



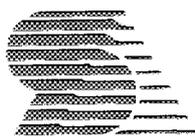
AT9700648

10 Jahre nach Tschernobyl,  
Strahlenbelastung,  
Gesundheitseffekte,  
Sicherheitsaspekte

Konrad Mück

November 1996

OEFZS--4785



S E I B E R S D O R F

SEIBERSDORF  
REPORT



# 10 Jahre nach Tschernobyl, Strahlenbelastung, Gesundheitseffekte, Sicherheitsaspekte

Konrad Mück

Bereich Verfahrens- und Umwelttechnik  
Abteilung Forschungsreaktor

## **Kurzfassung**

Der vorliegende Bericht enthält eine Zusammenfassung der zahlreichen Tagungen und wissenschaftlichen Symposia, die aus Anlaß des zehnjährigen Jahrestages des Unfalls im Kernkraftwerk in Tschernobyl stattgefunden haben. Dabei zeigt sich, daß durch den Unfall bis heute 31 Todesfälle unter den Rettungs- und Hilfsmannschaften am Kraftwerksgelände beobachtet werden. In der weiteren Umgebung wurde bis heute keine erhöhte Zahl an Todesfällen als Folge des Unfalls festgestellt. Allerdings wurde in den drei hauptbetroffenen Staaten Ukraine, Weißrußland und Rußland eine Erhöhung von Schilddrüsenkrebs bei Kindern beobachtet, die erheblich höher ist als nach den Atombombenabwürfen über den japanischen Städten beobachtet. Entgegen den häufig zu findenden Pressemeldungen wurden jedoch bis zum jetzigen Zeitpunkt keine Erhöhung von Leukämie und anderen Krebsarten, weder in der Bevölkerung der betroffenen Regionen noch unter den Liquidatoren, beobachtet.

Die hohen  $^{137}\text{Cs}$ -Depositionen in unmittelbarer Umgebung um das Kernkraftwerk ergeben auch heute eine Sperrzone in diesem Bereich. Die Depositionswerte in Kiew liegen andererseits bei nur  $30 \text{ kBq/m}^2$ , in weiten Teilen der Ukraine unter den durchschnittlichen Werten in Österreich von  $22 \text{ kBq/m}^2$ . Für diese Gebiete sowie solche außerhalb der früheren Sowjetunion ergaben sich mittlere Dosiswerte von weniger als  $1 \text{ mSv}$  im ersten Jahr, ein Wert, der weniger als ein Drittel der natürlichen jährlichen Strahlendosis beträgt.

Die Aktivitätskonzentration hat seit dem Reaktorunfall bis heute stark abgenommen, sodaß die Dosis als Folge des Reaktorunfalls heute nur weniger als  $0,8 \%$  der Dosis im ersten Jahr beträgt, in Österreich liegt sie 1996 bei weniger als  $0,3 \%$  der natürlichen Strahlenbelastung.

## **Abstract**

This report sums up the various conferences and symposia which were prompted by the tenth anniversary of the accident in the nuclear power plant of Chernobyl. It was shown that by the accident up to now 31 casualties among the emergency and rescue personal at the site. Offsite no increased number of casualties caused by the accident was observed up to now. In the countries with the highest impact Ukraine, Belarus and Russia, however, an increased number of infant thyroid cancer is observed which is substantially higher than after the nuclear detonations over Japanes cities. Contrary to often published media reports, however, up to now no increases in leucemia or other malignant deceases were observed, neither in the population of the concerned regions nor among the liquidators.

The high  $^{137}\text{Cs}$  activity concentration in the environment close to the power plant result in exclusion zone even today. The deposition values in Kiew, however, amount to only  $30 \text{ kBq/m}^2$ , in large areas of Ukraine they are below the average values in Austria of  $22 \text{ kBq/m}^2$ . For these areas as well as those outside the former Sovietunion the avergae doses were less than  $1 \text{ mSv}$  in the first year, a value which is less than one third of natural annual radiation exposure.

Since the reactor accident the activity concentration has significantly decreased resulting in an exposure as consequence of the reactor accident of less than  $0,8 \%$  of the exposure in the first year. In Austria the exposure in 1996 amounts to less than  $0,3 \%$  of natural radiation exposure.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	1
2. Der Unfall und seine Folgen.....	2
2.1 Der Unfall.....	2
2.2 Die Aktivitätsfreisetzung beim Tschernobylunfall im Vergleich zu früheren .....	4
3. Effekte in den hochbelasteten Gebieten Weißrußlands, Rußlands und der Ukraine.....	6
3.1 Effekte in Flora und Fauna .....	6
3.2 Die Belastung in der Exklusionszone und außerhalb .....	8
3.3 Strahleneffekte in der Bevölkerung.....	12
3.3.1 Akutschäden .....	13
3.3.2 Spätschäden .....	14
3.3.2.1 Somatische Schäden .....	14
3.3.2.2. Genetische Schäden.....	20
3.3.2.3 Teratogene Schäden .....	20
3.3.3 Psychische Folgen .....	20
3.4 Ökonomische Folgen.....	21
4. Kontamination außerhalb der hochbelasteten Gebiete.....	22
5. Die Abnahme der Strahlenbelastung in den Folgejahren.....	24
6. Einfluß der Gegenmaßnahmen auf die Strahlenexposition der Bevölkerung .....	27
7. Die heutige Situation .....	30
7.1 Die Situation in der Ukraine und Weißrußland.....	30
7.2 Kann man in der Ukraine als Tourist reisen?.....	31
7.3 Kann man in der Ukraine arbeiten?.....	32
7.4 Kann man lokale Nahrungsmittel essen? .....	32
7.5 Die Situation in Mitteleuropa und Österreich.....	33
7.5.1 Gibt es noch eine Strahlenbelastung? .....	33
7.5.2 Pilze, Wild und Hochalmen.....	33
8. Sicherheitsfragen .....	35
8.1 Die Sicherheit des RBMK-Reaktors heute.....	35
8.1.1 Unfallursache und unmittelbare Verbesserungen .....	35
8.1.2 Nachrüstungen und deren Auswirkungen auf die Sicherheit .....	36
8.2 Die Sicherheit des Sarkophags .....	37
9. Zusammenfassung.....	40
10. Literatur .....	41

