

## Tschernobyl – Zehn Jahre danach

Der Unfall und die  
Sicherheit der  
RBMK-Anlagen





**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

**Der Unfall  
und die Sicherheit  
der RBMK-Anlagen**

Februar 1996

## Die GRS in Osteuropa

Der Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl hat in dramatischer Weise die Notwendigkeit internationaler Zusammenarbeit in der Reaktorsicherheit aufgezeigt. Unter diesem Eindruck hat die GRS Ende der 80er Jahre mit osteuropäischen Fachorganisationen erste Kontakte geknüpft. Im Rahmen von Aufträgen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, der Europäischen Union und anderer internationaler Organisationen entwickelten sich diese im Laufe der Jahre zu einer intensiven Zusammenarbeit. Gemeinsam mit ihrer französischen Partnerorganisation, dem Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, hat die GRS in Moskau und Kiew technische Büros geschaffen und mit moderner Telekommunikation ausgerüstet, um die Zusammenarbeit mit diesen Ländern effektiver zu gestalten.

Fachlich hat die Tätigkeit der GRS in Osteuropa drei Schwerpunkte:

- **Zusammenarbeit in der Reaktorsicherheitsforschung**

Ein Informationsaustausch mit dem Kurchatov-Institut in Moskau stand am Anfang der immer enger werdenden technisch-wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit Rußland und anderen osteuropäischen Ländern. Es wurden z.B. Möglichkeiten für einen Einsatz deutscher Computercodes zur Simulation von Störfällen in sowjetischen Reaktoren geschaffen und eine gemeinsame Weiterentwicklung solcher Werkzeuge in Angriff genommen. Die bei diesen gemeinsamen Arbeiten gewonnenen Kenntnisse sind gleichzeitig Grundlage für Sicherheitsbewertungen osteuropäischer Kernkraftwerke und den Aufbau eines gemeinsamen Verständnisses wesentlicher Sicherheitsfragen.

- **Unterstützung osteuropäischer Sicherheitsbehörden**

Unabhängige, kompetente und durchsetzungsfähige Sicherheitsbehörden sind von grundlegender Bedeutung für die Reaktorsicherheit in den osteuropäischen Ländern. Die GRS unterstützt Aufbau und Stärkung dieser Behörden und ihre technischen Sachverständigenorganisationen in vielfältiger Weise, z.B. durch Transfer von Know-how, technische Hilfe beim Aufbau der Infrastruktur und Vermittlung westlicher Vorgehensweisen im Rahmen gemeinsamer Sicherheitsanalysen.

- **Planung und Durchführung technischer Verbesserungen**

Die GRS beteiligt sich direkt an der Planung und Durchführung konkreter sicherheitserhöhender Maßnahmen in kerntechnischen Anlagen. Sie koordiniert Unterstützungsprojekte zur Lieferung sicherheitstechnischer Ausrüstungen und Geräte, arbeitet in Pilotprojekten an der Verbesserung der Anlagen- und Betriebsdokumentation mit und hilft bei der Erstellung und Qualitätskontrolle von Sicherheitsberichten.

## **Impressum**

Der Bericht gibt die Meinung der GRS wieder und beruht auf Erkenntnissen, die im Zusammenhang mit Untersuchungen für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, der Europäischen Union und der Europäischen Bank für Wiederaufbau und Entwicklung (London) gewonnen wurden.

**Herausgeber:** Gesellschaft für Anlagen- und  
Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Schwertnergasse 1  
50667 Köln

**Copyright:** Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der  
GRS gestattet.

## INHALT

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>1 Der Reaktortyp RBMK und der Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl</b>	<b>4</b>
1.1 Kernkraftwerk Tschernobyl	4
1.2 Kernkraftwerke vom Typ RBMK in der Ukraine, Rußland und Litauen	10
1.3 Anlagenbeschreibung	13
1.3.1 Reaktorgebäude	13
1.3.2 Reaktorkern	17
1.3.3 Reaktorbehälter	18
1.3.4 Druckrohr mit Brennelement	18
1.3.5 Wasser/Dampfkreislauf	21
1.4 Grundzüge der Sicherheit des RBMK	23
1.4.1 Grundbegriffe der Reaktorphysik	23
1.4.2 Sicherheitskonzept	26
1.4.3 Reaktorphysikalische Eigenschaften des RBMK	27
1.4.4 Sicherheitseinrichtungen der RBMK	29
1.5 Situation in Block 2 des Kernkraftwerks Tschernobyl	37
<b>2 Entstehung und Ursachen des Unfalls</b>	<b>39</b>
2.1 Versuchsprogramm	39
2.2 Ablauf und Diskussion der Ereignisse bis zur Zerstörung des Reaktors	40
2.3 Diskussion der Unfallursachen	43
2.3.1 Defizite der Kernauslegung	43
2.3.2 Ungeeignetes Abschaltssystem	45
2.3.3 Unzureichende Wahrnehmung der Verantwortung für die Reaktorsicherheit	45
2.3.4 Mängel im Versuchsprogramm	46

2.3.5	Verhalten des Personals	48
2.4	Zusammenfassende Beurteilung der Unfallursachen	51
<b>3</b>	<b>Zerstörung des Reaktors und Kontamination durch radioaktive Stoffe</b>	<b>52</b>
3.1	Zerstörung der Reaktoranlage	52
3.2	Zeitlicher Verlauf der Freisetzung	54
3.3	Ausbreitung der freigesetzten radioaktiven Stoffe	59
3.4	Radioaktive Kontamination und Strahlungssituation am Unfallort	62
3.5	Radiologische Situation in der 30-km-Zone	64
3.6	Großflächige Kontamination in der Ukraine, in Weißrußland und Rußland	65
<b>4</b>	<b>Sarkophag</b>	<b>71</b>
4.1	Errichtung des Sarkophags	71
4.2	Kernbrennstoff im Sarkophag	74
4.3	Strahlungssituation im Inneren des Sarkophags	77
4.4	Standesicherheit des Sarkophags	78
<b>5</b>	<b>Schutz und Versorgung der Bevölkerung</b>	<b>83</b>
5.1	Evakuierung der betroffenen Bevölkerung	83
5.2	Medizinische Versorgung	88
5.3	Nahrungsmittelversorgung	89
5.4	Wirtschaftliche Auswirkungen	90
<b>6</b>	<b>Gesundheitliche und ökologische Auswirkungen des Unfalls</b>	<b>91</b>
6.1	Gesundheitliche Auswirkungen durch die Unfallbekämpfung	92
6.2	Gesundheitliche Auswirkungen für die Bevölkerung	94
6.3	Gesundheitliche Auswirkungen in Deutschland	98
6.4	Ökologische Auswirkungen	98
<b>7</b>	<b>Sicherheit der RBMK-Anlagen</b>	<b>100</b>
7.1	Reaktivitätskontrolle	100
7.1.1	Positiver Voideffekt	101
7.1.2	Positiver Abschalteffekt	105

7.1.3	Reaktivitätszufuhr bei Kühlmittelverlust im Steuerstabskühlsystem	106
7.1.4	Regel- und Abschaltssystem	107
7.1.5	Verbesserungen im Reaktorschutzsystem	109
7.1.6	Kernüberwachung	110
7.1.7	Zusammenfassende Bewertung der Reaktivitätskontrolle	112
7.2	Kernkühlung	113
7.2.1	Kühlmittelblockaden bei den Druckrohren	113
7.2.2	Notspeisewassersystem	113
7.2.3	Notkühlsystem	115
7.2.4	Technisch-Wasser-System	116
7.2.5	Zusammenfassende Bewertung der Kernkühlung	116
7.3	Aktivitätseinschluß	117
7.3.1	Sicherheitseinschluß	117
7.3.2	Druckabsicherung des Reaktorbehälters	118
7.4	Übergreifende Auslegungsanforderungen	119
7.4.1	Elektro- und Leittechnik	119
7.4.2	Brandschutz	123
7.4.3	Einwirkungen von außen, insbesondere Erdbeben	123
7.5	Störfallanalysen	124
7.6	Betriebsführung	125
7.6.1	Management und Verantwortlichkeit	126
7.6.2	Betriebsvorschriften	127
7.6.3	Erfahrungsrückfluß	127
7.6.4	Dokumentation	127
7.6.5	Instandhaltung	128
7.6.6	Training und Schulung	128
7.6.7	Zusammenfassende Bewertung der Betriebsführung	129
<b>8</b>	<b>Erforderliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Funktion des Sarkophags</b>	<b>130</b>
<b>9</b>	<b>Zukünftige Strahlenschutzmaßnahmen</b>	<b>132</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Schlußfolgerungen</b>	<b>134</b>
10.1	Ursachen des Unfalls	134

10.2	Sicherheit der RBMK-Anlagen	135
10.2.1	Kernauslegung	135
10.2.2	Abschaltsysteme	135
10.2.3	Sicherheitseinrichtungen	136
10.2.4	Reaktorbehälter	137
10.2.5	Störfallanalysen	138
10.2.6	Betriebsführung	138
10.3	Sicherheit der Blöcke 1, 2 und 3 in Tschernobyl	139
10.4	Weiterbetrieb von RBMK-Anlagen	139
10.5	Sicherheit des Sarkophags	141
10.6	Kontamination und radioaktive Abfälle am Standort	142
10.7	Radiologische Situation in den betroffenen Gebieten	142
10.8	Gesundheitliche Folgen des Unfalls	143
10.9	Konsequenzen des Unfalls für die Reaktorsicherheit in Deutschland	145
10.10	Konsequenzen des Reaktorunfalls in Tschernobyl für die Strahlenschutzvorsorge in Deutschland	146
<b>11</b>	<b>Glossar</b>	<b>148</b>
<b>12</b>	<b>Literatur zu Tschernobyl</b>	<b>157</b>
<b>Anhang</b>	<b>Chronologischer Ereignisablauf des Reaktorunfalls am 26. April 1986 im Kernkraftwerk Tschernobyl</b>	<b>164</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AR	Globale automatische Leistungsregelung
ATHLET	Analyse der Thermohydraulik von Lecks und Transienten (von der GRS entwickelter Thermohydraulikcode)
BE	Brennelement
BIPR 8	Name des Neutronenkinetikprogramms in Rußland
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMBF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
Bq	Becquerel
Ci	Curie
DBA	Design Basis Accident
DREG	Prozeßrechner für RBMK
EU	Europäische Union
GBsB	Grenzwerte und Bedingungen des sicheren Betriebs
Gy	Gray
He	Helium (Edelgas)
HKP	Hauptkühlmittelpumpe
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IPHECA	International Programme of the Health Effects of the Chernobyl Accident
IPSN	Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire
LAR	Lokale automatische Leistungsregelung
$k_{\text{eff}}$	effektiver Multiplikationsfaktor
MPa	Megapascal
MW	Megawatt
MWd/t	Megawattage pro Tonne Brennstoff
MWd/kg	Megawattage pro Kilogramm Brennstoff
N <sub>2</sub>	Stickstoff
Nb	Niob
NW	Nennweite [mm]

ORM	operational reactivity margin
RBMK	Graphitmoderierter Siedewasser-Druckröhrenreaktor
Sv	Sievert
WHO	World Health Organization
WWER	Russischer Druckwasserreaktortyp
Zirkaloy	Zirkoniumlegierung
Zr	Zirkonium

## Abbildungsverzeichnis

- Bild 1-1** Das Kernkraftwerk Tschernobyl vor dem Unfall im Jahre 1986 (hinter dem Kamin links befindet sich der später zerstörte Block 4)
- Bild 1-2** Die geographische Lage des Kernkraftwerks Tschernobyl
- Bild 1-3** Lageplan des Kernkraftwerks Tschernobyl (4x1000 MW RBMK)
- Bild 1-4** Schematische Skizzen vor und nach dem Unfall von Block 4 in Tschernobyl
- Bild 1-5** Kontroll- (30 km) und Sperrzone (10 km) um das Kernkraftwerk Tschernobyl; rund 50 km östlich die neue Stadt Slavutitsch, in der heute die Mitarbeiter des Kernkraftwerks Tschernobyl leben
- Bild 1-6** Standorte der Kernkraftwerke vom Typ RBMK in der Ukraine, in Rußland und Litauen
- Bild 1-7** Perspektivischer Querschnitt durch das Reaktorgebäude (Tschernobyl-4)
- Bild 1-8** Verschiedene Schnitte durch das Kernkraftwerk Tschernobyl: oben Block 4 mit dem Maschinenhaus, unten die Blöcke 3 und 4 mit dem Hilfsanlagengebäude
- Bild 1-9** Querschnitt durch den Reaktor
- Bild 1-10** Druckrohr mit Brennelement
- Bild 1-11** Brennelement
- Bild 1-12** Schematische Darstellung der Graphitringe um ein Druckrohr (die Temperaturangaben gelten für den Normalbetrieb)
- Bild 1-13** Vereinfachte Darstellung des Wasser/Dampfkreislaufs
- Bild 1-14** Blockwarte im Kernkraftwerk Tschernobyl
- Bild 1-15** Schematische Darstellung des Kernspaltprozesses
- Bild 1-16** Strahlungsmessung am Reaktordeckel
- Bild 1-17** Ursprüngliche Auslegung des Regel- und Abschaltsystems von RBMK-Anlagen
- Bild 1-18** Schematische Darstellung des Notkühlsystems von RBMK-Anlagen der 1. Generation (Tschernobyl Block 1 und 2)
- Bild 1-19** Schematische Darstellung des Notkühlsystems von RBMK-Anlagen der 2. Generation (Tschernobyl Block 3 und 4)

- Bild 1-20** Schematische Darstellung des partiellen Sicherheitseinschlusses bei RBMK-Anlagen der 2. Generation (Tschernobyl-4)
- Bild 1-21** Der Brand im Maschinenhaus von Block 2 in Tschernobyl verursachte erhebliche Schäden
- Bild 2-1** Vereinfachter Verlauf der Reaktorleistung vor dem Unfall
- Bild 2-2** Reaktivitätstransienten bei 7% thermischer Leistung eines RBMK-1000
- Bild 3-1** Ausmaß der Zerstörung von Block 4 in Tschernobyl
- Bild 3-2** Blick durch das zerstörte Dach in die Reaktorhalle. Die obere Kernplatte des Reaktors (Gewicht: ca. 3 000 t) wurde durch die Explosion aufgerichtet und steht nunmehr in einem Winkel von 15° zur Senkrechten.
- Bild 3-3** Untere tragende Strukturen des Reaktorbehälters ("Struktur OR"), die sich um ca. 4 m abgesenkt haben
- Bild 3-4** Menge der freigesetzten radioaktiven Stoffe in den ersten zehn Tagen (mit Unsicherheitsbereichen)
- Bild 3-5** Hauptausbreitungsrichtungen vom 27. April bis 2. Mai 1986
- Bild 3-6** Hauptausbreitungsrichtungen vom 1. Mai bis 10. Mai 1986
- Bild 3-7** Kartogramm der Ortsdosisleistung von Cäsium 137 in einem Meter Höhe über Grund
- Bild 3-8** Messung der radioaktiven Strahlung am Kraftwerkstandort vom Hubschrauber aus
- Bild 3-9** Kontaminationen durch Cäsium 137 in der Ukraine, in Weißrußland und Rußland
- Bild 3-10** Kontaminationen durch Strontium 90 in der weiteren Umgebung von Tschernobyl
- Bild 3-11** Kontaminationen durch Plutonium 239 und 240 in der weiteren Umgebung von Tschernobyl
- Bild 4-1** Schematische Darstellung des Sarkophags, der von Mai bis Oktober 1986 errichtet wurde
- Bild 4-2** Blick auf die im Bau befindliche "Kaskadenwand" und die Westwand, vor der später die Stahlhohlwand errichtet wurde
- Bild 4-3** Zerstörter Block 4: Während der Konstruktionsphase des Sarkophags
- Bild 4-4** Stahlträger "Mamont" auf der Südseite des zerstörten Blocks, der sich auf Behelfsfundamente abstützt

- Bild 4-5** Arbeitsbesprechung beim im Bau schon weit fortgeschrittenen Sarkophag; rechts die Stahlhohlwand mit Strebepfeilern
- Bild 4-6** Horizontale Verteilung des geschmolzenen Kernbrennstoffs (Lava) im Inneren des Sarkophags
- Bild 4-7** Aus Kernschmelze und Sand gebildeter "Elefantenfuß" mit einem Durchmesser von rund 2 m
- Bild 4-8** Prozentuale Raumteile der Ortsdosisleistung im Sarkophag
- Bild 4-9** Im Inneren des Sarkophags: links sind die aus ihrer Lage verdrehten Stützpfeiler sichtbar. Rechts ist die südliche Außenhülle des Sarkophags erkennbar.
- Bild 4-10** Der Sarkophag kurz vor der Vollendung
- Bild 4-11** Der fertiggestellte Sarkophag
- Bild 5-1** Dieser Gebäudekomplex wurde nach dem Unfall errichtet und war Sitz der Regierungskommission in Tschernobyl.
- Bild 5-2** Evakuierung der Bevölkerung aus der 10-km-Sperrzone am 27. April 1986
- Bild 5-3** Die evakuierte Stadt Pripjat (im Hintergrund das Kernkraftwerk Tschernobyl)
- Bild 5-4** Blick in die neuerbaute Stadt Slavutitsch
- Bild 5-5** Einfahrt in die 30-km-Kontrollzone
- Bild 5-6** Blick auf die verlassenene Stadt Pripjat
- Bild 5-7** Getreidepflanzen werden auf radioaktive Kontamination untersucht
- Bild 6-1** Versprühen von Dekontaminationsmitteln per Hubschrauber
- Bild 6-2** Liquidatoren während der Errichtung des Sarkophags
- Bild 6-3** Kiewer Institut für Strahlenmedizin: Dieser Ingenieur war zur Zeit der Reaktorexlosion in der Maschinenhalle und erlitt schwere Strahlenschäden. Er muß sich immer wieder stationär behandeln lassen
- Bild 6-4** An der Schilddrüse operierte weißrussische Kinder, die in der Klinik des Instituts für Strahlenmedizin in Aksakovtchina nachbehandelt werden
- Bild 6-45** Auftreten von Schilddrüsenkrebs bei Kindern in der Ukraine, in Weißrußland und Rußland in den Jahren 1986 bis 1995 (Wert für 1995 nach ukrainischen Angaben)
- Bild 7-1** Voidreaktivität in Abhängigkeit von der Anzahl der zusätzlichen Absorber
- Bild 7-2** Abhängigkeit des Voidkoeffizienten vom Abbrand und der Anfangsanreicherung ohne Berücksichtigung von Absorbern im Kern

- Bild 7-3** Veränderungen der Steuerstabfunktion beim RBMK, um den positiven Abschalteffekt zu verhindern
- Bild 7-4** Reaktivitätswirksamkeit des Abschaltsystems in RBMK-Anlagen als Funktion der Zeit
- Bild 7-5** Regel- und Schutzsystem der Anlage Tschernobyl-3 (12-Zonen-System)
- Bild 7-6** Notkühlsystem der 1. Generation mit Nachrüstungen (Block 1 und 2 des Kernkraftwerks Leningrad)
- Bild 7-7** Untersysteme der Notkühlung der Anlage Smolensk-3
- Bild 7-8** Vereinfachtes Schema des Druckabsicherungssystems des Reaktorbehälters
- Bild 7-9** Oktober 1991: Der Brand im Turbinenhaus verursachte erhebliche Schäden
- Bild 7-10** Prinzipschaltbild der Eigenbedarfs- und Notstromversorgung der Anlage Tschernobyl-4
- Bild 7-11** Batterieanlagen der Notstromversorgung (Beispiel: RBMK-1500 in Ignalina, Litauen)
- Bild 7-12** Blick in die Reaktorhalle einer RBMK-Anlage
- Bild 10-1** Das Kernkraftwerk Tschernobyl mit dem Kühlwasserreservoir im Vordergrund
- Bild 10-2** Der Sarkophag
- Bild 10-3** Verlassenes ukrainisches Bauernhaus
- Bild 10-4** Das Kernkraftwerk in Tschernobyl von Osten. Block 4 befindet sich links hinten

## Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1-1** Prozentualer Anteil der Kernenergie an der Stromversorgung in der Ukraine, in Rußland und Litauen
- Tabelle 1-2** Liste der Kernkraftwerke vom Typ RBMK
- Tabelle 1-3** Technische Daten der RBMK-1000 in Tschernobyl (Mitte der 80er Jahre)
- Tabelle 1-4** Kenndaten eines Brennstabes
- Tabelle 1-5** Sicherheitseinrichtungen der Kernkraftwerke mit RBMK
- Tabelle 3-1** Ereignisse nach Unfallbeginn
- Tabelle 3-2** Freisetzungsrates der wichtigsten Radionuklide
- Tabelle 5-1** Einteilung der Zonen für Evakuierung und Kontrollmaßnahmen
- Tabelle 6-1** Schilddrüsenkrebs bei Kindern bis zu 14 Jahren nach Angaben der WHO 1995
- Tabelle 7-1** Aktuelle Werte für den Voideffekt und den Leistungskoeffizienten der RBMK-Anlagen (nach russischen Angaben)
- Tabelle 7-2** Reaktivitätsänderung durch Entleeren des Steuerstabkühlkreislaufs in Abhängigkeit von der Anzahl der ausgefahrenen Steuerstäbe
- Tabelle 7-3** Handmaßnahmen des Operators zur Stabilisierung der räumlichen Leistungsdichteverteilung

## Einführung

Der Unfall am 26. April 1986 im ukrainischen Kernkraftwerk Tschernobyl hat für viele Menschen großes Leid gebracht. Über weite Entfernungen hinweg sind unmittelbare Schäden und Folgelasten für Menschen, Umwelt und Wirtschaft entstanden. Die Sowjetunion und später ebenso ihre Nachfolgestaaten Rußland, die Ukraine und Weißrußland haben große Anstrengungen unternommen, die schlimmsten Unfallfolgen einzudämmen.

Die Ukraine, Rußland und Litauen, die Länder, die noch RBMK-Kernkraftwerke betreiben, haben inzwischen einiges zur Verbesserung der Sicherheit dieser Kernkraftwerke getan. Westliche Länder helfen im Rahmen bilateraler und internationaler Unterstützungsprogramme.

Trotz aller Anstrengungen sind jedoch die Unfallfolgen noch lange nicht bewältigt und die Defizite in der Reaktorsicherheit nur teilweise behoben. Die Gründe dafür liegen nicht nur im Ausmaß der Probleme, sondern vor allem in der prekären ökonomischen Situation der vom Unfall besonders betroffenen Staaten Ukraine, Rußland und Weißrußland.

So bleibt auch im zehnten Jahr nach dem Unfall noch viel zu tun. Die langfristige Sanierung des Standorts Tschernobyl muß angegangen werden. Die betroffene Bevölkerung der Ukraine, Rußlands und Weißrußlands benötigt nach wie vor dringend Hilfe. Die radioökologischen und gesundheitlichen Folgen müssen systematischer als bisher erfaßt werden, um gezielter helfen zu können. Die Sicherheit aller Reaktoren sowjetischer Bauart ist weiter zu verbessern, zumal mit einer kurzfristigen, vorzeitigen Stilllegung selbst bei älteren Anlagen kaum zu rechnen ist.

Die Programme zur Lösung dieser Aufgaben müssen weiterentwickelt, die Kooperationsmechanismen verbessert und neue Finanzierungsquellen erschlossen werden. Dabei wird es notwendig sein, das seit dem Zerfall der Sowjetunion zunehmend zersplitterte Wissen über die mit Tschernobyl verbundenen Fragen wieder zusammenzuführen und weiterzuentwickeln. Tschernobyl bleibt damit eine Herausforderung für kooperatives Denken und Handeln auf den Gebieten der Reaktorsicherheit, der Entsorgung sowie des Umwelt- und Strahlenschutzes.

In dem Jahrzehnt seit dem Unfall wurde eine Vielzahl von Untersuchungen und Forschungen durchgeführt, die das Verständnis der komplexen mit Tschernobyl zusammenhängenden Fragen erheblich verbessert haben. Die GRS war im Rahmen von Vorhaben des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), des Bundesministers für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und der Kommission der Europäischen Union an vielen dieser Arbeiten beteiligt. Die GRS hat dabei - zusammen mit ihren ausländischen Partnerorganisationen - wesentliche Sicherheitsfragen bewertet und konkrete Verbesserungsvorschläge gemacht.

Mit diesem Bericht macht die GRS die bei diesen Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich. Sie will so dazu beitragen, daß in den betroffenen Staaten die Maßnahmen zur Bewältigung der Unfallfolgen und zur Verbesserung der Reaktorsicherheit problem- und sachgerecht durchgeführt werden.

Es geht dabei zunächst um Fragen der Sicherheit der noch in Betrieb befindlichen Reaktorblöcke am Standort Tschernobyl sowie anderer Kernkraftwerke dieses Typs:

- Sind Ursachen und Verlauf des Reaktorunfalls ausreichend bekannt? Sind ausreichende Maßnahmen gegen eine Wiederholung eines derartigen Unfalls getroffen worden?
- Wie sind die Risiken und Sicherheitseigenschaften dieser Reaktoren zu bewerten? Sind die notwendigen Maßnahmen gegen Stör- und Unfälle abgeleitet worden?
- Wie ist der weitere Betrieb der Kernkraftwerke dieses Typs zu beurteilen?

Weiterhin geht es um Fragen des Strahlenschutzes, der gesundheitlichen Auswirkungen und der Entsorgung am Standort Tschernobyl:

- Welche Gefahren gehen vom Sarkophag aus?
- Welche Gefahren gehen von den auf dem Kraftwerksgelände vorhandenen Kontaminationen und radioaktiven Abfällen aus?
- Wie sind die Strahlenbelastungen und gesundheitlichen Auswirkungen bei den vom Unfall betroffenen Menschen einzuschätzen? Müssen bzw. können zusätzliche Vorsorgemaßnahmen getroffen werden?

Schließlich geht es um die Bedeutung dieses Unfalls für Sicherheit und Strahlenschutz in Deutschland:

- Welche Konsequenzen hat der Reaktorunfall in Tschernobyl für die Sicherheitsbeurteilung deutscher Kernkraftwerke?

- Welche Konsequenzen sind aus dem Reaktorunfall in Tschernobyl für die Strahlenschutzvorsorge in Deutschland zu ziehen?

Die Darstellung gliedert sich in drei Schwerpunkte:

- Kapitel 1 gibt eine Übersicht über die Situation am Standort in Tschernobyl sowie über Funktionsweise und Sicherheitseigenschaften der dort betriebenen Reaktoren.
- In den Kapiteln 2 bis 6 werden Ursachen und Ablauf des Reaktorunfalls sowie die Auswirkungen auf das Kernkraftwerk Tschernobyl, seine Umgebung und die Gesundheit der betroffenen Menschen beschrieben.
- In den Kapiteln 7 bis 9 werden die Sicherheitsprobleme der Reaktoren vom Tschernobyl-Typ, die durchgeführten sicherheitstechnischen Verbesserungen sowie die noch erforderlichen Sanierungsmaßnahmen am Standort und die künftigen Strahlenschutzaufgaben dargestellt und bewertet.

Die Kernaussagen und die Schlußfolgerungen sind in Kapitel 10 zusammengefaßt. Ein Glossar (Kapitel 11) erläutert wichtige Fachbegriffe. Die verwendete und weiterführende Literatur enthält Kapitel 12.

Die GRS stützt sich in diesem Bericht auf die umfangreichen Arbeiten und Informationen ost- und westeuropäischer Fachleute sowie auf eigene Forschungsergebnisse. Sie dankt insbesondere den russischen Fachleuten für ihre offenen Diskussionen und die Informationen, die sie zur Verfügung gestellt haben.

Dieser Bericht erscheint auch in russischer, französischer und englischer Sprache.

Köln, Garching und Berlin im März 1996

# 1 Der Reaktortyp RBMK und der Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl

## 1.1 Kernkraftwerk Tschernobyl

Der Bau des Kernkraftwerks Tschernobyl geht auf Entscheidungen der UdSSR aus dem Jahre 1966 zurück. Kernenergie sollte verstärkt zur Stromversorgung beitragen. Kurzfristig sollten mehrere Kernkraftwerke mit einer elektrischen Gesamtleistung von 12 000 MW errichtet werden, davon acht Anlagen vom Typ RBMK-1000. Dieser Reaktortyp wurde Mitte der 60er Jahre entwickelt. Dabei konnte man auf die Erfahrungen, die man mit den ersten sowjetischen Kernkraftwerken Obninsk und Bjelojarsk gesammelt hatte, zurückgreifen.

Mit der Entwicklung der RBMK-Anlagen verfolgte man das Ziel, in einem relativ kurzen Zeitraum mit bekannten und bewährten Komponenten und Systemen, d.h. ohne größere Investitionen in die Entwicklung neuer Technologien oder in den Aufbau neuer Fertigungsindustrien, eine bedeutende Anzahl großer Leistungsreaktoren (1 000, 1 500,



**Bild 1-1** Das Kernkraftwerk Tschernobyl vor dem Unfall im Jahre 1986  
(hinter dem Kamin links befindet sich der später zerstörte Block 4)

2 400 MW) zu errichten. Beim RBMK handelt es sich um einen graphitmoderierten Siedewasser-Druckröhrenreaktor. Anstelle eines Druckbehälters wurde eine große Anzahl von Druckrohren (sogenannte "Technologische Kanäle") verwendet, in denen sich der Kernbrennstoff befindet. Als besondere Vorzüge dieses Reaktortyps wurden von sowjetischer Seite gesehen:

- hohe Zuverlässigkeit durch jederzeitige Kontrolle jedes einzelnen Druckrohres
- einfache Möglichkeit, die Gesamtleistung des Kraftwerksblocks durch Hinzufügen baugleicher Konstruktionselemente, d.h. weiterer Druckrohre, zu erhöhen
- Möglichkeit, den Brennelementwechsel während des Betriebs durchzuführen.

Prototypen waren die Blöcke 1 und 2 des Kernkraftwerks in Leningrad<sup>1)</sup> (Leningrad-1 und -2). Die nächsten Anlagen waren die Blöcke 1 und 2 in Kursk sowie die Blöcke 1 und 2 in Tschernobyl.



**Bild 1-2** Die geographische Lage des Kernkraftwerks Tschernobyl

<sup>1)</sup> Das Kernkraftwerk Leningrad wird auch Kernkraftwerk Sosnovyi Bor genannt

Das Kernkraftwerk Tschernobyl liegt in der Ukraine in einem Waldgebiet (Polesje), unmittelbar am Ufer des Pripjats. Im Umkreis von ca. 400 km gab es erheblichen Bedarf an elektrischem Strom. Verkehrs- und Netzanbindungen waren günstig. Die Besiedlungsdichte und landwirtschaftliche Nutzung in der Umgebung waren gering.

Rund 110 km südlich liegt Kiew, die Hauptstadt der Ukraine, mit 2,6 Millionen Einwohnern. Die Stadt Tschernobyl, nach der das Kernkraftwerk benannt ist und 12 000 Einwohner zählt, liegt 12 km südöstlich. Für die Beschäftigten des Kraftwerks wurde 3 km vom Standort entfernt die Stadt Pripjat gebaut, wo zum Zeitpunkt des Unfalls 45 000 Einwohner lebten.

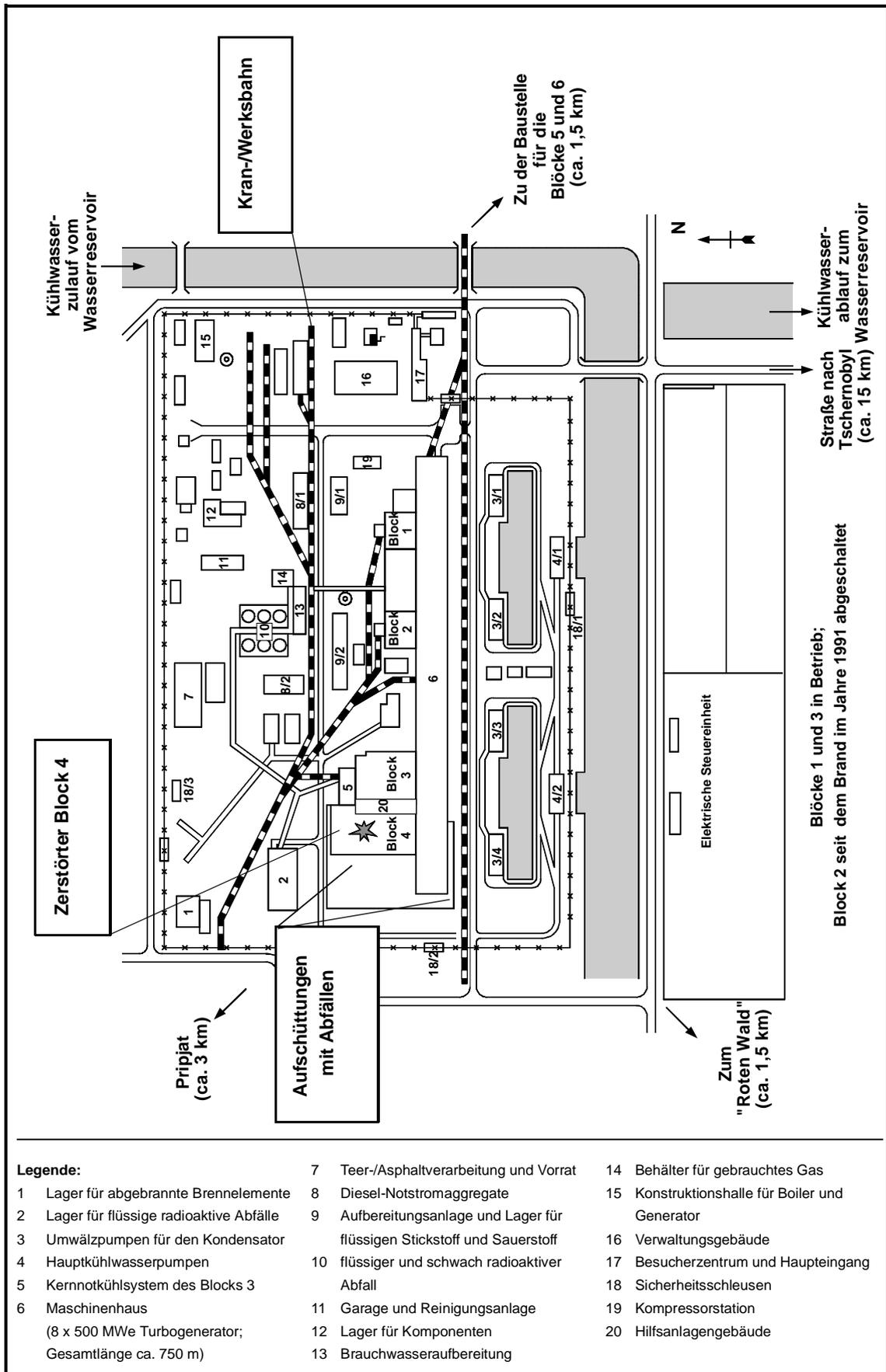
Insgesamt waren am Standort Tschernobyl sechs RBMK-Blöcke mit jeweils 1 000 MW vorgesehen. Der erste Block wurde im September 1977 in Betrieb genommen, der zweite Block im Dezember 1978.

Die Reaktorblöcke 3 und 4 gingen in den Jahren 1981 und 1983 in Betrieb. Bereits im Jahre 1981 wurde mit dem Bau zwei weiterer Reaktorblöcke 1,5 km südöstlich der Blöcke 1 bis 4 begonnen. Die Inbetriebnahme des fünften Blocks war für den Herbst 1986 vorgesehen. Nach dem Unfall wurde der Bau der beiden Blöcke eingestellt.

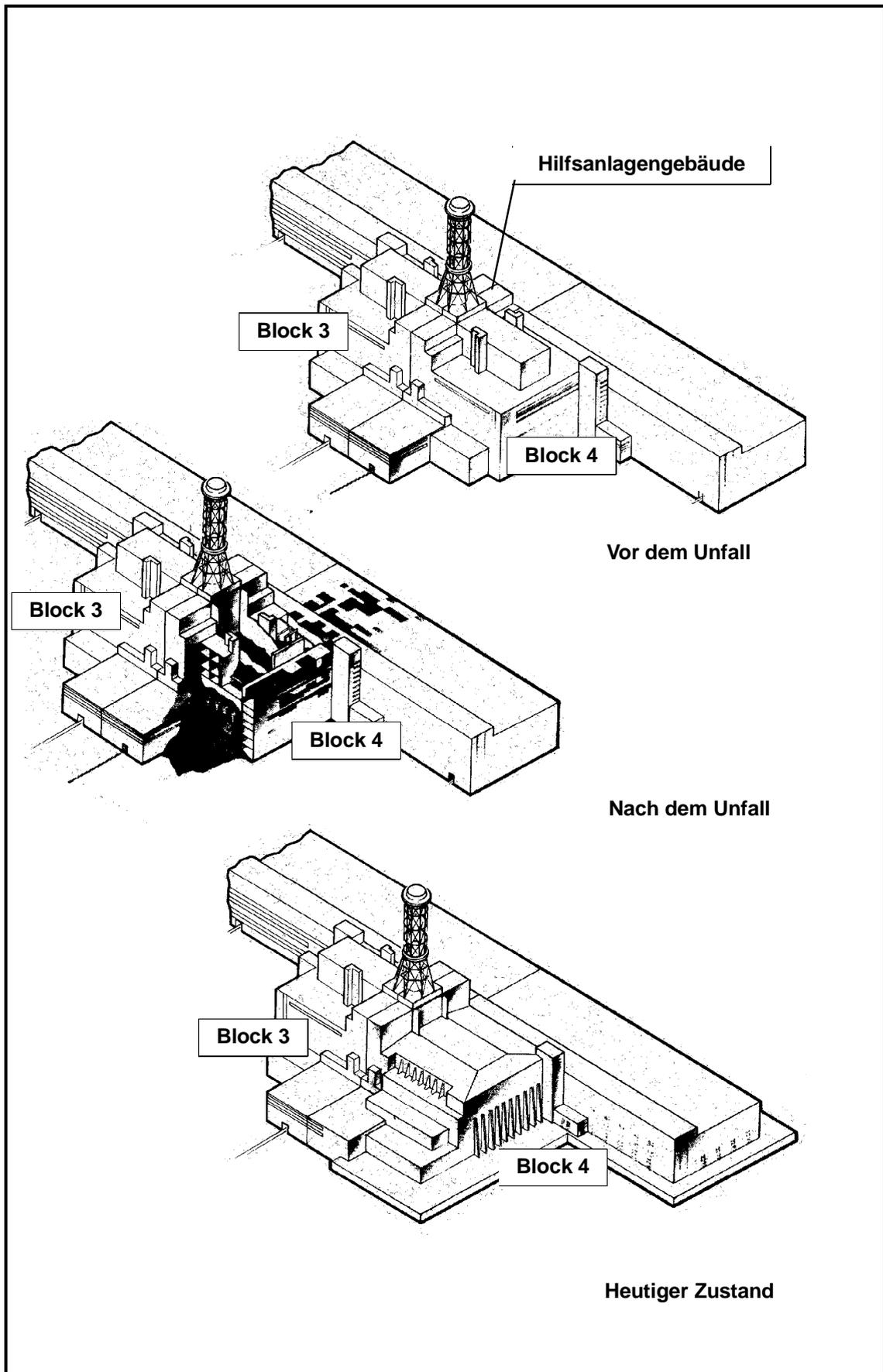
Zur Zeit sind die Blöcke 1 und 3 in Betrieb. In der Turbinenhalle des Blocks 2 brach im Oktober 1991 ein Feuer aus. Das Dach der Turbinenhalle stürzte infolge des Brandes teilweise ein. Der Block mußte abgeschaltet werden und wurde bis heute nicht wieder in Betrieb genommen. Vorarbeiten zur Wiederinbetriebnahme wurden durchgeführt.

Zum Zeitpunkt des Unfalls waren am Standort Tschernobyl vier Reaktorblöcke des Typs RBMK-1000 in Betrieb. Der Unfall ereignete sich im vierten Block, der am westlichen Ende der 4-Block-Anlage liegt. Nach dem Unfall wurde um den zerstörten Reaktorblock der sogenannte Sarkophag errichtet. Er soll die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung begrenzen und die im zerstörten Block befindlichen radioaktiven Stoffe für 30 Jahre - das wurde als Auslegungsziel genannt - sicher einschließen.

Am Kraftwerksstandort wurden umfangreiche Schadensbeseitigungs- und Dekontaminationsmaßnahmen durchgeführt, um die Blöcke 1 bis 3 weiterbetreiben zu können. Block 3 sowie die Blöcke 1 und 2 waren am 26.4. bzw. am 27.4.1986 abgeschaltet worden. Am 1.10.1986 wurde Block 1 wieder in Betrieb genommen, am 5.11.1986 Block 2 und am 3.12.1987 Block 3.

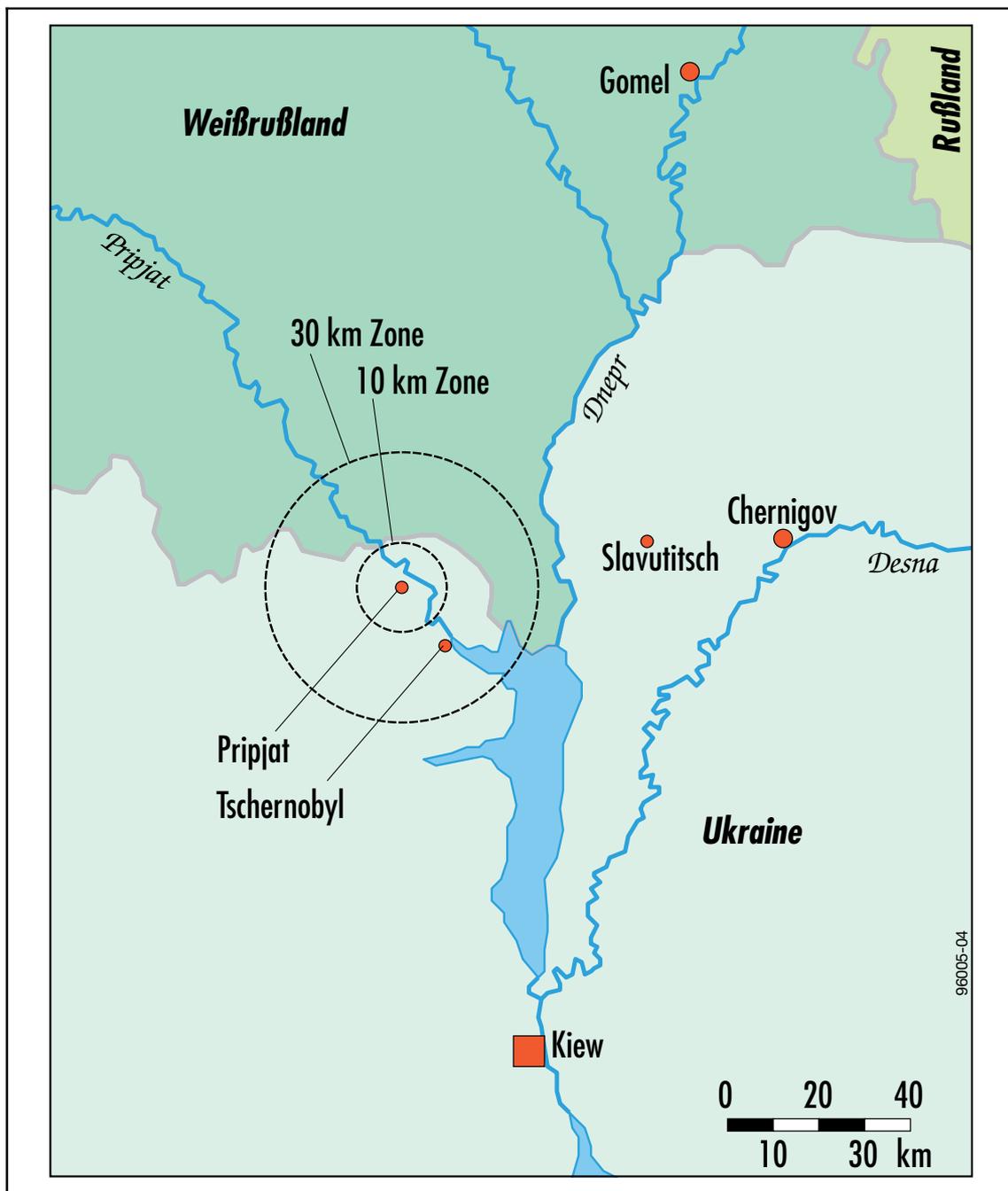


**Bild 1-3** Lageplan des Kernkraftwerks Tschernobyl (4x1 000 MW RBMK)



**Bild 1-4** Schematische Skizzen vor und nach dem Unfall von Block 4 in Tschernobyl

Die weitere Umgebung um das Kraftwerk wurde so stark radioaktiv kontaminiert, daß insbesondere die Städte Pripjat und Tschernobyl evakuiert werden mußten. Nach der Evakuierung wurde um das Kraftwerk eine ringförmige 30-km-Kontroll- bzw. 10-km-Sperrzone eingerichtet, die heute praktisch unbewohnt ist. Sie umfaßt eine Fläche von ca. 2 700 km<sup>2</sup>, zusammen mit Pripjat und Tschernobyl 76 Siedlungen.



**Bild 1-5** Kontroll- (30 km) und Sperrzone (10 km) um das Kernkraftwerk Tschernobyl; rund 50 km östlich die neue Stadt Slavutitsch, in der heute die Mitarbeiter des Kernkraftwerks Tschernobyl leben

Die Zone unterliegt einer besonderen Verwaltung. Wirtschaftliche oder wissenschaftliche Tätigkeiten beschränken sich auf den Betrieb des Kernkraftwerkes Tschernobyl, einschließlich des Sarkophags, und auf Maßnahmen zur Bewältigung der Folgen des Unfalls. Es arbeiten etwa 15 000 Personen, darunter 5 500 für den Betrieb des Kernkraftwerks. In der Zone sind etwa 120 verschiedene wissenschaftlich-technische Organisationen tätig, hauptsächlich in der Stadt Tschernobyl. Für die Mitarbeiter des Kernkraftwerks wurde nach der Evakuierung von Pripjat außerhalb der Zone die neue Stadt Slavutitsch aufgebaut.

Zum Kraftwerk gehört ein Lager für abgebrannte Brennelemente. In diesem werden sämtliche Brennelemente gelagert, die während der Betriebszeit aller Blöcke angefallen sind. Heute befinden sich in diesem Lager rund 14 000 abgebrannte Brennelemente. Seine Kapazität ist damit nahezu erschöpft. Eine Wiederaufarbeitung der RBMK-Brennelemente ist grundsätzlich nicht vorgesehen. Daher werden bei einem Weiterbetrieb der Blöcke neue Lager erforderlich. Auf dem Kraftwerksgelände lagern außerdem ca. 35 000 m<sup>3</sup> feste und 21 000 m<sup>3</sup> flüssige radioaktive Betriebsabfälle. Ein großes Problem stellen die provisorischen oberflächennahen Deponien (Abfallgräber) von radioaktiven Materialien und Abfällen dar, die vom Unfall im Block 4 stammen.

Das ukrainische Tschernobyl-Ministerium und die Nationale Akademie der Wissenschaften der Ukraine haben ein Konzept für die Zukunft der 30-km-Zone ausgearbeitet und dessen Umsetzung begonnen. Ziel ist es, die ökologischen, sozialen und ökonomischen Folgen des Unfalls zu minimieren sowie das Risiko weiterer Strahlenexpositionen zu senken.

## **1.2 Kernkraftwerke vom Typ RBMK in der Ukraine, in Rußland und Litauen**

Kernkraftwerke des Typs RBMK wurden nur auf dem Gebiet der ehemaligen Sowjetunion errichtet. Ihre Standorte liegen heute in Litauen, Rußland und der Ukraine. Insgesamt sind an fünf Kraftwerksstandorten 15 Reaktoren (Blöcke) dieses Typs in Betrieb. Der im Bau befindliche Block 5 in Kursk soll nach russischen Planungen fertiggestellt werden. Weitere im Bau befindliche Blöcke wurden aufgegeben.



**Bild 1-6** Standorte der Kernkraftwerke vom Typ RBMK in der Ukraine, in Rußland und Litauen

Kernenergie hat für die Stromversorgung Litauens, Rußlands und der Ukraine global oder regional nach wie vor eine große Bedeutung. Ein erheblicher Teil des nuklear erzeugten Stroms stammt aus RBMK-Anlagen: in der Ukraine sind es rund 17 %, in Rußland rund 50 % und in Litauen 100 %.

**Tabelle 1-1** Prozentualer Anteil der Kernenergie an der Stromversorgung in der Ukraine, in Rußland und Litauen

Land	Prozentualer Anteil der Kernenergie an der Stromversorgung			
	1991	1992	1993	1994
Ukraine	27,1	29,1	32,9	34,2
Rußland	11,4	11,8	12,7	11,4
Litauen	60	80	87,2	76,4

Versucht man, die RBMK-Anlagen einzelnen technischen Entwicklungsschritten zuzuordnen, so kann man von drei Anlagengenerationen mit unterschiedlicher sicherheitstechnischer Auslegung sprechen, wobei auch innerhalb der einzelnen Generationen noch deutliche Unterschiede bestehen. Die erste Generation, die in den 70er Jahren in Betrieb ging, ist unter anderem durch das vollständige Fehlen eines Sicherheitseinschlusses gekennzeichnet. Reaktoren der zweiten und dritten Generation - sie gingen seit den frühen 80er Jahren in Betrieb - besitzen dagegen ein "Störfall-Lokalisierungssystem", das Teile des Reaktorsystems umfaßt und - wie ein Sicherheitseinschluß - bei Leckagen oder Rohrleitungsbrüchen Dampf und radioaktive Stoffe von der Umwelt zurückhalten soll.

**Tabelle 1-2** Liste der Kernkraftwerke vom Typ RBMK

Land	Standort	Block	Elektrische Leistung [MW]	Generation	Status	Betriebsbeginn
Litauen	Ignalina	1	1 500	2	in Betrieb	1983
Litauen	Ignalina	2	1 500	2	in Betrieb	1986
Rußland	Leningrad	1	1 000	1	in Betrieb	1973
Rußland	Leningrad	2	1 000	1	in Betrieb	1975
Rußland	Leningrad	3	1 000	2	in Betrieb	1980
Rußland	Leningrad	4	1 000	2	in Betrieb	1981
Rußland	Kursk	1	1 000	1	in Betrieb	1976
Rußland	Kursk	2	1 000	1	in Betrieb	1978
Rußland	Kursk	3	1 000	2	in Betrieb	1983
Rußland	Kursk	4	1 000	2	in Betrieb	1985
Rußland	Kursk	5	1 000	3	in Bau	-
Rußland	Smolensk	1	1 000	2	in Betrieb	1982
Rußland	Smolensk	2	1 000	2	in Betrieb	1985
Rußland	Smolensk	3	1 000	3	in Betrieb	1990
Ukraine	Tschernobyl	1	1 000	1	in Betrieb	1977
Ukraine	Tschernobyl	2	1 000	1	Brand 1991	1978
Ukraine	Tschernobyl	3	1 000	2	in Betrieb	1981
Ukraine	Tschernobyl	4	1 000	2	Unfall 1986	1983

Die RBMK-Anlagen wurden für eine Betriebszeit von 30 Jahren ausgelegt. Nach den Vorstellungen der Betreiberorganisationen sollen sie in den meisten Fällen auch über die volle Lebensdauer betrieben werden.

### **1.3 Anlagenbeschreibung**

Die Blöcke 3 und 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl wurden als Doppelblockanlage ausgeführt. Die beiden Reaktorgebäude bilden mit einem dazwischenliegenden, gemeinsamen Hilfsanlagengebäude einen Gebäudekomplex. Ein Zwischentrakt verbindet ihn mit dem Maschinenhaus (Turbinenhalle), wo für jeden Block zwei Turbosätze mit je 500 MW stehen. Das Maschinenhaus schließt unmittelbar an das der Blöcke 1 und 2 an, in dem sich weitere vier Turbosätze befinden. Die technischen Daten der RBMK-1000 in Tschernobyl sind in Tabelle 1-3 zusammengefaßt.

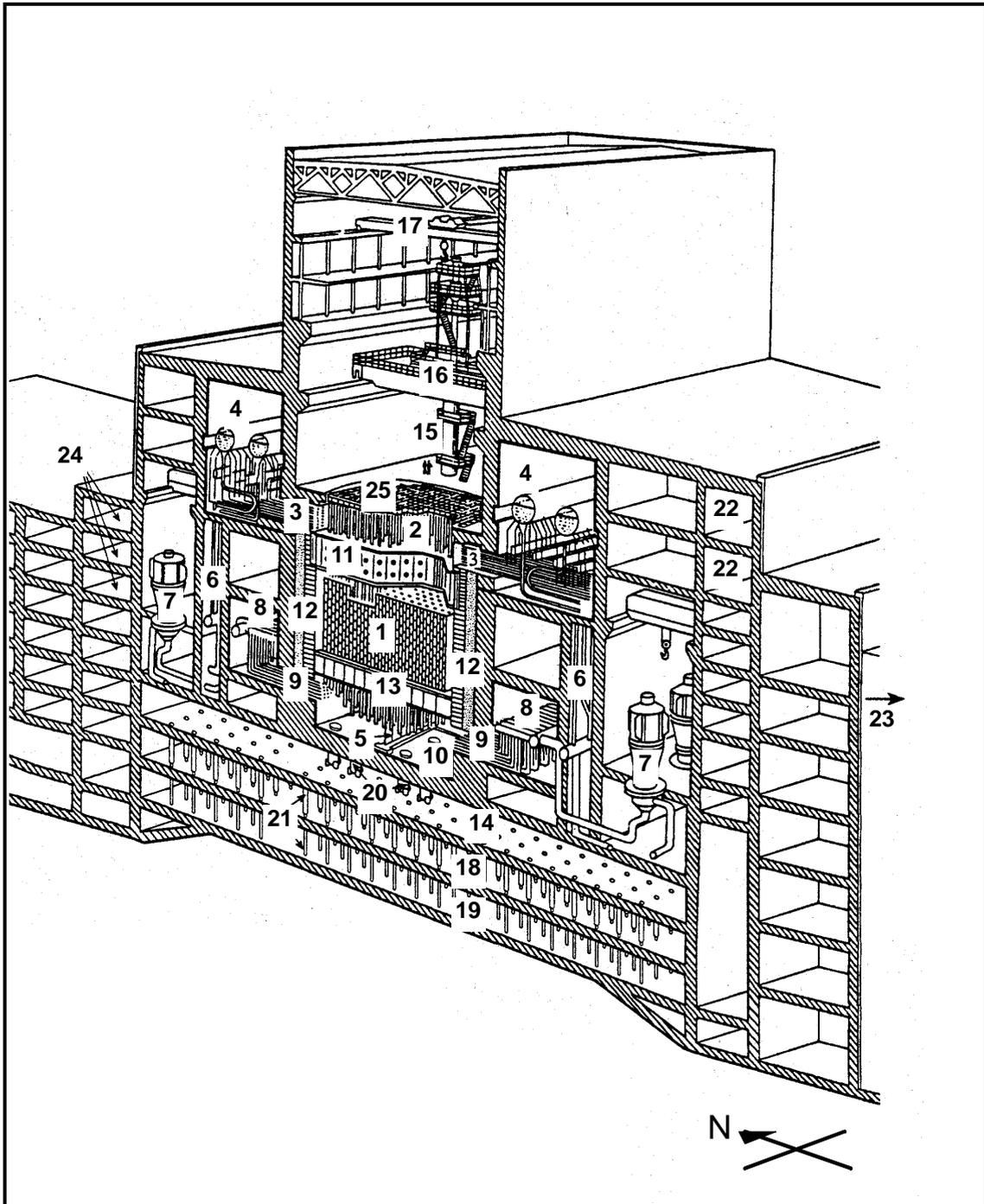
#### **1.3.1 Reaktorgebäude**

Im Reaktorgebäude (Bilder 1-7 und 1-8) befinden sich der Reaktor und die Komponenten des Reaktorkühlkreislaufrs sowie die zugehörigen Steuerungs- und Versorgungseinrichtungen.

In den beiden älteren Blöcken 1 und 2 gibt es keine druckfesten Räume zur Umschließung der Komponenten des Reaktorkühlkreislaufrs. Die beiden neueren Blöcke 3 und 4 haben Druckkammern, welche die unteren Bereiche des Reaktorkühlkreislaufrs umschließen. Zusammen mit den Kondensationseinrichtungen bilden diese Bereiche einen Sicherheitseinschluß, der bei Rohrbrüchen oder Leckagen Kühlmittel und radioaktive Stoffe zurückhält. Die übrigen Komponenten des Reaktorkühlkreislaufrs, insbesondere die Frischdampfleitung oberhalb des Reaktorkerns und die Dampfseparatoren, befinden sich jedoch nicht im Sicherheitseinschluß.

