

TSCHERNOBYL

- Rückblick
- Status Quo
- Ausblick

CHERNOBYL

- Retrospection
- Status Quo
- Outlook



1986 » 2011 » »



Sonderdruck von zwei Artikeln der GRS veröffentlicht in der Zeitschrift atw, Ausgabe 2/2011 – Special issue of two GRS articles published in the magazine atw, issue 2/2011:

- Der Unfall von Tschernobyl 1986 / The 1986 Chernobyl accident und/and
- Entwicklung des nuklearen Sicherheitsregimes und Unterstützungsprogramme für Tschernobyl / Development of the nuclear safety regime and support programmes for Chernobyl

Am 26. April 2011 Jahr jährt sich der Reaktorunfall von Tschernobyl zum 25. Mal. Es war dies der schwerste Unfall in der Geschichte der friedlichen Nutzung der Kernenergie. Während die Untersuchungen zum Ablauf und den Ursachen des Unfalls überwiegend ein einheitliches Bild aufzeigen, findet man bei den Auswirkungen auf die Bevölkerung und die Umwelt allerdings noch sehr unterschiedliche Darstellungen.

Mit dieser Aufarbeitung des Tschernobyl-Ereignisses, werden die Fakten zur Unfalleinleitung und zum Unfallablauf zusammengefasst. Zudem werden Maßnahmen aufgeführt, die unternommen wurden, um eine Wiederholung einer derartigen Katastrophe auszuschließen. Auf die gesundheitlichen oder sozioökonomischen Folgen des Unfalls wird nicht näher eingegangen.

Der 1. Abschnitt gibt eine Einführung und einen Überblick über die sowjetische Reaktorbaulinie vom Typ RBMK (Tschernobyl). Der 2. Abschnitt erläutert grundsätzliche Eigenschaften dieses besonderen, ausschließlich in der ehemaligen Sowjetunion errichteten, Reaktortyps. Die Informationen sind notwendig für das Verständnis des Unfallablaufs und geben bereits eine Antwort auf die häufig gestellte Frage nach einer Übertragbarkeit des Unfalls auf hiesige Reaktoren. Der 3. Abschnitt beschreibt den Unfallablauf, welcher letztlich durch einen bis dahin nicht durchgeführten Inbetriebsetzungsversuch ausgelöst wurde. Eine kurze Beschreibung der radiologischen Freisetzung und des Zustands der Anlage nach dem Unfall mit dem Einschluss durch den „Sarkophag“ beenden den Abschnitt. Die verschiedenen Ursachen werden abschließend zusammengefasst und die an RBMK-Reaktoren daraufhin durchgeführten Anlagenänderungen aufgezeigt.

Anschriften der Verfasser:

Alexander Kerner,
Dr. Reinhard Stück

Leiter des Bereichs Reaktorsicherheitsanalysen
und

Prof. Dr. Frank-Peter Weiß

Wissenschaftlich-technischer Geschäftsführer
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Forschungszentrum

Boltzmannstr. 14

85748 Garching bei München

und

Schwertnergasse 1

50667 Köln

Der Unfall von Tschernobyl 1986

Alexander Kerner, Reinhard Stück und Frank-Peter Weiß,
Garching bei München und Köln

Einführung

In diesem Jahr jährt sich der Reaktorunfall von Tschernobyl zum 25. Mal. Es war der schwerste Unfall in der Geschichte der friedlichen Nutzung der Kernenergie. Seit dieser Zeit wurde eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt und Veröffentlichungen verfasst. Während die Untersuchungen zum Ablauf und den Ursachen des Unfalls überwiegend ein einheitliches Bild aufzeigen, findet man bei den Auswirkungen auf die Bevölkerung und die Umwelt allerdings noch sehr unterschiedliche Darstellungen. Die folgende Aufarbeitung des Tschernobyl-Ereignisses hat zum Ziel, noch einmal vor Augen zu führen, wie es zum Unfall kommen konnte, wie dieser abließ und was unternommen wurde, um eine Wiederholung einer derartigen Katastrophe auszuschließen. Auf die gesundheitlichen oder sozioökonomischen Folgen des Unfalls wird im Folgenden nicht näher eingegangen.

Der 1. Abschnitt gibt eine Einführung und einen Überblick über die sowjetische Reaktorbaulinie vom Typ RBMK (Typ wie in Tschernobyl). Der 2. Abschnitt erläutert grundsätzliche Eigenschaften dieses Reaktortyps, da dieser sich von den in Westeuropa betriebenen Reaktoren in ganz wesentlichen Punkten unterscheidet. Die Informationen sind notwendig für das Verständnis des Unfallablaufs und geben bereits eine Antwort auf die häufig gestellte Frage nach einer Übertragbarkeit des Unfalls auf hiesige Reaktoren. Der 3. Abschnitt beschreibt den Unfallablauf, welcher letztlich durch einen bis dahin nicht durchgeführten Inbetriebsetzungsversuch ausgelöst wurde. Eine kurze Beschreibung der radiologischen Freisetzung und des Zustands der Anlage nach dem Unfall mit dem Einschluss durch den „Sarkophag“ beenden den Abschnitt. Anschließend werden die verschiedenen Ursachen zusammengefasst und die an RBMK-Reaktoren daraufhin durchgeführten Anlagenänderungen aufgezeigt.

1 RBMK – die Reaktorbaulinie vom Typ Tschernobyl

Die Reaktorbaulinie, zu der auch der Unfall-Reaktor in Tschernobyl gehört, trägt die Abkürzung „RBMK“. Diese steht für „Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny“ und heißt übersetzt „Reaktor mit großer Leistung vom Kanaltyp“. Die Entwicklung dieses Typs Mitte der 1960er-Jahre verfolgte das Ziel, in relativ kurzer Zeit mit bekannten und bewährten Komponenten und Systemen eine bedeutende Anzahl großer Leistungsreaktoren zu errichten. Als Vorzüge dieses Anlagentyps wurden damals aus sowjetischer Sicht gesehen [1]:

- Hohe Zuverlässigkeit durch jederzeitigen Zugriff auf jedes einzelne Druckrohr (siehe hierzu Abschnitt 2)
- Möglichkeit während des Betriebs Brennelemente zu wechseln
- „Modularer“ Aufbau: die Reaktorleistung kann durch Hinzufügen weiterer Druckrohre erhöht werden und Großschmiedestücke wie ein Reaktordruckbehälter sind nicht notwendig

Aus *Tabelle 1* ist ersichtlich, dass dieser Reaktortyp an den 5 Standorten *Leningrad, Kursk, Smolensk, Ignalina* und *Tschernobyl* errichtet und betrieben wurde. Die Tabelle zeigt ferner, dass in Russland derzeit noch 11 Blöcke in Betrieb sind, für die eine Laufzeitverlängerung geplant oder bereits bewilligt wurde.

2 Charakteristische Merkmale des RBMK

2.1 Aufbau und Funktionsweise des RBMK

Beim RBMK handelt es sich um einen grafitmoderierten Siedewasser-Druckröhrenreaktor. Der grundsätzliche Aufbau eines RBMK ist in *Abbildung 1* anhand des Schemas eines RBMK der 1. Generation dargestellt. Die Reaktoren dieser Generation haben kein Containment. Bei der 2. Generation stellen die

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

1) Sonderbauform der 2. Generation
 2) Erlaubte Leistung 4.200 MW_{th}, entsprechend ca. 1.300 MW_{el}

Tab. 1: RBMK-Reaktoren in Osteuropa [4], [5]

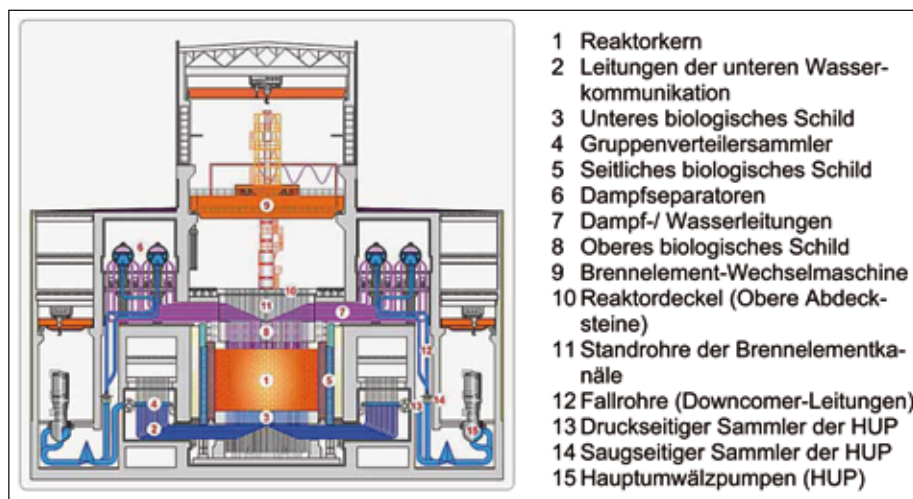


Abb. 1: Schematischer Querschnitt eines RBMK-Reaktors (1. Generation) [8]

Druckkammern, welche sich unterhalb des Kühlkreislafs befinden, mit den Kondensationseinrichtungen einen partiellen Sicherheitseinschluss dar. Die übrigen Komponenten des Reaktorkühlkreislafs, wie die Frischdampfleitungen oberhalb des Reaktorkerns und die Dampfseparatoren sind nicht im Sicherheitseinschluss angeordnet.

Der Reaktorkern besteht aus etwa 2.500 Grafitssäulen, zusammengesetzt aus einzelnen Blöcken unterschiedlicher Länge, mit einer Gesamthöhe von 7 m und einem Durchmesser von 11,8 m. Vertikale Bohrungen in den Grafitssäulen nehmen die Druckrohre (ca. 1.661 bis 1.693) und die Rohre für Regel- und Schutzsysteme (211 Steuerstäbe), Reflektorkühlung und Kern-

instrumentierung auf. Der Reaktorkern ist umgeben von einem zylinderförmigen Metallgehäuse, welches zusammen mit der oberen und unteren Kernplatte den Reaktorbehälter bildet. Er ist hermetisch abgeschlossen und mit Stickstoff/Helium inertisiert. Die Inertisierung sorgt dafür, dass der Grafit, der bei Betrieb bis zu 750 °C heiß wird, nicht durch Luftzufuhr oxidiert.

Die Druckrohre enthalten jeweils ein Brennelement, das aus 2 Brennstabblöcken mit je 18 Brennstäben besteht. Jeder Brennstab enthält 3,5 kg UO₂ mit einer ursprünglichen Anreicherung von 1,8 % U-235. Die Brennelemente erzeugen eine durchschnittliche Leistung von 2 MW (max. 3 MW). Das ca. 7 m lange Brennelement wird vom Kühlwasser von unten nach oben umströmt, dabei wird das Kühlmittel teilweise verdampft. Am Kernaustritt liegt der Dampfgehalt bei 15 bis 30 % bei einem Druck von 70 bar, was einer Sättigungstemperatur von 286 °C entspricht.

Der Wasser-Dampf-Kreislauf besteht aus 2 Teilkreisläufen, einer für je eine Kernhälfte. Sie sind über das Frischdampfsystem miteinander verbunden. Jeder Teilkreislauf wiederum enthält 2 Dampfseparatoren, die wasser- und dampfseitig miteinander verbunden sind. Das Wasser der Dampfseparatoren vermischt sich mit dem Speisewasser und strömt pro Teilkreislauf über 24 Downcomer-Leitungen zum saugseitigen Sammler der 4 Hauptumwälzpumpen, von denen 3 bei Vollast im Betrieb sind und eine in Reserve steht. Auf der Druckseite der Hauptumwälzpumpen befindet sich ebenfalls ein Sammler, der durch Rohrleitungen mit 22 Gruppenverteilersammlern verbunden ist. Von jedem Gruppenverteilersammler zweigen 40 bis 44 Leitungen zu den einzelnen Druckrohren ab.

Der Dampf aus den 4 Dampfseparatoren gelangt über die Frischdampfleitungen auf 2 Turbosätze (je 500 MW_{el}). Das Kondensat aus den Turbinenkondensatoren wird mittels der Kondensatpumpen in 4 Speisewasserbehälter mit Entgaser gefördert und von dort mit 5 Speisewasserpumpen in die Dampfseparatoren, wo sich das auf 160 °C vorgewärmte Speisewasser mit dem gesättigten Wasser mischt.

Zur Erläuterung des Inbetriebsetzungsversuchs, der wesentlicher Auslöser für den Unfall war, wird nunmehr auf das Notkühl-system des betroffenen Blocks eingegangen (siehe Abbildung 2). Grundsätzlich ist das Notkühl-system der RBMK-Reaktoren 3-strängig aufgebaut. In der Funktion des Notkühl-systems ist zwischen kurzfristiger (bis ca. 3 min) und langfristiger Kühlung sowie, bei langfristiger Kühlung, zwischen einer Einspeisung in die betroffene bzw. nicht betroffene Kernhälfte zu unterscheiden. Das Teilsystem für die kurzfristige

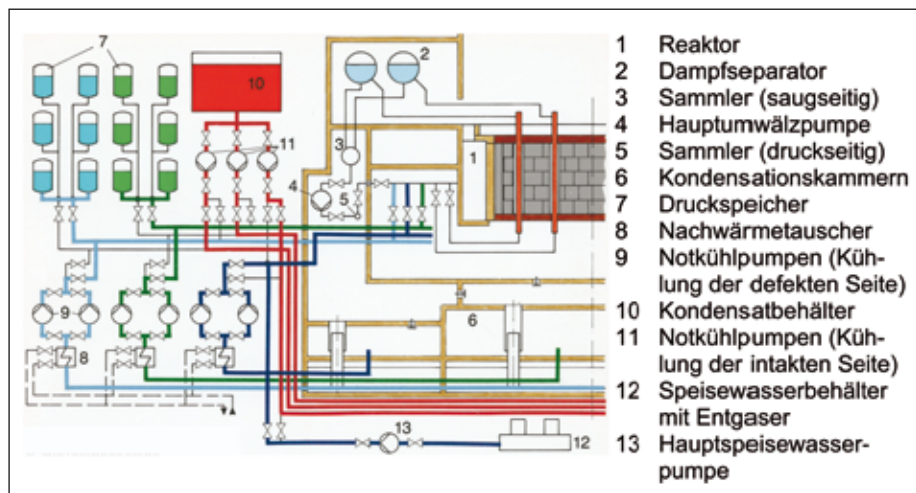


Abb. 2: Schematische Darstellung des Notkühlsystems von RBMK-Anlagen der 2. Generation (Tschernobyl Block 3 und 4)

Kernkühlung besteht aus 2 Strängen, die von je 6 Druckspeichern (7) versorgt werden sowie einem Strang, der aus dem Hauptspeisewassersystem (12 und 13) gespeist wird. Das Teilsystem für die langfristige Kernkühlung besteht aus 3 mal 2 Notkühlpumpen (9), die aus den Kondensationskammern in die betroffene Kreislaufhälfte einspeisen und aus 3 mal 1 Notkühlpumpe (11), die aus dem Kondensatbehälter in die nicht betroffene Kernhälfte einspeist. Alle Notkühlpumpen sind notstromversorgt.

2.2 Reaktorphysikalische Eigenschaften des RBMK vor dem Unfall

Bei dem Reaktorunfall von Tschernobyl handelte es sich um einen Reaktivitätsstörfall, der durch die besonderen reaktorphysikalischen Eigenschaften des RBMK-Reaktors bedingt war, insbesondere durch die positive Reaktivitätsrückwirkung von Dampfblasen, die in Leichtwasserreaktoren westlicher Bauart grundsätzlich negativ ist.

Die Verwendung von Grafit als Moderator und von Wasser als Kühlmittel ergibt die für einen RBMK typische, besondere Situation. Das Kühlmittel Wasser wirkt zugleich als Neutronenmoderator und als Neutronenabsorber. Während die Moderatorwirkung des Wassers gegenüber der des Grafits 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 durch Kühlmittelverlust zu einer deutlichen Verminderung der Neutronenabsorption im Reaktorkern. Eine Erhöhung des Dampfgehaltes in den Druckrohren bewirkt also eine Erhöhung der Reaktivität und somit eine Erhöhung der Reaktorleistung. Der Leistungsanstieg hat wiederum eine Erhöhung der Verdampfung zur Folge usw. Dies wird als positiver Voideffekt bezeichnet.

Ein reaktorphysikalischer Parameter mit großem Einfluss auf die Höhe des positiven Voideffekts stellt die „betriebliche Reaktivitätsreserve (englisch: operational reactivity margin – ORM)“ dar. 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. Die im Jahre 1986 gültigen Betriebsvorschriften forderten, dass bei Leistungsbetrieb der ORM-Wert mindestens 26 bis 30 Steuerstäbe betragen muss (minimal erlaubt waren 15). Diese Reserve ist für betriebliche Zwecke erforderlich, um bei Lastwechsel zur Kompensation der Xenonvergiftung, Steuerstäbe ausfahren zu können – 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, da der relative Einfluss des Kühlmittels Wasser als Absorber steigt.

Ferner muss eine ausreichende Zahl von Regelstäben soweit in den Kern eingefahren sein, dass bei Auslösung einer Abschaltung sofort eine ausreichend große Wirksamkeit erreicht wird. Die Einfahrtgeschwindigkeit der Steuerstäbe betrug damals 0,4 m/s, sodass vollständig ausgefahrene Steuerstäbe erst nach etwa 10 s im wirksamen Bereich gewesen wären [2].

Die Höhe der positiven Reaktivitätsrückwirkung hängt außer vom ORM-Wert auch noch von weiteren Parametern ab:

- Bei niedriger Leistung ist die positive Rückwirkung besonders hoch. Im oberen Leistungsbereich ist der Dampfblasenanteil in den Druckrohren in etwa konstant. Im unteren Leistungsbereich trifft dies nicht zu, da der Kühlmitteldurchsatz nicht ausreichend begrenzt werden kann. Daher sind auch der Kerneintrittsdampfgehalt und die Kerneintrittsunterkühlung niedriger als bei Voll-

last. Die Änderung des Volumendampfgehaltes im Kern aufgrund von Änderungen der Leistung ist dadurch größer als bei Volllast. Aufgrund der geringeren Brennstofftemperatur bei niedriger Leistung ist zudem die stabilisierende Dopperrückwirkung über die Brennstofftemperatur langsamer als bei Volllast.

- Der Wert der positiven Rückwirkung steigt ferner mit zunehmendem Abbrand an. Untersuchungen in den 1970er-Jahren zeigten, dass bei vollständiger Verdampfung des Wassers bei einem mittleren Abbrand von etwa 10 MWd/kg ohne fest eingebaute Absorberstäbe, die zur Kompensation der anfänglichen Überschussreaktivität dienten, die Reaktivität durch den Voideffekt auf etwa $+5 \beta^1$ steigt [1].
- Eine höhere Anreicherung hat eine Abnahme des positiven Voideffekts zur Folge, da zur Kompensation der Überschussreaktivität mehr Absorberstäbe eingebracht werden müssen und dadurch der relative Einfluss des Wassers als Absorber sinkt.

Eine weitere Besonderheit der RBMK-Anlagen war ein positiver Reaktivitätseffekt des Abschaltsystems. Das Regel- und Abschalt-system eines RBMK der 2. Generation besteht aus 211 Steuerstäben, von denen 187 von oben und 24 verkürzte Steuerstäbe von unten in den 7 m hohen Kern einfahren. 163 der oberen Steuerstäbe bestanden aus einem 6,2 m langem Absorberteil und einem 4,55 m langem Verdrängerteil aus Grafit (siehe auch Abbildung 3), der die

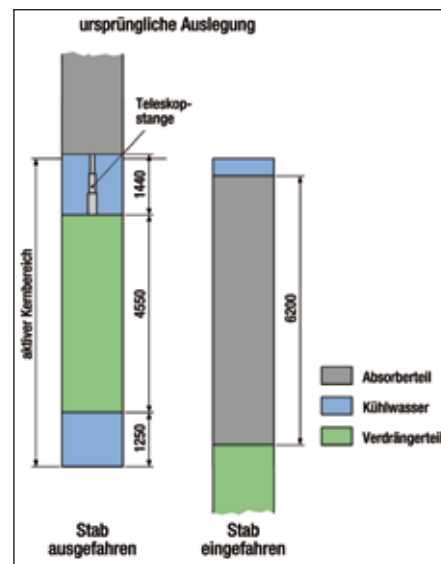


Abb. 3: Ursprüngliche Auslegung von RBMK-Steuerstäben (Längenangaben in mm)

¹ β ist der Anteil der verzögerten Neutronen (an allen Spaltneutronen). Wenn die Reaktivität einen Wert größer als $+1\beta$ annimmt, wird der prompt überkritische Zustand erreicht. Ein Reaktor ist in diesem Bereich nicht mehr regelbar, da eine Verdopplung der Neutronen im Millisekundenbereich erfolgt.

Moderation weiter erhöhen soll. Oberhalb und unterhalb des Verdrängerteils wird der Steuerstabkanal durch Wassersäulen ausgefüllt. Wird ein ausgefahrener Steuerstab in den Kern eingefahren, wird das neutronenabsorbierende Wasser im unteren Teil durch den moderierenden Teil aus Grafit verdrängt. Damit tritt im ersten Moment das Gegenteil der beabsichtigten Wirkung ein: Die Reaktorleistung wird nicht durch das Einbringen negativer Reaktivität verringert, sondern durch den positiven Reaktivitätseintrag erhöht, der als Folge der Wasserverdrängung im unteren Teil des Kerns entsteht. Dieser Effekt wird auch als „positiver Abschalteneffekt“ bezeichnet. Die Größe des Effektes wird durch eine axiale Leistungsverteilung mit einer Überhöhung im unteren Kernbereich erheblich verstärkt. Ein weiteres, unabhängiges und innerhalb weniger Sekunden wirkendes Abschaltensystem gab es in den RBMK-Anlagen zu dieser Zeit nicht.

3 Der Unfall von Tschernobyl 1986

3.1 Das Versuchsprogramm und der Unfallablauf

Der Unfall im Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl am 26. April 1986 ereignete sich, als die Anlage für eine Revision abgefahren werden sollte. Während des Abfahrvorganges war vorgesehen, einen bis dahin nicht durchgeführten Inbetriebsetzungsversuch nachzuholen, mit dem bestimmte Sicherheitseigenschaften für das Not- und Nachkühlensystem nachgewiesen werden sollten.

Die kurzfristige Einspeisung des Not- und Nachkühlensystems bei Kühlmittelverlust-Störfällen (KMV) erfolgt – wie oben erläutert – in einem Strang über das Hauptspeisewassersystem. Wird entsprechend des sowjetischen Regelwerks zusätzlich der Notstromfall unterstellt, sollte die Rotationsenergie der auslaufenden Turbogeneratoren dazu genutzt werden, die Hauptspeisepumpe dieses Notkühlstrangs bis zum Übergang auf die langfristige Kühlung, d.h. bis zum Hochlaufen der Dieselgeneratoren zu versorgen. Der geplante Versuch sollte die Funktion dieser Maßnahme nachweisen.

Der Versuch wurde – fehlerhafterweise – als rein konventioneller Versuch im Bereich der Elektrotechnik ohne Rückwirkung auf den nuklearen Teil angesehen. Im Wesentlichen war folgendes Programm geplant:

- Die thermische Leistung der Anlage sollte bei Versuchsbeginn zwischen 700 und 1.000 MW (ca. 20 bis 30 %) liegen. In diesem Leistungsbereich befindet sich ein Turbosatz in Betrieb und der zweite ist abgeschaltet.

- Abweichend vom Normalbetrieb war vorgesehen, dass neben den 6 normalerweise in Betrieb befindlichen Hauptumwälzpumpen auch die beiden Reservepumpen laufen.
- Vier Hauptumwälzpumpen, einschließlich der 2 Reservepumpen, sollten während und nach dem Versuch weiterlaufen, um die Kernkühlung zu gewährleisten. Diese Pumpen waren deshalb mit dem normalen Stromnetz verbunden.
- Die 4 übrigen Hauptumwälzpumpen waren bei dem Versuch anstelle der Hauptspeisewasserpumpen als Last für den Turbogenerator vorgesehen. Sie blieben für den Versuch auch nach Abschaltung des Turbogenerators weiterhin mit diesem elektrisch verbunden und sollten mit Beginn des Versuchs 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 Reaktorabschaltung ausgelöst werden.

- 13:05 Uhr: Abschaltung eines Turbosatzes und Umschalten der Verbraucher auf den verbleibenden Turbogenerator.
- 14:00 Uhr: Leistung blieb auf Anforderung des Lastverteilers weiterhin auf 50 % der Nennleistung. Der Versuchsbeginn wurde um ca. 9 h verschoben.
- 23:10 Uhr: Das Abfahren auf für den im Versuch vorgesehenen Leistungsbereich 700 bis 1.000 MW wurde fortgesetzt. Eine thermische Leistung von 700 MW war die minimal zulässige Leistung für den stationären Betrieb.

26. April 1986

- 0:28 Uhr: Durch eine technische Störung im Regelsystem oder eine Fehllumschaltung durch den Operateur wurde der Zielbereich der Reaktorleistung weit unterschritten. Die Leistung betrug nur noch etwa 1 %. Sowohl aufgrund des Unterschreitens der minimal zulässigen Reaktorleistung als auch des minimal zulässigen ORM-Wertes, hätte der Reaktor (auch) zu diesem Zeitpunkt abgeschaltet werden müssen. Stattdessen wurde die Leistung durch weiteres Ausfahren von Steuerstäben soweit technisch möglich angehoben und bei etwa 200 MW_{th} gehalten, was eine weitere Verringerung des ORM-Wertes zur Folge hatte.
- 0:43 Uhr: Das Reaktorabschaltsignal, welches beim Abschalten des letzten Turbogeneratorsatzes durch den Reaktorschutz ausgelöst wird, wurde unwirksam gemacht, um den Versuch eventuell wiederholen zu können (massiver Eingriff in das Reaktorschutzsystem, der auch nicht im Versuchsprogramm vorgesehen war).
- 1:00 Uhr: Zu dieser Zeit befand sich die Anlage in einem äußerst instabilen und nicht zulässigen Zustand: Kern mit hohem Abbrand, niedriges Leistungsniveau mit ungünstiger Leistungsdichteverteilung, hoher Kühlmitteldurchsatz im

Der chronologische Unfallablauf stellt sich wie folgt dar (siehe auch Abbildung 4):

25. April 1986

- 1:00 Uhr: Planmäßiges Abfahren zur jährlichen Revision (hoher Abbrand: ca. 12 bis 15 MWd/kg bei 75 % der Brennelemente). Der ORM-Wert lag bei 31.
- 3:47 Uhr: Thermische Leistung wurde auf 50 % der Nennleistung gehalten.
- 7:10 Uhr: Der ORM-Wert von 13,2 unterschritt aufgrund der instationären Xenonvergiftung den zulässigen Wert. Der Reaktor hätte abgeschaltet werden müssen. Im weiteren Verlauf stieg der ORM-Wert wieder über den minimal zulässigen Wert an.