## 1. Einführung

Der Reaktorunfall im Kernkraftwerk Tschernobyl Block 4 am 26. April 1986 war der gravierendste Unfall, der je in einem Kernkraftwerk aufgetreten ist. Durch die komplette Zerstörung aller Barrieren, die bei Kernkraftwerken gegen Aktivitätsfreisetzungen in die Umgebung vorgesehen sind, führte dieser Unfall zu Emissionen von radioaktivem Material in einem Ausmaß, das praktisch dem höchstmöglichen freisetzbaren Potential entspricht. Der Tschernobylunfall stellt somit in bezug auf die Umgebungsbelastung einen Maximalunfall mit höchstmöglicher Belastung dar.

Aus diesem Grund stand der Tschernobylunfall von Anfang im Zentrum des Interesses der Öffentlichkeit wie der wissenschaftlichen Fachwelt und wird es auch in Zukunft sein. Die Auswirkungen des Unfalls, insbesondere dessen gesundheitliche Folgen für die betroffene Bevölkerung zu untersuchen und zu evaluieren, ist dabei eines der Hauptziele der wissenschaftlichen Forschung. 10 Jahre ist ein Zeitpunkt, wo eine Bilanz des bisherigen Wissensstandes und der beobachtbaren Effekte sinnvoll erscheint, wobei sich in vielen Bereichen an dem heutigen Wissensstand kaum mehr wesentliche Änderungen zu erwarten sind, in einigen Aspekten (z.B. Langzeitfolgen in bezug auf die Gesundheit, Wiederbesiedelung etc.) heute noch keine endgültigen Antworten gemacht werden können. Jedoch ist aus den Kenntnissen, die bei früheren erhöhten Strahlenbelastungen größerer Bevölkerungsgruppen gewonnen worden waren, eine Abschätzung der zu erwartenden Folgeschäden möglich, die hier ebenfalls durchgeführt werden soll.

Der vorliegende Bericht soll daher eine Darstellung der Situation aus heutiger Sicht, eine Evaluation der Strahlenbelastung der Bevölkerung nach dem Reaktorunfall sowie eine Abschätzung der Folgen enthalten. Er soll weiters ein Resümee ziehen über den Erkenntnisstand, der aus dem Unfall und dessen Folgen gewonnen werden konnte. Dabei wird sowohl auf die Folgen in den stark belasteten Gebieten in der näheren Umgebung des Kraftwerks in der Ukraine, Weißrußlands und der russischen Föderation als auch auf den Fallout und die Konsequenzen im etwa 1000 km entfernten Österreich eingegangen werden.

Dieser Zusammenfassung kommt entgegen, daß 1996 zahlreiche Seminare und Symposien über die Konsequenzen des Tschernobylunfalls stattgefunden haben. Der vorliegende Bericht enthält daher als wesentlichen Teil eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlüsse, die auf diesen Tagungen präsentiert wurden. Die zahlreichen Tagungen zu diesem Thema, die in den vorliegenden Bericht eingearbeitet wurden, umfassen:

- "Zehn Jahre nach Tschernobyl, eine Bilanz", Symposium des Deutschen Bundesamtes für Strahlenschutz, München, 6.-7. März 1996
- "One Decade after Chernobyl - Summing up the Consequences" Internationale Conference der Europ. Commission, der IAEA, und der WHO, Wien, 8.-12. April 1996
- "One Decade after Chernobyl - Nuclear safety aspects", Internationales Forum, IAEA, Wien, 1.-3. April 1996
- "Health Consequences of the Chernobyl and other Radiological Accidents", WHO Intern. Conference, Genf, 20.-23. Nov. 1995
- IRPA9, 9. Intern. Kongress der Intern. Strahlenschutzvereinigung, Wien, 14.-19. April 1996
- "Tschernobyl - 10 Jahre danach: Eine aktuelle Bilanz der Folgen", Intern. Konferenz des Otto Hug Strahleninst. und Ärzte für die Verhütung des Atomkrieges, München, 1996
- "Ten Years Terrestrial Radioecological Research following the Chernobyl accident", Intern. Symp. d. Österr. Bodenkundl. Gesell. u. d. Österr. Umweltbundesamtes, 22.-24. April 1996

## 2. Der Unfall und seine Folgen

### 2.1 Der Unfall

Das Unfallszenario und der Ablauf wurden bereits oft genug beschrieben und soll daher nicht nochmals detailliert behandelt werden. Es sollen jedoch einige Fakten dargestellt werden, die heute in der Fachwelt außer Diskussion stehen:

- Beim Tschernobylunfall handelte es sich um einen Reaktivitätsunfall, wie er nur aufgrund der speziellen Konstruktionsmerkmale des RBMK-Reaktortyps (Tschernobyltyp) möglich ist. In Leichtwasserreaktoren, wie sie z.B. in praktisch allen westlichen Staaten, aber auch in den an Österreich angrenzenden östlichen Nachbarstaaten betrieben werden, ist ein solcher Unfall prinzipiell nicht möglich. Dies hängt mit dem stark positiven Temperaturkoeffizienten des Reaktortyps zusammen, während in Leichtwasserreaktoren grundsätzlich ein negativer Temperaturkoeffizient zu einer erheblichen passiven Sicherheit auch bei schweren Operatorfehlern führt <sup>(1,2)</sup>.
- Die Unfallfolgen wurden durch den Umstand verschärft, daß der Reaktor kein echtes Schnellabschaltssystem besaß. Die mit Schwerkraft bewegten Abschaltstäbe waren viel zu langsam, um die bei diesem Reaktortyp möglichen steilen Transienten (als Folge des positiven Temperaturkoeffizienten) abzufangen <sup>(3)</sup> und eine genügend schnelle Schnellabschaltung und damit Bewahrung der Integrität der Brennelemente sicherzustellen.
- Der Unfall wurde durch eine Reihe schwerwiegender Fehler der Bedienungsmannschaft ausgelöst <sup>(4)</sup>. Allerdings wäre es trotz dieser Fehler der Operatoren bei anderen Reaktoren dennoch nicht zu diesen gravierenden Auswirkungen gekommen. Aus heutiger Sicht ist an dem Unfallablauf zu einem erheblichen Teil die schlechte Konstruktion des Reaktors und seiner Sicherheitssysteme, zu einem geringeren Teil die Bedienungsfehler der Mannschaft schuld. Grundsätzlich wird in westlichen Anlagen den möglichen Bedienungsfehlern der Mannschaft in Streßsituationen ein so hoher Stellenwert eingeräumt, daß eine wesentliches Konstruktionsmerkmal einer sicheren Anlage die Tatsache ist, daß in kritischen Situationen dem Operator wenig Möglichkeiten gegeben werden, in die Systeme falsch einzugreifen.
- Durch den hohen Überdruck als Folge des Reaktivitätsunfalls wurde nicht nur ein Großteil der Druckröhren, sondern auch das umgebende Reaktorgebäude zerstört, sodaß die Aktivität aus dem zerstörten Brennelementen direkt in die Umgebung, ohne jegliche Rückhaltebarrieren, freigesetzt werden konnte. Dadurch kam es zu einer Freisetzung in höchstmöglichen Ausmaß, sodaß der Tschernobylunfall als ein Maximalunfall in bezug auf die freigesetzte Radioaktivitätsmenge gelten kann <sup>(5)</sup>.
- Bei einem Leichtwasserreaktor ist im Falle eines Maximalunfalls prinzipiell ein anderer Unfallablauf zu erwarten. Da ein Reaktivitätsunfall aufgrund des völlig anderen neutronendynamischen Verhaltens auszuschließen ist, ist der Maximalunfall durch einen völligen Verlust der Kühlmöglichkeiten des Reaktorkerns und als Folge davon eines Schmelzens des Kerns charakterisiert. Bei einem solchen Schmelzvorgang ergibt sich jedoch prinzipiell kein Druckaufbau in der Anfangsphase wie bei einem Reaktivitätsunfall, der zu einer Zerstörung des Reaktorgebäudes führen würde. Ein solch massiver Druckaufbau ist erst in einer späteren Phase (einige Tage später) zu erwarten, zu einem Zeitpunkt, bei dem bereits mehr als 99,9 % der aus der Kernschmelze freigesetzten Aktivität an den Gebäudeoberflächen abgelagert ist und so nicht mehr ins Freie freigesetzt wird. Der Quellterm (die in die

Umgebung freigesetzte Aktivität) würde somit um mehrere Größenordnungen niedriger als beim Tschernobylunfall liegen <sup>(6)</sup>.

Beim Three-Mile-Island Unfall, bei dem ein ähnlicher großer Teil der Kerns wie beim Tschernobylreaktor zerstört wurde, bei dem jedoch ein Containment mit einem praktisch dichten Abschluß vorhanden war, wurde nur etwa ein Zehntausendstel der Aktivität des Tschernobylunfalls freigesetzt, sodaß die Strahlenbelastung auch in unmittelbarer Umgebung des Reaktors etwa im Bereich des jährlichen natürlichen Strahlenpegels blieb <sup>(7)</sup>.

- Die Folgen in der unmittelbaren Umgebung wurden durch die starke Überhöhung der radioaktiven Wolke als Folge der Thermik gemildert. Diese Thermik war im wesentlichen eine Folge der Nachwärmeproduktion, der oft zitierte Beitrag des Graphitbrandes war sicherlich geringer. Da die Nachwärmeproduktion im wesentlichen von der Leistung des Reaktors abhängt und somit grundsätzlich bei jedem Reaktor einer bestimmten Leistung ähnlich ist, ist daher auch bei Leichtwasserreaktoren mit ähnlichen Abluftüberhöhungen zu rechnen. Der Tschernobylunfall stellt in dieser Hinsicht keine "günstigere" Situation als bei Leichtwasserreaktorunfällen dar.

Durch die Überhöhung und Verfrachtung der Radioaktivität in höhere Wolkenschichten ergeben sich jedoch nur in der unmittelbaren Umgebung geringere Dosiswerte, in größerer Entfernung, insbesondere in Weißrußland, Mitteleuropa und Österreich hatte dies jedoch nur geringe Auswirkungen. Eher wurden durch die starke Überhöhung die radioaktive Wolke weiter vertragen als bei niedriger Ausbreitungshöhe zu erwarten gewesen wäre.

- Durch die explosionsartige Freisetzung als Folge des Reaktivitätsunfalls kam es zur Bildung und Freisetzung von "heißen Teilchen". Diese Art von Freisetzung, die bei einem Schmelzunfall bei einem Leichtwasserreaktor nicht zu erwarten wäre, führte zu einer inhomogenen Belastung sowohl bei der Inhalation als auch bei der Ablagerung am Boden. Wegen der Größe der Partikeln wurden die meisten in unmittelbarer Umgebung um den Reaktor bis zu einer Entfernung von einigen Kilometern abgelagert. Auch in dieser Zone lag der Beitrag allerdings nur bei etwa 2 % der insgesamt abgelagerten Aktivität und trug so nicht nennenswert zur Gesamtdosis bei <sup>(8)</sup>. In größerer Entfernung, insbesondere in Mitteleuropa wurden nur mehr äußerst vereinzelt heiße Teilchen und da auch nur sehr kleine gefunden. Ihr Beitrag zur Dosis der Bevölkerung in Mitteleuropa ist daher vernachlässigbar.