**Tabelle 1-3** Technische Daten der RBMK-1000 in Tschernobyl (Mitte 80er Jahre)

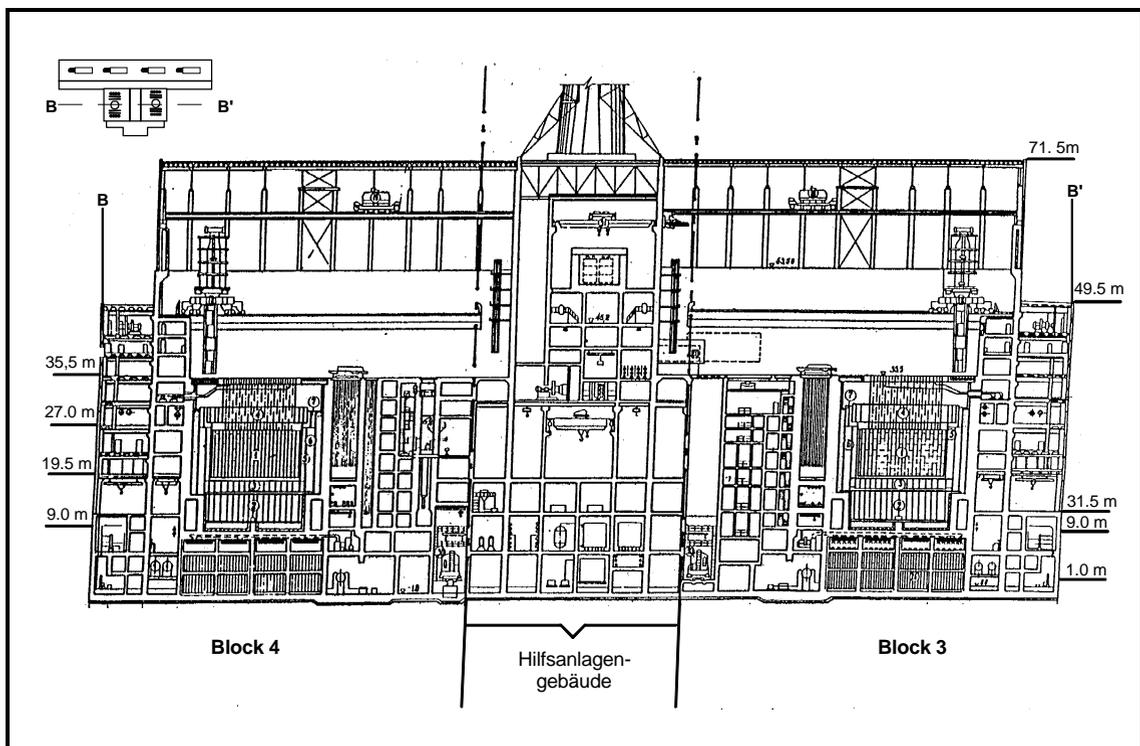
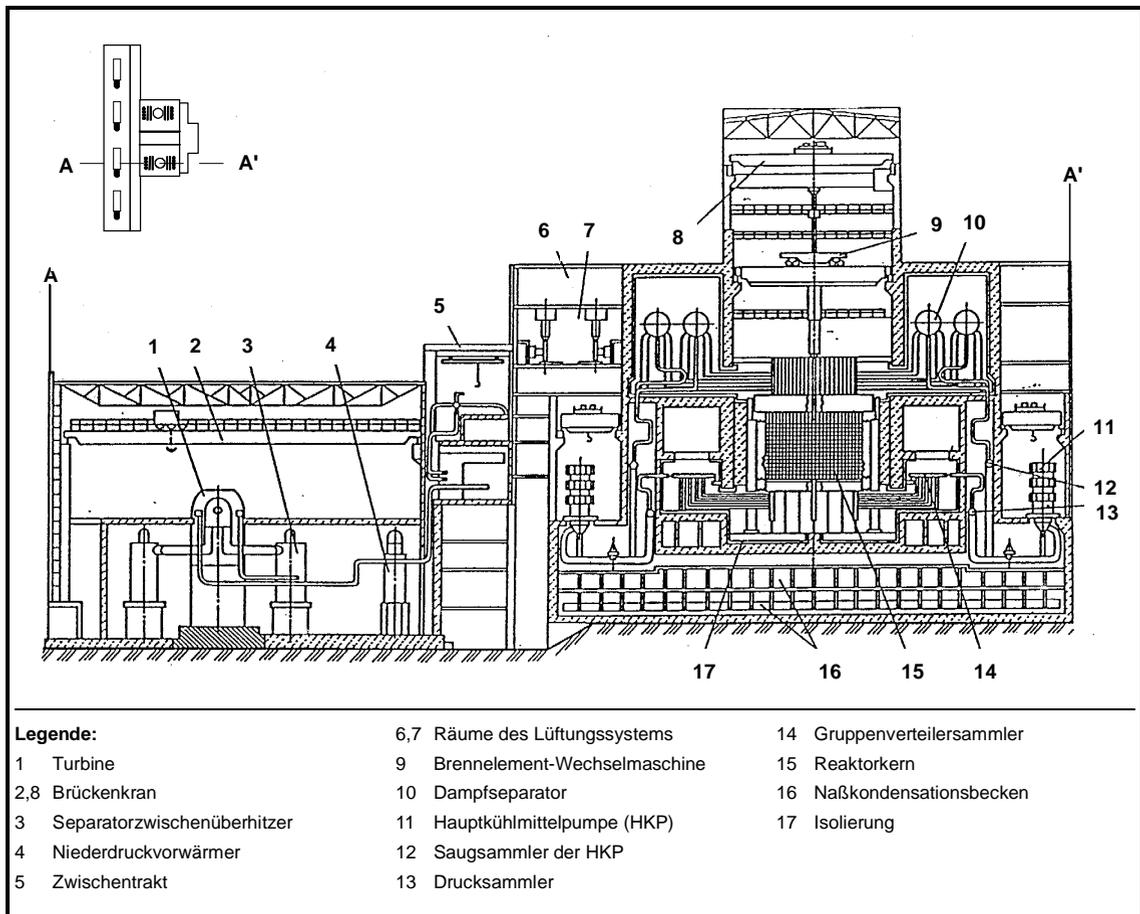
Reaktoranlage	Tschernobyl-1	Tschernobyl-3
Reaktorleistung (thermisch/elektrisch)	3 200 / 1 000 MW	
Turbogenerator	2 x 500 MW	
<b>Kühlkreislauf</b>		
Kühlmittel	H <sub>2</sub> O	
Kühldurchsatz	37 500 t/h	
Kühlmitteltemperatur am Kerneintritt/-austritt	265°C / 284° C	
mittlerer Dampfmassegehalt am Kernaustritt	14,5 %	
Frischdampfdruck im Separator	6,8 MPa	
Frischdampfdurchsatz	5 400 t/h	
<b>Reaktorkern</b>		
Höhe/Durchmesser	7 m / 11,8 m	
Moderator	Graphit (He-N <sub>2</sub> -Inertisierung)	
Moderatorgewicht	ca. 1 700 t	
Abmessungen eines Graphitblocks (H x B x T)	600 x 250 x 250 mm	
Moderatortemperatur	zwischen 500° C und 750° C	
Anzahl der Druckrohre	1693	
Anzahl der Reflektorkühlkanäle	156	
Anzahl der festinstallierten Absorberstäbe <sup>1)</sup>	0	0
Anzahl der Steuer- und Abschaltstäbe	179	211
davon halblange Steuerstäbe von unten	21	24
Stabeinfahrzeit bei Reaktorabschaltung	18 - 20 s	
Stabfahrgeschwindigkeit bei Regelung	20 cm/s	
Gesamtmasse Zirkaloy	ca. 177 t	
<b>Druckrohr mit Brennelement</b>		
Länge eines Druckrohrs: gesamt / Zirkoniumanteil	ca. 22 m / 7,93 m (Zr 2,5 Nb)	
Außendurchmesser x Wandstärke	88 x 4 mm	
Brennstabbündel pro Brennelement	2 übereinander	
Brennstäbe pro Brennstabbündel	18	
maximale Leistung pro Druckrohr: Auslegung/Betrieb	3,0 MW / 2,8 MW	
mittlere Stableistung	150 W/cm	
Brennstoff	UO <sub>2</sub>	
Gesamtmasse Uran	ca. 190 t	
Anreicherung	2,0% U-235	
mittlerer Abbrand / Entladeabbrand	10 000 / 20 000 MWd/t	
<sup>1)</sup> nur die Erstbeladung enthielt feste Absorber		



**Legende:**

- |                                             |                                              |                                                   |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 Reaktorkern                               | 8 Gruppenverteilersammler                    | 18 Wasservorlage des Druckabbausystems - 2. Ebene |
| 2 Oberes Ende der Druckrohre                | 9 Rohrleitungen (Reaktoreintritt)            | 19 Wasservorlage des Druckabbausystems - 1. Ebene |
| 3 Wasser-/Dampfleitungen (Reaktoraustritt)  | 10 Bereich unterhalb des Reaktors            | 20 Überströmmembranen                             |
| 4 Dampfseparator (Wasserdampfabscheider)    | 11 Oberer biologischer Schild                | 21 Kondensationsrohre                             |
| 5 Tragestruktur des Reaktors (Komponente S) | 12 Seitlicher biologischer Schild            | 22 Lüftungsanlagenräume                           |
| 6 Fallrohre (Downcomer-Leitungen)           | 13 Unterer biologischer Schild               | 23 Zum Maschinenhaus                              |
| 7 Hauptkühlmittelpumpen                     | 14 Dampfverteilungskorridor                  | 24 Raum für Notkühlsysteme                        |
|                                             | 15 Brennelement-Wechselmaschine              | 25 Obere Abdecksteine                             |
|                                             | 16 Kran für die Brennelement-Wechselmaschine |                                                   |
|                                             | 17 Brückenkran                               |                                                   |

**Bild 1-7** Perspektivischer Querschnitt durch das Reaktorgebäude (Tschernobyl-4)

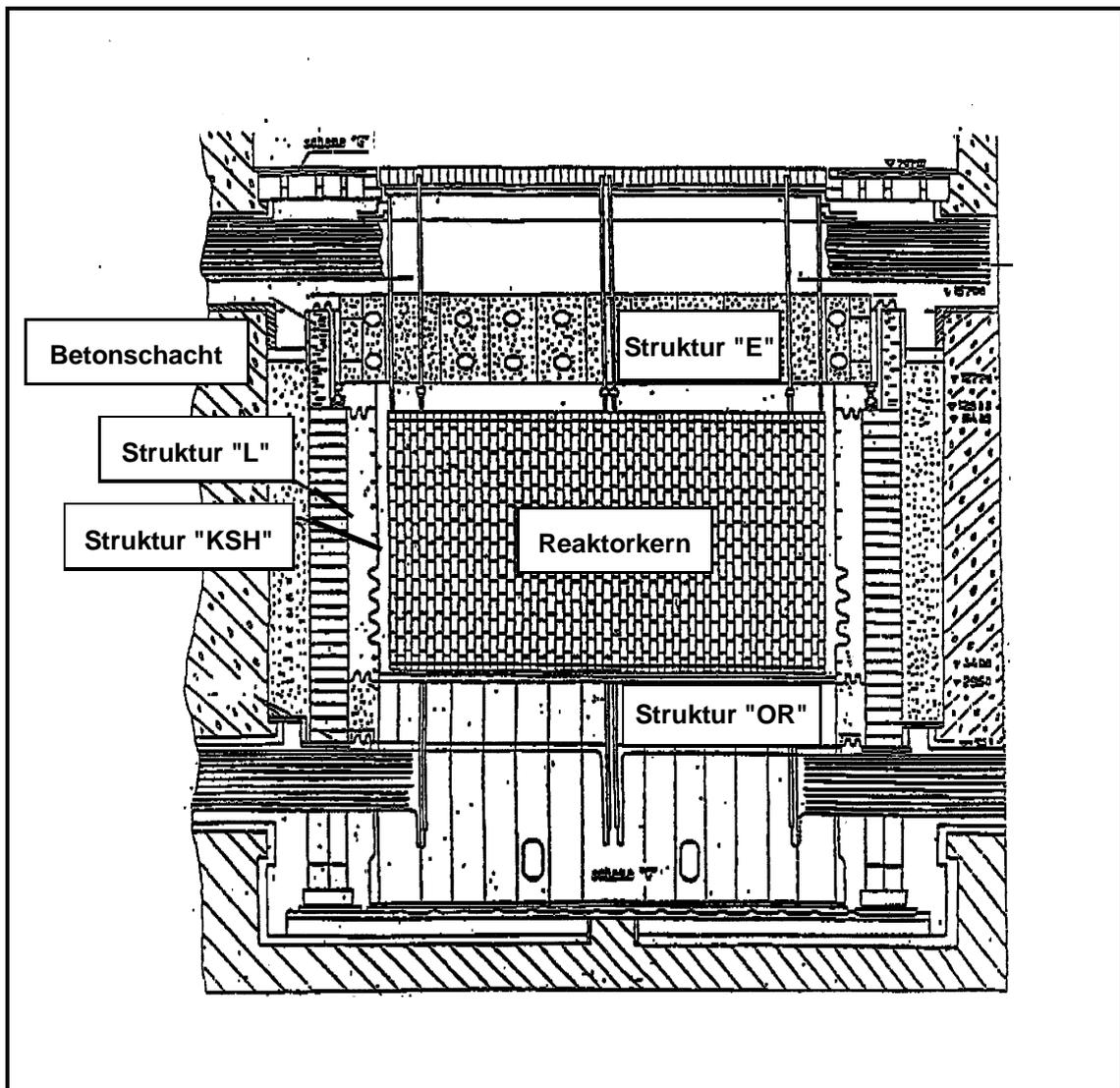


**Bild 1-8** Verschiedene Schnitte durch das Kernkraftwerk Tschernobyl: oben Block 4 mit dem Maschinenhaus, unten die Blöcke 3 und 4 mit dem Hilfsanlagen-gebäude

### 1.3.2 Reaktorkern

Der Reaktorkern hat die Form eines senkrecht stehenden zylinderförmigen Blocks. Er besteht aus 2 488 quaderförmigen Graphitsäulen, die aus einzelnen Graphitblöcken unterschiedlicher Höhen zusammengesetzt sind. In den Graphitblöcken befinden sich vertikale Bohrungen, welche die Druckrohre und die Rohre der Spezialkanäle des Kühlkreislafs für das Regel- und Schutzsystem, die Reflektorkühlung und die Kernnenninstrumentierung aufnehmen.

Die vier äußeren Reihen der Graphitsäulen dienen als Seitenreflektoren. In ihren Bohrungen befinden sich Graphitstäbe oder weitere Spezialkanäle für die Reflektorkühlung.



**Bild 1-9** Querschnitt durch den Reaktor

### 1.3.3 Reaktorbehälter

Die Graphitsäulen befinden sich in einem hermetisch abgeschlossenen Raum - dem Reaktorbehälter (Bild 1-9). Dieser besteht aus einem zylinderförmigen Metallgehäuse (Struktur "KSH"), das mit der oberen Kernplatte (Struktur "E") und der unteren Kernplatte (Struktur "OR") verschweißt ist. Alle Druckrohre und Spezialkanäle sind mit der oberen Kernplatte fest verbunden. Der Reaktorbehälter sitzt in einem zylinderförmigen Betonschacht.

Der Reaktorbehälter sorgt dafür, daß der Graphit keinen Kontakt mit Luft bekommt. Während des Betriebs erreicht der Graphit Temperaturen bis zu 750° C. Bei Luftzutritt würde er oxidieren. Um dies zu verhindern und um den Wärmeübergang zwischen dem Graphit und den Arbeits- und Spezialkanälen zu verbessern, wird der Reaktorbehälter von einem Helium-Stickstoff-Gemisch (bis zu 90 Volumen-% He) durchströmt.

### 1.3.4 Druckrohr mit Brennelement

Das Druckrohr (Technologischer Kanal, Bild 1-10) besteht aus einem oberen Rohr, an dem die Dampf-Wasser-Leitungen angeschweißt sind, einem Mittelstück im Kernbereich aus einer Zirkonium-Niob-Legierung und einem unteren

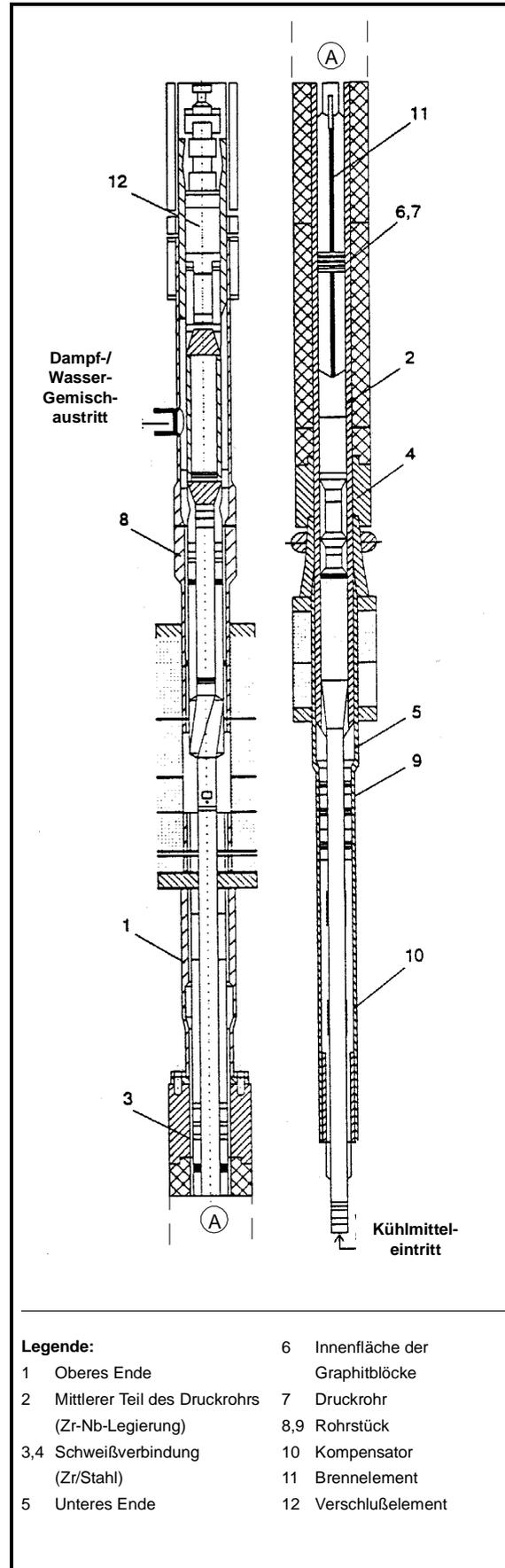
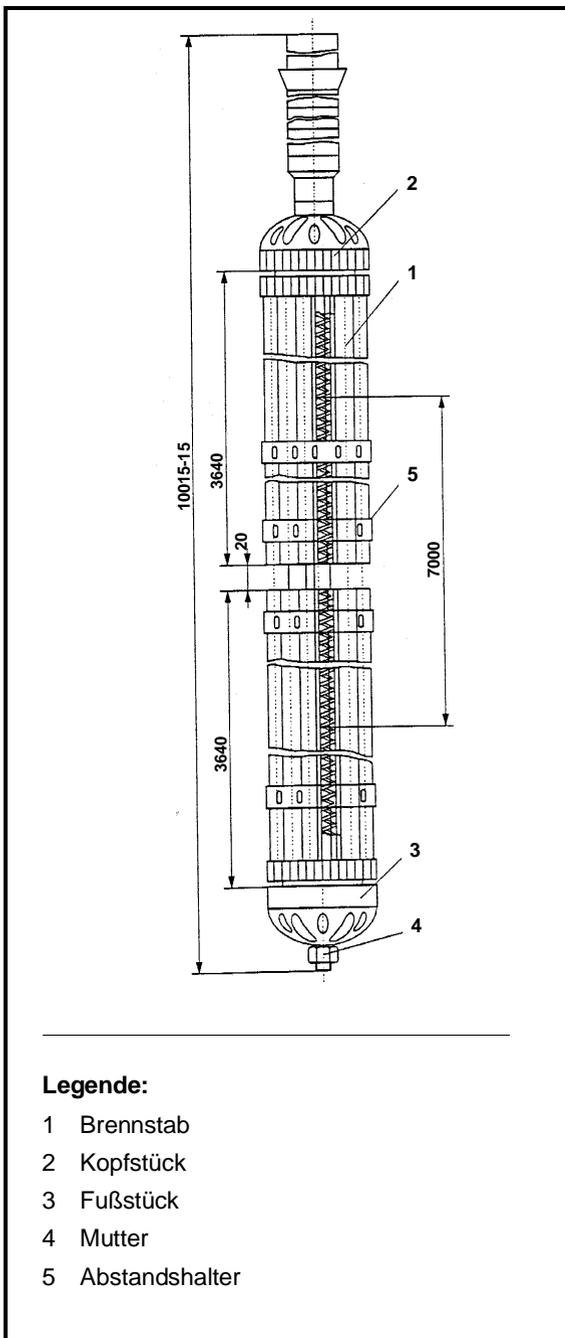


Bild 1-10 Druckrohr mit Brennelement

Rohr mit Verbindung zu den Wasserzuleitungen. Die oberen und unteren Abschnitte des Druckrohres bestehen aus Edelstahl.

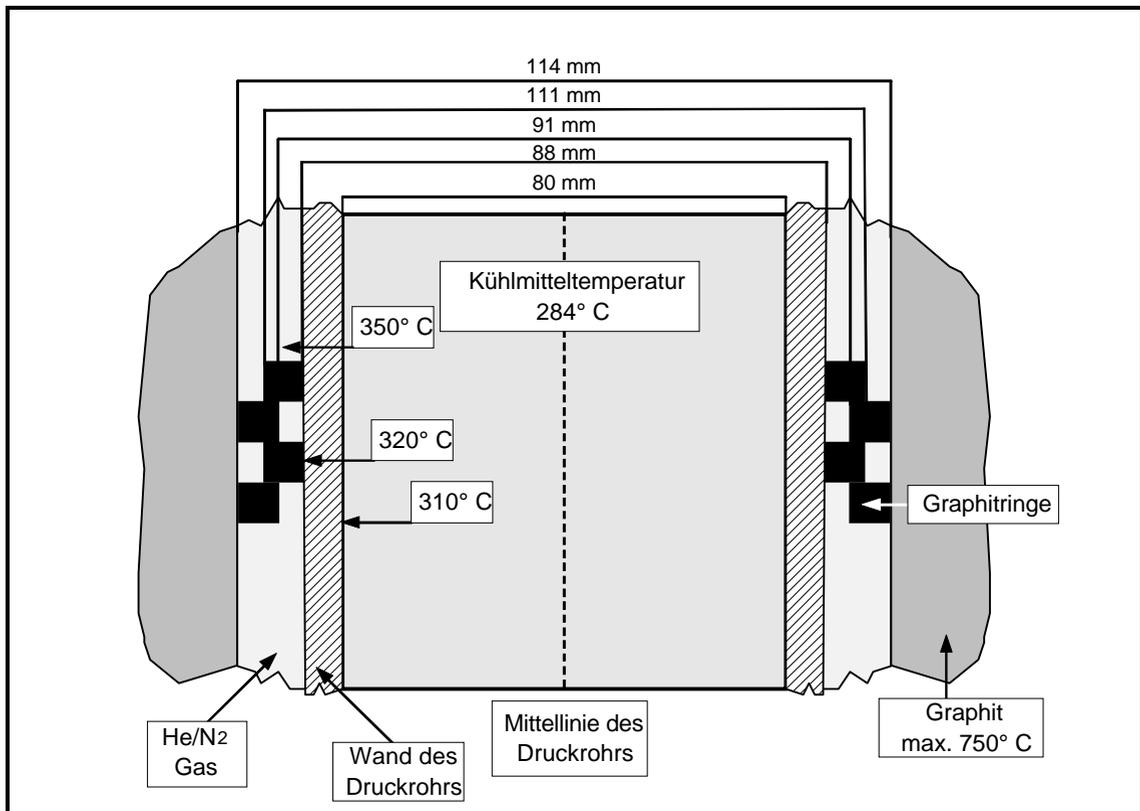
Das Druckrohr mit dem Brennelement (Bild 1-11) dient als Arbeitskanal des Reaktors. Während des Betriebes entsteht im Brennelement durch Kernspaltung Wärme. Das Kühlmittel durchströmt das Druckrohr von unten nach oben und verdampft teilweise im Bereich des Brennelementes.



**Bild 1-11** Brennelement

Jedes Brennelement besteht aus einer Aufhängevorrichtung und zwei in Reihe gekoppelten Brennstabbündeln. Jedes Brennstabbündel ist 3,5 m lang und besteht aus 18 Brennstäben, in welche Urandioxid-Tabletten eingefüllt sind. Ein zentrales Rohr mit in Längsrichtung regelmäßig angeordneten Gittern mit Öffnungen zum Kühlmitteldurchfluß dient zur Fixierung der 18 Brennstäbe in zwei konzentrischen Kreisen um das zentrale Rohr.

Zur besseren Wärmeübertragung von den Graphitblöcken zum Kühlmittel im Kernbereich sind 268 Graphitringe von je 20 mm Höhe um das Druckrohr angeordnet, die abwechselnd entweder dicht am Druckrohr oder an den Bohrungen in den Graphitblöcken anliegen (Bild 1-12). Der Spalt zwischen Druckrohr und Graphitring bzw. zwischen Graphitring und Graphitblock beträgt bei unbestrahlten Druckrohren und Graphit ca. 2 mm. Er wird während des Reaktorbetriebs kleiner, weil der Graphit unter Strahleneinfluß schrumpft und das Druckrohr schwillt. Fehler in der Auslegung führen



**Bild 1-12** Schematische Darstellung der Graphitringe um ein Druckrohr  
(die Temperaturangaben gelten für den Normalbetrieb)

dazu, daß dieser schon nach 15 Jahren zugewachsen ist. Damit ist während der geplanten Betriebsdauer ein Austausch der Druckrohre und Graphitringe notwendig. Dabei wird auch die Bohrung im Graphitblock wiederhergestellt.

**Tabelle 1-4** Kenndaten eines Brennstabes

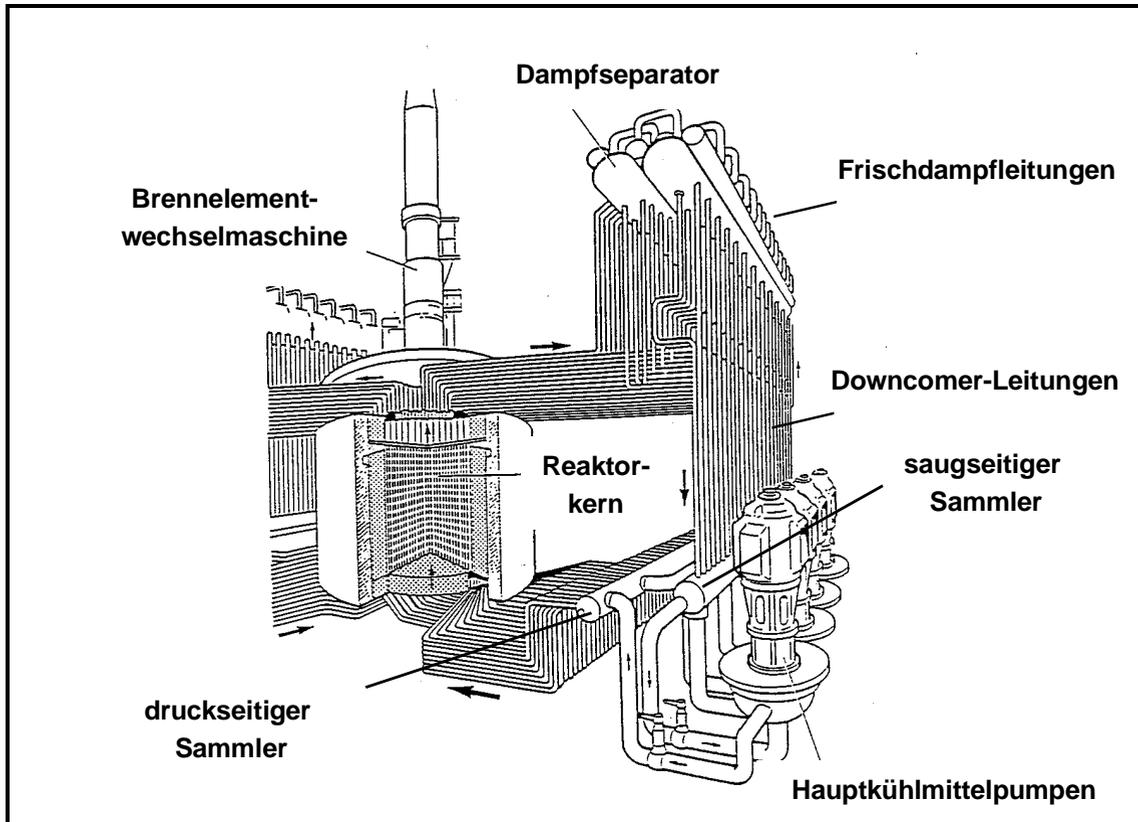
Kenndaten	Werte
Hüllrohrdurchmesser	13,5 mm
Hüllrohrwandstärke	0,9 mm
Durchmesser der UO <sub>2</sub> -Tablette	11,46 mm
Höhe der UO <sub>2</sub> -Tablette	15 mm
Dichte der Tablette	10,4 g/cm <sup>3</sup>
Anreicherung Uran-235	früher 1,8 %, dann 2,0 %, jetzt 2,4 %
Gewicht des UO <sub>2</sub> im Brennstab	3 360 g

### 1.3.5 Wasser/Dampfkreislauf

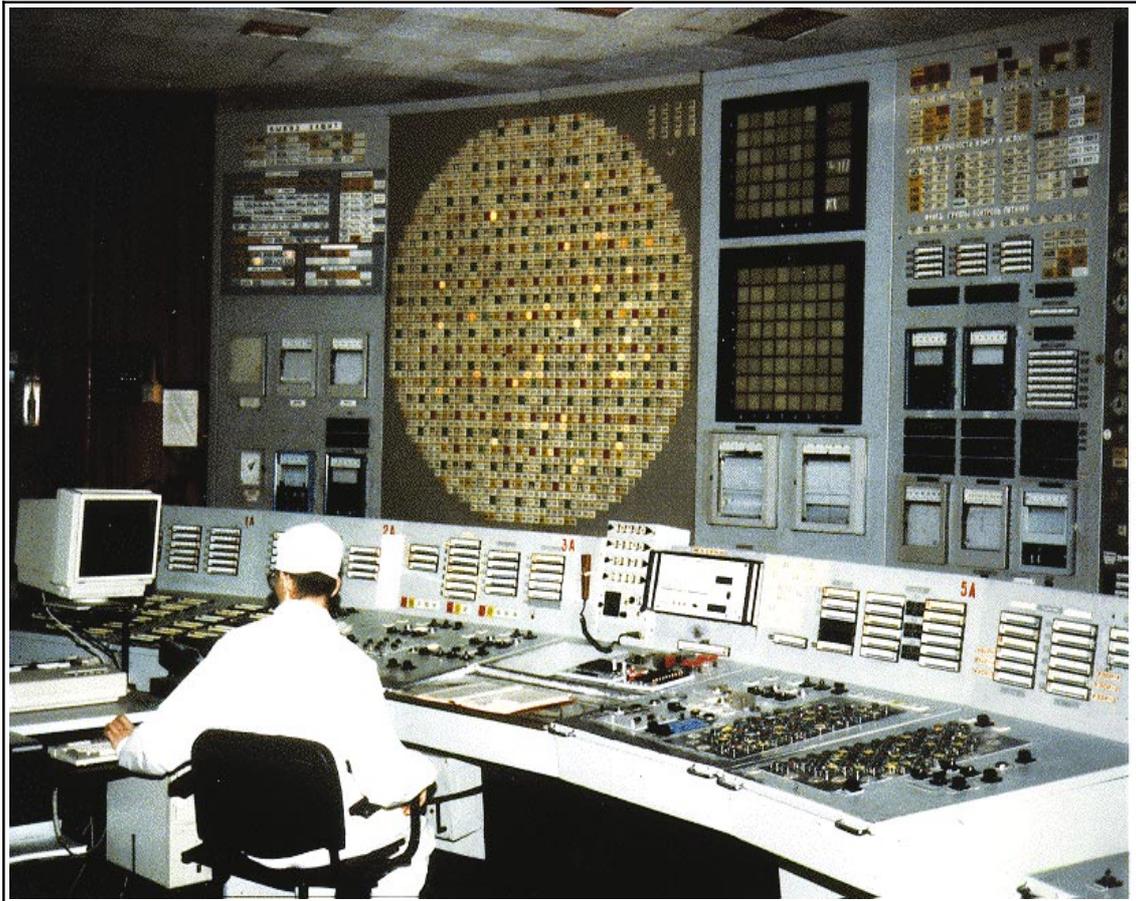
Der Kühlkreislauf des Reaktors (Bild 1-13) besteht aus den Druckrohren, den Wasser/Dampfleitungen, den Dampfseparator-Trommeln (kurz: Dampfseparatoren), den Hauptkühlmittelpumpen (HKP), druck- und saugseitigen Sammlern der Hauptkühlmittelpumpen, Gruppenverteilersammlern und den entsprechenden Wasserzuleitungen.

Die RBMK-Anlagen arbeiten mit einem Kühlkreislauf nach dem Siedewasserprinzip. Das Kühlmittel gelangt unterkühlt von unten in den Reaktorkern. Beim Durchströmen des Reaktorkerns wird ein Teil des Kühlmittels verdampft. Am Kernaustritt beträgt der Dampfgehalt ca. 14,5 %.

Strömungstechnisch besteht der Reaktorkühlkreislauf aus zwei Teilkreisläufen (Schleifen), einer für je eine Kernhälfte. Sie sind nur über das Frischdampfsystem miteinander verbunden. Jede Schleife enthält zwei horizontale Dampfseparatoren, die wasser- und dampfseitig miteinander verbunden sind. Zu jeder Schleife gehören vier Hauptkühlmittelpumpen. Davon sind bei Vollast drei in Betrieb und eine steht in Reserve.



**Bild 1-13** Vereinfachte Darstellung des Wasser/Dampfkreislaufs



**Bild 1-14** Blockwarte im Kernkraftwerk Tschernobyl

In den Dampfseparatoren werden Wasser und Dampf getrennt. Das Wasser vermischt sich mit dem Speisewasser. Anschließend tritt es aus dem Speisewassersammler, der sich in jedem Dampfseparator befindet, aus und fließt von dort über Downcomer-Leitungen zu den saugseitigen Sammlern der Hauptkühlmittelpumpen zurück.

Der abgetrennte Dampf gelangt über die Frischdampfleitungen zu den beiden Turbosätzen. Das Kondensat aus den Turbinenkondensatoren wird über die Kondensatpumpen und die Entgaser von den Speisewasserpumpen in die Speisewassersammler der Dampfseparatoren gefördert, mischt sich dort mit dem gesättigten Wasser und gelangt damit in die Hauptkühlmittelschleifen zurück.

Von den Hauptkühlmittelpumpen wird das Wasser zu einem druckseitigen Sammler gefördert. Dieser ist durch Rohrleitungen mit 22 Gruppenverteilersammlern verbunden. Von jedem Gruppenverteilersammler zweigen 40 - 44 Leitungen ab, die zu den einzelnen Druckrohren im Reaktor führen.

## 1.4 Grundzüge der Sicherheit des RBMK

Die für den Unfall ursächlichen Sicherheitsdefizite der RBMK-Anlagen werden maßgeblich durch ihre reaktorphysikalischen Eigenschaften bestimmt.

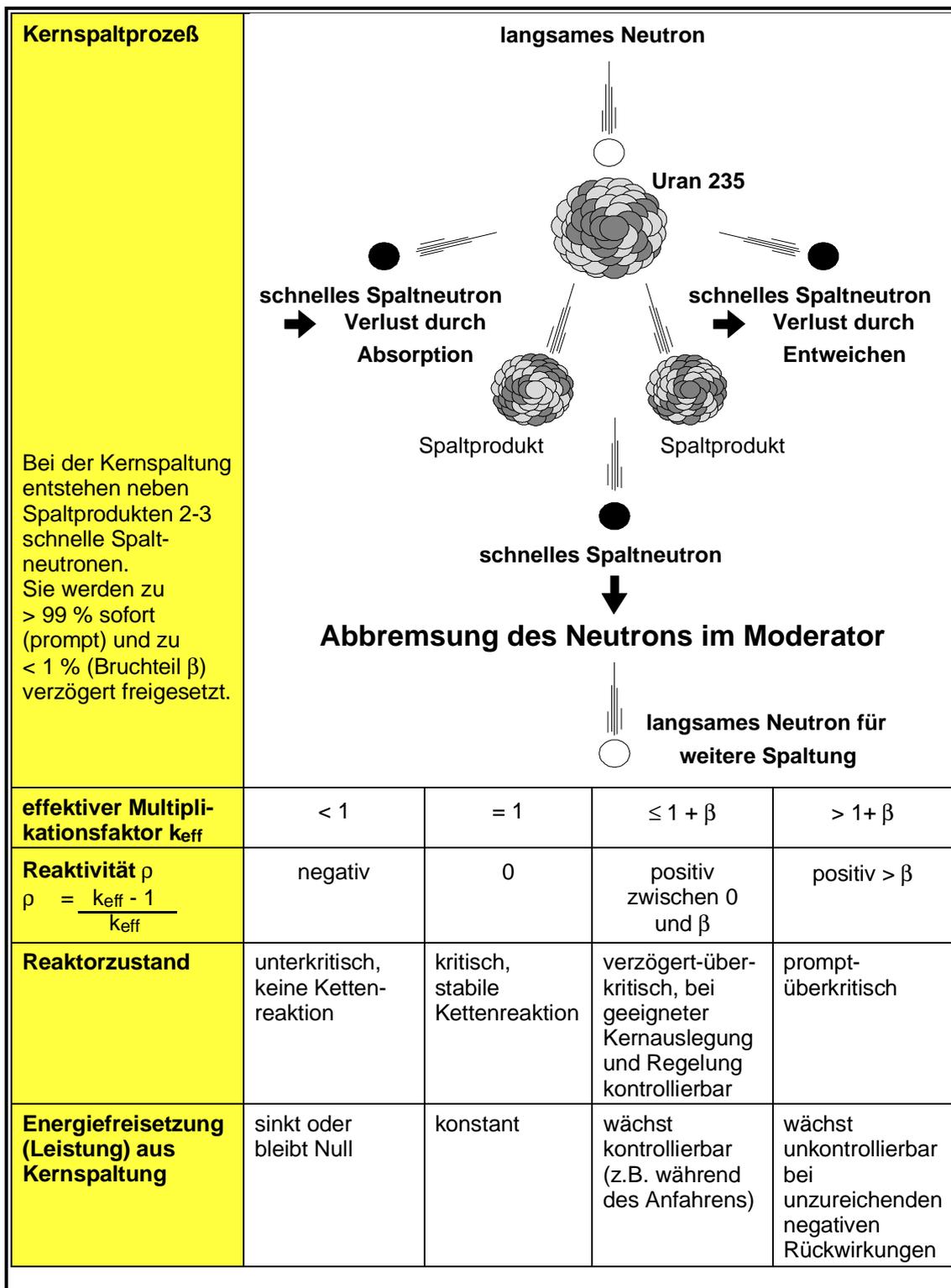
### 1.4.1 Grundbegriffe der Reaktorphysik

#### **Die Reaktivität und ihre Bedeutung für die Kontrolle eines Kernreaktors**

Die Wärmeerzeugung in einem Kernreaktor beruht darauf, daß ein kontrollierter Prozeß von Kernspaltungen aufrechterhalten wird. Bei Reaktoren wie dem RBMK werden die Kernspaltungen zum größten Teil durch langsame Neutronen ausgelöst. Bei jeder Spaltung entstehen neben den Bruchstücken des Atomkerns, den Spaltprodukten, zwei bis drei Neutronen (Spaltneutronen), die in einem Moderator (beim RBMK Graphit) abgebremst (moderiert) werden und dann weitere Spaltungen auslösen können. Auf diese Weise entwickelt sich - bei geeigneter Anordnung des Kernbrennstoffs - eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion. Durch das Abbremsen der Spaltprodukte im umgebenden Brennstoff entsteht Wärme, die durch ein Kühlmittel (Wasser) aus dem Reaktorkern abgeführt und schließlich im Turbogenerator in elektrische Energie umgewandelt wird. Nicht alle Spaltneutronen lösen wieder Spaltungen aus: einige Neutronen werden von nicht spaltbaren Atomen absorbiert oder sie entweichen aus dem Kern. Ein stabiler Prozeß der Kernspaltung - und damit der Wärmeerzeugung im Reaktorkern - wird erreicht, wenn im Mittel nach jeder Spaltung ein Neutron eine weitere Spaltung auslöst. Die Anzahl der Neutronen bleibt dann konstant, der Reaktor ist "kritisch".

Ein grundlegendes Gebot der Reaktorsicherheit ist, daß die Zahl der Neutronen im Reaktorkern nicht größer werden darf als zur Aufrechterhaltung einer stabilen Kettenreaktion erforderlich ist. Anderenfalls würden schnell große Energiemengen freigesetzt. Die technischen Sicherheitseinrichtungen könnten den dadurch entstehenden Temperatur- und Druckbelastungen nicht entgegenwirken. Die Anlagenteile wären unmittelbar gefährdet und könnten den Belastungen nicht standhalten.

Die Neutronenbilanz im Reaktorkern, die den zeitlichen Verlauf der Reaktorleistung bestimmt, wird durch den effektiven Multiplikationsfaktor  $k_{\text{eff}}$  oder durch die Reaktivität  $\rho$ , die nach der Beziehung  $\rho = (k_{\text{eff}} - 1)/k_{\text{eff}}$  berechnet wird, beschrieben. Mehr als 99 % der Spaltneutronen entstehen unmittelbar ("prompt") bei der Spaltung. Ein Anteil von 0,5 bis 0,7 % wird beim Zerfall instabiler Spaltprodukte verzögert freigesetzt. Der



**Bild 1-15** Schematische Darstellung des Kernspaltprozesses

der verzögerten Neutronen pro Spaltung wird mit  $\beta$  bezeichnet. Die verzögerten Neutronen spielen eine entscheidende Rolle für die Kontrolle der Kettenreaktion im Reaktor: Ist  $k_{eff} = 1$ , d.h.  $\rho = 0$ , so ist der Reaktor - unter Einbeziehung der prompten und der verzögerten Neutronen - kritisch. Ist  $k_{eff}$  größer 1 ( $\rho > 0$ ), nimmt die Anzahl der Neuro-

nen mit jeder “Spaltungsgeneration” zu, und die im Reaktor erzeugte Wärmeleistung steigt an. Die Zeitspanne, in der sich die Anzahl der Neutronen um den Faktor  $e \approx 2,718$  erhöht, wird als Reaktorperiode bezeichnet. Im verzögert-überkritischen Bereich ( $k_{\text{eff}} \leq 1 + \beta$ ,  $\rho < \beta$ ) steigt die Leistung nur langsam an. Wird dagegen der Reaktor “prompt-überkritisch” ( $k_{\text{eff}} > 1 + \beta$ ,  $\rho > \beta$ ), reichen bereits die prompten Neutronen für einen Leistungsanstieg aus. Falls keine ausreichenden negativen Rückwirkungsmechanismen wirksam werden, wächst die Anzahl der Spaltneutronen sehr rasch an: es kommt zu einem Anstieg der Kettenreaktion mit einer Reaktorperiode im Bereich von Millisekunden, der auch durch aktive Gegenmaßnahmen, wie das Einfahren von Steuerstäben, nicht beherrschbar ist. Wie lange eine solche “Leistungssexkursion” anhält und welche Energiemenge dabei freigesetzt wird, hängt von der zugeführten Reaktivität und von der Stärke rasch wirkender negativer Rückwirkungseffekte ab.

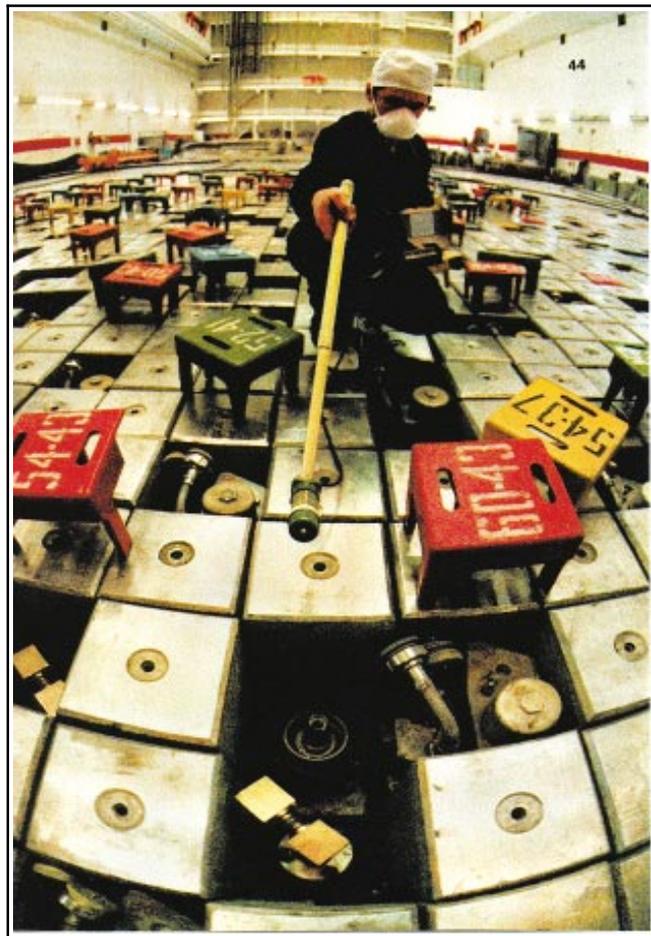
### Reaktivitätskoeffizienten

Die Reaktivität wird von mehreren Zustandsgrößen, wie Brennstofftemperatur, Kühlmitteldichte, Kühlmitteldruck und Moderator­temperatur, beeinflusst. Der Einfluß dieser und anderer Zustandsgrößen auf die

Reaktivität wird durch Reaktivitätskoeffizienten beschrieben.

Der Reaktivitätskoeffizient ist das Verhältnis der Reaktivitätsänderung zur Änderung der jeweiligen Zustandsgröße (z.B. ist  $\Delta\rho/\Delta T_{\text{Brennstoff}}$  der Reaktivitätskoeffizient der Brennstofftemperatur).

Das Leistungsverhalten des Reaktors wird vom Zusammenwirken aller Reaktivitätskoeffizienten bestimmt. Änderungen der Reaktorleistung beeinflussen in der Regel mehrere Zustandsgrößen und damit auch die Reaktivität. Dementsprechend kann auch ein “Leistungskoeffizient” als Verhältnis von Reaktivitätsänderung und Leistungsänderung definiert werden.



**Bild 1-16** Strahlungsmessung am Reaktordeckel

Wird dem Reaktor Reaktivität zugeführt, steigt die Leistung zunächst an. Wenn der Leistungskoeffizient negativ ist, stellt sich von selbst ein neuer stationärer Zustand ein. Ist der Leistungskoeffizient der Reaktivität dagegen positiv, kann ein Anstieg der Leistung bis zur Kernzerstörung nur durch aktive Eingriffe, z.B. durch Einfahren von Steuerstäben, begrenzt werden.

Ausreichend negative Rückwirkungseffekte, die durch geeignete Kernausslegung erreicht werden können, sind deshalb eine wesentliche Voraussetzung für einen sicheren Betrieb von Kernreaktoren. Reaktoren mit ausreichend negativer Reaktivitätsrückwirkung zeigen selbstregelndes Verhalten, da sich nach einer Reaktivitätszufuhr selbständig ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt.

### **Überschußreaktivität**

Die Reaktivität des Reaktorkerns wird (längerfristig) davon beeinflusst, daß bei der Kernspaltung Brennstoff verbraucht wird (Abbrand) und Spaltprodukte entstehen, die Neutronen absorbieren. Spaltprodukte mit besonders starker Absorptionswirkung werden als Neutronengifte bezeichnet. Damit der zunehmende Abbrand und die zunehmende Neutronenabsorption durch Spaltprodukte die Kettenreaktion nicht vorzeitig zum Erliegen bringen, wird beim Beladen des Reaktorkerns mehr Kernbrennstoff eingesetzt als zunächst für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion erforderlich ist. Diese "Überschußreaktivität" wird durch zusätzliche, in den Kern eingebrachte Absorber ausgeglichen, die im Laufe der Zeit wieder aus dem Reaktor entfernt werden.

### **Xenonvergiftung**

Ein für den Reaktorbetrieb besonders wichtiges Neutronengift ist das Xenon 135. Es entsteht hauptsächlich aus dem Zerfall des Spaltprodukts Jod 135 mit einer Halbwertszeit von etwa sieben Stunden. Xenon 135 ist ein wirkungsvoller Neutronenabsorber mit einer Halbwertszeit von etwa neun Stunden. Bei stationärem Betrieb eines Reaktors sind das Entstehen von Xenon 135 und sein Verschwinden durch Neutroneneinfang und -zerfall im Gleichgewicht. Nimmt die Leistung des Reaktors ab, so geht mit abnehmender Zahl der Neutronen auch der Neutroneneinfang durch das Xenon 135 zurück. Da Xenon aus dem Zerfall von Jod 135 zunächst in nahezu unverändertem Umfang entsteht, vergrößert sich die Konzentration des Neutronengiftes im Reaktorkern vorübergehend. Damit die Kettenreaktion nicht erlischt, muß solange zusätzlich Reaktivität zugeführt werden, bis die Xenonkonzentration wieder abnimmt.

## 1.4.2 Sicherheitskonzept

Im Reaktor eines Kernkraftwerks - das gilt in gleicher Weise für einen RBMK wie für andere Reaktoren - entstehen während des Betriebs große Mengen radioaktiver Stoffe, die zuverlässig von der Umwelt ferngehalten werden müssen. Dazu sind bei allen Betriebszuständen einschließlich Störfällen folgende grundlegenden Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten:

- **Reaktivitätskontrolle:** die Kontrolle der Wärmeerzeugung im Kern
- **Kernkühlung:** die Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern
- **Aktivitätseinschluß:** der Einschluß der radioaktiven Stoffe.

Als Sicherheitsstrategie für Kernkraftwerke westlicher Prägung wurde das gestaffelte Schutzkonzept entwickelt und in die Praxis umgesetzt. Dieses Konzept beinhaltet eine hierarchische Staffelung von möglichst unabhängigen Sicherheitsvorkehrungen. Das sind zum einen die sich umschließenden festen Barrieren, die die im Reaktor entstehenden radioaktiven Stoffe zurückhalten. Zum anderen schützen mehrstufige Sicherheitsmaßnahmen diese Barrieren vor Beschädigung:

- **Barrieren**  
Bei westlichen Reaktoren sind die Aktivitätsbarrieren die Brennstäbe, die Umschließung des Reaktorkühlsystems und der Sicherheitsbehälter.
- **mehrstufige Sicherheitsmaßnahmen**  
Die mehrstufigen Sicherheitsmaßnahmen stellen möglichst unabhängige Verteidigungslinien dar, die die Integrität der Barrieren gewährleisten sollen: hohe Qualitätsanforderungen zur Verhinderung von Störungen, Schutzeinrichtungen zur Begrenzung von Störungen, mehrfach vorhandene Sicherheitseinrichtungen zur Beherrschung von Störfällen, technische und administrative Maßnahmen für anlageninterne Notfälle. Eine grundlegende Voraussetzung dieses Konzepts bilden inhärente Sicherheitseigenschaften (z.B. selbstregelndes Verhalten bei Reaktivitätsstörungen) und automatisierte Systeme, welche bei Störungen und Störfällen den notwendigen zeitlichen Spielraum für ein Eingreifen schaffen. Ist diese Voraussetzung nicht gegeben, ist die Unabhängigkeit der Verteidigungslinien beeinträchtigt und die Anwendbarkeit des Konzepts grundsätzlich in Frage gestellt.

Das gestaffelte Schutzkonzept wurde bei RBMK-Anlagen nur eingeschränkt verwirklicht:

- Mit den Brennstäben und der Umschließung des Reaktorkühlsystems sind zwei Barrieren zum Einschluß der radioaktiven Stoffe vorhanden. Die Barriere "Sicherheitsbehälter" fehlt jedoch bei RBMK-Anlagen der ersten Generation völlig und ist ab der 2. Generation nur unvollkommen vorhanden.
- Hinsichtlich der mehrstufigen Sicherheitsmaßnahmen ist von Bedeutung, daß das Fehlen wichtiger inhärenter Sicherheitseigenschaften (siehe Abschnitt 1.4.3) nicht durch automatisierte Einrichtungen kompensiert wird. Dadurch werden Schadensfälle möglich, die alle Verteidigungslinien gleichzeitig durchbrechen. Darüber hinaus ist die Verteidigungslinie "Störfallbeherrschung" durch Defizite der Schutz- und Sicherheitseinrichtungen erheblich beeinträchtigt.

### **1.4.3 Reaktorphysikalische Eigenschaften des RBMK**

#### **Positive Reaktivitätsrückwirkungen beim RBMK**

Für das Reaktivitätsverhalten des RBMK ergibt sich aus der Verwendung von Graphit als Moderator und von Wasser als Kühlmittel eine besondere Situation. Das Kühlmittel Wasser wirkt zugleich als Neutronenmoderator und als Neutronenabsorber. Während die Moderatorwirkung des Wassers gegenüber der des Graphits von geringer Bedeutung ist, wird das Reaktivitätsverhalten des Reaktors durch die Absorberwirkung des Wassers erheblich beeinflusst. So führt eine Verringerung der Kühlmitteldichte, z.B. durch Verdampfung, oder ein Kühlmittelverlust zu einer deutlichen Verminderung der Neutronenabsorption im Reaktorkern. Eine Erhöhung des Dampfgehaltes in den Druckrohren bewirkt somit eine Erhöhung der Reaktivität. Der RBMK hat eine positive Dampfblasen ("Void")-Reaktivitätsrückwirkung (positiver Voideffekt).

Die Größe dieser Reaktivitätsrückwirkung hängt stark vom Abbrand des Kernbrennstoffs und von der Anzahl der Absorber im Kern ab.

Bereits in den siebziger Jahren wurde durch Messungen bestätigt, daß der Voideffekt beim RBMK im Laufe des Betriebs stark positiv wird. Der aufgrund der Messungen ermittelte Voideffekt, d.h. die Reaktivitätsänderung bei vollständiger Verdampfung des Wassers, lag für den Erstkern mit etwa 200 fest eingebauten Absorberstäben bei  $-0,2 \beta$ . Bei einem mittleren Abbrand von etwa 10 MWd/kg und ohne die fest eingebauten Absorberstäbe stieg der Voideffekt auf etwa  $+5 \beta$ .

### **Betriebliche Reaktivitätsreserve (ORM)**

Eine wichtige Kenngröße für den Reaktivitätszustand der RBMK-Anlagen ist die betriebliche Reaktivitätsreserve (englisch: operational reactivity margin - ORM). Der ORM-Wert ist das Reaktivitätsäquivalent aller (ganz oder teilweise) in den Kern eingefahrenen Steuerstäbe. Er wird als Vielfaches des Reaktivitätsäquivalents eines mittleren, voll eingefahrenen Steuerstabes angegeben.

Der ORM-Wert hat betriebliche und sicherheitstechnische Bedeutung.

- Die im Jahre 1986 gültigen Betriebsvorschriften forderten, daß bei Leistungsbetrieb der ORM-Wert mindestens 26-30 Steuerstäbe beträgt. Diese Reserve ist für betriebliche Zwecke erforderlich, weil bei Lastwechseln, z.B. zur Kompensation der Xenonvergiftung, Steuerstäbe ausgefahren werden müssen. Andernfalls würde sich der Reaktor von selbst abschalten.
- Aus sicherheitstechnischen Gründen dürfen nicht zu viele Steuerstäbe ausgefahren werden, weil ein zu geringer ORM-Wert den positiven Voideffekt verstärkt und die Abschaltwirksamkeit zu Beginn des Einfahrens der Steuerstäbe vermindert. Bis 1986 betrug der minimal zulässige Grenzwert für den ORM 15 Steuerstäbe. Die Erfahrungen aus Tschernobyl haben gezeigt, daß die Untergrenzen des betrieblichen ORM-Werts von 26-30 Steuerstäben unter Sicherheitsgesichtspunkten zu knapp bemessen waren. Die sicherheitstechnische Bedeutung des ORM-Wertes war in der Sowjetunion vor dem Unfall im Prinzip bekannt, wurde aber dort nicht ausreichend beachtet. Die Betriebsmannschaft sah diese Größe offensichtlich fast ausschließlich unter betrieblichen Aspekten.

#### **1.4.4 Sicherheitseinrichtungen der RBMK**

Nachfolgend werden einige für die Sicherheit der RBMK wichtige Systeme beschrieben. Bei Regel- und Abschaltssystemen bezieht sich diese Beschreibung auf den Zustand bis zum Unfall. Auf die gerade bei diesen Systemen erheblichen Nachrüstungen wird in Kapitel 7 eingegangen. Bei den übrigen Systemen wird der heutige Zustand wiedergegeben, wobei sich dieser nur geringfügig vom Zustand vor 1986 unterscheidet. Die Auslegungsmerkmale der wichtigsten Sicherheitseinrichtungen sind in Tabelle 1-5 zusammengestellt.

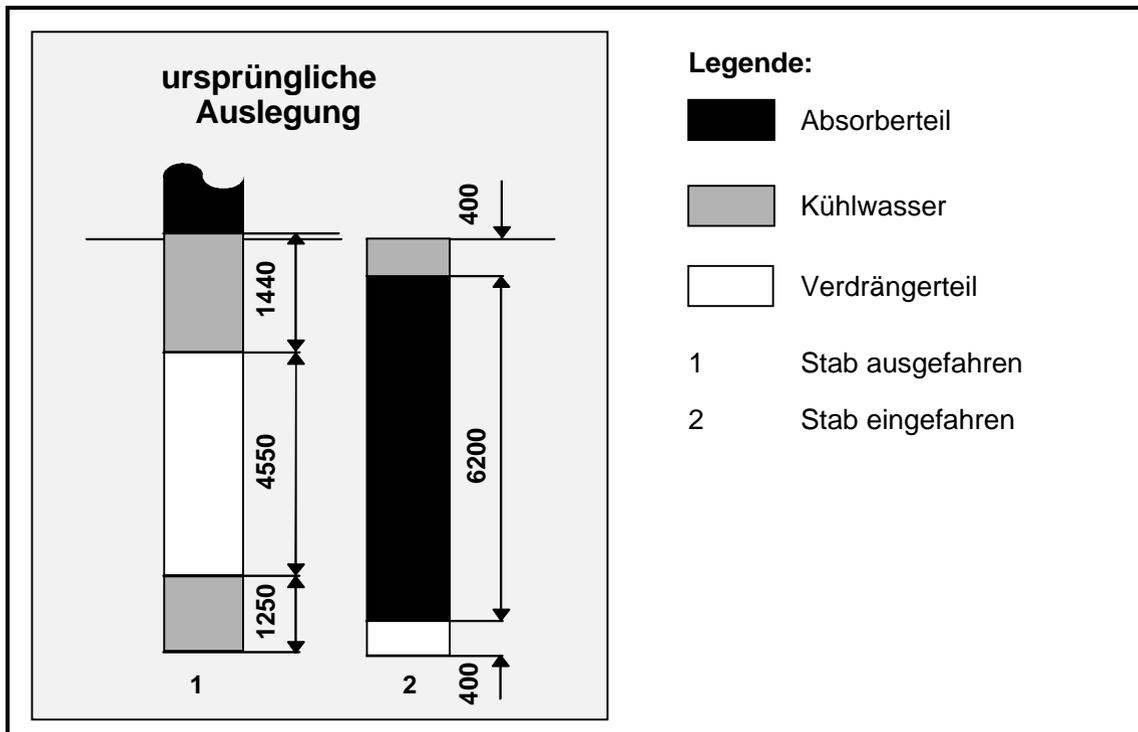
## **Regel- und Abschaltssystem**

Die Aufgabe des Regel- und Abschaltsystems (Bild 1-17) besteht in der betrieblichen Regelung der Reaktorleistung und in der Abschaltung des Reaktors durch Beendigung der Kettenreaktion. Um die Wärmeerzeugung nicht durch "unnötige" Abschaltungen zu unterbrechen, sah die Anlagenauslegung Schnellabschaltungen nur bei äußerster Notwendigkeit vor. Dementsprechend war ein Reaktorschutzsystem vorhanden, das je nach Schwere der Störung die Reaktorleistung nur auf ein bestimmtes Niveau (60 %, 50 % oder 20 % der Nennleistung) absenkte und den Abschaltvorgang unterbrach, sobald das Anregesignal nicht mehr anstand.

Im Reaktorkern eines RBMK der 2. Generation befinden sich 211 Steuerstäbe (bei den Anlagen der 1. Generation 179). Zur Abschaltung fahren 187 der 211 Steuerstäbe von oben in den Kern ein. 24 verkürzte Steuerstäbe fahren von unten in den Kern ein. Sie dienen dazu, die axiale Leistungsverteilung zu regeln. Die von unten einfahrenden Steuerstäbe waren nicht in den Reaktorschutz eingebunden. 163 der von oben einfahrenden Steuerstäbe bestanden aus einem Absorberteil von ca. 6 m Länge und einem Verdrängerteil aus Graphit von 4,5 m Länge bei einem insgesamt 7 m hohen Kern. Die anderen 24 von oben einfahrenden Steuerstäbe waren ohne Verdrängerteil und mit einem Absorberteil von ca. 5 m Länge ausgeführt. Die Steuerstäbe werden durch ein eigenes "Steuerstab-Kühlsystem" mit Wasser gekühlt.

Eine Besonderheit der RBMK-Anlagen vor dem Unfall war ein positiver Reaktivitätseffekt des Abschaltsystems. Bei einem voll ausgefahrenen Steuerstab befindet sich das Verdrängerteil etwa in der Mitte des Reaktorkerns. Oberhalb und unterhalb des Verdrängerteils wird dann der Steuerstabkanal durch Wassersäulen ausgefüllt. Wird ein Steuerstab aus dieser Stellung in den Kern eingefahren, ersetzt das (neutronenmoderierende) Verdrängerteil aus Graphit die untere (neutronenabsorbierende) Wassersäule. Damit wird zunächst das Gegenteil der beabsichtigten Wirkung erreicht: Die Reaktorleistung wird nicht durch das Einbringen negativer Reaktivität verringert, sondern durch positiven Reaktivitätseintrag in den unteren Teil des Kerns erhöht. Der durch das Einfahren vollständig ausgefahrener Steuerstäbe bewirkte positive Reaktivitätseffekt wird auch als "positiver Abschalteffekt" bezeichnet.

In den RBMK-Anlagen gab es nur ein System zur Abschaltung. In westlichen Reaktoren gibt es dagegen neben dem ersten, innerhalb weniger Sekunden wirkenden Abschaltssystem, ein zweites, unabhängig wirkendes System.



**Bild 1-17** Ursprüngliche Auslegung des Regel- und Abschaltensystems von RBMK-Anlagen

Vor dem Unfall betrug die größte Einfahrtgeschwindigkeit der Steuerstäbe beim RBMK nur 0,4 m/s. Die Steuerstäbe benötigten auch bei einer Abschaltung im Störfall 18-20 s zum vollständigen Einfahren.

### Sicherheitssysteme zur Wärmeabfuhr

Im Normalbetrieb wird die im Reaktor erzeugte Wärme über den Wasser/Dampfkreislauf abgeführt.

Für Störungen und Störfälle, bei denen dieser nicht mehr verfügbar ist, sind Sicherheitssysteme zur Nachwärmeabfuhr vorhanden. Bei Störungen und Störfällen ohne Kühlmittelverlust ist dies das Notspeisewassersystem, bei Kühlmittelverlust-Störfällen das Notkühlsystem. Diese Systeme werden im Anforderungsfall vom Reaktorschutzsystem automatisch in Betrieb genommen.