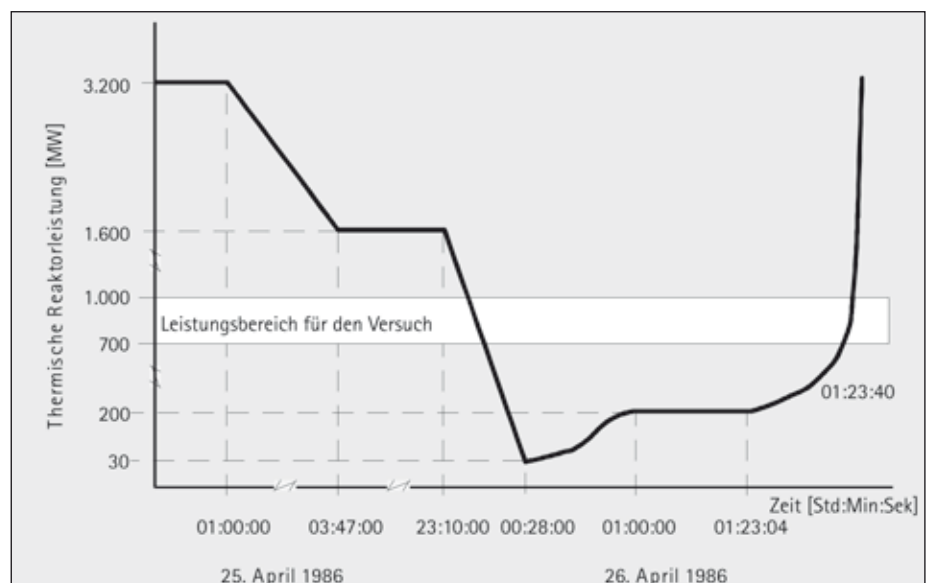


Abb. 4: Vereinfachter Verlauf der Reaktorleistung vor dem Unfall [1]

Kern (die beiden Hauptumwälzpumpen aus der Reserve wurden zu dieser Zeit zugeschaltet), verringerter Speisewas-serdurchsatz mit Erhöhung der Kühlmit-teltemperatur am Kerneintritt (nahe Sättigungstemperatur) und instationä-res Verhalten der räumlichen Xenonver-giftung. Zur Stabilisierung des Anlagen-zustandes wurde mehrfach gegen Be-triebsvorschriften verstoßen (z.B. Über-schreiten des zulässigen Wertes für den Kühlmitteldurchsatz in einigen Haupt-umwälzpumpen, weiteres Herausfahren der Steuerstäbe, Blockieren der Anrege-signale für die Reaktorabschaltung durch Füllstands- oder Druckkriterien in den Dampfseparatoren). Nachrech-nungen ergaben, dass der ORM-Wert bei 6 bis 8 lag.

- 1:23:04 Uhr: Der Versuch wurde einge-leitet und die 4 Hauptumwälzpumpen liefen aus. Dies führte zu einer Verrin-gerung des Kühlmitteldurchsatzes im Reaktorkern und zu einem Anstieg der Kerneintrittstemperatur und des Dampf-blasengehalts im Reaktorkern. Dies be-deutete einen Leistungsanstieg, den die Regelung nicht mehr kompensieren konnte.
- 1:23:40 Uhr: Bei etwa 10 % Reaktorlei-stung erfolgte die Reaktorabschaltung per Hand, die einen zusätzlichen unmittel-baren Reaktivitätseintrag durch den po-sitiven Abschalteffekt zur Folge hatte.

Die Leistungsexkursion führte zu einem ra-piden Anstieg der Energiefreisetzung in den Brennelementen und im Weiteren zur Zerstörung des Reaktorkerns. Die im Brennstoff gespeicherte Wärme wurde da-bei sehr schnell in das umgebende Kühlmit-tel übertragen, welches praktisch spontan verdampfte. Rechnungen lassen darauf schließen, dass die Reaktorleistung zu die-sem Zeitpunkt das 100-fache der Nennlei-stung des Reaktors erreichte. Der resultie-rende hohe Druckanstieg führte zur Explo-sion des Reaktors. Augenzeugen beobach-teten eine zweite Explosion ca. 2 bis 3 Se-kunden später. Ob diese durch eine Was-serstoffexplosion oder durch eine zweite Leistungsexkursion begründet war, blieb unklar. Der Zerstörung des Reaktorkerns mit Verlust der Schutzatmosphäre folgten Grafitbrände, wobei 250 t Grafit verbrann-ten, und durch die Zerstörung der Reaktor-halle eine massive Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umwelt.

Ereignisse nach Unfallbeginn

- 26.4.1986: Gegen 5:00 Uhr waren die Brände außerhalb des Reaktors ge-löscht. Block 3 wurde abgeschaltet. Der Einsatz von Wasser zur Kühlung des Re-aktorkerns wurde nach 10 h abgebro-chen, da die Kühlung der Grafitblöcke nicht gelang und zusätzlich Radioakti-vidät aus der Anlage in die Umgebung



Abb. 5: Der zerstörte Block 4 (links) und Block 3 (rechts) des Kernkraftwerks Tschernobyl

- transportiert wurde. Zudem wären die weiteren Blöcke durch Überflutung ge-fährdet gewesen.
- 27.4.1986: Block 1 wurde um 1:13 Uhr und Block 2 um 2:13 Uhr abgeschaltet
- 27.4. bis 10.5.1986: Zuschütten des Re-aktors mit verschiedenen Materialien mit Hilfe von Hubschraubereinsätzen
 - 40 t Borcarbid um Kettenreaktionen zu unterbinden
 - 800 t Dolomit um Energie zu absorbie-ren und mit dem daraus entstandenen Kohlendioxid den Grafitbrand im Kern-bereich zu ersticken
 - 2.400 t Blei um die Gammastrahlung zu minimieren und zur Bildung einer geschlossenen Schicht über dem ge-schmolzenen Kern

- 1.800 t Sand und Lehm um die radio-aktiven Stoffe zu filtern
- Einblasen von Stickstoff in den Kern-bereich zur Kühlung des Reaktorkerns
- 28.4.1986: Um 9:00 Uhr wurde im KKW Forsmark (Schweden) eine erhöhte Ra-dioaktivität gemessen. Am gleichen Tag wurde von sowjetischer Seite erstmals von einem Unfall berichtet.

3.2 Freisetzung radioaktiver Stoffe

Einen Überblick zum zeitlichen Verlauf der Freisetzung zeigt *Abbildung 6*. Es ist zu er-kennen, dass die Aktivitätsfreisetzungen mit großen Unsicherheiten behaftet sind (siehe Unsicherheitsbänder), da qualifi-zierte Messdaten fehlen.

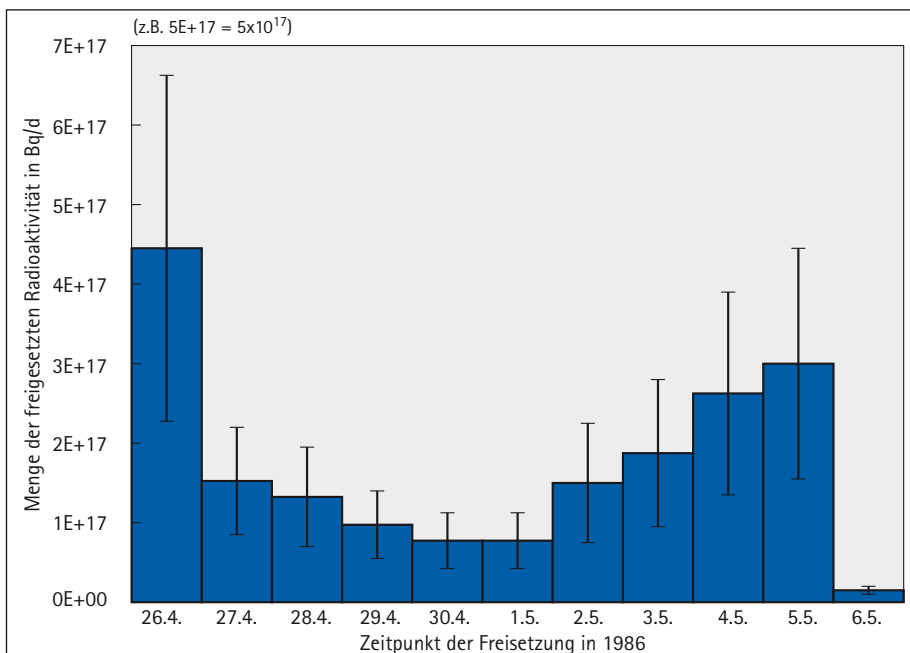


Abb. 6: Freigesetzte Radioaktivität in den ersten 10 Tagen (mit Unsicherheitsbereichen) [1]

Die massive Freisetzung dauerte 10 Tage und lässt sich in 4 Phasen einteilen [1]:

Phase 1: Am 1. Tag wird bei der Explosion des Reaktors und während des späteren Brandes 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.

Phase 2: In den folgenden 5 Tagen nimmt die Freisetzung aufgrund der Maßnahmen zum Löschen des Grafitbrandes und zur Abdeckung des Reaktorkerns stetig ab. Heiße Gase und Verbrennungsprodukte des Grafitreißens reißen feindisperse Brennstoffteilchen mit. Die Nuklidzusammensetzung der freigesetzten radioaktiven Stoffe entspricht der im Kernbrennstoff.

Phase 3: Vom 2.5. bis zum 5.5. nimmt die Freisetzung 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, insbesondere auch durch die Kühlung des Reaktorkerns mit Stickstoff und der Bildung von schwerflüchtigen Verbindungen der Radionuklide zugeschrieben. Messbare geringere Freisetzungen dauern auch noch während des restlichen Monats an.

Die Ausbreitung der kontaminierten Luftmassen in dem Zeitraum vom 27.4. bis 10.5. wurde durch die vorherrschenden Strömungen bestimmt, die sich aus der großräumigen Luftdruckverteilung, den Windverhältnissen und den Niederschlägen ergaben. Während der ersten Freisetzungsphase wurden die radioaktiven Stoffe durch den heißen Luftstrom des Grafitbrandes bis in eine Höhe von 1.200 m und dort nordwärts transportiert. In den weiteren Freisetzungsphasen hatten die ausströmenden Gase eine niedrigere Temperatur, sodass der Auftrieb bis in Höhen von 200 bis 400 m erfolgte. Die Größe der aufgetre-



Abb. 7: Das Kernkraftwerk Tschernobyl mit dem Sarkophag um den 4. Block

tenen Kontamination resultiert insbesondere aus der Intensität der Regenfälle, sodass es lokal zu unterschiedlichen Kontaminationen kam.

3.3 Der Sarkophag

In der Zeit von Mai bis November 1986 wurde zur Isolierung des zerstörten Reaktors von der Umwelt der Sarkophag (siehe Abbildung 7) errichtet. Wegen der ungünstigen Strahlensituation bei den Bauarbeiten konnten nicht alle Teile miteinander verschweißt oder verschraubt werden, sondern wurden z.T. lediglich aufeinander gesetzt. Konzipiert wurde der Sarkophag für eine Standzeit von ca. 30 Jahren. In den vergangenen Jahren hat er äußeren Einwirkungen, wie z.B. dem Erdbeben von 1990 ohne Veränderungen standgehalten. Seine Standsicherheit ist allerdings langfristig nicht gesichert. Im Jahre 1997 vereinbarten die G7-Staaten, die EU und die Ukraine die Verwirklichung des „Shelter Implementation Plan“ (SIP). Der SIP, der gemeinsam von ukrainischen und westlichen Experten erarbeitet wurde, zielt darauf ab, den Sarkophag zu stabilisieren und darüber eine neue, größere Schutzhülle zu errichten – das „New Safe Confinement“ (NSC). [7]

Die Untersuchungen zum Verbleib des Kernbrennstoffs kommen zu dem Ergebnis, dass sich heute noch mehr als 95 % (rund 180 t) des ursprünglich im Reaktor vorhandenen Brennstoffs innerhalb des Sarkophags befinden. Diese Angaben konnten durch Messungen und später durch Bohrungen näherungsweise ermittelt werden. Abbildung 8 zeigt anhand eines Modells die angenommene Situation im Block 4. Der größte Teil des im Reaktorschacht verbliebenen Kernbrennstoffs schmolz zunächst nach dem Unfall aufgrund der Nachzerfallswärme und floss dann durch Öffnungen in tiefer gelegene Räume. Dort vermischte er 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



Abb. 8: Darstellung des derzeitigen Zustandes anhand eines Modells

Zustand übergang. Die Oberflächentemperatur der Lava liegt heute meist im Bereich der Raumtemperatur. In den oberen Bereichen befinden sich beträchtliche Mengen an radioaktivem Staub sowie Brennstofffragmente.

4 Unfallursachen und durchgeführte Maßnahmen

4.1 Zusammenfassung der Unfallursachen

Technische Ursachen für den Unfall waren vor allem die gravierenden Defizite in der reaktorphysikalischen Auslegung, der Abschaltvorrichtungen und der Betriebsvorschriften der RBMK-Anlagen. Dadurch war bei bestimmten Betriebszuständen eine explosionsartige Leistungsexkursion möglich.

In diesem Zusammenhang sind die folgenden sicherheitstechnischen Defizite für das Eintreten des Unfalls als ursächlich anzusehen:

- Mangelhafte Kernausslegung, insbesondere ein hoher positiver Voideffekt bei Betriebszuständen mit hohen Abbränden. Unmittelbar vor Versuchsbeginn betrug der Voideffekt, d.h. die Reaktivitätserhöhung bei vollständiger Verdampfung des Kühlmittels in den Druckrohren mindestens 5 β
- Fehlerhafte Auslegung des Abschaltsystems durch einen positiven Abschaltfaktor bei voll ausgefahrenen Regelstäben, erheblich verstärkt durch eine „peak unten“ Leistungsverteilung
- Unzureichende Wirksamkeit der Abschaltvorrichtungen u.a. durch die lange Zeit des Einfahrens der Steuerstäbe.
- Fehlende automatische Abschaltkriterien (z.B. bei niedrigem ORM-Wert)
- Unzureichender Schutz gegen Blockieren von Reaktorschutzaktionen durch die Operateure

Auslösende und zum Unfall wesentlich beitragende Ereignisse waren:

- Mängelbehaftetes Versuchsprogramm. Da der Versuch nur als elektrotechnischer Test eingestuft wurde, blieben sämtliche Aspekte der Reaktorsicherheit bei Aufstellung des Versuchsprogramms unbeachtet
- Geringe Erfahrungen und unzureichende Beteiligung des Betriebspersonals an den Vorbereitungen des Versuchs
- Verstöße des Betriebspersonals gegen Betriebsvorschriften:
 - Erstmals Unterschreiten des vorgeschriebenen ORM-Mindestwertes bereits am 25.04. um 07:10 Uhr
 - Verringern der Leistung unter den im Versuchsprogramm vorgesehenen Zielkorridor von 700 bis 1.000 MW_{th}, zumal ein Betrieb < 700 MW_{th} grundsätzlich nicht erlaubt ist [2]

- Erneutes deutliches Unterschreiten des ORM-Mindestwertes im Zusammenhang mit der Stabilisierung der Leistung auf 200 MW_{th}
- Zuschalten der Reservepumpen in den Hauptkühlmittelschleifen obwohl Grenzwerte für den maximalen Durchsatz überschritten wurden
- Blockieren von Anregungen für die Reaktorabschaltung.

Die Bewertung der Handlungen des Personals lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Aus den mehrfachen Verstößen des Betriebspersonals kann gefolgert werden, dass dies mit Billigung leitender Verantwortlicher und in Unkenntnis der sicherheitstechnischen Bedeutung geschah.
- Insbesondere bei Betriebszuständen mit sehr geringer Leistung war die Anlage instabil, sodass die Betriebsmannschaft vielfach korrigierend eingreifen musste. Für das erforderliche sicherheitsgerichtete Handeln der Betriebsmannschaft war die Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle unzureichend.
- Die eindeutige Einschätzung des Anlagenzustandes gestaltete sich schwierig: In der Warte wurden ca. 4.000 (!) Werte angezeigt, wobei während des Versuchs viele Messgeräte auf versuchsspezifische Messdaten umgestellt waren. Ferner befanden sich die Rechenanlage und der Ausdruck des ORM-Wertes etwa 50 m vom Schaltpult in der Reaktorwarte entfernt.
- Die Ausbildung des Personals hinsichtlich der für den Unfall wichtigen physikalischen Vorgänge war unzureichend. Es gab keine ausreichend umfassenden Sicherheitsanalysen zum RBMK und wichtige Betriebserfahrungen, wie das Vorläuferereignis im Block 1 des Kernkraftwerks *Leningrad*, wurden nicht weitergegeben.
- Zum damaligen Zeitpunkt gab es keine Simulatoren für RBMK-Anlagen. Daher konnten betriebliche Vorgänge, Störungen und Störfälle nicht praxisnah trainiert werden.

Als weitere Hauptursache des Unfalls ist die unzureichende Sicherheitskultur anzuführen. In den Jahren vor 1986 gab es Vorläufer-Ereignisse die die RBMK-spezifischen Schwachstellen der Auslegung zeigten. So wurde der hohe Dampfblasenkoeffizient bereits in den 1970er-Jahren – auch in *Tschernobyl* – gemessen. Im Jahre 1975 ereignete sich im Kernkraftwerk *Leningrad* ein Reaktivitätsstörfall mit Schäden am Reaktor, der wegen anderer Randbedingungen jedoch glimpflich ablief. Die daraufhin eingeführten Maßnahmen (z.B. Erhöhung der Anreicherung, automatisches lokales Regel- und Schutzsystem) konnten den Einfluss des positiven Dampfblasenkoeffizi-

enten nicht ausreichend beseitigen. Auch der positive Abschaltfaktor trat bereits bei Versuchen zur Inbetriebnahme 1983 in *Ignalina* und ebenfalls am Block 4 in *Tschernobyl* auf. Insgesamt waren alle maßgeblichen technischen Unfallursachen vorher bekannt. Die notwendigen Maßnahmen, die den Unfall verhindert hätten, waren vor dem Unfall konzipiert, jedoch nicht umgesetzt worden.

4.2 Durchgeführte Ertüchtigungsmaßnahmen

In allen RBMK-Reaktoren wurden nach dem Unfall von *Tschernobyl* Ertüchtigungsmaßnahmen durchgeführt. In einer ersten Stufe wurden Verbesserungen umgesetzt, die darauf abzielten, diejenigen Mängel zu beseitigen, die unmittelbar zum Unfall von *Tschernobyl* führten. Die kurzfristige Planung und Durchführung dieser Post-*Tschernobyl*-Modifikationen zeigt auch, dass wichtige Gegenmaßnahmen bereits bekannt waren. Hierzu zählen:

- Maßnahmen zur Reduktion des positiven Dampfblaseneffekts
 - Installation zusätzlicher fester Absorberstäbe (ca. 80)
 - Erhöhung des minimalen ORM auf 43 bis 48 gegenüber 26 bis 30 (mit Ausnahmeregelung ist minimal 15 erlaubt) und
 - Sukzessive Erhöhung der Brennstoffanreicherung von 2,0 auf 2,4, 2,6 und 2,8 % sowie Verwendung des abbrennbaren Neutronengifts Erbium
- Maßnahmen zur Beschleunigung des Abschaltvorgangs sowie zur Erhöhung der Abschaltreaktivität
 - Korrektur der Steuerstabkonstruktion zur Vermeidung eines positiven Abschalt-Effektes
 - Erhöhung der Anzahl der Steuerstäbe, die von unten in den Reaktorkern eingeführt werden, sowie deren Einbindung in den Reaktorschutz
 - Verhinderung, dass die Stäbe ganz ausgefahren werden können und
 - Installation eines Schnellabschaltsystems, welches aus 24 Steuerstäben besteht, die in 2 Sekunden einfallen, gegenüber den modifizierten Steuerstäben mit einer Einfahrzeit von 14 Sekunden (früher etwa 20 s)
- Maßnahmen zur Verbesserung der Betriebsführung
 - Verkürzung des Zeitintervalls zur Berechnung der betrieblichen Reaktivitätsreserve (ORM) und deren Anzeige auf der Warte
 - Alarm bei Unterschreiten des zulässigen ORM-Wertes
 - Erhöhung der rechenstechnischen Kapazitäten zur Ermittlung reaktorphysikalischer Betriebsparameter und
 - Verbesserungen der administrativen Regelungen, z.B. Abschaltungen bei

Leistungen $<700 \text{ MW}_{\text{th}}$ durch automatische Maßnahmen

Diese nach dem Unfall durchgeführten Post-*Tschernobyl*-Modifikationen zur reaktorphysikalischen Auslegung und zum Abschaltsystem schließen eine Wiederholung des explosionsartigen Unfallablaufs praktisch aus. Trotz dieser Verbesserungen bestanden bei den meisten RBMKs weiterhin erhebliche Sicherheitsdefizite, die für einen mittelfristigen Weiterbetrieb anlagen-spezifisch behoben werden mussten/müssen. Hierzu zählen beispielsweise:

- Nachrüstung zusätzlicher Anregekriterien für die Reaktorabschaltung
- Entwicklung und Installation eines diversitären (schnellen) Abschaltsystems
- Ertüchtigungen des Steuerstabskühlsystems zur Verringerung eines positiven Reaktivitätseffektes bei Entleerung oder Gaseintrag
- Entwicklung und Installation eines eigenständigen Notkühlsystems für die RBMK der 1. Generation
- Erhöhung der Druckentlastungskapazität aus dem Reaktorbehälter auf das technisch Machbare und
- Maßnahmen im Rahmen der Betriebsführung wie Erstellung von Störfallprozeduren und Training an Simulatoren

Viele der Ertüchtigungsmaßnahmen, die in internationalen Kooperationen weitgehend definiert wurden, sind in den vergangenen 25 Jahren umgesetzt worden, bei einigen gibt es auch heute noch Handlungsbedarf. Darüber hinaus ist anzumerken, dass auch einige grundlegende Probleme, wie der fehlende Sicherheitseinschluss mit angemessenem Aufwand nicht beseitigt werden können.

5 Zusammenfassung

Am 26. April 1986 ereignete sich die folgenschwerste Katastrophe in der Geschichte der Kernenergie. Der Unfall von *Tschernobyl* und die Schwere seiner Auswirkungen haben ihre Ursache in der Kombination aus einem Reaktorkonzept mit grundlegenden sicherheitstechnischen Auslegungsmängeln und einem umfassenden Versagen der für die Sicherheit verantwortlichen Organisationen. Nach dem Unfall wurden in kurzer Zeit Ertüchtigungsmaßnahmen durchgeführt, sodass die Wiederholung eines derartigen Unfallablaufs praktisch ausgeschlossen werden kann.

Der Unfall von *Tschernobyl* hatte keine direkten Konsequenzen für die Technik und Sicherheitsauslegung westlicher Leichtwasserreaktoren, da sich die RBMK-Baureihe vom Konzept, der Bauweise und der Betriebsführung westlicher Reaktoren völlig unterscheidet. Ferner wurden keine neuen Erkenntnisse über wissenschaftlich-technische Phänomene erbracht, die nicht schon vorher grundsätzlich bekannt waren.

Angesichts der katastrophalen Unfallfolgen kam es national und international zur Festlegung von konkreten Maßnahmenprogrammen zur Erhöhung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen. Weiterhin entstanden internationale Übereinkünfte (Konventionen), in denen sich die Staaten, die kerntechnische Anlagen betreiben, verpflichten, konkrete Maßnahmen zur Gewährleistung eines globalen Regimes für nukleare Sicherheit und Sicherung umzusetzen. Zur Bewältigung der Unfallfolgen unmittelbar am Standort *Tschernobyl* und der näheren Umgebung wurden umfangrei-

che bi- und multilaterale Unterstützungsprogramme realisiert, auf die in einem weiteren Beitrag mit dem Titel „Entwicklung des nuklearen Sicherheitsregimes und Unterstützungsprogramme für *Tschernobyl*“ eingegangen wird.

Literatur

- [1] Der Unfall und die Sicherheit der RBMK-Anlagen, *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit GRS (mbH)*, GRS-121, Februar 1996
- [2] Neuere Erkenntnisse zum Unfall im Kernkraftwerk *Tschernobyl*, Teil 1: Zusammenfassung und Bewertung der Informationen zur Anlage und zum Unfallablauf, *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH*, GRS-S-40, Februar 1987
- [3] Der Reaktorunfall in *Tschernobyl*, Unfallursachen – Unfallfolgen und ihre Bewältigung – Sicherung und Entsorgung des Kernkraftwerks *Tschernobyl*, *Informationskreis Kerntechnik*, 3. Auflage, Februar 2006
- [4] *World Nuclear Association*: <http://www.world-nuclear.org/info/inf45.html>
- [5] Power Reactor Information System der IAEA: <http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>
- [6] 20 Jahre nach dem Unfall in *Tschernobyl*: Ursachen, Ertüchtigungsmaßnahmen und Status der RBMK-Reaktoren heute, *J.P. Weber*, *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH*, Vortrag, 21./22. November 2006
- [7] GRS-Projekte für *Tschernobyl*, <http://www.grs.de/content/grs-projekte-für-tschernobyl>, 22.04.2010
- [8] *Leningrad Nuclear Power Plant*: http://www.lnpp.ru/new_lnpp/eng-htm/cont/proizv/tehnology/51a.htm ■

Der Reaktorunfall in Tschernobyl und seine Konsequenzen zählen auch heute noch, 25 Jahre nach dem Unfallereignis, zu den wichtigen Themen der internationalen Politik. Die internationale Staatengemeinschaft und sehr oft vorangehend Deutschland nehmen die durch den Unfall ausgelösten Sorgen ernst und geben realistische Antworten auf die durch den Unfall aufgeworfenen Fragen. Ein umfassendes Aktionsprogramm ist initiiert worden.

Durch die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl war besonders deutlich geworden, dass der Schutz vor den Gefahren der friedlichen Nutzung der Kernenergie, wie er in nationalen Atomgesetzen als bestimmendes Ziel definiert ist, nicht allein von der Sicherheit der im eigenen Land betriebenen Kernkraftwerke, sondern ebenso von der Sicherheit der in anderen Staaten betriebenen Kernkraftwerke, abhängt. Eine Stilllegung der Kernkraftwerke im eigenen Land wird daher das Risiko nicht beseitigen, durch Unfälle möglicherweise in Mitleidenschaft gezogen zu werden. Die Entscheidung zur Nutzung von Kernkraft oder dagegen erfolgt weiterhin allein national. Das Risiko kann nur dadurch weiter reduziert werden, dass man weltweit auf ein möglichst hohes Sicherheitsniveau der Kernkraftwerke hinwirkt.

Der Tschernobyl-Unfall war de facto der Auslöser für die Schaffung eines umfassenden internationalen Sicherheitsregimes und zu umfangreichen Maßnahmen zur Stärkung der internationalen Zusammenarbeit in kerntechnischer Sicherheit und im Strahlenschutz. Ein ganzes System von internationalen Übereinkommen ist seitdem entstanden.

Vielfältige multilaterale Unterstützungsprogramme aber auch bi- und trilaterale Projekte mit aktiver deutscher Beteiligung halfen der Ukraine sowohl bei der Überwindung der Folgen des Unfalls von Tschernobyl auf der Industrieseite als auch bei Aufbau und fachlicher Stärkung einer unabhängigen atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde.

Anschrift der Verfasser:

Dr. Gunter Pretzsch

Leiter des Bereichs Strahlen- und Umweltschutz
und

Dr. Hartmuth Teske

Leiter der Abteilung Internationale Programme
im Bereich Projekte und Internationales
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Kurfürstendamm 200
10719 Berlin

Entwicklung des nuklearen Sicherheitsregimes und Unterstützungsprogramme für Tschernobyl

Gunter Pretzsch und Hartmuth Teske, Berlin

Einführung

Der Reaktorunfall in Tschernobyl und seine Konsequenzen zählen auch heute noch zu den wichtigen Themen der internationalen Politik. Im vorliegenden Artikel wird deutlich, dass die internationale Staatengemeinschaft und sehr oft vorangehend Deutschland die durch den Unfall ausgelösten Sorgen ernst nehmen und realistische Antworten auf die durch den Unfall aufgeworfenen Fragen geben. Ein umfassendes Aktionsprogramm ist initiiert worden.

Durch die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl war besonders deutlich geworden, dass der Schutz vor den Gefahren der friedlichen Nutzung der Kernenergie, wie er in nationalen Atomgesetzen als bestimmendes Ziel definiert ist, nicht allein von der Sicherheit der im eigenen Land betriebenen Kernkraftwerke (KKW), sondern ebenso von der Sicherheit der in anderen Staaten betriebenen Kernkraftwerke, abhängt. Eine Stilllegung der Kernkraftwerke im eigenen Land wird daher das Risiko nicht beseitigen, durch Unfälle in Mitleidenschaft gezogen zu werden. Die Entscheidung zur Nutzung von Kernkraft oder dagegen erfolgt weiterhin allein national. Das Risiko kann nur dadurch weiter reduziert werden, dass man weltweit auf ein möglichst hohes Sicherheitsniveau der Kernkraftwerke hinwirkt.

1 Sofortaktionen zur Minderung der Unfallfolgen, Bau des Sarkophags

Die Explosion des Blockes 4 im KKW Tschernobyl am 26. April 1986 und der anschließende Brand im Reaktorkern haben zu einem erheblichen Ausstoß radioaktiven Materials in die Umwelt und zum Auswurf von Brennstoff-Trümmern in die Umgebung des Kraftwerks geführt. Während der ersten 10 Tage nach dem Unfall sind radioaktive Stoffe mit einer Gesamtaktivität von etwa

12×10^{18} Bq (12 Exa-Becquerel) in die Atmosphäre abgegeben worden. Die gasförmigen radioaktiven Spaltprodukte (Edelgase wie Krypton und Xenon) wurden gänzlich und die leicht flüchtigen (wie Jod und Cäsium) wurden in großen Teilen freigesetzt.