Der Tschernobylunfall stellt somit keinen typischen Reaktorunfall dar, da er in einem Leichtwasserreaktor praktisch nicht möglich ist. Da das Kerninventar an Krypton- und Xenonisotopen beim Tschernobylunfall zu praktisch 100 %, Jod und Cäsium zu einem wesentlichen Anteil des Inventars (~ 33 - 60 %) freigesetzt wurden <sup>(5)</sup>, stellt er in seinen radiologischen Auswirkungen im wesentlichen das Maximum an Umgebungsbelastung dar, die bei einem Unfall eines Reaktors vergleichbarer Leistung möglich ist.

Die Frage, ob ein solcher Unfall auch heute in den RBMK-Reaktortypen jederzeit möglich ist, sowie generelle Sicherheitsfragen dieses Reaktortyps werden in Kap. 8.1 behandelt.

## 2.2 Die Aktivitätsfreisetzung beim Tschernobylunfall im Vergleich zu früheren Belastungen

Die häufig gehörte Frage, ob der Fallout nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl höher war als nach den Kernwaffenversuchen der Fünfziger- und Sechzigerjahre, ist nicht mit einem einfachen Ja oder Nein zu beantworten. Vergleicht man die insgesamt freigesetzte Aktivität, so lagen die Kernwaffenversuche um viele Größenordnungen höher, die Freisetzung nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl lag nur etwa bei einem Hunderttausendstel der freigesetzten Aktivität nach den Kernwaffentests <sup>(9,10)</sup>.

Auch wenn man nur die für die Langzeitbelastung bedeutenden langlebigen Radionuklide Cäsium und Strontium vergleicht, so lag die insgesamt freigesetzte Aktivität durch die Kernwaffenversuche noch immer wesentlich über der des Tschernobylunfalls. Wie aus Abb. 1 ersichtlich, betrug die insgesamt freigesetzte Aktivität an Cäsium-137 nach Tschernobyl etwa ein Zwanzigstel, die von Strontium-90 etwa ein Hundertstel der nach den Kernwaffentests <sup>(10,11,12)</sup>. Die Radioaktivität wurde nach den Kernwaffenversuchen jedoch zu einem Großteil in höhere Atmosphärenschichten verlagert und so weltweit vertragen. Nach dem Tschernobylunfall