### Notspeisewassersystem

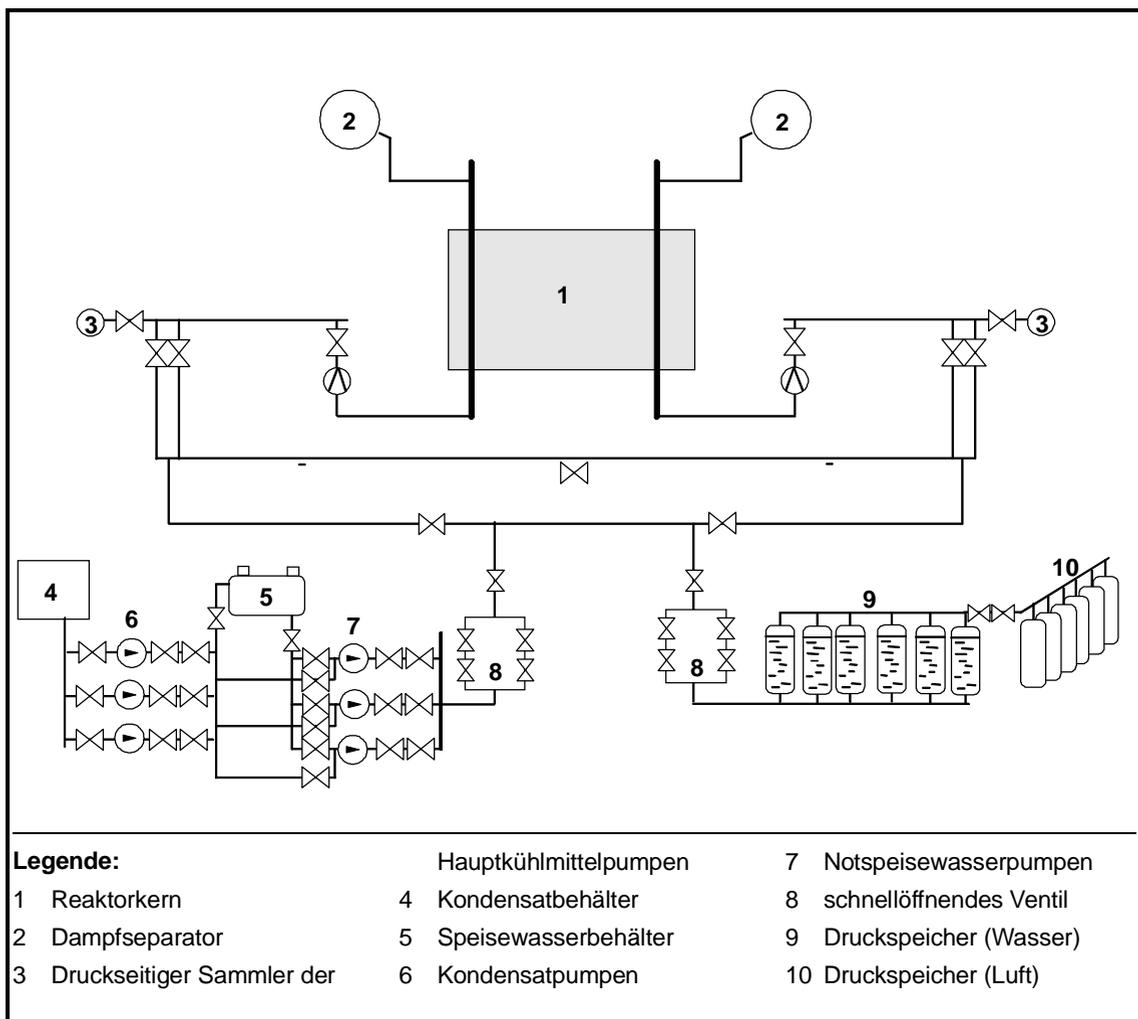
Das Notspeisewassersystem speist Wasser aus Kondensatbehältern über die Notspeisewasserpumpen mit vorgeschalteten Kondensatpumpen in die Dampfseparatoren ein und führt nach Abschaltung des Reaktors die Nachwärme ab. Die drei Notspeisewas-

serpumpen stehen neben den Hauptspeisewasserpumpen im Maschinenhaus. Das Notspeisewassersystem hat auch betriebliche Funktionen beim An- und Abfahren, z.B. beim Füllen des Reaktorkühlkreislaufs.

### Notkühlung

Die Notkühlfunktion der Blöcke 1 und 2 in Tschernobyl (1. Generation) wird durch zwei Teilsysteme wahrgenommen (Bild 1-18). Die kurzfristige Kernkühlung übernimmt ein System von 6 Druckspeichern mit schnellöffnenden Ventilen und gleichzeitiges Zuschalten des Hauptspeisewassersystems, das ebenfalls über schnellöffnende Ventile einspeist.

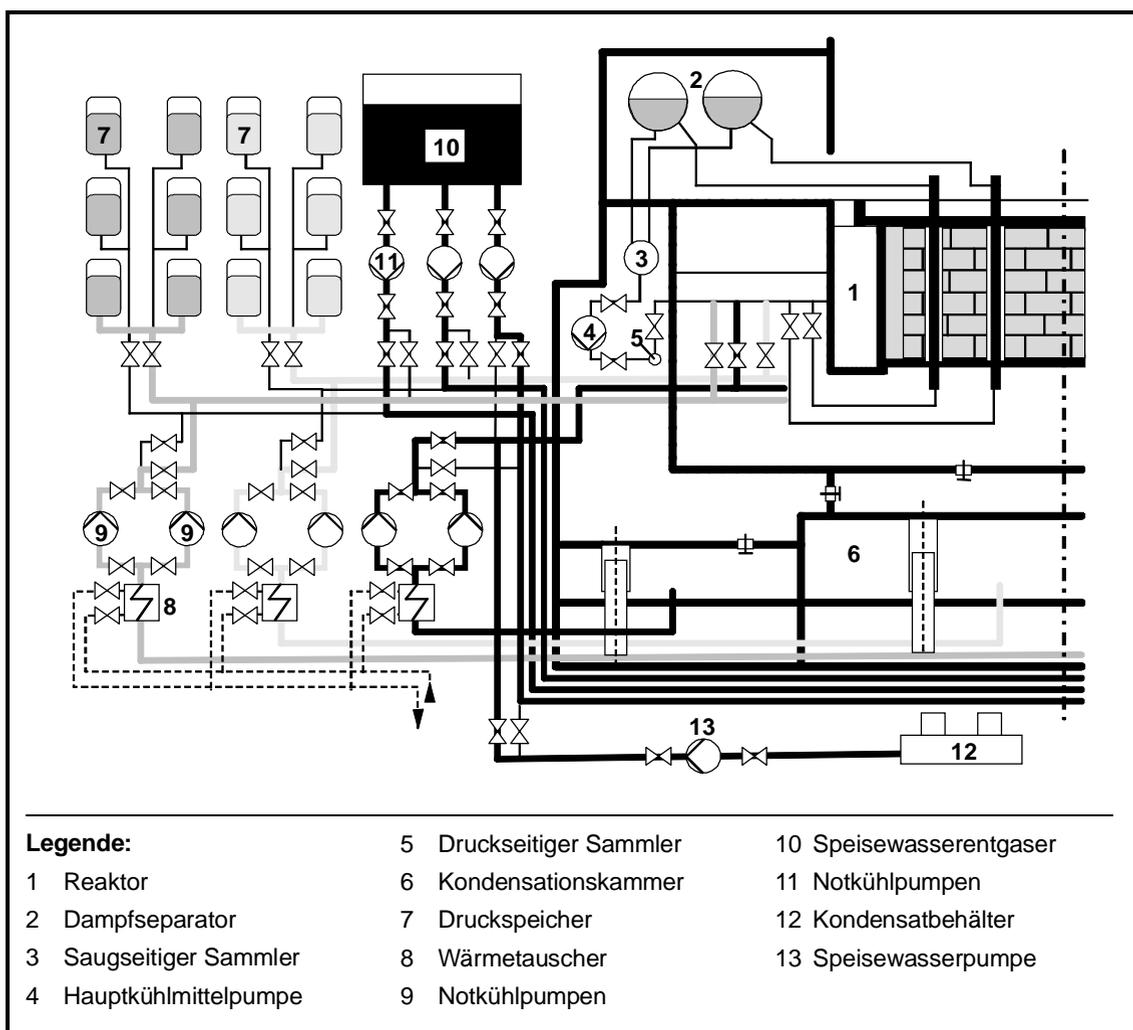
Die langfristige Kernkühlung wird durch die 3 Notspeisewasserpumpen (3 x 50 %) und, sofern verfügbar, durch die Hauptspeisewasserpumpen gewährleistet.



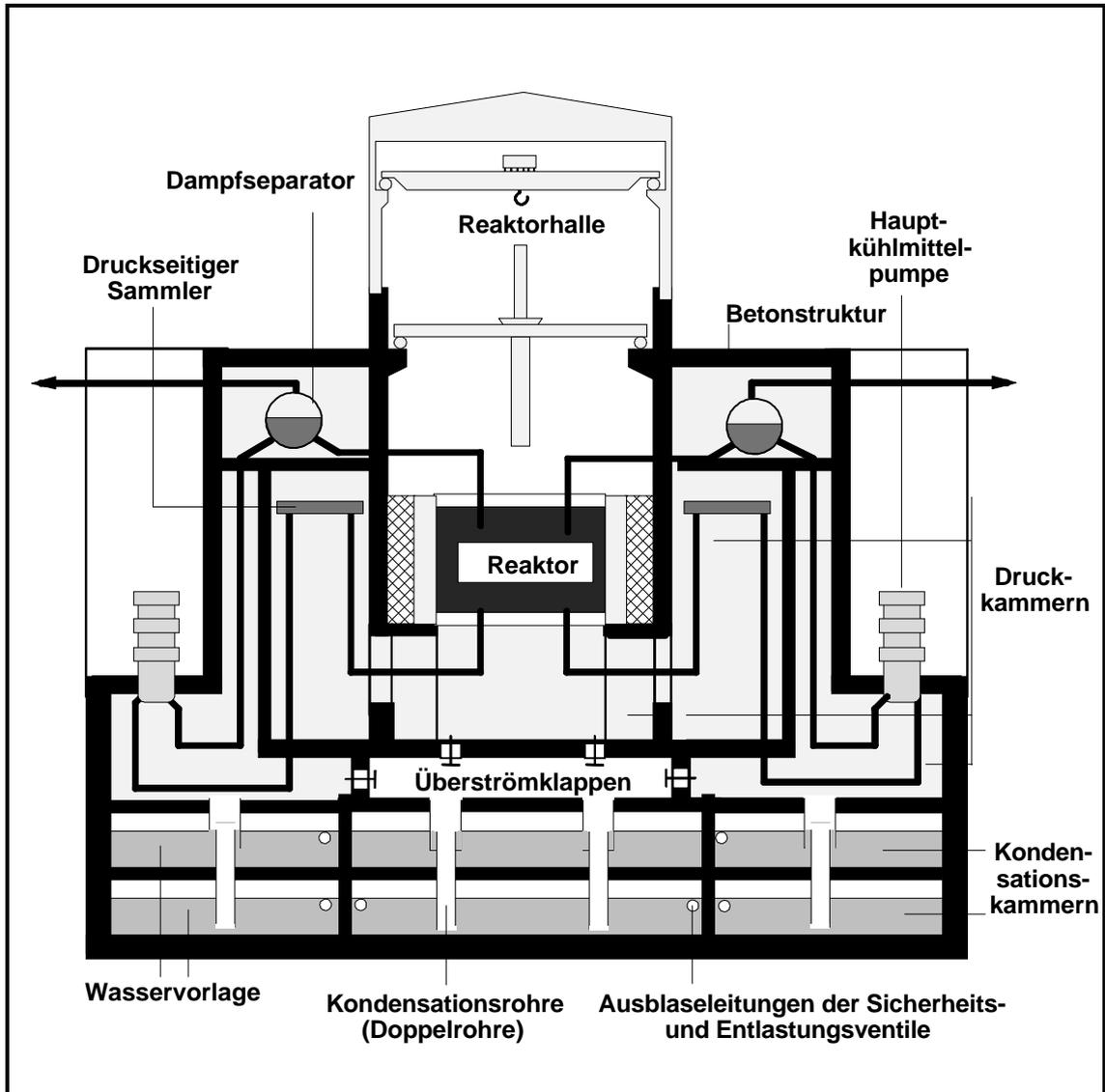
**Bild 1-18** Schematische Darstellung des Notkühlsystems von RBMK-Anlagen der 1. Generation (Tschernobyl Block 1 und 2)

Diese Systeme speisen über einen gemeinsamen Sammler in beide Hälften des Reaktorkerns ein. Die die Notkühlfunktion wahrnehmenden Systeme sind für den Bruch einer Leitung mit Nennweite (NW) 300 ausgelegt.

Nicht nachgerüstete Anlagen der 1. Generation verfügen für die Notkühlung nur über die Hauptspeisewasser- und Notspeisewassersysteme. Bei einzelnen Kernkraftwerken bestehen Pläne, das Notkühlsystem nach dem Vorbild von Leningrad, Block 2, zu ertüchtigen, bei dem eine Umrüstung gerade durchgeführt wird. Mit der Installation einer zusätzlichen Redundanz von sechs Druckspeichern für die kurzfristige Kernkühlung und drei räumlich voneinander getrennt angeordneten eigenständigen Notkühlpumpen mit redundanter Wasserversorgung soll ein durchgängig dreisträngiges Notkühlsystem nachgerüstet werden. Dabei sind für beide Reaktorhälften getrennte Notkühlsammler vorgesehen.



**Bild 1-19** Schematische Darstellung des Notkühlsystems von RBMK-Anlagen der 2. Generation (Tschernobyl Block 3 und 4)



**Bild 1-20** Schematische Darstellung des partiellen Sicherheitsenschlusses bei RBMK-Anlagen der 2. Generation (Tschernobyl-4)

Das Notkühlsystem im Kernkraftwerk Tschernobyl, Block 3 (2. Generation), ist für den Bruch der größten kühlmittelführenden Leitung des Reaktorkühlkreislaufs mit NW 900 ausgelegt. Das Notkühlsystem besteht aus Teilsystemen für die kurzfristige und für die langfristige Kernkühlung. Beide Teilsysteme sind dreisträngig ausgelegt (Bild 1-19).

Das Teilsystem für die kurzfristige Kernkühlung besteht aus zwei Strängen mit je sechs Druckspeichern. Der dritte Strang besteht aus dem Hauptspeisewassersystem. Alle Stränge speisen über schnellöffnende Armaturen in die Gruppenverteilersammler ein. Das Teilsystem für die kurzfristige Kernkühlung speist über eine Auswahl-schaltung nur in die betroffene Reaktorhälfte ein.

Das Teilsystem für die langfristige Kernkühlung besteht aus 3 x 2 Notkühlpumpen, die durch eine Auswahlhaltung der betroffenen Kernhälfte mit dem Leck zugeordnet werden und aus 3 x 1 Notkühlpumpe für die nicht betroffene Kernhälfte. Alle Stränge besitzen eine durchgehend separate Einspeiseleitung zu den Notkühlsammlern und weiter bis in die Gruppenverteilersammler. Alle Notkühlpumpen sind notstromversorgt.

### **Technisch-Wasser-System**

Das Technisch-Wasser-System ist Teil der Nachkühlkette und dient zur Abfuhr der Nachwärme und zur Kühlung sicherheitstechnisch wichtiger Komponenten und betrieblicher Verbraucher.

### **Sicherheitseinschluß**

Die RBMK-Anlagen verfügen nicht über einen mit westlichen Leichtwasserreaktoren vergleichbaren Sicherheitseinschluß. Bei der 1. Generation der RBMK-Anlagen existiert zur Druckbegrenzung nach Kühlmittelverluststörfällen lediglich ein Notkondensationssystem geringer Kapazität in den Räumen, die den unteren Teil des Reaktorkühlkreislaufes umgeben. Damit sind mittlere und größere Brüche des Reaktorkühlkreislaufes zwangsläufig mit der Freisetzung radioaktiver Stoffe in den Reaktorsaal, das Maschinenhaus bzw. in die Umgebung verbunden. Das Reaktorgebäude ist nur für die Lasten ausgelegt, die bei Rohrleitungsbrüchen bis zur NW 300 auftreten.

Ab der 2. Generation besitzen die Anlagen ein Störfall-Lokalisierungssystem, das einen partiellen Sicherheitseinschluß mit Naßkondensationsanlage darstellt. Die Wasservorlage der Naßkondensationsanlage wird durch das Beckenkühlsystem auf dem erforderlichen Temperaturniveau gehalten. Auslegungsstörfälle für dieses System sind der Bruch eines druckseitigen Sammlers der Hauptkühlmittelpumpen (NW 900), eines Gruppensammlers (NW 300) in den unteren hermetisch abgeschlossenen Räumen des Reaktorgebäudes sowie das Versagen eines Druckrohrs im Reaktorbehälter.

Bei sämtlichen RBMK-Anlagen fehlen wirksame Vorkehrungen zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe bei mittleren und größeren Lecks im Speisewassersystem, in den oberen Bereichen des Wasser/Dampfkreislaufs und im Frischdampfsystem.

**Tabelle 1-5** Sicherheitseinrichtungen der Kernkraftwerke mit RBMK

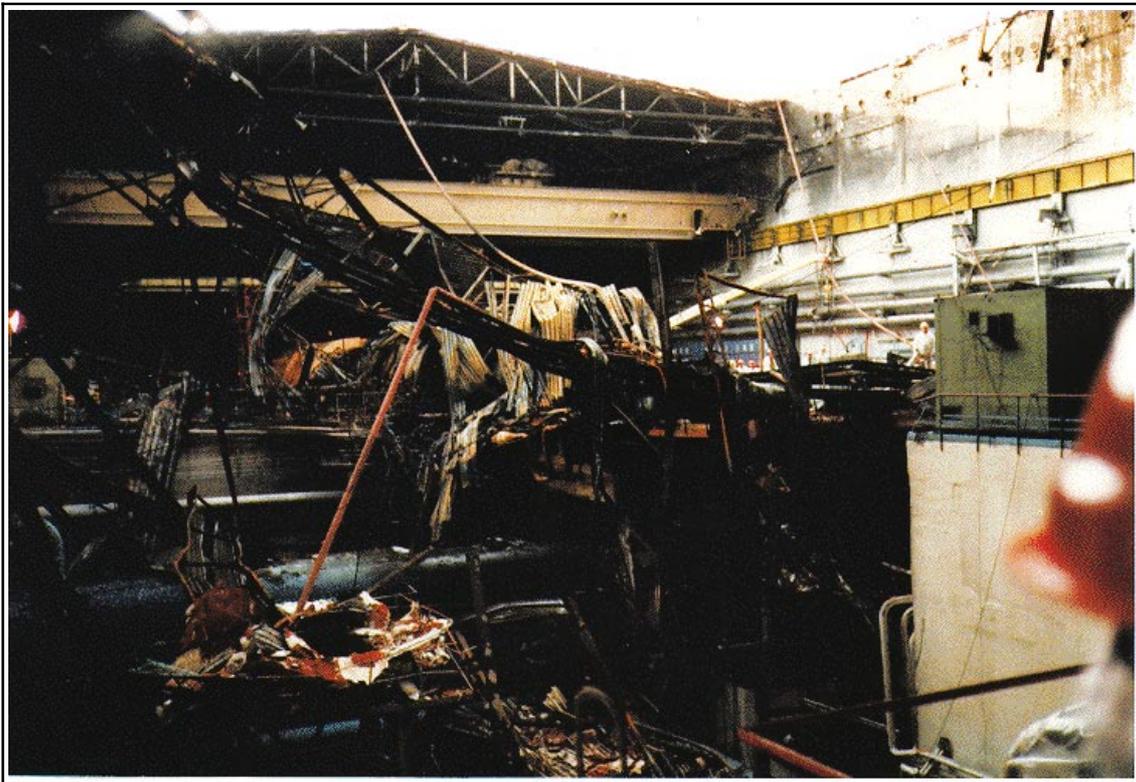
Kennwerte bzw. Systeme der Reaktoranlage	1. Generation (Tschernobyl-1 und -2)	2. Generation (Tschernobyl-3 und -4)
<b>Regel- und Abschaltssysteme</b>		
Anzahl der Steuer- und Regelstäbe	191	211
Fahrgeschwindigkeit der Regelstäbe	aus: 0,2 m/s; ein: 0,4 m/s	
Einfallzeit der Schnellabschaltstäbe <sup>1)</sup>	2 - 2,5 s bzw. 7 s	
Einfahrzeit der Regelstäbe 1986/heute	18 - 20 s/12 s <sup>1)</sup>	
<b>Druckspeicher</b>		
Druckspeicher	1 System mit 6 Tanks	2 Systeme mit je 6 Tanks
Wasservolumen	je Tank 6,8 m <sup>3</sup>	je Tank 13 m <sup>3</sup>
Treibgasvolumen	je Tank 6,8 m <sup>3</sup>	je Tank 12 m <sup>3</sup>
Druck	9,5 MPa	
<b>Notkühlpumpen</b>		
Anzahl für die beschädigte Kernhälfte		3 x 2 Pumpen
Anzahl für die unbeschädigte Kernhälfte		3 x 1 Pumpe
Kapazität		3 x 50 %
Förderleistung je Pumpe		250 t/h
<b>Notspeisewasserpumpen</b>		
Anzahl	3	
Kapazität	3 x 50 %	
Förderleistung je Pumpe	250 t/h	
<b>Kondensationsbeckenkühlpumpen</b>		
Anzahl		3
Kapazität		ca. 3 x 50 %
Förderleistung je Pumpe		250 t/h
<b>Kondensationsbecken</b>		
Anzahl		2
Wasservorlage		ca. 3 200 t
<b>Druckabbausystem</b>		
Auslegungsdruck im Bereich der Sammler der Hauptkühlmittelpumpen		0,45 MPa
Auslegungsdruck im Bereich der Gruppenverteilersammler		0,18 MPa
<sup>1)</sup> nachgerüstet nach dem Unfall		

## 1.5 Situation in Block 2 des Kernkraftwerks Tschernobyl

Seit dem Brand im Maschinenhaus am 10. Oktober 1991 ist der Block 2 des Kernkraftwerks Tschernobyl abgeschaltet. Zur Zeit prüft der Betreiber, unter welchen Bedingungen der Reaktor wieder in Betrieb genommen werden kann. Eine Entscheidung ist in Kürze zu erwarten. Aus dem Reaktor wurde über die Hälfte der Brennelemente ausgeladen. Die verbliebenen 800 Brennelemente sollen 1996 nach dem Abschluß der Reparaturarbeiten am Abklingbecken (Leck im Boden des Beckens) ausgeladen werden.

Die zum Block 2 gehörenden Turbinen 3 und 4 befinden sich nach Diagnose- und Reparaturarbeiten im funktionsfähigen Zustand. Der zur Turbine 3 gehörende Generator 3 ist ebenfalls funktionstüchtig. Der benachbarte Generator 4 ist wegen der brandbedingten Beschädigungen irreparabel.

Die Hauptspeisewasser- und die Notspeisewasserpumpen waren nur geringfügig beschädigt. Dennoch müssen viele Rohrleitungen sowie die leittechnischen und elektrotechnischen Teile komplett ausgetauscht werden.



**Bild 1-21** Der Brand im Maschinenhaus von Block 2 in Tschernobyl verursachte erhebliche Schäden

In den letzten zwei Jahren wurden am Block keine Instandsetzungsarbeiten durchgeführt. Zur Zeit wird der Zustand der Ausrüstungen untersucht. Vorläufige Untersuchungsergebnisse zeigen Korrosionsbefunde in den Übergangsschweißverbindungen zwischen Zirkonium und Stahl der Druckrohre. Es ist nicht auszuschließen, daß eine größere Zahl dieser Druckrohre ausgetauscht werden muß, falls eine Wiederinbetriebnahme vorgesehen wird.

Nach Einschätzung einiger Experten des Kernkraftwerks Tschernobyl sind erhebliche finanzielle Mittel für eine Wiederinbetriebnahme erforderlich. Nach den derzeitigen Prognosen wird es nicht möglich sein, den Block 2 schon im Jahr 1996 wieder in Betrieb zu nehmen.

## **2 Entstehung und Ursachen des Unfalls**

Der Unfall im Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl am 26. April 1986 ereignete sich, als die Anlage planmäßig für eine Revision abgefahren wurde. Während des Abfahrvorganges war ein Versuch vorgesehen, mit dem bestimmte Sicherheitseigenschaften der Anlage nachgewiesen werden sollten. Unzulänglichkeiten des Versuchsprogramms, unerwartete Bedingungen während der Versuchsdurchführung sowie mehrere nicht vorherzusehende Ereignisse und ungeplante Eingriffe des Betriebspersonals führten dazu, daß die Anlage in der Nacht vom 25. zum 26. April 1986 in einen äußerst instabilen Betriebszustand gefahren wurde. Eine prompt überkritische Leistungsexkursion führte zum katastrophalen Versagen des Reaktors.

### **2.1 Versuchsprogramm**

Bei Kühlmittelverlust-Störfällen wird der Kern in der ersten Phase durch Einspeisen von Wasser aus Druckspeichern und aus dem Hauptspeisewassersystem gekühlt. Um die Hauptspeisewasserpumpen auch bei gleichzeitigem Ausfall der normalen Stromversorgung (Notstromfall) betreiben zu können, war für diesen Zweck die Nutzung der Rotationsenergie des auslaufenden Turbogenerators vorgesehen. Die zuverlässige Funktion dieser Maßnahme sollte nachgewiesen werden. Bei früheren Versuchen konnte dieser Nachweis nicht erbracht werden. Daraufhin waren Änderungen am Generator vorgenommen worden.

Die sichere Beherrschung eines Kühlmittelverlust-Störfalles mit gleichzeitigem Notstromfall wird vom sowjetischen Regelwerk gefordert und war in der Auslegung der RBMK vorgesehen. Der Funktionsnachweis dieser Auslegung hätte durch Prüfungen während des Probetriebs erbracht werden müssen. Der Block 4 hatte seinen Betrieb im Dezember 1983 ohne diesen Nachweis aufgenommen.

Das Versuchsprogramm sah im wesentlichen folgendes vor:

- Die thermische Leistung der Anlage sollte bei Versuchsbeginn zwischen 700 und 1 000 MW (ca. 20 % bis 30 %) liegen. In diesem Leistungsbereich ist ein Turbosatz in Betrieb und der zweite abgeschaltet.

- Zur Durchführung des Versuchs war, abweichend vom Normalbetrieb, vorgesehen, daß die sechs normalerweise in Betrieb befindlichen Hauptkühlmittelpumpen und die beiden Reservepumpen liefen.
- Vier Hauptkühlmittelpumpen (einschließlich der zwei Reservepumpen) sollten während und nach dem Versuch weiterlaufen, um die Kernkühlung zu gewährleisten. Diese Pumpen waren deshalb mit dem normalen Stromnetz verbunden.
- Die vier übrigen Hauptkühlmittelpumpen waren bei dem Versuch als Last für den Turbogenerator vorgesehen. Dementsprechend wurden diese Pumpen vor dem Versuch von dem Turbogenerator versorgt. Mit Beginn des Versuchs sollten sie entsprechend der abnehmenden Leistung des Generators auslaufen.
- Der Versuch selbst sollte durch Schnellabschalten des in Betrieb befindlichen Turbosatzes eingeleitet werden. Entsprechend der Auslegung des Reaktorschutzsystems sollte dadurch gleichzeitig eine automatische Reaktornotabschaltung ausgelöst werden.

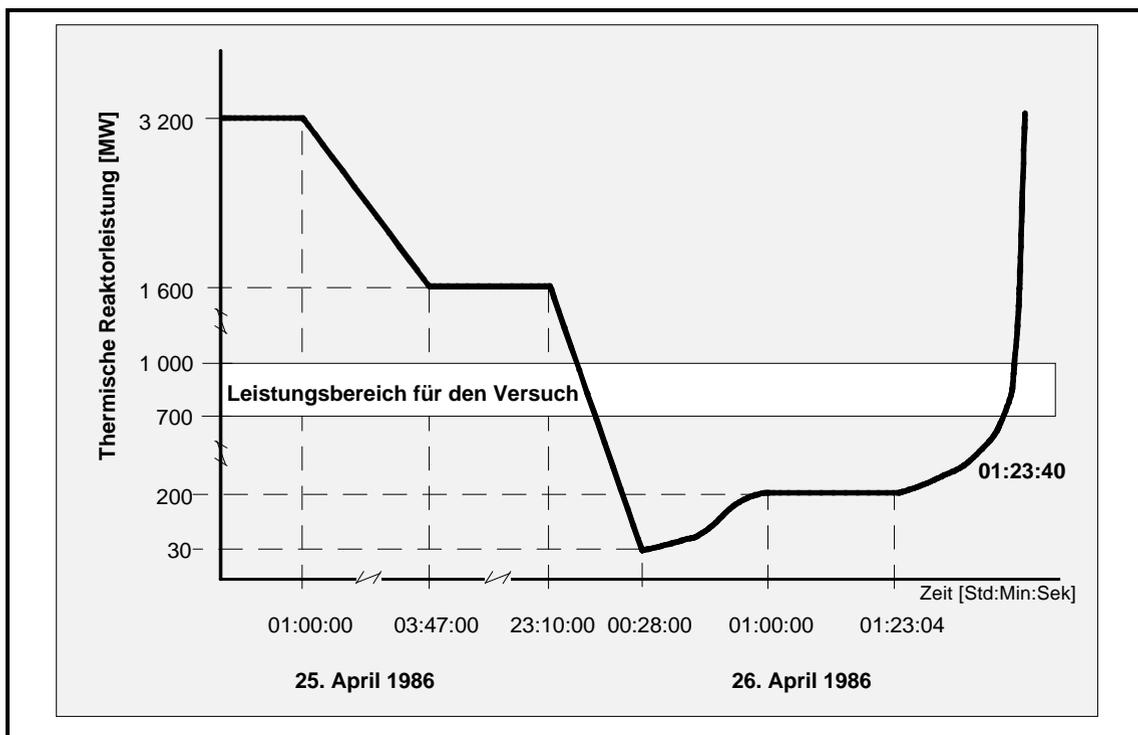
## **2.2 Ablauf und Diskussion der Ereignisse bis zur Zerstörung des Reaktors**

Der Plan für die Versuchsdurchführung konnte aufgrund verschiedener Umstände nicht eingehalten werden. Die wichtigen Ereignisse, die schließlich zu dem Unfall führten, sind im folgenden zusammengefaßt. Zur Aufzeichnung der für den Versuch wesentlichen Meßwerte war ein großer Teil der betrieblichen Registriereinrichtung eingesetzt worden. Die Aufzeichnung der üblichen Betriebsparameter war dadurch vor dem Versuch deutlich eingeschränkt. Die letzten Minuten bis zum Unfall mußten daher teilweise rekonstruiert werden.

- Die Anlage wurde am 25. April 1986, um 1:00 Uhr morgens planmäßig zur jährlichen Revision und für den geplanten Versuch abgefahren.
- Um 3:47 Uhr war die thermische Leistung auf 1 600 MW, d.h. auf ca. 50 % der Nennleistung, reduziert und wurde dort gehalten.
- Um 7:10 Uhr war die betriebliche Reaktivitätsreserve (ORM) aufgrund der instationären Xenonvergiftung kleiner als der zulässige Wert. Der Reaktor hätte unverzüg-

lich abgeschaltet werden müssen. Dies geschah nicht. Im weiteren Verlauf stieg der ORM wieder über den minimal zulässigen Wert an.

- Bis 14:00 Uhr betrug die Leistung unverändert 50 %. Auf Anforderung der Verteilerstation in Kiew wurde diese Leistung weiter in das Netz eingespeist. Die Fortführung des Versuches wurde aufgeschoben.
- Etwa neun Stunden später konnte das Abfahren auf den für den Versuch vorgesehenen Leistungsbereich von 20 bis 30 % fortgesetzt werden. Dieser Leistungsbereich wurde jedoch aus nicht bekannten Gründen unterschritten.
- Um 0:28 Uhr, weniger als eine Stunde vor dem Unfall, kam es bei einer thermischen Leistung von 500 MW infolge eines technischen Ausfalls oder einer Fehhandlung zu Schwierigkeiten bei der Umschaltung der Reaktorleistungsregelung. Dabei fiel die Leistung des Reaktors praktisch auf Null. Die mit ca. 1 % gemessene thermische Reaktorleistung entsprach etwa der Leistung der sechs Hauptkühlmittelpumpen. Da vor dem Zeitpunkt der Abschaltung der ORM mit 26 Steuerstäben kleiner war als der für ein Wiederanfahren zulässige Wert von 30, hätten der Reaktor abgeschaltet und der Versuch verschoben werden müssen.



**Bild 2-1** Vereinfachter Verlauf der Reaktorleistung vor dem Unfall

- Statt dessen wurde die Leistung so weit wie möglich wieder angehoben, um den Versuch durchzuführen. Durch Ausfahren von Steuerstäben gelang es, die Reaktorleistung auf etwa 7 % anzuheben und dort zu halten.
- Etwa 40 Minuten vor Versuchsbeginn, um 0:43 Uhr, wurde 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.
- Unmittelbar vor Einleitung des Versuchs befand sich die Anlage in einem äußerst instabilen Zustand, da ein ungünstiger Beladungszustand, ein niedriges Leistungsniveau mit ungünstiger Leistungsdichteverteilung, ein hoher Kühlmitteldurchsatz im Kern, ein verringerter Speisewasserdurchsatz mit Erhöhung der Kühlmitteltemperatur am Kerneintritt und ein instationäres Verhalten der räumlichen Xenonvergiftung vorlagen. Wie Nachrechnungen zeigten, betrug der ORM zu diesem Zeitpunkt nur noch 7-8 Steuerstäbe.
- Um 1:23 Uhr wurde der Versuch eingeleitet. Wie vorgesehen, liefen vier Hauptkühlmittelpumpen aus. Die damit verbundene Verringerung des Kühlmitteldurchsatzes im Reaktorkern und die wenig später ausgelöste Abschaltung des Reaktors führten bei dem vorliegenden instabilen Anlagenzustand zunächst zu einem Leistungsanstieg auf über 15 % der Nennleistung und dann in wenigen Sekunden zu einer Leistungsexkursion.
- Die Leistungsexkursion führte zu einem rapiden Anstieg der Energiefreisetzung in den Brennelementen und im weiteren zur Zerstörung des Reaktorkerns. Die im Brennstoff gespeicherte Wärme wurde dabei sehr schnell in das umgebende Kühlmittel übertragen, welches praktisch spontan verdampfte. Der resultierende hohe Druckanstieg führte zur Explosion des Reaktors.

Der Anhang 1 enthält den chronologischen Ablauf des Unfalls und kommentiert die entsprechenden Unfallphasen.

## 2.3 Diskussion der Unfallursachen

Ursache für den Unfall waren vor allem die gravierenden Defizite in der sicherheitstechnischen Auslegung der RBMK-Anlagen:

- hoher positiver Voideffekt bei Betriebszuständen mit hohen Abbränden
- positiver Abschalteneffekt voll ausgefahrener Regelstäbe
- unzureichende Wirksamkeit der Abschalteneinrichtungen
- fehlende Einbindung des ORM in den Reaktorschutz.

Bestimmt und verschärft wurde der Unfallablauf durch:

- Ungünstige Wahl des Zeitpunktes - hoher Abbrand mit sehr großem positiven Voideffekt von mindestens  $5 \beta$  - für die Durchführung des Versuchs
- Nichtbeachtung der Erfordernisse der Reaktorsicherheit bei Aufstellung des Versuchsprogramms
- geringe Erfahrungen und unzureichende Beteiligung des Betriebspersonals an den Vorbereitungen des Versuchs sowie Verstöße des Betriebspersonals gegen Betriebsvorschriften.

Die wesentlichen Aspekte, die zum Unfall beigetragen haben, werden in den folgenden Abschnitten ausführlicher diskutiert.

### 2.3.1 Defizite der Kernausslegung

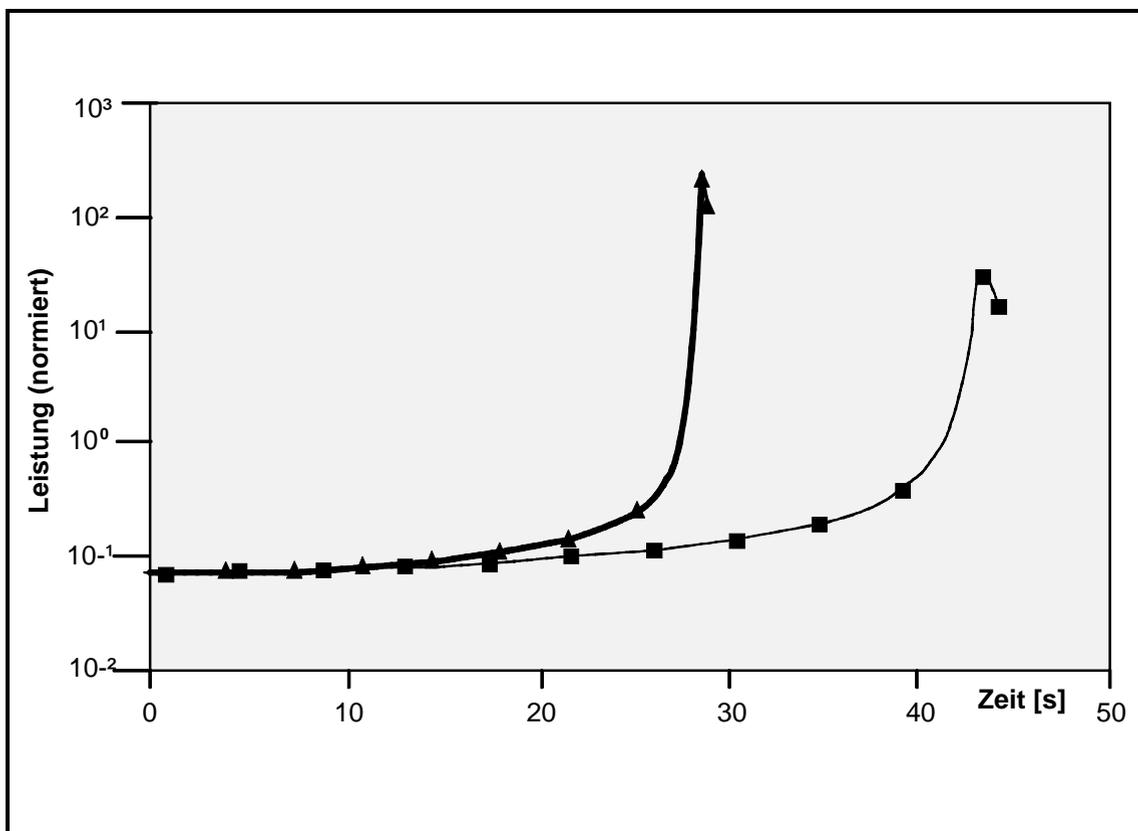
Eine Besonderheit der RBMK-Anlagen stellt der positive Voideffekt dar. Die grundsätzliche Bedeutung des positiven Voideffekts ist in Kapitel 1.4 dargestellt.

Unmittelbar vor Versuchsbeginn betrug in Block 4 der Voideffekt, d.h. die Reaktivitätserhöhung bei vollständiger Verdampfung des Kühlmittels in den Druckrohren, mindestens  $5 \beta$ . Der Kern war zu diesem Zeitpunkt praktisch vollständig mit Wasser gefüllt, fast alle Steuerstäbe waren herausgezogen und das Leistungsniveau war sehr niedrig. Unter

diesen vom Normalbetriebszustand deutlich abweichenden Verhältnissen war es möglich, daß der große Voideffekt praktisch voll wirksam werden konnte.

Wie sich ein solch hoher Voideffekt unter Störfallbedingungen auswirken kann, zeigt Bild 2-2. Die fett eingezeichnete Kurve gibt den Leistungsanstieg für die Randbedingungen beim Unfall wieder. Angenommen wurde eine Abnahme des Kühlmitteldurchsatzes um 0,8 %/s, bedingt durch das Auslaufen der Hauptkühlmittelpumpen. Bei der dünngezeichneten Kurve ist man bei sonst gleichen Bedingungen davon ausgegangen, daß der ORM-Grenzwert von 30 Steuerstäben im Gegensatz zum Unfall eingehalten wurde. Es ergibt sich ein verzögerter Leistungsanstieg mit geringerem Maximum.

Die Rechnungen zeigen, daß bei der damaligen Auslegung in beiden Fällen prompt-überkritische Reaktorzustände bei Kühlmittelverlust bzw. bei Kühlmitteldurchsatzreduzierung möglich waren. Sie machen auch deutlich, daß die Einhaltung der ORM-Grenzwerte allein nicht ausreichend war, um prompt-überkritische Leistungsexkursionen zu verhindern.



**Bild 2-2** Reaktivitätstransienten bei 7 % thermischer Leistung eines RBMK-1000

### **2.3.2 Ungeeignetes Abschaltssystem**

Einen wesentlichen Beitrag zum Unfall lieferten konstruktive Mängel des Abschaltsystems (siehe Kapitel 1.4). Zum einen benötigen die Steuerstäbe im voll ausgefahrenen Zustand einige Sekunden, um bei Anforderung wirksam zu werden. Zum anderen erhöht das Einfahren voll ausgefahrener Steuerstäbe zunächst die Reaktivität ("positiver Abschalteffekt").

Der "positive Abschalteffekt" wurde auch experimentell bei Versuchen zur Inbetriebnahme des ersten Blockes des Kernkraftwerks Ignalina und des vierten Blockes in Tschernobyl festgestellt. Er verstärkt sich, wenn sich das Maximum der axialen Leistungsichte Verteilung beispielsweise im Zusammenhang mit einer Leistungsabsenkung nach unten verschiebt. Abschätzungen aus dem Jahre 1983 ergaben eine starke Abhängigkeit von der Zahl der vollständig ausgefahrenen Steuerstäbe und damit von dem ORM. Je nach Anlagentyp wird bei 130-160 vollständig ausgefahrenen Steuerstäben und einem Leistungsmaximum im unteren Kernbereich im Falle einer Abschaltung des Reaktors innerhalb der ersten Sekunden zunächst insgesamt eine positive Reaktivität zugeführt.

Unmittelbar vor dem Unfall lag eine solche Situation vor. Die Steuerstäbe waren praktisch alle voll ausgefahren und der untere Kernbereich wies ein Leistungsmaximum auf. Dadurch wurde die Leistungsexkursion, welche sich im Verlauf des Versuchs allmählich entwickelte, mit Auslösung der Abschaltung verstärkt und konnte nicht mehr rechtzeitig begrenzt werden.

### **2.3.3 Unzureichende Wahrnehmung der Verantwortung für die Reaktorsicherheit**

Nach der Inbetriebsetzung des ersten Blockes des RBMK-Kernkraftwerkes in Leningrad zeigte sich frühzeitig, daß der Voidkoeffizient entgegen den Annahmen bei der Auslegung im Laufe des Betriebs hohe positive Werte annahm. Im Jahre 1975 ereignete sich in Leningrad-1 ein lokaler Reaktivitätsstörfall mit Schäden am Reaktor. Dieses Ereignis war ein Vorläufer für den Reaktorunfall in Tschernobyl. Obwohl damals schon wesentliche Auslegungsschwächen sichtbar wurden, die später dann zu dem Unfall in Tschernobyl beigetragen haben, wurde dieses Ereignis offiziell von den zuständigen Stellen mit unzureichender Qualität bei der Fertigung abgetan.

Die im Anschluß an den Störfall vorgenommene experimentelle Ermittlung der Voidkoeffizienten der Reaktivität bei Leningrad-1 und die dabei sichtbar gewordenen Instabilitäten des Reaktorkerns führten zu der Entscheidung, den Anreicherungsgrad von ursprünglich 1,8 auf 2 % Uran 235 anzuheben und ein automatisches lokales Regel- und Schutzsystem einzubauen. Diese sicherheitstechnischen Probleme wurden aber keiner vertieften Bewertung unterzogen. Mit den Änderungen wurden die mit den hohen positiven Voidkoeffizienten verbundenen Probleme zwar gemildert, aber nicht grundlegend beseitigt. Dies gilt auch für die neueren RBMK-Anlagen.

Ein entscheidender Grund für die Geringschätzung dieser Probleme war, daß es keine unabhängigen Sicherheitsbehörden gab, die darüber wachten, daß Planer, Errichter und Betreiber ihrer Verantwortung für die Reaktorsicherheit in vollem Umfang nachkamen. Bis zum Jahre 1984 lag diese Verantwortung allein beim Ministerium für den Mittleren Maschinenbau, das gleichzeitig für die Errichtung und den Betrieb verantwortlich war.

Auch der positive Abschalteneffekt war den für die Anlagenauslegung Verantwortlichen bekannt. Die Anlagenplaner beabsichtigten, Änderungen an den Anlagen vorzunehmen, um diesen Effekt auszuschließen. Dennoch wurde die Konstruktion der Steuerstäbe nicht verändert, die Ausfahrmöglichkeiten blieben unbegrenzt. Ebenso wenig wurden die Betriebsvorschriften und die Schulung der Betriebsmannschaft verbessert.

Alle für den Unfall maßgeblichen Faktoren waren bereits vor dem Unfall bekannt. Das System von Genehmigung und Aufsicht und generell die Sicherheitskultur bei den für die Reaktorsicherheit Verantwortlichen war aber nicht ausreichend entwickelt. Die notwendigen Gegenmaßnahmen zur Beseitigung der Auslegungsmängel unterblieben.

#### **2.3.4 Mängel im Versuchsprogramm**

Das Versuchsprogramm wies deutliche Mängel auf. Der Versuch war nur als elektrotechnischer Test eingestuft, bei dem keine Rückwirkungen auf den Reaktor zu erwarten waren. Das Versuchsprogramm wurde durch einen Elektroingenieur ausgearbeitet. Obwohl zur Durchführung des Experiments Eingriffe in das Schutz- und Verriegelungssystem erforderlich waren, blieben Sicherheitsaspekte unberücksichtigt. Die notwendige Abstimmung mit der für die nukleare Sicherheit zuständigen Fachabteilung im Kraft-

werk, dem Generalprojektanten "Hydroprojekt" und der Genehmigungsbehörde "Gosatomenergondisor" unterblieb. Das Betriebspersonal wurde praktisch nicht auf den Versuch vorbereitet.

Die Annahme, daß es sich bei dem Versuch nur um ein elektrotechnisches Experiment handelte, war unzutreffend. Das Experiment hatte unmittelbaren Einfluß auf das Reaktivitätsverhalten des Reaktors. Dies ergab sich aus der Tatsache, daß als Last für den auslaufenden Turbogenerator nicht wie im Anforderungsfall die Hauptspeisewasserpumpen (als Bestandteil des Notkühlsystems), sondern ein Teil der Hauptkühlmittelpumpen gewählt wurde. Obwohl bekannt war, daß der Ausfall von Hauptkühlmittelpumpen zur Erhöhung des Dampfgehaltes im Reaktorkern und damit zu einer Reaktivitätszufuhr führt, enthielt das Versuchsprogramm keine besonderen Anweisungen zur Gewährleistung der Sicherheit. Das Programm beinhaltete auch keine explizite Forderung nach Abschaltung des Reaktors bei Versuchsbeginn. Im Versuchsprogramm war lediglich festgelegt, daß Abweichungen vom vorgeschriebenen Programm vom Schichtleiter freizugeben waren.

Eine Besonderheit des für den Versuch vorgesehenen Betriebszustandes bestand in einem im Vergleich zum Normalbetrieb erhöhten Anfangsdurchsatz des Kühlmittels im Reaktor. Der Dampfgehalt war minimal bei einer geringen Unterkühlung unterhalb der Sättigungstemperatur am Eintritt in den Reaktorkern. Damit war das Potential für eine hohe Reaktivitätszufuhr durch den Voideffekt gegeben. Die genannten Faktoren hatten einen direkten Einfluß auf die Auswirkungen, die sich beim Versuch zeigten.

Der Versuch war eigentlich Bestandteil der Inbetriebnahmeexperimente. In bezug auf den Abbrandzustand des Reaktors war der Zeitpunkt der Durchführung von Versuchen, die mit Reaktivitätsänderungen verbunden sind, besonders ungünstig. Der vierte Block verfügte weder über einen Erstbeladungskern (mit sehr geringem Abbrand und negativem Voideffekt) noch über einen Gleichgewichtskern (mit einem mittleren Abbrand von 9 - 10 MWd/kg), sondern befand sich in einer Übergangsphase von der Erstbeladung zum Gleichgewichtskern (mit einem mittleren Abbrand von 10,3 MWd/kg). Von Bedeutung hierbei ist, daß der Abbrand von ca. 75 % der Brennelemente, die sich hauptsächlich im zentralen Teil des Kerns befanden, 12-15 MWd/kg betrug. Somit lag der Voidkoeffizient im Zentralbereich des Kerns deutlich über dem Wert eines Gleichgewichtskerns und damit höher als üblich.

### **2.3.5 Verhalten des Personals**

Eine wichtige Ursache für den Unfall war das Verhalten des Betriebspersonals, das vor und während der Versuchsdurchführung gegen Betriebsvorschriften verstoßen hat.

#### **Unzureichende Erfahrung des Betriebspersonals**

Aufgrund der langen Verzögerung des Versuchsprogramms nahm das ursprünglich vorgesehene Personal infolge von Schichtwechseln nicht am Versuch teil. Der größte Teil des Personals, das am 26.4.1986 schließlich den Versuch durchführte, verfügte nur über geringe Erfahrungen bei An- und Abfahrprozessen. Nur der stellvertretende Hauptingenieur für den Betrieb der Blöcke 3 und 4 hatte langjährige Erfahrungen.

#### **Unterschreitung des vorgeschriebenen Mindestwertes der betrieblichen Reaktivitätsreserve (ORM)**

Bei strikter Anwendung der Betriebsvorschriften hätte der Versuch bereits um 7:10 Uhr abgebrochen und die Anlage abgefahren werden müssen, weil der minimale zulässige Wert für den ORM von 15 unterschritten worden war. Inwieweit eine derartige Entscheidung durchsetzbar war und welche Folgen sie gehabt hätte, ist ungewiß.

#### **Verringern der thermischen Leistung unter den im Versuchsprogramm vorgesehenen Wert von 700 - 1 000 MW**

Inwieweit das Absinken der thermischen Leistung zunächst auf 500 MW und dann auf fast Null durch technische Ausfälle oder durch Fehlhandlungen des Personals verursacht wurde, läßt sich kaum beurteilen. Hiermit wurde zwar gegen das Versuchsprogramm verstoßen, nicht aber gegen die Betriebsvorschriften. RBMK neigen im unteren Leistungsbereich zu instabilem Verhalten in bezug auf die Xenonvergiftung. Die Ausgangssituation ist daher mit der für den Störfall am 30.11.1975 im Block 1 des Kernkraftwerks Leningrad vergleichbar, aus dem aber keine ausreichenden Konsequenzen gezogen wurden.

#### **Unterschreitung des vorgeschriebenen Mindestwertes der betrieblichen Reaktivitätsreserve (ORM) beim Wiederauffahren des Reaktors**

Ein Wiederauffahren des Reaktors nach einer kurzfristigen Abschaltung von einem Leistungsniveau unter 50 % war nur dann gestattet, wenn der ORM vor dem Abfahren mindestens 30 Steuerstäbe betrug. Der ORM betrug am 25.4.1986 vor Beginn des Abfahrens aber nur 26 Steuerstäbe. Nach dem Abfall der Leistung auf Null am

26.4.1986 um 0:28 Uhr hätte daher der Reaktor nicht wieder angefahren werden dürfen.

Die Reaktorleistung konnte wegen der Xenonvergiftung nur durch manuelles Ausfahren von Steuerstäben in erheblichem Umfang wieder angehoben werden. Es ist zu vermuten, daß der erforderliche Mindestwert des ORM von 15 Steuerstäben unterschritten wurde. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, daß die sicherheitstechnische Bedeutung des ORM der Betriebsmannschaft nicht bekannt war. Der minimal zulässige ORM wurde häufig nur als Reaktivitätsreserve zur Kompensation der instationären Xenonvergiftung bzw. als Mittel zur Regelung der Leistungsdichteverteilung verstanden.

Die Auslegung des Reaktors sah weder eine automatische Abschaltung noch ein Warnsignal beim Unterschreiten des minimalen ORM vor. Somit wurde dem ORM bei der Anlagenauslegung und bei der Anzeige in der Warte nicht die Bedeutung zugewiesen, die ihm als eine bestimmende Größe für die Wirksamkeit des Abschaltsystems zukommt.

#### **Zuschalten der Reservepumpen zu den Hauptkühlmittelkreisläufen**

Das Zuschalten der Reservepumpen stimmte mit dem Versuchsprogramm überein. Im Verlauf des Versuchs erreichten einzelne Hauptkühlmittelpumpen Durchsätze, die den in den "Grenzwerten und Bedingungen des sicheren Betriebs" (GBsB) fixierten Maximalwert deutlich überschritten. Damit bestand die Gefahr einer Reaktivitätszufuhr aufgrund von Durchsatzstörungen im Reaktorkern durch Unterbrechung der Pumpenförderung.

#### **Blockieren der Anregung für eine Reaktorabschaltung beim Ausfall der zweiten Turbine**

Für das im Versuchsprogramm vorgesehene Leistungsniveau von mindestens 700 MW thermisch war ein Blockieren dieser Anregung für die Reaktorabschaltung nach den Betriebsvorschriften nicht zulässig. Unterhalb eines Leistungsniveaus von 300 MW thermisch war dies jedoch gestattet. Grund für die Blockierung war die Durchführung zusätzlicher Experimente zur Messung der Vibrationseigenschaften der Turbogeneratoren. Ein weiterer Grund für die Blockierung war, bei Mißlingen des Tests eine Wiederholung durchführen zu können.

### **Bewertung der Handlungen des Personals:**

- Die mehrfachen Verstöße des Personals, insbesondere gegen Festlegungen zum ORM, lassen den Schluß zu, daß dies mit Billigung leitender Verantwortlicher in Unkenntnis der sicherheitstechnischen Bedeutung geschah.
- Die sicherheitstechnische Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ließ es nicht zu, ausreichend Toleranz gegenüber Bedienungsfehlern bei dieser komplexen Anlage zu schaffen und die Betriebsmannschaft auf das erforderliche sicherheitsgerichtete Handeln festzulegen. Gerade bei Betriebszuständen mit sehr geringer Leistung war die Anlage besonders instabil, die Instrumentierung unzulänglich und die Kenntnisse über das Anlagenverhalten begrenzt, so daß die Betriebsmannschaft vielfach korrigierend eingreifen mußte, um mit den Folgen dieser Unzulänglichkeiten zurechtzukommen. Ermittlung, Anzeige und betriebliche Umsetzung des ORM-Wertes wurden wie bei einem betrieblichen System ausgestaltet: Die Rechenanlage zur Ermittlung des jeweiligen ORM befand sich etwa 50 m vom Schaltpult in der Reaktorwarte entfernt. Die Daten wurden dort ausgedruckt. Die Rechenergebnisse mußte die Betriebsmannschaft umsetzen.
- Die Ausbildung des Personals hinsichtlich der für den Unfall wichtigen physikalischen Vorgänge war unzureichend. Wesentlich hierfür war, daß keine ausreichend umfassenden Sicherheitsanalysen zum RBMK vorhanden waren und versäumt wurde, wichtige Betriebserfahrungen, wie das Vorläuferereignis im Block 1 des Kernkraftwerks Leningrad, weiterzugeben. Ein erheblicher Ausbildungsmangel ergab sich auch aus dem Umstand, daß zum damaligen Zeitpunkt kein Simulator für RBMK-Anlagen existierte. Daher konnten betriebliche Vorgänge wie An- und Abfahrprozesse, Störungen und Störfälle nicht praxisnah trainiert werden. Hinzu kam, wie Untersuchungen nach dem Unfall ergaben, daß das Ausbildungssystem im Kernkraftwerk Tschernobyl ungenügend war und Prüfungen des Betriebspersonals nicht vorschriftsgemäß abgenommen wurden.

## 2.4 Zusammenfassende Beurteilung der Unfallursachen

Die für den Reaktorunfall entscheidenden Ursachen waren den für die Sicherheit verantwortlichen Anlagenplanern wie auch einigen wissenschaftlichen Institutionen in der Sowjetunion bereits Jahre vor dem Unfall bekannt. Maßnahmen zur Beseitigung der Auslegungsmängel des Reaktorkerns und des Regel- und Abschaltsystems waren geplant und ihre Durchführung in Betracht gezogen, wurden aber nie realisiert.

Angesichts der gravierenden Auslegungsmängel, des ungünstigen Abbrandzustands und eines erhöhten Voidkoeffizienten im Reaktorkern hätte einem derartigen Versuch ohne eingehende Analyse nicht zugestimmt werden dürfen. Außerdem hat das Betriebspersonal während der Versuchsdurchführung mehrfach gegen Betriebsvorschriften verstoßen.

Die Betriebsmannschaft wurde nur unzureichend durch geeignete Informations- und Bedienelemente, durch analytisch abgesicherte Kenntnisse zum Anlagenverhalten sowie durch eine sicherheitsgerechte Auslegung des Reaktorschutzes unterstützt. Sie war überfordert, die ihr zukommende Verantwortung für die Sicherheit voll wahrzunehmen.

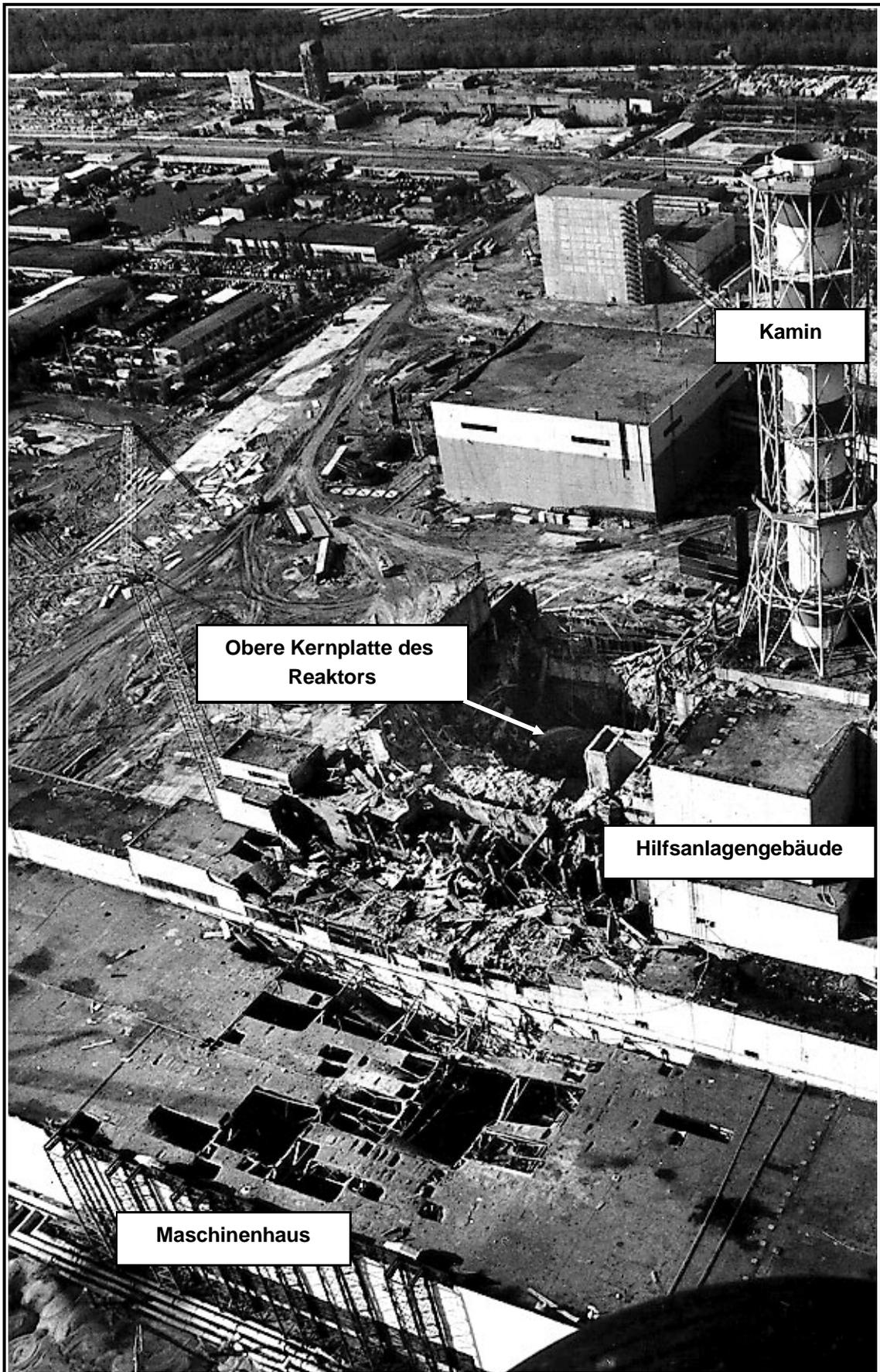
Die kurzfristige Planung und Durchführung von Maßnahmen nach dem Unfall zur Reduzierung des Voidkoeffizienten, zur Erhöhung der erforderlichen betrieblichen Reaktivitätsreserve und der Wirksamkeit des Abschaltsystems beweisen, daß wichtige Gegenmaßnahmen bereits bekannt waren. Hätte man diese vor dem 26. April 1986 durchgeführt, wäre es nicht zu dem Unfall gekommen.