Bei der Explosion waren erhebliche Zerstörungen am Reaktorgebäude, dem Entgaserflügel, dem Maschinenhaus sowie an anderen Gebäuden aufgetreten. Es war eine vordringliche Aufgabe, die zerstörten bzw. stark beschädigten Gebäude von der Umwelt zu isolieren, um einen weiteren Austrag hoch radioaktiver Stoffe zu verhindern.

Obwohl für dieses Ausmaß der Zerstörung keine Katastrophen- und Notfallpläne existierten und auch keine Erfahrungen mit derartigen Unfällen vorlagen, mussten sofortige Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenbelastungen des Personals und der Umwelt ergriffen werden, die in der Zeit vom 26. April bis 2. Mai 1986 umgesetzt wurden. Dazu gehörten die Verhinderung einer erneuten Kettenreaktion sowie eines weiteren Aufheizens der Brennelemente, eine ausreichende Abschirmung der Direktstrahlung und die Minimierung weiterer Freisetzungen von radioaktiven Stoffen.

Um die Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus dem beschädigten Reaktor zu begrenzen, versuchte die Feuerwehr zunächst, Kühlwasser aus dem Vorratstank zur Kühlung des intakten Blockes 3 in den zerstörten Reaktorkern in der Größenordnung von 200 bis 300 t pro Stunde zu pumpen. Nach wenigen Stunden beendete man die Einspeisung, da die beabsichtigte Kühlung der Grafitblöcke nicht gelang. Zudem floss kontaminiertes Wasser aus der Anlage heraus.

Deshalb wurden mit über 30 Militärhubschraubern Materialien in den Reaktor geworfen, um auch den zwischenzeitlich entstandenen Grafitbrand zu löschen. Zu diesen Materialien gehörten etwa 40 t Borkarbid, um eine erneute Kettenreaktion zu

verhindern, 800 t Dolomit zur Verringerung der Wärmeentwicklung und zum Erstickten des Grafitbrandes, 2.400 t Blei zur Verringerung der Wärmeentwicklung und zur Abschirmung der Gamma-Strahlung sowie 1.800 t Sand und Lehm als Filtermaterial für die freigesetzten radioaktiven Stoffe zur Abschirmung der Strahlung.

Die von Hubschraubern abgeworfene Abdeckung erhöhte zunächst die Temperatur und somit die Freisetzung von radioaktiven Stoffen. Am 6. Mai konnte ein Stickstoffkühlsystem unterhalb der Reaktorgrube erfolgreich installiert werden, wodurch die Temperatur und die Freisetzung zurückgingen.

Die gesamte Masse an im Block 4 nach dem Unfall verbliebenem bestrahltem Kernbrennstoff aus der Kernladung, die ursprünglich aus 1.659 Kassetten mit insgesamt 190,2 t Brennstoff bestand, wurde auf etwa 96 %, d.h. mehr als 180 t mit einer Gesamtaktivität von etwa 7×10^{17} Bq (Becquerel) in nunmehr verschiedenen Modifikationen abgeschätzt. Dies bestätigten sowohl Messungen der freigesetzten Radioaktivität und der Kontaminationen nach dem Unfall außerhalb wie auch Messungen und Bohrungen innerhalb des Sarkophags.

Um die Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem zerstörten Reaktor so schnell wie möglich weiter zu reduzieren und die Strahlung abzuschirmen und damit das stark beschädigte Gebäude von der Umwelt zu isolieren, wurde in wenigen Monaten eine Gebäudehülle (Sarkophag oder Shelter) um den zerstörten Block 4 unter Verwendung von Teilen des stark beschädigten Reaktorgebäudes und des Maschinenhauses errichtet. Aufgrund der Strahlungssituation und der Dringlichkeit war die erforderliche Zeit für die Bewertung der Standortbedingungen sowie für die bei solchen komplizierten Bauten übliche Projektierung der technischen Maßnahmen nicht vorhanden. Teile der neu errichteten Baustrukturen stützen sich auf Trümmern des zerstörten Blockes ab, über deren Zustand wenig bekannt ist. Viele Konstruktionsteile mussten fernbedient montiert werden, sodass sie nicht immer präzise in den vorgesehenen Positionen abgesetzt wurden. Auch konnten einige wesentliche Bauteile nicht verschraubt oder verschweißt, sondern nur aufgesetzt werden.

Die Konstruktion des Sarkophags beinhaltet monolithische Trennwände aus Stahlbeton von bis zu einigen Metern Dicke und einer Höhe von bis zu 60 m zwischen den Blöcken 3 und 4 im Entgaserflügel, im Maschinenhaus und zum Hilfsanlagegebäude. Auf der nördlichen Seite wurde eine Kaskadenschutzwand aus Beton errichtet, die auch ausgeworfene radioaktive Trümmer enthält.

Die erhalten gebliebene Westwand des Reaktorgebäudes und 2 auf der Osteite erhalten gebliebene Luftschächte aus Stahlbeton wurden als Stützkonstruktion für 2 Stahlträgerpaare verwendet. Auf diese beiden Stahlträgerpaare wurden Stahlrohre von 1,2 m Durchmesser gelegt und darauf eine Dachkonstruktion aus Stahl und profilierten Dachplatten aufgesetzt, wodurch der zerstörte Reaktorsaal nach oben abgeschlossen wurde.

Am 30. November 1986, nach knapp 6 Monaten Bauzeit, stand der Sarkophag. Das zuständige Ministerium für Mittleren Maschinenbau, das sowohl über eigene zivile als auch militärische Einheiten verfügte, hatte den Bau geleitet. Die Errichtung des Sarkophags – als Sofortmaßnahme für eine begrenzte Standzeit von 20 bis 30 Jahren konzipiert – war angesichts des damals bestehenden Zeitdrucks eine große technische und logistische Leistung. Der Sarkophag und die eingeschlossene Ruine des Blocks 4 werden auch als Objekt Einschluss bezeichnet.

Die Errichtung des Sarkophags sowie intensive und umfangreiche Arbeiten zur Dekontamination und der Ausbau der neuen Siedlung Slavutich für das Personal des Kraftwerks außerhalb der 30-km-Sperrzone waren 1986/87 aus ukrainischer Sicht die Voraussetzungen für einen Weiterbetrieb der Blöcke 1, 2 und 3 des KKW Tschernobyl.

2 Nukleares Sicherheitsregime nach Tschernobyl

2.1 Unmittelbare internationale Aktivitäten nach dem Unfall in Tschernobyl

Auf deutschen Vorschlag befasste sich der G7-Gipfel in Tokio (4. bis 5. Mai 1986) mit dem Tschernobyl-Unfall. Des Weiteren regte der damalige Bundeskanzler Helmut Kohl im Mai 1986 eine Erörterung auf internationaler Ebene an. Diese Initiative wurde weltweit unterstützt und führte zur Sondersitzung der IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation; engl. International Atomic Energy Agency – IAEA) vom 24. bis 26. September 1986 zum Thema „Maßnahmen zur Stärkung der internationalen Zusammenarbeit in kerntechnischer Sicherheit und im Strahlenschutz“.

Auf Anregung der Bundesregierung traf sich im Vorfeld dieser Konferenz am 21. Mai 1986 der IAEA-Gouverneursrat und beschloss als längerfristige Maßnahme die Etablierung einer Expertengruppe, die sich mit der Verbesserung der Zusammenarbeit in der kerntechnischen Sicherheit (einschließlich der Sicherheitsstandards) und der Ausarbeitung eines erweiterten kerntechnischen Sicherheitsprogramms der IAEA zu befassen hat. Bereits im August

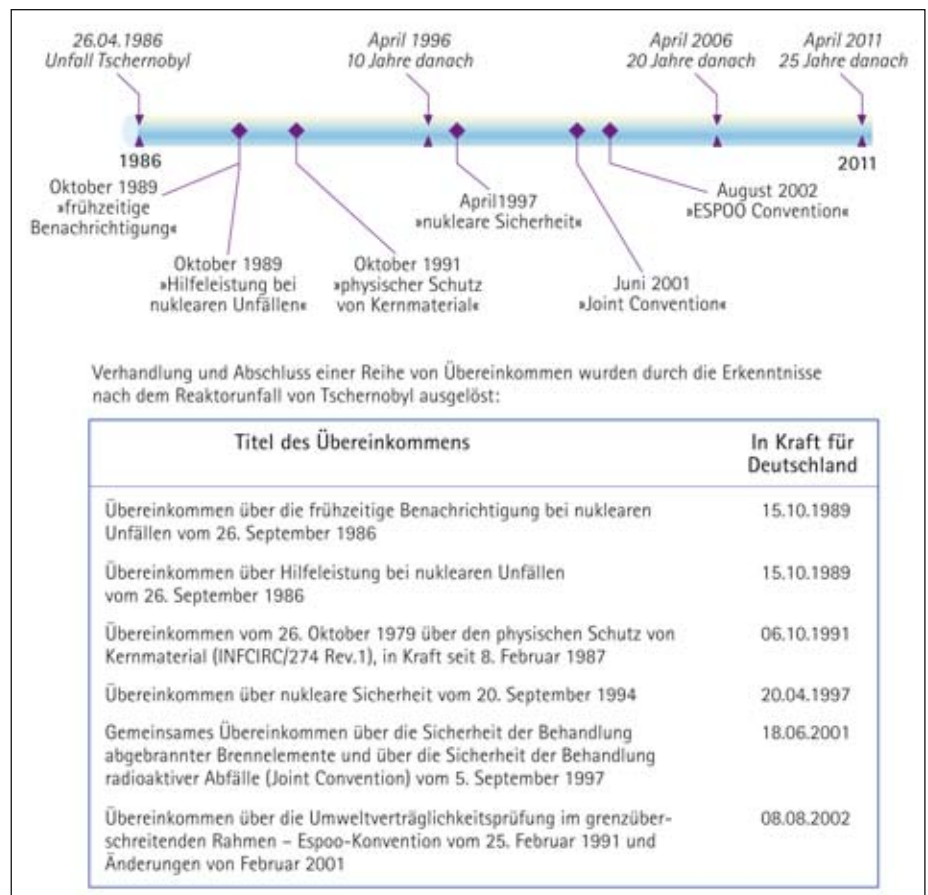


Abb. 1: Internationale Übereinkommen als Element des globalen Sicherheits- und Sicherungsregimes

1986 wurden auf Expertentreffen 2 Übereinkommen über Unfallinformation und gegenseitige Hilfeleistung als auch ein Bericht zur technischen Analyse des Unfalls von *Tschernobyl* erarbeitet.

Am 26. September 1986 wurden von der IAEA-Generalkonferenz die Übereinkommen

- über die frühzeitige Benachrichtigung bei kerntechnischen Unfällen und
- über die Hilfeleistung bei kerntechnischen Unfällen oder radiologischen Notfällen

verabschiedet und am selben Tage bereits von 51 Staaten – darunter auch von Deutschland – unterzeichnet (in Kraft für Deutschland: 15. Oktober 1989, vgl. *Abbildung 1*).

Sowohl auf der Sondersitzung als auch durch das Beratergremium der IAEA (*International Nuclear Safety Advisory Group – INSAG*) wurden weitergehende Vorschläge und Empfehlungen gemacht, die Auftakt für eine längerfristige verstärkte internationale Zusammenarbeit in der nuklearen Sicherheit und im Strahlenschutz (erweitertes nukleares Sicherheitsprogramm der IAEA) waren. Dies betrifft:

- die Schaffung einer umfassenden Sicherheitskultur und die Errichtung eines internationalen „Sicherheitsregimes“
- die Aufstellung grundlegender Sicherheitsprinzipien für bestehende und neue Reaktoren
- die Überprüfung der Sicherheitsempfehlungen der IAEA Safety Standards,
- den Schutz kerntechnischer Anlagen gegen Terrorismus
- die Verbesserung des internationalen Nuklearhaftungsregimes
- den Ausbau des Operational Safety Review Team OSART-Programms (Missionen zur Überprüfung der Betriebssicherheit)

Auf internationaler Ebene begann mit der Wiener Konferenz der IAEA eine neue Phase der Zusammenarbeit in der kerntechnischen Sicherheit und im Strahlenschutz. Das Ziel lag für Deutschland darin, vor allem höchste Sicherheitsstandards weltweit festzuschreiben, der Sicherheit entsprechend dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik höchste Priorität einzuräumen, die geringe Wahrscheinlichkeit von Unfällen in KKW weiter herabzusetzen und ein weltweit wirksames Nuklearhaftungssystem zu schaffen [BBR 86].

2.2 Ausgestaltung eines internationalen Sicherheits- und Sicherungsregimes

Im September 1991 fand eine IAEA-Konferenz zur Schaffung einer globalen Sicherheitsstrategie für die friedliche Nutzung der Kernenergie statt, auf der umfassende Sicherheitsüberprüfungen älterer KKW

und Stilllegung bei ungenügendem Ergebnis empfohlen wurde. Diese Empfehlungen mündeten im Juni 1994 in die Verabschiedung des Übereinkommens über nukleare Sicherheit (Convention on Nuclear Safety – CNS). Ziel des Übereinkommens ist die weltweite Erhöhung der Sicherheit von Kernkraftwerken. Die Unterzeichnerstaaten gehen u.a. folgende Verpflichtungen ein:

- Erreichen und Beibehalten eines hohen Standes der nuklearen Sicherheit. KKW, die dieses Ziel nicht erreichen, sind möglichst bald außer Betrieb zu nehmen
- Gewährleistung einer effektiven gesetzlichen und unabhängigen behördlichen Kontrolle der nuklearen Sicherheit
- Teilnahme an einem offenen internationalen Austausch zur Gewährleistung hoher nuklearer Sicherheit, u.a. durch Teilnahme an den alle 3 Jahre stattfindenden Überprüfungskonferenzen

Der Mechanismus der Überprüfungskonferenzen (derzeit wird die 5. Konferenz für April 2011 vorbereitet) und die intensivere internationale Zusammenarbeit in verschiedenster Form, wie z.B. freiwillige Überprüfungs- und Bewertungs-Services und Missionen, erlauben eine neue Art der möglichen Einflussnahme auf die Verbesserung der nuklearen Sicherheit in den IAEA-Mitgliedstaaten. Mehr Transparenz und Nutzung der Instrumente der Vertrauensbildung anstatt eines strikten Kontroll- und Sanktionssystems stehen hier im Vordergrund.

Im Jahr 1997 wurde weiterhin ein Übereinkommen zur nuklearen Entsorgung verabschiedet: das „Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit und Behandlung radioaktiver Abfälle“. Auch dieses Übereinkommen nutzt den Mechanismus von Überprüfungskonferenzen.

Die Palette internationaler Übereinkommen wird vervollständigt durch Konventionen zur Haftung bei nuklearen Unfällen und zur nuklearen Sicherung.

3 Multilaterale Unterstützungsprogramme für Tschernobyl

3.1 Multilaterales Aktionsprogramm Nukleare Sicherheit Osteuropa

Anfang der 90er-Jahre wurde immer deutlicher, dass sehr große finanzielle und personelle Ressourcen erforderlich sind, um notwendige Verbesserungen der nuklearen Sicherheit in Osteuropa zu erreichen. Auf Initiative der Bundesregierung wurde die Sicherheit der KKW in Osteuropa ein wichtiges Thema des G7-Gipfels 1992 in

München (G7: Gruppe der Sieben: Deutschland, Frankreich, Italien, Japan, Kanada, Vereinigtes Königreich, Vereinigte Staaten und *Europäische Union*. Vgl. *Abbildung 2*). Zuvor wurde die G7-Arbeitsgruppe für Nukleare Sicherheit gebildet und damit beauftragt, den aktuellen Stand der nuklearen Sicherheit in Osteuropa zu bewerten. Auf dieser Basis wurde auf dem Gipfel ein „Multilaterales Aktionsprogramm zur nuklearen Sicherheit in den Staaten Mitteleuropas und in der Gemeinschaft der unabhängigen Staaten“ ins Leben gerufen.

Dieses Aktionsprogramm war über 2 Jahrzehnte die konzeptionelle Basis von weltweit unternommenen Anstrengungen zur Verbesserung der kerntechnischen Sicherheit in Osteuropa. Damit wurde den osteuropäischen Staaten Unterstützung angeboten, um aktuelle Sicherheitsdefizite zu überwinden, unsichere Kernkraftwerke so bald wie möglich abzuschalten und eine grundlegende Erneuerung der Energieversorgung durchzuführen. Dabei sollten die für die Sicherheit verantwortlichen nationalen Organisationen in der Wahrnehmung dieser Aufgaben gestärkt werden. Die G7 erwarteten die volle Mitarbeit der osteuropäischen Staaten. Sie riefen andere westliche Staaten dazu auf, ebenfalls einen Beitrag zum Aktionsprogramm zu leisten.

Das Aktionsprogramm unterscheidet zwischen kurzfristig erforderlichen sowie mittel- und langfristigen Zielen. Die kurzfristig erforderlichen Ziele betreffen Verbesserungen der Sicherheit der Betriebsführung, kurzfristige technische Verbesserungen in den Anlagen auf der Grundlage von Sicherheitsbewertungen und die Verbesserung der atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtspraxis. Mittel- und langfristige Ziele betreffen Untersuchungen zu Ersatzenergien, um weniger sichere Anlagen außer Betrieb nehmen zu können und die Nachrüstung an sicherheitstechnisch moderneren Anlagen.

Die westlichen Staaten stimmten zu diesem Zeitpunkt darin überein, dass die RBMK-Reaktoren (russ.: Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny; Kanalreaktor großer Leistung; techn.: graphitmoderierter Siedewasser-Druckröhrenreaktor russischer Bauart; *Tschernobyl*-Typ) und die Druckwasserreaktoren WWER-440/W-230 (Wasser-Wasser-Energie-Reaktor (Druckwasserreaktor russischer Bauart)) nicht länger als unbedingt erforderlich betrieben werden sollten. Der Bau neuer RBMK-Reaktoren sollte eingestellt werden. Die westlichen Länder sahen sich allerdings nicht in der Lage, die Forderung zur Stilllegung älterer Anlagen, die gravierende Sicherheitsmängel aufweisen, unmittelbar durchzusetzen. Stattdessen sollte in Verhandlungen eine Verständigung mit den betreffenden Staaten darüber erreicht werden, die restliche

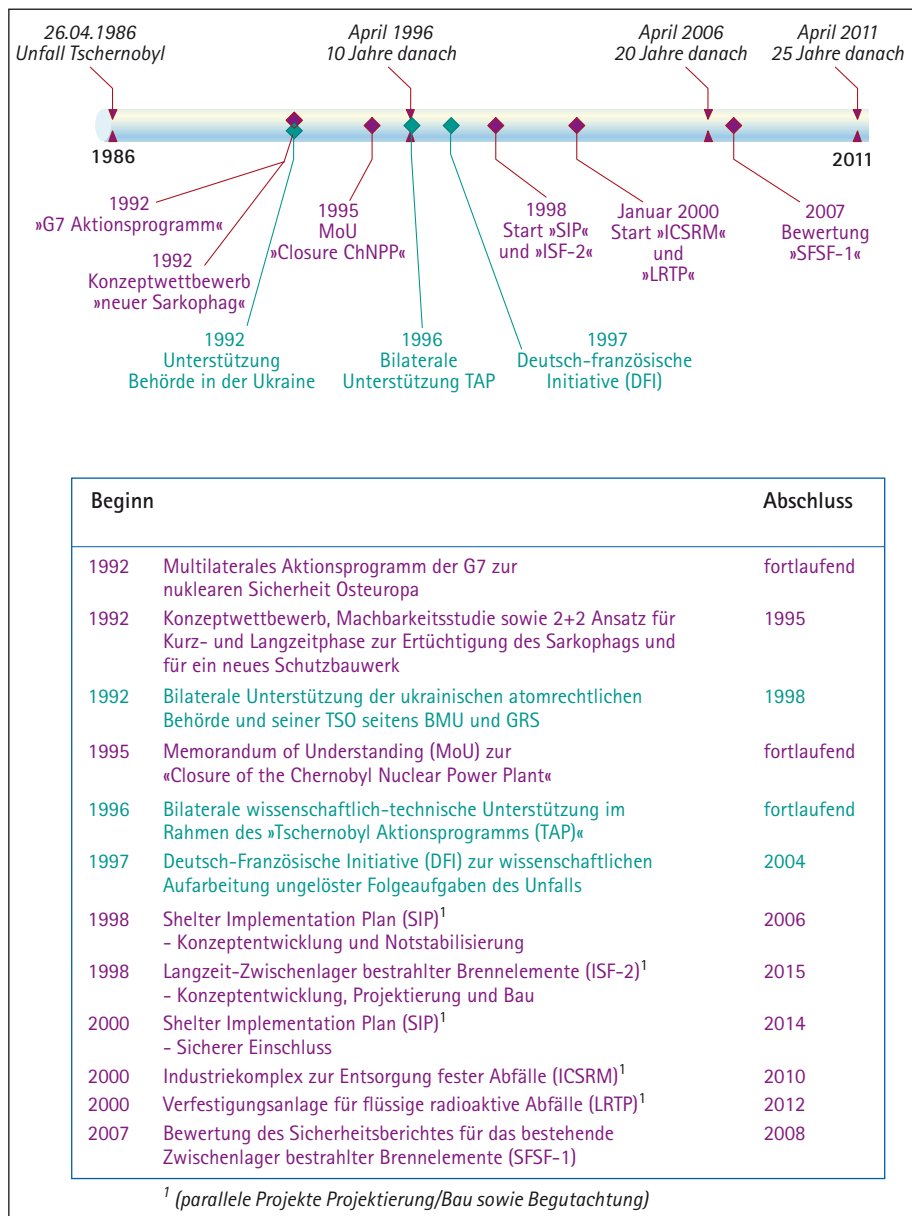


Abb. 2: Bi- und multilaterale Unterstützung für Tschernobyl

Betriebszeit dieser Kraftwerke auf der Grundlage von Sicherheitsbeurteilungen und Einschätzungen von Energiebedarf und -angebot zu begrenzen.

Auch nach München waren Fragen der nuklearen Sicherheit in Osteuropa ein wichtiges Thema der jährlichen G7-Wirtschaftsgipfel und der von den westlichen Industriestaaten geleisteten Unterstützung.

3.2 Konzepte zur Gewährleistung der Sicherheit des Unfall-Blockes

Obwohl der Bauzustand des Sarkophags in der Folgezeit z.B. durch Abdichten von Öffnungen, Spalten und Schlitzen gegen das Eindringen von Regenwasser und die Ausrüstung mit Messtechnik zur Überprüfung der Strahlungssituation sowie der Standsicherheit weiter vervollkommen wurde, war von Anfang an klar, dass aufgrund der begrenzten Standzeit und der Unsicherheiten der Baustabilität des Sarkophags ein

langfristiges tragendes Konzept für den sicheren Einschluss des Unfall-Blockes entwickelt werden musste.

Bei den Planungen für die langfristige Zukunft des Sarkophags standen 3 Varianten zur Debatte: Verfüllung mit Beton, Stabilisierung der bestehenden Konstruktion sowie Errichtung eines neuen Schutzbauwerks. 1992 schrieb die Ukraine auf internationaler Ebene einen mit 10.000 US\$ dotierten Konzeptwettbewerb zur Überführung des Blocks 4 in einen sichereren Zustand aus.

Kein Teilnehmer am Wettbewerb erfüllte die gestellten Anforderungen. Der beste Lösungsvorschlag stammte von der französischen Firma *Campenon Bernard SGE*, die ein neues Schutzbauwerk favorisierte. Die Europäische Kommission vergab daraufhin zur Unterstützung der ukrainischen Regierung und ohne weitere Ausschreibung 1994 eine Machbarkeitsstudie zur Ertüchtigung der Konstruktion und zur Errichtung eines

neuen Schutzbauwerkes an das Konsortium „Alliance“ unter Leitung dieser Firma. Weitere Mitglieder dieses Konsortiums waren *Bouygues* (Frankreich), *SGN* (Frankreich), *Taywood Engineering* (Großbritannien), *Walter Bau* (Deutschland) sowie ukrainische und russische Partner.

Im Ergebnis schlug *Alliance* vor, den zerstörten Block 4 sowie den unmittelbar angrenzenden und damals noch laufenden Block 3 mit einem neuen Bauwerk (*Shelter 2*) einzuhüllen. Die Kosten dafür wurden auf 3 bis 4 Mrd. US\$ geschätzt.

Von der ukrainischen Regierung wurde das *Alliance*-Konzept u.a. mit der Begründung abgelehnt, dass dafür der Block 3 stillgelegt werden müsste. Die Ausschreibungsbedingungen sahen jedoch den Normalbetrieb während der Stabilisierung und der Errichtung des *Shelters 2* vor. Die Ukraine verfolgte daher das Projekt nicht weiter. Neben dieser Studie gab es weitere unabhängige Vorschläge, wie z.B. den des deutschen Bauunternehmens *Hochtief*, die ebenfalls keine Berücksichtigung fanden.

Stattdessen wurde von der *Europäischen Kommission* gemeinsam mit der Ukraine nach einer Beratung im September 1995 in Brüssel ein anderer Ansatz gewählt, der jedoch die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie von *Alliance* berücksichtigte. Die in Brüssel getroffene Vereinbarung enthielt 4 Aktionen (2+2 Ansatz für Kurz- und Langzeitphase) im Rahmen von TACIS (Technical Assistance to the Community of Independent States):

1. Definition von Sicherheitszielen und Konstruktionskriterien für die Stabilisierung des existierenden Sarkophags
2. Erarbeitung der Aufgabenstellung für die Stabilisierung des existierenden Sarkophags
3. Definition von Sicherheitszielen und Konstruktionskriterien für ein neues Einschlussbauwerk und
4. Erarbeitung der Aufgabenstellung für den Bau eines neuen Einschlussbauwerks

In einer Studie, an der auch die *GRS* mitwirkte, wurden entsprechend den Aktionen 1 und 3 die Anforderungen für die Kurzzeitsicherheit für die nächsten ca. 15 Jahre sowie für die Langzeitsicherheit im Zeitraum der nächsten ca. 100 Jahre definiert. In einer 2. Studie entsprechend den Aktionen 2 und 4 erfolgte parallel dazu die Konzeption praktischer Maßnahmen, die diese Anforderungen erfüllen sollten.

Die Ergebnisse dieser Studie unterscheiden sich grundsätzlich von den beiden o.g. Berichten von *Alliance* und *Hochtief*, in dem sie zunächst alle bis dahin existierenden Konzepte zusammenstellten, durch neue ergänzten und auf einheitlicher Basis eine vergleichende Bewertung durchführten. Daraus resultierte der „Recommended

Course of Action“, der zukünftig eine flexible Vorgehensweise ermöglichen sollte.

Die Studien waren Grundlage der Diskussionen der *G7-Arbeitsgruppe* für nukleare Sicherheit mit der ukrainischen Regierung über die weitere Vorgehensweise. Nachfolgend wurde von der EU ein neuer Auftrag vergeben, auf der Basis des Recommended Course of Action den so genannten „Shelter Implementation Plan“ zu erarbeiten. Damit zeichnete sich ein deutlicher Fortschritt hinsichtlich der künftigen Vorgehensweise ab.

3.3 Shelter Implementation Plan und Chernobyl Shelter Fund

Auf dem G7-Gipfel im Juli 1994 in Neapel wurde der Ukraine ein Aktionsplan zur Unterstützung der Stilllegung des gesamten KKW *Tschernobyl* angeboten. Dieses Angebot führte zur Zusage von Präsident *Kutschma*, *Tschernobyl* im Jahr 2000 zu schließen und zu einem Unterstützungsprogramm, das im Dezember 1995 zwischen den G7, der *Europäischen Kommission* und der Ukraine in einem „Memorandum of Understanding on the Closure of the *Chernobyl* Nuclear Power Plant“ (MoU) vereinbart wurde.