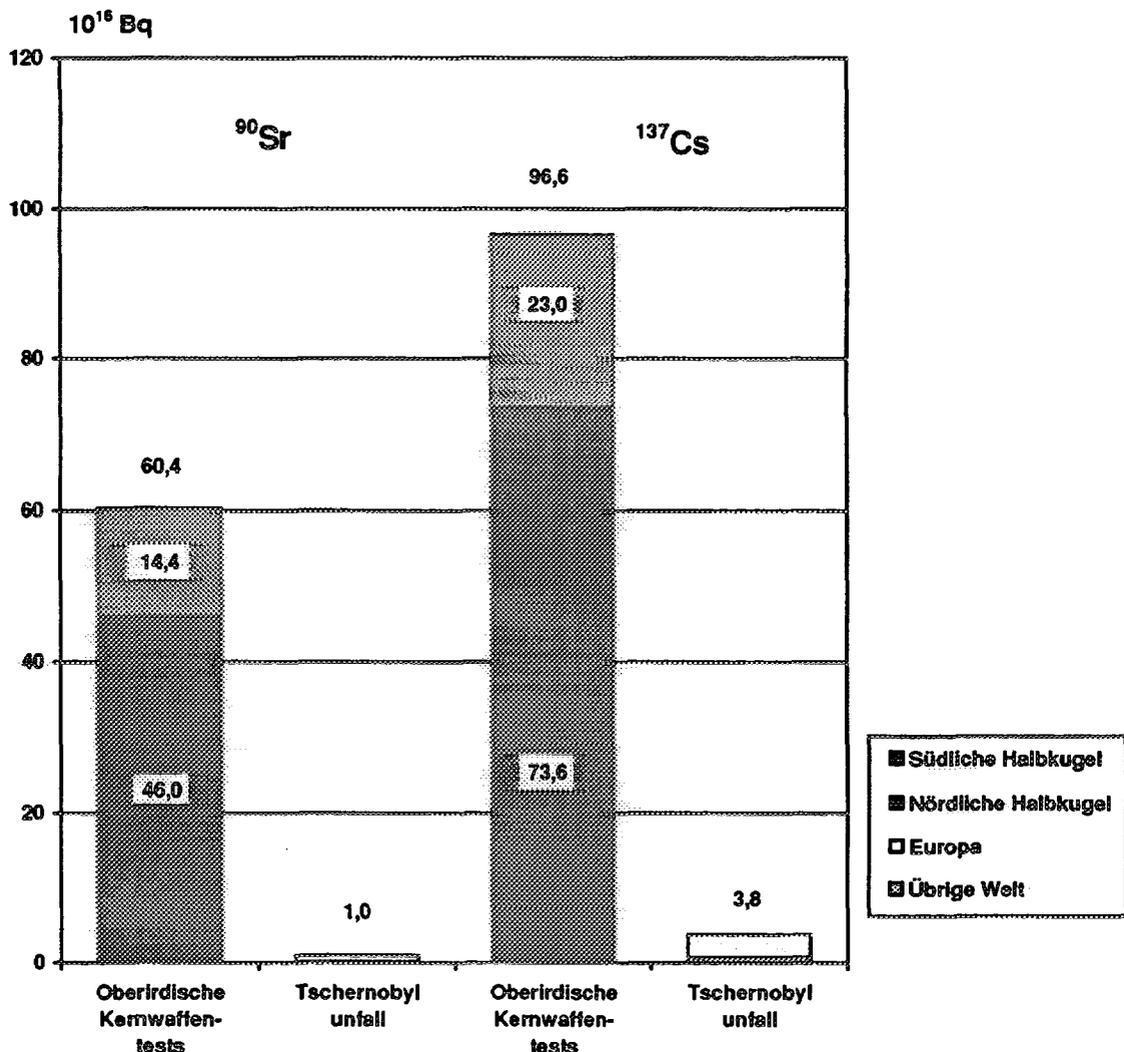


Abb. 1 Ingesamte Aktivitätsdeposition nach dem Tschernobylunfall und den oberirdischen Kernwaffenversuchen der Fünfziger- und Sechzigerjahre <sup>(12)</sup>

erfolgte die Freisetzung ziemlich bodennahe, sodaß sich viel höhere Depositionen in Europa als in anderen Erdteilen ergab. Wie aus Tab. 1 ersichtlich wurden etwa 80 % der insgesamt freigesetzten Aktivität in Europa abgelagert. Damit ergaben sich generell noch immer niedrigere Depositionswerte als nach den Kernwaffentests, in einigen Ländern, insbesondere in weiten Teilen Osteuropas lag allerdings die Deposition über, zum Teil erheblich über den Werten nach den Kernwaffenversuchen <sup>(12)</sup>.

Land	Kumulative Deposition [kBq/m <sup>2</sup> ]			
	<sup>90</sup> Sr		<sup>137</sup> Cs	
	Tschernobyl- unfall	Kernwaffen- versuche	Tschernobyl- unfall	Kernwaffen- versuche
USA	0,001	1,6	0,03	2,6
England	0,04	2,6	1,4	4,1
Türkei	0,03	2,5	0,08	3,9
Österreich	0,9	3,3	23,0	5,2
Ukraine	6,5	1,8	140,0	2,8

Tab. 1 Kumulative Deposition nach dem Reaktorunfall Tschernobyl und nach den oberirdischen Kernwaffentests im Vergleich

Die Strahlenbelastung war jedoch in allen Gebieten - auch in den am meisten betroffenen Gebiet unmittelbar um den zerstörten Reaktor - niedriger als die höchsten Strahlenbelastungen in Hiroshima und Nagasaki <sup>(13)</sup>. Durch die ergriffenen Gegenmaßnahmen wurden diese Dosiswerte jedoch noch weiter reduziert, sodaß auch in hochbelasteten Gebieten der Ukraine und Weißrußlands die Dosis um mehr als eine Größenordnung unter den Dosiswerten der japanischen Atombombenopfer lagen. Untersuchungen der Auswirkungen nach dem Tschernobylunfall sind deswegen besonders interessant und wichtig, da nach den Atombombendetonationen über den japanischen Städten - abgesehen von den entsetzlichen Sofortfolgen - als Spätfolgen bis heute etwa 370 zusätzliche Leukämie- und Krebsfälle aufgetreten sind, eine geringe Zahl im Vergleich zu den etwa 170.000 Soforttoten <sup>(14)</sup>.

Außerdem konnte in Hiroshima and Nagasaki unterhalb einer Dosis von etwa 200 mSv keine statistisch signifikante Erhöhung der Zahl maligner Erkrankungen festgestellt werden <sup>(14,15)</sup>. In der Umgebung des verunfallten Kernkraftwerkes lag die effektive Dosis der Bevölkerung generell unterhalb dieses Wertes. Die Anzahl der Personen, die Dosiswerten von einigen zehn mSv ausgesetzt waren, ist allerdings wesentlich höher als nach den Atombombenabwürfen über Japan. Aus diesem Grund ist eine genaue statistische Beobachtung möglicher Effekte äußerst bedeutend.

Die nächsten Kapiteln sollen daher eine Darstellung des bisherigen Standes an beobachteten echten bzw. vermeintlichen Effekten in den hochbelasteten Gebieten der Ukraine, Weißrußlands und der russischen Föderation, wie auch in den weniger belasteten Gebieten außerhalb dieser Länder geben.

### 3. Effekte in den hochbelasteten Gebieten Weißrußlands, Rußlands und der Ukraine

#### 3.1 Effekte in Flora und Fauna

Als Folge der freigesetzten Aktivitäten wurde in der unmittelbaren Umgebung um das Kernkraftwerk Dosisleistungen im Maximum von über  $5 \text{ mGy} \cdot \text{h}^{-1}$  im Freien erreicht. Dies bedeutete eine Dosis im ersten Jahr von mehr als  $5 \text{ Gy}$  in diesen Gebieten für Personen, die sich die ganze Zeit über im Freien aufhalten. Da jedoch Personen sich typischerweise zu mehr als 80 % im Inneren von Häusern aufhalten<sup>(16)</sup>, liegt ihre Dosis in der Regel um mehr als das Vierfache niedriger. Da außerdem Personen aus diesem Gebieten bereits knapp nach dem Unfall evakuiert wurden, lag die Strahlenbelastung dieser Personengruppe bei nur  $0,02 \text{ Gy}$ <sup>(17)</sup>.

Für Pflanzen, die im Freien wachsen, ergibt sich jedoch keine Dosisreduktion. Bei Dosiswerten über etwa  $1 \text{ Gy}$  sind jedoch Auswirkungen auf Pflanzen zu erwarten und wurden in der unmittelbaren Umgebung um das KKW Tschernobyl auch beobachtet. Die bekannteste und augenscheinlichste Auswirkung ist der sogenannte "Rote Wald", der in einem eng begrenzten Gebiet von einigen Kilometern Ausdehnung zwischen dem Kraftwerk und der Stadt Pripjat sowie nördlich davon beobachtbar ist. Dabei handelt es sich um Zonen mit Nadelwald, in denen durch die hohen Dosiswerte die Nadeln braun werden und die Bäume absterben.