### **3 Zerstörung des Reaktors und Kontamination durch radioaktive Stoffe**

Entscheidend für die radiologische Situation am Ort des Unfalls und in den betroffenen Gebieten waren Art und Menge der freigesetzten radioaktiven Stoffe, der zeitliche Verlauf der Freisetzung und die herrschenden Wetterverhältnisse, die die Ausbreitung der Kontamination bestimmten. Die radiologische Situation hat sich heute auf Grund des Abklingens der kurzlebigen Radionuklide gebessert. Zum Teil haben hierzu auch die ergriffenen Maßnahmen beigetragen. Dennoch sind weite Gebiete nach wie vor mit langlebigen Radionukliden belastet, vor allem mit Cäsium 137, das nur langsam zerfällt (Halbwertszeit 30 Jahre). Weite Flächen in der Ukraine, in Weißrußland und Rußland sind gesperrt und werden es für viele Jahre bleiben.

#### **3.1 Zerstörung der Reaktoranlage**

Die Explosion zerstörte große Teile des Reaktorgebäudes von Block 4, des Maschinenhauses sowie des Zwischentraktes. Die Wände der Reaktorhalle wurden teilweise und das Dach vollständig zerstört. In den Räumen der Dampfseparatoren traten Versetzungen und Schäden an Wänden auf. Die Räume mit den Antrieben der Hauptkühlmittelpumpen wurden ganz oder teilweise zerstört. Dagegen blieben die hermetisch abgeschlossenen Räume der Hauptkühlmittelpumpen intakt. Die obere waagerechte Platte des Reaktors ("Struktur E") mit einem Gewicht von ca. 3 000 t wurde angehoben und steht nunmehr in einem Winkel von 15° zur Senkrechten. Die unteren tragenden Strukturen des Reaktorbehälters ("Struktur OR") senkten sich um ca. 4 m und zerdrückten dabei die darunter befindlichen Verbindungsleitungen zu den einzelnen Druckrohren (Bild 3-3 und 1-9). Der südöstliche Quadrant der "Struktur OR" sowie das Notkühlssystem im Nordostteil des Reaktorgebäudes wurden vollständig zerstört. Der Reaktorschacht, in dem sich der Reaktor befand, ist praktisch leer. Ein Großteil des Kernbrennstoffes wurde in die Reaktorhalle geschleudert oder befindet sich als erstarrte Lava unterhalb der ursprünglichen Reaktorposition.



**Bild 3-1** Ausmaß der Zerstörung von Block 4 in Tschernobyl

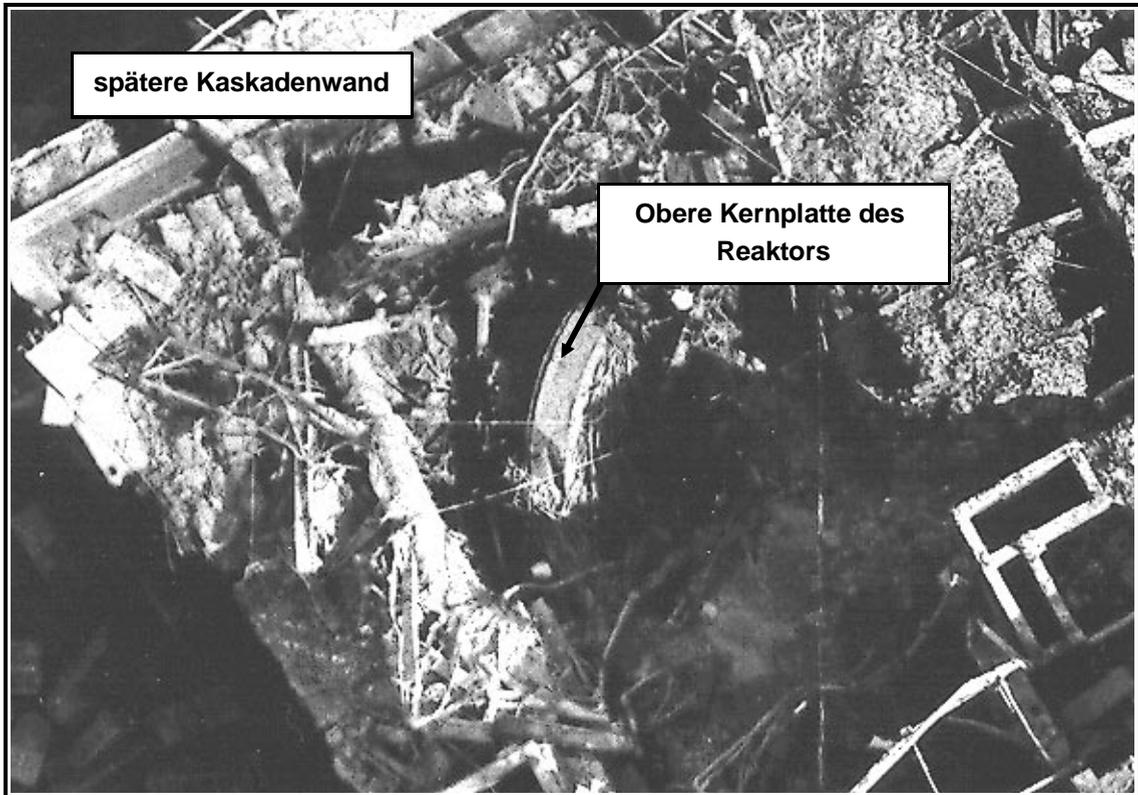
**Tabelle 3-1**      Ereignisse nach Unfallbeginn

Zeit	Ereignis
<b>26. April 1986</b>	
01:24:00	Aufzeichnung des Schichtleiters: "Starke Schläge, die Abschaltssysteme bleiben vor Erreichen der unteren Endlage stehen..."  Leistungsexkursion mit mehr als hundertfacher Nennleistung. Explosion und Zerstörung des Reaktorkerns. Die obere Platte des Reaktors wird emporgeschleudert, alle Druckröhren werden abgerissen. Kernmaterial und brennende Graphitteile werden ausgeworfen. Der Reaktor brennt, weitere Brände entstehen in der Umgebung. Massive Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten.
gegen 05:00	Brände von der Feuerwehr gelöscht. Abschalten des unmittelbar benachbarten Blocks 3.
<b>27. April 1986</b>	
01:13	Abschalten von Block 1.
02:13	Abschalten von Block 2.
<b>27. April bis 10. Mai 1986</b>	
	Zuschütten des Reaktors mit verschiedenen Materialien (ca. 2 400 t Blei, ca. 2 600 t Bor, Dolomit, Sand und Lehm). Mit dieser Maßnahme werden die Spaltproduktfreisetzung und die Direktstrahlung aus dem zerstörten Reaktor begrenzt und der brennende Graphit im Kernbereich abgedeckt.
<b>ab 4. Mai 1986</b>	
	Einblasen von Stickstoff in den Kernbereich zur Kühlung.
<b>6. Mai 1986</b>	
	Weitgehende Beendigung der Spaltproduktfreisetzung aus dem zerstörten Reaktor.

### 3.2      Zeitlicher Verlauf der Freisetzung

Zur Zeit der Explosion des Reaktors befanden sich 1 659 zweiteilige Brennelemente im Kern. Die Anreicherung des Urans betrug 2 %, der mittlere Abbrand lag nach 715 Betriebstagen bei ca. 10,3 MWd/kg.

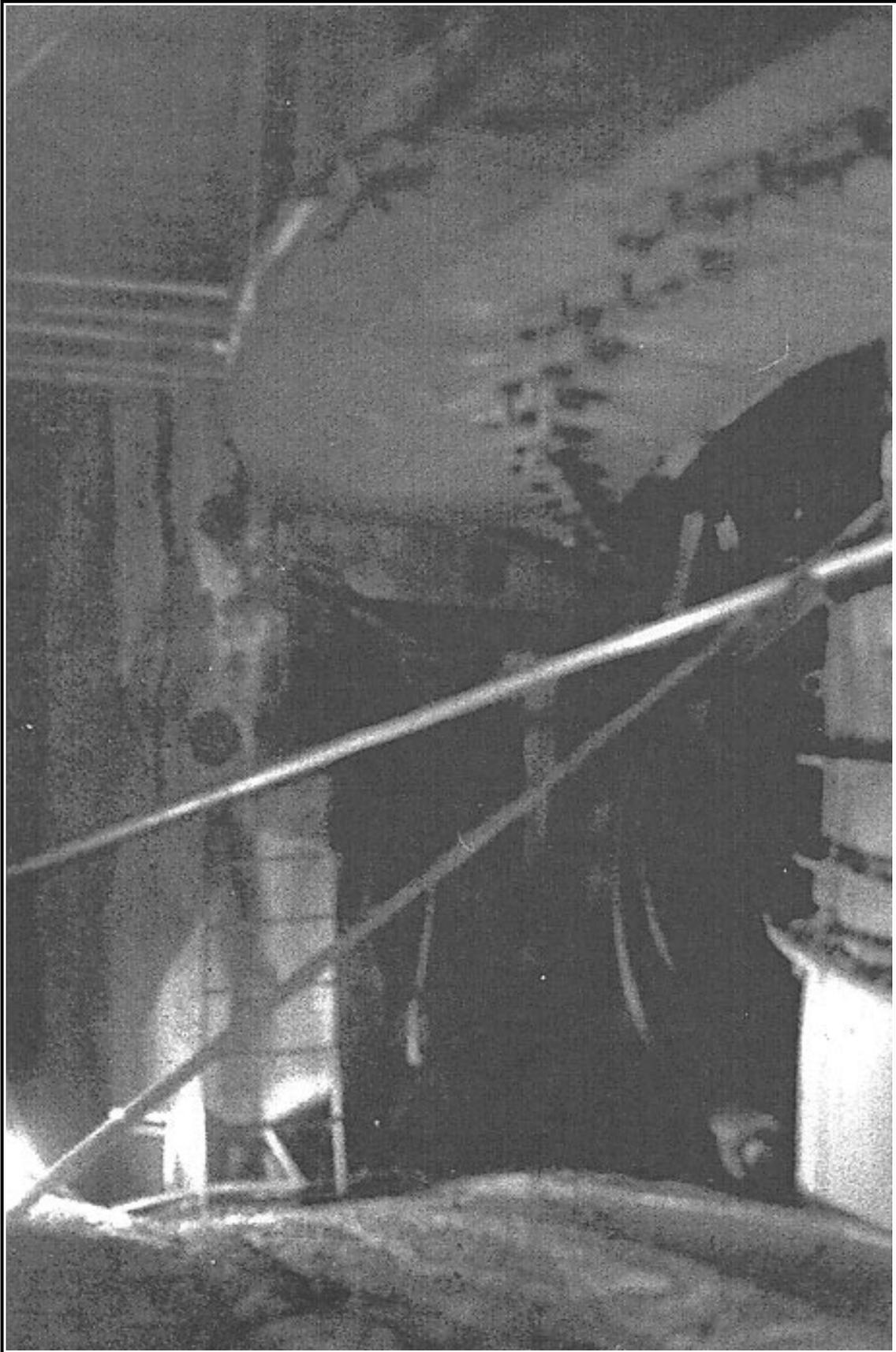
Massive Freisetzungen radioaktiver Stoffe zogen sich über zehn Tage hin. Die Intensität der Freisetzung und die Zusammensetzung der freigesetzten Radionuklide gliedern sich in 4 Phasen (Bild 3-4):



**Bild 3-2** Blick durch das zerstörte Dach in die Reaktorhalle. Die obere Kernplatte des Reaktors (Gewicht: ca. 3 000 t) wurde durch die Explosion aufgerichtet und steht nunmehr in einem Winkel von 15° zur Senkrechten.

**Phase 1:** Bei der Explosion des Reaktors und während des späteren Brandes wird ein Teil des Brennstoffs - teilweise zu Brennstoffstaub oder -körnern fraktioniert - herausgeschleudert oder ausgetragen. Edelgase und leicht flüchtige Nuklide wie Jod, Tellur und Cäsium werden massiv freigesetzt. Die Zusammensetzung der freigesetzten schwerflüchtigen Nuklide entspricht in etwa ihrem Anteil im zerstörten Reaktorkern. Der heiße Luftstrom des Graphitbrandes transportiert die radioaktiven Stoffe in mehr als 1 200 m Höhe.

**Phase 2:** In den folgenden fünf Tagen nimmt die Freisetzung auf Grund der Maßnahmen zum Löschen des Graphitbrandes und zur Abdeckung des Reaktorkerns stetig ab. Heiße Gase und Verbrennungsprodukte des Graphits reißen feindispersierte Brennstoffteilchen mit. Die Nuklidzusammensetzung der freigesetzten radioaktiven Stoffe entspricht der im Kernbrennstoff. Die Temperatur der ausströmenden heißen Gase ist niedriger als in Phase 1. Der Auftrieb vermindert sich und die freigesetzten Stoffe gelangen nur mehr in Höhen von 200 bis 400 m.

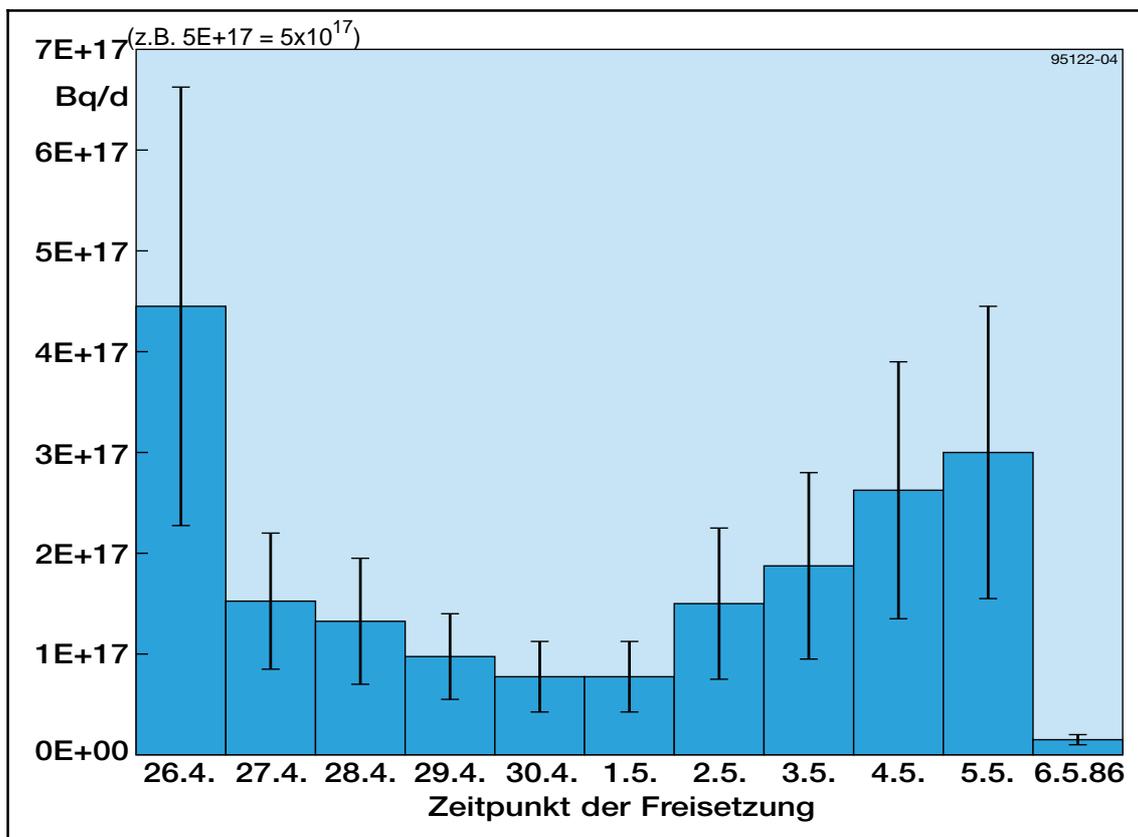


**Bild 3-3** Untere tragende Strukturen des Reaktorbehälters (Struktur "OR"), die sich um ca. 4 m abgesenkt haben

**Phase 3:** Die Freisetzung nimmt deutlich zu. Die den zerstörten Kern überdeckenden Materialien behindern die Wärmeabfuhr. Dies führt zu einer Aufheizung des Reaktorkerns auf über 2 000° C. Aus dem heißen Brennstoff wird zunächst noch verbliebenes Jod ausgetrieben, die Zusammensetzung der übrigen freigesetzten Stoffe entspricht etwa den jeweiligen Anteilen im Kernbrennstoff.

**Phase 4:** Am 6. Mai nimmt die Freisetzung abrupt ab. Dies ist überraschend und bis heute nicht vollständig erklärbar. Wesentliche Einflüsse werden den Gegenmaßnahmen und der Bildung von schwerflüchtigen Verbindungen der Radionuklide zugeschrieben. Meßbare geringere Freisetzungen dauern auch noch während des restlichen Monats an.

Im Verlauf des Unfalls schmilzt der im Reaktorschacht verbliebene Kernbrennstoff, vermischt sich mit Strukturmaterial und fließt entlang der Korridore und durch die Öffnungen in die Räume unterhalb des Reaktorschachtes. Die Schmelze vermischt sich



**Bild 3-4** Menge der freigesetzten radioaktiven Stoffe in den ersten zehn Tagen (mit Unsicherheitsbereichen)

mit weiteren Stoffen, insbesondere mit den abgeworfenen Materialien wie Blei und Sand. Insgesamt wurden von Hubschraubern 5 000 t Material abgeworfen, um die Freisetzung radioaktiver Stoffe einzudämmen. Die Kernschmelze erstarrt schließlich.

Die bis zum 6. Mai freigesetzte Menge der radioaktiven Stoffe - ohne Berücksichtigung der meist kurzlebigen Edelgase und des Tritiums - wurde 1986 zu  $2 \times 10^{18}$  Bq abgeschätzt, mit einer Unsicherheit  $\pm 50$  %. Neuere Analysen bestätigen die früheren Abschätzungen. Der Anteil an Kernbrennstoff, der sich außerhalb des Reaktors befindet, wurde 1986 mit  $(3,5 \pm 0,5)$  % der Kernbrennstoffmasse (190 t) ermittelt. Auch dieser Wert wird durch neuere Untersuchungen bestätigt.

Die Edelgase Krypton und Xenon sowie das im Kern enthaltene Tritium entweichen praktisch vollständig.

Größere Unsicherheiten bestehen nach wie vor bei der Abschätzung der freigesetzten Anteile der leichtflüchtigen Cäsium- und Jodisotope. Die ursprünglich mit 13 % des entsprechenden Kerninventars angegebene Cäsium 137-Freisetzung wird nach neuen Untersuchungen als zu niedrig angesehen. Eine neuere Bilanzierung führt für die Cäsium 137-Freisetzung zu einem Wert von  $(33 \pm 10)$  % des entsprechenden Kerninventars. Dies entspricht einer Aktivität von  $(8,5 \pm 2,6) \times 10^{16}$  Bq.

Noch unsicherer ist die Bestimmung der Freisetzung der Jodisotope, die sowohl als Aerosol als auch in gasförmigem Zustand auftreten können. Die relative Konstanz des Verhältnisses Jod 131 und Cäsium 137 im Fallout in den meisten europäischen Staaten erlaubt es, die Freisetzung des Jods nach unten hin einzugrenzen. Als genaueste Abschätzung ist ein freigesetzter Anteil von mindestens 50 % des Jod 131-Kerninventars anzunehmen. Dies entspricht unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls einer Aktivitätsfreisetzung von ca.  $1,3 \times 10^{18}$  Bq.

Repräsentativ für die Gruppe der schwer flüchtigen Radionuklide ist Strontium 90 mit einem freigesetzten Anteil von 4 % des Gesamtinventars. Für die Freisetzung der zum großen Teil langlebigen alphastrahlenden Aktiniden, also insbesondere für Plutonium, wird ein Anteil von 3 % abgeschätzt.

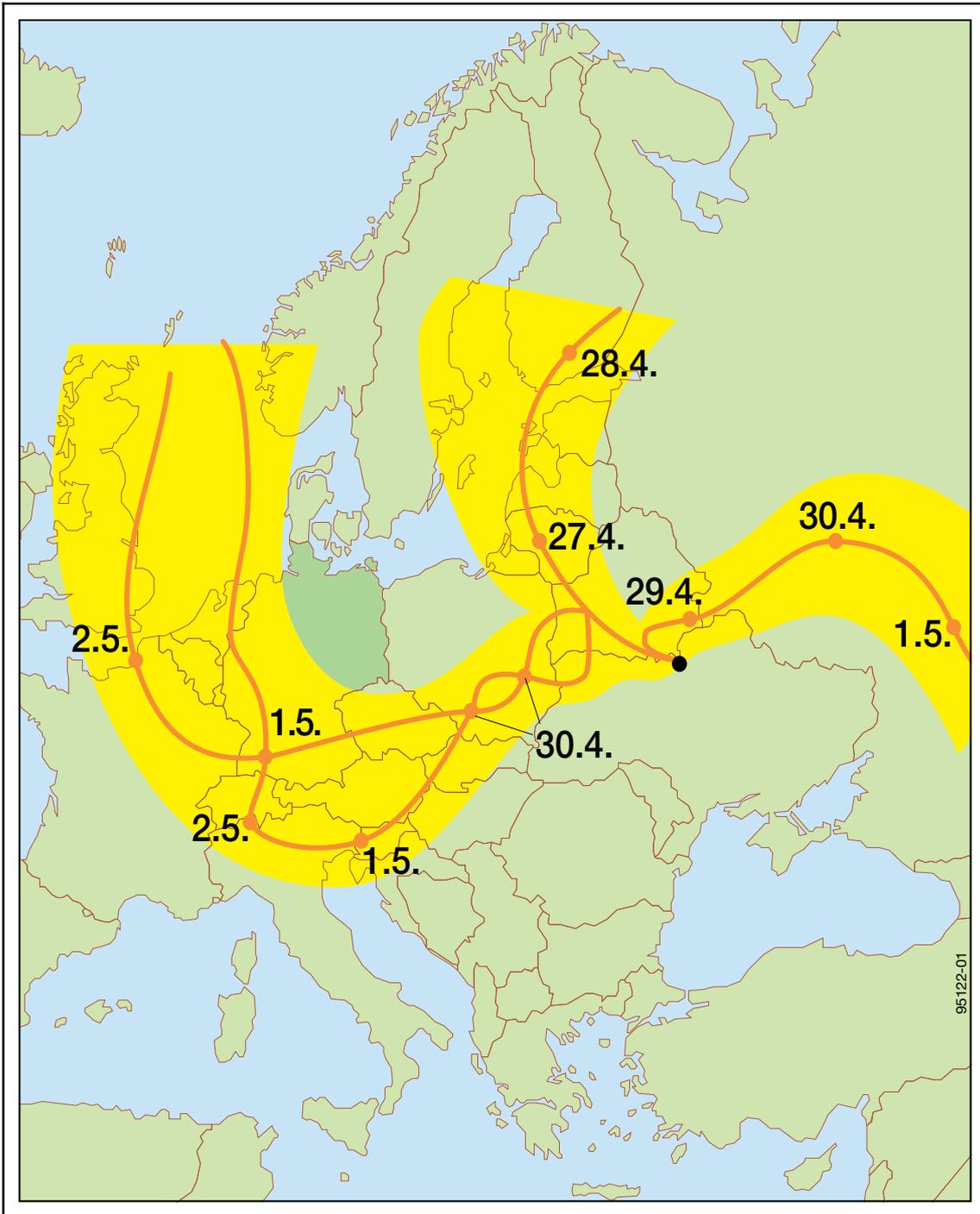
**Tabelle 3-2** Freisetzungsanteile der wichtigsten Radionuklide

Radionuklid	Halbwertszeit [Tage]	Kerninventar [Bq]	abgeschätzter freigesetzter Anteil [%]
Krypton 85	3 930	$3,3 \times 10^{16}$	100
Xenon 133	5,27	$7,3 \times 10^{18}$	100
Jod 131	8,05	$3,1 \times 10^{18}$	50
Tellur 132	3,25	$3,2 \times 10^{18}$	15
Cäsium 134	750	$1,9 \times 10^{17}$	33
Cäsium 137	11 000	$2,9 \times 10^{17}$	33
Ruthen 106	368	$2,0 \times 10^{18}$	3
Strontium 89	53	$2,3 \times 10^{18}$	4
Strontium 90	10 200	$2,0 \times 10^{17}$	4
Plutonium 238	31 500	$1,0 \times 10^{15}$	3
Plutonium 239	8 900 000	$8,5 \times 10^{14}$	3
Plutonium 240	2 400 000	$1,2 \times 10^{15}$	3
Plutonium 241	4 800	$1,7 \times 10^{17}$	3
Curium 242	164	$2,6 \times 10^{16}$	3

### 3.3 Ausbreitung der freigesetzten radioaktiven Stoffe

Während des gesamten Zeitraums der Freisetzung von etwa zehn Tagen haben sich die Wetterbedingungen in der näheren und weiteren Umgebung des Standortes erheblich verändert. Die durch die Explosion und den Brand am 26. April 1986 freigesetzten radioaktiven Stoffe wurden zunächst in großer Höhe in nordwestliche Richtung über Weißrußland bis nach Finnland und in den mittleren und nördlichen Teil von Schweden transportiert. Am folgenden Tag drehte der Wind in westliche Richtung. Der Weg der radioaktiv kontaminierten Luftmassen führte über Polen, Tschechien, Österreich nach Süddeutschland, wo sie zwischen dem 30. April und dem 1. Mai eintrafen (Bild 3-5).

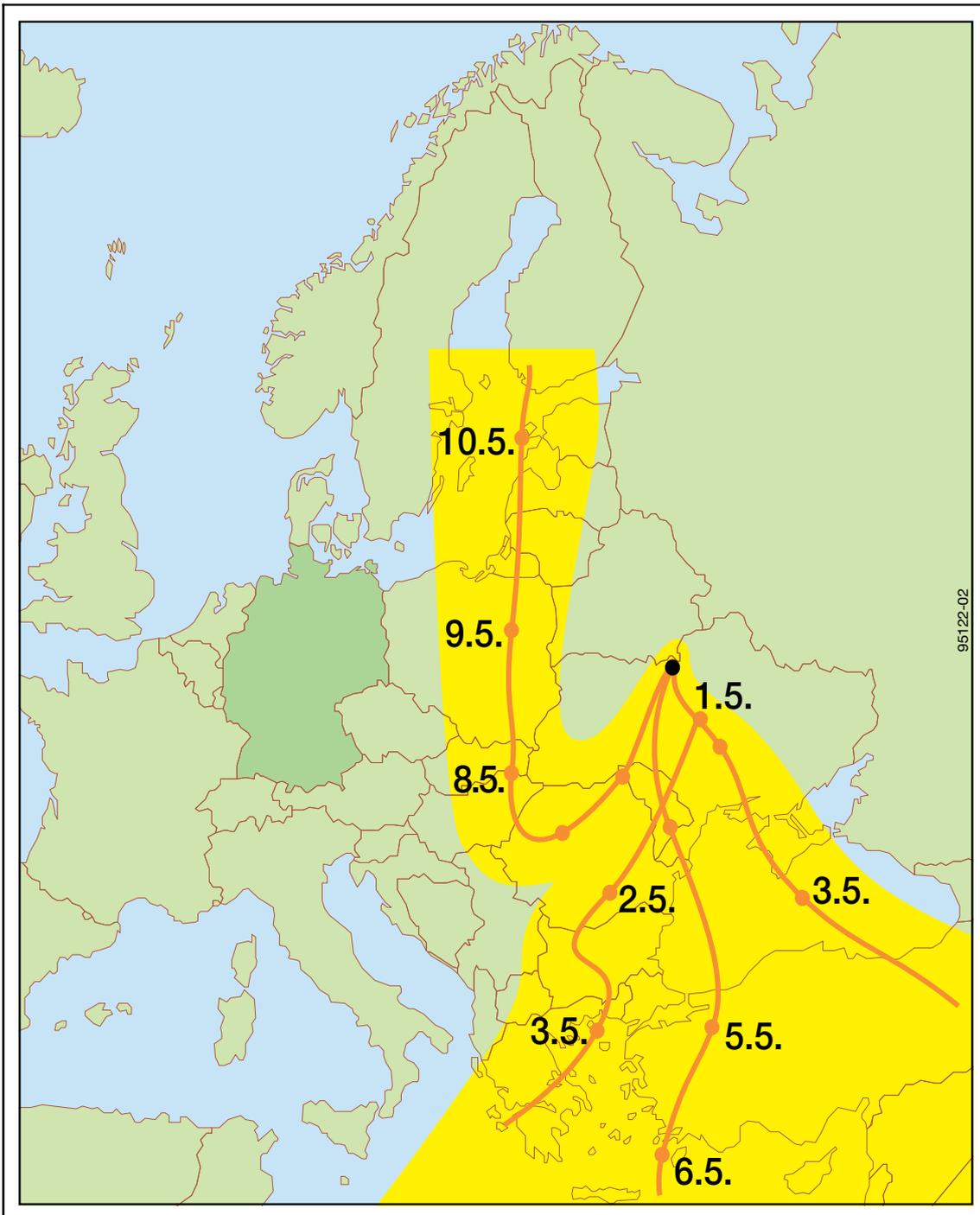
Die Fahne breitete sich anschließend in nordwestlicher Richtung über den westlichen Teil Deutschlands und den Nordosten Frankreichs aus und erreichte am 2. Mai Großbritannien und Schottland. Während dieser Zeit bildete sich am Unfallort eine weitere Ausbreitungsfahne Richtung Osten aus, die eine schwächere Kontamination bis in den



**Bild 3-5** Hauptausbreitungsrichtungen vom 27. April bis 2. Mai 1986

Raum südlich von Moskau verursachte. Die naheliegende Großstadt Kiew blieb außerhalb der Hauptwege der Ausbreitung.

Die Höhe der schließlich aufgetretenen Kontamination wurde nicht nur durch meteorologische Parameter wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit bestimmt. Ganz

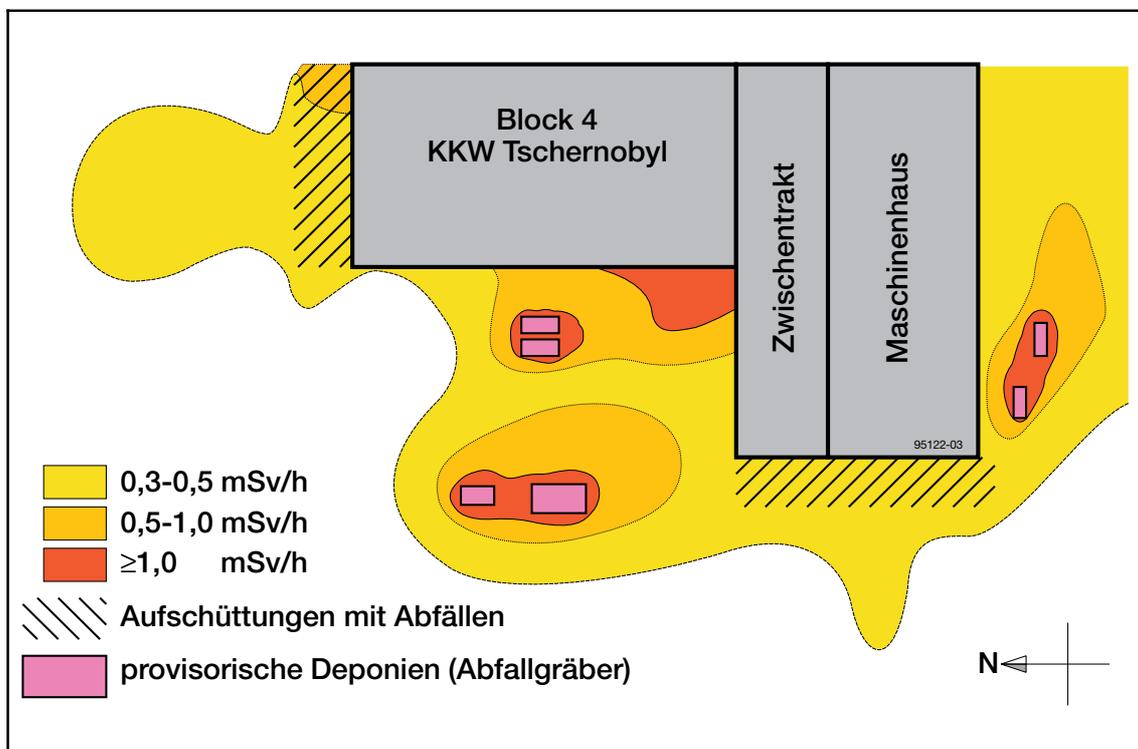


**Bild 3-6** Hauptausbreitungsrichtungen vom 1. bis 10. Mai 1986

entscheidend war auch die Intensität der auftretenden Regenfälle, durch die die radioaktiven Stoffe ausgewaschen und niedergeschlagen wurden. Dementsprechend zeigen sich lokal sehr unterschiedliche Kontaminationsgrade. Außerdem spielten auch Bodenrelief und Bewuchs, z.B. Waldgebiete, eine Rolle.

### 3.4 Radioaktive Kontamination und Strahlungssituation am Unfallort

Die heute bestehenden Strahlungsfelder am Standort des Kernkraftwerks Tschernobyl, insbesondere in der Nähe des havarierten Blockes 4, sind bekannt. Es liegen dazu Meßwerttabellen und Kartogramme der Dosisleistung in einem dichten Meßwertraster mit einigen Metern Abstand und in verschiedenen Höhen vor. Bild 3-7 zeigt ein Kartogramm der Ortsdosisleistung in 1 m Höhe über Grund. Bestimmendes Radionuklid ist Cäsium 137. Die Dosisleistung der Gammastrahlung beträgt in der unmittelbaren Umgebung des Sarkophags sowie des Zwischentraktes und des Maschinenhauses des Blockes 4 in einem Meter Höhe über Grund etwa 0,3 bis 0,5 mSv/h. Die Dosisleistung in Entfernungen bis etwa 150 m von den genannten Gebäuden beträgt etwa 0,1 bis 0,2 mSv/h.



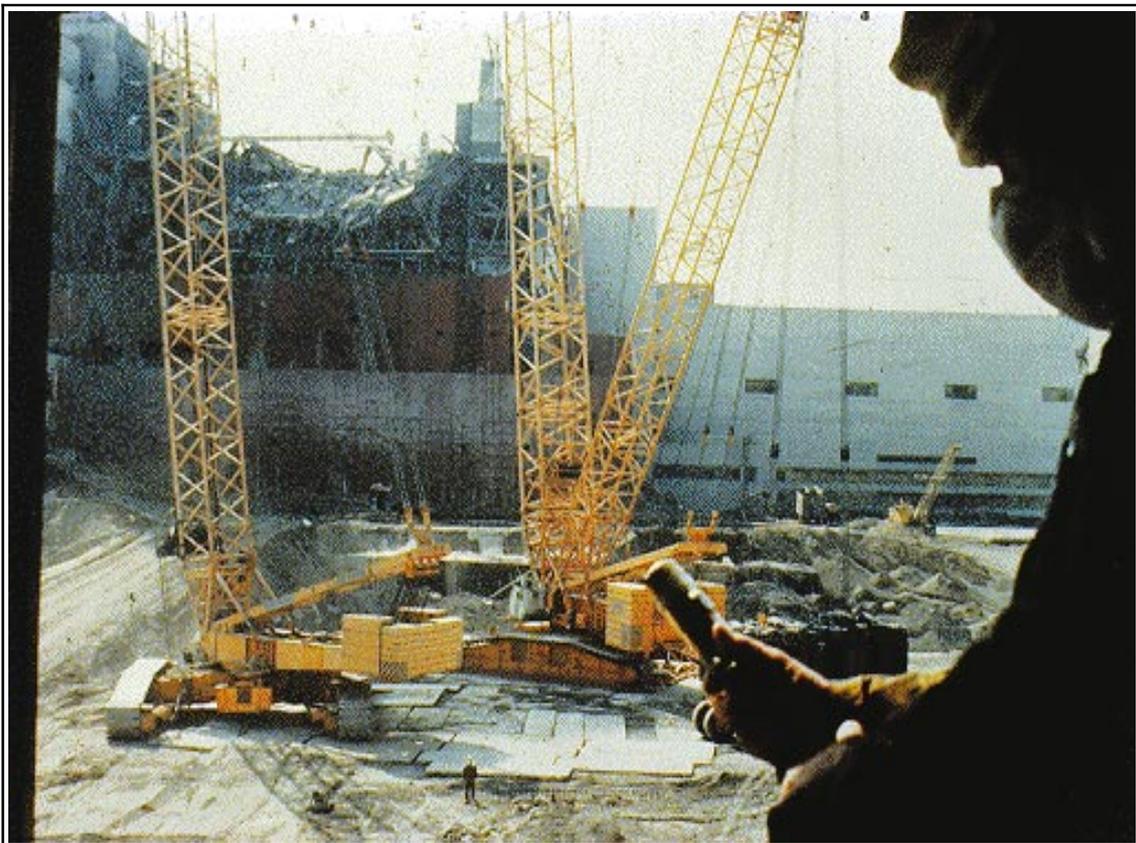
**Bild 3-7** Kartogramm der Ortsdosisleistung von Cäsium 137 in einem Meter Höhe über Grund

Am Standort befinden sich etwa zehn Deponien mit radioaktiven Stoffen, vor allem an der Westwand des Sarkophags. Mindestens in drei dieser Deponien werden hochradioaktive Abfälle, eventuell Trümmerstücke aus dem Reaktorkern, vermutet. Zwei Deponien mit einer Dosisleistung oberhalb 10 mSv/h befinden sich etwa in Mitte der Westwand in einem Abstand von etwa 20 m, eine dritte mit einer Dosisleistung oberhalb etwa 50 mSv/h in einem Abstand von etwa 50 m. Auch unmittelbar hinter der Südwand des Maschinenhauses wurden Deponien angelegt (Dosisleistung bis 5 mSv/h).

Im Norden und Nordosten des Sarkophags bis zu Entfernungen von etwa 100 m wurden mehrere Bohrlöcher zur Untersuchung der radioaktiven Kontamination des Bodens und des Grundwassers niedergebracht. Daraus ergibt sich, daß das ursprünglich in bis zu einigen 10 cm Tiefe verteilte kontaminierte Material nunmehr in einer Tiefe von etwa zwei bis drei Metern unter aufgeschütteten Schotter- und Betonschichten liegt. Der Grundwasserspiegel liegt etwa fünf Meter unterhalb dieser radioaktiven Schicht.

Die Deponien wurden weder systematisch eingerichtet noch durch geeignete Schichten abgedichtet. Damit ist eine Auswaschung und Wanderung von Radionukliden in das Grundwasser möglich.

Die Kontamination des Grundwassers durch die großflächige kontaminierte Schicht sowie durch die radioaktiven Abfälle in den Deponien erscheint wesentlich problematischer als ein möglicher Austrag von Radioaktivität aus dem bestehenden Sarkophag.



**Bild 3-8** Messung der radioaktiven Strahlung am Kraftwerkstandort vom Hubschrauber aus

### 3.5 Radiologische Situation in der 30-km-Zone

Was die großflächigen Kontaminationen betrifft, so befinden sich derzeit die Radionuklide im wesentlichen in einer etwa 5 cm dicken Schicht der Bodenoberfläche. 1990 betrug diese Schicht noch etwa 1,0 bis 1,5 cm (fortschreitende Migration in die Tiefe).

Ein anderes Problem ist mit dem sich ändernden chemischen Zustand der Abfälle verbunden. Feuchte und organische Bestandteile im Boden mobilisieren die radioaktiven Stoffe.

Das Gebiet mit einer Plutonium-Kontamination (Pu-239 und Pu-240) oberhalb  $3,7 \times 10^{10}$  Bq/km<sup>2</sup> umfaßt in der 30-km-Zone etwa 360 km<sup>2</sup>. Die spezifische Plutoniumaktivität des Bodens liegt in diesem Gebiet oberhalb 370 Bq/kg.

In der 30-km-Zone befinden sich weiterhin Deponien mit radioaktiven Abfällen aus dem Betrieb der Blöcke 1, 2 und 3 sowie mit radioaktiven Abfällen, die vom Unfall des Blockes 4 herrühren. Letztere wurden auf Grund der Umstände unsachgemäß konditioniert und an verschiedenen Orten deponiert. Zu diesen Orten gehören der Sarkophag (z.B. Verwendung von Abfällen als Verfüllmaterial für neu errichtete Wände), Plätze für eine einfache Zwischenlagerung (Vergrabung von Abfällen) sowie endgültige Lagerstätten. Die Abfälle weisen sehr unterschiedliche spezifische Aktivitäten auf und enthalten häufig langlebige Alphastrahler. Einige Abfälle sind hochradioaktiv. Oft ist die Zusammensetzung der Abfälle nur unzureichend oder gar nicht bekannt.

In der 30-km-Zone befinden sich mehrere überwachte Zwischen- und Endlager, die nicht den Anforderungen an eine langfristige Endlagerung radioaktiver Abfälle genügen. Zu diesen Deponien gehören: "Komplexnuj" (Stahlbetonwanne mit Lehmschichtabdeckung auf der Baustelle für die Blöcke 5 und 6 des Kernkraftwerks, Inhalt 11 500 Behälter mit festen radioaktiven Abfällen), "Burakowka" (Grabentyp mit 30 Gräben in 12 km Entfernung vom Kernkraftwerk, mit 200 000 m<sup>3</sup> niedrig- und mittelradioaktiven Abfällen mit insgesamt  $5,5 \times 10^{14}$  Bq) und "Podlesnuj" (Modultyp in 1,5 km Entfernung vom Kernkraftwerk, ausgelegt für 5 Millionen m<sup>3</sup> hochradioaktiver Abfälle). Diese in der Ukraine gewählte Einteilung der Abfälle in niedrig-, mittel- und hochradioaktive entspricht nicht den international gebräuchlichen Klassifizierungen.

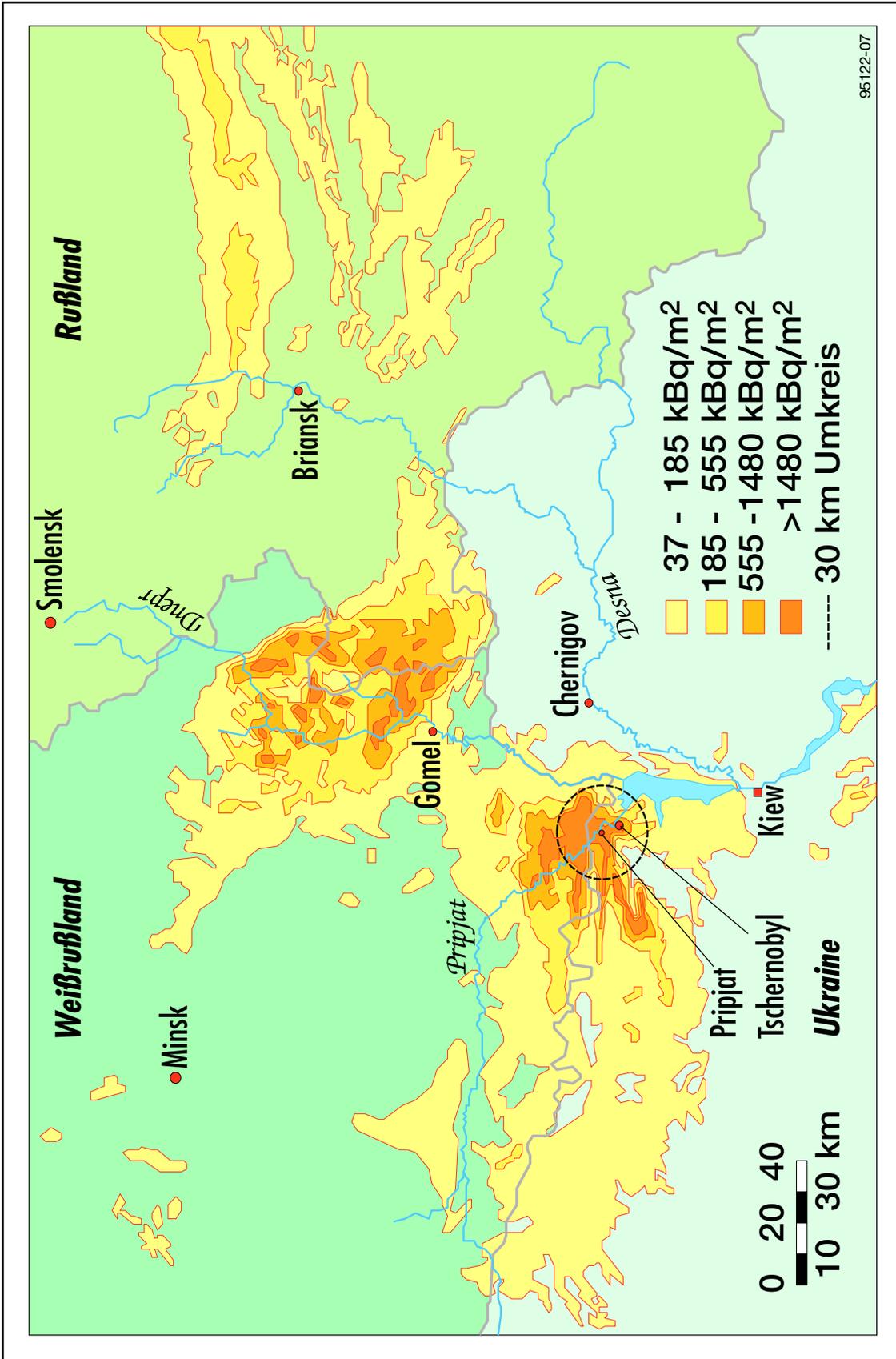
Die Abfälle sind sehr verschiedenartig, werden von unterschiedlichen Bodenarten umschlossen und sind zum Teil einer Erhöhung des Grundwasserspiegels ausgesetzt. Ein großer Teil der Abfälle mit einem Gesamtvolumen von 1,1 Millionen m<sup>3</sup> und einer Gesamtaktivität von  $1,4 \times 10^{16}$  Bq ist in Gräben und Mulden, die nicht gegen Wasserzutritte geschützt sind, eingelagert. Die derzeit gemessene Aktivität im Grundwasser in der Nähe dieser Lager wird überwiegend von Strontium 90 bestimmt. Die Konzentration überschreitet dort den für die Bevölkerung zulässigen Wert für Trinkwasser teilweise um mehr als das Hundertfache. Nach Experteneinschätzungen sind an diesen Stellen etwa 15 % der Strontium 90-Kontamination als mobile Verbindungen in das Grundwasser übergegangen. Die Cäsium 137- und Plutoniumkonzentrationen im Grundwasser liegen dort um etwa eine Größenordnung niedriger als die von Strontium. In anderen kontaminierten Bereichen überwiegt jedoch die Cäsium 137-Kontamination gegenüber der Strontium 90-Kontamination.

### **3.6 Großflächige Kontamination in der Ukraine, in Weißrußland und Rußland**

Bereits unmittelbar nach dem Unfall wurden umfangreiche Messungen der Luftbelastungen (Aerogamma-Messungen) und der Bodenkontamination durchgeführt. Später wurden Boden-, Wasser- und Bioproben entnommen und auf radioaktive Stoffe untersucht. Diese mehr als hunderttausend Messungen, an denen eine Vielzahl von Institutionen der früheren Sowjetunion teilgenommen hat, dienen zur Beschreibung der radioaktiv kontaminierten Gebiete durch Kartogramme, auf deren Grundlage Schutz- und Dekontaminationsmaßnahmen ergriffen wurden.

In den ersten Monaten nach der Freisetzung war das radioaktive Jod, das zu einer Belastung der Schilddrüse führt, besonders bedeutsam. Aufgrund der kurzen Halbwertszeit blieb die Einwirkung von radioaktivem Jod jedoch auf diesen Zeitraum begrenzt. Das kritische Nuklid ist nunmehr das Cäsium 137 mit einer Halbwertszeit von etwa 30 Jahren, das über weite Gebiete verteilt wurde (Bild 3-9).

Das Nuklid Strontium 90 mit einer Halbwertszeit von etwa 28 Jahren ist, außer im Nahbereich der gesperrten 30-km-Zone um das Kernkraftwerk Tschernobyl und in Gebieten um Gomel, weniger bedeutsam. Als reiner Beta-Strahler trägt es zwar nicht zur externen Strahlenexposition bei, ist jedoch wegen seiner Akkumulation in pflanzlichen Nahrungsmitteln und wegen seiner Eigenschaften als "Knochensucher" besonders ge-



**Bild 3-9** Kontamination durch Cäsium 137 in der Ukraine, in Weißrußland und Rußland

fährlich. Die insgesamt freigesetzte Strontiumaktivität ist wesentlich geringer als die des Cäsiums und wurde über kürzere Entfernungen verteilt.

Die mit Cäsium, Strontium und Plutonium kontaminierten Gebiete Rußlands, der Ukraine und Weißrußlands sind in den Bildern 3-9 bis 3-11 dargestellt. Die Kontaminationen in den westeuropäischen Ländern waren wesentlich geringer.

Von den früheren sowjetischen Behörden wurden die kontaminierten Gebiete entsprechend dem Kontaminationsgrad in drei Zonen eingeteilt:

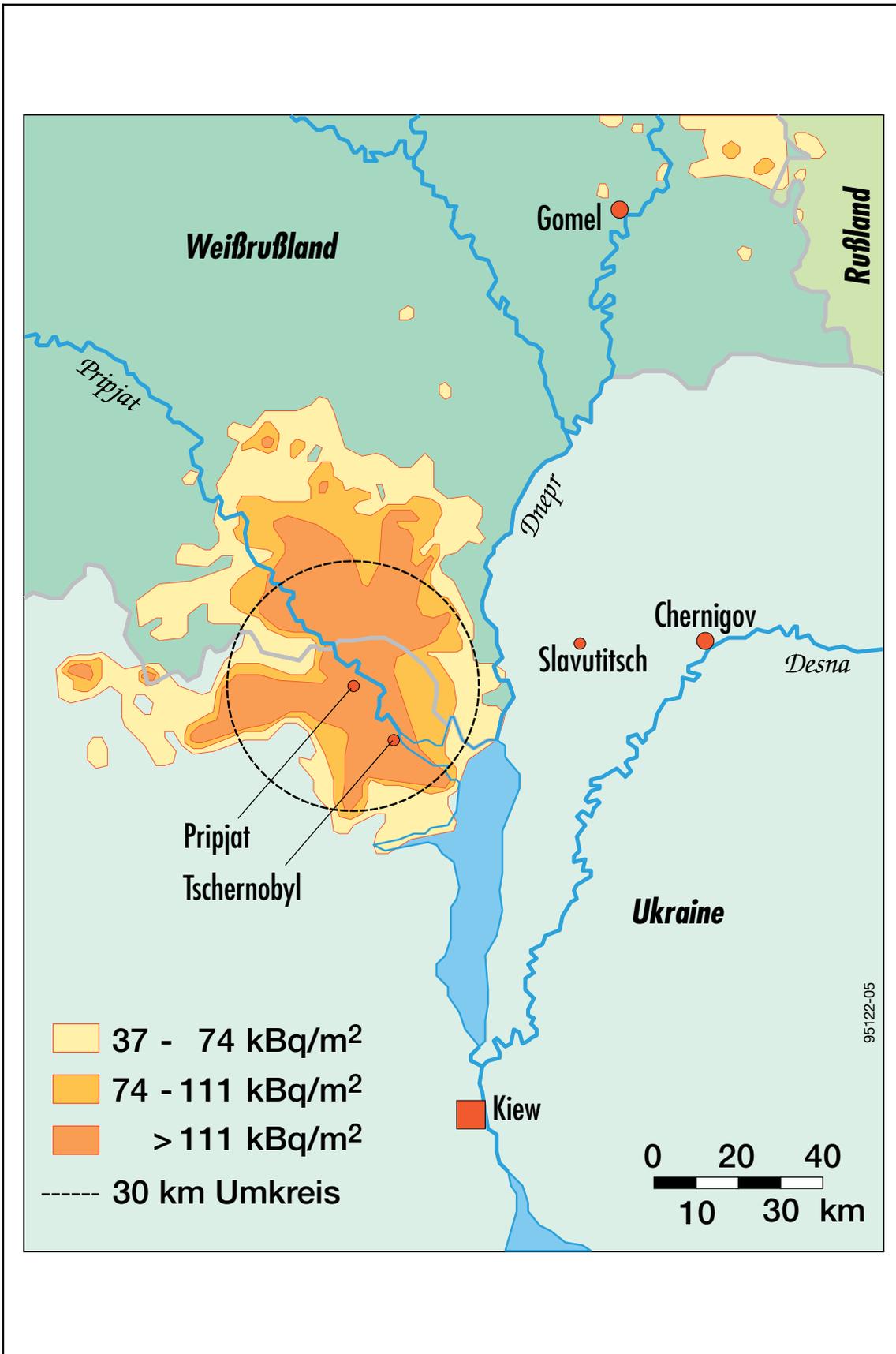
- **Zone 1: Zone der gelegentlichen Kontrollen**  
Gebiete mit einer Cs 137-Kontamination zwischen 37 und 555 kBq/m<sup>2</sup>  
(1-15 Ci/km<sup>2</sup>)
  
- **Zone 2: Zone der ständigen Kontrolle**  
Gebiete zwischen 555 kBq/m<sup>2</sup> und 1 480 kBq/m<sup>2</sup> (15-40 Ci/km<sup>2</sup>)
  
- **Zone 3: Zone der strikten Kontrolle**  
Gebiete mit einer Kontamination von mehr als 1 480 kBq/m<sup>2</sup> (mehr als 40 Ci/km<sup>2</sup>).

Die Zonen 2 und 3 werden im folgenden als "engere Kontrollzonen" bezeichnet.

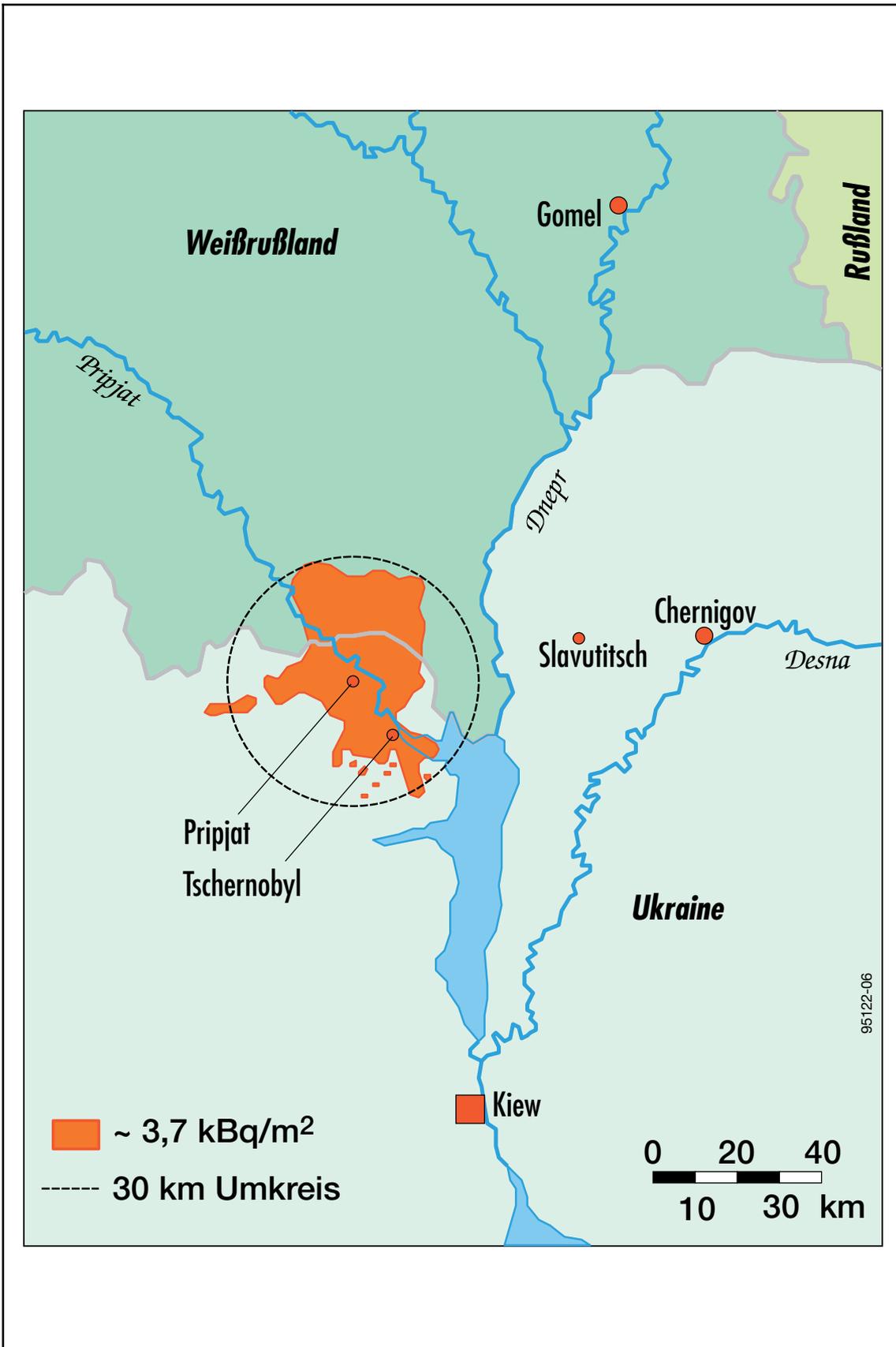
In Weißrußland erstrecken sich die engeren Kontrollzonen über 7 000 km<sup>2</sup>, in Rußland über 2 000 km<sup>2</sup> und in der Ukraine über 1 000 km<sup>2</sup>. Zum Vergleich die durch den Unfall von Tschernobyl in Südbayern verursachte Cäsiumkontamination: sie erreichte in lokal stark begrenzten Gebieten in Südostbayern 100 kBq/m<sup>2</sup> und um München 20 kBq/m<sup>2</sup>.

In Weißrußland befinden sich in der engeren Kontrollzone noch etwa 440 Ansiedlungen mit 109 000 Einwohnern. In der Russischen Föderation leben im Gebiet von Brjansk 112 000 Einwohner in 274 Orten, in der Ukraine 52 000 Einwohner in 73 Orten in der engeren Kontrollzone. Etwa ein Drittel dieser insgesamt 273 000 Einwohner sind Kinder. Diese Zahlen unterliegen ständigen Änderungen, einerseits infolge ungeplanter Umsiedlungen und Abwanderungen und andererseits durch Einbeziehung zusätzlicher Orte in die engere Kontrollzone.

Die Strahlenschutzkommission der früheren Sowjetunion empfahl eine Reihe von Maßnahmen zur Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung in den am stärksten kontaminierten Gebieten. Dadurch sollte die Dosis für eine Einzelperson im ersten



**Bild 3-10** Kontamination durch Strontium 90 in der weiteren Umgebung von Tschernobyl



**Bild 3-11** Kontamination durch Plutonium 239 und 240 in der weiteren Umgebung von Tschernobyl

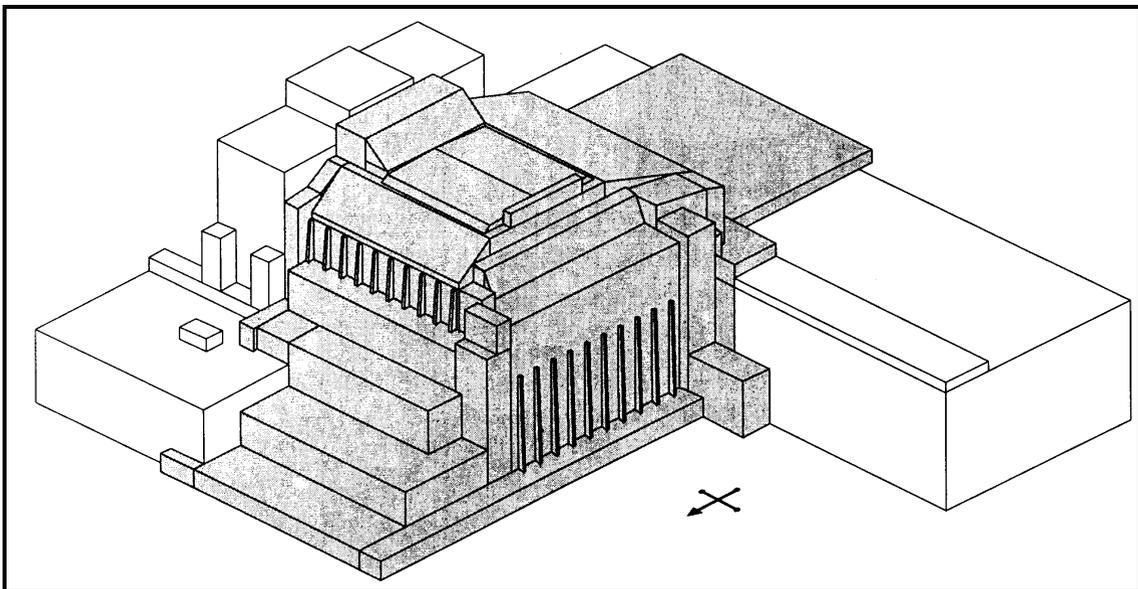
Jahr auf höchstens 100 mSv, im folgenden Jahr auf 30 mSv und dann auf 25 mSv pro Jahr begrenzt werden. Entsprechend wurden Grenzwerte für die Kontamination von Nahrungsmitteln abgeleitet. In einer Abschätzung geben sowjetische Wissenschaftler an, daß die 273 000 Personen in den engeren Kontrollzonen im Zeitraum bis Ende 1989 im Mittel eine Ganzkörperdosis von insgesamt mehr als 50 mSv durch den Reaktorunfall erhalten haben. Pro Jahr hat damit die betroffene Bevölkerung im Mittel mit etwa 10 mSv die vier- bis fünffache Jahresdosis im Vergleich zur natürlichen Strahlendosis in Deutschland erhalten.