Die Unterstützung umfasste Maßnahmen zur Reform des Energiesektors, zur Schaffung von Ersatzkapazitäten durch kreditfinanzierte Energieprojekte, zur Verbesserung der nuklearen Sicherheit für den befristeten Weiterbetrieb von Block 3 sowie zur Bewältigung der sozialen Folgen, die mit der Schließung des Kernkraftwerks verbunden waren. Zu den Aufgaben am Standort des KKW *Tschernobyl* gehörten auch die Vorbereitung und Durchführung der Stilllegung der Blöcke 1 bis 3 einschließlich der Entsorgung radioaktiver Abfälle und des abgebrannten Kernbrennstoffs und die Überführung des Objekts in ein langfristig stabiles und ökologisch sicheres System, d.h. weiterführende Vorsorge gegen radiologische Gefahren für Umwelt und Bevölkerung zu treffen und die Beendigung der behördlichen Strahlenschutzüberwachung zu erzielen (siehe auch [GRS 96]).

Auf dem G7-Gipfel in Denver 1997 erfolgte eine Finanzierungszusage für die Ukraine von zunächst 300 Mio. US\$ für die Sanierung des Sarkophags. Auf der dann im November 1997 einberufenen ersten Geberkonferenz in New York wurden auch andere Staaten aufgerufen, sich an der Finanzierung zu beteiligen.

Die zur Verfügung gestellten Mittel der Geberländer werden seit 1997 in dem dafür geschaffenen „*Chernobyl Shelter Fund*“ (CSF) bei der *Europäischen Bank für Wiederaufbau und Entwicklung* (*European Bank for Reconstruction and Development – EBRD*) verwaltet. Die Rahmenvereinbarung zwischen der Ukraine und der *EBRD* zu den Aktivitäten des CSF in der Ukraine wurde

im November 1997 unterzeichnet und durch das Ukrainische Parlament im Februar 1998 ratifiziert. Grundlage für den CSF waren die kurz- und langfristigen Maßnahmen zur Sanierung des Sarkophags (Aktionen 2 und 4 des o.g. Ansatzes). Der Maßnahmenplan wurde „Shelter Implementation Plan“ (SIP) genannt.

Die ursprünglich diskutierte Einbeziehung der Stilllegung des KKW *Tschernobyl* und der Entsorgung radioaktiver Abfälle in den SIP wurde aus Kostengründen fallen gelassen. Diese Aufgaben wurden in die Verantwortung der Ukraine übergeben.

Der SIP beinhaltet 5 Hauptziele:

1. Reduzierung der Wahrscheinlichkeit eines Einsturzes des Sarkophags (geotechnische und seismische Untersuchungen, Stabilisierung, Abschirmung, Überwachung)
2. Reduzierung der radiologischen Auswirkungen (Staubbehandlung, Notfallschutzmaßnahmen)
3. Verbesserung der nuklearen Sicherheit (Charakterisierung der brennstoffhaltigen Materialien, Wasserbehandlung, Verhinderung der Kritikalität)
4. Verbesserung der Sicherheit des Personals und des Umweltschutzes (Strahlenschutz, Arbeitsschutz, Brandschutz, Überwachungssysteme, Informationssystem) und
5. Entwicklung einer langfristigen Strategie für die Umwandlung des Objekt-Einschlusses in ein langfristig stabiles und ökologisch sicheres System (Strategie und Technologie zur Entfernung der brennstoffhaltigen Materialien, neuer Einschluss, teilweiser Rückbau des Sarkophags)

Die genannten Ziele des SIP zur Sanierung des Sarkophags sind pragmatisch und auf einen überschaubaren Zeithorizont ausgelegt. Der Sarkophag soll mittelfristig sicher gemacht werden, um Zeit für langfristige Lösungen zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle zu gewinnen. Es wurden konkrete Aufgabenpakete definiert, entsprechende Kostenschätzungen durchgeführt und ein konzeptioneller Ablaufplan mit Meilensteinen erstellt. Parallel dazu wurde auch für das Genehmigungsverfahren ein Ablaufplan beruhend auf Meilensteinen entwickelt. Aus den Aufgabenpaketen wurden einzelne Projekte definiert, die bei entsprechender Finanzierung frühzeitig beginnen können.

Der SIP gliedert sich in 22 Aufgaben mit insgesamt 297 Arbeitsschritten. Die Hauptziele des SIP sollten bei einer geplanten Projektdauer von 8 bis 9 Jahren mit Gesamtkosten in Höhe von 768 Mio. US\$ nach Realisierung der folgenden 2 Projektabschnitte erreicht werden:

1. Projektabschnitt: Konzeptentwicklung und Notstabilisierung
2. Projektabschnitt: Sicherer Einschluss

Der erste Projektabschnitt definierte besonders vordringliche Aufgaben (Early Bidable Projects), die in den Jahren 1998 bis 2000 umgesetzt werden sollten. Dieser Abschnitt beinhaltete auch die Integration von geplanten, laufenden oder abgeschlossenen bilateralen und ukrainischen Projekten und die Optimierung des Genehmigungsprozesses. Folgende Ergebnisse wurden beim ersten Projektabschnitt bis Anfang 2001 erreicht:

- Abschluss erster Stabilisierungsmaßnahmen am Kamin und an den Dachträgern B1/B2
- Festlegung weiterer notwendiger Stabilisierungsmaßnahmen
- Konzeptentwicklung für einen neuen Einschluss mit einer Standzeit von 100 Jahren
- Entwicklung erster Konzepte zur späteren Entfernung der brennstoffhaltigen Materialien
- Entwicklung eines ersten Konzeptes zum Management von Wasser im Sarkophag und
- Entwicklung eines neuen Konzeptes zur Staubunterdrückung

Der in 2000 begonnene 2. Projektabschnitt des SIP umfasst folgende Aktivitäten:

- Planung und Umsetzung von Stabilisierungsmaßnahmen
- Ausschreibung, Installation und Betrieb von Überwachungssystemen
- Entwicklung von Techniken zum Umgang mit brennstoffhaltigen Massen,
- Entwicklung und Konstruktion eines neuen Sarkophags und
- Rückbau oder Stabilisierung instabiler Teile des jetzigen Sarkophags

Bis 2006 erfolgten weitere Stabilisierungsmaßnahmen am Sarkophag, z.B. an der Westwand (siehe *Abbildung 3*). Den Abschluss des 2. Projektabschnitts des SIP stellt die Errichtung des neuen Einschlusses New Safe Confinement (NSC) dar. Das NSC ist eine wichtige Voraussetzung für die Realisierung aller weiteren Arbeiten zur Standortsanierung. Die Beseitigung der radioaktiven Stoffe aus dem alten Sarkophag und dessen Rückbau sind nicht Bestandteil des SIP.

Das NSC ist eine bogenförmige Metallkonstruktion, die auf dem westlichen Baufeld montiert und dann über den Sarkophag und das Maschinenhaus des KKW geschoben wird. Das NSC soll die eingeschlossenen Strukturen und radioaktiven Materialien für mindestens 100 Jahre von der Umwelt sicher isolieren und deren Demontage bzw. Bergung mit dafür vorgesehenen Ausrüstungen und Vorrichtungen ermöglichen.

Die Ausschreibung für die detaillierte Konstruktion des NSC wurde im März 2004 veröffentlicht. Von den 3 im November 2004 eingegangenen Angeboten wurden nach Prüfung das französisch geführte Konsortium



Abb. 3: Stabilisierungsmaßnahmen an der Westwand des Sarkophags

Novarka und das amerikanisch geführte Konsortium „CH2M Hill“ zur Abgabe kommerzieller Angebote aufgefordert, deren Prüfung und Bewertung bis Februar 2006 dauerte.

Im Juli 2007 ermächtigten die Geberländer des CSF die EBRD zur ersten Mittelzuweisung für die Projektrealisierung, im August 2007 wurde der Vertrag mit Novarka unterzeichnet. Der derzeitige Zeitplan sieht die Fertigstellung des NSC im Jahr 2013 mit den Phasen I Entwurf (Design) und II Errichtung und Inbetriebnahme vor. Die Errichtung des NSC enthält 6 Genehmigungspakete LP-1 bis LP-6:

- LP-1: Baustellenvorbereitung mit Konstruktionsplattform und angrenzenden Bereichen
- LP-2: Hilfseinrichtungen vor Ort
- LP-3: Fundamente für die Konstruktions- und Transportzonen
- LP-4: Demontage des gemeinsamen Abluftkamins der Blöcke 3 und 4
- LP-5: Auslegungsunterlagen des NSC (Bogenkonstruktion, Hauptkransystem, Fundamente im Service-Bereich, vorläufige Sicherheitsdokumentation)
- LP-6: Komplette Auslegung des NSC (Technologisches Gebäude, Hilfseinrichtungen und Hilfssysteme, Errichtungsplan und überarbeitete Sicherheitsdokumentation)

Zum Stand der Erfüllung des SIP wurden verschiedene Bewertungen erstellt. Die EBRD geht von einer vollständigen Erfüllung aller Aufgaben nach der Errichtung des NSC aus (siehe Abbildung 4). Andere Bewertungen sehen noch die Notwendigkeit der Finanzierung und Realisierung einiger weiterer Vorhaben.

Zur Unterstützung der ukrainischen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde SNRIU wurde für die gutachterliche Begleitung



Abb. 4: Schematische Darstellung des New Safe Confinement

der SIP-Industrieaktivitäten ein Konsultant (Licensing Consultant – LC) etabliert. Der SIP-LC ist ein Konsortium aus US-amerikanischen, französischen und deutschen Expertenorganisationen.

Die Umsetzung des SIP war im Jahre 1997 zunächst mit Kosten von 758 Mio. US\$ (zuzüglich 10 Mio. US\$ zur Unterstützung des Genehmigungsverfahrens) und einer Realisierungszeit von 7 Jahren (1998 bis 2005) prognostiziert worden. Auf der ersten Geberkonferenz wurden von 25 Ländern rund 400 Mio. US\$ zugesagt, davon 50 Mio. US\$ seitens der Ukraine in Form von Sachleistungen. Auf dieser Basis begann die Realisierung des SIP mit der Einrichtung einer Projektmanagementeinheit (PME) im April 1998. Im Juli 2000 organisierte Deutschland eine zweite Geberkonferenz für den CSF in Berlin, auf der weitere 335 Mio. Euro zugesagt wurden. In 2003 legte die PME einen geänderten Zeitplan und eine Kostenschätzung über 1,1 Mrd. US\$ vor. Im Mai 2005 wurden nochmals 182 Mio. € zugesagt, davon entfallen 49 Mio. € auf die EU, 22 Mio. € auf die Ukraine und erstmalig 10 Mio. US\$ auf Russland.

Derzeit sind im CSF genügend Mittel für den Abschluss der Phase I vorhanden. Die Mittel reichen jedoch nicht aus, um die Gesamtkosten des NSC zu decken.

Die G8-Staaten und die EU haben als wichtigste Geber des CSF ihr Engagement für die vollständige Durchführung des SIP in den zurückliegenden Jahren immer wieder, zuletzt auf dem G8-Gipfel von Muskoka im Juli 2010, bekräftigt: „Angesichts des 25. Jahrestages des Reaktorunglücks von Tschernobyl, dessen wir im Jahre 2011 gedenken, werden wir alle erforderlichen Schritte unternehmen, um die Projekte zur Gewährleistung der Sicherheit und der Stabilität am Standort Tschernobyl zu Ende zu führen.“

Im Juni 2010 legte das Konsortium Novarka eine aktualisierte Kostenabschätzung für die Realisierung des NSC vor. Damit verdoppelten sich in etwa die Kosten für das NSC. Unmittelbar vor dem 25. Jahrestag des Unglücks ist deshalb eine weitere Geberkonferenz in Kiew im April 2011 geplant, die Zusagen für den fehlenden Betrag von 600 Mio. € erbringen soll. Deutschland ist mit bisher 60 Mio. € direkt und über den Beitrag der EU größter Geber am CSF.

Derzeit ist von einer Fertigstellung des NSC erst nach 2013 auszugehen. Offen ist die Finanzierung weiterer notwendiger Aktivitäten, wie der Demontage von instabilen Dachstrukturen oder der Entsorgung der kernbrennstoffhaltigen radioaktiven Materialien aus dem Sarkophag.

3.4 Entsorgung flüssiger und fester radioaktiver Betriebsabfälle

3.4.1 Entsorgungskonzept

Die Entsorgung sämtlicher fester und flüssiger radioaktiver Betriebsabfälle des KKW Tschernobyl sollte entsprechend dem damals geltenden Konzept erst bei der Stilllegung und dem Rückbau geplant und durchgeführt werden. Seit Beginn des Reaktorbetriebs im Mai 1978 wurden die Abfälle, grob sortiert in schwach-, mittel- und hochaktive Abfälle, am Standort zwischengelagert. Feste Abfälle wurden in Betonbunkern, flüssige in 1.000 m³ und 5.000 m³ Tanks gesammelt.

Die existierenden sowie während der Stilllegung der Blöcke 1, 2 und 3 anfallenden radioaktiven Betriebsabfälle sollen konditioniert und endgelagert werden. Hinzu kommen die Stilllegungsabfälle des Unfallreaktors Block 4. Die Konditionierung der festen radioaktiven Abfälle beinhaltet hauptsächlich die Volumenreduzierung durch Fragmentierung und Kompaktierung mittels hydraulischer Hochdruckpressen

oder die Verbrennung. Die flüssigen radioaktiven Abfälle, überwiegend Verdampferkonzentrate und Schlämme, Filtermaterial und Ionentauscherharze, werden durch Zementierung verfestigt. Die konditionierten Abfälle werden in 200-l-Stahlfässer verfüllt und diese in Beton-Transportbehältern der Endlagerung zugeführt.

Die Europäische Kommission unterstützt das KKW Tschernobyl im Rahmen ihres TACIS-Programms bei der Errichtung einer Konditionierungsanlage für feste radioaktive Abfälle und eines Endlagers. In gleicher Weise wird die zuständige Behörde bei ihren Aktivitäten zur Genehmigung der Anlagen mit TACIS-Projekten gezielt gefördert.

3.4.2 Industriekomplex zur Abfallentsorgung

Das Projekt ICSRM (Industrial Complex for Solid Radwaste Management) wird industrieseitig im Rahmen des TACIS-Programms der Europäischen Kommission durchgeführt. Damit soll die Entsorgung radioaktiver Abfälle aus dem KKW Tschernobyl umgesetzt werden.

Ursprünglich war das ICSRM in 3 Lose unterteilt, im Laufe des Projektfortschritts waren einige Anpassungen erforderlich. Das Los 1 ist eine Anlage zur Rückholung der festen Abfälle aus den Zwischenlagern (Betonbunker) am Standort des KKW (siehe Abbildung 5). Die Abfälle werden in Container verpackt und durch eine Galerie in die Konditionierungsanlage, das Los 2, transportiert. In der Konditionierungsanlage Los 2 werden die Abfälle nach Beschaffenheit und Aktivität sortiert, ggf. fragmentiert und kompaktiert. Brennbar feste sowie flüssige Abfälle werden in der Verbrennungsanlage verbrannt. Der volumenredu-

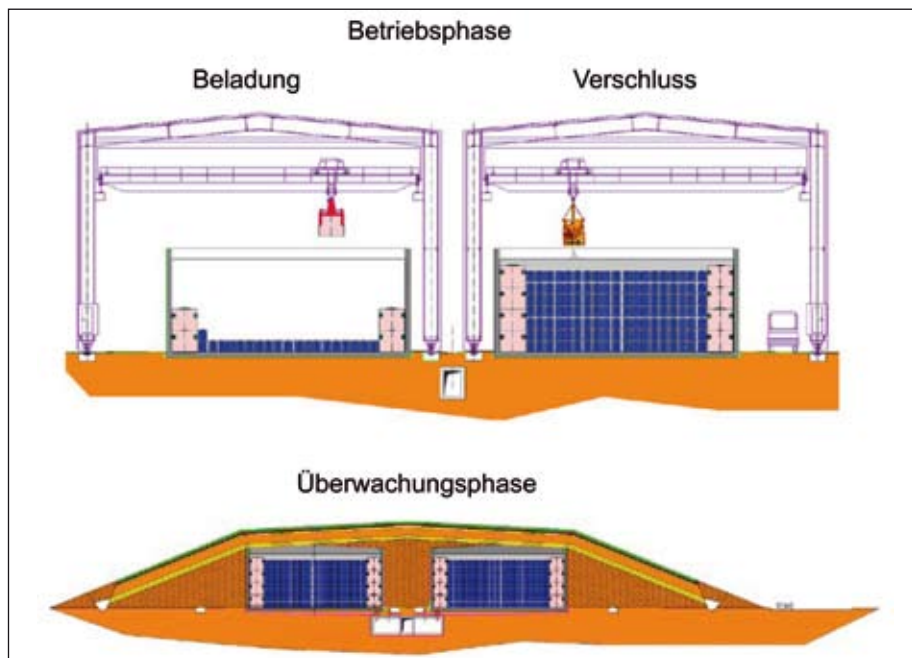


Abb. 6: Oberflächennahes Endlager ENSDF für feste schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort VEKTOR

zierte Abfall wird in 200-l-Stahlfässer verfüllt und mit Beton-Sandmörtel verfestigt. Die Aktivität der gesamten festen Abfälle wird auf 100 TBq (2.700 Ci) geschätzt.

Betreiber der Anlagen zur Rückholung und Konditionierung ist das KKW Tschernobyl. Beide Anlagen wurden von der NUKEM Technologies GmbH errichtet und befinden sich zurzeit in der Inbetriebnahme.

Das Los 3, ein oberflächennahes Endlager (Engineered Near-Surface Disposal Facility – ENSDF) befindet sich innerhalb der 30-km-Schutzzone am Standort VEKTOR. Dies ist ein Industriekomplex für Abfallentsorgung und Endlagerung in der Nähe des

Ortes Buryakiva, ca. 18 km südwestlich von Tschernobyl entfernt (siehe Abbildung 6). Betreiber ist das staatliche Unternehmen Technocentre. Die Bauart des ENSDF gleicht etwa dem spanischen Endlager El Cabril. Es ist für schwach- und mittelaktive konditionierte Abfälle aus dem KKW Tschernobyl ausgelegt. Die hochaktiven langlebigen festen Abfälle müssen zurzeit am Standort des KKW Tschernobyl zwischengelagert werden.

Die Gesamtkapazität des Endlagers an Abfallgebinden ist durch deren Aktivität auf 50.210 m³ begrenzt. Als Betriebszeit sind 30 Jahre für die Einlagerung sowie eine anschließende behördliche Überwachung von 300 Jahren geplant. Das Endlager wurde, wie die Lose 1 und 2, von NUKEM Technologies GmbH gemeinsam mit ukrainischen Unternehmen errichtet. Die Bauarbeiten begannen im Juli 2004 und wurden aufgrund technischer, organisatorischer aber auch finanzieller Probleme 2 Jahre nach ursprünglich vorgesehenem Termin Ende 2009 fertiggestellt.

Die Europäische Kommission hat die zuständige ukrainische Behörde SNRIU bei der gutachterlichen Begleitung der Genehmigung des ICSRM von Beginn an unterstützt. Die Gutachterorganisationen GRS (Deutschland), IRSN (Frankreich), BELV (Belgien) und ISPRA (Italien) sowie das ukrainische SSTC haben im Rahmen von TACIS-Projekten mit einer gesamten Laufzeit von über 10 Jahren von 1999 bis 2010 die sicherheitstechnischen Bewertungen von Genehmigungsunterlagen des ICSRM, Los 1 bis 3, wie z.B. Technische Spezifikationen, Sicherheitsberichte u.a., durchgeführt. Auf der Basis der durchgeführten Bewertungen hat die Aufsichtsbehörde Teilgenehmigungen für



Abb. 5: Anlage zur Rückholung der festen Abfälle ICSRM über dem Betonbunker

die Auslegung, Errichtung und Inbetriebnahme der Anlagen erteilt.

Für die errichteten ICSR-Anlagen zur Rückholung und Konditionierung der festen Abfälle, Lose 1 und 2, wird die Aufsichtsbehörde die Betriebsgenehmigung voraussichtlich in 2011 mit Auflagen erteilen. Die Gutachterorganisationen GRS und ISP-RA haben die Genehmigungsunterlagen von deren Auslegung bis zur Errichtung sicherheitstechnisch bewertet. Aufgedeckte Mängel wurden vom Antragsteller weitgehend beseitigt, die Erfüllung von Annahmekriterien für die Endlagerung von Abfallgebinden muss noch nachgewiesen werden.

Gemessen an westlichen Sicherheitsstandards wurden im Los 3, Endlager ENSDF, erhebliche Defizite in der vorgelegten Dokumentation sowie der baulichen Konstruktion der Anlage festgestellt. Die zuständige ukrainische Behörde SNRIU hat Ende 2009 entgegen der Empfehlung der westlichen Gutachterorganisationen die Inbetriebnahme und den Betrieb des neuen Endlagers ENSDF genehmigt. SNRIU erteilte eine befristete Betriebsgenehmigung unter der Auflage, dass der Betreiber zunächst nur 2 von insgesamt 22 Abteilen mit konditionierten Abfällen aus dem KKW Tschernobyl (Los 2 und der Verfestigungsanlage für flüssige radioaktive Abfälle) verfüllt. Mit den gewonnenen Betriebserfahrungen und ggf. nach Durchführung von Verbesserungsmaßnahmen muss für die Verlängerung der Betriebsgenehmigung eine erneute Sicherheitsüberprüfung der Anlage durchgeführt werden.

Das TACIS-Projekt zur Unterstützung der Genehmigungsbehörde für die ICSR-Anlagen wurde Ende 2010 abgeschlossen. Die sicherheitstechnische Bewertung der Inbetriebnahme wird vom ukrainischen SSTC allein weitergeführt.

3.4.3 Verfestigungsanlage für flüssige radioaktive Abfälle

Die seit Beginn des Reaktorbetriebs erzeugten flüssigen radioaktiven Abfälle werden am Standort des Kernkraftwerks Tschernobyl in 12 Stahl tanks mit einer Kapazität von 1.000 m³ und in 6 mit Stahlblech ausgekleideten Betontanks von 5.000 m³ gelagert.

Im Rahmen der Stilllegungsvorhaben wurde eine Verfestigungsanlage für schwach- und mittelaktive flüssige Abfälle in der Nähe der Tanks geplant und errichtet. Die Liquid Radwaste Treatment Plant (LRTP) wird mit Mitteln aus dem nuklearen Sicherheitsfonds NSA (Nuclear Safety Account) finanziert.

Der flüssige Abfall besteht hauptsächlich aus Verdampferkonzentraten, Ionenaustauscherharzen und Filtermaterial Perlit. Die geschätzte Gesamtaktivität des flüssigen Abfalls beträgt 418 TBq (11.300 Ci). Dieser Abfall soll in der Verfestigungsanlage behandelt, zementiert und in 200-l-Stahlfässer verfüllt sowie im Endlager ENS-

DF endgelagert werden. Die geplante Betriebszeit für die Verfestigung der existierenden flüssigen Betriebsabfälle ist 10 Jahre. Weitere flüssige Abfälle aus der Stilllegung der KKW Blöcke 1 bis 3, dem Betrieb des Brennelementlagers ISF-2 und des New Safe Confinement über dem Block 4 sollen ebenfalls in der Verfestigungsanlage konditioniert werden.

Das Projekt LRTP begann im Jahr 2000, zeitgleich mit dem ICSR, und sollte ursprünglich vor 2004 fertig sein. Die von westlichen Firmen (Belgom, SGN, Ansaldo) geplante Anlage beruht auf einem in Frankreich entwickelten vollautomatischen Zementierungsverfahren. Unzulänglichkeiten bei Abfallcharakterisierung und Auslegung der Anlage führten zu Verzögerungen des Genehmigungsverfahrens und der Errichtung um 2 Jahre sowie zum Rückzug der westlichen Firmen in 2006. Das KKW Tschernobyl hatte daraufhin beschlossen, die Anlage selbst nach einem geänderten Konzept, z.B. bei der Rückholung der flüssigen Abfälle aus den Lagertanks, fertigzustellen und in Betrieb zu nehmen (siehe Abbildung 7).

Dies erforderte zusätzliche Mittel aus dem NSA, deren Bereitstellung die EBRD an eine straffe Projektplanung und -kontrolle gekoppelt hat. Die kalte Inbetriebnahme des LRTP soll vor Ende 2011 erfolgen; der normale Betrieb soll ein Jahr später beginnen.

Parallel zu den Industrieaktivitäten waren im Rahmen der Unterstützung der Genehmigungsbehörde die GRS, SSTC und IRSN gutachterlich am Genehmigungsverfahren für die Verfestigungsanlage LRTP beteiligt. Seit dem Jahr 2000 wurden Sicherheitsberichte und weitere Genehmigungsunterlagen bewertet. Grundlegende Sicherheitsaspekte bei der Zementierung von flüssigen Abfällen sind die ausreichende Charakterisierung des radioaktiven Inventars und die Abschirmung der radioaktiven Strahlung im technischen Verfahren. Darü-

ber hinaus müssen die Abfallgebinde die Annahmekriterien für die Endlagerung erfüllen.

Die Gutachten zu den Sicherheitsberichten für Auslegung und Bau weisen auf sicherheitstechnische Mängel und fehlende Nachweise hin. Es wurde u.a. bemängelt, dass die radiologische Charakterisierung des flüssigen Abfalls sowie die Gewährleistung der Annahmekriterien für die Abfallgebinde im Endlager ENSDF noch fehlen.

Das KKW Tschernobyl muss nun einen aktualisierten Sicherheitsbericht vorlegen, der auch die Änderungen an der Auslegung des LRTP berücksichtigt. Anschließend ist eine erneute Bewertung des Berichts geplant.

3.5 Entsorgung bestrahlter Brennelemente

3.5.1 Entsorgungskonzept

Eine wichtige Aufgabe im Zusammenhang mit der Stilllegung und dem Rückbau des KKW Tschernobyl ist die Entsorgung der aus dem Betrieb angefallenen bestrahlten Brennelemente (BE), die sich derzeit in den Abklingbecken der Reaktorblöcke 1 bis 3 und im Nasslager am Standort befinden. Die Planung sieht hierfür eine Zwischenlagerung der Brennelemente in Lagerbehältern in der Nähe des KKW Tschernobyl für einen Zeitraum von bis zu 100 Jahren vor. Dabei soll ein in den USA entwickeltes und eingesetztes Konzept aus verschweißten Stahlbehältern für den dichten Einschluss und Lagermodulen aus Beton zur Abschirmung der Strahlung zur Anwendung kommen. Bis zur Inbetriebnahme des noch fertigzustellenden neuen Langzeit-Zwischenlagers (Interim Storage Facility ISF-2) soll das am Standort bereits bestehende Nasslager für bestrahlte Brennelemente SFSF-1 als Interimlager genutzt werden.



Abb. 7: Behandlungsanlage für flüssige schwach- und mittelaktive Abfälle LRTP

3.5.2 Das Nasslager

Das *SFSF-1* (Spent Fuel Storage Facility) wurde zwischen 1983 und 1986 als eigenständiges Nasslager für bestrahlte RBMK-Brennelemente aus den Reaktoren des KKW *Tschernobyl* errichtet und im September 1986 in Betrieb genommen. Der Gebäudekomplex umfasst einen Verwaltungstrakt, einen Chemiebereich und den transport-technologischen Bereich, in dem die Brennelemente entladen und gelagert werden. Dazu stehen insgesamt 5 Lagerbecken mit einer Gesamtkapazität von 21.900 BE-Lagerpositionen zur Verfügung. Für die Zwischenlagerung aller vorhandenen Brennelemente einschließlich bestrahlter Absorberelemente werden ca. 23.000 Lagerpositionen benötigt, was auch die Nutzung von Reservekapazitäten erforderlich macht. Das Lager wurde für eine Betriebszeit von ca. 30 Jahren ausgelegt.

Der Betreiber des *SFSF-1* hat ein Konzept zum Alterungsmanagement erstellt und einen Sicherheitsbericht für die weitere Nutzung des Zwischenlagers vorgelegt.