Die räumliche Ausdehnung dieser Gebiete mit Schädigung des Waldes ist an Abb. 2 zu sehen. Die Zone mit Dosisleistungen im Maximum von über  $5 \text{ mGy} \cdot \text{h}^{-1}$  (komplettes Absterben des Nadelwaldes) erstreckt sich, wie ersichtlich, etwa  $5 \text{ km}$  westlich,  $2 \text{ km}$  südöstlich und etwa  $10 \text{ km}$  nordwestlich des zerstörten Reaktorblocks<sup>(18)</sup>. Nördlich und östlich wurden nirgends so hohe Dosiswerte registriert, sodaß dort auch kein abgestorbener Wald beobachtet wird<sup>(18)</sup>.

Außerhalb dieser Zone wurden nirgends Dosiswerte beobachtet, die zu einer Schädigung des Waldes oder anderer Pflanzen führen könnten<sup>(19)</sup>. Sie wurden auch nicht beobachtet<sup>(18)</sup>.

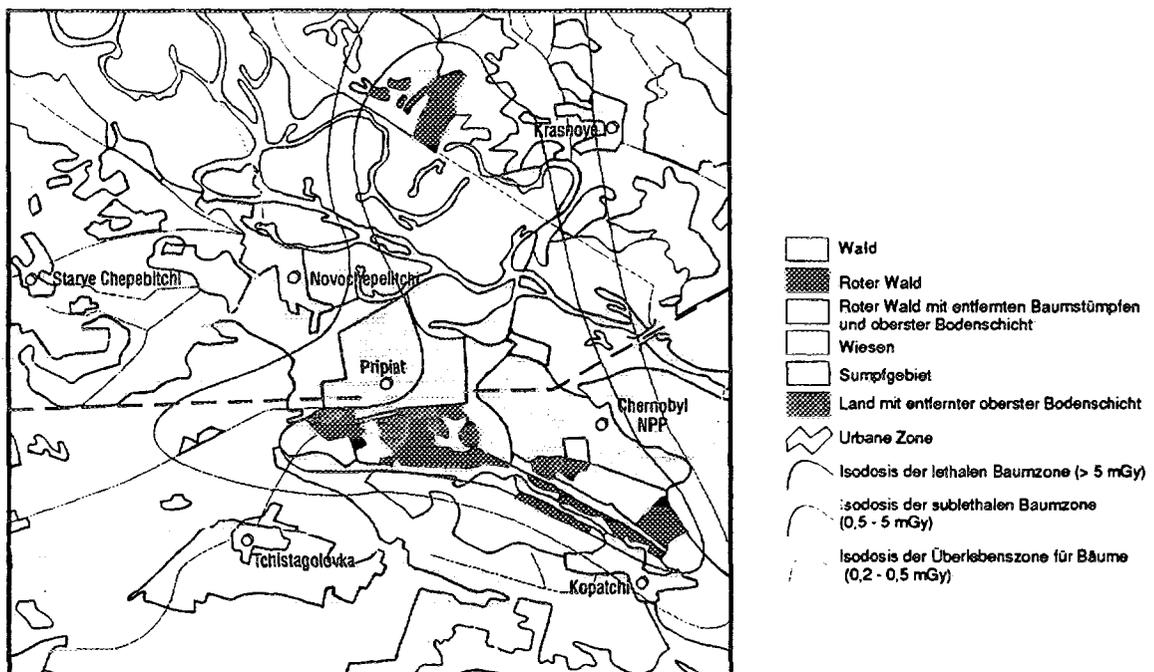


Abb. 2 Letale und subletale Zonen in der Umgebung des KKW Tschernobyl

Die verursachten Waldschäden in der Kernzone sind jedoch nicht irreversibel. Im Gegenteil, die Erholung der betroffenen Waldzonen geht schneller vor sich als landläufig angenommen. Dies ist in Tab. 2 dargestellt. Natürlich erfolgt die Erholung des Waldes in jenen Gebieten, wo niedrigere Dosiswerte und damit auch geringere Schäden beobachtet worden waren, schneller als in jenen Gebieten, in denen hohe Dosiswerte zu einem hohen Schadenausmaß geführt hatten. In den Gebieten, in denen nur vereinzelt Bäume abgestorben waren, ist heute bereits eine fast vollständige Erholung zu verzeichnen. Aber auch in den Gebieten, wo praktisch ein vollständiges Absterben der Bäume zu verzeichnen war, ist zehn Jahre danach bereits die Bildung einer neuen Generation von Bäumen zu beobachten <sup>(20)</sup>.

Auswirkungen / Dosis [Gy]	1986	1987	1988	1989-1990	1991-1994
bemerkbar 0,1 - 0,5	Änderungen im Wachstum	→	Erholung		
schwach 0,6 - 5,0	verringertes Wachstum	Morphose	→	Erholung	
mittel 6,0 - 10,0	starke Wachstumsverringering, Tod einzelner Bäume	teilweise Erholung d. Bewuchs, kein Blühen	Erholung der Population	→ Erholung	
stark 10 - 20	kein Wachstum, Nadeln werden braun, Absterben von Teilen des Baumes	einzelne Bäume überleben, der Großteil stirbt ab	vermehrtes Wachstum von Nichtkoniferen, Schädlingsbefall	begin. Wachstum der Population Wiedererstehen der Grasnarbe, Blattfall	Bildung von neuen Wachstumgruppen
kompletter Tod > 20	komplettes Absterben des Baumes, starker Schädlingsbefall	Abfallen der Nadeln, Schalen der Rinde, Schädlingsbefall	Rinde schält, zarter Beginn von Wachstum	Fall der Stämme, Bildung von neuen Wachstumsgemeinschaften	Fall der Stämme, Bildung von neuen Wachstumsgemeinschaften

Tab. 2 Effekte im Nadelwald rund um das Kernkraftwerk Tschernobyl und die Erholung der Gebiete danach <sup>(20)</sup>

Ein besonderes Problem stellt in diesen Zonen der nach wie vor hohe Cäsiumgehalt des Bodens dar. Ein Teil des Gebietes wurde daher durch Tiefpflügen bzw. durch Abtragen der obersten Bodenschicht behandelt, wobei erhebliche Dekontaminationseffekte von mehr als 90 % erzielt werden konnten. Diese Zonen sind ebenfalls in Abb. 2 ersichtlich.