Als Kriterium für die Umsiedlung wurde von der Strahlenschutzkommission der früheren Sowjetunion das Konzept einer unfallbedingten maximalen Lebenszeitdosis von 350 mSv eingeführt. Aus diesem Konzept folgt, daß zusätzlich zu den bereits bisher umgesiedelten Personen zukünftig noch einige weitere 10 000 Personen umgesiedelt werden müßten. In den Gebieten der Zone 1 ist im allgemeinen ein Leben ohne radiologisch bedingte Einschränkungen möglich.

## 4 Sarkophag

### 4.1 Errichtung des Sarkophags

Nach der Explosion im Block 4 in Tschernobyl war es vordringlich, den zerstörten Reaktor von der Umwelt zu isolieren, um einen weiteren Austrag hochradioaktiver Stoffe zu verhindern. Dazu wurde in der Zeit von Mai bis Oktober 1986 eine als "Objekt Einschluß" bzw. "Sarkophag" bezeichnete Konstruktion aus Beton und Stahl um den zerstörten Reaktor errichtet. Wegen der Dringlichkeit blieb keine Zeit für eine detaillierte Planung.

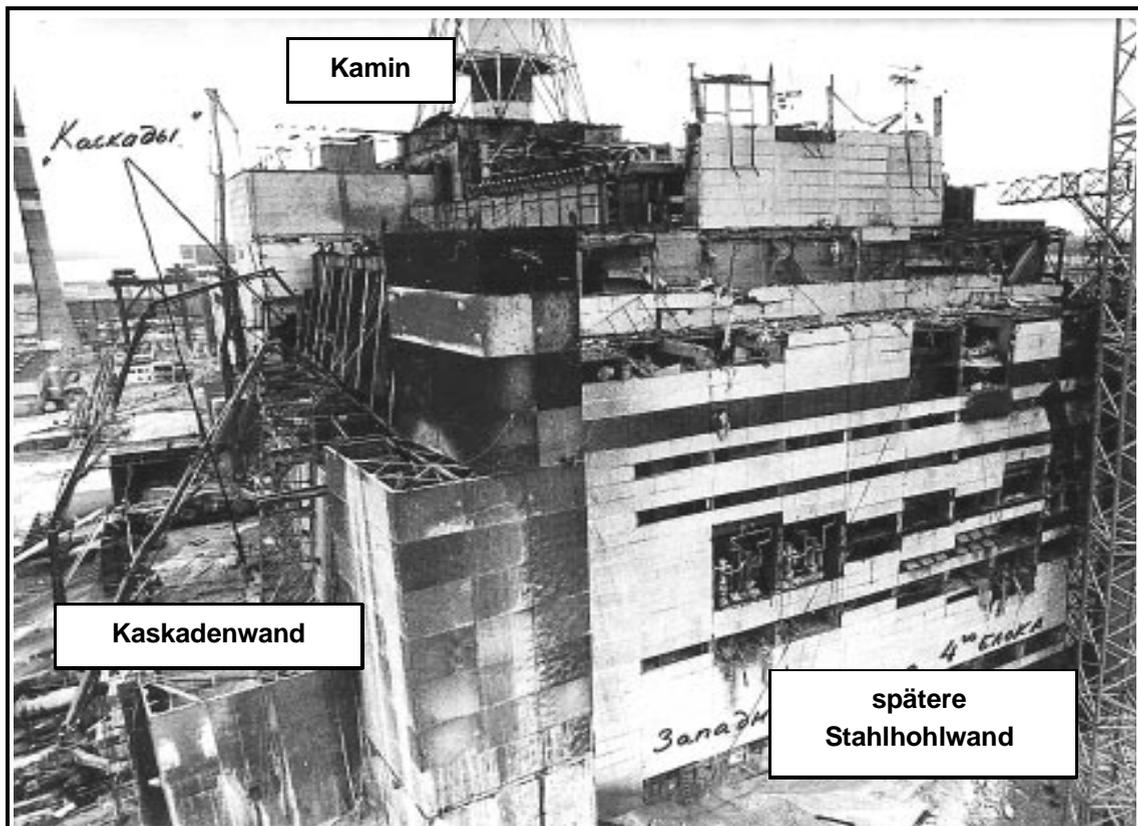


**Bild 4-1** Schematische Darstellung des Sarkophags, der von Mai bis Oktober 1986 errichtet wurde

Besondere Anforderungen ergaben sich aus dem Ziel, den dritten Reaktorblock des Kernkraftwerks, der mit dem zerstörten Reaktor unter anderem über das gemeinsame Maschinenhaus und das Hilfsanlagegebäude verbunden war, weiter zu betreiben. Dies erforderte eine bauliche Abgrenzung der beiden Blöcke.

Im Maschinenhaus wurde eine Trennwand zwischen dem Bereich des Blockes 3 und 4 errichtet. In dem zwischen den beiden Reaktorblöcken angeordneten Hilfsanlagegebäude (Bild 1-8) wurden in der Nähe des vierten Blocks Räume ganz mit Beton aufgefüllt, so daß eine bis zu 6 m starke Absperrung entstand.

Auf der nördlichen Seite wurde eine in vier Kaskaden hochgeführte, etwa 50 m hohe Schutzwand aus Beton errichtet (Bild 4-2). In diese "Kaskadenwand", die im unteren Bereich rund 20 m dick ist, soll ein erheblicher Teil der während der Explosion aus dem Reaktor ausgetragenen radioaktiven Trümmer einbetoniert worden sein. Auf Fotografien aus der Zeit der Errichtung ist zu erkennen, daß dabei auch größere Gebinde einbetoniert wurden. Vor der weitgehend erhalten gebliebenen Westwand des Reaktorgebäudes wurde von außen eine Stahlhohlwand mit Strebepfeilern errichtet.



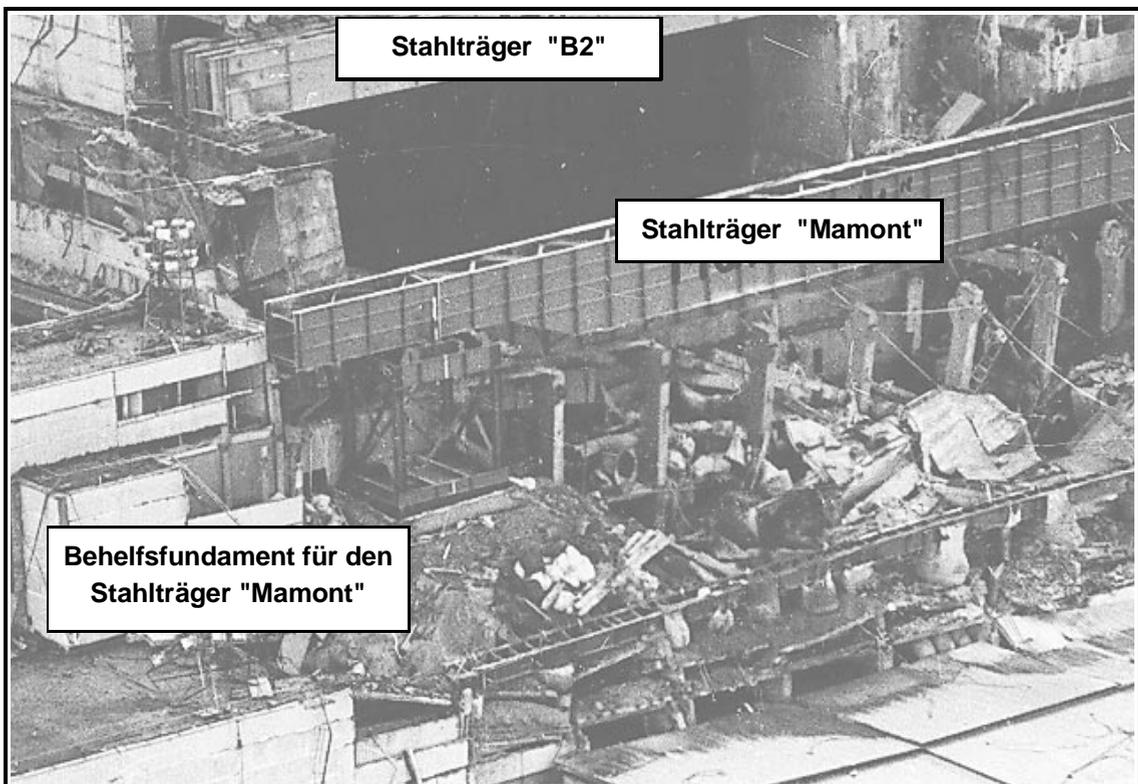
**Bild 4-2** Blick auf die im Bau befindliche "Kaskadenwand" und die Westwand, vor der später die Stahlhohlwand errichtet wurde

Als Stützkonstruktion für das Sarkophagdach wurden die erhalten gebliebene Westwand des Reaktorgebäudes und zwei auf der Ostseite erhalten gebliebene Luftschächte aus Stahlbeton verwendet. Auf diesen Strukturen ruhen als Hauptträger des Sarkophagdaches zwei Stahlträger B 1 und B 2 (Bild 4-3). Auf diese beiden Stahlträger wurden Stahlrohre von 1,2 m Durchmesser gelegt und darauf eine Dachkonstruktion aus Stahl und profilierten Dachplatten aufgesetzt. Diese Decke schließt den früheren Reaktorsaal heute nach oben ab.

Auf der Nordseite wurde die Kaskadenwand praktisch bis zum Dach geführt. Auf der Südseite wurden zwei große Stahlträger - "Mamont" und "Osminok" - eingezogen (Bild



**Bild 4-3** Zerstörter Block 4: Während der Konstruktionsphase des Sarkophags



**Bild 4-4** Stahlträger "Mamont" auf der Südseite des zerstörten Blocks, der sich auf Behelfsfundamente abstützt



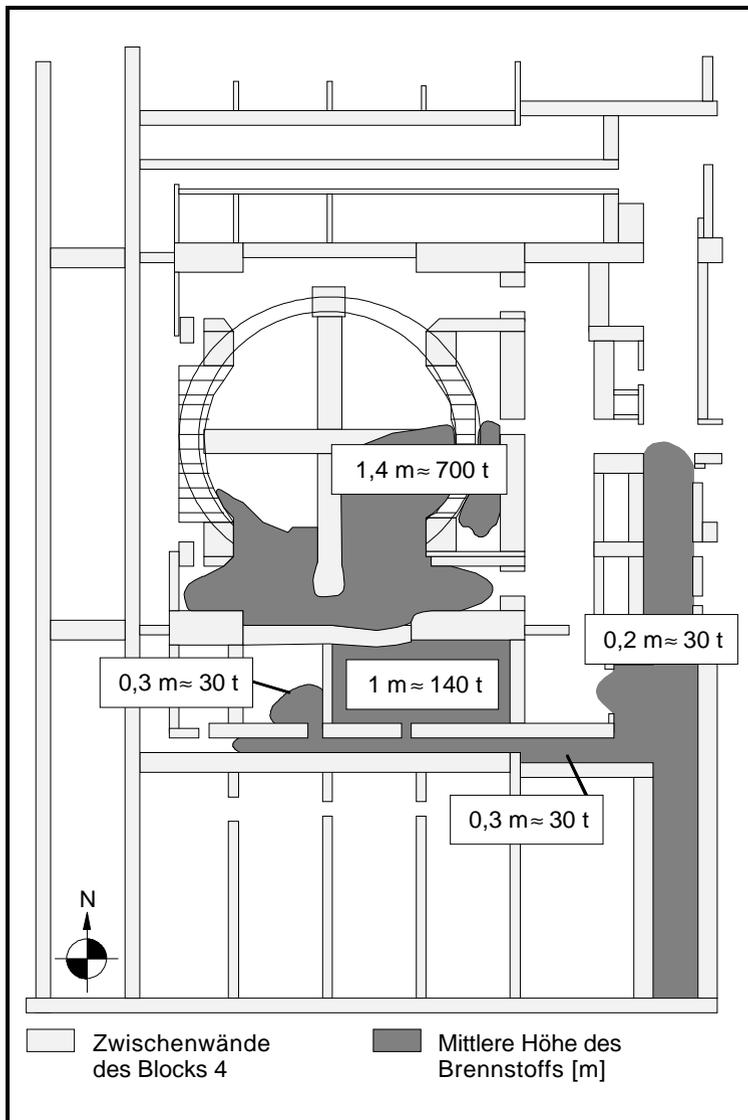
**Bild 4-5** Arbeitsbesprechung beim im Bau schon weit fortgeschrittenen Sarkophag; rechts die Stahlhohlwand mit Strebepfeilern

4-4). Diese stützen sich auf Behelfsfundamente bzw. auf verbliebene Teile des zerstörten vierten Blocks ab. Die Dachkonstruktion wurde über diese Träger hinweg nach Süden verlängert und geht dort in das Dach des Maschinenhauses über.

## 4.2 Kernbrennstoff im Sarkophag

Die Untersuchungen zum Verbleib des Kernbrennstoffs kommen zu dem Schluß, daß sich ca. 95 % des ursprünglich im Reaktor vorhandenen Brennstoffs heute innerhalb des Sarkophags befinden. Das sind rund 180 Tonnen Kernbrennstoff.

Der größte Teil des im Reaktorschacht verbliebenen Kernbrennstoffs schmolz zunächst nach dem Unfall aufgrund der Nachzerfallswärme und floß dann durch Öffnungen in tiefergelegene Räume. Er vermischte sich mit anderen Stoffen und verfestigte sich zu einer glasartigen Masse, der "Lava", die im Laufe der Zeit unter dem Einfluß von Strahlung, Wärme und Feuchtigkeit in einen porösen Zustand überging. Die Oberflächentemperatur der Lava liegt heute meist im Bereich der Raumtemperatur.



**Bild 4-6** Horizontale Verteilung des geschmolzenen Kernbrennstoffs (Lava) im Inneren des Sarkophags

Die räumliche Verteilung des Kernbrennstoffs ist ungefähr bekannt. In den unteren Räumen liegen etwa 100 bis 130 Tonnen. Da viele dieser Räume nach dem Unfall teilweise oder vollständig mit Beton verfüllt wurden, ist eine genauere Bestimmung dieser Massen schwierig. 50 bis 80 Tonnen Brennstoff werden im zerstörten Reaktorsaal und in der nördlichen Kaskadenwand vermutet. Dazu kommen etwa 20 Tonnen abgebrannter Brennelemente, die beim Unfall außerhalb des Reaktors im Abklingbecken lagerten.

In den unteren Räumen des Sarkophags befinden sich ca. 3 000 m<sup>3</sup> Wasser. Dabei handelt es sich um

Löschwasser und von außen eingedrungenes Regenwasser. Eine sicherheitstechnisch wichtige Frage ist dabei, ob ein Kontakt dieses Wassers mit der brennstoffhaltigen Lava aufgrund der Moderationswirkung des Wassers zu einer Kettenreaktion von Kernspaltungen führen könnte. Die Möglichkeit einer solchen Rekritikalität wird in einer Reihe von Untersuchungen als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt.

Im Sarkophag befindet sich eine beträchtliche Menge radioaktiven Staubs. Da dieser Staub in Form von Aerosolen aus dem Sarkophag austreten kann, ist seine Menge und Beschaffenheit von großem Interesse. Die Gesamtmasse des radioaktiven Staubs im Sarkophag wird auf 1 Tonne, seine Aktivität auf  $4,3 \times 10^{15}$  Bq geschätzt. Diese Aktivität



**Bild 4-7** Aus Kernschmelze und Sand gebildeter "Elefantfuß" mit einem Durchmesser von rund 2 m

geht insbesondere auf Strontium 90 (rund 47 %) und Cäsium 137 (rund 30 %) zurück. Über ein im Sarkophag installiertes Sprühsystem wird periodisch Latexlösung in den Sarkophag gesprüht, um den radioaktiven Staub zu binden. Damit werden allerdings nicht alle Bereiche des Sarkophags erreicht. Außerdem ist diese Abbindung nicht dauerhaft. Aus der fortschreitenden Erosion des Reaktorgebäudes und der Lavazersetzung bildet sich laufend neuer Staub. Die Gesamtmenge ungebundenen Staubs bleibt dadurch nahezu unverändert.

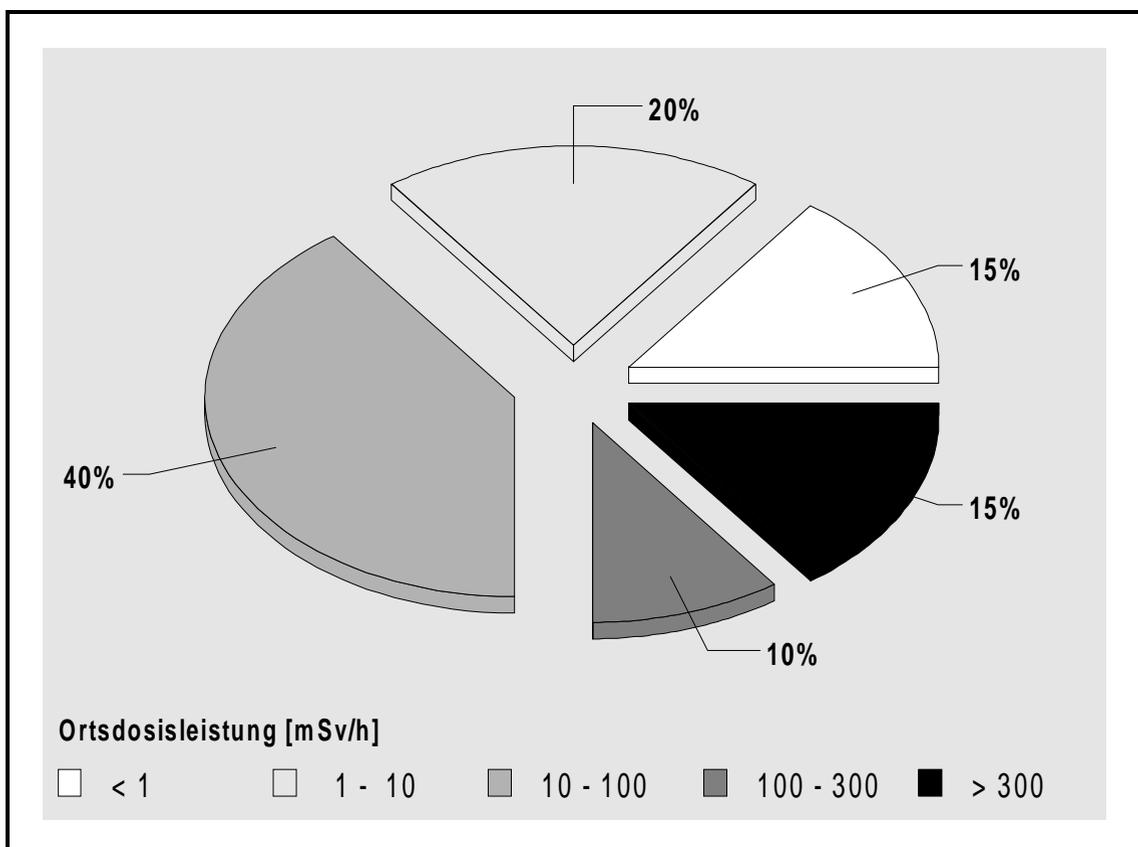
Die durch natürliche Luftzirkulation verursachte Freisetzung radioaktiver Aerosole aus dem Sarkophag ist gering. Nach ukrainischen Angaben liegt sie derzeit bei  $1,1 \times 10^{10}$  Bq/a. Bei bestimmten Störfällen, beispielsweise beim Absturz größerer Teile, wäre eine Aufwirbelung mit Freisetzung in die Umgebung möglich, was zu einer Gefährdung des auf dem Kraftwerksgelände beschäftigten Personals führen könnte. Allerdings zeigen Abschätzungen, daß selbst bei einem Kollaps des Sarkophags der nächste größere Ort, Slavutitsch, praktisch nicht mehr betroffen wäre.

Die Anwesenheit der radioaktiven Stoffe im Sarkophag birgt auch die Gefahr einer Grundwasserkontamination. Diese Gefahr wird zur Zeit jedoch als gering eingeschätzt.

### 4.3 Strahlungssituation im Inneren des Sarkophags

Die meisten Räume des Sarkophags sind für kurze Zeit begehbar oder wenigstens mit Robotern zugänglich. Die Intensität der radioaktiven Strahlung ist dort gut bekannt. Sie variiert stark in Abhängigkeit von der Anwesenheit brennstoffhaltiger Massen und radioaktiven Staubs, vom Grad der Zerstörung sowie von der Verfüllung mit Stoffen wie Beton und Sand.

Die Kontamination der an den zerstörten Reaktorblock angrenzenden Gebäude ist unterschiedlich. Die Entgaseretage ist beispielsweise nur relativ schwach kontaminiert, da dort die meisten Wände intakt blieben. Deshalb konnte radioaktives Material kaum eindringen. Dagegen gelangten in das Maschinenhaus, dessen Dach zerstört wurde, Teile des beim Unfall aus dem Reaktorgebäude geschleuderten Kernbrennstoffs, kontaminiertes Löschwasser und radioaktiver Staub. Die Ortsdosisleistung im Maschinenhaus beträgt heute etwa 10 bis 20 mSv/h, auf dem Dach über dem zerstörten Reaktor erreicht sie Werte bis zu 390 mSv/h.



**Bild 4-8** Prozentuale Raumanteile der Ortsdosisleistung im Sarkophag



**Bild 4-9** Im Inneren des Sarkophags: links sind aus ihrer Lage verdrehte Stützpfiler sichtbar. Rechts ist die südliche Außenhülle des Sarkophags erkennbar.

#### **4.4 Standsicherheit des Sarkophags**

Ein Teil der Bauteile des Sarkophags wurde bei dessen Errichtung nach üblichen ingenieurtechnischen Kriterien konzipiert und hergestellt. Es gibt wenig Anlaß, an der Tragfähigkeit dieser Bauteile zu zweifeln. Einschränkungen ergeben sich jedoch aus den durch starke radioaktiver Strahlung bestimmten Montagebedingungen. So wurde vielfach fernbedient montiert, wobei die Bauteile nicht immer präzise in den vorgesehenen Positionen abgesetzt werden konnten. Auch konnten einige wesentliche Tragteile nicht wie üblich verschraubt oder verschweißt, sondern lediglich aufeinandergesetzt werden. Zwar ergeben sich daraus für die Abtragung vertikaler Lasten keine gravierenden Probleme. Bei horizontaler Beanspruchung wirken solche Verbindungen jedoch nur über den Reibungswiderstand, so daß die Tragfähigkeit erheblich herabgesetzt wird.

Beim Bau des Sarkophags wurden auch Bauteile des zerstörten Reaktorgebäudes genutzt, soweit diese nach dem Unfall noch brauchbar schienen. Solche Bauteile,



**Bild 4-10** Der Sarkophag kurz vor der Vollendung

insbesondere die auf der Ostseite erhalten gebliebenen Luftschächte aus Stahlbeton und die westliche Wand des Reaktorgebäudes, stellen wesentliche Stützen für den oberen Teil des Sarkophags dar und müssen entsprechende Lasten aufnehmen. Die Einschätzung ihrer Tragfähigkeit ist nicht einfach, da eine genauere Prüfung ihrer Qualität vor Verwendung wegen der starken radioaktiven Strahlung nicht möglich war. Solche Bauteile könnten zumindest teilweise vorgeschädigt sein.

Ein Teil der neu errichteten Baustrukturen stützt sich auf Trümmer des zerstörten Blockes ab. Die Vorgehensweise beinhaltete Schritte wie Grobplanung des betroffenen Bereichs, fern-

bedientes Aufsetzen einer Schalung, Verfüllung mit Beton und Aufsetzen einer Stahlkonstruktion, welche die Stütze für neu errichtete Bauteile bildete. Leider ist über die Verhältnisse unterhalb dieser Fundamente wenig bekannt. Hohlräume mit Wasserzutritt könnten dort auf Dauer zu Setzungen führen und die Abstützung beeinträchtigen.

Bei der Einschätzung der Standsicherheit des Sarkophags sind innere und äußere Einwirkungen zu berücksichtigen:

- Im Inneren sind vor allem Korrosionsprozesse an Betonoberflächen sowie an Stahlkonstruktionen und freigelegten Bewehrungsstählen, etwa bei vorgeschädigten Bauteilen, von Bedeutung.  
Das im Sarkophag vorhandene Wasser, das durch Fugen und Spalten eindringende Regenwasser und die damit verbundene Feuchtigkeit fördern diese Prozesse.

- Von außen ist die Standsicherheit des Sarkophags vor allem durch horizontale Lasteinwirkungen gefährdet.

Dazu gehören insbesondere Stürme und Erdbeben. Tschernobyl liegt auf der "Russischen Platte". Sie bildet eine große tektonische Einheit und ist in ihrem zentralen Teil durch geringe seismische Aktivität gekennzeichnet. Erdbeben überschreiten dort kaum die Magnitude 5 auf der Richterskala. Lediglich in den rund 700 km von Tschernobyl entfernten Karpaten ist mit größeren Beben zu rechnen. Dort sind in den letzten 50 Jahren mehrere Beben mit Magnituden zwischen 6,3 und 7,4 auf der Richterskala aufgetreten, deren Herde teilweise in großer Tiefe lagen. In jüngster Zeit wurden ukrainische Überlegungen bekannt, Erdbeben mit der Intensität 7 für die Sicherheitsbetrachtung am Standort Tschernobyl zugrunde zu legen. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses sehr gering.

Stürme sind im Gebiet von Tschernobyl nichts Ungewöhnliches. Orkane mit extremen Windgeschwindigkeiten sind jedoch sehr selten. Beispielsweise beziffert eine ukrainische Untersuchung die Wahrscheinlichkeit eines schweren Sturms mit bis zu 170 km/h auf 1:10 000 pro Jahr. Wie belastbar solche Angaben zu Erdbeben- und Sturmgefährdungen sind und welcher Handlungsbedarf sich hier ergibt, muß noch genauer untersucht werden.

Der Sarkophag war ursprünglich für eine Standzeit von rund 30 Jahren konzipiert. Er hat den äußeren Einwirkungen der letzten 10 Jahre standgehalten. Zu diesen Einwirkungen gehörten auch Erdbeben, wie z.B. die Beben vom 30. und 31. Mai 1990, deren Herd in den Karpaten lag (mit Magnituden von 6,8 bzw. 6,3 auf der Richterskala). Dabei traten keine feststellbaren äußeren Veränderungen am Sarkophag auf. Es gab allerdings Veränderungen an Spalten einiger Wände innerhalb des Sarkophags. Die bisher von ukrainischen Forschungsinstituten durchgeführten Analysen zur Standsicherheit haben Defizite festgestellt, insbesondere hinsichtlich der Ergebnisse der Montagearbeiten. Letztlich wurden aber keine Fakten identifiziert, die einen Einsturz des Sarkophags schon in den nächsten Jahren wahrscheinlich erscheinen ließen. Eine Einschätzung der Standsicherheit über die vollen noch verbleibenden 20 Jahre der ursprünglich geplanten Standzeit ist allerdings heute mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Konkrete technische Konzepte für Ertüchtigungsmaßnahmen sind bereits an verschiedenen Stellen in der Diskussion und sollten erlauben, die Gefährdungen mit vertretbarem Aufwand zu verringern. Die nächsten Jahre müssen zeigen, ob und inwieweit sich die Unsicher-

heiten in der Bewertung der Standsicherheit des Sarkophags künftig eingrenzen lassen.

Konkrete Schritte zur Sanierung des Sarkophags sind jedoch wichtiger als verbesserte Analysen, zumal die Sanierung auf Dauer unumgänglich ist. Eine wichtige Frage ist dabei, welche Schritte in welcher Reihenfolge zweckmäßig sind.

Bislang hat die ukrainische Regierung ihre Überlegungen vor allem auf die Errichtung eines neuen, baulich unabhängigen Einschlusses konzentriert, welcher den heute bestehenden Sarkophag umschließt (Sarkophag 2). Ein eventueller Rückbau der Ruinen des vierten Reaktorblocks und des bestehenden Sarkophags würde bei einem solchen Konzept innerhalb des neuen Einschlusses durchgeführt. In einer von der Europäischen Union in Auftrag gegebenen Machbarkeitsstudie wurde hierfür eine Überbauung des gesamten Doppelblocks, also des zerstörten vierten und des noch betriebenen dritten Reaktorblocks ins Auge gefaßt. Die Kosten für die Realisierung dieses anspruchsvollen Konzepts wurden auf rund 2 Milliarden DM abgeschätzt (Preise des Jahres 1995).



**Bild 4-11** Der fertiggestellte Sarkophag

Bei solchen Überlegungen ist auch von Bedeutung, daß die Zweckmäßigkeit des Vorgehens bei der Sanierung des Sarkophags eng mit der Lösung verschiedener anderer Probleme verbunden ist:

- Das vor allem in der näheren Umgebung des heutigen Sarkophags provisorisch vergrabene radioaktive Material erschwert die Gründungsarbeiten für einen zweiten Einschluß und verschlechtert die Arbeitsbedingungen durch Strahlung.
- Während der Bauphase für einen zweiten Einschluß über dem bestehenden Sarkophag kann dieser beschädigt werden. Dies beinhaltet schwer überschaubare Risiken für das Baupersonal, die durch vorherige Sanierung des bestehenden Sarkophags reduziert werden können.
- Die notwendige Größe und damit die Kosten eines neuen Einschlusses hängen maßgeblich von zwei Faktoren ab: ob nach Errichtung des Sarkophags 2 noch mit einem Einsturz des alten Sarkophags zu rechnen ist und ob die Ruine des vierten Reaktorblocks dann noch abgerissen werden soll. Ein vorheriger, möglicherweise auch partieller Abriß des vierten Reaktorblocks mit der Entsorgung radioaktiver Stoffe, z.B. des Staubes oder der Lava im Sarkophag, würde eine kompaktere Bauweise ermöglichen.

Alles in allem erscheint es daher sinnvoll, die miteinander verknüpften Sanierungsfragen im Rahmen eines Gesamtkonzepts schrittweise anzugehen. Erster Schritt sollte eine Ertüchtigung des bestehenden Sarkophags sein, weil diese relativ kostengünstige Maßnahme ohnehin Voraussetzung für weitere Sanierungsschritte ist. Mit diesem Schritt, der in drei bis fünf Jahren abgeschlossen werden könnte, sollte sich das Stabilitätsproblem des heutigen Sarkophags für 15 bis 20 Jahre entschärfen lassen. Damit könnte die Zeit gewonnen werden, die für eine sorgfältige Gesamtplanung der in jedem Falle kostspieligen Lösung aller miteinander verknüpften Probleme erforderlich ist.

## 5 Schutz und Versorgung der Bevölkerung

### 5.1 Evakuierung der betroffenen Bevölkerung

Am Vormittag des 26. April 1986 wurde auf Anordnung des Ministerrats der UdSSR eine Regierungskommission zur Koordinierung der technischen und medizinischen Aufgaben in den drei betroffenen Republiken Ukraine, Weißrußland und Rußland einberufen. Diese Regierungskommission arbeitete unter extremen Bedingungen. Viele Entscheidungen mußten unter äußerstem Zeitdruck getroffen werden. Vorkehrungen für Unfälle eines derartigen Ausmaßes gab es nicht. Vorrang wurde der Gesundheit der Bevölkerung, insbesondere der Kinder und Schwangeren, gegeben. Am Anfang ihrer Arbeit operierte die Regierungskommission von der Stadt Pripjat aus und zog nach der Evakuierung der Stadt am 29. April 1986 nach Tschernobyl um.

Parallel zu dieser Kommission wurde eine sogenannte Operativgruppe eingerichtet, die die Fragen im Zusammenhang mit der Beseitigung der Unfallfolgen klären sollte. An



**Bild 5-1** Dieser Gebäudekomplex wurde nach dem Unfall errichtet und war Sitz der Regierungskommission in Tschernobyl.

dieser Operativgruppe waren Leiter der Ministerien und Behörden, Vorsitzende örtlicher sowjetischer Parteiorgane, Wissenschaftler und Experten beteiligt. Besonders wichtige Entscheidungen wurden im Politbüro des Zentralkomitees der Kommunistischen Partei und in der Regierung der Sowjetunion getroffen.

Unterstützt wurde die Operativgruppe durch eine medizinische Kommission, die die Kriterien für die Evakuierungsmaßnahmen in der 30-km-Zone festlegte. In den ersten Wochen der Evakuierung ging es primär darum, die Einwohner und insbesondere Kinder und Schwangere, die in der unmittelbaren Umgebung des Kernkraftwerks lebten, vor der radioaktiven Strahlung zu schützen.

Als Entscheidungskriterium für eine Evakuierung wurde 1986 die gemessene Ortsdosisleistung herangezogen. Heute werden die Kontaminationszonen anhand der Cäsium 137-Kontamination eingeteilt (Tabelle 5-1).

Von der kurzfristigen Evakuierung der Zone 3 waren 116 000 Personen betroffen. In den Folgejahren wurde die Bevölkerung auch aus Zone 2 teilweise umgesiedelt.

**Tabelle 5-1** Einteilung der Zonen für Evakuierung und Kontrollmaßnahmen

<b>Zone</b>	<b>Cs-137-Kontamination [kBq/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Strahlendosis [mSv/a]</b>	<b>Maßnahmen</b>
1	37 - 555	bis zu 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Evakuierung</li> <li>• regelmäßige Kontrolle der Strahlungssituation</li> </ul>
2	555 - 1 480	bis zu 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evakuierung des Gebietes über längere Zeiträume</li> <li>• eventuell Rücksiedlung möglich</li> <li>• ständige Kontrolle des Gebietes</li> <li>• Verzehrsverbot der angebauten Nahrungsmittel</li> </ul>
3	über 1 480	über 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sofortige Evakuierung des Gebietes</li> <li>• dauernde Umsiedlung der Bevölkerung</li> <li>• Zutrittsverbot und strikte Kontrolle</li> </ul>



**Bild 5-2** Evakuierung der Bevölkerung aus der 10-km-Sperrzone am 27. April 1986

Die Stadt Pripjat mußte vollständig evakuiert werden, da die Dosisleistung in der Stadt einige Hundert Milliröntgen pro Stunde und damit mehr als das Zehntausendfache des Normalwertes erreichte. Dies geschah am Abend des 27. April 1986. Innerhalb von drei Stunden wurden alle Einwohner Pripjats, darunter 17 000 Kinder und 80 bettlägerige Patienten, evakuiert. Alle Bewohner durften die Stadt nur mit dem Nötigsten verlassen.



**Bild 5-3** Die evakuierte Stadt Pripjat (im Hintergrund das Kernkraftwerk Tschernobyl)

Am 2. und 3. Mai 1986 folgte eine zweite Evakuierungsphase. Aus der 10-km-Zone um den Unglücksreaktor wurden rund 10 000 Personen aus weiteren Siedlungen in unbelastete Gebiete umgesiedelt. Ab 4. und 5. Mai 1986 wurde auch die 30-km-Zone um den Reaktor evakuiert. Neben den Einwohnern der Stadt Tschernobyl wurden auch die Bewohner von 50 Ortschaften im Gebiet Gomel im heutigen Weißrußland umgesiedelt. Rund 273 000 Menschen leben heute noch in Gebieten, in denen die radioaktive Kontamination  $555 \text{ kBq/m}^2$  überschreitet. Insgesamt wurden nach einem Bericht der Vereinten Nationen beinahe 400 000 Menschen (150 000 in Weißrußland, 150 000 in der Ukraine und 75 000 in der Russischen Föderation) zwangsweise oder aus eigenem Antrieb umgesiedelt. Ein Teil dieser Menschen konnte inzwischen in Gebiete der Zone 2 zurückkehren. Zahlenangaben hierzu fehlen.

In der Stadt Kiew bestand zu keiner Zeit nach dem Unfall eine radiologisch bedenkliche Situation.

Die Einwohner Tschernobyls wurden hauptsächlich in die Städte Kiew und Chernigow transportiert. Etwa tausend Familien wurden in Gebiete außerhalb der Ukraine nach Moldavien, ins Baltikum und in die Russische Föderation evakuiert. Als Ersatz für die Stadt Pripjat, in der hauptsächlich das Betriebspersonal des Kernkraftwerks Tschernobyl lebte, wurde später 45 km östlich von Pripjat die Stadt Slavutitsch gebaut.



**Bild 5-4** Blick in die neuerbaute Stadt Slavutitsch

Um den umgesiedelten Bewohnern möglichst schnell wieder einen Lebensraum zur Verfügung zu stellen und die Versorgung mit Energie zu gewährleisten, mußten umgehend Unterkünfte und soziale Einrichtungen geschaffen, Straßen gebaut, Gas- und Ölleitungen verlegt sowie die Stromversorgung sichergestellt werden. Bisher wurden z.B. in Weißrußland rund 66 000 Wohnungen und Häuser errichtet, Schulen für rund 30 000 Kinder gebaut, Vorschuleinrichtungen für etwa 12 000 Kinder geschaffen sowie mehrere Krankenhäuser errichtet.

Trotzdem reichen diese Anstrengungen nicht aus. Bis heute sind die Lebensbedingungen der umgesiedelten Bevölkerung nicht befriedigend. Seit der Verschärfung der wirtschaftlichen Situation Anfang der 90er Jahre gibt es große Probleme, die erforderlichen Maßnahmen auszuführen und zu finanzieren. Weiterhin zeigt sich, daß viele neu errichtete Häuser nicht bezogen wurden, da die Bauqualität schlecht war, keine ausreichenden Arbeitsplätze in den neuen Siedlungen geschaffen wurden oder ungünstige soziale Lebensbedingungen herrschten.

Ein besonderes Problem besteht in der psychosozialen Situation der umgesiedelten Bevölkerung. Zum Teil kehren die ehemaligen Bewohner in die kontaminierten Zonen zurück. Nach ukrainischen Angaben sind etwa 2 000 Personen in die 30-km-Zone zurückgekehrt.



**Bild 5-5** Einfahrt in die 30-km-Kontrollzone



**Bild 5-6** Blick auf die verlassene Stadt Pripjat

## 5.2 Medizinische Versorgung

Unmittelbar nach dem Unfall wurden an rund fünf Millionen Menschen Jodtabletten zur Schilddrüsenprophylaxe ausgeteilt. Dabei wurden die Einwohner der 30-km-Zone bevorzugt versorgt. Das russische Gesundheitsministerium legte vorläufige Grenzwerte für Radionuklide in Milch (3 700 Bq/l) und in täglichen Nahrungsmitteln fest. Lebensmittel, die diese Grenzwerte überschritten, wurden vom Verzehr ausgeschlossen. Diese Verzehrerbote wurden in ländlichen Gebieten jedoch nur teilweise oder gar nicht beachtet.

In der Zeit unmittelbar nach dem Unfall wurde eine wirksame Betreuung der Bevölkerung durch die widersprüchlichen Informationen und die politisch erzwungene Bagatellisierung der Situation erschwert. In der Folgezeit wurden Reihenuntersuchungen auf Schilddrüsenkrebs an der betroffenen Bevölkerung vorgenommen, die bis heute innerhalb der nationalen Gesundheitsprogramme weitergeführt werden.

Die medizinische Betreuung der betroffenen Bevölkerung wurde verstärkt, leidet jedoch unter der schlechten wirtschaftlichen Situation. In Gomel wurde ein strahlenmedizinisch-

sches Zentrum eröffnet. In Obninsk wurde das zentrale Staatliche Medizin- und Radiologie-Kataster zur Erfassung von Personen mit radiologischen Schäden eingerichtet. Außerdem wurden weitere strahlenmedizinische Zentren in den belasteten Regionen geschaffen.

Bereits im Juni 1986 hatte das Gesundheitsministerium der Ukraine die künftige jährliche externe und interne Strahlenexposition abgeschätzt. Weiter wurde eine Reihe von Schutzmaßnahmen angeordnet, um die Strahlenexposition zu reduzieren. Kliniken in Kiew übernahmen die Aufgabe, Patienten mit Strahlenschäden zu erfassen und medizinisch zu betreuen. Weiterhin wurden ein gemeinsames Forschungszentrum und eine wissenschaftliche "Beratungsstelle für Radiologische Medizin" eröffnet.

Die internationale Zusammenarbeit für die medizinische Versorgung und Analyse der Unfallfolgen kam anfänglich nur zögerlich in Gang. Erst als das politische Klima offener wurde, akzeptierten die betroffenen Länder Hilfsangebote aus dem Ausland. Seither hat sich die internationale Zusammenarbeit verstärkt. Die Gesundheitsbehörden der Ukraine, Weißrußlands und Rußlands haben 1991 im Rahmen des IPHECA-Programms der Weltgesundheitsorganisation epidemiologische Kataster eingerichtet, in denen die Ergebnisse der radiologischen Untersuchungs- und Überwachungsprogramme erfaßt werden.

Allerdings ist nach Auflösung der Sowjetunion die Zusammenarbeit der betroffenen Länder auf dem Gebiet der Gesundheitsvorsorge immer schwächer geworden. Damit wird eine objektives Bild der gesundheitlichen Situation sehr erschwert.

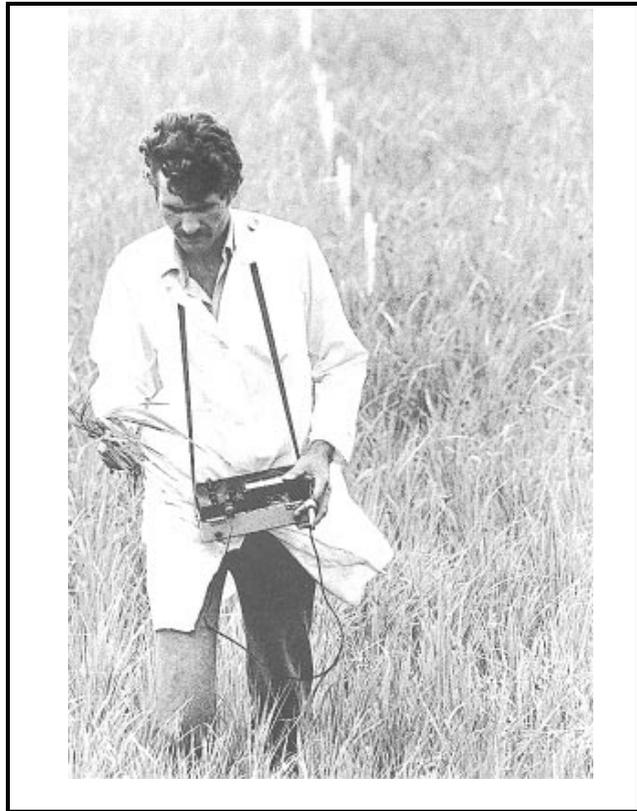
### **5.3 Nahrungsmittelversorgung**

Die Versorgung der Bevölkerung in den kontaminierten Gebieten mit unbelasteten Lebensmitteln war und ist eines der Hauptprobleme nach dem Unfall. In diesen Gebieten gibt es zahlreiche Betriebe der Lebensmittelindustrie, insbesondere der Milch- und Getreideverarbeitung sowie der Zuckerherstellung. Diese Nahrungsmittelbetriebe produzierten 1992 rund 30 % der Waren in der Region entsprechend 6 % der Gesamtproduktion in der Ukraine. Die landwirtschaftlichen Erzeugnisse sind oftmals radioaktiv kontaminiert und entsprechen somit nicht immer der notwendigen Qualität.

Um die Aktivität in den Nahrungsmitteln gering zu halten, werden spezielle Technologien und Verarbeitungsmethoden angewandt. Bei vielen dieser Verarbeitungsmethoden nimmt

jedoch der Vitamingehalt drastisch ab und die Qualität der Lebensmittel verschlechtert sich. Dies ist um so problematischer, als die gesundheitlich geschwächte Bevölkerung in den betroffenen Gebieten gerade Vitamine zur Stärkung ihrer körpereigenen Abwehrkräfte dringend benötigt.

Trotz aller getroffenen Maßnahmen ist es nach wie vor nicht möglich, die Bevölkerung in den betroffenen Gebieten ausreichend mit nicht kontaminierten Lebensmitteln zu versorgen.



**Bild 5-7** Getreidepflanzen werden auf radioaktive Kontamination untersucht

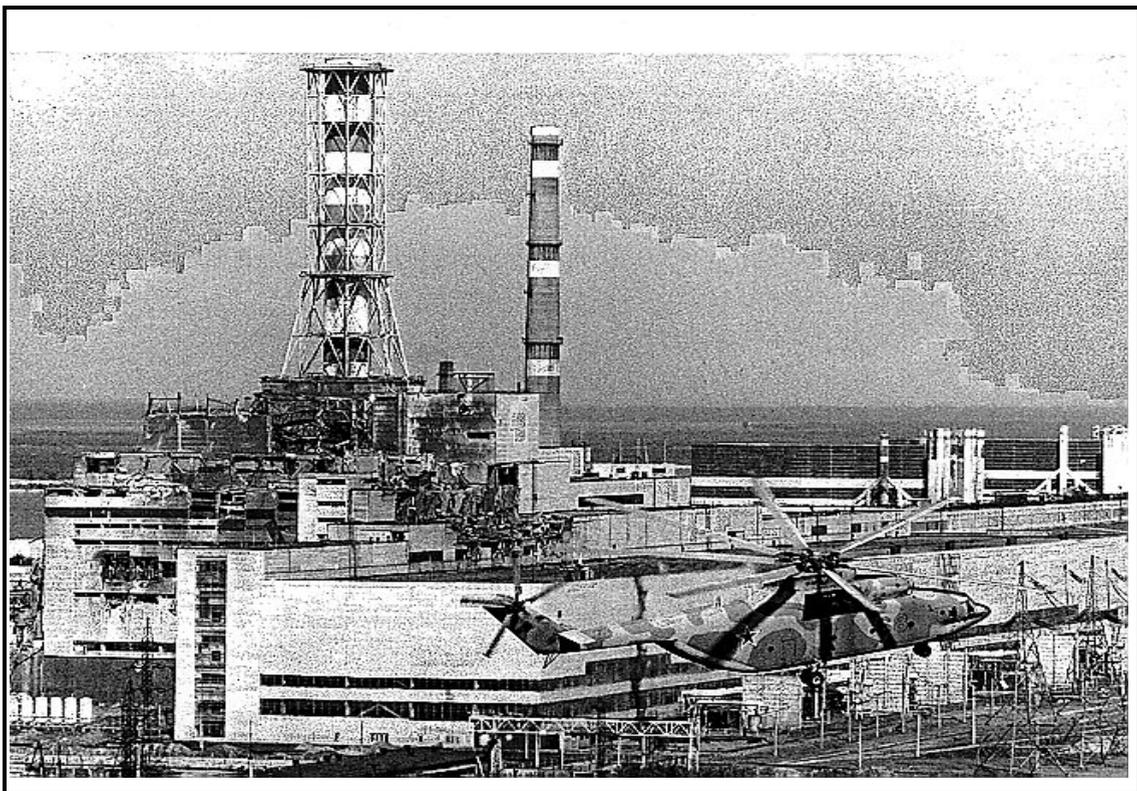
#### **5.4 Wirtschaftliche Auswirkungen**

Die Beseitigung der Folgen des Tschernobyl-Unfalls erfordert bedeutende materielle und finanzielle Mittel. Es ist nahezu unmöglich, den entstandenen Gesamtschaden abzuschätzen, da direkt oder indirekt nahezu alle Bereiche der Volkswirtschaft in den drei betroffenen Staaten berührt sind. Allein in der ehemaligen Sowjetunion wurden mehr als 15 Milliarden Dollar zur Behebung der sozialen, wirtschaftlichen und gesundheitlichen Folgen ausgegeben.

Die Auflösung der Sowjetunion hat die wirtschaftlichen Schwierigkeiten in den betroffenen Ländern verstärkt. Sie geben einen erheblichen Teil der Staatsfinanzen für die Schadensbeseitigung aus. In Weißrußland und in der Ukraine waren dies in den neunziger Jahren immer noch mehr als zehn Prozent des Staatshaushalts.

## 6 Gesundheitliche und ökologische Auswirkungen des Unfalls

Über die gesundheitlichen Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl gibt es sehr kontroverse Auffassungen. Dies betrifft in besonderem Maße die Höhe der bisherigen und künftigen radiologisch bedingten Gesundheitsschäden. Seit 1986 haben sich die nationalen Organisationen in den drei hauptsächlich betroffenen Ländern Ukraine, Weißrußland und Rußland und viele internationale Organisationen um eine sachgerechte Aufklärung bemüht. Zu nennen sind hier vor allem die Internationale Atomenergie-Organisation, die Weltgesundheitsorganisation, die Europäische Union und die Vereinten Nationen. Vorrangig ging es darum zu klären, welche Maßnahmen geeignet und zweckmäßig sind, um eine angemessene medizinische Versorgung der betroffenen Menschen sicherzustellen. Das Gesamtbild der tatsächlich aufgetretenen gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen wird durch die Arbeiten der nationalen und internationalen Organisationen langsam klarer. Dabei muß allerdings berücksichtigt werden, daß angesichts der langen Latenzzeiten die meisten Spätschäden nur prognostiziert werden können. Systematische Untersuchungen zu den Langzeitfolgen sind daher weiter erforderlich.



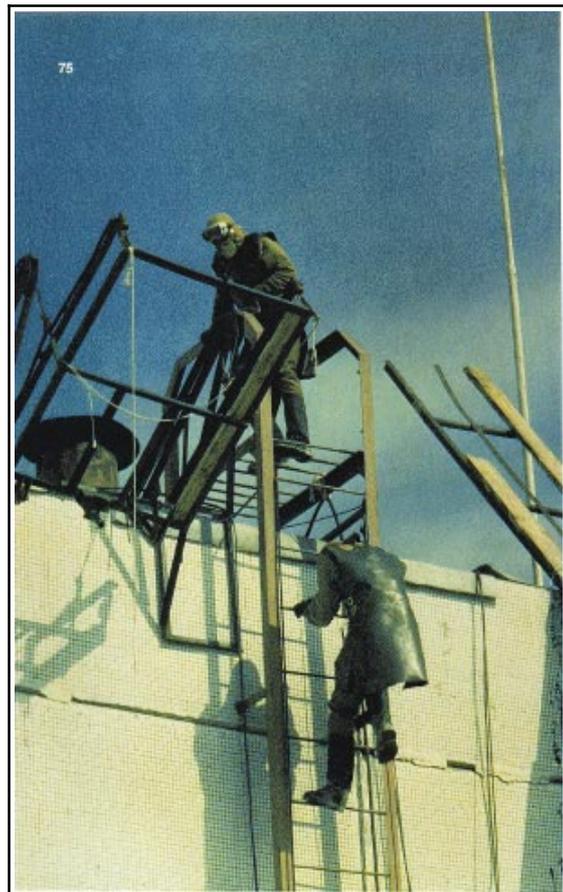
**Bild 6-1** Versprühen von Dekontaminationsmitteln per Hubschrauber

Folgende Arten gesundheitlicher und ökologischer Auswirkungen sind zu unterscheiden:

- Akute Strahlenschäden bei der Unfallbekämpfung sowie gesundheitliche Spätfolgen bei den an der Unfallbekämpfung und den Aufräumarbeiten beteiligten Personen
- Gesundheitliche Auswirkungen bei der Bevölkerung der am stärksten betroffenen Regionen in der Ukraine, in Weißrußland und Rußland
- Gesundheitliche Auswirkungen außerhalb der früheren Sowjetunion
- Ökologische Auswirkungen im betroffenen Gebiet.

### 6.1 Gesundheitliche Auswirkungen durch die Unfallbekämpfung

Zur unmittelbaren Bekämpfung des Brandes und zur Abdeckung des offenen Reaktorkerns wurden das Betriebspersonal des Reaktors, Feuerwehrleute sowie Armeeangehörige, z.B. Hubschrauberpiloten, eingesetzt. Dieser Personenkreis erhielt zum Teil sehr hohe Strahlendosen. Etwa 300 Personen wurden in Krankenhäuser gebracht, 134 Personen zeigten Symptome einer akuten Strahlenkrankheit mit Schwäche, Erbrechen und Schwindel sowie Hautverbrennungen. Trotz intensiver medizinischer Bemühungen, zum Teil mit Knochenmarktransplantationen in Spezialkliniken in Moskau und Kiew mit Hilfe amerikanischer Ärzte, starben 28 Personen an der Strahlenkrankheit und den erlittenen Brandverletzungen. Die Körperdosen betragen bis zu 13 Gy (bei einer Körperdosis von 4 Gy beträgt die Überlebenschance etwa fünfzig Prozent).



**Bild 6-2** Liquidatoren während der Errichtung des Sarkophags



**Bild 6-3** Kiewer Institut für Strahlenmedizin: Dieser Ingenieur war zur Zeit der Reaktorexpllosion in der Maschinenhalle und erlitt schwere Strahlenschäden. Er muß sich immer wieder stationär behandeln lassen.

Zwei Angehörige des Betriebspersonals starben unmittelbar durch Brand- und Explosionswirkungen.

Darüber hinaus sind nach ukrainischen Angaben von den akut Strahlenkranken in der Ukraine bis 1995 14 Personen verstorben.

Für die Dekontaminations- und Aufräumarbeiten in der Region des Unfallreaktors wurden Armeeingehörige und Zivilisten aus vielen Teilen der Sowjetunion eingesetzt. Die Anzahl dieser nur schwer erfaßbaren Personengruppe, im allgemeinen als "Liquidatoren" bezeichnet, betrug nach sowjetischen Angaben etwa 600 000 Personen; die jüngsten Berichte der Weltgesundheitsorganisation und der Vereinten Nationen sprechen von etwa 800 000 Personen.

Für diesen Personenkreis wurde bereits 1986 ein zentrales strahlenepidemiologisches Register in Obninsk eingerichtet, das Ende 1991 Daten von 285 000 Personen enthielt. Nach

der Auflösung der Sowjetunion werden zwar in der Ukraine, in Weißrußland und in Rußland die Register weitergeführt, die Erfassung scheint jedoch nicht vollständig und einheitlich zu sein. Personen aus den baltischen Staaten und den Kaukasusregionen außerhalb der Russischen Föderation sind in diesen Registern nicht erfaßt.

Nach ersten Auswertungen der erfaßten radiologischen Daten belaufen sich die Körperdosen dieser Liquidatoren in vielen Fällen auf 50 - 250 mSv. Dabei ist die Zuverlässigkeit der Dosisbestimmung fragwürdig. Beim Einsatz in den ersten Tagen erhielten die Einsatzkräfte häufig vermutlich höhere Dosen als 250 mSv. Bisher gibt es keine Erkenntnisse über einen Anstieg typischer Folgewirkungen durch die Strahlenexposition wie

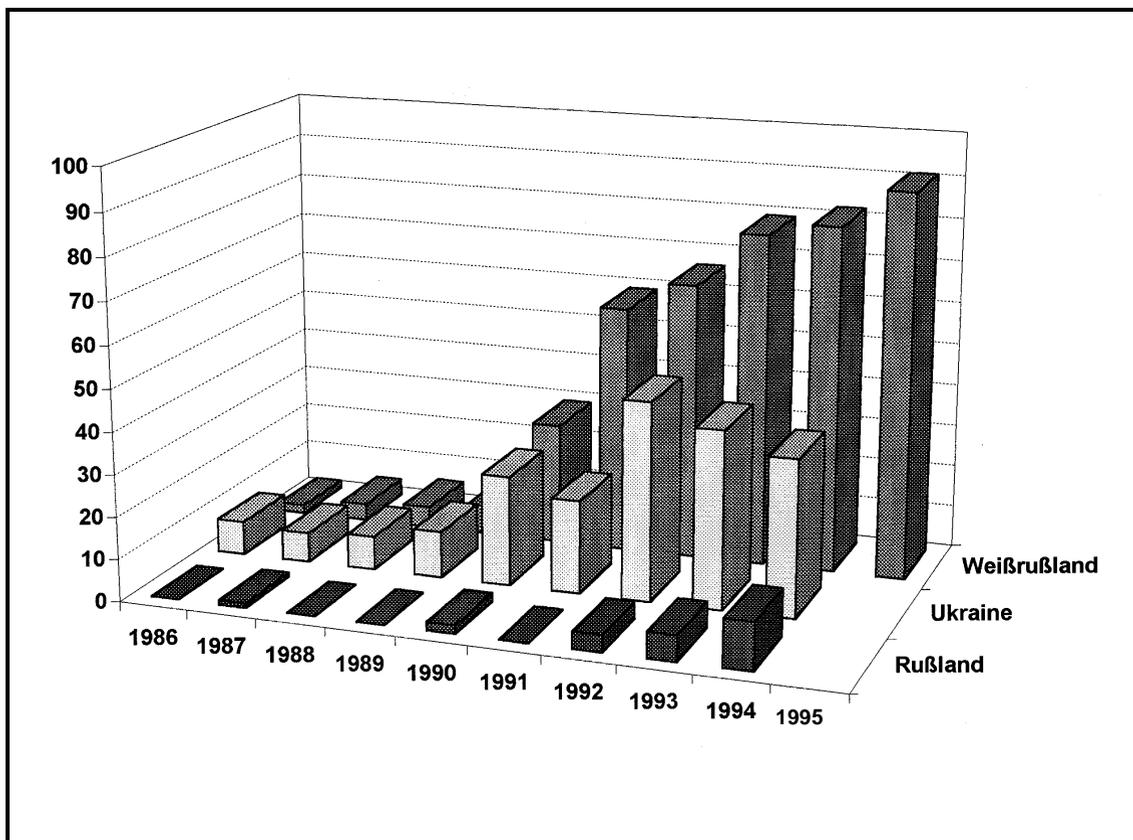
Leukämie, Schilddrüsenkrebs oder andere Tumore. Es gibt jedoch verbreitet Hinweise, besonders aus Rußland, daß Selbstmorde, andere Formen gewaltsamer Todesfälle, Invaliddität und neurologische oder psychosomatische Erkrankungen unter den Liquidatoren verstärkt zu beobachten sind. Diese Folgeerscheinungen sind zwar nicht unmittelbar auf Strahleneinwirkung zurückzuführen, jedoch im weiteren Sinne mit den Auswirkungen des Reaktorunglücks in Verbindung zu bringen. Die Weltgesundheitsorganisation wird in ihrem internationalen Programm IPHECA Ausmaß und Ursachen der Verschlechterung der gesundheitlichen Situation der Liquidatoren analysieren.

## 6.2 Gesundheitliche Auswirkungen für die Bevölkerung

Die durch den Reaktorunfall bedingte Strahlenexposition der Bevölkerung ist im wesentlichen auf das kurzlebige Jod 131 und auf das langlebige Cäsium 137 zurückzuführen. Unmittelbar nach dem Unfall haben die sowjetischen Behörden Notfallschutzmaßnahmen angeordnet. Die am stärksten betroffenen Gebiete, z.B. die Stadt Pripjat, wurde binnen kurzer Zeit evakuiert. Weitere Evakuierungen folgten später, als durch



**Bild 6-4** An der Schilddrüse operierte weißrussische Kinder, die in der Klinik des Instituts für Strahlenmedizin in Aksakovtchina nachbehandelt werden



**Bild 6-5** Auftreten von Schilddrüsenkrebs bei Kindern in der Ukraine, in Weißrußland und Rußland in den Jahren 1986 bis 1995 (Wert für 1995 nach ukrainischen Angaben)

Messungen zusätzliche hoch belastete Gebiete gefunden wurden. Außerdem wurden Beschränkungen für den Verzehr von Nahrungsmitteln angeordnet. Durch diese Maßnahmen sollte erreicht werden, daß auch die Bevölkerung aus den hoch belasteten Gebieten in der Regel keine höhere Ganzkörperdosis als 250 mSv erhielt. Damit konnten unmittelbare Strahlenschäden weitgehend verhindert werden. In Einzelfällen wurde jedoch über entzündliche Augenkrankheiten und Trübungen der Augenlinse berichtet.