Im Rahmen eines EU-finanzierten TACIS-Projektes wurde gemeinsam von den Gutachterorganisationen *GRS* und *IRSN* sowie dem ukrainischen *SSTC* eine Bewertung des Sicherheitsberichtes für das bestehende Zwischenlager *SFSF-1* in Hinblick auf die geplante zeitlich und kapazitätsmäßig erweiterte Nutzung durchgeführt. In die Bewertung flossen auch Erkenntnisse einer Begehung des Zwischenlagers im Januar 2008 ein. In der Stellungnahme, die der ukrainischen Aufsichtsbehörde am 1. Februar 2008 übergeben worden war, wurden gemessen an westlichen Sicherheitsstandards erhebliche Defizite in der vorgelegten Dokumentation, in der baulichen Konstruktion und Auslegung sowie in der Betriebsführung der Anlage festgestellt. Im Juni 2008 verlängerte die ukrainische Behörde die Betriebsgenehmigung unter der Auflage, dass der Betreiber bis Ende 2012 eine Reihe von Verbesserungsmaßnahmen und eine erneute Sicherheitsüberprüfung durchführt.

3.5.3 Das Langzeit-Zwischenlager ISF-2

Das von westlichen Firmen (*Framatome/ Areva*) geplante Trockenlager beruht auf dem in den USA entwickelten und angewendeten NUHOMS-Konzept. Hierbei werden mehrere Brennelemente in einen doppelwandigen Stahlbehälter von ca. 2 cm Wandstärke mit verschweißtem Deckel dicht eingeschlossen. Der Stahlbehälter wird in einem kubischen, aus Beton hergestellten Lagermodul (Concrete Storage Module) in horizontaler Position gelagert. Das Lagermodul gewährleistet die Abschirmung der von den Brennelementen ausgehenden radioaktiven Strahlung, während der Stahlbehälter für den dichten Einschluss des radioaktiven Inventars sorgt.

Die Nachzerfallswärme wird durch Luftkonvektion über abgeschirmte Lüftungsschlitze aus den Lagermodulen abgeführt. Das für LWR-Brennelemente westlicher Bauart entwickelte System wurde an die Gegebenheiten der RBMK-Brennelemente angepasst. Diese werden wegen ihres Aufbaus aus 2 gleichlangen Brennstabbündeln in der Mitte geteilt. Ferner ist wegen der langen Nasslagerung ein Trocknungsprozess erforderlich. Das Trocknen und Verpacken der Brennelemente erfolgt in einem Prozessgebäude, die verschlossenen Behälter werden dann auf einem abgeschirmten Transportwagen zu den im Freien errichteten Lagermodulen gebracht (siehe *Abbildung 8* und *Abbildung 9*). Das ursprünglich vorgesehene Behälterkonzept wurde der nach ukrainischem Regelwerk geforderten

Doppelwandigkeit nicht in vollem Umfang gerecht und deshalb von der Genehmigungsbehörde abgelehnt. Dadurch verzögerte sich die Genehmigung und Errichtung des Zwischenlagers um mehrere Jahre. Inzwischen hat ein Firmenkonsortium unter Federführung des US-Unternehmens *Holtec* ein überarbeitetes Konzept vorgelegt und treibt die Planung auf der Basis der bereits errichteten Bauwerke weiter voran.

Im Auftrag des NSA, der den Bau des Zwischenlagers finanziert, werden die gleichen Gutachterorganisationen am Genehmigungsverfahren beteiligt, die das Nasslager bewerteten. So wurden im Jahr 2010 der Sicherheitsbericht für das Trockenlager und die damit verbundene Konditionierungsanlage und das neue Behälterkonzept bewertet. Die grundlegenden Sicherheitsaspekte



Abb. 8: Prozess- und Konditionierungsgebäude des Zwischenlagers ISF-2



Abb. 9: Lagermodule des Zwischenlagers ISF-2

bei der trockenen Zwischenlagerung sind der sichere Einschluss des radioaktiven Inventares, die Abschirmung der radioaktiven Strahlung, die Ableitung der Nachzerfallswärme und Sicherstellung der Unterkritikalität der Brennelemente. Darüber hinaus sollte eine geordnete Entsorgung der Brennelemente am Ende der vorgesehenen Lagerzeit sichergestellt sein.

Die Bewertung erfolgte in mehreren Stufen, wobei auch der Antragsteller in die Diskussion eingebunden wurde. Eine abschließende Bewertung durch die Gutachter, unter denen weitgehende Einigkeit herrschte, wurde der Behörde im Dezember 2010 übergeben. Das Gutachten weist auf eine Reihe von sicherheitstechnischen Mängeln, Schwachpunkten oder fehlenden Nachweisen, z.B. das Fehlen eines schlüssigen Konzepts zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs für den geplanten Zeitraum von 100 Jahren (Alterungsmanagement), hin.

Die internationalen Unterstützungsmaßnahmen haben die Situation am Standort *Tschernobyl* bereits erheblich verbessert. Gleichzeitig zeigen vor allem die beiden Hauptprojekte zum *NSC* und zum *ISF-2*, dass solche komplexen internationalen Vorhaben mit z.T. erheblichen Herausforderungen behaftet sind. Diese Herausforderungen sind sowohl technischer, organisatorischer aber auch finanzieller Art. Andererseits gab es aufgrund der Einzigartigkeit und Größe der Projekte auch kaum eine Alternative.

Mit der Unterstützung der westlichen Geberländer besteht die reale Aussicht, dass bis zum Ende des Jahrzehnts der Standort *Tschernobyl* in einen sicheren Zustand überführt werden kann. Dann können Entscheidungen ohne Eile getroffen werden, wie mit den eingeschlossenen radioaktiven Stoffen und dem alten Sarkophag weiter verfahren werden soll. Die Arbeiten zur Umsetzung einer entsprechenden Konzeption werden weitere Jahrzehnte in Anspruch nehmen.

4 Bi- und trilaterale Unterstützungsprogramme für Tschernobyl

4.1 Stärkung der ukrainischen atomrechtlichen Behörde und seiner TSO

Ausgangspunkt für internationale Programme zur Lösung der Probleme am Standort *Tschernobyl* war der o.g. Aktionsplan Ukraine, der in ein Memorandum of Understanding (MoU) mit der G7 und der EU-Kommission im Dezember 1995 mündete, in dem die Schließung von *Tschernobyl* bis zum Jahre 2000 vereinbart wurde. Darin waren auch Projekte zur nuklearen Sicherheit, zum Strahlenschutz sowie Vor-

arbeiten zur Sanierung des instabilen Sarkophags eingeschlossen, die größtenteils über die *EBRD* aber auch über bilaterale Zusammenarbeit finanziert wurden.

Die deutsche Regierung, vertreten durch das *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)*, hatte in diesem Zusammenhang die Ukraine im Rahmen von bilateralen Projekten zu *Tschernobyl* von 1992 bis 1998 unterstützt, die von der *GRS* durchgeführt worden waren. Partner der *GRS* waren vor allem die nukleare Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde *SNRIU* sowie deren ukrainische Gutachterorganisation *SSTC*.

Im Rahmen dieser Projekte führte die *GRS* vielfältige Arbeiten zum Teil mit deutschen, ukrainischen und russischen wissenschaftlichen Organisationen und Unterauftragnehmern durch. Die Zielrichtung bestand einerseits in der Unterstützung von *SNRIU*, das nach der Unabhängigkeit der Ukraine 1991 erst gegründet worden war, sowie in der Analyse und Bewertung der Situation am Standort des *KKW Tschernobyl*, um durch verbesserte Informationen u.a. auch dem *BMU* eine effektivere Unterstützung der Ukraine zu ermöglichen.

Umfangreiche Sicherheitsanalysen wurden beispielsweise zum damals größten anzunehmenden Störfall, dem Dacheinsturz infolge innerer oder äußerer Einwirkungen, gefolgt von einer massiven Freisetzung radioaktiven Staubes sowie zu den radiologischen Folgen in der näheren und weiteren Umgebung durchgeführt. Beachtet werden musste damals auch die Auswirkung auf den noch in Betrieb befindlichen, direkt angrenzenden Block 3 und dessen Betriebsmannschaft. Es ergaben sich potenzielle Strahlenbelastungen deutlich über den Grenzwerten für beruflich strahlenexponierte Personen am Standort, die jedoch bereits in einigen km Entfernung vernachlässigbar waren.

Weitere Sicherheitsanalysen betrafen eine mögliche Kritikalität der im Sarkophag verbliebenen brennstoffhaltigen Materialien nach Eindringen von Regenwasser, radioaktive Freisetzung aus dem Sarkophag durch Aerosole oder durch flüssige Ableitungen ins Grundwasser und die radioaktive Belastung des Kühlteiches sowie die Aufwirbelung radioaktiver Kontaminationen bei Wald- und Steppenbränden.

Weiterhin unterstützte die *GRS* das *SNRIU* bei der Erarbeitung von Regeln und Richtlinien, so beispielsweise beim Review des betrieblichen Strahlenschutz- und Notfallplans sowie des Sicherheitsberichts für das Objekt Einschluss und bei Sachstandsbeschreibungen, wie dem baulichen Zustand und der Standsicherheit des Objekts Einschluss und dem radioökologischen Zustand des Kühlteichs.

Insgesamt wurden mit diesem Projekt wertvolle neue Erkenntnisse gewonnen

und die bilaterale Zusammenarbeit mit der Ukraine und Russland auf den o.g. Gebieten gefördert.

4.2 Tschernobyl Aktionsprogramm

Anlässlich des 10. Jahrestages des Reaktorunfalls von *Tschernobyl* im Jahre 1996 wurde in mehreren internationalen Konferenzen und in Beratungen der G7-Arbeitsgruppe für nukleare Sicherheit festgestellt, dass weitere wissenschaftlich-technische Unterstützung für die Ukraine auch durch bilaterale Zusammenarbeit erforderlich ist. Diese Arbeiten waren Gegenstand der von der *GRS* im Auftrag des *BMU* durchgeführten Projekte „*Tschernobyl* Aktionsprogramm“ (TAP).

Mit den Projekten im TAP und mit der Durchführung der Deutsch-Französischen Initiative wurden die Arbeiten für *Tschernobyl* fortgesetzt. Das Arbeitsprogramm war mit anderen Projekten, wie z.B. dem SIP und TACIS-Projekten, abgestimmt. Es beinhaltete Arbeiten zur Ermittlung und Bewertung des aktuellen Standes von durchgeführten bzw. weiter geplanten Arbeiten am Standort *Tschernobyl* sowie zur Förderung der internationalen Zusammenarbeit und zur Unterstützung der Bundesregierung bei ihrer Mitarbeit in der G7.

4.3 Deutsch-Französische Initiative (DFI) und Folgeaktivitäten

Als Reaktion auf das Ersuchen des ukrainischen Umweltministers erklärten die Umweltministerinnen Deutschlands und Frankreichs, *Dr. Angela Merkel (BMU)* und *Corinne Lepage*, anlässlich der *IAEO*-Konferenz im April 1996 in Wien ihre Bereitschaft, die internationale Kooperation zwischen der Ukraine, Russland und Weißrussland zur Aufarbeitung der noch ungelösten Folgeaufgaben des Unfalls durch eine Deutsch-Französische Initiative (DFI) zu unterstützen.

Im Juli 1997 wurde von den beauftragten Organisationen *GRS*, dem französischen *IRSN* und dem ukrainischen *International Chernobyl Centre (ICC)* for Nuclear Safety, Radioactive Waste and Radioecology als Begünstigte eine Vereinbarung geschlossen.

Seit der Reaktorkatastrophe von *Tschernobyl* 1986 waren zahlreiche Studien über die Folgen des Unfalls von *Tschernobyl* in den betroffenen Republiken der ehemaligen UdSSR durchgeführt worden, meist ohne wirkliche Koordinierung sowie ohne westliche Beteiligung. Im Ergebnis entstanden nicht abgestimmte und teilweise sogar widersprüchliche Resultate insbesondere zu den ökologischen und gesundheitlichen Folgen.

Ein wesentliches Ziel der *DFI* war es daher, die bestehenden Daten und Informationen

zu sammeln, zu verifizieren und in elektronischer Form bereitzustellen, um eine sichere und objektive Informationsbasis für die Planung und Durchführung von zukünftigen Schutz- und Sanierungsmaßnahmen, zur Information der Öffentlichkeit und für spätere wissenschaftliche Arbeiten zu erstellen.

Dazu finanzierten Frankreich und Deutschland 3 Kooperationsprogramme:

- Programm 1: Sicherheitszustand des Sarkophags von *Tschernobyl*,
- Programm 2: Untersuchung der radioökologischen Folgen des Unfalls,
- Programm 3: Untersuchung der gesundheitlichen Auswirkungen.

Im Rahmen dieser Vereinbarung organisierten *GRS* und *IRSN* über ein Steuerungskomitee die methodische Unterstützung für ukrainische, russische und weißrussische Organisationen als Unterauftragnehmer zur Durchführung wissenschaftlicher Projekte in den 3 Kooperationsprogrammen. Neben den beiden Regierungen unterstützen auch die deutschen und die französischen Energieerzeuger die *DFI*.

Ziel des Programms „Sicherheitszustand des Sarkophags“ war es, alle Kenntnisse zur bautechnischen, nuklearen und radiologischen Situation des Sarkophags, zum verbliebenen Brennstoff und seinen Modifikationen sowie zum Zustand der Systeme und Ausrüstungen zu sammeln, zu verifizieren und in Form einer Datenbank bereitzustellen, um eine sichere und objektive Informationsbasis für die Bewertung des sicherheitstechnischen Zustandes des Sarkophags sowie zur Planung und Durchführung von zukünftigen Schutz- und Sanierungsmaßnahmen zu schaffen. Mit diesen Kenntnissen konnten z.B. Stabilisierungsmaßnahmen im Rahmen des SIP und die bereits genannten Entsorgungsmaßnahmen für radioaktive Stoffe unterstützt werden.

Das Programm „Radioökologie“ der *DFI* konzentrierte sich auf die Untersuchung der radiologischen Folgen des Unfalls in der 30-km-Zone und auf das Gebiet um Gomel in Weißrussland sowie um Brjansk in Russland. Die radioökologischen Schwerpunkte des Programms waren:

- Transfer von Radionukliden in die Umwelt (in terrestrische Ökosysteme wie Boden/Pflanze und Pflanze/Tier, in aquatische Ökosysteme, Transfer in der Nahrungskette und Transfer von Radionukliden in städtischen Gebieten)
- Gegenmaßnahmen und Dekontaminationsverfahren (in städtischen und bebauten Gebieten, auf landwirtschaftlichen, seminaturalen und natürlichen Flächen sowie für landwirtschaftliche Produkte) und
- Erfassung von Daten und Informationen zu radioaktiven Abfällen (Lager für radioaktiven Abfall, unplanmäßig angelegte Abfallgräber u.a.)

Im Programm 3 „Gesundheitliche Auswirkungen“ wurde eine gemeinsame Beurteilung der Gesundheitsparameter erstellt, die eine Beziehung zur Strahlenbelastung der Bevölkerung aufweisen. Die Untersuchungen konzentrierten sich im Wesentlichen auf alle Ereignisse der damals letzten 15 Jahre sowie auf jene Gruppen, die in stark kontaminierten Gebieten lebten oder auch heute noch dort leben. Deren Gesundheitszustand wurde mit dem von in niedrig belasteten Gegenden lebenden Gruppen verglichen. Die meisten beteiligten Forschungszentren hatten bereits entsprechende Erfahrungen und waren verantwortlich für Register entsprechender Erkrankungen.

Die Zielstellung der *DFI* bestand im Vergleich von Inzidenzraten spezieller Erkrankungen zwischen exponierten und nicht exponierten Regionen. Sie unterschied sich dadurch von anderen analytischen Studien, die z.B. Dosis-Wirkungs-Beziehungen bestimmter Gruppen mithilfe der Rekonstruktion individueller Dosen untersuchten.

Die Ergebnisse der 3 Programme der *DFI* wurden auf einem abschließenden internationalen Workshop im Oktober 2004 in Kiiew vorgestellt und diskutiert sowie in zusammenfassenden Berichten dargestellt [GRS 05].

Nach Beendigung der *DFI* wurden einige Arbeiten, insbesondere zum Programm 1 Sarkophag, das von deutscher Seite geleitet worden war, von der *GRS* in Zusammenarbeit mit dem ukrainischen *ICC* in begrenztem Umfang im Rahmen des vom *BMU* geförderten Projekts TAP-ICC weitergeführt.

Dazu gehörten Aufgaben zur radiologischen Situation am Standort und zur Situation des Brennstoffinventars im Sarkophag. Diese Fragen finden im SIP weniger Beachtung, haben aber in den nächsten Jahren wesentliche Bedeutung bei der Errichtung des „New Safe Confinement“ (NSC). Darüber hinaus sind bei der Überführung des Sarkophags in ein langfristig stabiles und ökologisch sicheres System Kenntnisse zur radiologischen Situation in der näheren Umgebung der 30-km-Zone von Bedeutung. In diesem Gebiet befinden sich großflächige Kontaminationen von Boden und Wasserreservoir sowie ca. 800 lokale Deponien mit schätzungsweise 1 Mio. m³ radioaktiven Abfalls mit einer gesamten Aktivität von etwa 10¹⁶ Bq.

Seit 2007 werden im o.g. Projekt Daten und Informationen zu diesen Fragestellungen gesammelt, aufbereitet und in einer Datenbank integriert. Diese Datenbank ist mehreren wissenschaftlich-technischen Institutionen und dem Kernkraftwerk *Tschernobyl* zugänglich.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der *Tschernobyl*-Unfall war de facto der Auslöser für die Schaffung eines umfassenden internationalen Sicherheitsregimes und zu umfangreichen Maßnahmen zur Stärkung der internationalen Zusammenarbeit in kerntechnischer Sicherheit und im Strahlenschutz.

Ein ganzes System von internationalen Übereinkommen (u.a. zu Unfallbenachrichtigung, Hilfeleistung, nuklearer Sicherheit, Abfallmanagement und Nuklearhaftung) ist seitdem entstanden. Die Schaffung einer umfassenden Sicherheitskultur, die Harmonisierung von Sicherheitsstandards und Sicherungsanforderungen, international begleitete Selbstüberprüfungen auf vielen Gebieten als auch ein sich stetig vertiefender Informations- und Wissensaustausch über diverse Netzwerke sind weitere wichtige Elemente des herausgebildeten globalen Sicherheits- und Sicherungsregimes.

Vielfältige multilaterale Unterstützungsprogramme aber auch bi- und trilaterale Projekte mit aktiver deutscher Beteiligung halfen der Ukraine sowohl bei der Überwindung der Folgen des Unfalls von *Tschernobyl* auf der Industrieseite als auch bei Aufbau und fachlicher Stärkung einer unabhängigen atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde.

Heute, 25 Jahre nach dem *Tschernobyl*-Unfall, wurde ein deutlich höheres kerntechnisches Sicherheitsniveau auf breiter internationaler Basis erreicht, die wesentlichen Aufgaben zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle und zur Sanierung des Standorts *Tschernobyl* befinden sich in der Realisierung oder wurden bereits abgeschlossen. Die Überführung des Unfall-Blockes 4 und des darüber errichteten Sarkophags in einen langfristigen stabilen und ökologisch sicheren Zustand wird derzeit durch den Bau des New Safe Confinement umgesetzt.

Ungeachtet dieser Fortschritte wird der Standort *Tschernobyl* noch für viele Jahrzehnte ein besonderes Territorium bleiben und damit den ukrainischen Staat und die internationale Gemeinschaft belasten.

Literatur

- [BBR 86] Bericht der Bundesregierung über den Reaktorunfall und seine Konsequenzen für die Bundesregierung, Drucksache 10/6442, 12.11.1986
- [GRS 96] *Chernobyl – Ten Years After*. Reports in 4 languages provided by *GRS*, *IPSN* and *RRC KL*, *GRS* 121, February 1996
- [GRS 05] Deutsch-Französische Initiative für *Tschernobyl*, Programm 1, Sicherheitszustand des Sarkophags. *GRS*, *IRSN*, November 2005, ISBN 3-931995-83-6 Programm 2, Untersuchung der radioökologischen Folgen, *GRS*, *IRSN*, März 2006, ISBN 3-931995-84-4 Programm 3, Untersuchung der gesundheitlichen Auswirkungen, *GRS*, *IRSN*, März 2006, ISBN 3-931995-85-2

26 April 2011 marks the 25th anniversary of the Chernobyl reactor accident, the worst accident in the history of the peaceful utilisation of nuclear power. While investigations of the course of events and the causes of the accident largely present a uniform picture, descriptions still vary widely when it comes to the impact on the population and the environment.

This treatment of the Chernobyl accident constitutes a summary of facts about the initiation of the accident and the sequence of events that followed. In addition, measures are described which were taken to exclude any repetition of a disaster of this kind. The health consequences and the socio-economic impact of the accident are not discussed in any detail.

The first section contains an introduction and an overview of the Soviet RBMK (Chernobyl) reactor line. In section two, fundamental characteristics of this special type of reactor, which was exclusively built in the former Soviet Union, are discussed. This information is necessary to understand the progression of the accident and provides an answer to the frequent question whether this accident could be transferred to reactors in our country. The third section outlines the history of the accident caused ultimately by a commissioning test that had not been performed before. The section is completed by a brief description of radiological releases and the state of the plant after the accident when entombed in the “Sarcophagus.” The different causes are then summarised and the modifications afterwards made to RBMK reactors are outlined.

Authors' address:

Alexander Kerner,
Dr. Reinhard Stück

Leiter des Bereichs Reaktorsicherheitsanalysen
and

Prof. Dr. Frank-Peter Weiß

Wissenschaftlich-technischer Geschäftsführer
Gesellschaft für Anlagen- und

Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Forschungszentrum

Boltzmannstr. 14

85748 Garching bei München

Germany

and

Schwertnergasse 1

50667 Köln

Germany

The 1986 Chernobyl accident

Alexander Kerner, Reinhard Stück and Frank-Peter Weiß,
Garching near Munich; Cologne

26 April 2011 marks the 25th anniversary of the Chernobyl reactor accident, the worst accident in the history of the peaceful utilisation of nuclear power. Since then, many investigations have been carried out and numerous papers have been published. While investigations of the course of events and the causes of the accident largely present a uniform picture, descriptions still vary widely when it comes to the impact on the population and the environment.

This paper about the Chernobyl accident constitutes a summary of facts about the initiation of the accident and the sequence of events that followed. In addition, measures are described which were taken to exclude any repetition of a disaster of this kind. The health consequences and the socio-economic impact of the accident are not discussed in detail.

The first section contains an introduction and an overview of the Soviet RBMK (Chernobyl) reactor line. In section two, fundamental characteristics of this special type of reactor, which was exclusively built in the former Soviet Union, are discussed. This information is necessary to understand the progression of the accident and provides an answer to the frequent question whether this accident could be applied to reactors in our region. The third section outlines the history of the accident caused ultimately by a commissioning test that had not been performed before. The section is completed by a brief description of radiological releases and the state of the plant after the accident when entombed in the “Sarcophagus”. The different causes are then summarised and the modifications afterwards made to RBMK reactors are outlined.

1 RBMK – The reactor line of the Chernobyl type

The Chernobyl reactor belongs to the reactor line with the abbreviation “RBMK” which stands for “Reactor Bolschoi Mo-

schtschnosti Kanalny” which means “Large-capacity Reactor of the Channel Type”. This type was developed in the mid-1960ies, aiming at the erection of many high-capacity nuclear power plants within a relatively short period of time. This was to be achieved by using well-known components and systems. At that time, the Soviets considered the RBMK design as very advantageous due to the following features [1]:

- High reliability because the design provides access to any pressure tube at any time (see also section 2),
- Possibility to change fuel elements while plant is under power operation,
- “Modular” design: reactor power can be increased by adding further pressure tubes; large forged components, like a reactor pressure vessel, are not required.

Table 1 lists the five sites where this type of reactor had been erected and operated, i.e. Leningrad, Kursk, Smolensk, Ignalina and Chernobyl. The Table also shows that lifetime extensions were granted or are being planned for another 11 units of this design being operated in Russia.

2 Characteristics of the RBMK

2.1 Design and functioning of the RBMK

The RBMK is a graphite-moderated boiling water pressure tube reactor. Figure 1 shows the basic design of the RBMK, i.e. the schematic layout of the RBMK of the first generation. Reactors of this generation were built without containment. The second generation is equipped with a pool-type pressure suppression system below the cooling cycle. Together with the condensate system, this system forms a partial confinement. The remaining components of the reactor cooling cycle like steam lines above the reactor core and steam separators are not part of the confinement.

Country	Location	Unit	Gene-ration	Design/ Capacity	Start of power operation	Date of decommissioning	
						Design	(planned)
Lithuania	Ignalina	1	2. ¹⁾	1.500 ²⁾	1983	2013	2004
		2	2. ¹⁾	1.500 ²⁾	1987	2017	2009
Russia	Leningrad	1	1.	1.000	1974	2003	(2019)
		2	1.	1.000	1976	2005	(2022)
		3	2.	1.000	1980	2010	(2025)
		4	2.	1.000	1985	2011	(2026)
	Kursk	1	1.	1.000	1977	2006	(2021)
		2	1.	1.000	1979	2008	(2024)
		3	2.	1.000	1984	2013	(2013)
		4	2.	1.000	1985	2015	(2015)
		5	3.	1.000+	under construction since 1985 – problems with project financing		
	Smolensk	1	2.	1.000	1983	2012	(2028)
		2	2.	1.000	1985	2015	(2025)
3		3.	1.000	1990	2020	(2030)	
Ukraine	Chernobyl	1	1.	1.000	1977	2007	1996
		2	1.	1.000	1978	2008	1991
		3	2.	1.000	1981	2011	2000
		4	2.	1.000	1983	2013	Accident 1986

1) Special design of 2nd generation
 2) Permitted capacity 4,200 MW_{th}, corresponds to about 1.300 MW_e

Tab. 1. RBMK reactors in Eastern Europe [4], [5].

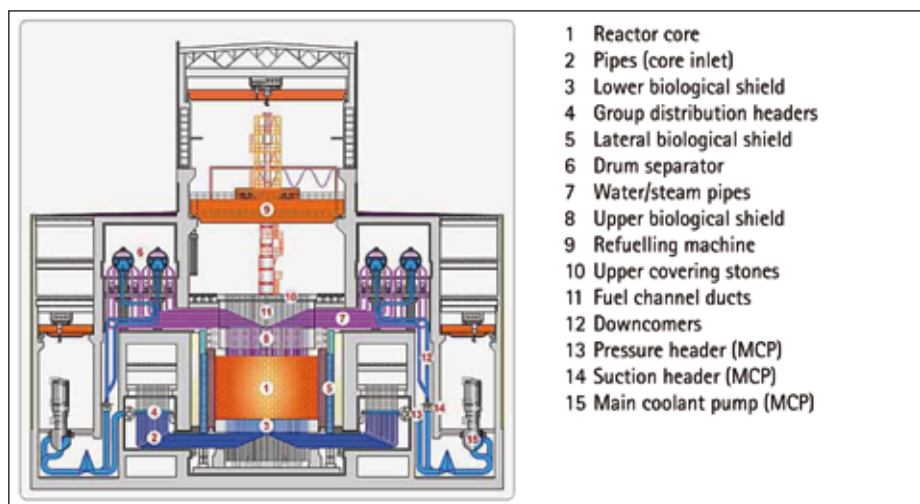


Fig. 1. Cross-sectional view of an RBMK reactor (1st generation) [8].

The reactor core comprises some 2,500 graphite columns made up of different units of different length with a total height of 7 m and a diameter of 11.8 m. Vertical bores into the graphite columns accommodate the pressure tubes (approximately 1,661 to 1,693) and the tubes for control and protection systems (211 control rods),

reflector cooling and core instrumentation. A cylindrical metal casing surrounds the reactor core, which forms the reactor vessel with the upper and lower core plate. It is sealed hermetically and inertised with nitrogen/helium. Inertisation ensures that graphite, which reaches temperatures of up to 750 °C, cannot oxidise.

Each pressure tube houses one fuel element, which comprises two fuel rod bundles with 18 fuel rods each. Every fuel rod contains 3.5 kg UO₂ with an original enrichment of 1.8 % U-235. The average capacity of the fuel elements amounts to 2 MW (maximum 3 MW). Cooling water surrounds the fuel element from the bottom to the top. The approximate length of the fuel element amounts to 7 meters. Heat released from the fuel elements partly evaporates the cooling medium: at the core outlet, 15 to 30 % of the cooling medium is converted into steam at a pressure of 70 bar, equivalent to a temperature of 286 °C.