In den Medien wurde nach dem Tschernobylunfall öfters von vermehrtem Wachstum und insbesondere von Riesenwachstum berichtet. Grundsätzlich ist dieser biopositive Effekt der Strahlung seit langem bekannt. Seit der Zeit vor dem zweiten Weltkrieg wurde die wachstumsfördernde Wirkung der Strahlung untersucht und auch in Experimenten praktisch genutzt. Nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl wurde vereinzelt auch das Auftreten von vergrößerten Blättern und Nadeln berichtet. Eine statistisch eindeutige Erhöhung des Pflanzenwachstums ist jedoch nicht bekannt.

Neben den Effekten im Bereich des Bewuchses waren auch reichlich Medienberichte über Effekte bei Tieren zu finden. So gab es in den Jahren 1988/89 zahlreiche Berichte über eine

erhöhte Zahl schwerer Geburtsdefekte bei Tieren in der Umgebung des Reaktors. Insbesondere die Darstellung von Kälbern mit zwei Köpfen waren sehr häufig in den Medien zu finden. Eine Studie einer ukrainischen Expertengruppe <sup>(21)</sup> fand jedoch keinen Unterschied in der Zahl der Geburtsdefekte zwischen höher belasteten und niedrig belasteten Gebieten. Die erhöhte Radioaktivität kann somit als Ursache ausgeschlossen werden. Eine mögliche Erklärung könnte die exzessive Verwendung von Kunstdünger in diesen Gebieten nach dem Unfall sein.

Bei Weidekühen in der unmittelbaren Umgebung des Reaktors wurden jedoch Strahleneffekte festgestellt. Als Folge des Konsums von kontaminierten Weidegras kam es bei diesen Tieren zu hohen Schilddrüsendosiswerten von einigen Hundert Sievert, wodurch es zu Schilddrüsenatrophien und Nekrosen kam <sup>(22)</sup>. Dies war jedoch auf die Zone unmittelbar um den Reaktor beschränkt, außerhalb dieser Zone, insbesondere außerhalb der 30 km-Zone wurden keine Effekte in dieser Hinsicht beobachtet.

### 3.2 Die Belastung in der Exklusionszone und außerhalb

Durch die Ausbreitung der freigesetzten Radioaktivität wurde neben der externen Strahlung auch eine Dosis durch Inhalation sowie durch Ingestion verursacht. Dabei wurden in den GIS-Staaten wie auch in Österreich etwa 50 % der Inhalationsdosis durch Jodisotope verursacht. Unter diesen kam der Hauptbeitrag von <sup>131</sup>J, das mit einer Halbwertszeit von 8,06 Tagen in vergleichsweise hoher Aktivität im Reaktorkern vorliegt, einen hohen Freisetzungsfaktor aus dem erhitzten Kern aufweist und in der Umgebung nur langsam abklingt. Da es wie die anderen Jodisotope in der Schilddrüse gespeichert wird, kann es dort vergleichsweise hohe Dosiswerte hervorrufen. Abschätzungen der Schilddrüsendosis ergeben, daß in einigen Dörfern der Umgebung des Tschernobylreaktors die Schilddrüsendosis bis 2,4 Gy für Kinder und 0,4 Gy für Erwachsene betrug <sup>(19)</sup>.

Für die gesamte Umgebung mögen diese Werte nicht typisch sein, jedoch wird für die Region um Gomel, Belarus, die in einer Entfernung von etwa 150 km liegt, Schilddrüsendosiswerte von 0,4 Gy, in einer neueren Studie von 1 Gy abgeschätzt <sup>(23)</sup>. In Kiew lag die Inhalationsdosis durch <sup>131</sup>J jedoch nur bei 0,1 Gy für das Kleinkind und 0,04 Gy für den Erwachsenen <sup>(24)</sup>. Für die höherbelasteten Gebiete der Ukraine wurden im Mittel Schilddrüsendosiswerte von 0,3 Gy abgeschätzt <sup>(25)</sup>. Im Mittel über die gesamte Ukraine lagen sie wesentlich niedriger.

Die Inhalationsdosis nimmt mit zunehmender Entfernung vom Kraftwerk stark ab. So wurden in Wien nur mehr Inhalationsdosen durch <sup>131</sup>J von 0,0006 Gy beobachtet <sup>(26)</sup>.