Von besonderer Bedeutung war die Aufnahme von Jod 131 mit der Nahrung. Jod 131 hat eine Halbwertszeit von acht Tagen und gelangt insbesondere über den Verzehr von Frischmilch in den Körper, wo es sich vorzugsweise in der Schilddrüse ansammelt. In den am stärksten betroffenen Gebieten traten sehr hohe Jodkonzentrationen in der Milch auf. Bei Kindern waren Strahlenexpositionen der Schilddrüse von bis zu 50 Gy die Folge. An die betroffene Bevölkerung wurden zwar Jodtabletten verteilt, um die Aufnahme von radioaktivem Jod zu blockieren, diese Maßnahme war jedoch nur zum Teil erfolgreich.

Schilddrüsenkrebs bei Kindern aufgrund natürlicher Ursache ist eine sehr seltene Krankheit. Untersuchungen der Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki haben gezeigt, daß Bestrahlung zu einem deutlichen Anstieg der Häufigkeit von Schilddrüsenkrebs bei Kindern führt. Diese Erkenntnis wird durch die ansteigenden Zahlen von Schilddrüsenkrebsfällen bei Kindern in den vom Unfall am stärksten betroffenen Gebieten deutlich bestätigt. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat die Zahlen für das Auftreten von Schilddrüsenkrebs in der Altersgruppe bis zu 14 Jahren in den Vergleichszeiträumen 1981 bis 1985 und 1986 bis 1994 ermittelt (Tabelle 6-1).

**Tabelle 6-1** Schilddrüsenkrebs bei Kindern bis zu 14 Jahren nach Angaben der WHO 1995

Länder	Aufgetretene Fälle im Zeitraum	
	1981 - 1985 <sup>1)</sup>	1986 - 1994
Weißrußland	12	333
Ukraine	26	208 <sup>2)</sup>
Russische Föderation (Gebiet Brjansk und Kaluga)	1	24
<sup>1)</sup> Zahlen errechnet aus jährlicher Inzidenz und Kinderzahl nach WHO 1995 <sup>2)</sup> Bis Mitte 1994		

Die Anzahl der pro Jahr aufgetretenen Fälle steigt seit 1986 bis heute weiterhin an. Insgesamt sind bis 1994 bei mehr als zwei Millionen untersuchten Kindern 565 Schilddrüsenkrebsfälle aufgetreten. Die meisten dieser Fälle können auf die Radiojodaufnahme nach dem Unfall zurückgeführt werden. Die Schilddrüsenkrebsfälle treten vor allem in den am stärksten belasteten Regionen auf. In der stark belasteten weißrussischen Region Gomel stieg die Häufigkeit von Schilddrüsenkrebs von einem Fall bei einer Million Kindern vor dem Unfall auf mehr als 100 auf eine Million Kinder im Jahr 1994. Kindlicher Schilddrüsenkrebs kann im allgemeinen mit gutem Erfolg operiert werden, erfordert jedoch langfristige Therapie. In einigen Fällen mußte die Operation auch wiederholt werden. Dennoch verstarben in Weißrußland einige Kinder.

Ein strahlenbedingter Anstieg von anderen Tumorerkrankungen und von Leukämie bei Kindern oder Erwachsenen konnte trotz zahlreicher Untersuchungen bisher nicht ermittelt werden. Dies gilt auch für genetische Defekte. Auch die jüngsten Berichte der WHO

und der Vereinten Nationen bestätigen diese Ergebnisse. Dennoch ist vor einer verfrühten Wertung zu warnen. Die Latenzzeiten für viele Tumorarten sind länger als die seit dem Unfall vergangene Zeit. Aus den Untersuchungsergebnissen, wonach kein statistisch signifikanter Zusammenhang mit dem Unfall zu finden ist, läßt sich nicht schließen, daß es überhaupt keine zusätzlichen strahlenbedingten Krebsfälle gibt. Auf der anderen Seite ist bisher nicht bewiesen, daß ein erhöhtes Auftreten von Lungen- und Magenkrebs - wie im Bericht der Vereinten Nationen für die Region Gomel angeführt - auf Strahlenwirkung zurückzuführen ist, weil die Latenzzeiten für diese Krebsarten länger sind als die Zeitdauer seit dem Unfall.

In der Presse wurde vor einiger Zeit (April 1995) von 125 000 Todesfällen infolge des Reaktorunfalls in Tschernobyl berichtet. Diese vom Gesundheitsministerium der Ukraine genannte Zahl ist die Gesamtzahl aller Todesfälle im Zeitraum von 1988 bis 1994 in der betroffenen Bevölkerung von etwa 2,5 Millionen. Diese Zahl umfaßt Todesfälle aller Ursachen und kann nicht den Strahlenbelastungen durch den Reaktorunfall zugerechnet werden. Sie entspricht vielmehr weitgehend der gesamten Sterberate der Bevölkerung. Die tatsächlich infolge des Unfalls aufgetretenen Todesfälle sind auch ohne diese Übertreibungen und Fehldeutungen schlimm genug.

Aus den vom Reaktorunfall betroffenen Gebieten in der Ukraine, in Weißrußland und Rußland wird über eine allgemeine Zunahme von Krankheiten in der Bevölkerung berichtet. Insbesondere werden streßbezogene Krankheiten wie Depressionen, Ängste, psychische Unruhe aber auch chronische Bronchitis, Bluthochdruck, Koronarerkrankungen und Diabetes vermehrt diagnostiziert. Nach bisherigen Kenntnissen beruhen diese Erkrankungen nicht unmittelbar auf einer Strahleneinwirkung. Sie werden aber dennoch als mittelbare Folgen des Unfalls und der damit verbundenen Vertreibung vieler Tausender von Menschen aus ihren vertrauten Lebensumständen angesehen. Ein Teil dieser Krankheiten mag auch auf der allgemeinen Verschlechterung der Lebensumstände nach der Auflösung der Sowjetunion und der damit verbundenen Unsicherheit beruhen. Auch der Anstieg ansteckender Krankheiten, z.B. Diphtherie und Tuberkulose, dürfte mit dieser Verschlechterung und mit der mangelnden medizinischen Versorgung zusammenhängen.

Die strahlenbiologischen Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl werden auch weiterhin Gegenstand intensiver internationaler Untersuchungen und Forschungsarbeiten sein. Dabei ist eine systematische und in sich schlüssige Aufbereitung der bereits

vorhandenen umfangreichen Daten und Untersuchungsergebnisse in den drei betroffenen Ländern die wichtigste Aufgabe. Über diesen Forschungsarbeiten darf jedoch die betroffene Bevölkerung nicht vergessen werden. Sie benötigt verstärkt Hilfe. Die betroffenen Staaten können diese Aufgabe nicht aus eigener Kraft lösen. Hierfür sind weitere Anstrengungen der internationalen Staatengemeinschaft und entsprechende finanzielle Mittel erforderlich.

### **6.3 Gesundheitliche Auswirkungen in Deutschland**

Aufgrund der zur Zeit des Unfalls herrschenden meteorologischen Ausbreitungsbedingungen wurden weite Teile Europas radioaktiv kontaminiert, wobei die Verteilung stark von den lokalen Wetterbedingungen abhing. So war die Cäsium 137-Kontamination in Deutschland sehr unterschiedlich (Berlin 2,3 kBq/m<sup>2</sup>, München 19 kBq/m<sup>2</sup>, Alpenregion stellenweise bis 100 kBq/m<sup>2</sup>). Die dadurch hervorgerufenen Strahlenexpositionen betrugen in Südbayern bis zu 1 mSv effektive Dosis durch äußere Bestrahlung und etwa 0,5 mSv durch Ingestion (die mittlere natürliche Strahlenexposition in Deutschland beträgt 2,3 mSv pro Jahr). Aufgrund dieser Dosen kann zwar rechnerisch ein Risiko für Spätschäden ermittelt werden, es ist jedoch gegenüber dem bestehenden allgemeinen Krebsrisiko sehr gering.

Insgesamt gibt es keine wissenschaftlich belegten Nachweise für eine Beeinträchtigung der Gesundheit in Deutschland aufgrund der zusätzlichen Strahlenexposition durch den Reaktorunfall in Tschernobyl.

### **6.4 Ökologische Auswirkungen**

Für die Auswirkungen von Strahlung auf Flora und Fauna sind die äußere Bestrahlung und die Aufnahme von Radionukliden in den Organismus sowie die sehr unterschiedlich ausgeprägte Strahlenempfindlichkeit der Organismen bestimmend.

In der Nähe des Kraftwerks wurden in einem angrenzenden Waldstück große Mengen radioaktiver Partikel abgelagert. Dieser Wald wurde massiv geschädigt. Vor allem die Kiefern in der näheren Umgebung des Unfallortes starben in den Wochen und Monaten nach dem Unfall völlig ab (sogenannter "Roter Wald"). Für diesen Bereich wurden Energiedosen von über 10 Gy abgeschätzt.

Im weiteren Bereich, in dem die Energiedosen zwischen 3 und 10 Gy lagen, gab es deutlich erkennbare Schäden an den Kiefern. Andere Baumarten, wie Espen, Birken und Eichen in der Nachbarschaft der geschädigten Kiefern, zeigten keine oder nur geringe Symptome. Viele der geschädigten Kiefern gingen in den folgenden Jahren ein. Um der Bodenerosion und einer Verfrachtung von kontaminiertem Staub vorzubeugen, sollten die geschädigten Gebiete wieder aufgeforstet werden.

Krautige Pflanzen zeigten kaum sichtbare Schäden. Untersuchungen an diesen Pflanzen ergaben jedoch erhöhte Gen-Mutationsraten, die sich normalisierten, wenn deren Nachkommenschaft in eine gering kontaminierte Umgebung umgesetzt wurde.

Ein Großteil der abgelagerten radioaktiven Stoffe sammelte sich in der Streunadelschicht der Waldböden an. Die Zahl der in dieser Streuschicht lebenden Insekten und deren Larven ging im Sommer 1986 auf etwa ein Prozent des Normalwertes zurück. Bei tiefer im Boden lebenden Arten gab es einen Rückgang auf etwa ein Drittel. In den abgestorbenen Wäldern kam es aufgrund des gestörten ökologischen Gleichgewichts zu einem vermehrten Auftreten von Holzschädlingen wie Kiefernspinner, Holzkäfer, Rüsselkäfer, die auch die schwächer geschädigten Waldbestände in der Nachbarschaft bedrohten. Um einer Ausbreitung von Holzschädlingen vorzubeugen, wurden die abgestorbenen Waldstreifen gerodet.

In den geschädigten Gebieten verringerte sich auch die Zahl der Wirbeltiere. Bei Mäusen zeigten sich pathologische Veränderungen des Blutes und der inneren Organe sowie eine verringerte Fruchtbarkeit. Allerdings wurden die geschädigten Gebiete rasch wieder von zugewanderten Tieren bevölkert. So wurde 1987, also ein Jahr nach dem Unfall, bei den Nagetieren eine Verzehnfachung gegenüber der Besiedlungsdichte vor dem Unfall festgestellt. Als Ursache hierfür wird die nicht eingebrachte Getreideernte und die geringe Anzahl an Raubtieren angesehen. Seit 1989 haben sich die Verhältnisse normalisiert. In den gesperrten Gebieten haben sich für Wildtiere Lebensverhältnisse ohne Beeinflussung durch den Menschen herausgebildet.

Über die Auswirkungen auf Vögel und Wassertiere liegen wenig Berichte vor. Bei Vögeln gibt es Hinweise auf eine erhöhte Embryosterblichkeit in den Eiern. Im Gewebe von Fischen wurden erhöhte Gehalte von Cäsium 137 gefunden. Die Kontamination im Dnjepr, im Pripjat und in der Desna sowie im Dnjepr-Staubecken führten nicht zu Strahlendosen, bei denen mit einer Beeinträchtigung der Besiedlungsdichte von Wasserorganismen zu rechnen ist.

## **7 Sicherheit der RBMK-Anlagen**

Nach dem Unfall im Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl wurden große Anstrengungen unternommen, Ablauf und Ursache aufzuklären. In der westlichen Welt waren die Technik des RBMK und damit auch seine sicherheitstechnischen Eigenschaften weitgehend unbekannt. Vorrangiges Ziel von sowjetischer Seite war es, die Sicherheit der RBMK so zu verbessern, daß ein katastrophaler Unfall infolge einer Leistungsexkursion verhindert wird.

Die Auslegungsmängel und Umstände, die zum Unfall geführt haben, sind inzwischen hinreichend bekannt. Entscheidend waren grundlegende Defizite der reaktorphysikalischen Auslegung (siehe auch Abschnitt 1.4), der Abschaltvorrichtungen und der Betriebsvorschriften der RBMK-Anlagen. Dadurch waren bei bestimmten Betriebszuständen explosionsartige Leistungsexkursionen möglich. Bei allen RBMK-Anlagen wurden inzwischen Verbesserungen hinsichtlich dieser Defizite vorgenommen.

Aufbauend auf den bei der Unfallanalyse gewonnenen Erkenntnissen hat man sowohl in der Sowjetunion und später in Rußland als auch im Rahmen internationaler Kooperation Fragen der RBMK-Sicherheit immer systematischer analysiert. Diese Untersuchungen haben eine Reihe weiterer Sicherheitsdefizite aufgezeigt, die zu schweren Stör- und Unfällen führen können.

Im folgenden werden die seit dem Tschernobyl-Unfall durchgeführten Ertüchtigungsmaßnahmen dargestellt und die damit erreichte Verbesserung der Sicherheit diskutiert. Außerdem wird auf weitere Maßnahmen eingegangen, die noch durchzuführen sind.

### **7.1 Reaktivitätskontrolle**

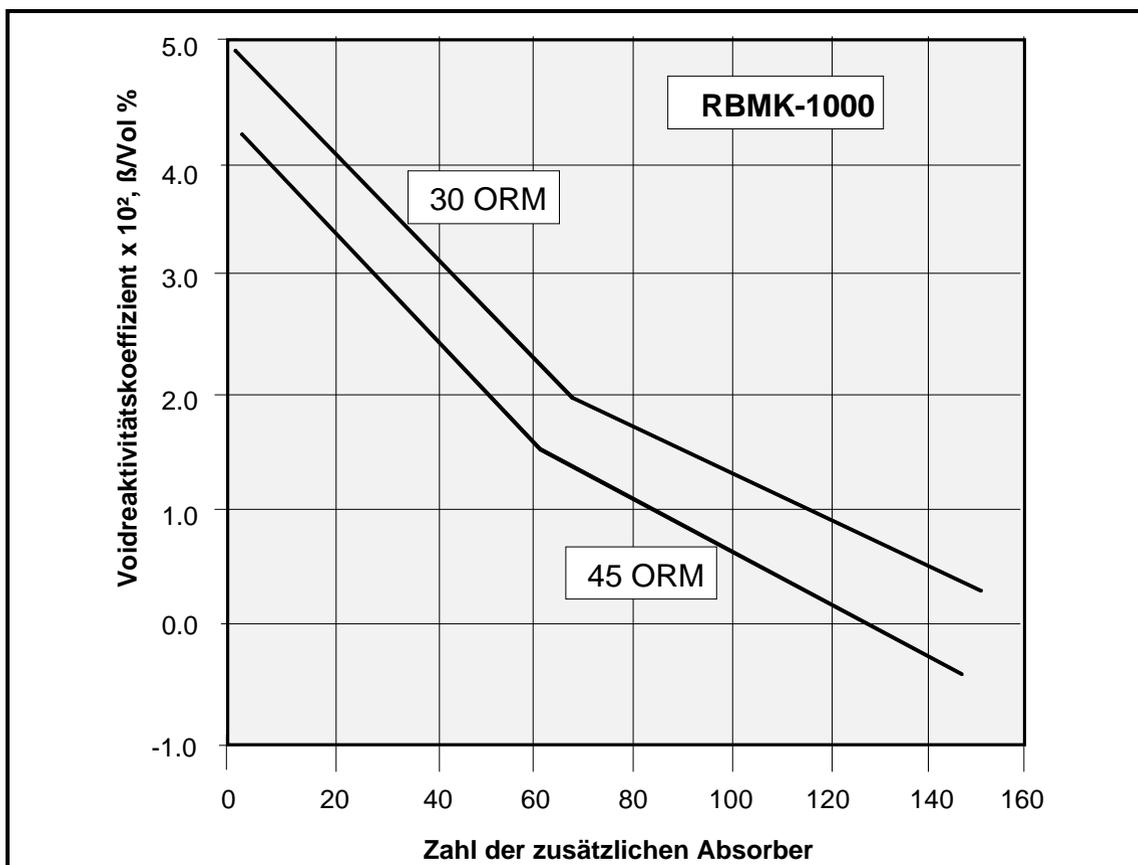
Die Sicherheit der RBMK wird maßgeblich durch das Reaktivitätsverhalten des Reaktorkerns bestimmt. Wesentliches Ziel der bereits durchgeführten und noch geplanten Maßnahmen ist es, die Möglichkeit großer, schneller Reaktivitätserhöhungen auszuschließen.

Wichtige Ertüchtigungen sind:

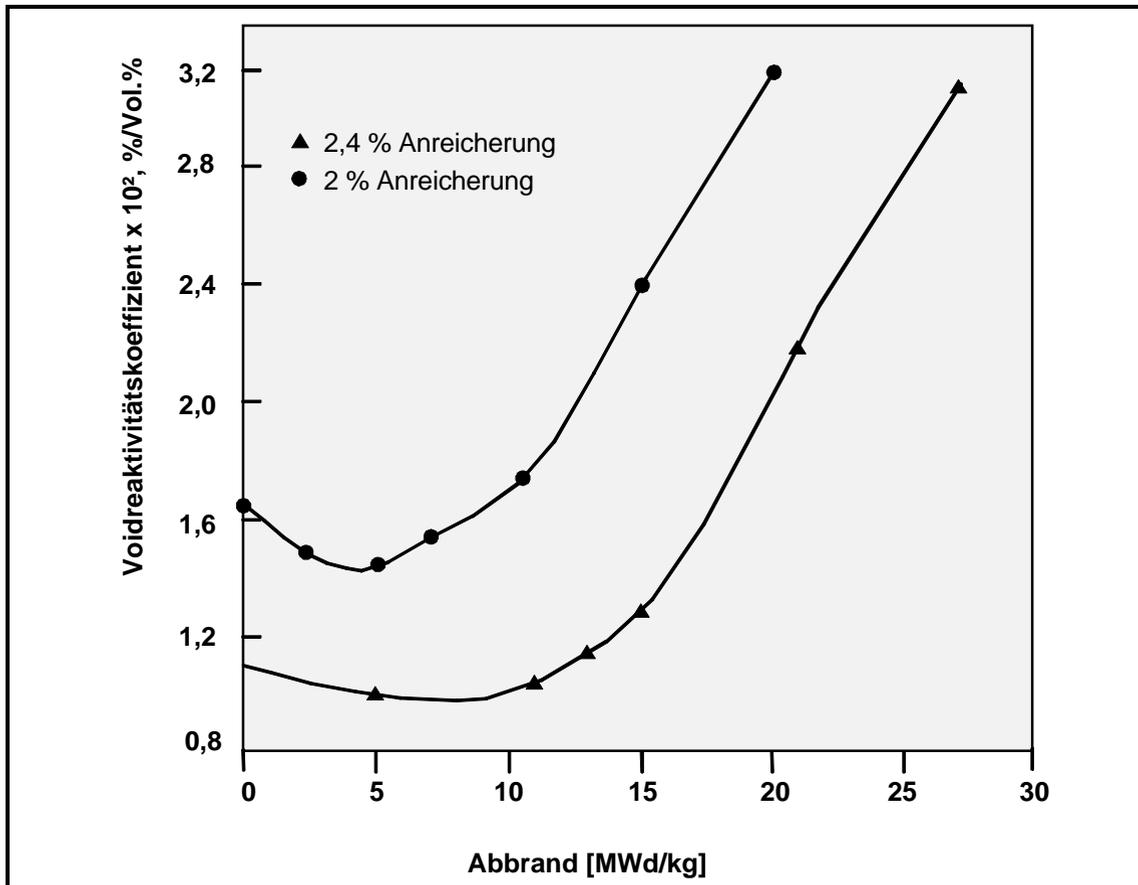
- Verringerung des positiven Voideffekts
- Beseitigung des "positiven Abschalteffekts"
- Begrenzung der Reaktivitätszufuhr bei Kühlmittelverlust im Kühlkreislauf für die Steuerstäbe
- Einbau eines schnellen Abschaltsystems.

### 7.1.1 Positiver Voideffekt

Der positive Voideffekt der Reaktivität des Kernkraftwerks Tschernobyl, Block 4, betrug kurz vor dem Unfall bei niedriger Leistung und einer betrieblichen Reaktivitätsreserve (ORM) von etwa 7 Steuerstäben mindestens 5  $\beta$ . Er war entscheidend für die Unfallauslösung und den katastrophalen Ablauf und ist als das wohl größte Sicherheitsdefizit



**Bild 7-1** Voidreaktivität in Abhängigkeit von der Anzahl der zusätzlichen Absorber



**Bild 7-2** Abhängigkeit des Voidkoeffizienten vom Abbrand und der Anfangsanreicherung ohne Berücksichtigung von Absorbern im Kern

der RBMK-Anlagen bis zur Zeit des Unfalls anzusehen. Seine Verringerung wurde für einen Weiterbetrieb der RBMK-Anlagen sehr wichtig.

Schon kurz nach dem Unfall wurden konstruktive Maßnahmen ergriffen, um den positiven Voideffekt zu reduzieren, insbesondere durch zusätzliche feste Absorberstäbe im Reaktorkern. Pro Reaktor wurden etwa 80 solcher Steuerstäbe installiert (Bild 7-1), in einigen Anlagen auch mehr. Die zusätzlichen Absorber haben die Nutzbarkeit des Brennstoffs verschlechtert, also den erreichbaren Brennstoffabbrand verringert. Um diesen Effekt zu kompensieren, wurde die Brennstoffanreicherung von Uran 235 erhöht und zwar bei den meisten Anlagen von 2,0 auf 2,4 % (Bild 7-2). Diese Erhöhung bewirkt eine weitere, allerdings kleinere Verringerung des positiven Voideffekts. Kontinuierlich werden die abgebrannten Brennelemente durch neue mit 2,4 % Anreicherung ersetzt. Dieser Vorgang ist zur Zeit noch nicht bei allen RBMK-Anlagen abgeschlossen. In den Blöcken 1 und 3 des Kernkraftwerks Tschernobyl beispielsweise werden zur Zeit jeweils rund 1 200 von den etwa 1 600 Brennelementen im Kern mit der Anreicherung von 2,4 % eingesetzt.

Darüber hinaus wurden die Betriebsvorschriften modifiziert. Sie verlangen jetzt eine größere Zahl in den Reaktor eingefahrener Steuerstäbe als früher. War früher bei Normalbetrieb eines RBMK-1000 ein ORM-Wert von 30 Steuerstäben einzuhalten, sind es heute 43 bis 48 Steuerstäbe (53 bis 58 bei einem RBMK-1500). Ein ORM-Wert von 30 darf heute keinesfalls unterschritten werden. Früher lag der minimal zulässige ORM-Wert bei 15. Die Einhaltung des minimal zulässigen ORM-Wertes wird auch heute noch nur durch Betriebsvorschriften geregelt. Allerdings wird der ORM-Wert inzwischen in allen Anlagen gut sichtbar in der Warte angezeigt. In einigen Anlagen wurde darüber hinaus ein Alarm bei Unterschreiten des zulässigen ORM-Wertes nachgerüstet.

**Tabelle 7-1** Aktuelle Werte für den Voideffekt und den Leistungskoeffizienten der RBMK-Anlagen (nach russischen Angaben)

Anlage	Datum der Messung	mittlerer Abbrand [MWd/kg]	Zusätzliche Absorber	BE mit 2,4 % Anreicherung	Void-effekt [ $\beta$ ]	Leistungs-koeffizient [ $10^{-4} \times \beta/\text{MW}$ ]
Leningrad-1	06.02.94	11,7	80	1 520	$0,8 \pm 0,2$	$-2,8 \pm 0,2$
Leningrad-2	23.12.94	11,5	80	1 474	$0,4 \pm 0,1$	$-2,5 \pm 0,2$
Leningrad-3	31.07.94	11,4	81	1 579	$0,8 \pm 0,1$	
Leningrad-4	16.03.94	11,4	80	1 579	$0,8 \pm 0,2$	$-2,1 \pm 0,2$
Kursk-1	11.04.94	9,6	99	1 102	$0,8 \pm 0,1$	-2,3
Kursk-2	18.05.95	8,7	108 <sup>1)</sup>	848	$1,0 \pm 0,1$	-1,8
Kursk-3	03.03.95	9,6	87 <sup>2)</sup>	1 075	$0,6 \pm 0,1$	-2,3
Kursk-4	16.12.94	10,2	84	1 210	$0,8 \pm 0,1$	-2,1
Smolensk-1	21.04.94	11,6	81	1 536	$0,6 \pm 0,2$	-2,8
Smolensk-2	29.03.95	11,5	81	1 546	$0,7 \pm 0,2$	-2,1
Smolensk-3	24.01.95	10,4	93	1 329	$0,1 \pm 0,2$	-2,7
Tschernobyl-1	28.04.95	10,6	84	1 168	$0,7 \pm 0,2$	-2,7
Tschernobyl-3	14.04.95	10,3	93	1 262	$0,7 \pm 0,2$	-3,5
Ignalina-1	18.03.95	7,7	52	0	$0,8 \pm 0,2$	$-2,3 \pm 0,2$
Ignalina-2	17.03.95	7,7	53	0	$0,8 \pm 0,2$	$-1,8 \pm 0,2$
<sup>1)</sup> einschließlich 34 zusätzlicher Absorber aus Edelstahl <sup>2)</sup> einschließlich 25 zusätzlicher Finger-Absorber aus Borkarbid						

In Tabelle 7-1 sind die aktuellen Werte des Voideffekts und des Leistungskoeffizienten nach den Verbesserungen dargestellt. Es handelt sich um Ergebnisse russischer Messungen im Leistungsbereich nahe Vollast, die bei mittlerem Abbrand und bei ORM-Werten von 42 bis 48 Steuerstäben durchgeführt wurden. Die Tabelle zeigt, daß der positive Voideffekt inzwischen bei den meisten Anlagen im Bereich von  $(0,8 \pm 0,2) \beta$  liegt. Die Größe des Voideffektes wird im Reaktorbetrieb regelmäßig alle 200 Betriebstage ermittelt und überprüft.

Wenn die Leistung bzw. der ORM-Wert kleiner werden, steigt der positive Voideffekt an, bei Übergang von Voll- auf Nullast beispielsweise um etwa  $0,7 \beta$ . Bei einem nach heutigen Betriebsvorschriften gerade noch zulässigen Anlagenzustand mit einer thermischen Reaktorleistung von 700 MW und dem minimal zulässigen ORM-Wert läge der positive Voideffekt derzeit bei den meisten RBMK - abhängig vom Abbrandzustand des Reaktorkerns - bei bis zu  $1,6 \beta$ . Bei einem Anlagenzustand, wie er damals unmittelbar vor dem Unfall bestand und in den die Anlage bei Verletzung der Betriebsvorschriften im Prinzip auch heute noch hineingefahren werden könnte, läge der Voideffekt zwar erheblich niedriger als früher, aber immer noch deutlich über  $2 \beta$ . Im Gegensatz zur Zeit vor dem Unfall gibt es jedoch inzwischen das nachgerüstete schnelle Abschaltssystem. Berücksichtigt man weiter den negativen Reaktivitätsrückwirkungseffekt durch die Brennstofftemperaturerhöhung, so erscheint eine Wiederholung des damaligen explosionsartigen Unfallablaufs heute kaum noch möglich. Allerdings besteht hier in einer Reihe von Detailfragen noch Untersuchungsbedarf.

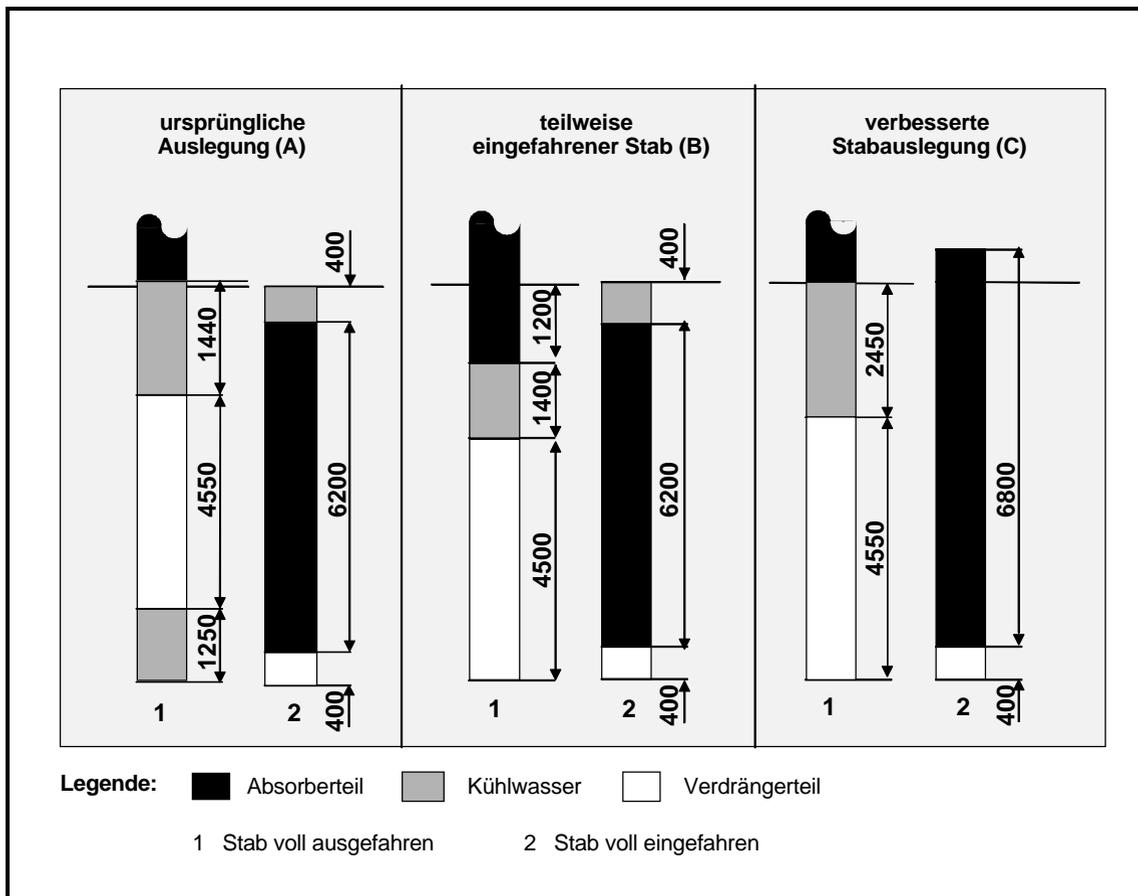
Grundsätzlich müßte die Einhaltung von Betriebsbedingungen, die von herausragender Bedeutung für die Sicherheit sind, durch überlappende Maßnahmen gewährleistet werden, wobei einer Automatisierung eine hohe Bedeutung zukommt. Eine wesentliche Verbesserung könnte beispielsweise durch die Einführung einer Anregung von "ORM niedrig" erreicht werden, die eine automatische Abschaltung einleitet.

An der Einführung eines derartigen Anregekriteriums arbeitet man derzeit in Leningrad-1 und -2.

## 7.1.2 Positiver Abschalteffekt

Die ursprüngliche Steuerstabkonstruktion der RBMK bedingte beim Einfahren der Steuerstäbe aus ihrer oberen Endlage zur Abschaltung des Reaktors einen "positiven Abschalteffekt" (siehe Abschnitt 1.4.4). Diese ungewöhnliche und bei westlichen Reaktoren nicht vorhandene Eigenschaft führte zu Beginn des Steuerstabeinfahrens zunächst positive Reaktivität zu. Die Größe des Effektes kann durch eine axiale Leistungsverteilung mit einer Überhöhung im unteren Kernbereich erheblich verstärkt werden. Der "positive Abschalteffekt" hat zusammen mit dem positiven Voideffekt zu den schweren Unfallauswirkungen beigetragen.

Eine der ersten Maßnahmen nach dem Unfall war, das Ausfahren der Steuerstäbe zu begrenzen. Später wurde die Steuerstabkonstruktion geändert, um diesen Auslegungsfehler zu beheben. Bild 7-3 zeigt eine schematisierte Gegenüberstellung von alter Steuerstabkonstruktion, Zwischenlösung und neuer Steuerstabkonstruktion. Durch die



**Bild 7-3** Veränderung der Steuerstabfunktion beim RBMK, um den positiven Abschalteffekt zu verhindern

Begrenzung des Ausfahrens der Steuerstäbe kann die für den positiven Abschalteneffekt maßgebliche Wassersäule im unteren Kernbereich nicht mehr auftreten, siehe Variante B in Bild 7-3. Die neue Steuerstabkonstruktion, Variante C, erlaubt das vollständige Ausfahren des Absorbenteils, da das Absorbenteil verlängert ist und der Abstand zwischen Graphitverdränger und Absorbenteil vergrößert wurde. Durch diese Änderung der Steuerstabkonstruktion wurde der "positive Abschalteneffekt" beseitigt. Sie wurde in allen RBMK-Anlagen durchgeführt.

### 7.1.3 Reaktivitätszufuhr bei Kühlmittelverlust im Steuerstabskühlsystem

Die Steuerstäbe im Kern des RBMK werden durch ein gesondertes System mit Wasser gekühlt. Ein Gaseintrag oder ein Verlust des Kühlmittels aus diesem Kühlkreislauf haben das Potential für eine hohe Reaktivitätszufuhr.

Die Höhe des Reaktivitätseffektes hängt deutlich von der Zahl der gerade im Kern befindlichen Steuerstäbe ab. Dies haben GRS-eigene Nachrechnungen von betrieblichen Messungen in Smolensk-1 beim Anfahren des Reaktors gezeigt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-2 aufgeführt. Im abgeschalteten Zustand bei eingefahrenen Steuerstäben ist der Reaktivitätseffekt des Steuerstabskühlkreislaufs nahezu Null bzw. leicht negativ. Mit zunehmender Anzahl der gezogenen Steuerstäbe erhöht sich der Reaktivitätseffekt. So kann bei 84 gezogenen Steuerstäben (kritischer Zustand des Reaktors) ein Leerlaufen des Systems bereits eine Reaktivitätszufuhr von 4,3  $\beta$  bewirken.

**Tabelle 7-2** Reaktivitätsänderung durch Entleeren des Steuerstabskühlkreislaufs in Abhängigkeit von der Anzahl der ausgefahrenen Steuerstäbe

Zahl der gezogenen Steuerstäbe	Reaktivitätseffekt bei Entleerung des Systems [ $\beta$ ]
alle Steuerstäbe vollständig eingefahren	- 0,1
46 Steuerstäbe vollständig ausgefahren	+ 3,1
84 Steuerstäbe vollständig ausgefahren	+ 4,3

Geplante Maßnahmen, um diesen Reaktivitätseffekt zu reduzieren, sehen eine Verbesserung durch Aufteilung des Steuerstabskühlkreislaufs in zwei oder mehr separate

Kreisläufe vor. Zusätzlich werden konstruktive Änderungen des Steuerstabaufbaus geplant, um das Wasserinventar in den Steuerstabkanälen zu verringern.

Für die meisten RBMK-Anlagen wurde bereits die Überwachung des Steuerstabskühlkreislaufs durch zusätzliche Messungen des Durchflusses und des Füllstandes verbessert. Bei Unterschreitung der Grenzwerte wird eine Abschaltung ausgelöst. Aufgrund von Betriebserfahrungen wurden Vorschriften für das Entlüften von Wärmetauschern und Pumpen im Steuerstabskühlkreislauf erstellt. Damit sollen mögliche Ursachen für Füllstandsabsenkungen oder Gaseintrag weitgehend ausgeschlossen werden.

Durch die Nachrüstmaßnahmen zur Aufteilung des Kühlkreislaufs und die verbesserte Steuerstabskonstruktion können Reaktivitätsstörungen durch das Entleeren des Steuerstabskühlkreislaufs ganz vermieden bzw. ihre möglichen Auswirkungen erheblich verringert werden. Entsprechende Maßnahmen sollten in allen Anlagen möglichst rasch durchgeführt werden.

#### **7.1.4 Regel- und Abschaltssystem**

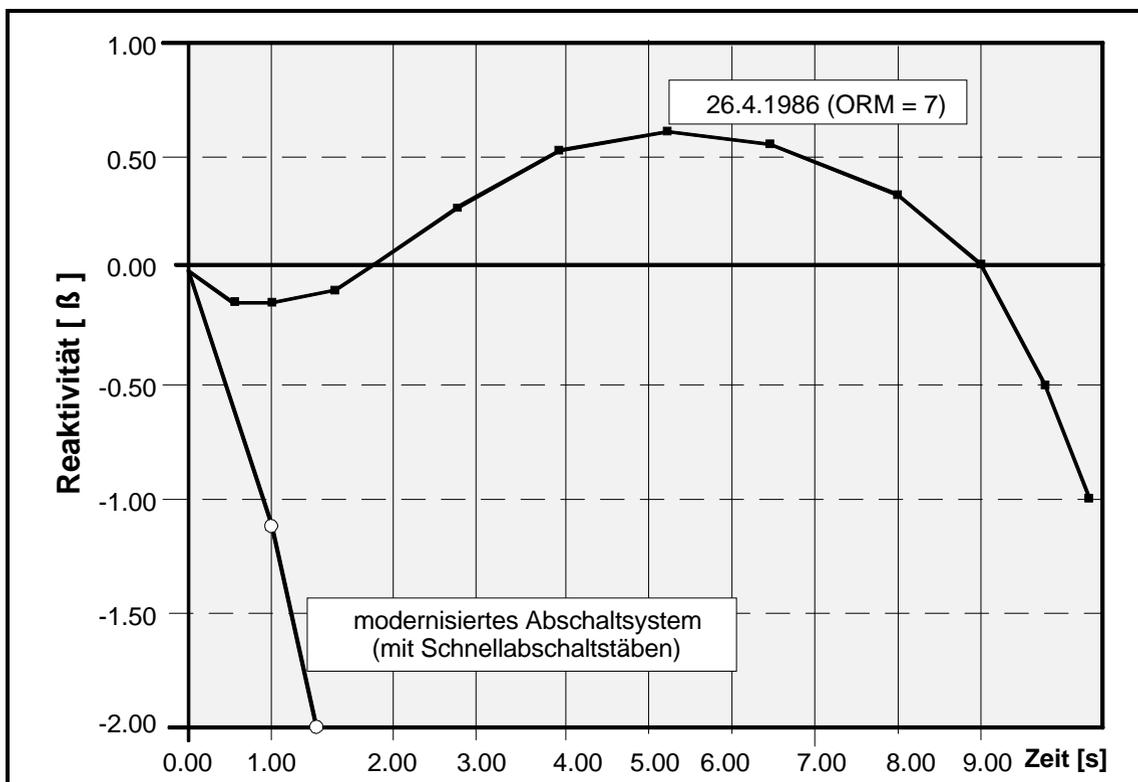
Die Aufgabe des Regel- und Abschaltsystems ist die betriebliche Reaktivitätsregelung und die Abschaltung des Reaktors in den unterkritischen Zustand. Diesem System kommt in RBMK-Anlagen eine besonders hohe Bedeutung zu, da sich die RBMK-Anlagen bei einer Reihe von Störungen und Störfällen nicht über Reaktivitätsrückwirkungen selbsttätig abschalten. Beispiele sind Kühlmitteldurchsatz-Reduzierungen, Druckentlastungsvorgänge und große Kühlmittelverlust-Störfälle. Es ist internationale Praxis, zwei diversitäre Abschaltssysteme vorzusehen, die jedes für sich den Reaktor abschalten können. Die RBMK-Anlagen erfüllen diese Anforderung zur Zeit noch nicht.

Das bestehende Regel- und Abschaltssystem der RBMK besitzt insgesamt 211 Steuerstäbe (Anlagen der 1. Generation hingegen besitzen 191 Steuerstäbe), die entweder manuell oder automatisch verfahren werden und bei Abschaltung gemeinsam einfahren oder einfallen. Bis zum Unfall war die Abschaltgeschwindigkeit für schnell ablaufende Störfälle zu langsam. Die Nachrüstmaßnahmen zielten deshalb darauf ab, die Abschaltzeiten zu verkürzen. So wurden 24 Steuerstäbe zu einem Schnellabschaltssystem umgerüstet. Diese Steuerstäbe fallen nun in 2 - 2,5 s in den Reaktorkern ein. Für die meisten anderen Steuerstäbe wurde die Einfahrzeit auf 12 - 14 s verkürzt.

Das Regel- und Abschaltssystem besteht aus folgenden Steuerstabgruppen (für Anlagen der 1. Generation gelten die Zahlen in Klammern):

- 24 (21) Schnellabschaltstäbe, Einfallzeit: 2,0 - 2,5 s,
- 12 (8) Steuerstäbe der lokalen automatischen Leistungsregelung (LAR),
- 24 (16) Steuerstäbe des lokalen automatischen Schutzes (LAP),
- 119 (114) manuelle und automatische Regelstäbe für die Reaktorleistungsregelung,
- 32 (32) verkürzte Steuerstäbe (USP), die von unten in den Kern einfahren und dazu dienen, die Leistung gleichmäßig zu verteilen.

Die kurze Einfallzeit der schnellen Abschaltstäbe wird durch eine geänderte Kühlung erreicht. Bei der neuen Konstruktion sorgt ein Wasserfilm für die Kühlung, so daß beim Einfahren bzw. Einfallen der Steuerstäbe kein Wasser mehr verdrängt werden muß, wie es bei den anderen Steuerstäben der Fall ist.



**Bild 7-4** Reaktivitätswirksamkeit des Abschaltsystems in RBMK-Anlagen als Funktion der Zeit

Die Anzahl der verkürzten Steuerstäbe, die von unten in den Reaktorkern eingefahren werden, wurde von 24 auf 32 erhöht. Im Gegensatz zu früher wurden diese Steuerstäbe in den Reaktorschutz aufgenommen.

Für das Abschaltssystem der RBMK der 2. und 3. Generation mit 211 Steuerstäben ergeben sich die folgenden Reaktivitätswirksamkeiten: Die Reaktivitätswirksamkeit der schnellen Abschaltstäbe beträgt etwa  $2 \beta$ , während die Reaktivitätswirksamkeit aller Steuerstäbe der manuellen und automatischen Regelung einen Betrag von etwa  $12 \beta$  hat. Diese Werte beziehen sich auf einen stabfreien Reaktorkern. Bei dem im Leistungsbetrieb üblichen ORM-Wert von 45 Steuerstäben verringert sich die Abschaltreaktivität auf etwa  $9 - 10 \beta$ . Bei einer Reaktorabschaltung werden alle Steuerstäbe gleichzeitig ausgelöst, so daß mit den 24 Schnellabschaltstäben auch die anderen Steuerstäbe einfallen. Daraus ergibt sich zu Beginn der Schnellabschaltung eine Reaktivitätswirksamkeit von etwa  $1,5 \beta/s$ .

Insgesamt sind mit den Verbesserungen des Regel- und Abschaltsystems die wesentlichen Defizite in diesem Bereich beseitigt. Einschränkungen ergeben sich für Anlagen der 1. Generation. Durch die Verringerung des positiven Voideffektes und die Erhöhung der ORM-Werte ist die Unterkritikalität im abgeschalteten Zustand geringer. Dieser Effekt wirkt sich bei Anlagen der 1. Generation mit nunmehr 191 Steuerstäben besonders aus. Hier sind noch zusätzliche Sicherheitsnachweise und gegebenenfalls Nachrüstungen erforderlich.

Weiterhin bleibt das Problem, daß die RBMK-Anlagen über kein zweites diversitäres Abschaltssystem verfügen. Angesichts der Besonderheiten der Kernauelegung ist die Nachrüstung eines solchen Systems zur Gewährleistung einer hohen Zuverlässigkeit der Abschaltfunktion wichtig. In Diskussion sind ein zweites unabhängiges Abschaltssystem mit Steuerstäben, die Einspeisung von flüssigen Absorbern wie Gadoliniumnitrat oder Borsäure sowie das Einfallen von Borkarbid-Kugeln in spezielle Kühlkanäle.

### **7.1.5 Verbesserungen im Reaktorschutzsystem**

Das Reaktorschutzsystem regt bei Erreichen festgelegter Kriterien in sechs verschiedenen Stufen automatisch eine Abschaltung oder eine Leistungsreduktion an. In den beiden höchsten Stufen wird eine automatische Reaktorabschaltung ausgelöst. Die nachfolgenden Stufen bewirken heute eine Leistungsabsenkung auf 50 bzw. 60 %.

Es wurde eine Reihe von Nachrüstungen durchgeführt. Sie hatte vor allem das Ziel, einen schnellen Anstieg der Leistung früher und zuverlässiger zu erfassen. Die Änderungen betrafen u.a. folgende Anregesignale: Der Wert der Anregung "Reaktorperiode niedrig" wurde von 10 s auf 20 s geändert, der Wert der Anregung "zulässige schnelle Leistungsänderung" auf 10 % vom Sollwert verringert. Zur Überwachung der Reaktorperiode wurde ein dreisträngiges System eingeführt. Die Reaktorperiode wird nun kontinuierlich bei allen Laststufen überwacht. Das Signal kann darüber hinaus nicht mehr unterdrückt werden. Ein vorher mögliches Blockieren der Abschaltfunktion durch Handeingriffe ist jetzt weitgehend verhindert.

Zusätzlich wurden in verschiedenen Anlagen weitere Anregesignale für die Abschaltung nachgerüstet, wie die oben beschriebenen Signale bei Störungen im Steuerstabskühlsystem. Weitere Verbesserungen sind notwendig. Ein Beispiel ist die Einführung eines Abschaltsignals "Niedriger Kühlmitteldurchsatz in einer Gruppe von Arbeitskanälen" als Beitrag zur Vermeidung des gleichzeitigen Versagens einer größeren Anzahl von Druckrohren.

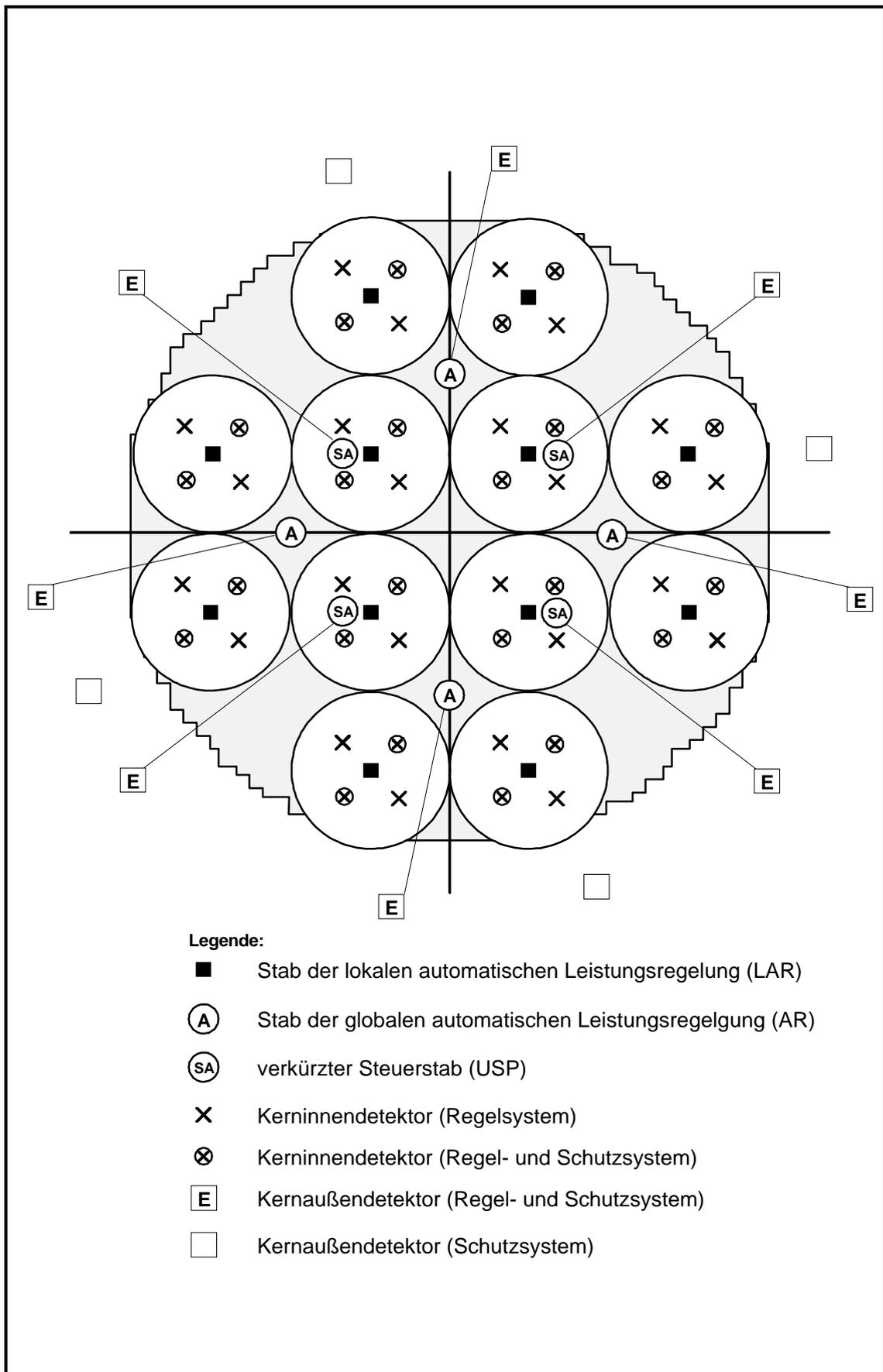
Für bestimmte auslösende Ereignisse werden Schutzmaßnahmen auch nach wie vor nur durch ein einziges Anregekriterium ausgelöst. Grundsätzlich sollten jedoch für alle Störfälle wenigstens zwei Anregesignale zur Verfügung stehen, die von unterschiedlichen physikalischen Größen abgeleitet werden. Hier ist noch eine systematische Analyse erforderlich.

### **7.1.6 Kernüberwachung**

Das System der Kernüberwachung liefert die für die Reaktivitäts- und Leistungskontrolle des Reaktorkerns erforderlichen Meßdaten. Für die Kernüberwachung stehen Detektoren sowohl außerhalb als auch innerhalb des Reaktorkerns zur Verfügung.

Bei den meisten Betriebszuständen (Leistungen größer 5 %) wird die Kernüberwachung durch ein sogenanntes "lokales" System, d.h. weitgehend von der Kerninneninstrumentierung, übernommen.

Dazu ist der Kern in Zonen aufgeteilt. Zu jeder Zone gehören ein Steuerstab und vier bis sechs lokale Detektoren. Bei einer lokalen Leistungsänderung von mehr als 1 % wird der Steuerstab der zugehörigen Zone zur Kompensation automatisch verfahren. Bei einem Leistungsanstieg von mehr als 2 % werden ein bis zwei weitere Steuerstäbe eingefahren. Um die Möglichkeit eines schnellen Steuerstabausfahrens zu verhindern,



**Bild 7-5** Regel- und Schutzsystem der Anlage Tschernobyl-3 (12-Zonen-System)

wurde die Steuerstabausfahrgeschwindigkeit auf 0,2 m/s begrenzt. Zusätzlich können Steuerstäbe manuell nur noch schrittweise in mehreren Stufen ausgefahren werden.

Die lokale Überwachung des Reaktorkerns erfordert eine Mindestzahl von Zonen, um die ausreichende Kontrolle aller Kernbereiche sicherzustellen. Die heutige Standardkonfiguration umfaßt 12 Zonen (Bild 7-5), die als ausreichend anzusehen ist. Die meisten Anlagen sind inzwischen mit dieser Konfiguration ausgestattet. Die übrigen sollen nachgerüstet werden. Tschernobyl-1 ist noch mit dem unzulänglichen 7-Zonen-System ausgerüstet.

Die radiale und axiale Leistungsverteilung im Reaktorkern wird von einem Online-Rechner (SKALA) aufgezeichnet und ausgewertet. Am SKALA-System wurden in allen Anlagen erste Verbesserungen vorgenommen. Statt früher maximal alle 30 Minuten wird der Kernzustand in Intervallen von fünf Minuten angezeigt. Dies gilt auch für den ORM-Wert. Allerdings reichen diese Maßnahmen noch nicht aus. Das SKALA-System ist veraltet und nicht ausreichend leistungsfähig. Hier sind weitere Verbesserungen nötig und möglich, wie die Konzepte zur Modernisierung von Leningrad-1 und -2 zeigen.

### **7.1.7 Zusammenfassende Bewertung der Reaktivitätskontrolle**

Die Maßnahmen zur Verringerung des hohen positiven Voideffektes und zur Beseitigung des positiven Abschalt-effektes sowie die Beschleunigung des Abschaltvorgangs waren die wichtigsten Änderungen, um die gravierenden Mängel in der nuklearen Auslegung zu beseitigen. Diese Nachrüstungen wurden in allen Anlagen in vergleichbarer Weise realisiert.

Untersuchungen zur Abhängigkeit des Voideffektes vom Betriebszustand zeigen allerdings, daß er bei Teillast und kleinen ORM-Werten deutlich zunimmt. Der Einhaltung des minimal zulässigen ORM und der minimal zulässigen Reaktorleistung kommt daher auch heute noch große Bedeutung zu. Sie wird nach wie vor nur durch Betriebsvorschriften geregelt.

Ein Entleeren des Kühlkreislaufs der Steuerstäbe kann zu einer hohen Reaktivitätszufuhr führen. Inzwischen wurde die Überwachung des Systems verbessert, um den Reaktor bei solchen Störungen zuverlässiger abzuschalten. Darüber hinaus sind Ände-

rungen der Konstruktion geplant, um die Größe der möglichen Reaktivitätszufuhr zu verringern.

Durch die Gesamtheit der getroffenen Maßnahmen wurde die Möglichkeit von Reaktivitätsstörfällen deutlich verringert. Eine Wiederholung des damaligen explosionsartigen Unfallablaufs erscheint heute kaum noch möglich. Dennoch sind weitere Verbesserungen der Reaktivitätskontrolle notwendig.

## **7.2 Kernkühlung**

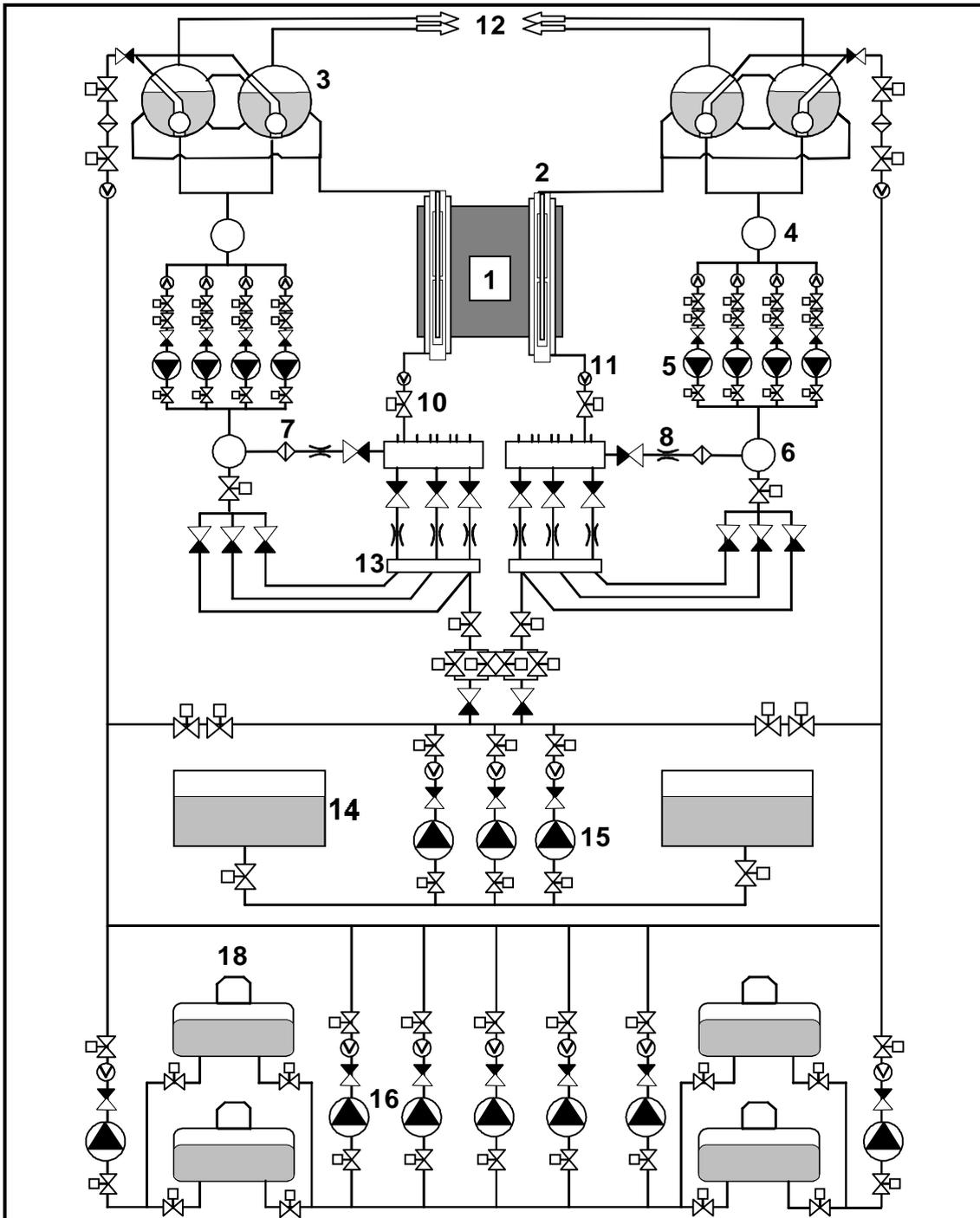
Zur Abfuhr der im Reaktor erzeugten Wärme stehen bei Normalbetrieb der Wasserdampf-Kreislauf, bei Störungen und Störfällen das Notspeise- und das Notkühlsystem zur Verfügung. Notspeise- und Notkühlsystem weisen insbesondere bei den Anlagen der 1. Generation (Bild 7-6) erhebliche Defizite auf. Eine weitere Schwachstelle betrifft die Kühlmittelzufuhr der einzelnen Druckrohre.

### **7.2.1 Kühlmittelblockaden bei den Druckrohren**

Aufgrund eines konstruktiven Mangels war an den Regel- und Absperrventilen in den Zuleitungen der Druckrohre ein Schaden möglich, der die Kühlmittelzufuhr blockieren konnte. Ein solches Ereignis führte am 24.3.92 in der Anlage Leningrad-3 zur Zerstörung des Brennelements mit anschließendem Druckrohrversagen. Nach Angaben der Betreiberländer wurden inzwischen in allen Anlagen die Regel- und Absperrventile durch eine verbesserte Konstruktion ersetzt, die jetzt eine Mindestöffnung zur Sicherstellung der Kühlung besitzt. Damit ist dieses Defizit beseitigt.

### **7.2.2 Notspeisewassersystem**

Das Notspeisewassersystem wurde nicht als Sicherheitssystem ausgelegt. Seine Hauptkomponenten und Rohrleitungen sind in enger Nachbarschaft zum Hauptspeisewassersystem im Maschinenhaus angeordnet. Die Stränge des Notspeisewassersystems sind nicht räumlich voneinander getrennt. Es ist praktisch nicht gegen übergreifende Einwirkungen geschützt. Die Betriebserfahrung zeigt, daß es dadurch keine ausreichende Zuverlässigkeit besitzt. So setzte der Brand am 11.10.91 in Tschernobyl,



- Legende:**
- |                         |                             |                                       |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 Reaktorkern           | 7 Mechanische Filter        | 14 Vorratsbehälter 500 m <sup>3</sup> |
| 2 Druckrohr             | 8 Durchsatzregler           | 15 Notspeisepumpe                     |
| 3 Dampfseparator        | 9 Gruppenverteilersammler   | 16 Hauptspeisepumpe                   |
| 4 Saugsammler           | 10 Regel- und Absperrventil | 17 Hilfsspeisepumpe                   |
| 5 Hauptkühlmittelpumpen | 11 Durchsatzmesser          | 18 Speisewasserbehälter               |
| 6 Drucksammler          | 13 Notkühlsammler           |                                       |

**Bild 7-6** Notkühlsystem der 1. Generation mit Nachrüstungen  
(Block 1 und 2 des Kernkraftwerkes Leningrad)

Block 2, der im Maschinenhaus zum Einsturz des Dachs führte, sowohl die Hauptspeisewasserpumpen als auch die Notspeisewasserpumpen außer Betrieb. Dies führte zu einer erheblichen Gefährdung der Kernkühlung. Der Reaktorkern wurde zeitweise nur durch die Sperrwasserpumpen der Hauptkühlmittelpumpen gekühlt.