The water-steam cycle comprises two part loops, one for each core half. They are connected with each other via the main steam system. Each partial loop comprises two steam separators connected on the water and steam side. Water of the steam separators mixes with feedwater und flows via 24 downcomer pipes to the header on the suction side. This header belongs to the four main coolant pumps, three of which are operated at nominal power and one is redundant. A header also stands at the pressure side of the main coolant pumps. It is connected to 22 group distribution headers via pipes. 40 to 44 lines are branched off from each group header to the individual pressure tubes.

Steam from the four steam separators is fed to two turbo sets (500 MW_e each) via main steam lines. Condenser pumps transport the condensate from the turbine condensers to four deaerators. Five feedwater pumps convey the condensate to the steam separators where the feedwater – pre-heated to 160 °C – mixes with saturated water.

In the following, the emergency core cooling system of the unit concerned (see Figure 2) is outlined in order to explain the commissioning test that mainly triggered the accident. The emergency cooling system of RBMK reactors is designed as a three-train system. The cooling system functions have to be distinguished according to short-term cooling (up to some three minutes) and long-term cooling. Long-term cooling also differentiates between feeding of the affected and non-affected core half. The partial system for short-term cooling comprises two trains that are supplied by seven accumulators (7) as well as one train supplied by the main feedwater system (12 and 13). The partial system for long-term cooling comprises three times two emergency cooling pumps (9) that fed the affected loop from the deaerator and three times one emergency cooling pump (11) that supply the non-affected loop from the condenser tank. All emergency pumps are connected to the emergency power supply system.

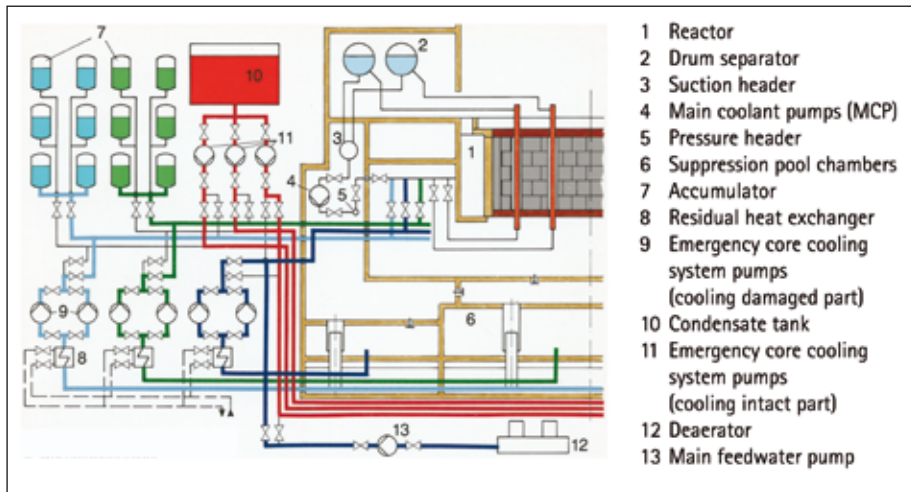


Fig. 2. Diagram of the emergency core cooling system of an RBMK plant of the 2nd generation (Chernobyl Units 3 and 4).

2.2 Reactor-physical properties of the RBMK prior to the accident

The *Chernobyl* accident is a so-called reactivity accident, which was due to the special features of the RBMK reactor in terms of reactor physics, and particularly due to the positive reactivity feedback effect of steam voids. This effect is generally negative in light water reactors of Western design.

Utilisation of graphite as moderator and water as coolant results in the typical, special situation of RBMK reactors. Water applied as coolant acts simultaneously as neutron moderator and neutron absorber. While the moderating effect of water is of less importance compared to graphite, the reactivity behaviour of the reactor is highly influenced by the absorbing effect of water. A reduction of coolant density due to e.g. evaporation or loss of coolant results in a clear reduction of neutron absorption in the reactor core. Increased steam content in the pressure tubes means an increase in reactivity and thus an increase in reactor power. An increase of reactor power. An increase of reactor power results in more evaporation etc.; this phenomenon is called “positive void effect”.

The “operational reactivity margin” (ORM) is one parameter of reactor physics highly influencing the intensity of the positive void effect. The ORM value describes the reactivity equivalent of all control rods inserted (completely or partly) into the core. It is defined as a multiple of the reactivity equivalent of a control rod fully inserted. According to the safety regulations of the year 1986, the ORM value during normal operation had to amount to at least 26 to 30 control rods (15 was the minimum number permitted). This reserve is required among others for operational reasons in order to be able to withdraw control rods upon load changes to make up for xenon poisoning because otherwise the reactor would scram itself. For

reasons of safety technology, it is not permitted to withdraw too many control rods because an insufficient ORM would increase the positive void effect since the relative influence of water (used as coolant) on the neutron-absorbing capacity is increasing.

Besides, a sufficient number of control rods must be inserted into the core to a certain length in order to guarantee sufficient efficiency in the case of a reactor scram. At that time, the velocity at which control rods were inserted into the core amounted to 0.4 m/s, i.e. control rods completely withdrawn only became reactive within some 10 s after having been re-inserted [2].

Apart from the ORM value, the positive reactivity feedback effect also depends on additional parameters:

- The positive reactivity feedback effect is particularly high at low power. In the upper power range, the amount of steam voids in the pressure tubes is more or less constant. This does not apply to the lower power range because the coolant flow rate cannot be sufficiently limited. Therefore, the steam content at core outlet and the core inlet sub-cooling are lower than at nominal power. Consequently, the change of volume steam content in the core caused by power change is higher than at nominal power. Besides, at lower power, i.e. lower fuel temperature, the stabilising Doppler feedback effect via fuel temperature is slower than at nominal power.
- The value of positive feedback effect also increases with increasing burn-up. Investigations in the 1970ies revealed that a complete evaporation of the water at an average burn-up of about 10 MWd/kg and without fixed absorber rods in order to compensate initial excess reactivity, the reactivity caused by the void effect will increase to approximately $+5 \beta^1$ [1].

- Higher enrichment results in reduced positive void effect, because more absorber rods have to be inserted to make up for excess reactivity. This decreases the relative influence of water as absorber.

The positive reactivity effect of the shutdown system is another special feature of reactor physics of the RBMK reactor. The control and shutdown system of the second generation comprises 211 control rods. 187 of these are inserted from the top and 24 – shorter rods – are inserted from the bottom into the core. 163 of the upper control rods were made up of an absorber part of 6.2 meters and a graphite displacement part of 4.55 meters (see Figure 3). The latter is to increase moderation. Water columns above and below the part of displacement fill the control rod channel. If a control rod that has been withdrawn is re-inserted into the core, the moderating (graphite) part of the control rod will displace the neutron-absorbing water in the lower part. At first, quite the opposite is achieved of what is intended: reactor power is not decreased by the admission of negative reactivity but increased through the admission of positive reactivity in the lower part of the core. This effect is also called “positive shutdown effect”. The intensity of this effect is considerably increased through the axial power distribution shifting to the lower core part. An additional, independent shutdown system ef-

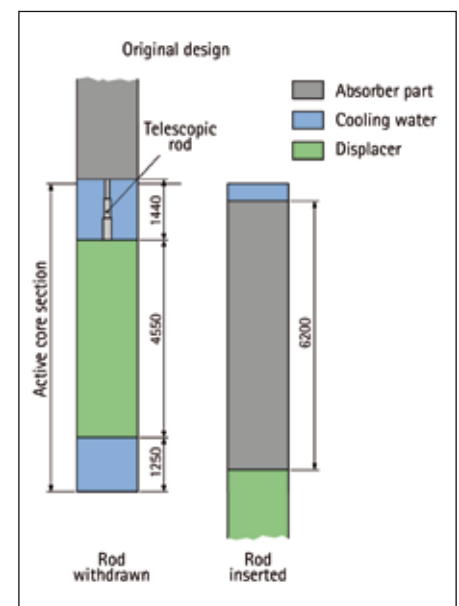


Fig. 3. Original design of RBMK control rods (lengths in mm).

¹ β is the proportion of delayed neutrons (of all fissionable neutrons). If the reactivity is $> +1\beta$ the prompt supercritical state is achieved. A reactor in this state cannot be controlled any longer because the neutrons double within milliseconds.

fective within seconds did not exist in RB-MK reactors of that time.

3 The Chernobyl accident of 1986

3.1 The test programme and sequence of the accident

The accident in Unit 4 of the *Chernobyl* Nuclear Power plant on 26 April 1986, occurred when the plant was to be shut down for inspection. While shutting down the plant a commissioning test had to be caught up that had not been carried out until that point in time. Certain safety features of the emergency core cooling system had to be proven.

As mentioned above, in the case of a loss-of-coolant-accident (LOCA), a line of the main feedwater system supplies the emergency core cooling system in the short term. If – according to Soviet regulations – the loss of offsite power is assumed, the rotational energy of the turbines phasing out is to be used to provide power for the main feedwater pump of this emergency cooling line until the diesel generators would have achieved the capacity needed. It was to be demonstrated by the test that this measure worked.

The test was not assessed properly and regarded as mere conventional test in the field of electrical engineering without any consequences for the nuclear part. Principally, the following test programme was planned:

- At the beginning of the test, thermal output was to amount to a range between 700 and 1,000 MW (some 20 to 30 %). This is the power range with one turbo set in operation and the second being shut down.
- In contrast to normal operation, it was also intended that apart from the six main coolant pumps also the two reserve pumps were to be activated.
- Four main coolant pumps including two reserve pumps were to be running during and after the test in order to guarantee core cooling. Therefore, these pumps were connected to the normal power grid.
- During the test, the four remaining main coolant pumps were to act as load – instead of the main feedwater pumps – for the turbo generator. They remained electrically connected to the turbo generator also after the generators had been shut down. These pumps were to run down at the beginning of the test according to the decreasing generator output.
- Tripping of the turbo set in operation was to initiate the test. According to the design of the reactor protection system, turbine tripping was also to actuate reactor scrambling.

The accident chronology was as follows (see Figure 4):

25 April 1986

- 1:00 hours: Scheduled shutdown of the plant for the annual inspection (high burn-up: about 12 to 15 MWd/kg at 75 % of the fuel elements). The ORM value amounted to 31.
- 3:47 hours: Thermal output was maintained at 50 % of nominal capacity.
- 7:10 hours: The ORM value of 13.2 was below the permissible value due to non-stationary xenon poisoning. The reactor would have had to be scrammed. In the further course, the ORM increased again to the minimum permissible value.
- 13:05 hours: Shutting down of one turbo set and switching of the consumers to the remaining turbo generator.
- 14:00 hours: According to requirements of the load dispatcher, power had to remain at 50 % of nominal capacity. Test start was delayed for about nine hours.
- 23:10 hours: Plant shutdown continued to achieve the intended power range of 700 to 1,000 MW. Thermal power of 700 MW is the minimum permissible power for stationary operation.

26 April 1986

- 0:28 hours: The range of reactor power was highly below target due to a technical failure of the control system or wrong switching by an operator. The power amounted to 1 % only. At that time, the reactor (also) would have had to be shut down because the minimum values of reactor power and the minimum permissible ORM were not met. Instead, the output was increased to the technical maximum by further withdrawal of control rods. The output was kept at about 200 MW_{th}, which resulted in a further reduction of the ORM value.
- 0:43 hours: The reactor shutdown signal – triggered by reactor protection upon shutdown of the last turbo generator set – was disabled in order to be able to repeat the test if required (massive intervention into the reactor protection system which was also not intended by the test programme).
- 1:00 hours: The plant was in a very unstable and impermissible state: core with high burn-up, low power level with unfavourable distribution of power density, high coolant flow rate in the core (two reserve main coolant pumps were added at that time), lower feedwater flow rate with increase of coolant temperature at core inlet (close to saturation temperature) and non-stationary behaviour of spatial xenon poisoning. In order to stabilise the plant state the operational instructions were ignored several times (e.g. admissible value for coolant flow rate in some of the main coolant pumps was not met, further withdrawal of control rods, blocking of trigger signals for reactor scrambling through level or pressure criteria in the steam separators). According to post calculations, the ORM value amounted to 6 to 8 at that time.
- 1:23:04 hours: The test began and the four main coolant pumps were running out. Consequently, less coolant was flowing through the reactor core, which in turn increased the core entrance temperature and thus the amount of steam voids in the reactor core. This leads to an increase of reactor power, that could not be compensated by control systems.
- 1:23:40 hours: The reactor was scrammed manually at about 10 % reactor load. The positive shutdown effect

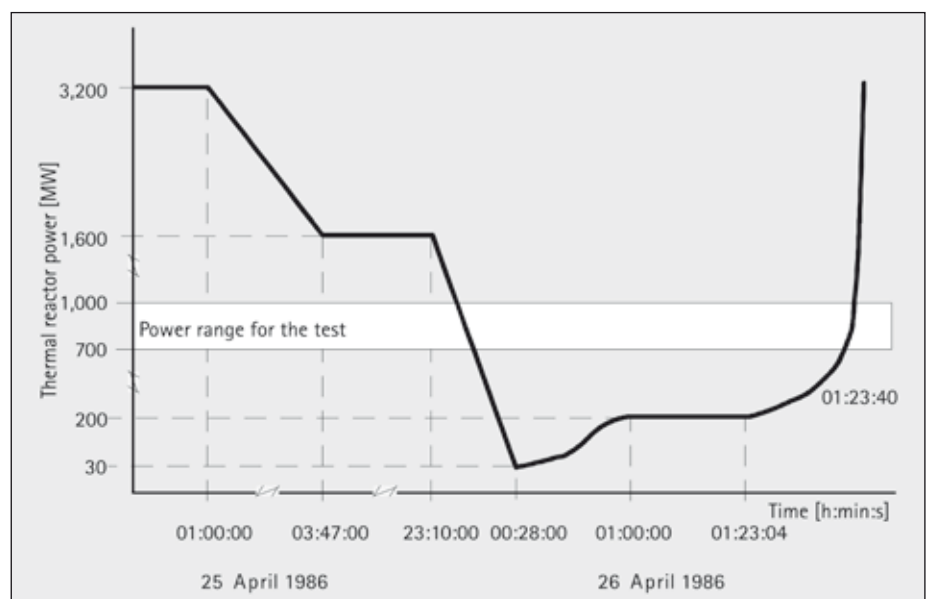


Fig. 4. Simplified distribution of reactor power before the accident [1].

caused an additional immediate increase in reactivity.

The power excursion, taking place at that moment, resulted in rapid increase of energy release in the fuel elements and further in the destruction of the reactor core. The heat stored in the fuel was quickly transferred to the surrounding coolant that evaporated instantly. According to calculations it is assumed that at that moment the reactor power amounted to about the 100-fold of nominal design load. The resulting high increase in pressure led to reactor explosion. Eyewitnesses observed a second explosion some two to three seconds later. It has not been settled yet whether the second explosion was a hydrogen explosion or a second power excursion.

Graphite fires followed the destruction of the reactor core that had lost its protective atmosphere. About 250 tons of graphite were burnt and the destruction of the reactor hall resulted in massive release of radioactive substances into the atmosphere.

Events after the accident had initiated

- 26 April 1986: The fires outside the reactor were extinguished at around 5:00 hours. Unit 3 was shut down. Water cooling of the reactor core was abandoned after some 10 hours because cooling of graphite columns failed and additional radioactivity was transported to the environment. Besides, flooding endangered the other units.
- 27 April 1986: Unit 1 was shut down at 1:13 hours and Unit 2 at 2:13 hours.
- 27 April to 10 May 1986: Helicopters were employed to bury the reactor with different materials:
 - 40 t of boron carbide to stop chain reactions,
 - 800 t of dolomite to absorb energy and smother the graphite fire in the core area with the resulting carbon dioxide,
 - 2.400 t of lead to minimise gamma radiation and to form a compact layer above the molten core,
 - 1.800 t of sand and clay to filter radioactive substances,
 - Nitrogen was injected into the core area to cool the reactor core.
- 28 April 1986: At 9.00 hours, the Forsmark Nuclear Power Plant in Sweden measured increased radioactivity. At the same day, the Soviet Government communicated for the first time that an accident had happened.

3.2 Release of radioactive substances

Figure 6 provides an overview about the sequence of release. It can be seen that the release of activity is subject to great un-



Fig. 5. The destroyed Unit 4 (left) and Unit 3 (right) of the Chernobyl nuclear power plant.

certainty (see scattered bands of uncertainty) because qualified measured data are missing.

Massive release lasted for about ten days and can be sub-divided into four phases [1]:

Phase 1: On the first day, parts of the fuel are fractionated into dust or grains, ejected or discharged during reactor explosion and subsequent fuel fire. Noble gases and massive amounts of easily volatile nuclides like iodine, tellurium and caesium are released. The composition of the released heavily volatile nuclides corresponds roughly to their share in the destroyed reactor core.

Phase 2: In the following five days, the release continuously decreases due to fighting of the graphite fires and coverage of the reactor core. Hot gases and combustion products of the graphite fires entrain finely dispersed fuel particles. Nuclide composition of the released radioactive substances corresponds to that in the nuclear fuel.

Phase 3: Release clearly increased from 2 May to 5 May 1986. The materials covering the destroyed core impair heat released. This results in heating up of the core of up to $> 2,000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Iodine still remaining in the fuel is being expelled

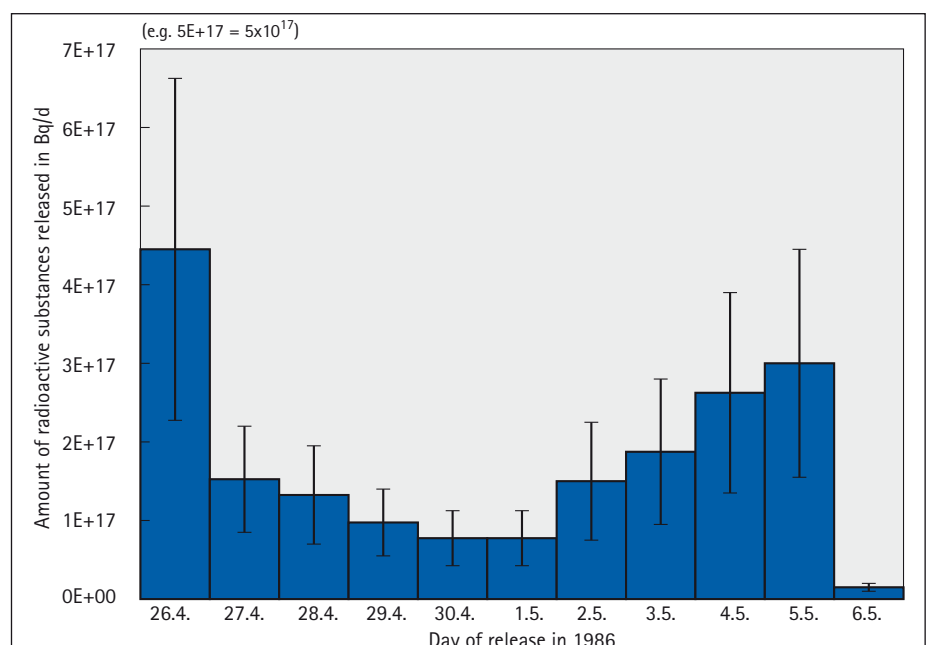


Fig. 6. Radioactivity released during the first 10 days (with uncertainty ranges) [1]

out of the hot fuel. The composition of the other substances released corresponds to their share in the nuclear fuel.

Phase 4: Release stops abruptly on 6 May 1986. This is surprising and has not been settled completely until yet. Decisive influences are attributed to the countermeasures taken, especially reactor cooling with nitrogen and the formation of highly volatile compounds of radionuclides. Measurable, smaller release continues during the rest of the month.

Dispersion of contaminated air masses in the period 27 April to 10 May 1985 was determined by the prevailing airstreams that resulted from air pressure distribution, rainfalls and wind conditions. During the first phase of release, the radioactive substances were transported into a height of 1,200 meters in Northern direction. During the subsequent release phases, the escaping gases were of low temperature thus buoyancy took place up to a height of 200 to 400 meters. The intensity of contamination was due to the intensity of rainfalls and resulted in locally different contamination.

3.3 Sarcophagus

From May to November 1986, the sarcophagus was erected to isolate the destroyed reactor from the environment (see Figure 7). Not all parts of the Sarcophagus could be weld-connected or screwed to each other because of the unfavourable radiation situation during construction. Some parts were laid on each other only. The Sarcophagus was designed for a lifetime of about 30 years. In the past years, it withstood without any changes external influences like the earthquake of 1990. However, its lifetime is not secure and safe in the long-term. In 1997 the G7 States, the EU and the Ukraine agreed on the "Shelter Implementation Plan" (SIP) which had been jointly elaborated by Ukrainian and Western experts. The Sarcophagus is to be stabilised and a new, larger protection structure – "New Safe Confinement" (NSC) – is to be erected above it [7].

Investigation about the whereabouts of the nuclear fuel revealed that today more than 95 % (about 180 tons) of the fuel originally contained in the reactor are still within the Sarcophagus. These data could be obtained by measurements and later by borings (by approximation). Figure 8 shows a model about the situation assumed in Unit 4. The largest portion of the nuclear fuel that remained in the reactor melted after the accident due to decay heat. The molten fuel then flew via open-



Fig. 7. The Chernobyl nuclear power plant with the Sarcophagus around Unit 4.

ings into lower compartments. There it solidified with other substances and vitrified to a mass called "lava" which turned into a porous state in the course of time under the influence of radiation, heat and humidity. Today, the surface temperature of the lava is mostly in the range of room temperature. Considerable amounts of radioactive dust and fuel fragments are in the upper range.

4 Reasons for the accident and measures taken

4.1 Summary of the reasons for the accident

The technical root causes were massive deficiencies of reactor physics, the shutdown system and operational procedures of RBMK



Fig. 8. Model illustrating the present status.

reactors. At certain operating conditions these factor enabled an explosion-like power excursion.

The following deficits in terms of safety technology can be considered the root cause of the accident:

- Insufficient core design, particularly a very high void effect at operating conditions with high burn-up rates. Shortly before the test started the positive void effect, i.e. increase in reactivity at complete evaporation of the coolant in the pressure tubes, amounted to at least 5β ,
- Improper design of the shutdown system caused by the positive shutdown effect when control rods were fully withdrawn; this effect was considerably increased by the “peak bottom“ power distribution,
- Insufficient efficiency of shutdown device, among others due to the long period required to re-insert control rods,
- Missing automatic scram criteria (e.g. at low ORM value),
- Insufficient protection against operators who are blocking/disabling actuation of reactor protection.

Events that triggered the accident and contributed to its initiation:

- Deficient test programme. Since the test had been considered a mere test of electrical engineering, all aspects of reactor safety were not taken into account when elaborating the test programme,
- Operating personnel were not experienced enough and were not sufficiently involved in test preparation,
- Operating staff violated operational regulations:
 - The required ORM minimum value was too low for the first time on 25 April 1986 at 07:10 hours,
 - Reduction of power below the target range of the test programme of 700 to 1,000 MW; basically it is not permitted to operate the plant $< 700 \text{ MW}_{\text{th}}$ [2],
 - The permissible ORM was again below the minimum value when trying to stabilise plant output at $200 \text{ MW}_{\text{th}}$,
 - Adding of reserve pumps to the main coolant loops although limit values for maximum flow rate were not met,
 - Blocking of actuators that would have caused reactor scram.

The assessment of actions of operating personnel leads to the following conclusions:

- Operating personnel made several infringements, therefore, it can be concluded that these infringements had taken place in agreement with responsible shift staff and without having knowledge of safety technology,
- The plant was unstable particularly at low load operation, thus operating personnel had to interfere several times to take corrective action. The man-machine interface was not designed prop-

erly. Therefore, staff could not take the actions required in terms of safety technology,

- It is very difficult to assess the state of plant clearly: about 4.000 (!) data and values were displayed in the control room with a lot of measuring equipment being applied to test-specific measuring data during the test. Besides, the computer system and the hard copy of the ORM value were at a distance of some 50 meters away from the control panel in the reactor control room,
- Training of personnel was insufficient concerning physical processes important for the accident. Sufficient and comprehensive safety analyses of RBMK did not exist and important operating experience, as the previous event that had occurred in Unit 1 of the Leningrad Power plant had not been passed on,
- Simulators for RBMK did also not exist at that time. Thus, staff could not train operational processes, events and accidents under realistic conditions.

Insufficient safety culture is another root cause of the accident. In the years before 1986 there had been precursor events disclosing weak points specific to RBMK. The high void effect e.g. had been measured as early as in the 1970ies also in *Chernobyl*. In 1975, a reactivity event occurred in the Leningrad Power Plant resulting in reactor damage. However, due to other marginal conditions that accident was not so severe. The measures introduced following that event (e.g. increase of enrichment, automatic local control and protection system) were not able to sufficiently eliminate the influence of the positive void effect. The positive shutdown effect also occurred within the scope of commissioning tests performed 1983 in Ignalina and at Unit 4 of the *Chernobyl* reactor. All main technical root causes had been known before. Necessary measures that would have prevented the accident had been elaborated prior to the accident, however, they had not been implemented.

4.2 Retrofit measures taken

After the *Chernobyl* accident, retrofit measures had been taken in all RBMK reactors. Improvements were made in a first stage. These were aiming at the elimination of those deficits that led to the *Chernobyl* disaster. Short-term planning and realization of the post-*Chernobyl* modifications also indicate that important countermeasures had already been known before the accident had happened. Such measures included:

- Measures to decrease the positive void effect
 - Installation of additional fixed absorber rods (approximately 80),

- Increase of the minimum ORM to 43 to 48 instead of 26 to 30 (in exceptional cases a minimum of 15 is permitted) and
- Successive increase of fuel enrichment from 2.0 to 2.4, 2.6 and 2.8 % as well as application of the combustible neutron poison erbium.
- Measures to accelerate shutdown process and to increase shutdown reactivity
 - Correction of control rod design to avoid the positive shutdown effect,
 - Increasing the number of control rods that are inserted into the core from the bottom and integration of these rods into reactor safety,
 - Prevention that rods can be withdrawn completely and
 - Installation of a scrambling system comprising 24 control rods that are inserted within two seconds in comparison to modified control rods requiring 14 seconds to be inserted (at former times about 20 s).
- Measures to improve operations
 - Reduction of the interval for calculating the operational reactivity margin (ORM) and its display in the control room,
 - Alarm when the permissible ORM value is exceeded,
 - Increase of the calculation capacity to determine operating parameters of reactor physics and
 - Improvement of administrative regulations, e.g. scrambling when reactor power $< 700 \text{ MW}_{\text{th}}$ by automatic measures.

Because of these post-*Chernobyl* modifications in terms of reactor physics and shutdown system, it can be excluded that an explosion-like accident will repeat. However, despite these improvements, most RBMK still suffer from considerable safety deficits that had/have to be eliminated plant-specifically in order to continue plant operation in the medium term. This e.g. applies to:

- Retrofit of additional criteria triggering reactor scram,
- Development and installation of a diverse (rapid) shutdown system,
- Improvement and upgrading of the control rod cooling system to avoid positive reactivity effect upon emptying or introduction of gas,
- Development and installation of an independent emergency core cooling system for RBMK of the 1st generation,
- Increase of pressure relieve capacity from the pressure vessel to what is technically feasible and
- Measures within the framework of operational procedures as well as elaboration of event procedures and simulator training.

Many retrofit measures, mostly defined by international co-operation, were realised

in the past 25 years. However, some measures are still calling for action. In addition, it has to be remarked that also some basic problems like missing safety confinement cannot be eliminated at justified expenditure.

5 Summary

The most severe disaster in the history of nuclear energy happened on 26 April 1986. The *Chernobyl* accident and its extreme impacts were due to a combination of a reactor concept with basic design deficits in terms of safety technology and comprehensive failure of the organisations responsible for safety. After the accident, retrofit measures were taken within short term. These measures exclude repetition of such an accident.

The *Chernobyl* accident did not have any direct consequences for the technology and safety design of Western light water reactors because design, engineering and mode of operation of RBMK reactors differ completely from Western light water reactors. Besides, the accident did not reveal any

new findings about scientific-technical phenomena that had not been known before.

Against the background of the disastrous consequences of the accident, concrete measures were taken to increase nuclear safety of nuclear plants on national and international level. Besides, international agreements were made (conventions) according to which governments that operate nuclear plants committed themselves to take concrete action guaranteeing the global regime for nuclear safety. Comprehensive bi- and multi-lateral support programmes were realised at the *Chernobyl* site and the close vicinity to manage the consequences of the disaster. A separate paper entitled "Development of the nuclear safety regime and support programmes for *Chernobyl*" will address these support programmes.

References

- [1] Der Unfall und die Sicherheit der RBMK-Anlagen, *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit GRS (mbH)*, GRS-121, Februar 1996
- [2] Neuere Erkenntnisse zum Unfall im Kernkraftwerk *Tschernobyl*, Teil 1: Zusammenfassung und Bewertung der Informationen zur Anlage und zum Unfallablauf, *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH*, GRS-S-40, Februar 1987
- [3] Der Reaktorunfall in *Tschernobyl*, Unfallursachen – Unfallfolgen und ihre Bewältigung – Sicherung und Entsorgung des Kernkraftwerks *Tschernobyl*, *Informations-kreis Kerntechnik*, 3. Auflage, Februar 2006
- [4] *World Nuclear Association*: <http://www.world-nuclear.org/info/inf45.html>
- [5] Power Reactor Information System der *IAEA*: <http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>
- [6] 20 Jahre nach dem Unfall in *Tschernobyl*: Ursachen, Ertüchtigungsmaßnahmen und Status der RBMK-Reaktoren heute, *J.P.Weber, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH*, Vortrag, 21./22. November 2006
- [7] *GRS-Projekte für Tschernobyl*, <http://www.grs.de/content/grs-projekte-für-tschernobyl>, 22.04.2010
- [8] Leningrad Nuclear Power Plant: http://www.lnpp.ru/new_lnpp/eng-htm/cont/proizv/tehnology/51a.htm ■

The reactor accident of Chernobyl and its consequences continue to be among the most important topics of international politics even now, 25 years after the event. The international community, often with Germany in the lead, takes the concerns caused by the accident seriously and responds realistically to the questions raised by the accident. A comprehensive action program has been initiated. The reactor catastrophe of Chernobyl has shown very clearly that protection from the hazards of the peaceful uses of nuclear power, as defined as a main goal in national atomic energy laws, depends not only on the safety of nuclear power plants operated in the respective country but also on the safety of such plants run in other countries. Decommissioning the nuclear power plants in one's country therefore is not going to remove the risk of potentially becoming a victim of accidents elsewhere. The decision for or against using nuclear power, however, continues to be taken nationally. The risk can be further reduced only by ensuring worldwide the highest possible level of safety of nuclear power plants.

The Chernobyl incident de facto initiated the establishment of a comprehensive international safety regime as well as extensive measures strengthening international cooperation in nuclear safety and radiation protection. A whole system of international conventions has since been established. Many multilateral support programs as well as bilateral or trilateral projects with active German participation have helped Ukraine to overcome the consequences of the Chernobyl accident on the part of industry and also establish and strengthen, in technical terms, an independent licensing and supervisory authority under nuclear law.

Development of the nuclear safety regime and support programmes for Chernobyl

Gunter Pretzsch and Hartmuth Teske, Berlin

The reactor accident of Chernobyl and its consequences continue to be among the most important topics of international politics even now, twenty-five years after the event. The international community, often with Germany in the lead, takes the concerns caused by the accident seriously and responds realistically to the questions raised by the accident. A comprehensive action programme was initiated.

The reactor catastrophe of Chernobyl has shown very clearly that protection from the hazards of the peaceful utilisation of nuclear power, as defined as a main goal in national atomic energy legislation, depends not only on the safety of nuclear power plants operated in the respective country but also on the safety of such plants run in other countries. Decommissioning nuclear power plants in one's country therefore is not going to remove the risk of potentially becoming a victim of accidents elsewhere. The decision for or against using nuclear power, however, continues to be taken nationally. The risk can only be reduced further by ensuring worldwide the highest possible safety level of nuclear power plants.

fission products (noble gases like krypton and xenon) were discharged completely as well as large portions of the easily volatile products like iodine and caesium.

The explosion considerably destroyed the reactor building, deaerator wing, turbine hall and other buildings. Isolation of the highly damaged buildings from the surroundings was among the most important tasks in order to avoid further release of highly radioactive material into the environment.

Although there did not exist any disaster response and/or emergency plans for that kind of disaster and destruction, and no experience had been made with such an accident, immediate action had to be taken in order to reduce radiation exposure of personnel and radioactive release into the environment. These measures – taken between 26 April to 2 May 1986 – comprised the prevention of a new chain reaction as well as further heating up of the fuel elements, sufficient shielding from direct radiation and minimisation of the release of radioactive substances.

Firstly, fire brigades tried to limit release of radioactivity from the damaged reactor, i.e. they pumped cooling water – about 200 to 300 tons per hour – from the intact storage tank of Unit 3 to cool the destroyed reactor core of Unit 4. However, this measure was stopped after a couple of hours because cooling of the graphite columns failed. Besides, contaminated water escaped from the power plant.

Thus, military helicopters were employed to drop materials into the reactor to extinguish the graphite fire that had developed in the meantime. These materials comprised some 40 tons of boron carbide to avoid a new chain reaction, 800 tons of dolomite to reduce heat development and to quench the graphite fire, 2,400 tons of lead to reduce heat development and to

1 Immediate action to reduce the impacts of the accident – Erection of the Sarcophagus

The explosion of Unit 4 of the Chernobyl nuclear power plant on 26 April 1986 and the subsequent fire in the reactor core resulted in a massive release of radioactive material into the environment and the ejection of fuel debris into the surroundings of the site. During the first ten days after the accident, radioactive substances with a total activity of approximately 12×10^{18} Bq (12 Exa-Becquerel) were released into the atmosphere. Gaseous radioactive

Authors' address:

Dr. Gunter Pretzsch

Head of Radiation and Environmental Protection Division and

Dr. Hartmuth Teske

Head of International Programmes Department in the Division of Projects and International Affairs

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Germany

shield gamma radiation as well as 1,800 tons of sand and clay as filter materials to precipitate radioactive materials released.

Initially, the materials thrown from the helicopters increased the temperature and thus the release of radioactive materials. On 6 May 1986, a nitrogen cooling system, reducing temperature and radioactive release, could be installed successfully below the reactor.

According to estimates, the entire mass of irradiated core fuel from core loading, originally amounting to 1,659 assemblies with a total of 190.2 tons of fuel, that remained in Unit 4 after the accident, now is estimated to correspond to some 96 %, i.e. more than 180 tons with a total activity of some 7×10^{17} Bq (Becquerel) with different modifications. Measurements taken externally to quantify the release of radioactivity and contamination after the accident as well as measurements and borings in the Sarcophagus confirmed these estimations.

A Sarcophagus (shelter) was erected within a couple of months around the destroyed Unit 4 in order to further reduce the release of radioactive materials from the destroyed reactor as quickly as possible, to shelter the environment from radiation and to isolate the heavily damaged buildings. The Sarcophagus was built by using parts of the severely damaged reactor building and turbine hall. Due to the radiation situation and the urgency, there was no time to assess the site and to plan the project as would have been done under normal conditions when realising such a complicated building. The debris of the destroyed Unit, the condition of which is hardly known, supports parts of the new building structure. Many parts of the new construction had to be assembled by remote control, i.e. the parts were not always positioned precisely at their location that had been intended originally. Besides, some important construction elements could not be bolted or welded, on their positions.

The construction of the Sarcophagus comprises monolithic separation walls made of reinforced concrete. The walls' thickness amounted to several meters and a height of up to 60 m. They were erected between Units 3 and 4 in the deaerator wing, turbine hall and auxiliary buildings. A concrete cascade protection wall was also erected on the northern side, which also encapsulates radioactive debris ejected.

Two air shafts of reinforced concrete on the eastern side as well as the western wall of the reactor building were used as supporting construction for two steel beams. Steel tubes with a diameter of 1.2 meters were laid on these beams and a roof construction of steel and profiled roof plates was put on it, closing the destroyed reactor building on the top.

On November 30, 1986, the Sarcophagus was completed after a construction period of only some six months. The competent Ministry of Mechanical Engineering that disposed about civilian as well as military units had managed the erection activities. Against the background of time pressure, the erection of the Sarcophagus as immediate measure and designed for a limited lifetime of 20 to 30 years was a huge technical and logistical performance. The Sarcophagus and the encapsulated ruin of Unit 4 are also called "object shelter".

In 1986/87, the Ukrainian government was of the opinion that Units 1, 2 and 3 of the Chernobyl nuclear power plant could only be further operated if the Sarcophagus was built, intensive and comprehensive decontamination activities were carried out and the new residential area of Slavutich was built for power plant personnel outside the 30-km exclusion zone.

disaster. Additionally, the former German Chancellor *Helmut Kohl* initiated an international debate in May 1986. That initiative was supported worldwide and resulted in the special IAEA (*International Atomic Energy Agency*) session entitled "Measures to increase international co-operation in nuclear safety and radiation protection". It took place from 24 to 26 September 1986.

According to suggestions of the German Government, the IAEA Board of Governors met prior to the session on 21 May 1986, and decided to set up an expert group as long-term measures. This group was to deal with the improvement of co-operation in nuclear safety (including safety standards) and the development of an extended nuclear safety IAEA programme. As early as in August 1986, two treaties about early notification and mutual assistance were drafted at an expert meeting. Besides, a report was drafted that analysed the technical aspects of the Chernobyl accident.

On 26 September 1986, the IAEA General Conference passed the treaties on

- early notification in the case of nuclear accidents and
- assistance in the case of nuclear accidents and radiological emergencies.

51 states – among them Germany – signed those treaties on the same day (in force in Germany since 15 October 1989, see Figure 1). Further proposals and recommendations were made at the special session of

2 Nuclear safety regime after Chernobyl

2.1 Immediate international activities after the Chernobyl accident

Following the German proposal, the G7 (group of the seven largest industrialised nations) summit held in Tokyo from 4 to 5 May 1986, was dealing with the Chernobyl

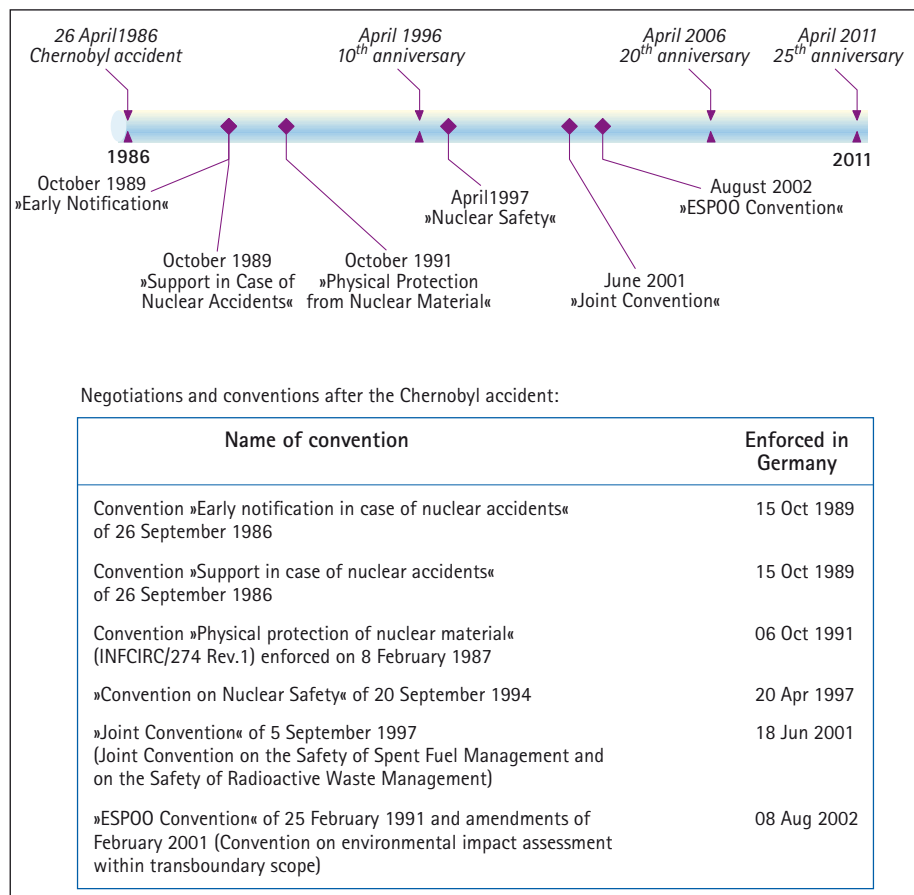


Fig. 1. International conventions as element of the global safety and security regime

the *International Nuclear Safety Advisory Group – INSAG* that is advising *IAEA*. These can be considered as “kick-off” for long-term, increased international co-operation in nuclear safety and radiation protection (extended nuclear safety programme of *IAEA*). This refers to the:

- establishment of a comprehensive safety culture and establishment of an international “safety regime”,
- establishment of fundamental safety principles for existing and new reactors,
- revision of the recommended *IAEA* Safety Standards,
- protection of nuclear plants against terrorist attack,
- improvement of the system of international nuclear liability regime,
- extension of the Operational Safety Review Team OSART and its programmes (missions to check operational safety).

A new phase of international co-operation in nuclear safety and radiation protection began with the *IAEA* Vienna Conference. Germany was aiming at setting the highest safety standards worldwide, giving top priority to the latest state of the art in science and technology, decreasing the low probability of accidents in nuclear power plants and creating an effective international nuclear liability regime [BBR 86].

2.2 Definition and structure of an international safety and security regime

An *IAEA* Conference took place in September 1991 dealing with the creation of a global safety policy for the peaceful utilisation of nuclear energy. It was also recommended to check comprehensively older nuclear power plants and to shut down those plants that would have failed the test. In June 1994, these recommendations resulted in the Convention on Nuclear Safety (CNS) that is aiming at increasing the safety of nuclear power plants worldwide. Among others, the signatory states commit themselves to:

- achieving and keeping a high standard of nuclear safety. Nuclear power plants not meeting this target have to be shut down quickly,
- guaranteeing effective legal and independent checks of nuclear safety by authorities,
- participating in frank international exchange to guarantee high nuclear safety among others by participation in review meetings that take place every three years.

A new kind of influence aiming at the improvement of nuclear safety in the *IAEA* member states is possible through the mechanisms of review meetings (5th conference in April 2011) and the intensive international co-operation like e.g. volun-

tary control as well as assessments and missions. The focus is more on transparency and instruments of confidence-building instead of strict surveillance and sanction systems.

A convention on nuclear disposal was also adopted in 1997: “Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management”. This convention also uses the mechanisms of review meetings.

The range of international treaties is completed by conventions about the liability of nuclear accidents and nuclear safety.

3 Multilateral assistance programmes for Chernobyl

3.1 Multilateral action programme “Nuclear safety in Eastern Europe”

At the beginning of the 1990s, it became clearer that large financial and personnel expenditures were required to improve nuclear safety in Eastern Europe.

Following an initiative of the German Federal Government, safety in East-European nuclear power plants was a priority topic on the agenda of the G7 summit (G7: group of the seven – Germany, France, Italy, Japan, Canada, the United Kingdom, the United States of America and the European Union, see *Figure 2*) held in Munich in 1992. Prior to the summit, a G7 Working Group “Nuclear Safety” was set up and entrusted to assess the current state of nuclear safety in Eastern Europe at that time. This was the base for initiating a “Multilateral Action Programme for Improving the Safety of all Soviet-designed Reactors in Central and Eastern Europe” at the summit.

For more than two decades, this action programme was the conceptual base of endeavours taken worldwide to improve nuclear safety in East-European nuclear power plants. The East-European states were offered support to overcome current safety deficits, to shut down unsafe nuclear power plants as soon as possible and to restructure their energy supply. The national organisations in charge of safety were to be strengthened to assume these tasks. The G7 states expected 100 % co-operation from the East-European states. They also called on other Western states to make their contribution to the action programme.

The action programme differentiates between short-, medium- as well as long-term targets. Short-term targets relate to improving safety of plant operations, short-term technical improvements in the plants based on safety assessments and improvement of the licensing and supervisory practice within the scope of nuclear legislation. Medium- and long-term targets refer to in-

vestigations on replacement sources of energy in order to be able to shut down those plants that are less safe as well as upgrading to catch up with modern plants in terms of safety technology.

At that time the Western states agreed that the RBMK reactors (Reactor *Bolschoi Moschtschnosti Kanalny*” which translated into English means “Large-capacity Reactor of Channel Type” – technology: graphite-moderated boiling water pressure tube reactor of Russian design, type *Chernobyl*) and the pressurised reactors VVER-440/V-230 (water-water-energy-reactor (pressurised water reactor of Russian design) were not to be operated longer than necessarily required. Construction of new RBMK reactors was to be abandoned. However, the Western states were unable to enforce the immediate shutdown of older plants with serious safety deficits. Instead, it was agreed to negotiate with the states concerned about the limitation of residual lifetime of these power plants based on safety assessments and estimates of energy demand and offer.

Issues of nuclear safety in Eastern Europe have continued to remain an important topic on the agenda of the annual G7 economic summits and the support granted by Western industrial states, also after the Munich summit in 1992.

3.2 Concepts to guarantee the safety of the damaged unit

In the time following the erection of the Sarcophagus, its status was further improved, e.g. by sealing of cavities, clearances and gaps against rainwater, installation of measuring equipment to check the radiation situation and to improve safety. However, despite these measures, it had been clear from the very first beginning that due to the limited lifetime and the uncertainties concerning the stability of the sarcophagus, a long-term concept had to be developed for the safe confinement of the damaged unit.

Three variants were discussed when planning the long-term future of the Sarcophagus: backfilling with concrete, stabilisation of the existing construction, and erection of a new shelter construction. In 1992, the Ukrainian Government invited for an international tender awarded with US \$ 10,000 – a concept was to be developed bringing Unit 4 into a safe status.

The participants taking part in the competition did not meet the requirements. The French company *Campeon Bernard SGE* presented the best solution: they favoured a new protective construction. In support of the Ukrainian Government and without additional tender, the European Commission awarded in 1994 a feasibility study about upgrading of the existing

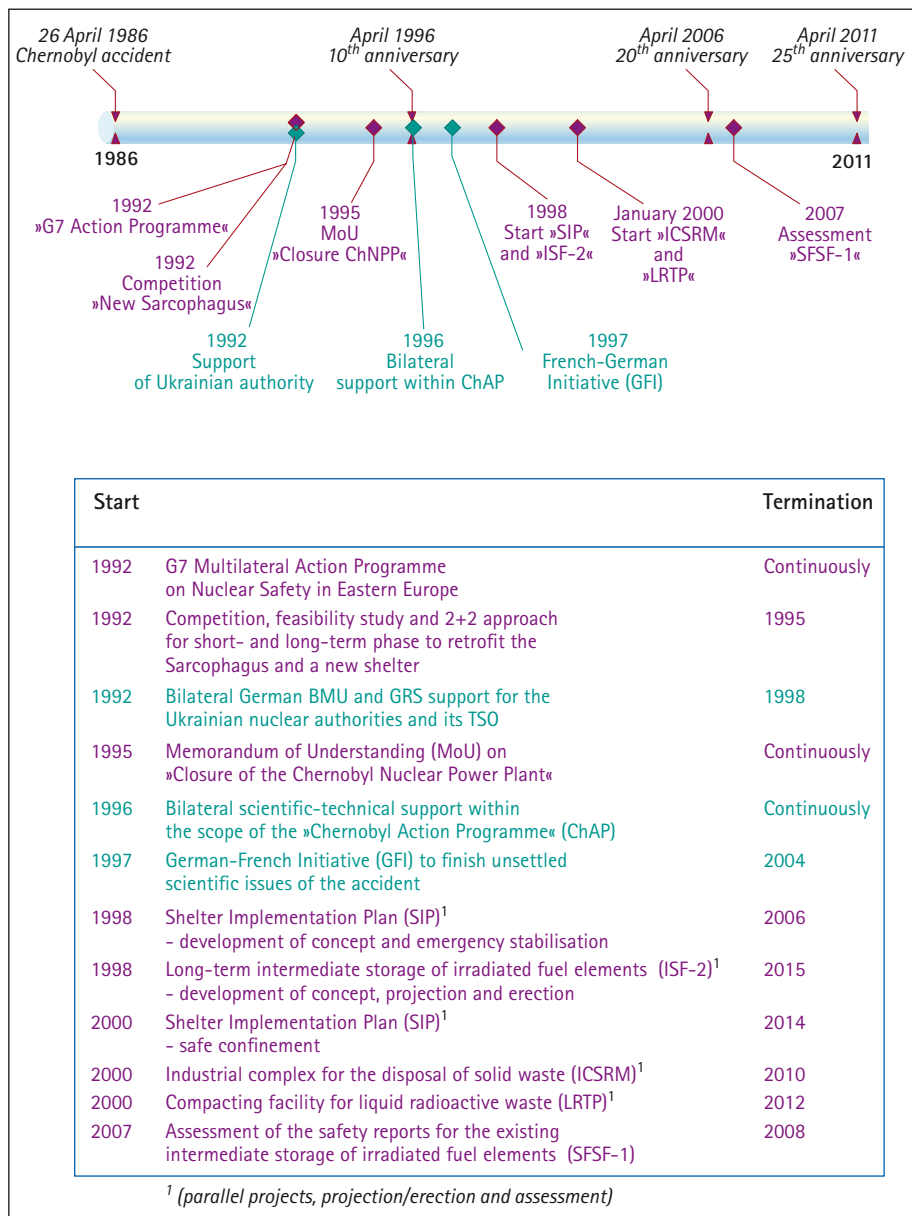


Fig. 2. Bi- and multilateral support for Chernobyl.

construction and erection of a new protective building to the consortium "Alliance" that was headed by the aforementioned French company. Bouygues (France), SGN (France), Taywood Engineering (Great Britain), Walter Bau (Germany) as well as Russian and Ukrainian partners were also members of the consortium.

Finally, the Alliance suggested Confining the destroyed Unit 4 and the directly adjacent Unit 3, still running at that time, by a new construction (Shelter 2). The related costs were estimated to amount to US\$ 3 to 4 billion.

The Ukrainian Government rejected the Alliance concept, among others due to the fact that Unit 3 would have to be shut down. However, according to the tender documents, normal operation was required during the stabilisation and erection of Shelter 2. Therefore, Ukraine did not further pursue that concept. Apart from that study, additional independent proposals were made,

e.g. also by the German construction company Hochtief. However, those concepts were also not taken into account.

Instead, the European Commission jointly with Ukraine opted for a different approach following a discussion in Brussels in September 1995. The feasibility study of the Alliance was also considered by the new approach. The approach agreed upon in Brussels comprised four actions (2+2 approach for short- and long-term phase) within the scope of TACIS (Technical Assistance to the Commonwealth of Independent States – CIS):

- 1 definition of safety targets and construction criteria for stabilising the existing Sarcophagus
- 2 definition of the task for stabilising the existing Sarcophagus
- 3 definition of safety targets and construction criteria for a new confinement and
- 4 definition of terms of reference for the construction of a new confinement construction

A study, in which GRS also participated, was made defining the requirements for short-term safety covering roughly the next 15 years according to actions 1 and 3 and the long-term safety for about the next 100 years. Concepts of practical measures according to actions 2 and 4 were developed within a second parallel study.

The results of this study differ fundamentally from the aforementioned concepts of Alliance and Hochtief: firstly, the study compiled all concepts existing until then, besides, new concepts were added and finally the concepts were assessed comparatively on a uniform basis. This approach resulted in the "Recommended Course of Action", which was to allow flexible future proceedings.

The studies formed the basis for the discussions between the G7 Working Group "Nuclear Safety" and the Ukrainian Government about the further course. The EU placed a subsequent order, i.e. based on the "Recommended Course of Action"; the so-called "Shelter Implementation Plan" (SIP) was to be drafted. This was a clear step heading for future progress.

3.3 Shelter Implementation Plan (SIP) and Chernobyl Shelter Fund (CSF)

At the G7 Summit in Naples in 1994, the G7 states offered Ukraine an action plan to support decommissioning of the entire Chernobyl nuclear power plant. Following this offer, the Ukrainian president Kuchma agreed on shutting down Chernobyl in 2000 and on the support programme that was signed in December 1995 by the G7, the European Commission and the Ukraine: "Memorandum of Understanding on the Closure of the Chernobyl Nuclear Power Plant" (MoU).

The action plan comprised measures aiming at the reformation of the energy sector, the creation of substitute capacities through energy projects financed by loans, the improvement of nuclear safety for the limited further operation of Unit 3 as well as coping with social consequences resulting from shutting down the Chernobyl site. The tasks to be taken at the Chernobyl site involved preparation and realisation of shutting down of Units 1 to 3 including the disposal of radioactive waste and spent nuclear fuel. Besides, the tasks also comprised turning the existing shelter of Unit 4 into a long-term stable and ecologically safe system, i.e. further precaution against radiological hazards for the environment and the population and termination of radiation supervision by authorities (see also GRS 96)].

At the G7 Summit taking place in Denver in 1997, the Ukraine was granted funds amounting to initially US\$ 300 million for restoring the Sarcophagus. At the first

pledging conference held in New York in November 1997, other states were also asked to co-finance the projects.

Since 1997, the *European Bank for Reconstruction and Development (EBRD)* has been administering the “Chernobyl Shelter Fund” provided by the donor states. The Ukraine and the *EBRD* signed the framework agreement about the activities of the CFS in November 1997 and the Ukrainian Parliament ratified it in February 1998. The short- and long-term measures for restoring the Sarcophagus (action 2 and 4 of the aforementioned approach) formed the basis for the CFS. The plan of measures was called “Shelter Implementation Plan” (SIP).

The original plan involving the decommissioning of the entire *Chernobyl* site and disposal of nuclear fuel in the SIP was abandoned for financial reasons. These tasks were handed over to the responsibility of the Ukraine.

The SIP comprises five main targets:

- 1 reduction of the probability that the Sarcophagus might collapse (geo-technical and seismic investigations, stabilisation, shielding, surveillance)
- 2 reduction of radiological effects (treatment of dust, emergency measures)
- 3 improvement of nuclear safety (characterisation of fuel-containing material, water treatment, prevention of criticality)
- 4 improvement of personnel safety and better environmental protection (radiation protection, labour protection, fire protection, monitoring systems, information systems) and
- 5 development of a long-term policy for transferring the confinement into a long-term stable and ecologically safe system (strategy and technology to remove fuel-containing materials, new confinement, partial disassembly of the Sarcophagus).

The objectives of the SIP aiming at restoring the Sarcophagus are pragmatic and planned for a reasonable period. The Sarcophagus is to be made safer in the medium term in order to gain time for long-term solutions comprising the disposal of radioactive waste. A concrete bundle of tasks was defined, corresponding costs were estimated and a schedule with milestones was drafted. In parallel, a schedule – based on those milestones – was also developed for the related licensing procedure. Individual projects were derived from the bundle of tasks. If financing is secured, such projects can start early.

The SIP is made up of 22 tasks with a total of 297 working steps. The scheduled project duration is eight to nine years, with total costs amounting to US\$ 768 million. The main targets of the SIP will be achieved after having realised the following two project steps:

First project step: development of a concept and emergency stabilisation

Second project step: safe confinement.

In the first project step, particularly pressing tasks (Early Biddable Projects) were defined that were to be realised in the years 1998 to 2000. This also comprised the integration of planned, current or finished bilateral and Ukrainian projects and an optimisation of the licensing procedure. The following results were achieved within the first project step until the beginning of 2001:

- finalisation of first stabilisation measures at the stack and roof girders B1/B2,
- determination of further necessary stabilisation measures,
- development of a concept for a new confinement with a lifetime of more than 100 years,
- development of first concepts for the later removal of fuel-containing material,
- development of a concept for managing water in the Sarcophagus and
- development of a new concept for dust control.

The following activities were part of the second project step of SIP:

- planning and realisation of stabilisation measures,
- tendering, installation and operation of monitoring systems,
- development of techniques to handle fuel-containing masses,
- development and construction of a new Sarcophagus and
- disassembly or stabilisation of instable parts of the current Sarcophagus.

Further stabilisation measures at the Sarcophagus were taken until 2006, e.g. at the western wall (see *Figure 3*). The second project step of the SIP will be finished once a New Safe Confinement (NSC) has been erected. The NSC is an important precondition for realising further activities aiming at the restoration of the site. The removal of radioactive substances from the old Sarcophagus and its disassembly are not part of the SIP.