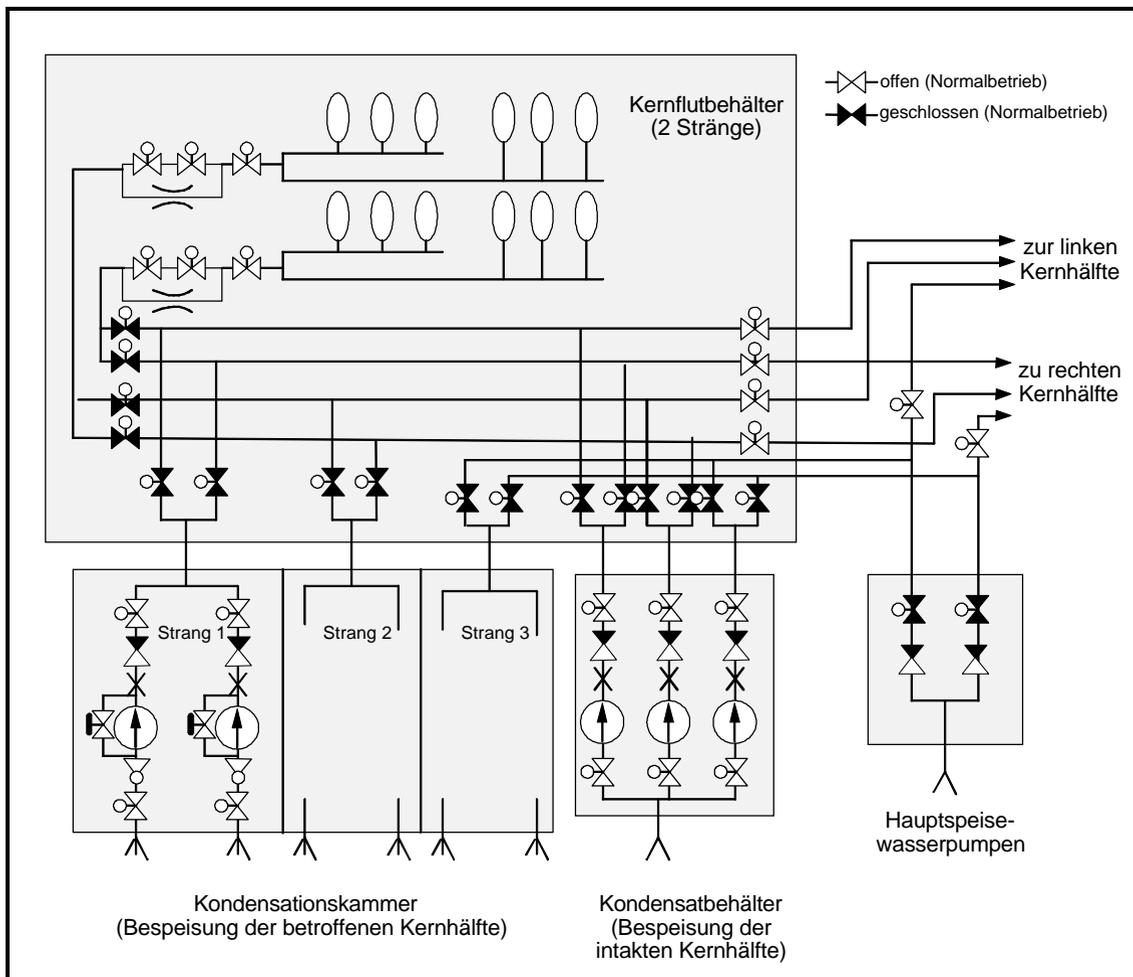
Angesichts der Auslegungsdefizite und der Betriebserfahrungen erscheinen Verbesserungen der Versorgung mit Notspeisewasser von großer Bedeutung. Dabei sind jedoch die Notspeise- und Notkühlsysteme im Verbund zu betrachten.

### **7.2.3 Notkühlsystem**

Die Notkühlsysteme der RBMK-Anlagen sind unterschiedlich aufgebaut (siehe Abschnitt 1.4.4 und Bild 1-18 sowie 1-19). Die 1. Generation besitzt kein eigenständiges Notkühlsystem. Zur Kernkühlung wird das Notspeisewassersystem verwendet. Damit bestehen die Defizite des Notspeisewassersystems auch in vollem Umfang für die Notkühlung. Eine Ertüchtigung der Notkühlfunktion in Anlagen der 1. Generation ist vordringlich.

In Leningrad-2 wird ein eigenständiges Notkühlsystem errichtet. Für andere Kernkraftwerke der 1. Generation bestehen entsprechende Pläne. Auch nach dieser Nachrüstung verbleiben zwei Schwächen. Die Notkühlleitungen bleiben weiterhin für jede Reaktorhälfte in gewissen Bereichen einsträngig und die Notkühlkapazität ist weiter begrenzt auf Brüche von Rohrleitungen der Nennweite 300. Die Bedeutung der Begrenzung auf Kühlmittelverlust-Störfälle NW 300 hängt stark davon ab, ob für die größeren Rohrleitungen ein vollständiger Bruch zu unterstellen ist oder nicht. Hier besteht noch Untersuchungsbedarf.

Das Notkühlsystem in Kernkraftwerken der 2. und 3. Generation, wie Tschernobyl-3, ist für den Bruch der größten kühlmittelführenden Leitung des Reaktorkühlkreislaufs mit NW 900 ausgelegt. Es entspricht weitgehend den heutigen Anforderungen für Sicherheitssysteme. Es ist dreisträngig ausgelegt. Alle Stränge besitzen durchgehende separate Einspeiseleitungen zu den Notkühlsammlern und weiter bis in die Gruppenverteilersammler. Allerdings bestehen Einschränkungen durch die Einsträngigkeit gewisser passiver Komponenten und bei der Auslegung bestimmter Hilfssysteme.



**Bild 7-7** Untersysteme der Notkühlung der Anlage Smolensk-3

## 7.2.4 Technisch-Wasser-System

Das Technisch-Wasser-System ist Teil der Nachkühlkette. Es dient zur Abfuhr der Nachwärme und zur Kühlung sicherheitstechnisch wichtiger Komponenten. Beim Technisch-Wasser-System finden sich die grundsätzlichen Defizite anderer Sicherheitssysteme wieder, wie teilweise fehlende räumliche Trennung und fehlender redundanter Aufbau.

## 7.2.5 Zusammenfassende Bewertung der Kernkühlung

Die Sicherheitssysteme zur Kernkühlung weisen bei der 1. Generation der RBMK-Anlagen erhebliche Defizite auf. Das Notspeisewassersystem ist in weiten Bereichen nicht redundant und nicht gegen übergreifende Einwirkungen, wie Brand oder Überflutung,

ausgelegt. Die Anlagen der 1. Generation besitzen außerdem kein eigenständiges Notkühlsystem. Hier sind insgesamt umfassende Ertüchtigungen, wie sie z.B. in Leningrad-1 und -2 zur Zeit durchgeführt werden, dringend erforderlich, um ein ausreichend hohes Zuverlässigkeitsniveau zu erreichen.

Bei den RBMK der 2. und 3. Generation ist die Situation hinsichtlich der Systemtechnik insgesamt günstiger. Die Anlagen verfügen über ein eigenständiges Notkühlsystem, und die Redundanzen der Sicherheitssysteme sind in größerem Umfang räumlich getrennt angeordnet.

Hinsichtlich des Notspeisewassersystems und Technisch-Wasser-Systems sind die Verhältnisse aber ähnlich wie bei der 1. Generation. Hier sind auch für die 2. und 3. Generation Nachrüstungen erforderlich.

## **7.3 Aktivitätseinschluß**

### **7.3.1 Sicherheitseinschluß**

Die 1. Generation der RBMK-Anlagen verfügt über keinen Sicherheitseinschluß - ein Störfall-Lokalisierungssystem, wie es im russischen genannt wird -, mit dem bei Lecks austretendes Kühlmittel mit den radioaktiven Stoffen von der Umwelt ferngehalten werden kann. Zur Niederschlagung von Dampf und zur Druckbegrenzung im Reaktorgebäude nach Kühlmittelverlust-Störfällen existiert lediglich ein Notkondensationssystem geringer Kapazität. Damit sind mittlere und größere Brüche im Bereich des Reaktorkühlkreislaufes zwangsläufig mit radioaktiven Freisetzungen in die Reaktorhalle bzw. in die Umgebung verbunden. Hinzu kommt, daß das Reaktorgebäude der Altanlagen nur für Leitungsbrüche bis einschließlich NW 300 ausgelegt ist.

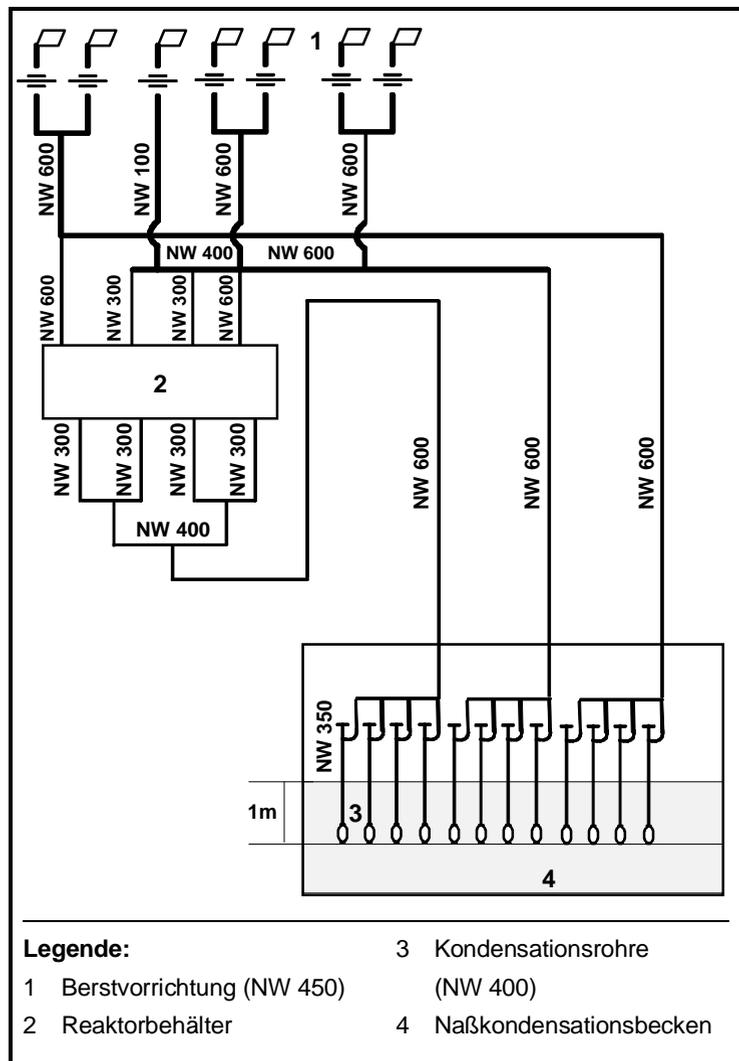
Die Anlagen Leningrad-1 und -2 rüsten zur Zeit partielle Sicherheitseinschlüsse nach, vergleichbar mit der 2. und 3. Generation der RBMK. Für die Naßkondensatoren werden separate Gebäude errichtet. Für die meisten anderen Anlagen der 1. Generation bestehen gegenwärtig noch keine konkreten Projekte für eine derartige Nachrüstung. Solche Nachrüstungen wären allerdings für sämtliche Altanlagen zweckmäßig.

Die RBMK-Anlagen der 2. und 3. Generation verfügen über einen partiellen Sicherheitseinschluß mit Naßkondensationsanlage. Auslegungsstörfälle sind der Bruch eines druckseitigen Sammlers der Hauptkühlmittelpumpen (NW 900), eines Gruppenverteilersammlers

(NW 300) in den unteren hermetisch abgeschlossenen Räumen des Reaktorgebäudes sowie das Versagen eines Druckrohres im Reaktorbehälter. Allerdings umfaßt der Sicherheitseinschluß nur Teile des Reaktorkühlsystems. Damit verfügt keine RBMK-Generation über einen Sicherheitseinschluß bei Brüchen in den oberen Räumen. Dies betrifft Frischdampfleitungen und obere Abschnitte der Downcomer- und Speisewasserleitungen. Nachrüstungen erscheinen hier praktisch nicht durchführbar. Nach russischen Angaben werden jedoch für die entsprechenden Störfälle die radiologischen Grenzwerte eingehalten.

### 7.3.2 Druckabsicherung des Reaktorbehälters

Der Reaktorbehälter, in dem sich der Reaktorkern befindet, muß bei bestimmten Störfällen gegen unzulässig hohen Druck abgesichert werden, um zu verhindern, daß die obere Deckplatte abhebt. Das Abheben der Deckelplatte würde zum Abriß aller Druckrohre und Steuerstabkühlkanäle führen. Dies hätte katastrophale Folgen. Als Auslegungsstörfall für die Druckabsicherung des Reaktorbehälters wurde ursprünglich der Bruch eines Druckrohres angenommen. Das gleichzeitige Versagen mehrerer Druckrohre wurde nicht betrachtet. Nach russischen Analysen wird allerdings der gleichzeitige Bruch von drei bis vier Druckrohren beherrscht.



**Bild 7-8** Vereinfachtes Schema des Druckabsicherungssystems des Reaktorbehälters

Bisher sind drei Ereignisse mit Versagen eines einzelnen Druckrohres aufgetreten. Diese Erfahrungen und Analysen belegen, daß eine Propagation, die zum Mehrfachversagen führt, unwahrscheinlich ist. Andere belastbare Szenarien mit Mehrfachversagen von Druckrohren sind nicht bekannt. Unabhängig davon bleibt dringend zu klären, ob es einen plausiblen Auslöser für das Mehrfachversagen von Druckrohren gibt und mit welcher Anzahl gleichzeitig versagender Druckrohre dabei zu rechnen wäre.

Maßnahmen zur Verbesserung der Druckabsicherung zielen vor allem auf die Verbesserung der Werkstoffprüfung der Druckrohre und die Erhöhung der Druckentlastungskapazität aus dem Reaktorbehälter. In Smolensk-3 und Leningrad-2 wurde die Druckentlastungskapazität aus dem Reaktorbehälter auf den technisch machbaren Wert erhöht. Damit wird das gleichzeitige Versagen von neun Druckrohren beherrscht. In den meisten anderen RBMK-Anlagen wurde die Druckentlastungskapazität im ersten Schritt entsprechend vier gleichzeitig versagenden Druckrohren erhöht. Auch hier ist längerfristig vorgesehen, den technisch machbaren Stand zu erreichen. Dies ist angesichts der möglichen Folgen eines entsprechenden Störfalls auch erforderlich.

## **7.4 Übergreifende Auslegungsanforderungen**

Die Sicherheitskonzepte für Kernkraftwerke beinhalten im allgemeinen sicherheitstechnische Vorkehrungen, die die Einhaltung der Schutzziele auch bei systemübergreifenden Einwirkungen sicherstellen. Solche Einwirkungen sind z.B. Brand, Überflutung und Erdbeben. Insbesondere werden redundante Sicherheitssysteme räumlich und funktionell getrennt angeordnet und notstromversorgt. Bei den RBMK sind diese Vorkehrungen nicht bei allen für die Sicherheit wichtigen Systemen getroffen. Bedeutende Defizite bestehen auch beim Brandschutz.

### **7.4.1 Elektro- und Leittechnik**

Die Elektro- und Leittechnik weisen ähnliche Schwächen wie andere Sicherheitseinrichtungen auf. Beispielsweise sind betriebliche und sicherheitstechnische Funktionen nicht konsequent funktionell und räumlich getrennt. So können sich Schäden durch räumliche Nähe von Stark- und Steuerstromkabeln oder Versagensfälle durch Brand oder Überflutung ausweiten. Derartige Defizite finden sich, wenngleich in geringerem Umfang, auch bei den

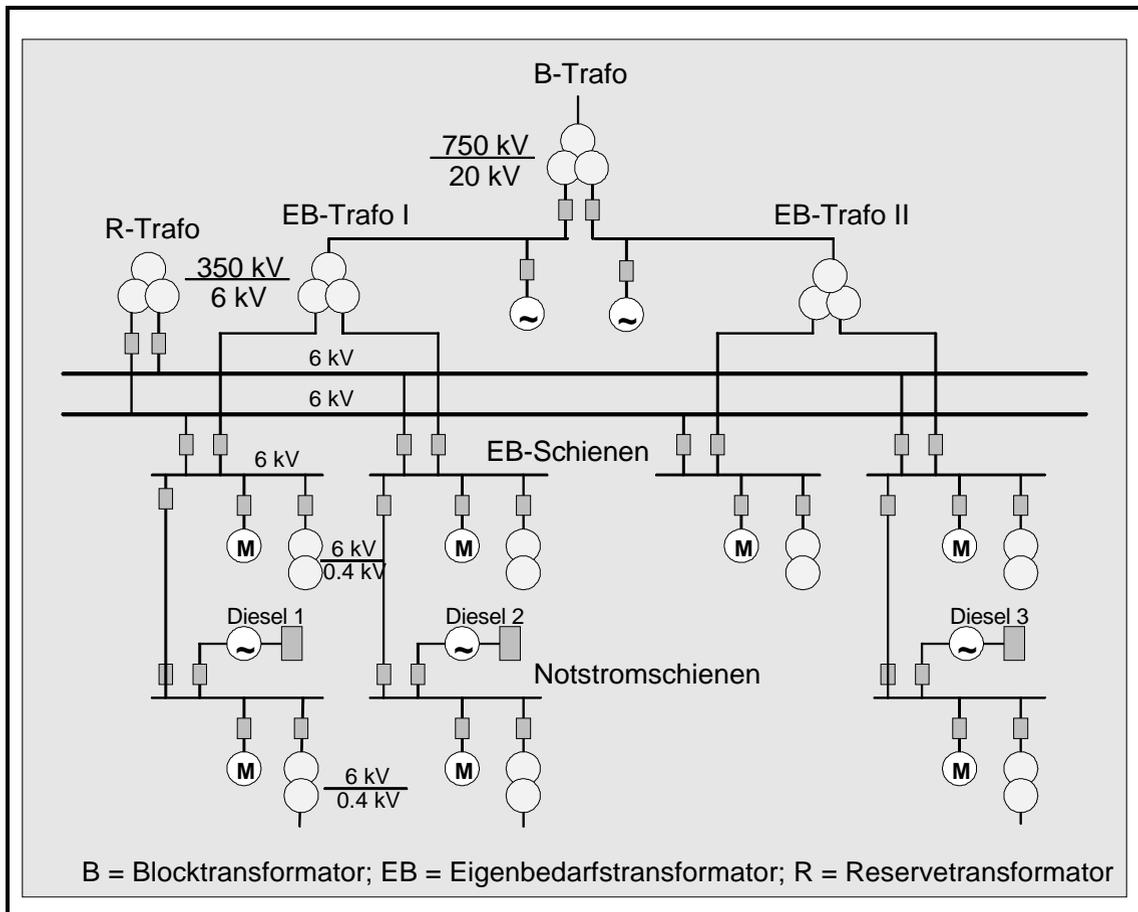
Anlagen der 2. und 3. Generation. Dabei sind die Redundanzen des Reaktorschutzes bei diesen Anlagen durch ein gemeinsames Lüftungssystem verbunden. Weitere wichtige Schwachstellen sind:

- Störfallfestigkeit der Instrumentierung
- Qualität der leittechnischen und elektrotechnischen Komponenten
- Absicherung elektrotechnischer Komponenten
- Kapazität der Notstrombatterien
- Notsteuerstellen bei Anlagen der 1. Generation.

Die Spezifikation der Instrumentierung und Meßumformer orientiert sich an den betrieblichen Umgebungsbedingungen. Für eine sichere Erfassung und Beherrschung von Störfällen ist aber zwingend erforderlich, daß die Instrumentierung auch unter den dann herrschenden Bedingungen funktioniert. Nach einer neueren Untersuchung liegt für eine größere Zahl von Instrumentierungskanälen keine Qualifikation für Störfallbedingungen vor.



**Bild 7-9** Oktober 1991: Der Brand im Turbinenhaus des Blocks 2 verursachte erhebliche Schäden



**Bild 7-10** Prinzipschaltbild der Eigenbedarfs- und Notstromversorgung der Anlage Tschernobyl-4

Die Mängel in der Qualität der leit- und elektrotechnischen Komponenten führen zu hohem Wartungsaufwand und häufigen Nachjustierungen und dadurch zu möglichen Fehleinstellungen.

Bei der Absicherung elektrotechnischer Komponenten bestehen erhebliche Defizite, die zu ausgedehnten Ausfällen von Unterverteilungen oder ganzen Stromversorgungsschienen führen können.

Die Entladezeit der Notstrombatterien beträgt nur 30 Minuten. Bei Ausfall der Notstromversorgung werden nach dieser Zeit die batteriegetriebenen Instrumentierungen und Meß- und Regeleinrichtungen nicht mehr versorgt.

Einige RBMK der 1. Generation besitzen keine Notsteuerstelle, um auch bei Ausfall der Warte die Anlage in einen sicheren Zustand zu überführen. Dies ist deshalb von Bedeu-

tung, weil z.B. in der Nähe der Warte größere druckführende Leitungen verlaufen, deren Bruch die Begehrbarkeit der Warte gefährden könnte.

Auf dem Gebiet der Leit- und Elektrotechnik wurden inzwischen Verbesserungen durchgeführt: z.B. wurde in Leningrad-2 die Sicherheitsleittechnik komplett ausgetauscht. In anderen Anlagen waren die Nachrüstungen aber nur punktuell.

Zwischen östlichen und westlichen Experten besteht daher weitgehend Übereinstimmung, daß weitere und umfassende Ertüchtigungsmaßnahmen in der Elektro- und Leittechnik der RBMK-Anlagen erforderlich sind. Eine Reihe von Unterstützungsprogrammen läuft oder ist geplant. Allerdings sind verschiedene Maßnahmen, z.B. zur räumlichen und funktionellen Trennung, aufwendig. So konnten derartige Maßnahmen in der Anlage Leningrad-2 erst durch Neubau von Teilen des Schaltanlagegebäudes verwirklicht werden.



**Bild 7-11** Batterieanlage der Notstromversorgung  
(Beispiel: RBMK-1500 in Ignalina, Litauen)

## **7.4.2 Brandschutz**

Der Brandschutz der RBMK entspricht alten russischen Standards. Er legt den Schwerpunkt auf die Brandbekämpfung durch die Werksfeuerwehr. Moderne Konzepte zielen vor allem auf die Brandvorbeugung und die räumliche und brandschutztechnische Trennung von Sicherheitssystemen, gegebenenfalls ergänzt durch automatische Löschsyste-me.

Entsprechend der hohen Bedeutung des Brandschutzes wurden zahlreiche Nach-rüstmaßnahmen durchgeführt. Diese umfassen z.B. die Verwendung von brandhem-menden Anstrichen, Brandschutztüren, brandhemmenden Kabeln sowie die Einführung räumlicher bzw. brandschutztechnischer Trennung der Sicherheits- und Hilfssysteme. Dennoch ist der heutige Status des Brandschutzes weiterhin als unbefriedigend anzu-sehen.

Weitere Ertüchtigungen sind notwendig, wobei die 1. Generation erheblich stärker be-troffen ist als die 2. und 3. Generation. Insbesondere ist ein Brandschutzkonzept erfor-derlich, welches die Vorbeugung, Meldung, Löschung von Bränden, die Begrenzung der Brandlasten sowie die Begrenzung der Brandauswirkungen als vorrangige Elemen-te des Brandschutzes vor der Brandbekämpfung durch Werksfeuerwehren vorsieht. Dar-über hinaus sind systematische Brandgefahrenanalysen, z.B. für die Kabeltrassen, durch-zuführen, um örtliche oder brandschutztechnische Schwachstellen zu identifizieren.

## **7.4.3 Einwirkungen von außen, insbesondere Erdbeben**

Die RBMK-Anlagen wurden nicht gegen Flugzeugabsturz oder Explosionsdruckwellen ausgelegt. Auch eine Auslegung gegen Erdbeben unterblieb bei der 1. Generation und z.T. auch bei der 2. Generation entsprechend den in den 60er Jahren gültigen sowjeti-schen Regelwerken. Erst zu Beginn der 80er Jahre wurden technische Regeln für die seismische Auslegung erarbeitet, die teilweise auf neuere Anlagen (Smolensk-3, Ignali-na-2) angewendet wurden.

Für die älteren RBMK-Anlagen wurden zwischenzeitlich Nachrechnungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß die bei Erdbeben zu unterstellenden Belastungen, mit Ausnah-me einer kleinen Zahl wichtiger Komponenten, z.B. der Auflager der Dampfseparato-ren, abgetragen werden können. Nachrüstungen werden diskutiert.



**Bild 7-12** Blick in die Reaktorhalle einer RBMK-Anlage

Dabei ist auch zu berücksichtigen, daß alle Standorte der RBMK-Anlagen in seismisch relativ inaktiven Gebieten der russischen Platte liegen. Obwohl dies auch für den Standort Tschernobyl gilt und dieser weit von Gebieten erhöhter seismischer Aktivität entfernt ist, werden derzeit in der Ukraine höhere seismische Lastannahmen diskutiert, als sie für die übrigen RBMK-Anlagen zugrunde gelegt wurden. Wie belastbar die dabei herangezogenen Untersuchungen sind und welcher Handlungsbedarf sich daraus ergibt, muß noch genauer untersucht werden.

## **7.5 Störfallanalysen**

Computersimulationen von Störfällen sind eine unverzichtbare Grundlage der Sicherheitsauslegung von Kernkraftwerken. Sie dienen dazu, das Verhalten der Anlage für alle zu unterstellenden Störungen und Störfälle vorauszuberechnen und damit die Basis für die Bemessung der Sicherheitseinrichtungen zu schaffen. Derartige Störfallana-

lysen konnten für RBMK-Anlagen nur in sehr begrenztem Umfang durchgeführt werden, weil

- den Anlagenkonstruktoren keine geeigneten Rechenprogramme zur Verfügung standen und
- sie keinen Zugang zu entsprechend leistungsfähigen Rechenanlagen hatten.

Dieses Defizit wirkt sich besonders nachteilig aus, weil der RBMK ein sehr komplexes Anlagenverhalten zeigt, das sich mit vereinfachten Modellen kaum realistisch simulieren läßt. Beispielsweise konnten die für das Reaktivitätsverhalten maßgeblichen mehrdimensionalen Rechnungen vor dem Unfall in Tschernobyl nicht durchgeführt werden.

Nach dem Unfall in Tschernobyl wurden zunehmend leistungsfähigere Rechenprogramme für die Störfallanalyse von RBMK eingesetzt, darunter auch westliche, für herkömmliche Leichtwasserreaktoren entwickelte Störfallcodes. Diese Rechenprogramme benötigen allerdings noch eine weitere Qualifizierung der zugrunde liegenden Modelle für RBMK-spezifische Bedingungen.

Vom systematischen Einsatz solcher Rechenprogramme für wichtige Auslegungsfragen, wie beispielsweise das transiente Anlagenverhalten bei Störfällen, werden wichtige Fortschritte in der Sicherheit und bei ihrer Bewertung erwartet.

Durch die zahlreichen Anlagenänderungen stimmen die Annahmen und Eingangsdaten der existierenden Störfallanalysen nicht mehr mit dem aktuellen Stand in den Anlagen überein. Das betrifft z.B. den Voidreaktivitätskoeffizienten sowie die Anregekriterien für die Reaktorschnellabschaltung und für die Notkühlung. Deshalb muß ein Großteil der Störfallanalysen mit anlagenspezifischen Daten wiederholt werden.

## **7.6 Betriebsführung**

Die Sicherheit von Kernkraftwerken wird maßgeblich von der Betriebsführung bestimmt. Das Sicherheitskonzept sowjetischer Reaktoren setzte dabei großes Vertrauen in das korrekte Handeln des Personals. Dies schlägt sich unter anderem in den Prozeduren zur Störfallbeherrschung nieder. Charakteristisch sind hier die vergleichsweise große Bedeutung von Handeingriffen der Betriebsmannschaft im Normalbetrieb und bei der Störfallbeherrschung sowie bedeutende Handlungsspielräume der Operateure. Ein Bei-

spiel für die Belastung des Operateurs während des normalen RBMK-Betriebs stellt die Stabilisierung der räumlichen Leistungsdichteverteilung dar (Tabelle 7-3).

**Tabelle 7-3** Handmaßnahmen des Operateurs zur Stabilisierung der räumlichen Leistungsdichteverteilung

Generation der RBMK-Anlagen	Normalbetrieb [Handlungen/h]	Auswechseln der Brennelemente [Handlungen/h]	Entwicklungsstand
Erste RBMK-Anlagen in Gleichgewichtsbeladung (Leningrad-1, Ende der 70er Jahre)	180	500	hoher positiver Voideffekt ( $\alpha_{\varphi}$ ), $\alpha_{\varphi} = (4-5)\beta \times 10^{-2}/\text{Vol}\%$ kein LAR-System
RBMK-Anlagen im Zeitraum 1980 - 1986	20	50	weiterhin hoher Voideffekt, $\alpha_{\varphi} = (4-5)\beta \times 10^{-2}/\text{Vol}\%$ mit LAR-System
Anlage Smolensk-3, 1993	2	50	heutige Auslegung mit reduziertem Voideffekt, $\alpha_{\varphi} \approx 0,3 \beta \times 10^{-2}/\text{Vol}\%$ LAR-System
LAR: Lokale automatische Leistungsregelung			

### 7.6.1 Management und Verantwortlichkeit

Bis in die jüngste Vergangenheit fehlte in den RBMK betreibenden Ländern eine klare Trennung der Verantwortlichkeiten für die nukleare Sicherheit sowohl zwischen Hersteller, Betreiber und Staat als auch innerhalb der Kraftwerke selbst. Zusätzlich war die Situation durch obrigkeitsorientierte Strukturen und erhebliche Kommunikations- und Entscheidungsprobleme gekennzeichnet. Die Verantwortung für Sicherheitsfragen konnte vor Ort, wo konkrete Sicherheitsaufgaben zu lösen waren, von den dort tätigen Verantwortlichen nur im Rahmen vorgeschriebener Strukturen und Verfahren wahrgenommen werden. Auch fehlten eine kompetente, unabhängige Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde und ihr zuarbeitende unabhängige Sachverständigenorganisationen, die darüber wachen, daß alle wichtigen Fragen der Sicherheit die erforderliche Beachtung finden.

Mehrere Zusammenarbeitsprojekte unterstützen heute den Aufbau kompetenter, unabhängiger und durchsetzungsfähiger Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden. Wichtige rechtliche Grundlagen (Atomgesetz) für die Tätigkeit der Behörden wurden in Rußland und der Ukraine kürzlich geschaffen. In Litauen werden sie derzeit erarbeitet. Teilweise fehlen jedoch finanzielle Mittel, um in erforderlichem Umfang auf kompetente Fachorganisationen zurückzugreifen.

### **7.6.2 Betriebsvorschriften**

Der Tschernobyl-Unfall hat Bedeutung und Grenzen von Betriebsvorschriften aufgezeigt. Obwohl die Mannschaft eine große Verantwortung für Sicherheit und Störfallbeherrschung zu tragen hatte, wurde sie nicht ausreichend durch klar strukturierte Anweisungen und eine übersichtliche Mensch-Maschine-Schnittstelle unterstützt. Bis heute sind die Betriebsvorschriften teilweise nicht konsistent mit den fachlichen Inhalten der Sicherheitsberichte und entsprechen nicht dem aktuellen Stand von Anlagentechnik und Sicherheitsanalysen.

### **7.6.3 Erfahrungsrückfluß**

Bis in die jüngste Vergangenheit hinein waren die Auswertung von Betriebserfahrungen sowie die Weiterleitung und Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse unzureichend. Auswertungen fanden in speziellen Abteilungen statt. Wichtige Informationen wurden teilweise als Verschußsache behandelt und weder in der eigenen noch an andere Organisationen weitergegeben. In mancher Hinsicht haben sich die Verhältnisse, auch Dank west-östlicher Kooperationen, inzwischen verbessert. Andererseits sind aus dem Zerfall der Sowjetunion neue Schwierigkeiten erwachsen.

### **7.6.4 Dokumentation**

Für den Betrieb ist eine vollständige und laufend aktualisierte Anlagendokumentation im Kernkraftwerk erforderlich. Dies gilt verstärkt, wenn, wie dies in Tschernobyl der Fall war, eine erhebliche personelle Fluktuation mit Verlust von Know-how-Trägern vorliegt.

In den RBMK-Anlagen gibt es seit langem Instrumentarien, erforderliche Dokumente ordnungsgemäß aufzubewahren, zu aktualisieren und zu verteilen. Diese Instrumentari-

en wurden jedoch mit sehr unterschiedlichem Engagement angewandt. Dies schlägt sich auch in einem schlechten Zustand und einer unzureichenden Zugänglichkeit der Unterlagen nieder. In einigen Fällen, wie z.B. in Litauen, wird gegenwärtig mit internationaler Hilfe an der Verbesserung der Anlagendokumentation gearbeitet.

### **7.6.5 Instandhaltung**

Die Instandhaltung muß die nach der Auslegung geforderte Funktion der sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen gewährleisten. Sie umfaßt Prüfung, Wartung und Reparatur.

Die RBMK-Anlagen erfordern vergleichsweise umfangreiche Instandhaltungsarbeiten. Dies ist teils durch den komplexen Aufbau der Anlage bedingt, teils waren wichtige Komponenten nicht ausreichend zuverlässig und mußten vorzeitig ausgetauscht werden.

In internationaler Kooperation durchgeführte Überprüfungen der Instandhaltungspraxis haben eine Reihe von Defiziten aufgezeigt. Diese betreffen beispielsweise die Festlegung von Prüfumfang und Prüfintervallen, die technische Ausstattung mit Prüfeinrichtungen und die Qualität der Arbeiten. Wegen der schwierigen wirtschaftlichen Situation macht auch die Beschaffung von qualifizierten Ersatzteilen immer wieder Probleme.

Auch wenn viele Komponenten mit größeren Sicherheitszuschlägen ausgelegt wurden, sind bei länger anhaltenden Defiziten im Bereich der Instandhaltung erhebliche Sicherheitseinbußen zu erwarten.

### **7.6.6 Training und Schulung**

Die Trainingsprogramme der RBMK-Anlagen beziehen praktisch nur die Operateure ein. Schulungsprogramme für das technische Personal und die Führungskräfte in konzeptionellen Sicherheitsfragen, wie z.B. Auslegungsbasis, Störfallanalyse oder Rückfluß aus der Betriebserfahrung, fehlen weitgehend. Auch sind Umfang und Häufigkeit der Ausbildung der Operateure am Simulator unzureichend, was seinen Grund im Fehlen bzw. in der begrenzten Leistungsfähigkeit von RBMK-Simulatoren hat. Nicht zuletzt wegen des geringen Automatisierungsgrads der RBMK-Anlagen und ihres komplexen Verhaltens ist dieses Defizit von besonderer Bedeutung.

### **7.6.7 Zusammenfassende Bewertung der Betriebsführung**

Im Bereich der Betriebsführung gibt es eine Fülle von Möglichkeiten zur Verbesserung der Sicherheit von RBMK-Anlagen. Allerdings kamen viele Dinge in der Vergangenheit nur langsam voran, weil in der schwierigen wirtschaftlichen Situation die Mittel fehlten. Grundsätzlich ließe sich jedoch vieles in verhältnismäßig kurzer Zeit und mit nach westlichen Maßstäben geringem Aufwand erreichen.

Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, daß hier internationale Kooperation sehr wirkungsvoll sein kann. Ansätze zu einer systematischen Analyse der Betriebsführung sind z.B. mit dem von der Europäischen Union finanzierten Vorhaben "RBMK Safety Review" - unter Einbindung der RBMK-Betreiber - eingeleitet worden und führten zu umfangreichen Empfehlungen unterschiedlicher Dringlichkeit. Diese Analysen werden jedoch nur für wenige Anlagen durchgeführt.

## **8 Erforderliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Funktion des Sarkophags**

Der Sarkophag wurde 1986 größtenteils mit Fernhandlung und unter großem Zeitdruck errichtet. Es gelang, den zerstörten Reaktorblock einzuschließen und eine weitere Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umgebung weitgehend zu verhindern. Dieses wesentliche Schutzziel erfüllt der bestehende Sarkophag seit nunmehr zehn Jahren. Der Austritt von radioaktiven Stoffen ist sehr gering. Allerdings stellt der Sarkophag keinen dauerhaften Einschluß dar, da insbesondere seine Standsicherheit fraglich ist. Dies betrifft vor allem die Abtragung von Lasten bei äußeren Einflüssen, wie z.B. Wind-, Schnee- und Erdbebenlasten. Weitere Sicherheitsbedenken richten sich auf eine mögliche Freisetzung von radioaktivem Staub bei mechanischen Belastungen im Inneren des Sarkophags. Nicht völlig ausgeschlossen, allerdings sehr unwahrscheinlich, ist der Fall, daß es durch einströmendes Wasser wieder zu einem kritischen Zustand der vorhandenen Kernbrennstoffmasse kommen könnte. Langfristig besteht auch die Gefahr, daß radioaktive Stoffe aus dem Sarkophag ins Grundwasser übertreten.

Von ukrainischer Seite ist immer wieder auf die Gefahr weitreichender Folgen bei einem Einsturz des Sarkophags hingewiesen worden. Eine Abschätzung dieses Risikos zeigt jedoch, daß ein solches Ereignis zwar große Strahlenexpositionen für das Kraftwerkspersonal zur Folge hätte, bereits der nächste größere Ort Slavutitsch aber kaum noch betroffen wäre. Auch bei einem Kritischwerden des Kernbrennstoffs wären weder große Freisetzungen noch mechanische Auswirkungen zu befürchten.

Dennoch sind Maßnahmen zur Verbesserung der Situation unerlässlich. Dabei ist die Sicherstellung der Standsicherheit des bestehenden Sarkophags vordringlich. Insbesondere müssen diejenigen lasttragenden Strukturen und ihre Fundamente verstärkt werden, die möglicherweise vorgeschädigt sind.

Damit kann auch die Standsicherheit gegenüber Erdbeben erhöht werden. Um Maßnahmen zur Verbesserung der Standsicherheit des Sarkophags planen und durchführen zu können, müssen der Zustand der Baustruktur sowie mögliche Belastungen und Einwirkungen detailliert untersucht und spezifiziert werden. Eine Verbesserung der Standsicherheit des Sarkophags ist auch erforderlich, um eine Beeinträchtigung des angrenzenden, noch in Betrieb befindlichen Blockes 3 auszuschließen.

Für die langfristige Gewährleistung der Sicherheit am Standort ist ein Gesamtkonzept für den Einschluß der radioaktiven Stoffe zu entwickeln. Dieses Gesamtkonzept muß alle wesentlichen Sicherheits- und Umweltaspekte berücksichtigen. Dazu gehören auch

der Strahlenschutz während der durchzuführenden Bau- und Sanierungsmaßnahmen, die Behandlung und Endlagerung von radioaktiven Abfällen sowie der Schutz des Grundwassers vor dem Eintrag radioaktiver Stoffe.

Die ukrainische Regierung hat im Jahre 1992 eine internationale Ausschreibung zur Lösung dieses Problems durchgeführt. Im Ergebnis dieser Ausschreibung wird von einem Firmenkonsortium die Errichtung eines neuen größeren Sarkophags 2 vorgeschlagen. Dieses Projekt ist technisch anspruchsvoll und geht von einer Stilllegung des noch betriebenen Blockes 3 aus. Es erfordert hohe finanzielle Mittel, deren Aufbringung gegenwärtig noch nicht gesichert ist. Das Projekt, einen zweiten Sarkophag zu errichten, macht die Verbesserung der Standsicherheit des bestehenden Sarkophags keineswegs überflüssig. Diese Verbesserung ist vielmehr notwendig, um überhaupt einen zweiten Sarkophag errichten zu können.

Während der Stabilisierung des vorhandenen Sarkophags wird zu untersuchen sein, inwieweit dadurch bereits der erforderliche Schutz erreicht werden kann, ohne einen weiteren aufwendigen Sarkophag bauen zu müssen. Dabei sollten auch Möglichkeiten zur Entschärfung der Situation im Inneren des bestehenden Sarkophags geprüft werden. Dazu gehören z.B. eine teilweise Bergung von kernbrennstoffhaltigen Massen, verbesserte Techniken zur Bindung von radioaktiven Stäuben und eine Erneuerung der veralteten Meßtechnik zur Überwachung des Sarkophags. Für Baumaßnahmen und eventuelle Eingriffe in den bestehenden Sarkophag müssen ferngesteuerte oder automatisierte technische Verfahren konzipiert und eingesetzt werden.

Wirkungsvolle Dekontaminationsmaßnahmen, temporäre Abschirmungen und eine umfassende Kontrolle der radiologischen Situation müssen integrale Bestandteile des Konzeptes sein. Um langfristig eine ökologisch verträgliche Situation am Unfallort zu erreichen, sind auch ausreichende Möglichkeiten zur Behandlung, Zwischen- und Endlagerung der radioaktiven Abfälle zu schaffen.

Der zerstörte Reaktorblock wird für viele Jahrzehnte, vielleicht Jahrhunderte eingeschlossen und von der Biosphäre isoliert bleiben müssen. Nur in internationaler Kooperation wird es der Ukraine gelingen, eine langfristig sichere Lösung dieses Problems zu erreichen. Von großer Bedeutung ist, das nach dem Zerfall der Sowjetunion immer stärker über unterschiedliche Organisationen Rußlands, Weißrußlands und der Ukraine zersplitterte Wissen zu den mit Tschernobyl verbundenen Fragen zu bündeln. Dies erfordert eine verstärkte technisch-wissenschaftliche Kooperation dieser Länder untereinander und mit dem Westen, um die für die Entwicklung eines guten Gesamtkonzeptes notwendige belastbare Daten- und Informationsbasis zu schaffen.

## 9 Zukünftige Strahlenschutzmaßnahmen

Zehn Jahre nach dem Reaktorunfall besteht das vorrangige Ziel der Strahlenschutzmaßnahmen heute darin, eine Aufnahme von langlebigen Radionukliden mit der Nahrung und dem Trinkwasser zu vermeiden. Nach wie vor sind große Gebiete radioaktiv belastet, insbesondere mit Cäsium 137 und Strontium 90. Teils ist die Bevölkerung in gesperrte Gebiete zurückgekehrt und lebt zum großen Teil von selbst erzeugten Nahrungsmitteln. Versuche, kontaminierte Nahrungsmittel durch spezielle Behandlungsverfahren zu dekontaminieren, hatten wenig Erfolg. Nützlich ist es, die Bevölkerung im Hinblick auf den Verzehr von Waldfrüchten zu beraten, um einer Aufnahme von hohen Radionuklidmengen mit bestimmten Produkten vorzubeugen. Eine Versorgung dieser Menschen und insbesondere der Kinder mit vitaminreicher unbelasteter Nahrung würde entscheidend zu einer Verbesserung des Strahlenschutzes und der allgemeinen gesundheitlichen Situation beitragen.

In den betroffenen Ländern hat sich die wirtschaftliche Situation in den letzten Jahren weiter verschlechtert, besonders für die evakuierte Bevölkerung. Dies dürfte auch zu der verschlechterten gesundheitlichen Situation der Bevölkerung beitragen, auch wenn sich die Ursachen für die gesundheitlichen Probleme nicht im einzelnen feststellen lassen. Notwendig ist eine umfassende und verlässliche Hilfe zur Verbesserung der Versorgung und Beschäftigungssituation.

Die medizinische Versorgung der Bevölkerung bedarf ebenfalls einer Unterstützung durch andere Nationen. Notwendig sind vor allem bessere Geräte, Heilmittel und bessere Behandlungsmethoden. Dies allein reicht jedoch nicht, wenn die betroffene Bevölkerung in den ländlichen Gebieten nicht erreicht wird oder über keine finanziellen Mittel verfügt. Besonders wirkungsvoll ist das Engagement westlicher Ärzte und Forschungszentren, die nicht nur wissenschaftlich tätig sind, sondern auch vor Ort helfen.

Die wissenschaftliche Analyse der Strahlenschutzaspekte und der gesundheitlichen Folgen bleibt weiterhin eine zentrale Aufgabe der betroffenen Staaten und der internationalen Fachwelt. Dies ist schon in Anbetracht der für viele Krebsarten sehr langen Latenzzeiten notwendig. Hohe Bedeutung kommt der Fortführung der Krebsregister und ihrer Auswertung in epidemiologischen Studien zu. Dabei ist es wichtig, die in der Ukraine, in Rußland und Weißrußland laufenden Arbeiten zu harmonisieren und die

vorhandenen nationalen Datenbestände gemeinsam zu nutzen, damit konsistente Ergebnisse abgeleitet werden können. Ein Problem stellt die nachträgliche Ermittlung der erhaltenen Strahlenexposition dar, die wiederum für epidemiologische Studien und Ableitung von Risikofaktoren bekannt sein muß. Wichtig sind Studien zum Gesundheitszustand klar definierter und sorgfältig überwachter Personengruppen, die beim Unfall als Liquidatoren eingesetzt waren.

Einen weiteren Schwerpunkt der künftigen wissenschaftlichen Analysen betrifft die Erforschung der Möglichkeiten, daß Strahlung Krankheiten beeinflusst oder mit verursacht, die gemeinhin als nicht strahlenabhängig angesehen werden.

Abgesehen von den auf Dauer gesperrten Gebieten der Zone 3 ist die Strahlung des Bodens in den belasteten besiedelten Gebieten zwar erhöht, im allgemeinen jedoch kein wesentliches Strahlenschutzproblem. Allerdings werden diese erhöhten Dosisleistungen lange andauern, zumal Dekontaminationsmaßnahmen von Böden und Waldgebieten wenig effektiv oder gar nicht durchführbar sind. Eine wichtige Strahlenschutzmaßnahme stellt die Wiederaufforstung dar, um einer Verschleppung von Kontamination von belasteten Bodenflächen durch Wind vorzubeugen. In der 30-km-Zone gibt es verschiedentlich noch Stellen hoher Ortsdosisleistung, die gesperrt sind und saniert werden müssen. Strahlenüberwachungsprogramme der Böden, der Flora und Fauna müssen weitergeführt werden. Auch die Sedimente in Oberflächengewässern und das Grundwasser müssen regelmäßig überwacht werden. Gegen eine Auswaschung von radioaktiv belasteten Sedimenten bei Überschwemmungen sollten Vorkehrungen getroffen werden.

## 10 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

### 10.1 Ursachen des Unfalls

Die Ereignisse, die zum Unfall am 26. April 1986 in Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl geführt haben, wurden in den vergangenen zehn Jahren weitgehend aufgeklärt. Zwar bestehen hinsichtlich einiger Details des Unfallhergangs nach wie vor Kenntnislücken, das inzwischen vorliegende Wissen reicht aber aus, um die Ursachen zu erkennen und wirkungsvolle Maßnahmen zu ergreifen, die die Wiederholung eines solchen Unfalls verhindern.

In der ersten Zeit stellte die Sowjetunion Fehlhandlungen und das Versagen des Personals als eigentliche Unfallursache in den Vordergrund. Auch mit Fehlinformationen wurden die technischen Mängel der Konstruktion des in Tschernobyl eingesetzten Reaktortyps RBMK heruntergespielt. Mit den genaueren Informationen, die der Westen dann im Rahmen der Kooperation mit Osteuropa erhielt, traten die ernstesten technischen Mängel der RBMK-Konstruktion und die Unzulänglichkeiten des politischen und organisatorischen Systems in der Sowjetunion immer stärker in den Vordergrund. Dies führte zu einer Relativierung der individuellen Schuld des Betriebspersonals.

Aus heutiger Sicht waren die Hauptursachen des Unfalls

- gravierende Mängel der reaktorphysikalischen Auslegung und der Auslegung der Abschaltvorrichtungen,
- ein politisches und organisatorisches System, welches nicht in der Lage war, diese Mängel abzustellen, obwohl sie lange vor dem Unfall bekannt waren,
- ein sicherheitstechnisch unzureichend durchdachtes und geprüftes Versuchsprogramm,
- eine Betriebsführung und Bedienungseinrichtungen, die das Personal bei der Wahrnehmung seiner Verantwortung für die Sicherheit überforderten.

## **10.2 Sicherheit der RBMK-Anlagen**

### **10.2.1 Kernauslegung**

Schon bald nach dem Unfall leitete die Sowjetunion Maßnahmen ein, um die Mängel der reaktorphysikalischen Auslegung und des Abschaltsystems zu beseitigen. Die Er-tüchtigungen dienten der Verringerung des hohen positiven Voideffektes, der Beseiti-gung des positiven Abschalt-effektes und der Beschleunigung des Abschaltvorgangs. Diese Nachrüstungen wurden in allen Anlagen in ähnlicher Weise realisiert. Damit sind die schlimmsten Mängel der nuklearen Auslegung beseitigt. Eine Wiederholung des damaligen explosionsartigen Unfallablaufs erscheint heute kaum noch möglich.

Untersuchungen zur Abhängigkeit des Voideffektes vom Betriebszustand zeigen aller-dings, daß dieser bei Teillast und kleinen Werten der betrieblichen Reaktivitätsreserve (ORM) deutlich zunimmt. Die Einhaltung des minimal zulässigen ORM und der minimal zulässigen Reaktorleistung wird nach wie vor nur durch Betriebsvorschriften geregelt. Bei Betriebsbedingungen, die von derart herausragender Bedeutung für die Sicherheit sind, ist dies nicht ausreichend. Hier sind weitere Verbesserungen notwendig, beispiels-weise durch Nachrüsten einer automatischen Abschaltung vor Erreichen unzulässiger Werte.

Zur Kernauslegung ist auch bekannt, daß Störungen mit Entleeren des Kühlkreislaufs der Steuerstäbe zu einer hohen Reaktivitätszufuhr führen können. Inzwischen wurde die Überwachung des Systems verbessert, um den Reaktor bei solchen Störungen mit höherer Zuverlässigkeit abzuschalten. Technische Maßnahmen, um die Höhe einer möglichen Reaktivitätszufuhr deutlich zu verringern bzw. völlig zu beseitigen, sind in Planung. Eine baldige Umsetzung solcher Nachrüstungen ist von großer Bedeutung.

### **10.2.2 Abschaltssysteme**

An das Abschaltssystem der RBMK-Anlagen sind aufgrund der ungünstigen reaktorphy-sikalischen Eigenschaften des Reaktorkerns erhöhte Anforderungen zu stellen. Diesen Anforderungen wurde das relativ langsam wirkende Abschaltssystem nicht gerecht. Nach dem Unfall wurden die Abschaltssysteme in allen RBMK-Anlagen wesentlich ver-bessert. Es wurde ein bedeutend schnelleres Abschaltssystem mit rasch (ca. 2 s) einfal-lenden Steuerstäben eingeführt.

Nach wie vor wird allerdings die Abschaltung bei bestimmten auslösenden Ereignissen nur durch ein einziges Kriterium angeregt. Hier sind weitere Nachrüstungen erforderlich, so daß möglichst bei allen Störfällen zwei diversitäre Anregesignale verfügbar sind. Grundsätzlich müßten RBMK-Anlagen auch mit einem zweiten diversitären Abschaltssystem ausgerüstet werden, um die erforderliche besonders hohe Zuverlässigkeit der Abschaltung zu gewährleisten. Eine derartige Nachrüstung ist technisch realisierbar.

### **10.2.3 Sicherheitseinrichtungen**

Die Sicherheitseinrichtungen weisen bei der 1. Generation der RBMK-Anlagen erhebliche Defizite auf. Das Notspeisewassersystem ist in weiten Bereichen nicht redundant und nicht gegen übergreifende Einwirkungen, wie z.B. Brand oder Überflutung, ausgelegt. Auch andere wichtige Systeme wie die Elektro- und Leittechnik sind vergleichbar verletzlich gegen übergreifende Einwirkungen. Die Anlagen der 1. Generation besitzen außerdem kein eigenständiges Notkühlsystem. Hier sind umfassende Ertüchtigungen dringend erforderlich. Entsprechende Nachrüstungen werden zur Zeit nur in Leningrad-1 und -2 durchgeführt.

Bei den RBMK-Anlagen der 2. und 3. Generation stellt sich die Situation hinsichtlich der Systemtechnik insgesamt günstiger dar. Die Anlagen verfügen über ein eigenständiges Notkühlsystem und die Redundanzen der Sicherheitssysteme sind in größerem Umfang räumlich getrennt angeordnet. Hinsichtlich des Notspeisewassersystems und Technisch-Wasser-Systems sind die Verhältnisse aber ähnlich wie bei der 1. Generation. Hier sind auch für die 2. und 3. Generation Nachrüstungen erforderlich.

Die RBMK-Anlagen der 2. und 3. Generation verfügen über einen partiellen Sicherheitseinschluß. Die 1. Generation besitzt eine solche Einrichtung nicht. Die Anlagen Leningrad-1 und -2 rüsten derzeit einen partiellen Sicherheitseinschluß nach, der mit dem der 2. und 3. Generation vergleichbar ist. Diese Nachrüstung wäre auch für die übrigen Altanlagen zweckmäßig.

Eine große Schwachstelle aller RBMK-Anlagen ist der Brandschutz, wobei auch hier die 1. Generation erheblich stärker betroffen ist als die 2. und 3. Generation. In allen Anlagen wurden in unterschiedlichem Umfang Nachrüstmaßnahmen durchgeführt. Dennoch ist der heutige Status des Brandschutzes immer noch unbefriedigend. Weitere Ertüchtigungen sind unumgänglich.



**Bild 10-1** Das Kernkraftwerk Tschernobyl mit dem Kühlwasserreservoir im Vordergrund

#### **10.2.4 Reaktorbehälter**

Der Bruch von Druckrohren führt zu einem Druckaufbau im Reaktorbehälter. Wird die Belastbarkeit des Reaktorbehälters überschritten, kann es zum Abheben der oberen Deckplatte kommen. Dies hätte katastrophale Folgen.

Als Auslegungsstörfall für die Druckabsicherung des Reaktorbehälters wurde ursprünglich der Bruch eines einzigen Druckrohres angenommen. Das gleichzeitige Versagen mehrerer Druckrohre wurde nicht betrachtet. Nach russischen Analysen soll der Reaktorbehälter aber auch noch dem gleichzeitigen Bruch von drei Druckrohren standhalten.

Obwohl bisher keine plausiblen Szenarien mit Mehrfachversagen von Druckrohren bekannt sind, unternehmen alle RBMK-Anlagen Anstrengungen zur Verbesserung der Druckabsicherung. Dies ist angesichts der möglichen Folgen eines entsprechenden Störfalls auch erforderlich. Die Maßnahmen zielen vor allem auf die Verbesserung der Werkstoffprüfung der Druckrohre und die Erhöhung der Druckentla-

stungskapazität aus dem Reaktorbehälter soweit erhöht, daß ein gleichzeitiges Versagen von neun Druckrohren beherrscht wird. Eine weitere Erhöhung ist praktisch nicht möglich.

In den meisten anderen RBMK-Anlagen wird inzwischen das gleichzeitige Versagen von drei bis vier Druckrohren beherrscht. Weitere Verbesserungen sind vorgesehen. Unabhängig davon bleibt dringend zu klären, ob es plausible Störfallabläufe mit einem gleichzeitigen Versagen von mehreren Druckrohren gibt und wieviel Druckrohre dabei versagen könnten.

### **10.2.5 Störfallanalysen**

Computersimulationen von Störfällen sind unverzichtbare Grundlagen für die sicherheitstechnische Auslegung und für die Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken. Derartige Analysen konnten früher in der Sowjetunion nur in sehr begrenztem Umfang durchgeführt werden, weil weder geeignete Rechenprogramme noch leistungsfähige Rechenanlagen zur Verfügung standen. Dies wirkte sich bei RBMK-Anlagen besonders nachteilig aus, weil diese ein sehr komplexes Verhalten zeigen, das sich mit vereinfachten Modellen kaum realistisch simulieren läßt.

Nach dem Unfall in Tschernobyl wurden in zunehmendem Maße leistungsfähige Rechenprogramme für die Störfallanalyse von RBMK eingesetzt. Diese Rechenprogramme, die zum Teil aus dem Westen stammen, benötigen allerdings eine weitere Qualifizierung der zugrunde liegenden Modelle für RBMK-spezifische Bedingungen. Von ihrem systematischen Einsatz für die Untersuchung des Anlagenverhaltens bei Störfällen werden weitere Erkenntnisse zur Sicherheit dieser Anlagen sowie zu konkreten Verbesserungsmöglichkeiten erwartet.

### **10.2.6 Betriebsführung**

Das Sicherheitskonzept sowjetischer Reaktoren stützt sich stark auf rechtzeitiges und richtiges Handeln des Betriebspersonals ab. Dies gilt im wesentlichen auch heute noch. Der Betriebsführung kommt deshalb bei RBMK-Anlagen eine besonders hohe Bedeutung für die Sicherheit zu. Neuere Untersuchungen zur Betriebsführung in RBMK-Anlagen weisen auf erhebliche Schwachstellen hin. Dies betrifft insbesondere unklare Re-

gelungen der Verantwortung, unzureichende Auswertung und Umsetzung von Betriebserfahrungen, Defizite in der Instandhaltung sowie Inhalte und Häufigkeit der Ausbildung für das Betriebspersonal. Hier sind Verbesserungen dringend notwendig. Dies wird auch von den Betreibern anerkannt.

Insgesamt gibt es im Bereich der Betriebsführung eine Fülle von Möglichkeiten zur Verbesserung der Sicherheit von RBMK-Anlagen. Vieles ließe sich in verhältnismäßig kurzer Zeit und mit relativ geringem Aufwand erreichen. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, daß hier internationale Kooperation sehr viel bewirken kann.

### **10.3 Sicherheit der Blöcke 1, 2 und 3 in Tschernobyl**

Sowohl der Block 1 als auch der an den zerstörten Block 4 direkt anschließende Block 3 des Kernkraftwerkes Tschernobyl sind nach wie vor in Betrieb. Block 2 steht seit dem Brand im Maschinenhaus im Jahr 1991 still. Der Anlagenbetreiber arbeitet seit mehreren Jahren an einer Wiederinbetriebnahme.

In den Blöcken des Kernkraftwerkes Tschernobyl wurden ähnliche technische Nachrüstungen vorgenommen wie in den meisten anderen RBMK-Anlagen. Allerdings haben die Verunsicherung über die Weiterführung des Betriebes und der Mangel an geeigneten Ausrüstungen und finanziellen Mitteln verschiedentlich zu Verzögerungen geführt. Hinzu kamen in der Vergangenheit erhebliche personelle Probleme durch Abwanderung erfahrener Reaktortechniker nach Rußland. Ob und inwieweit die Sicherheit des Blocks 3 durch die enge Nachbarschaft zum zerstörten Block 4 beeinträchtigt wird, ist weiter zu untersuchen.

### **10.4 Weiterbetrieb von RBMK-Anlagen**

Die Verantwortung für die Sicherheit der RBMK-Anlagen liegt allein bei den Betreiberstaaten. Westliche Organisationen arbeiten zwar mit den zuständigen Stellen in den Betreiberstaaten zusammen, um sie bei der Wahrnehmung ihrer Verantwortung zu unterstützen. Der Westen hat jedoch nur begrenzte Möglichkeiten, Einfluß zu nehmen. Auch ist das Wissen westlicher Experten zu Details der RBMK-Technik nach wie vor begrenzt.

Bei ihren Entscheidungen über den Weiterbetrieb der RBMK-Anlagen berücksichtigen die Betreiberländer neben den sicherheitstechnischen Erfordernissen auch ihre wirtschaftlichen und sozialen Bedürfnisse. Bloße Forderungen, die Reaktoren abzuschalten ohne diese Güterabwägungen zu berücksichtigen, würden sich für die Sicherheit kontraproduktiv auswirken.