The NSC is an arch-shaped metal construction that will be assembled on the western construction site and then pushed over the Sarcophagus and the turbine hall of the nuclear power plant. The NSC is to isolate safely the structures and radioactive materials for at least 100 years from the environment. Besides, the disassembly and retrieval of radioactive material with corresponding equipment and devices is to be made possible.

The tender documents for the detailed construction of the NSC were published in March 2004. Two out of three tenderers submitting their offers in November 2004 were asked to make commercial offers, namely the consortium *Novarka* with French management and the US Ameri-



Fig. 3. Stabilisation measures at the Western wall of the sarcophagus.

can-headed consortium “*CH2M Hill*”. Assessment and checking of the offers lasted until February 2006.

In July 2007, the donor countries of the CSF authorised the *EBRD* to grant first funds for project realisation. In August 2007, the contract was signed with *Novarka*. According to the current schedule, the NSC is to be completed in 2013 including phases I design and II erection and commissioning.

Erection of the NSC comprises six packages of licensing – LP-1 to LP-6:

- LP-1: preparation of the construction site with construction platform and adjacent areas,
- LP-2: auxiliary systems at the site,
- LP-3: foundations for construction and transport zones,
- LP-4: disassembly of the common stack of Units 3 and 4,
- LP-5: design documents of the NCS (arch-shaped construction, main crane system, foundations in the service area, preliminary safety documentation),
- LP-6: complete design of the NSC (technical building, auxiliary devices and systems, plan of erection and revised safety documentation).

The state of fulfilment of the SIP was assessed differently. According to *EBRD*, the tasks are fully met after erection of the NSC (see *Figure 4*). According to other assessments, financing and realisation of further procedures are necessary.

A licensing consultant – LC – was set up to support the Ukrainian licensing and supervising authority *SNRIU* in parallel to the SIP activities. The SIP-LC is a consortium of US-American, French and German expert organisations.

In 1997 it was estimated that realisation of the SIP amounted to US\$ 758 million



Fig. 4. Schematic depiction of the New Safe Confinement.

(plus 10 million US\$ for supporting the licensing procedure) and required a realisation period of seven years (1998 to 2005). At the first donor conference, 25 countries agreed to provide funds amounting to about US\$ 400 million, US\$ 50 million of which by the Ukraine in the form of non-cash benefits. Realisation of the SIP started from there by setting up a project management unit (PMU) in April 1998. Germany organised a second donor conference – the CSF in Berlin – in July 2000. Another 335 million euros were granted. In 2003, the PMU presented a modified schedule and a cost estimate of more than US\$ 1.1 billion. Further 182 million euros were promised in May 2005, 49 million euros of which from the EU, 22 million euros from the Ukraine and for the first time Russia granted US\$ 10 million.

Currently the CSF has sufficient means for completing phase I. However, the funds are not sufficient to cover the entire costs of the NSC.

In the past years, the G8 states and the EU, as most important donors to the CSF, have reaffirmed their engagement in completing the SIP – lastly at the G8 summit in Muskoka in July 2010: “In view of the 25th anniversary of the *Chernobyl* reactor accident we will take all necessary steps to finalise the projects ensuring safety and stability of the *Chernobyl* site.”

In July 2010, the *Novarka* consortium presented updated cost estimates for the realisation of the NSC. Accordingly, the cost for the NSC will roughly double. Therefore, shortly before the 25th anniversary, another donor conference is to be held in Kiev in April 2011 in order to collect the missing amount of 600 million euros. With currently 60 million euros, Germany has been the largest donor so far, either directly or via EU contributions.

Currently it can be assumed that the NSC will be finished only after 2013. It has not yet been settled how to finance any further activities required, like the disassembly of unstable roof structure or the disposal of nuclear-fuel containing radioactive material from the Sarcophagus.

3.4 Disposal of liquid and solid radioactive operational waste

3.4.1 Disposal concept

According to former waste concepts of that time, disposal of all solid and liquid radioactive wastes of the *Chernobyl* site was to be planned and realised when decommissioning and disassembling the plant. Since reactor operation had started in May 1978, the wastes were roughly sorted according to low-, medium- and high- level waste and stored in interim storage facilities at the site. Solid waste was collected in concrete bunkers and liquid wastes in tanks with capacities of 1,000 m³ and 5,000 m³.

Existing wastes as well as waste accruing in connection with the decommissioning of Units 1, 2 and 3 were to be conditioned and finally stored. The wastes from the decommissioning of the accident Unit 4 also have to be added. Solid wastes are mainly conditioned by volume reduction, i.e. fragmentation and compacting with hydraulic high pressure compactor or incineration. Liquid wastes, mainly evaporation concentrates and sludge, filter material and ion exchanger resins, are solidified through immobilisation in concrete (grouting). Conditioned wastes are filled in 200-l-steel casks and transported in concrete vessels to the final storage site.

The *European Commission* supports the *Chernobyl* nuclear power plant within the scope of the TACIS Programme with the erection of a conditioning plant for solid radioactive waste and a final storage facility.

The Ukrainian responsible licensing authority is equally supported by TACIS projects.

3.4.2 Industrial complex for waste disposal

The ICSRM (Industrial Complex for Solid Radwaste Management) project is being realised by the industry within the framework of the *European Commission's* TACIS Programme in order to dispose of the waste from the *Chernobyl* nuclear power plant.

Originally the ICSRM was sub-divided into three lots, however, within the course of the project, corrections and adjustments had to be made. The first lot comprises a plant for retrieval of solid wastes from the interim storage (concrete bunker) at the site of the nuclear power plant (see *Figure 5*). The wastes are packed in containers and transported to a conditioning plant, second lot, where the wastes are sorted according to structure and activity, and, if necessary, fragmented and compacted. Combustible solid as well as liquid wastes are treated in the incineration plant. The waste reduced by volume is filled into 200 l steel casks and compacted with concrete sand mortar. The activity of all solid wastes is estimated to amount to 100 TBq (2,700 Ci).

The facilities for retrieval and conditioning of radioactive wastes are operated by the *Chernobyl* nuclear power plant. *NUKEM Technologies GmbH* erected both plants that are currently being commissioned.

The third lot, an engineered near-surface disposal facility (ENSDF) is located within the 30-km exclusion zone at the VEKTOR site, which is an industrial complex for waste disposal and final storage close to Buryakiva, at a distance of about 18 km southwest of *Chernobyl* (see *Figure 6*). The state-run company Technocentre operates the plant. The design of the ENSDF is similar to the Spanish repository of *El Cabril*. The VEKTOR plant is designed for low- and medium-level conditioned wastes of the *Chernobyl* site. High-level, long-lasting solid wastes have to be stored in an interim storage at the *Chernobyl* nuclear power plant.

The total capacity of the final storage is limited to 50,210 m³ due to the activity of the waste casks. 30 years are planned for storing and another 300 years for regulatory supervision. *NUKEM Technologies GmbH* jointly with Ukrainian companies also erected the final storage facility in addition to the first and second lot. Construction activities started in July 2004 and were completed two years behind schedule at the end of 2009 due to technical, organisational and financial problems.

From the very beginning, the *European Commission* supported the responsible



Fig. 5. Facility for retrieval of solid waste – ICSRМ – above the concrete bunker.

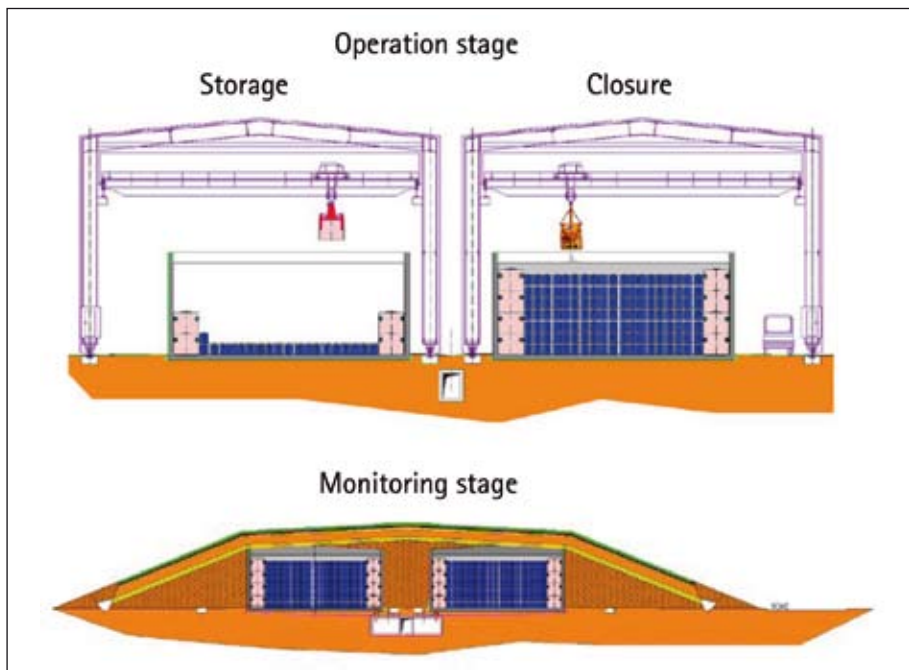


Fig. 6. Engineered near-surface disposal facility – ENSDF – for solid low- and medium-level conditioned wastes at the VEKTOR site.

Ukrainian authority *SNRIU* with expert supervision and licensing of the ICSRМ. Within the scope of TACIS, the expert organisations *GRS* (Germany), *IRSN* (France), *BELV* (Belgium) and *ISPRA* (Italy) as well as the Ukrainian *SSTC* carried out technical expert supervision during the entire period of more than ten years from 1999 to 2010. This comprised the assessing of licensing documents of the ICSRМ, lot 1 to 3, e.g. technical specifications and safety reports. The Ukrainian supervisory authority granted partial licenses for the design, erection and commissioning based on the aforementioned expert assessments.

In 2011 the authority will probably also grant the license for the ICSRМ plants for retrieval and conditioning of solid wastes, lot 1 and 2; however, requirements will be made. The expert organisations *GRS* and *ISPRA* have assessed the licensing documents from design to erection from a safety-related point of view. The applicant widely eliminated the deficits that were detected. However, it still has to be proven that the acceptance criteria are being met.

Compared to Western safety standards, considerable deficits were detected in lot 3, final storage *ENSDF*, i.e. the documentation presented as well as the plant con-

struction did not comply with Western requirements. Despite the recommendations of the Western experts, the competent Ukrainian authority *SNRIU* granted a limited license (commissioning and operation) at the end of 2009 provided that the operator only fills two out of a total of 22 compartments with conditioned wastes from the *Chernobyl* nuclear power plant (lot 2 and the compacting facility for liquid radioactive waste). After having collected operating experience and after having made improvements (if necessary), a new safety check will be required before the plant license will be prolonged.

By the end of 2010, the TACIS project supporting the licensing authority in connection with the ICSRМ plants had been finished. The Ukrainian *SSTC* will continue alone assessing the safety-related aspects of commissioning.

3.4.3 Compacting facility for liquid radioactive waste

The liquid radioactive waste that has been produced since commissioning of the reactors has been stored in 12 steel tanks with a capacity of 1,000 m³ at the *Chernobyl* site. The steel tanks are stored in six concrete vessels with a capacity of 5,000 m³ and are lined with steel sheets.

Within the scope of decommissioning, a compacting facility for low- and medium-level liquid wastes was planned and erected close to the tank. The Liquid Radwaste Treatment Plant (LRTP) is financed by the Nuclear Safety Account (NSA).

That waste mainly comprises evaporation concentrate, ion exchanger resins and the filter material perlite. The total estimated activity of the liquid waste amounts to 418 TBq (11.300 Ci). That waste is to be treated in the compacting plant, solidified through immobilisation in concrete, filled into the 200-l-steel casks and stored in the final storage plant *ENSDF*. The planned operating time of the plant for solidification of existing liquid wastes is to amount to ten years. Additional liquid wastes from the decommissioning of Units 1 to 3, the operation of the fuel element storage facility ISF-2 and the new safe confinement over Unit 4 are also to be conditioned in the compacting plant.

The LRTP project was started in 2000, in parallel with the ICSRМ. It was scheduled to be completed in 2004. Western companies (*Belgomat*, *SGN*, *Ansaldo*) planned the plant, which is based on a fully automatic plant immobilising liquid waste that was developed in France. Deficient waste characterisation and plant design delayed the licensing procedure and erection for two years. Finally, the Western partners withdrew from the project in 2006. Consequently the *Chernobyl* nuclear power plant decided to complete and operate the facility alone according to a



Fig. 7. Treatment plant for liquid low- and medium-level waste – LRTP.

modified concept, e.g. as regards retrieval of liquid wastes from the storage vessels (see Figure 7).

Additional financial funds were required from the NSA; the EBRD granted these means only in connection with stringent project planning and control. Cold commissioning of the LRTP is to be realised before the end of 2011; normal operation is to start one year later.

Within the scope of the support programme for the licensing authority, GRS, SSTC and IRSN assessed the licensing procedure of the compacting facility LRTP in parallel to the industrial activities. Safety reports and further licensing documents have been checked and assessed since 2000. Sufficient characterisation of the radioactive inventory and protection from radioactive radiation within the technical procedure are the basic safety aspects when solidifying liquid waste. Besides, waste casks have to meet the acceptance criteria for final storage.

The expert opinions about safety reports on design and construction revealed safety-related deficits, and safety demonstrations were missing. Among others it was criticised that the radiological characterisation of liquid radioactive waste as well as the guarantee of the acceptance criteria for the waste vessels in the final storage ENSDF were still missing.

Now the Chernobyl nuclear power plant has to present an updated safety report that also takes into account design modifications of the LRTP. Then it is planned to assess the report anew.

3.5 Disposal of irradiated fuel elements

3.5.1 Disposal concept

The disposal of irradiated fuel elements (FE), which are currently being stored in

the spent fuel pools of Unit 1 and 3 and the wet storage facility at the site, is another important task in connection with decommissioning and disassembly of the Chernobyl nuclear power plant. According to plans, the fuel elements are to be stored intermediately for a period of up to 100 years in storage casks close to the Chernobyl site. A concept developed and used in the USA is to be employed: welded steam casks are to seal the elements and storage modules made of concrete are to protect the environment from radiation. The wet storage facility existing at the Chernobyl site for irradiated fuel elements SFSF-1 is to be used as interim storage until the new long-term Interim Storage Facility ISF-2 is completed.

3.5.2 The wet storage facility

The SFSF-1 (Spent Fuel Storage Facility) was erected between 1983 and 1986 as independent wet storage facility for irradiated RBMK fuel elements from the Chernobyl reactors and was taken into operation in September 1986. The facility comprises an administration wing, a chemistry area and the transport-related area where the fuel elements are unloaded and stored in altogether five storage pools with a total of 21,900 FE storage positions. About 23,000 positions are required for intermediate storage of all existing fuel elements including irradiated absorber elements, i.e. reserve capacities are also needed. The storage facility was designed for a lifetime of about 30 years.

The operators of the SFSF-1 drafted a concept for ageing management and presented a safety report about the further utilisation of the interim storage facility. Within the scope of the EU-funded TACIS project, GRS and IRSN assessed jointly with the Ukrainian SSTC the safety report about the existing intermediate storage facility in

view of the extension concerning lifetime and capacity. Findings made during a site inspection in January 2008 were also incorporated. The statement was handed over to the Ukrainian safety authority in February 2008. Compared with Western safety standards, the experts outlined considerable deficits concerning the documentation presented, civil engineering, design and operation of the facility. In June 2008 the Ukrainian authority prolonged the license under the condition that the operator realise a number of improvements by the end of 2012 and carry out a second safety check.

3.5.3 The intermediate storage facility ISF-2

The dry storage facility planned by Western companies (Framatome/Areva) is based in on the NUHOMS concept developed and applied in the USA: several fuel elements are enclosed tightly in a double-wall steel cask of 2 cm wall thickness with welded lid. The steel cask is stored in a concrete storage module and positioned horizontally. The storage module guarantees that the environment is protected from radioactive radiation emitted by the fuel elements while the steel casks tightly seal the radioactive inventory. Decay heat is released from the storage modules through air convection via protected ventilation slots. The system developed for LWR fuel elements of Western design was adapted to RBMK fuel elements, which are separated in the middle due to their design comprising two fuel rod bundles of equal length. Besides, drying is required due to the long period of wet storage. The elements are dried in one building. The sealed casks are transported on a protected transport vehicle to the storage modules erected outside (see Figure 8 and Figure 9). The authorities rejected the cask concept planned originally because it did not fully meet the Ukrainian regulations for double walls. Therefore, erection and commissioning of the interim facility was delayed by several years. In the meantime, a consortium headed by the US American company Holtec has presented a revised concept. The consortium accelerates planning based on the buildings already erected.

The NSA, which finances the interim storage, also entrusted the same expert organisations in the licensing procedure that had already assessed the wet storage facility. Accordingly, the expert organisations assessed the safety report for the dry storage facility and related conditioning facility as well as the new cask concept. The basic safety aspects of dry intermediate storage are safe confinement of the radioactive inventory, shelter from ionizing radiation, release of decay heat and guaranteed sub-criticality of fuel elements. Besides, controlled disposal of the fuel elements at the



Fig. 8. Process- and conditioning building of the intermediate storage facility – ISF-2.



Fig. 9. Storage modules of the intermediate storage facility ISF-2.

end of the storage time is to be guaranteed, too.

The assessment comprised several stages; the applicant was also involved in the discussions. The experts widely agreed in their final statement that was handed over the authorities in December 2010. The expert opinion discloses a number of safety-related deficits, weak points or missing evidence, e.g. a logical concept is missing that guarantees safe operation over the planned period of 100 years (ageing management). The situation at the *Chernobyl* site has clearly improved owing to the international support measures. However, at the same time it became obvious that such

complex international projects, particularly the two main projects NSC and ISF-2, involve considerable challenges concerning technology, organisation and funding. On the other hand, there was hardly any alternative because of the dimension and uniqueness of the task.

It is realistic that the *Chernobyl* site can be brought to a safe condition by the end of the decade with the support of the Western donor countries. Then decisions can be taken without haste how to deal with the sealed confined radioactive substances and the old Sarcophagus. Work on the implementation of a concept will last yet again for further decades.

4 Bi- and trilateral support programmes for Chernobyl

4.1 Support of the Ukrainian nuclear regulatory authority and its TSO

The above-mentioned action plan “Ukraine” was the initial point for international programmes to solve the problems at the *Chernobyl* site. This plan led to the Memorandum of Understanding (MoU) between the G7 states and the European Commission signed in December 1995. According to the MoU, the *Chernobyl* plant was scheduled to be decommissioned by the year 2000. Projects on nuclear safety, radiation protection as well as preparatory activities to refurbish the unstable Sarcophagus were also included. These activities were mainly financed via the *EBRD* but also via bilateral co-operation.

In this context the *German Government*, represented by the *German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU)* supported *Chernobyl* within the scope of bilateral projects during the period 1992 to 1998. *GRS* jointly with its partners *SNRIU*, the nuclear licensing and supervision authority, and the Ukrainian expert organisation *SSTC* carried out these projects.

Within the scope of these projects, *GRS* carried out numerous activities partly in co-operation with German, Ukrainian and Russian scientific organisations and sub-contractors. The projects mainly focused on support for the *SNRI*, which was only been founded after independence of the Ukraine in 1991, and on analyses and assessments of the situation at the *Chernobyl* site to support the *BMU*, thus enabling the German ministry to provide support that is more efficient to the Ukraine.

Comprehensive safety analyses were carried out to assess the maximum credible accident that could be hypothesised at that time, i.e. a collapse of the roof caused by internal or external effects followed by a massive release of radioactive dust and the consequences for the closer and farther vicinity. The effects on the neighbouring Unit 3 that had been in operation at that time and its operating personnel had to be taken into consideration, too. The analyses yielded potential radiation doses clearly above the limit values for personnel exposed at the site. However, the doses were negligible some kilometres away from the nuclear power plant.

Further safety analyses were dealing with the possible criticality of the fuel that had remained in the Sarcophagus after the entry of rainwater, a radioactive release from the Sarcophagus by aerosols and liquid release into the groundwater, radioactive contamination of the cooling pool, and re-suspension of radioactive contamination in the case of forest and steppe fires.

Besides, *GRS* supported the *SNRIU* in elaborating rules and guidelines, e.g. in connection with the review of operational radiation protection and emergency plans, the status reports concerning the state of civil engineering, and safety of the object shelter as well as the radio-ecological condition of the fuel pool.

Valuable new findings resulted from the project, and the bilateral co-operation with the Ukraine and Russia was supported in the abovementioned fields.

4.2 Chernobyl action programme

Several international conferences were held and the G7 Working Group "Nuclear Safety" met for discussions on the occasion of the 10th anniversary of the *Chernobyl* reactor accident. It was ascertained that further scientific and technical support would be required for the Ukraine, also through bilateral co-operation. These activities were subject of the "Chernobyl Action Programme" (ChAP) carried out by *GRS* by order of the *BMU*.

The activities for *Chernobyl* were continued by realising the German-French Initiative (FGI) and activities within the scope of ChAP. The programme was harmonised with other projects like SIP and TACIS. It comprised activities for determining and assessing the status of measures already taken or to be implemented at the *Chernobyl* site as well as support in international co-operation and support to the German Federal Government concerning its commitment within the G7.

4.3 French-German Initiative (FGI) and subsequent activities

Following the request of the Ukrainian Environmental Minister, the German Environmental Minister *Dr Angela Merkel* and her French colleague *Corinne Lepage* declared their willingness at the *IAEA* Conference held in Vienna in April 1996 to support international co-operation between the Ukraine, Russia and Belarus to solve the unsettled issues of the *Chernobyl* accident with the French-German Initiative (FGI).

Thus, in July 1997, the entrusted organisations *GRS*, the French *IRSN* and the Ukrainian International *Chernobyl* Centre (ICC) for Nuclear Safety, Radioactive Waste and Radioecology as beneficiary signed an agreement.

Numerous studies about the consequences of the *Chernobyl* reactor accident were carried out in the affected republics of the former USSR. However, these studies were largely not co-ordinated and were carried out without Western participation. The results were not harmonised and often contradictory, especially as regards ecological and health consequences.

Therefore, it was among the major targets of the French-German Initiative to collect the existing data and information, to verify them, and to make them available electronically in order to create a corroborated and objective information base for planning and realising future protection and refurbishment measures, to inform the public, and for later scientific work.

France and Germany financed three co-operation programmes:

- Programme 1: Safety status of the *Chernobyl* Sarcophagus,
- Programme 2: Investigation of the radio-ecological consequences of the accident,
- Programme 3: Investigation of the health effects.

Within the scope of this agreement, *GRS* and *IRSN* set up a steering committee and organised the methodical support for Ukrainian, Russian and Byelorussian organisations, which also acted as sub-contractor for realising the scientific projects within the aforementioned three co-operation programmes. Apart from the German and French government, German and French utilities also supported the FGI.

The programme "Safety status of the Sarcophagus" was aimed at creating a reliable and objective base of information for future protection and refurbishment measures. Therefore, all knowledge and findings about the situation of the Sarcophagus concerning civil engineering, radiology, the remaining fuel and its modifications and the status of systems and equipment were to be collected, verified and digitalised (setting up of a data base). With these findings it was possible e.g. to support the disposal of radioactive substances within the SIP.

The programme "Study of the Radio-ecological" of the French-German Initiative concentrated on investigating the radiological consequences of the accident in the 30-km zone and the area around Gomel in Belarus and Brjansk in Russia. The programme was focussed on the following radio-ecological issues:

- transfer of radionuclides into the environment (into terrestrial eco-systems like soil/plant and plant/animal, into aqueous eco-systems, transfer into the food chain and transfer of radionuclides in urban areas),
- countermeasures and decontamination (on urban and residential areas, on agricultural, semi-natural and natural areas as well as for agricultural products) and
- recording of data and information on radioactive waste (storage for radioactive waste, unplanned waste ditches and others).

A joint assessment of the health parameters showing a relationship to the radiation exposure of the population was carried out within the scope of Programme 3 "Health

effects". The investigations mainly concentrated on all events of the past 15 years of that time and on those groups that lived or are still living in highly contaminated areas. Their state of health was compared to the health state of groups living in areas with low contamination. Most research centres involved had already gained corresponding experience and were in charge of keeping registers of related diseases.

The objective of the French-German Initiative was to compare evidence rates of special diseases between regions exposed and not exposed. Thus, it differed from other analytical studies that investigated e.g. the relation of dose effects of certain groups with the aid of reconstructing individual dose rates.

The results of the three Programmes of the French-German Initiative were finally presented and discussed at an international workshop that was held in Kiev in October 2004 and described in summarising reports [*GRS* 05].

After the termination of the French-German Initiative, *GRS* continued some activities with limited scope and in co-operation with the Ukraine within the scope of the ChAP-ICC project funded by the *BMU*. This applied in particular to Programme 1 "Sarcophagus" that was managed by the German partners.

This included issues on the radiological situation at the site and the situation of the fuel inventory in the Sarcophagus. These issues are considered to a lesser extent by the SIP; however, their importance will increase in connection with the erection of the "New Safe Confinement" (NSC). Besides, information about the radiological situation in the close vicinity of the 30-km zone is of importance when turning the existing Sarcophagus into a long-term stable and safe system. In this area, large soil and water reservoirs are contaminated, and about 800 local deposits with an estimated 1 million m³ of radioactive waste exist with a total radioactivity of about 10¹⁶ Bq.

Since 2007, data and information on these issues have been collected, prepared and integrated into a database within the above project. The database has been made available to several scientific and technical institutions and to the *Chernobyl* nuclear power plant.

5 Summary and outlook

The *Chernobyl* accident triggered de facto a comprehensive international safety regime and measures to support and strengthen international co-operation in nuclear safety and radiation protection.

A comprehensive system of international agreements (e.g. notification in the case of accidents, support, nuclear safety, waste

management and nuclear reliability) has been developed since then. The creation of a comprehensive safety culture, harmonisation of safety standards and safety requirements, internationally monitored self-checks in many fields and a permanently increasing exchange of information and knowledge via diverse networks are important elements in the global safety and security regime that has been developing.

Various multilateral support programmes but also bi- and trilateral projects with active German participation were carried out to support the Ukraine to overcome the consequences of the *Chernobyl* accident and to set up an independent nuclear regulatory authority.

Today, 25 years after the accident, a broader international nuclear safety regime has been established. Major tasks concerning the disposal of radioactive waste and the ecological restoration of the *Chernobyl* site have been realised or already completed. The accident Unit 4 and the Sarcophagus erected above it are currently being brought to a long-term stable and ecologically safe state by the erection of the New Safe Confinement.

However, irrespective of this progress, the *Chernobyl* site will remain a special territory for many decades to come and will hence continue to be a burden to the Ukraine and the international community.

References

- [BBR 86] Bericht der Bundesregierung über den Reaktorunfall und seine Konsequenzen für die Bundesregierung, Drucksache 10/6442, 12.11.1986
- [GRS 96] *Chernobyl – Ten Years After*. Reports in 4 languages provided by GRS, IPSN and RRC KI, GRS 121, February 1996
- [GRS 05] *The French-German Initiative for Chernobyl*, Programme 1 Safety State of the Sarcophagus, GRS, IRSN, November 2005, ISBN 3-931995-83-6 Programme 2, Study of the Radio-ecological Consequences, GRS, IRSN, März 2006, ISBN 3-931995-84-4 Programme 3, Study of the Health Effects, GRS, IRSN, März 2006, ISBN 3-931995-85-2 ■

- Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH ist eine gemeinnützige maßgeblich im Auftrag der Bundesregierung tätige Forschungs- und Sachverständigenorganisation. Arbeitsschwerpunkte der 450 Mitarbeiter sind die kerntechnische Sicherheit, der Strahlenschutz und die nukleare Entsorgung. Auf diesen Gebieten ist die GRS Deutschlands zentrale Fachinstitution. Mehr Informationen unter www.grs.de
- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH is a non-profit-making expert and research organisation working mainly for the German Federal Government. The main fields of activity of the 450 staff are nuclear safety, radiation protection, and nuclear waste management. In these areas, GRS is Germany's leading expert institution. For more information visit us at www.grs.de

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

Schwertnergasse 1

50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

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