Trotz der erheblichen Verbesserungen nach dem Tschernobyl-Unfall bestehen immer noch bedeutsame Sicherheitsdefizite bei den RBMK-Anlagen. Die in den letzten Jahren durchgeführten Analysen haben sogar neue Probleme aufgezeigt. Dabei hat sich allerdings auch gezeigt, daß an manchen Standorten größere Sicherheitsfortschritte als an anderen gemacht wurden und daß RBMK-Anlagen untereinander erhebliche Unterschiede aufweisen. Sie können heute sachgerecht nur anlagenspezifisch bewertet werden.

Fachleute in Ost und West stimmen überein, daß die heute noch vorhandenen Sicherheitsdefizite zumindest in den wesentlichen Punkten durch Ertüchtigung der Auslegung und Verbesserung des Betriebes abgestellt werden müssen. Die erforderlichen



**Bild 10-2** Der Sarkophag

Maßnahmen sind in internationaler Kooperation weitgehend definiert worden, bisher aber nur teilweise und auch nur in wenigen Anlagen umgesetzt. Hier müssen in der nächsten Zeit unbedingt weitere Fortschritte erzielt werden. Technisch sind wesentliche Ertüchtigungen realisierbar. Sie erfordern jedoch erhebliche finanzielle Mittel und wirkungsvolle Planung. Internationale Kooperation und Unterstützung sind hier von großer Bedeutung.

## **10.5 Sicherheit des Sarkophags**

Der 1986 in Eile um den zerstörten Reaktor errichtete Sarkophag hat seine Schutzfunktion in den vergangenen zehn Jahren erfüllt. Auf lange Sicht ist seine Rückhaltefähigkeit und Standsicherheit jedoch fraglich. Durch innere oder von außen kommende Belastungen könnte es zu Schäden oder sogar zu einem Einsturz des Sarkophags und zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen in der näheren Umgebung kommen. Dadurch wäre das Personal am Standort, z.B. das Betriebspersonal des Blockes 3, gefährdet. Weiträumige Auswirkungen sind jedoch nicht zu erwarten. Auch die rund 50 km östlich vom Standort für das Betriebspersonal neu errichtete Stadt Slavutitsch wäre praktisch nicht betroffen.

Die Ertüchtigung der Standsicherheit des Sarkophags stellt eine vordringliche Aufgabe dar. Diese Maßnahme ist auch notwendig, um einer möglichen Beeinträchtigung der Sicherheit des benachbarten Blockes 3 vorzubeugen.

Im Rahmen eines Gesamtkonzeptes, welches die dauerhafte Sicherung des zerstörten Reaktors und die Sanierung des Standortes umfaßt, müssen realistische Zielvorstellungen entwickelt werden, die die radiologischen Verhältnisse am Standort und die Prioritäten der Sicherheits- und Entsorgungsaufgaben berücksichtigen. Das Konzept muß schrittweise umgesetzt werden. Die vorgeschlagene Errichtung eines zweiten Einschusses, der den bestehenden Sarkophag umschließen soll, ist im Rahmen eines solchen Gesamtkonzeptes zu prüfen.

In diesem Zusammenhang ist es von großer Bedeutung, das nach dem Zerfall der Sowjetunion immer stärker über unterschiedliche Organisationen Rußlands, Weißrußlands und der Ukraine zersplitterte Wissen über die mit Tschernobyl verbundenen Fragen zu bündeln. Dies erfordert eine verstärkte technisch-wissenschaftliche Kooperation dieser Länder untereinander und mit dem Westen, um die für die Entwicklung

eines erfolgsversprechenden Gesamtkonzepts notwendige belastbare Daten- und Informationsbasis zu schaffen.

## **10.6 Kontamination und radioaktive Abfälle am Standort**

Art und Ausmaß der Kontamination auf dem Kraftwerksgelände sind durch Messungen gut bekannt. Zwar ist die Ortsdosisleistung deutlich erhöht, die meisten Bereiche sind jedoch zugänglich. An einigen Stellen wurde hochradioaktives Material vergraben, so auch aus dem Unfallreaktor herausgeschleudertes Kernbrennstoff. Diese provisorischen Deponien stellen ein Hindernis für Bau- und Sanierungsmaßnahmen dar. Außerdem treten dort radioaktive Stoffe ins Grundwasser über. Die Kontamination ist derzeit noch gering, langfristig liegt darin jedoch ein erhebliches Gefährdungspotential. Eine ordnungsgemäße Entsorgung der provisorischen Deponien ist daher unerlässlich.

Außerdem müssen für die abgebrannten Brennelemente aus den noch betriebenen Blöcken sichere und ausreichende Zwischenlagerungsmöglichkeiten am Standort bereitgestellt werden. Die vorhandenen Lager sind praktisch erschöpft.

## **10.7 Radiologische Situation in den betroffenen Gebieten**

Etwa 10 000 km<sup>2</sup>, davon 7 000 in Weißrußland, 2 000 in der Russischen Föderation und 1 000 in der Ukraine sind wegen der hohen Kontamination, vor allem durch Cäsium 137, gesperrt. Etwa 116 000 Personen wurden aus diesem Gebiet umgesiedelt. Diese Gebiete werden für viele weitere Jahrzehnte unzugänglich bleiben. Die Kontaminations- und Strahlenpegel sind durch Messungen recht detailliert bekannt. Es ergibt sich ein regional, ja sogar örtlich komplexes Bild mit sehr unterschiedlichen Kontaminationsgraden. Von den insgesamt nahezu 400 000 Personen, die ihre Heimat verlassen haben, konnten viele zurückkehren. Heute leben etwa 273 000 Personen in Gebieten mit erhöhter, aber nicht unmittelbar gesundheitsgefährdender Kontamination. Die jährlichen Strahlendosen betragen dort heute etwa das Fünffache des natürlichen Pegels. Da sich diese Strahlenexposition überwiegend durch die Aufnahme von kontaminierter Nahrung ergibt, ist die Versorgung der betroffenen Bevölkerung mit ausreichender unkontaminierter Nahrung vordringlich. Ein besonderes Problem stellt die unkontrollierte Rückkehr der Bevölkerung in hoch kontaminierte Gebiete dar. So sind etwa 2 000 Personen

in die 30-km-Zone zurückgekehrt. Einige wenige Gebiete haben sich erst nachträglich als hoch kontaminiert herausgestellt. Aus diesen Gebieten müßten etwa einige 10 000 weitere Personen umgesiedelt werden.

Land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen zur Verringerung der Kontamination haben sich als wenig effektiv erwiesen. Dennoch ist eine dauernde Beratung und Betreuung der betroffenen Bevölkerung auf diesem Gebiet wichtig, um durch gezielten Landbau die radiologische Belastung zu verringern.



**Bild 10-3** Verlassenes ukrainisches Bauernhaus

## **10.8 Gesundheitliche Folgen des Unfalls**

28 Personen, zumeist Feuerwehrleute und Angehörige der Betriebsmannschaft, starben an den Bestrahlungen und Verbrennungen, die sie bei der Bekämpfung der Brände und der Eindämmung der Katastrophe erlitten. 134 Personen wurden so stark bestrahlt, daß sie Symptome akuter Strahlenkrankheit entwickelten. Zwei Angehörige des Betriebspersonals starben durch unmittelbare Explosionswirkung.

Wenig Konkretes ist über die gesundheitliche Situation der Hilfskräfte bekannt, die aus allen Teilen der Sowjetunion zum Einsatz in Tschernobyl zusammengezogen wurden. Die Anzahl dieser sogenannten Liquidatoren beläuft sich auf etwa 800 000 Personen. Sie erhielten zum Teil beträchtliche Strahlendosen, die in den ersten Tagen vermutlich häufig über 250 mSv lagen. Häufig wird über eine erhöhte Rate an Erkrankungen verschiedenster Art in dieser Personengruppe berichtet. Die Weltgesundheits-Organisation sieht in der näheren Untersuchung dieser Aspekte einen Schwerpunkt ihrer weiteren Tätigkeit.

Statistisch signifikant ist der Anteil an Schilddrüsenkrebs bei Kindern in Weißrußland und in den betroffenen Gebieten der Ukraine und der russischen Föderation. Im Zeitraum von 1986 bis 1994 erkrankten in diesen Gebieten 565 Kinder an Schilddrüsenkrebs. Dies bedeutet, daß sich die Erkrankungsrate dort insgesamt bis zum Zehnfachen erhöht hat. Vorläufige Zahlen für 1995 zeigen noch keinen Rückgang der Erkrankungen. Schilddrüsenkrebs bei Kindern kann im allgemeinen mit gutem Erfolg operiert werden, erfordert jedoch langfristige Therapie. Trotz Operation starben in Weißrußland einige Kinder.

Ein strahlenbedingter Anstieg der Erkrankungsrate bei Leukämie wurde bislang weder bei Kindern noch bei Erwachsenen festgestellt. Bei den meisten Krebserkrankungen ist die Zeit bis zum Ausbruch der Krankheit jedoch sehr lang. Es ist daher weiterhin erforderlich, die Bevölkerung medizinisch zu betreuen und langfristige Analysen der gesundheitlichen Situation durchzuführen. Dabei ist eine Harmonisierung der in Weißrußland, Rußland und in der Ukraine laufenden Arbeiten im Rahmen der internationalen Programme sehr bedeutsam.

Neben diesen Untersuchungen bleibt die unmittelbare Hilfe für die betroffene Bevölkerung wichtig. Sie wird allerdings nur wirksam sein können, wenn sie alle relevanten Problemursachen und Symptome angeht. Eine ausschließliche Fixierung auf Maßnahmen zur Reduzierung der Strahlenexposition ist nicht ausreichend. Vordringlich sind Verbesserungen der Ernährung insgesamt, der medizinischen Behandlungsmöglichkeiten (z.B. Schilddrüsenkrebstherapie) sowie Programme, die die sozialen und wirtschaftlichen Perspektiven der vom Unfall betroffenen Bevölkerung verbessern.

## 10.9 Konsequenzen des Unfalls für die Reaktorsicherheit in Deutschland

Die RBMK-Anlagen unterscheiden sich vom Konzept, der Bauweise und der Betriebsführung völlig von deutschen Anlagen. Zudem hat der Reaktorunfall in Tschernobyl keine neuen Erkenntnisse über wissenschaftlich-technische Phänomene erbracht, die nicht schon vorher grundsätzlich bekannt waren.

Dennoch war es angesichts der katastrophalen Unfallfolgen ein Gebot der Vorsorge, die Sicherheit der deutschen Kernkraftwerke einer sorgfältigen Bewertung zu unterziehen. Hierzu führte die Reaktor-Sicherheitskommission, die den BMU berät, für alle deutschen Kernkraftwerke eine umfassende Überprüfung der Sicherheit und Betriebsführung durch. Diese Überprüfung zeigte, daß sich aus technischer Sicht keine Konsequenzen für deutsche Anlagen ergeben.

Gleichwohl haben die Umstände, die zu dem Reaktorunfall in Tschernobyl führten, bestätigt, wie wichtig es ist, Kernkraftwerke auf der Grundlage aktueller wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse laufend zu überprüfen und die Sicherheitstechnik und Betriebsführung weiterzuentwickeln. Dies war in Deutschland schon lange vor dem



**Bild 10-4** Das Kernkraftwerk in Tschernobyl von Osten. Block 4 befindet sich links hinten.

Unfall Praxis. Der Unfall hat allerdings zu Überlegungen geführt, wie diese Überprüfungen weiter gestärkt und systematisiert werden können. Ergebnis ist, daß in Deutschland - wie auch in anderen Staaten - künftig alle Kernkraftwerke in Abständen von etwa zehn Jahren einer umfassenden Sicherheitsüberprüfung unterzogen werden sollen.

Weiter wurden unter dem Eindruck der Unfallfolgen damals bereits laufende Bestrebungen beschleunigt, in deutschen Kernkraftwerken zusätzliche Vorsorgemaßnahmen zum Schutz gegen extrem unwahrscheinliche gleichzeitige Ausfälle mehrerer Sicherheitseinrichtungen zu treffen. Es kam zur Einführung eines "anlageninternen Notfallschutzes", der es bei vielen solchen Extremfällen noch erlaubt, ein Schmelzen des Reaktorkerns zu verhindern bzw. dessen Auswirkungen zu begrenzen. Bei neuen Kernkraftwerken ist der Nachweis, daß selbst ein Unfall mit Kernschmelzen nicht zu gravierenden Folgen außerhalb des Kernkraftwerks führt, inzwischen Voraussetzung für eine Genehmigung in Deutschland.

Der Unfall in Tschernobyl hat auch drastisch in Erinnerung gerufen, daß ein großer kerntechnischer Unfall erhebliche Auswirkungen über die Staatsgrenzen hinweg haben kann und daß Reaktorsicherheit nicht zuletzt aus diesem Grund eine internationale Aufgabe ist. Die Bundesrepublik Deutschland hat sich seit 1991 erfolgreich dafür eingesetzt, daß international verbindliche Regelungen zur Gewährleistung hoher Sicherheitsniveaus für die Kernkraftwerke weltweit praktiziert werden. Im Jahre 1994 wurde eine nukleare Sicherheitskonvention verabschiedet, die zwischenzeitlich von fast allen kernkraftwerkbetreibenden Staaten unterzeichnet wurde. Diese Konvention enthält grundlegende Anforderungen an die Sicherheit von Kernkraftwerken sowie Regelungen, wie die einzelnen Staaten die Erfüllung dieser Anforderungen auf ihrem Staatsgebiet dokumentieren. Verfahren zu einer wirksamen Umsetzung dieser Regelungen werden gegenwärtig international abgestimmt.

#### **10.10 Konsequenzen des Reaktorunfalls in Tschernobyl für die Strahlenschutzvorsorge in Deutschland**

In den ersten Tagen und Wochen nach dem Unfall waren die Menschen in den betroffenen westlichen Ländern über das Ausmaß der Kontamination mit radioaktiven Stoffen und der radiologischen Konsequenzen sehr verunsichert. Dazu haben unzureichend abgestimmte und teilweise widersprüchliche Maßnahmen der in den einzelnen Staaten

zuständigen Stellen erheblich beigetragen. Besonders große Unsicherheit bestand bei der Festlegung von Kontaminationsgrenzwerten für Nahrungsmittel.

Inzwischen haben sich die von Radioökologen und der Strahlenschutzkommission schon frühzeitig abgegebenen Einschätzungen der Unfallfolgen weitgehend bestätigt. Bei Berücksichtigung der empfohlenen Aktivitätsgrenzwerte waren keine negativen gesundheitlichen Folgen zu befürchten.

Die Europäische Union hat einheitliche Richtwerte festgelegt. International wurde mit den grundlegenden Sicherheitskriterien (Basic Safety Standards) der Internationalen Atomenergie-Organisation und mit der Empfehlung Nr. 63 der Internationalen Strahlenschutzkommission eine einheitliche Entscheidungsgrundlage für Notfälle geschaffen.

In Deutschland wurden im Rahmen des Strahlenschutzvorsorgegesetzes bessere Möglichkeiten geschaffen, bei Unfällen in kerntechnischen Anlagen die Auswirkung radioaktiver Stoffe frühzeitig zu erfassen und zu verfolgen, mögliche betroffene Gebiete festzustellen, Warnungen abzugeben und Verhaltensregeln oder Schutzmaßnahmen zu empfehlen. Beispielsweise wurde das rechnergestützte Früherfassungssystem IMIS (**I**ntegriertes **M**eiß- und **I**nformations **S**ystem) eingeführt, dessen Wirksamkeit seither in regelmäßigen Übungen erprobt und überprüft wird.

## 11 Glossar

- Abbrand** Der Abbrand des Kernbrennstoffs ist ein Maß für die durch Kernspaltung gewonnene Energie. Er wird in Megawatttagen pro Kilogramm Brennstoff (MWd/kg) gemessen. Die Höhe des Abbrandes bestimmt auch die Menge an Spaltprodukten (z.B. Cäsium und Jod) und an Aktivierungsprodukten, d.h. durch Neutroneneinfang entstehende Isotope (z.B. Plutonium und andere Aktiniden). Bei RBMK-Anlagen sind Abbrände von 10 bis 20 MWd/kg, bei Druck- und Siedewasserreaktoren 30 bis 50 MWd/kg üblich. Bei Erreichen dieser Abbrandwerte hat sich der Anteil an spaltbarem Uran 235 soweit verringert, daß die Brennelemente gegen neue ausgetauscht werden müssen.
- Abklingbecken** Mit Wasser gefülltes Becken, in dem abgebrannte Brennelemente so lange lagern, bis ihre Aktivität und Wärmeentwicklung auf einen gewünschten Wert abgenommen haben.
- Absorber** Materialien, die Neutronen absorbieren und damit die Kettenreaktion beeinflussen.  
Starke Neutronenabsorber, wie Bor, Hafnium und Cadmium, werden in Steuerstäben von Reaktoren verwendet. Einige Spaltprodukte haben ebenfalls (z.B. Xenon 135) eine besonders hohe Absorptionswirkung. Sie werden als Neutronengifte bezeichnet.
- Äquivalentdosis** siehe Dosis
- Aktivität** Sie gibt die Zahl der in einem radioaktiven Stoff je Sekunde zerfallenden Atomkerne an. Die Maßeinheit ist Becquerel. Die frühere Maßeinheit war "Curie" (Ci). 1 Ci = 37 Milliarden Becquerel. Aus der Aktivität läßt sich jedoch nicht auf die Wirkung der damit verbundenen Strahlen schließen! Dafür müssen Strahlenart, Strahlenenergie, biologische Gegebenheiten etc. berücksichtigt werden.

<b>Anregekriterien</b>	Die Gesamtheit aller physikalischen Meßgrößen, die eine Reaktorschutzaktion anregen.
<b>Anregungssignal</b>	Meßwerte physikalischer Größen lösen nach Signalverarbeitung Aktionen des Reaktorschutzes aus.
<b>Anreicherung</b>	Vorgang durch den der Anteil des spaltbaren Isotops, z.B. Uran 235, im Kernbrennstoff erhöht wird.
<b>Auslegungsstörfall</b>	Für Kernkraftwerke wird ein Spektrum von Störfällen bei der Auslegung der Anlage zugrunde gelegt. Diese sogenannten Auslegungsstörfälle müssen durch die Sicherheitseinrichtungen so beherrscht werden, daß die Auswirkungen in der Umgebung unter den festgesetzten Grenzwerten der Strahlenschutzverordnung bleiben.
<b>Barriere</b>	Vorrichtung in kerntechnischen Anlagen, die radioaktive Stoffe einschließt und darüber hinaus gegebenenfalls auch Strahlung abschirmt. In der Regel sind mehrere Barrieren hintereinander vorhanden.
<b>Becquerel (Bq)</b>	Maßeinheit für die Aktivität. Die Aktivität von 1 Becquerel liegt vor, wenn in einer bestimmten Menge eines Radionuklides 1 Atomkern pro Sekunde zerfällt.
<b>Biosphäre</b>	Gesamtheit des von Lebewesen besiedelten Teils der Erde.
<b>Dekontamination</b>	Beseitigung oder Verringerung einer radioaktiven Kontamination mit chemischen oder physikalischen Verfahren (z.B.: Abwaschen oder Reinigen mit Chemikalien). Dekontamination von Stoffströmen, wie Luft oder Wasser, wird mit Filtern bzw. Verdampfen und durch Ausfällen durchgeführt.
<b>Dampfblasenkoeffizient</b>	Die Leistungsänderung eines Reaktors ist von verschiedenen Parametern, den sogenannten Reaktivitätskoeffizienten, abhängig. Einer dieser Parameter ist der Dampfblasenkoeffizient, der die Reaktivitäts- und damit Leistungsänderung in Abhängigkeit vom Dampfblasengehalt im Reaktorkern beschreibt. Ein negativer Dampfblasenkoeffizient bewirkt, daß bei einem Leistungsanstieg durch den sich vergrößernden

Dampfblasenanteil eine negative Rückwirkung erfolgt und die Leistungserhöhung begrenzt wird. Im deutschen Genehmigungsverfahren muß nachgewiesen werden, daß der Dampfblasenkoeffizient immer negativ ist. Bei russischen RBMK-Anlagen ist dieser Dampfblasenkoeffizient positiv.

### **Dampfseparatoren**

Zylindrische Behälter in RBMK-Anlagen von ca. 30 m Länge mit einem Durchmesser von 2,5 bis 3 m, in denen Dampf und Wasser getrennt werden. In ihn münden die ca. 1 600 Wasser/Dampfleitungen, die mit den Druckrohren im Reaktor verbunden sind. Zudem zweigen von ihm die Dampfleitungen ab, die den Frischdampf über Sammler zur Turbine leiten, sowie die sogenannten Downcomer-Leitungen, die das vom Dampf abgetrennte und mit Speisewasser vermischte Wasser zu den saugseitigen Sammlern der Hauptkühlmittelpumpen leiten. In den Dampfseparatoren befinden sich Speisewassersammler, die das eingespeiste Speisewasser mit dem vom Dampf abgetrennten Wasser vermischen.

### **Downcomer-Leitung**

Die Downcomer-Leitungen in den RBMK verbinden die Dampfseparatoren mit den saugseitigen Sammlern der Hauptkühlmittelpumpen.

### **Dosis**

Die Dosis ist das Maß für eine Strahlenwirkung:

- **Äquivalentdosis**  
Produkt aus der Energiedosis und dem Bewertungsfaktor. Die Einheit ist das Sievert (Sv).  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ .
- **effektive Dosis**  
Die effektive Dosis - genauer: effektive Äquivalentdosis - ist die Summe der mit den Wichtungsfaktoren multiplizierten mittleren Organdosen Die effektive Dosis ist ein Maß zur Bewertung des strahlenbedingten Risikos für genetische und somatische Spätschäden.
- **Energiedosis**  
Quotient aus der Energie, der durch ionisierende Strah-

lung auf das Material in einem Volumenelement übertragen wird und der Masse in diesem Volumenelement. Die Einheit ist das Gray (Gy).  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ .

- **Individualdosis**

Ganz- oder Teilkörperdosis, die von einer Person akkumuliert wurde.

- **Sievert (Sv)/Millisievert (mSv)**

Maßeinheit für die Strahlendosis; das Millisievert hat die frühere Einheit Milirem (mrem) abgelöst.

Umrechnung:  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ ;  $1 \text{ mSv} = 100 \text{ mrem}$ . Das Millisievert berücksichtigt die Bestrahlung des Organismus durch verschiedenartige Strahlungen. Damit können alle Arten ionisierender Strahlung, z.B. Höhenstrahlung, Röntgenstrahlung und die Strahlung einer radioaktiven Substanz hinsichtlich ihrer biologischen Wirkung bewertet werden (künstliche und natürliche Strahlung sind also vergleichbar).

## **Druckspeicher**

In RBMK-Anlagen sind die Druckspeicher Teile des Kurzzeit-Notkühlsystems. Sie sind mit Wasser gefüllt, welches durch ein Stickstoffpolster auf einem Druck von 9,5 Mega-Pascal (MPa) gehalten wird. Die Druckspeicher haben die Aufgabe, die erste Zeitspanne nach dem Bruch einer größeren kühlmittelführenden Leitung zu überbrücken, bis nach dem Hochlaufen der Notstrom-Diesel die Einspeisepumpen des Langzeit-Notkühlsystems zur Verfügung stehen.

## **Energiedosis**

siehe Dosis

## **Freisetzung**

Entweichen von radioaktiven Stoffen aus einem durch eine oder mehrere Barrieren begrenzten Bereich (zum Beispiel aus einem Kernkraftwerk oder einem Abfallgebäude).

## **Frischdampfsystem**

System von Rohrleitungen, Sammlern und Ventilen, welches das nukleare Dampferzeugungssystem mit der Turbine verbindet.

<b>Gleichgewichtskern</b>	Kernbeladung, die sich nach fortlaufendem Austausch der abgebrannten Brennelemente durch frische Brennelemente einstellt und praktisch unverändert bleibt.
<b>Gruppenverteilersammler</b>	Die Gruppenverteilersammler in den RBMK sind über Rohrleitungen mit den druckseitigen Sammlern der Hauptkühlmittelpumpen verbunden. Es gibt 22 Gruppenverteiler in jeder Hälfte des Reaktorkühlkreislaufs. Von jedem Gruppenverteilersammler zweigen 40 bis 44 Leitungen ab, die zu den einzelnen Druckrohren im Reaktor führen.
<b>Hauptspeisewassersystem</b>	Das Hauptspeisewassersystem besteht im wesentlichen aus Rohrleitungen, Sammlern, Ventilen und den Hauptspeisewasserpumpen. Das Hauptspeisewassersystem ist ein betriebliches System. Bei Vollast sind vier von fünf Hauptspeisewasserpumpen in Betrieb, eine steht in Reserve.
<b>Individualdosis</b>	siehe Dosis
<b>Isotop</b>	Atome unterscheiden sich durch die unterschiedliche Zahl der Neutronen und Protonen im Atomkern. Haben Atomkerne gleich viele Protonen, gehören sie zu einem bestimmten Element. Enthalten Atomkerne bei gleicher Protonenzahl eine unterschiedliche Anzahl Neutronen, dann spricht man von verschiedenen Isotopen des betreffenden Elements. Beispiel: Alle Uran-Atome besitzen im Atomkern 92 Protonen; es gibt jedoch mehrere Uran-Isotope, je nachdem wieviele Neutronen der Atomkern enthält. Bei Uran 238 sind es 146 Neutronen: $238 = \text{Zahl der Protonen (92)} + \text{Zahl der Neutronen (146)}$ .
<b>Kernaußen- und Kerninnendetektor</b>	Kernaußen- und Kerninnendetektoren sind Strahlungsdetektoren, welche die induzierte Radioaktivität messen, die infolge der Bestrahlung in einem Strahlungsfeld entsteht, um die Teilchenflußdichte oder Teilchenfluenz zu bestimmen.
<b>Kernspaltung</b>	Spaltung eines Atomkerns in meistens zwei Bruchstücke (Spaltprodukte) und 2-3 schnelle Neutronen. Dabei werden große Energiemengen freigesetzt. Die Kernspaltung wird von einem durch einen Moderator abgebremstes, langsames

Neutron ausgelöst. Beispiel: Uran 235 + langsames Neutron = Barium 144 + Krypton 90 + 2 schnelle Neutronen + ca. 200 MeV.

<b>Kettenreaktion</b>	Reaktion, die sich von selbst fortsetzt. In einer Spaltungskettenreaktion absorbiert ein spaltbarer Kern ein Neutron, spaltet sich und setzt dabei mehrere Neutronen frei (bei Uran 235 im Mittel 2,5). Diese Neutronen können ihrerseits wieder durch andere spaltbare Kerne absorbiert werden, Spaltungen auslösen und weitere Neutronen freisetzen.
<b>Kontamination</b>	Durch radioaktive Stoffe verursachte Verunreinigung.
<b>Kritikalität</b>	Zustand eines Kernreaktors, in dem eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion abläuft. Ein Reaktor ist kritisch, wenn die Zahl der Spaltungen konstant bleibt; dies ist der normale Betriebszustand. Zum Anfahren macht man den Reaktor leicht überkritisch, beim Abfahren entsprechend unterkritisch (die Kettenreaktion erlischt).
<b>Kühlmittel</b>	Jeder Stoff, der zur Wärmeableitung aus einem Kernreaktor dient. Übliche Kühlmittel sind Wasser, Kohlendioxid, Helium und flüssiges Natrium.
<b>Lava</b>	hier: Mischung aus geschmolzenen Brennelementteilen und Strukturteilen.
<b>Leistungsexkursion</b>	Eine Leistungsexkursion ist ein rascher Anstieg der Reaktorleistung über das normale Betriebsniveau, die zu Kernschäden führen kann.
<b>Megawatt (MW)</b>	Das millionenfache der Maßeinheit Watt (W). $1 \text{ MW} = 1\,000 \text{ kW} = 1\,000\,000 \text{ W}$ . Maßeinheit für die (elektrische) Leistung von Kraftwerken. 1 MW entspricht 1 359 Ps.
<b>Millisievert (mSv)</b>	siehe Dosis
<b>Nachwärme</b>	Durch den Zerfall radioaktiver Spaltprodukte in einem Kernreaktor nach Abschalten des Reaktors erzeugte Wärme. Die Nachwärme beträgt in den ersten Sekunden nach dem Abschalten noch etwa 5 % der Leistung vor dem Abschalten.

<b>Naßkondensations-system</b>	Das Naßkondensationssystem in den RBMK der 2. und 3. Generation ist an die druckfesten Räume angeschlossen, in welchen sich die unteren Rohrleitungen und Komponenten des Reaktorkühlkreislaufs befinden. Es dient zur Begrenzung des Drucks in diesen Räumen nach dem Bruch einer kühlmittelführenden Rohrleitung durch Kondensation des ausströmenden Dampf/Wassergemischs in einer Wasservorlage.
<b>Neutronen, verzögerte</b>	Neutronen werden bei der Kernspaltung freigesetzt. Mehr als 99 % entstehen unmittelbar (prompt). Ein Anteil von 0,5 bis 0,7 % wird verzögert freigesetzt. Der Anteil der verzögert freigesetzten Neutronen wird mit Beta ( $\beta$ ) bezeichnet. Die verzögerten Neutronen spielen eine sehr wichtige Rolle für die Kontrolle der Kettenreaktion im Reaktor.
<b>ORM-Wert</b>	Eine wichtige Kenngröße des Reaktivitätsverhaltens der RBMK-Anlagen ist der ORM ( <b>o</b> perational <b>r</b> eactivity <b>m</b> argin (betriebliche Reaktivitätsreserve). Der ORM-Wert ist ein Reaktivitätsäquivalent für sämtliche ganz oder teilweise in den Kern eingefahrene Steuerstäbe. Er wird als Vielfaches des Reaktivitätsbeitrags eines mittleren, voll eingefahrenen Steuerstabes berechnet.
<b>Plutonium</b>	Radioaktives Element, das aus dem nicht spaltbaren Uran 238 durch die Aufnahme eines bei der Kernspaltung freigesetzten Neutrons entsteht. Ein Schneller Brüter nützt diesen Prozeß gezielt aus, um neuen Brennstoff zu "brüten". In Reaktoren kann Plutonium als Brennstoff verwendet werden.
<b>Radioaktivität</b>	Eigenschaften vieler Atomkerne, sich von selbst umzuwandeln: Sowohl in der Natur vorkommender, als auch durch künstliche Prozesse (z.B. Kernspaltung) ausgelöster spontaner Zerfall von Atomkernen unter Aussendung von Strahlung unterschiedlicher Art (Alpha-, Beta- und Gammastrahlung). Am durchdringungsfähigsten ist die Gammastrahlung, die mit der Röntgenstrahlung verwandt ist.

<b>Reaktivitätseffekt</b>	Veränderung der Reaktivität bei einer Änderung des Betriebszustands.
<b>Reaktivität</b>	<p>Maß für die Abweichung eines Reaktors vom kritischen Zustand. Sie wird durch den Zahlenwert <math>\rho</math> beschrieben und ergibt sich aus dem effektiven Multiplikationsfaktor <math>k_{\text{eff}}</math>:</p> $\rho = k_{\text{eff}} - 1/k_{\text{eff}}$ <p>Dabei beschreibt <math>k_{\text{eff}}</math> die Neutronenbilanz, d.h. das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Neutronengenerationen (aktuelle und vorhergehende). Ist <math>k_{\text{eff}} = 1</math> so ist der Reaktor - unter Einbeziehung der prompten und der verzögerten Neutronen - kritisch. Ist <math>k_{\text{eff}}</math> größer 1 so nimmt die Anzahl der Neutronen mit jeder "Spaltungsgeneration" zu und die im Reaktor erzeugte Wärmeleistung steigt an. Bei negativer Reaktivität sinkt der Leistungspegel.</p>
<b>Reaktorabschaltung</b>	Als Reaktorabschaltung bezeichnet man den Vorgang, bei dem ein Reaktor in den unterkritischen Zustand gebracht wird.
<b>Reaktorkern</b>	"Herz" des Reaktors, hier findet die Kettenreaktion statt. Der Kern besteht im wesentlichen aus Brennelementen, Steuerstäben, dem umströmenden Kühlmittel und dem Moderator. Der Reaktorkern befindet sich im Inneren des Reaktorbehälters.
<b>Reaktorperiode</b>	Die Zeit $T$ , in der sich die Neutronenflußdichte in einem Reaktor um den Faktor $e = 2,718$ ( $e$ : Basis der natürlichen Logarithmen) ändert, wenn die Neutronenflußdichte exponentiell zu- oder abnimmt.
<b>Reaktorschacht</b>	Im RBMK-Reaktorgebäude enthält der Reaktorschacht die gesamte Kernanordnung einschließlich des biologischen Schilts.
<b>Reaktorschutzsystem</b>	Ein Sicherheitssystem, das Informationen von verschiedenen Meßeinrichtungen erhält, die die für die Sicherheit wesentlichen Betriebsgrößen eines Kernreaktors überwachen, und das imstande ist, automatisch eine oder mehrere Sicherheitsfunktionen auszulösen, um den Reaktor in einem sicheren Zustand zu halten oder ihn abzuschalten.

<b>Sievert</b>	siehe Dosis
<b>Spaltprodukte</b>	Nuklide, die durch Spaltung oder nachfolgenden radioaktiven Zerfall der durch Spaltung direkt entstandenen Nuklide entstehen; z.B.: Krypton 85, Strontium 90, Cäsium 137.
<b>Störfall-Lokalisierungssystem</b>	Das Störfall-Lokalisierungssystem der RBMK der 2. und 3. Generation besteht aus druckfesten Räumen, welche den unteren Teil des Reaktorkühlkreislaufs mit den größten kühlmittelführenden Rohrleitungen (z.B. saug- und druckseitige Sammler der Hauptkühlmittelpumpen und Gruppenverteilersammler) umschließen. Die Auslegungsdrücke der einzelnen Räume sind unterschiedlich. Sie sind über Fallrohre mit der Wasservorlage im Naßkondensationssystem verbunden.
<b>Strahlenexposition</b>	Einwirkung ionisierender Strahlen auf den menschlichen Körper. Ganzkörperexposition ist die Einwirkung ionisierender Strahlen auf den ganzen Körper. Teilkörperexposition ist die Einwirkung ionisierender Strahlen auf einzelne Körperteile oder Organe. Äußere Strahlenexposition ist die Strahlenexposition außerhalb des Körpers, innere Strahlenexposition ist die Strahlenexposition durch Strahlenquellen innerhalb des Körpers.
<b>Transienten</b>	Jede wesentliche Abweichung der Betriebsparameter eines Kernkraftwerkes (u.a. Leistung, Druck, Temperatur, Kühlmitteldurchsatz) von den Sollwerten, die zu einem Ungleichgewicht zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeabfuhr im Reaktor führen kann, soweit diese Abweichung nicht durch Lecks in Leitungen oder Behältern bedingt ist.
<b>Überschußreaktivität</b>	Reaktivität des Reaktorkerns, die zur Kompensation des Abbrandes zwischen den Brennelementwechseln benötigt wird.
<b>Unterkritikalität</b>	Reaktorzustand, in dem weniger Neutronen erzeugt als verbraucht werden, die Leistung also auf Null sinkt.
<b>Voidkoeffizient</b>	siehe: Dampfblasenkoeffizient.

## 12 Literatur zu Tschernobyl

Zusammenstellung wichtiger Berichte, Studien, Artikel und sonstiger Informationen zu den Reaktoren vom Typ RBMK und zu dem Unfall in Tschernobyl:

**Abramov, V., Fedorenko, O., Shevchenko, V.:**

"Genetic consequences of radioactive contamination for populations of Arabidopsis".  
The Science of the Total Environment. Volume 112. S. 19-28. 1992.

**Adamov, E., Cherkashov, J.:**

"The RBMK reactor improvement and its safety increase".  
Nuclear accidents and the future of energy. Lessons learned from Chernobyl. Paris, 15 - 17  
April 1991.

**Afanasieva, A. A. et al:**

"The characteristics of the RBMK core".  
Nuclear Technology. Volume 103, July 1993.

**Albergel, A., Martin, D., Strauss, B., Gros, J.:**

"The Chernobyl Accident: Modelling of Dispersion over Europe of the Radioactive Plume  
and Comparison with Air Activity Measurements".  
Atmospheric Environment. Volume 22. pp. 2431 - 2444. 1988.

**Alexandrov, A. P. et al.:**

"Kernenergetik-Probleme und Perspektiven - Bewertungen der Experten".  
Kurchatov-Institut, Moskau, 1989. (Russisch).

**Almenas, K., Kaliatka, A., Uspuras, E.:**

"Ignalina RBMK-1500, A Source Book".  
Ignalina Safety Analysis Group. Lithuanian Energy Institute, 1994.

**Barjachtar, W. G.:**

"Die Tschernobyl-Katastrophe".  
Nationale Akademie der Ukrainischen Wissenschaften. W.G. Barjachtar (Hrsg.) Kiew,  
1995. (Russisch).

**Belyaev, S., Borovoy, A., Demin, V. et al.:**

"The Chernobyl source term".

in: Proceedings of a seminar on comparative assessment of the environmental impact of radionuclides released during three major nuclear accidents: Knyshtym, Windscale, Chernobyl. Luxembourg. EUR 13574 report. S. 71-91, 1991.

**Belyayev, S. et al.:**

"Technical Management on the Chernobyl Site. Status and Future of the Sarcophagus".  
Nuclear accidents and the future of energy, lessons learned from Chernobyl. Paris, 15 - 17 April 1991.

**Burlakov, E. V. et al.:**

"Analysis of the main circulating pumps (MCP) behavior in the preaccident period and the first phase of the Chernobyl accident".

The 1st International Workshop on Severe Accidents in NPPs. Dagomys, Sochy, USSR, 1989.

**Buzulukov, Y., Dobrynin, Y.:**

"Release of Radionuclides during the Chernobyl Accident".

aus: The Chernobyl Papers. Vol.I. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies. Research enterprises publishing segment. S.E. Merwin und M.I. Balonov (Hrsg.). Richland, Washington, USA, 1993.

**Dolleshal, N. und Emelyanov, J.:**

"Druckröhrenleistungsreaktor".

Moskau, Atomisdat, 1980. (Russisch).

**Eurasto, T., Sandberg, J., Marttila, J.:**

"The Leningrad Nuclear Power Plant".

A General Description. STUK. January, 1993.

**Franzewitsch, L., Gaitschenko, W., Kryschanowskij, W.:**

"Tiere im Strahlenfeld".

In: Tschernobyl und seine Folgen. Band 2. Elbe-Dnjepr-Verlag. Klitzschen, 1994.

**GRS:**

"Neuere Erkenntnisse zum Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl. Teil 1 und 2. Stand: Oktober 1986."

GRS-S-40. Köln, Februar 1987.

**GRS:**

"Reaktorsicherheit in Osteuropa".

GRS-117. Köln, Februar 1995.

**IAEA:**

"INSAG-1: Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident Safety".

Series No. 75 - INSAG - 1. IAEA, Wien, 1986.

**IAEA:**

"INSAG-7: The Chernobyl Accident".

Updating of INSAG-1 Safety Series No. 75-INSAG-7. IAEA, Wien, 1992.

**IAEA:**

"The International Chernobyl Project. The radiological consequences in the USSR of the Chernobyl accident: Assessment of health and environmental effects and evaluation of protective measures".

IAEA, Wien 1991.

**IAEA:**

"Safety assessment of proposed improvements to RBMK nuclear power plants".

Report of the IAEA Extrabudgetary Programme on the Safety of RBMK Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-694. Wien, March 1993.

**IAEA:**

"Safety assessment of design solutions and proposed improvements to Smolensk Unit 3 RBMK nuclear power plant".

Report of the IAEA Extrabudgetary Programme on the Safety of RBMK Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-722. Wien, October 1993.

**IAEA:**

"Background Information for the IAEA Mission to Chernobyl Nuclear Power Plant".  
RBMK-RD-004. Limited distribution 1994-3-28. Volume 2. Ukraine, 7-17 March 1994.

**IAEA:**

"RBMK Shutdown Systems".  
A Publication of the Extrabudgetary Programme on the Safety of RBMK NPPs. IAEA  
EB-RBMK-01. Wien, January 1995.

**IAEA:**

"RBMK Nuclear Power Plants Generic Safety Issues".  
A Publication of the Extrabudgetary Programme on the Safety of WWER and RBMK  
Nuclear Power Plants. Wien, October 1995.

**Kazakov, S.:**

"Carrying out and planning measures for improvement of radiation situation in alienation  
zone after accident at Chernobyl NPP".  
JAERI-Conf. 94-005 INIS 26 (15): 52564. 1994.

**Kellerer, A.:**

"Strahlenbiologische Folgen des Unfalls von Tschernobyl".  
Reaktorsicherheit und Energiepolitik in Osteuropa - Expertentagung. Akademie für  
politische Bildung. Tutzing, 29.6.-1.7.1995.

**Koelzer, W.:**

"Lexikon zur Kernenergie".  
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH. Karlsruhe, 1990.

**Konoplya, Y.:**

"The Chernobyl Disaster, its Consequences and Way of Overcoming in Belarus".  
Chernobyl State Committee of the Republic Belarus. 2nd edition, editor: Y.F.Konoplya.  
1995.

**Kopchinsky, G.:**

"Status of Chernobyl".  
Atomaudit. Ukraine, Geneva. May 1995.

**Koulikov, A. und Ryabov, I.:**

"Specific cesium activity in freshwater fish and size effect".

The Science of the Total Environment. Volume 112. S. 125-142. 1992.

**Krivolutzkii, D. und Pokarzhevskii, A.:**

"Effects of radioactive fallout on soil animal populations in the 30 km zone of the Chernobyl atomic power station".

The Science of the Total Environment. Volume 112. pp. 69-77. 1992.

**Landeyro, P. und Buccafurni, A.:**

"Time - Independent Neutronic Analysis of the Chernobyl Accident".

Nuclear Science and Engineering. p. 108. 1991.

**Leeuw de, F., Aalst, van, R., Dop, van, H.:**

"Modelling of Transport and Deposition over Europe of Radionuclides from the Chernobyl Accident".

(Editor: H. van Dop) Air Pollution Modeling and Its Application VI. pp. 499 - 508.

Nato Committee of the Challenges of Modern Society. Volume 11. Plenum Press. New York, 1988.

**Martinez-Val, J. M. et al.:**

"An Analysis of the physical causes of the Chernobyl accident".

Nuclear Technology. Volume 90. June 1990.

**NEA-OECD:**

"Chernobyl - ten years on. Radiological and health impact".

November , 1995.

**Petrosyanz, A. M.:**

"Atomenergetik".

Verlag Nauka, Moskau, 1976. (Russisch).

**Poiarkov, V., Nazarov, A., Kaletnik, N.:**

"Post-Chernobyl radiomonitoring of Ukrainian forest ecosystems".

Journal Environmental Radioactivity 26. pp. 259-271. 1995.

**Puschkarev, V. I. et al.:**

"Über Verfahren zur Beeinflussung der Reaktivitätskoeffizienten in RBMK-Reaktoren".  
Atomnaya Energiya. Band 46, Ausgabe 6, Juni 1979. (Russisch).

**Reichenbach, D.:**

"Sicherheit von RBMK-Reaktoren Ergebnisse von Projekten der Europäischen Union".  
IAEA , Wien, 30. Mai - 2. Juni 1995.

**Simon, H., Wilson, J., Guirguis, S., Scott, P.:**

"Assessment of the Chernobyl Release in the Intermediate Aftermath of the Accident."  
Nuclear Europe. Volume 26. pp. 295 - 301, 1987.

**Steinberg, N. et al.:**

"Ursachen und Umstände des Unfalls im 4. Block des KKW Tschernobyl am  
26.04.1986". 1991.

**Steinberg, N.:**

"Über die Ursachen und Umstände der Havarie im KKW Tschernobyl".  
GRS-Fachgespräch. München, 1991.

**Steinberg, N., Parashin, S.:**

"Program on Safety Improvement of Chernobyl NPP Power Units".  
Slavutich, 1994.

**Sokolow, W. et al.:**

"Über den Einfluß der Havarie im Atomkraftwerk Tschernobyl auf Wirbeltiere".  
Institut für Evolutionsmorphologie und Ökologie der Tiere. Akademie der Wissenschaften der UdSSR. (übersetzte Version).

**TACIS:**

"RBMK Safety Review: Final Report (Executive Final Report)".  
Final Reports of Topic Groups 1-9. CEC Project TACIS. 1991, March 1994.

"Tschernobyl-Reportage". Verlag Planeta, Moskau 1988.

**United Nations:**

"Strengthening of international cooperation and coordination of efforts to study, mitigate and minimize the consequences of the Chernobyl disaster".

Report to the Secretary-General. 1995.

**Velichov, E.P. et al.:**

"The Chernobyl Accident: Current vision of its causes and development".

Nuclear accidents and the future of energy. Lessons learned from Chernobyl. Paris, 15 - 17 April 1991.

**Weber, J., Reichenbach, D., Cherkashov, J.:**

"Sicherheitsfragen des RBMK".

atw. 40 Jg. Heft 5, 1995.

**Weber, J., Clemente, M., Reichenbach, D.:**

"Verhalten des RBMK-Reaktorkerns unter Störfallbedingung-Auswirkungen von Nachrüstmaßnahmen".

GRS Fachgespräch. Berlin, 1995.

**Weiss, W., Sittkus, A., Sartorius, H., Stockburger, H.:**

"Tschernobyl - eine Rückschau. Der Reaktorunfall von Tschernobyl und die daraus resultierende Kontamination in der Bundesrepublik".

Phys. Bl. Volume 43. pp. 125 - 130. 1987.

**WHO:**

"Health Consequences of the Chernobyl Accident. Results of the IPHECA Projects and related national programmes".

Summary report. 1995.

## Anhang Chronologischer Ereignisablauf des Reaktorunfalls am 26. April 1986 im Kernkraftwerk Tschernobyl

Chronologischer Ereignisablauf des Reaktorunfalls am 26.4.1986 im Kernkraftwerk Tschernobyl		
Zeit	Fahrweise, Betriebszustand	Kommentar
<b>25. April 1986</b>		
01:06	100 % Leistung; Beginn des Abfahrens; Der ORM betrug 31 Steuerstäbe.	Abfahren für die geplante Revision und die Durchführung des Versuchs.
03:45	Beginn Stickstoff-Helium-Gemische im Kühlsystem des Graphits durch Stickstoff zu ersetzen.	Dies führt allgemein zu einer Reduzierung der Absorption im Gasgemisch um 1 - 1,5 $\beta$ und zur Verringerung der Stabilität der axialen Leistungsdichteverteilung.
03:47	Die thermische Reaktorleistung beträgt 1 600 MW (50 % der Nennleistung)	
04:13 bis 12:36	Messungen von Parametern des Regelsystems und der Vibrations-eigenschaften der Turbogeneratoren Nr. 7 und 8 bei konstanter thermischer Leistung von 1 500 MW.	
07:10	Der ORM beträgt 13,2 Steuerstäbe	Folge der instationären Xenonvergiftung. Der Weiterbetrieb stellt einen Verstoß gegen die Grenzwerte und Bedingungen des sicheren Betriebs (GBsB) dar. (Der betriebliche Grenzwert für den ORM betrug laut GBsB 26-30 Steuerstäbe. Ein Betrieb mit ORM-Werten unter 26 Steuerstäben bedurfte der Genehmigung durch den Hauptidegenieur des Kraftwerks. Fällt der ORM unter 15 Steuerstäbe war unverzüglich abzuschalten.)
13:05	50 % Leistung; Unterbrechen des Abfahrens; Abschalten eines Turbosatzes (Nr. 7).  Umschalten der zugehörigen Verbraucher auf den verbleibenden Turbogenerator Nr. 8.	Nach der Umschaltung bestand folgende Energieversorgung der Hauptkühlmittelpumpen (HKP): <ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 laufende HKP vom Turbogenerator Nr. 8</li> <li>• 2 laufende HKP vom Netz</li> <li>• 2 Reservepumpen, für die bei späterer Zuschaltung die Versorgung aus dem Netz vorgesehen war.</li> </ul>

Chronologischer Ereignisablauf des Reaktorunfalls am 26.4.1986 im Kernkraftwerk Tschernobyl (Fortsetzung)		
Zeit	Fahrweise, Betriebszustand	Kommentar
14:00	Freischalten des Notkühlsystems.  Verzögern des weiteren Abfahrens auf Verlangen des Lastverteilers in Kiew.  Weiterbetrieb der Anlage mit 50 % Leistung.	Die Maßnahme wird in Übereinstimmung mit dem Versuchsprogramm durchgeführt. Das Versuchsprogramm verletzt in diesem Punkt die Betriebsvorschriften.  Für den Weiterbetrieb der Anlage wurde das Notkühlsystem nicht wieder betriebsbereit gemacht.
15:20	Der ORM beträgt 16,8 Steuerstäbe.	Verstoß gegen die GBsB, falls dies nicht durch den Hauptingenieur ausdrücklich genehmigt wird.
18:50	Eigenbedarfsverbraucher, die nicht in den Test einbezogen sind, wurden zum Transformator des Turbogenerators Nr. 6 geschaltet.	
23:10	50 % Leistung; Fortsetzen der Leistungsreduktion; Zielwert war gemäß Versuchsprogramm 700- 1 000 MW thermisch, entsprechend 20-30 %.	
26. April 1986		
00:05	Die thermische Reaktorleistung beträgt 720 MW.	
00:28	Die thermische Reaktorleistung beträgt 720 MW.  Umschaltung von lokaler Leistungsregelung auf mittlere Leistungsregelung.  Abfall der Reaktorleistung unter den vorgesehenen Zielwert bis 30 MW thermisch (ca. 1 %).  Anheben der Reaktorleistung durch manuelles Ausfahren von Steuerstäben in der Folgezeit.	Die Ursache für die Unterschreitung des Zielwertes ist nicht bekannt.  Umschaltung entsprechend einer Empfehlung der Betriebsvorschriften.  Der starke Abfall der Leistung wurde durch einen Fehler des Operateurs bei der Umschaltung der Regelung und zu spätes Gegensteuern von Hand verursacht.  Wiederanfahren verstößt gegen die GBsB, da der ORM vor der Abschaltung zu niedrig war. (Unmittelbar vor der Abschaltung betragen die Reaktorleistung ca. 15 % und der letzte fixierte ORM-Wert 26 Steuerstäbe. Gemäß GBsB ist ein Wiederanfahren nach einer kurzfristigen Abschaltung von einer Leistung unter 50 % nur dann zulässig, wenn der ORM vor der Abschaltung mindestens 30 Steuerstäbe betragen hat.

Chronologischer Ereignisablauf des Reaktorunfalls am 26.4.1986 im Kernkraftwerk Tschernobyl (Fortsetzung)		
Zeit	Fahrweise, Betriebszustand	Kommentar
00:28 (ff.)		Die Reaktorleistung, die über hinreichend lange Zeit vor dem Abschalten gehalten wurde, betrug 50 %. Geht man von diesem Leistungsniveau als Kriterium für den Mindestwert des ORM vor einem Wiederanfahren aus, so gilt, daß dieser mindestens 45 Steuerstäbe betragen muß.
00:34:03	Unerwartete Fluktuationen des Höhenstandes in den Dampfseparatoren.	
00:36:24	Änderung des Ansprechwertes für den Reaktorschutz bezüglich des Druckabfalls in den Dampfseparatoren von 55 auf 50 kg/cm <sup>2</sup> .	
00:39:32 bis 00:42:35	Das DREG-Programm ist außer Betrieb.  Blockierung des Reaktorschutzes bezüglich des Ausfalls des 2. Turbogenerators.	Die Blockierung des Reaktorschutzes stellt einen Verstoß gegen die GBsB dar.
00:41 bis 01:16	Trennung des 8. Turbogenerators vom Netz zur Messung der Vibrationseigenschaften ohne Last.	Nicht Bestandteil des Versuchsprogramms.
00:52:35 bis 00:59:54	Das DREG-Programm ist außer Betrieb.	
01:03	Stabilisieren der thermischen Leistung bei 200 MW (ca. 7 %).	Eine weitere Erhöhung der Reaktorleistung war auf Grund der Xenonvergiftung praktisch nicht mehr möglich, zumal die minimal zulässige Überschußreaktivität bereits unterschritten war.
01:03 und 01:07	Zuschalten der beiden Reservepumpen in den Hauptkühlmittelkreisläufen.	Zuschaltung der Reservepumpen in Übereinstimmung mit dem Versuchsprogramm. Nach Zuschaltung der Reservepumpen waren alle acht HKP in Betrieb.
01:06	Erhöhen der Speisewassereinspeisung und die Dampfseparatoren auf 1 200-1 600 t/h.	Mit dieser Maßnahme sollte der Wasserspiegel in den Dampfseparatoren wieder angehoben werden.
01:09	Plötzliche Verringerung des Speisewasserdurchsatzes auf 90 t/h im rechten und 180 t/h im linken Hauptkühlkreislauf. Der Kerndurchsatz beträgt 56 000 - 58 000 m <sup>3</sup> /h. Infolgedessen erhöhen sich die Temperaturen auf der Saugseite der HKP auf 280,8 °C (linke Seite) und 283,2 °C (rechte Seite).	Es trat eine Verringerung des Speisewasserdurchsatzes auf ca. 75 t/h in dem rechten Hauptkühlkreislauf und 130 t/h im linken Hauptkühlkreislauf zum Zeitpunkt 01:22:45 auf. Während des Auslaufs der HKP schwanken die Speisewasserdurchsätze um ca. 150 t/h in der rechten Schleife und um ca. 110 t/h in der linken Schleife.

Chronologischer Ereignisablauf des Reaktorunfalls am 26.4.1986 im Kernkraftwerk Tschernobyl (Fortsetzung)		
Zeit	Fahrweise, Betriebszustand	Kommentar
01:12:10 bis 01:12:49	Das DREG-Programm ist außer Betrieb.	
01:18:52	DBA-Signal lautet DREG-Programm.  (Für den Versuch wurde ein spezieller DBA-Schalter installiert, mit dem der Start der Dieselgeneratoren und der Auslauf des Turbogenerators ausgelöst wird. Dieser Schalter wurde betätigt als die Turbinenschnellschlußventile schlossen.)	Unterschiedliche Zeitangaben für DBA-Signal.
01:22:30	Die Parameter wurden auf Magnetband aufgezeichnet. Spätere Berechnungen ergaben, daß der ORM zu diesem Zeitpunkt 6-8 Steuerstäbe betrug.	Verstoß gegen die GBsB. Es ist unklar, ob die Unterschreitung des zulässigen ORM-Wertes (als Folge des unzulässigen Wiederanfahrens) dem Personal bekannt war.
01:23:04	Anweisung "Einschalten des Oszillographen". Die Schnellschlußventile der Turbine Nr. 8 schlossen. Der Auslauf der Turbine mit den 4 HKP (HKP 13, 23, 14, 24) begann.	Reaktivitätszufuhr infolge der Verringerung des Kühlmitteldurchsatzes und -druckes, der Erhöhung der Kühlmittleintrittstemperatur und damit ein Leistungsanstieg werden eingeleitet.
01:23:10	DBA-Schalter wurde gedrückt.	Unterschiedliche Zeitangaben für DBA-Signal.
01:23:10 bis 01:24:40	Die automatischen Regelstabgruppen AR-1 bis AR-3 (ingsgesamt 12 Steuerstäbe ohne Verdrängerteil) fahren vollständig ein.	Der automatische Regler der Reaktorleistung versucht einem Leistungsanstieg zu begegnen.
01:23:40	Der Reaktorschutz AZ-5 wurde ausgelöst. Die Abschaltstäbe und die Handregelstäbe fuhren in den Kern ein.	AZ-5 Auslösung von Hand oder automatisch? Zusätzlicher Leistungsanstieg infolge des positiven Abschalteffekts wird ausgelöst.
01:23:43	Auslösung des Reaktorschutzes auf Grund der Signale <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktorperiode kleiner 20s</li> <li>• hohe Reaktorleistung.</li> </ul> Die thermische Reaktorleistung überstieg 530 MW.	Folge des Leistungsanstiegs.
01:23:46	Abtrennung des ersten Paares auslaufender HKP von der Stromversorgung.	Ursache für weiteren Kühlmitteldurchsatz- und weitere -druckreduzierung.
01:23:46,5	Abtrennung des zweiten Paares auslaufender HKP von der Stromversorgung.	Ursache für weiteren Kühlmitteldurchsatz- und weitere -druckreduzierung.

<b>Chronologischer Ereignisablauf des Reaktorunfalls am 26.4.1986 im Kernkraftwerk Tschernobyl (Fortsetzung)</b>		
<b>Zeit</b>	<b>Fahrweise, Betriebszustand</b>	<b>Kommentar</b>
01:23:47	Starke Durchsatz-erhitzung (um 40 %) bei den HKP die nicht am Auslauf teilnehmen. Unzuverlässige Durchsatzmessung bei den auslaufenden HKP. Plötzlicher Anstieg des Drucks und des Höhenstandes in den Dampfseparatoren. Die Signale "Fehlerhafter Meßblock" erscheinen für beide automatischen Leistungsregler im Grundbereich (Nr. 1 und 2).	Ein Leistungsanstieg ist mit einer Erhöhung des hydraulischen Widerstandes der Druckrohre verbunden.
01:23:48	Wiederherstellung des Durchsatzes an den HKP, die nicht am Auslaufen teilnehmen. Wiederherstellen des Durchsatzes an den HKP der linken Seite, die am Auslauf teilnehmen, 15 % unter dem Ausgangsdurchsatz. Wiederherstellen des Durchsatzes der auslaufenden HKP 24, 10 % unter dem Ausgangsdurchsatz. Unzuverlässige Messungen an der auslaufenden HKP 23. Weiterer Druck- und Höhenanstieg in den Dampfseparatoren (linke Seite: 75,2 kg/cm <sup>2</sup> , rechte Seite: 88,2 kg/cm <sup>2</sup> ). Öffnen der Ventile der schnellwirkenden Reduzierstation in die Kondensatoren.	Die unterschiedlichen Drücke in den Dampfseparatoren der rechten und linken Seite korrespondieren mit den Unterschieden im Kühlmitteldurchsatz während des Auslaufs der HKP (01:23:22: linke Seite 27 900 m <sup>3</sup> /h; rechte Seite: 27 000 m <sup>3</sup> /h) und im Speisewasserdurchsatz unmittelbar vor dem Auslaufen der HKP (01:23:00: linke Seite: 130t/h; rechte Seite: 75 t/h).
01:23:49	Auftreten des Störfallsignals "Druckanstieg im Reaktorbehälter". "Keine Spannung = 48 V" (keine Stromversorgung der Steuerstabantriebe); Versagen der beiden automatischen Leistungsregler im Grundbereich (Nr. 1 und 2).	Bruch von Druckrohren
01:24:00	Starke Schläge, die Abschaltssysteme bleiben vor Erreichen der unteren Endlage stehen. Die Stromversorgung für die Muffen der Steuerstabantriebe fällt aus.	Zerstörung des Reaktors
gegen 05:00	Brände gelöscht.	
<b>27. April 1986</b>		
01:13	Abschalten von Block 1	Die Blöcke 1 und 2 werden erst einen Tag nach dem Unfall abgeschaltet.
02:13	Abschalten von Block 2	

**Chronologischer Ereignisablauf des Reaktorunfalls am 26.4.1986  
im Kernkraftwerk Tschernobyl (Fortsetzung)**

<b>Zeit</b>	<b>Fahrweise, Betriebszustand</b>	<b>Kommentar</b>
ab 27.4.86 bis 10.5.86	Zuschütten des Reaktors mit verschiedenen Materialien (ca. 2 400 t Blei; ca. 2 600 t Bor, Dolomit, Sand und Lehm).	Mit dieser Maßnahme sollten die Spaltproduktfreisetzung und die Direktstrahlung aus dem zerstörten Reaktor begrenzt und der zwischenzeitlich eingetretene Brand des Graphits im Kernbereich gelöscht werden.
ab 4.5.86	Einblasen von Stickstoff in den Kernbereich.	Kühlung des Reaktorkerns.
ab 6.5.86	Weitgehende Beendigung der Spaltproduktfreisetzung aus dem zerstörten Reaktor.	Der starke Abfall in der Spaltproduktfreisetzung war vermutlich auf das Abdecken des Kernbereichs und die Reduzierung der Kerntemperatur durch die Stickstoffkühlung zurückzuführen.

## **Bildnachweis**

"Tschernobyl-Reportage", Planeta Verlag: Bilder Seite 25, 85, 90 und 92

Photostudio Jürgens Photo, Berlin: Bilder Seite 63, 79, 86, 88, 124, 137, 140 und 145

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**  
Telefon +49 221 2068-0  
Telefax +49 221 2068-888

Forschungsinstitute  
**85748 Garching b. München**  
Telefon +49 89 32004-0  
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**  
Telefon +49 30 88589-0  
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4  
**38122 Braunschweig**  
Telefon +49 531 8012-0  
Telefax +49 531 8012-200

**[www.grs.de](http://www.grs.de)**