Eine ähnlich starke Abnahme wurde auch bei den Aktivitätsdepositionen beobachtet. Allerdings ist eine durch lokale Niederschläge bedingte starke Variation gegeben. Während in der Zone unmittelbar um das Kraftwerk Depositionswerte von 1500 kBq.m<sup>-2</sup> und mehr beobachtet wurden, liegen die Depositionswerte außerhalb dieser Zonen niedriger, zum Teil erheblich niedriger. Sie variieren ziemlich stark je nach Windrichtung und Entfernung vom Kraftwerk, wobei ausbreitungsmäßig und niederschlagsbedingt auch in größerer Entfernung Depositionswerte von > 500 kBq.m<sup>-2</sup>, mitunter auch von > 1500 kBq.m<sup>-2</sup> zu finden sind. Da in der Phase unmittelbar nach dem Unfall eine schnelle detaillierte Erfassung der Belastungssituation nicht möglich war, wurde das Gebiet rund um das Kraftwerk mit einem Radius von 30 km generell zum Sperrgebiet erklärt und die Bevölkerung aus diesem Gebiet abgesiedelt. Aus heutiger Sicht war diese Maßnahme in einigen Orten nicht erforderlich, da die Strahlenbelastung nicht so hoch war, um sie zu rechtfertigen <sup>(19)</sup>. In der damaligen Situation wäre jedoch eine Empfeh-



Abb. 3 <sup>137</sup>Cs-Deposition in der Ukraine, in Weißrußland und Rußland (19)

▨ > 1500 kBq/m<sup>2</sup>  
 ▩ 555 - 1500 kBq/m<sup>2</sup>  
 □ 185 - 555 kBq/m<sup>2</sup>

lung der Behörden zum Absiedeln einiger Ortschaften und dem Verbleiben der Nachbarortschaften vermutlich nicht realisierbar gewesen und von der betroffenen Bevölkerung wohl auch kaum verstanden worden.

Aus diesem Grund wurden die von den Behörden nach dem Unfall ergriffenen Gegenmaßnahmen von einem internationalen Expertenteam generell als gut und ausgewogen bewertet <sup>(19)</sup>.

Gebiete mit höheren Depositionswerten wurden jedoch auch außerhalb der 30 km-Sperrzone beobachtet. Durch Regenfälle wurden vor allem in SO von Weißrußland und im angrenzenden Gebiet der russischen Föderation erhebliche Bodendepositionen verursacht. Abb. 3 zeigt die von einer Expertengruppe im Rahmen des internationalen Tschernobylprojektes der IAEA in Zusammenarbeit mit Experten der ehemaligen Sowjetunion erstellte Depositionskarte für <sup>137</sup>Cs in der Ukraine, Weißrußland und der russischen Föderation <sup>(19)</sup>. Demnach ergibt sich ein größeres Gebiet nordöstlich von Gomel, Weißrußland, das Depositionswerte aufweist, die an die Werte in der weiteren Umgebung von Tschernobyl herankommen. Ähnliche Depositionswerte werden auch in der angrenzenden russischen Föderation um Novozybkow verzeichnet.

Umgekehrt gibt es Gebiete in der Umgebung von Tschernobyl, in denen die Depositionswerte nicht höher als in einigen Gebieten Österreichs waren. So lag etwa die Deposition an <sup>137</sup>Cs in Kiew bei etwa 30 kBq/m<sup>2</sup>, also niedriger als in den höher belasteten Gebieten Österreichs. Minsk, die Hauptstadt Weißrußlands weist durchschnittliche Bodenablagerungen von weniger als 10 kBq/m<sup>2</sup> auf, eine Deposition, die geringer ist als auf 95 % der österreichischen Bodenfläche beobachtet wurde <sup>(27)</sup>. Ein beachtlicher Teil der Fläche der Ukraine weist niedrigere Bodenkontaminationen auf als dem Mittelwert Österreichs entspricht <sup>(19,27)</sup>.

Abb. 4 zeigt die Anteile der Böden mit verschiedenen <sup>137</sup>Cs-Depositionen in den drei am meisten betroffenen Ländern Weißrußland, Rußland und Ukraine. Wie ersichtlich liegt in allen drei Ländern der überwiegende Teil der Böden in Zonen mit verhältnismäßig geringen Depositionswerten, nämlich 7 - 37 kBq/m<sup>2</sup>. Als Vergleich: Die durchschnittliche Deposition lag in Österreich bei 22 kBq/m<sup>2</sup>, die höchsten Werte bei etwa 150 kBq/m<sup>2</sup> <sup>(27)</sup>. Eines der interes-

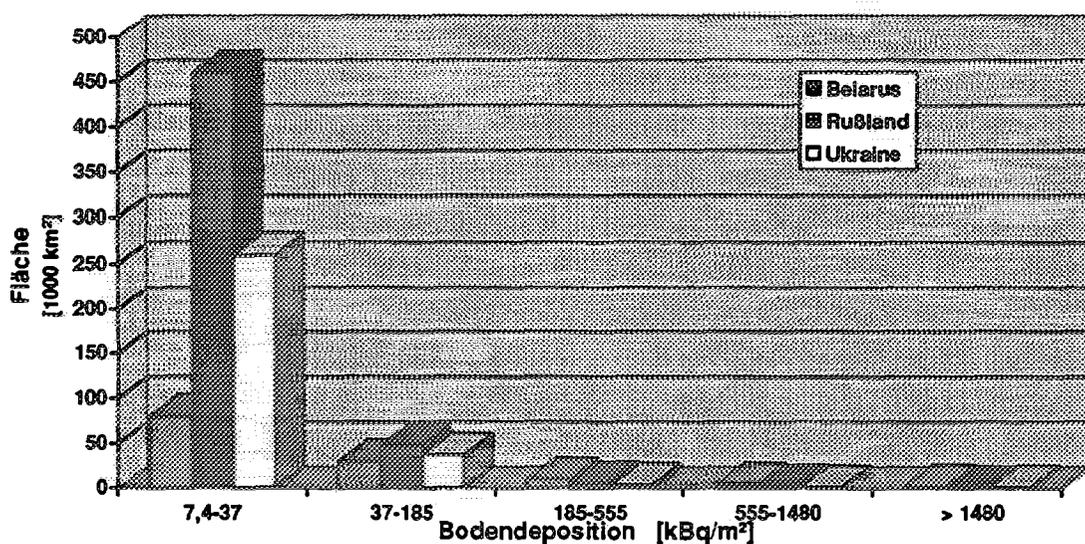
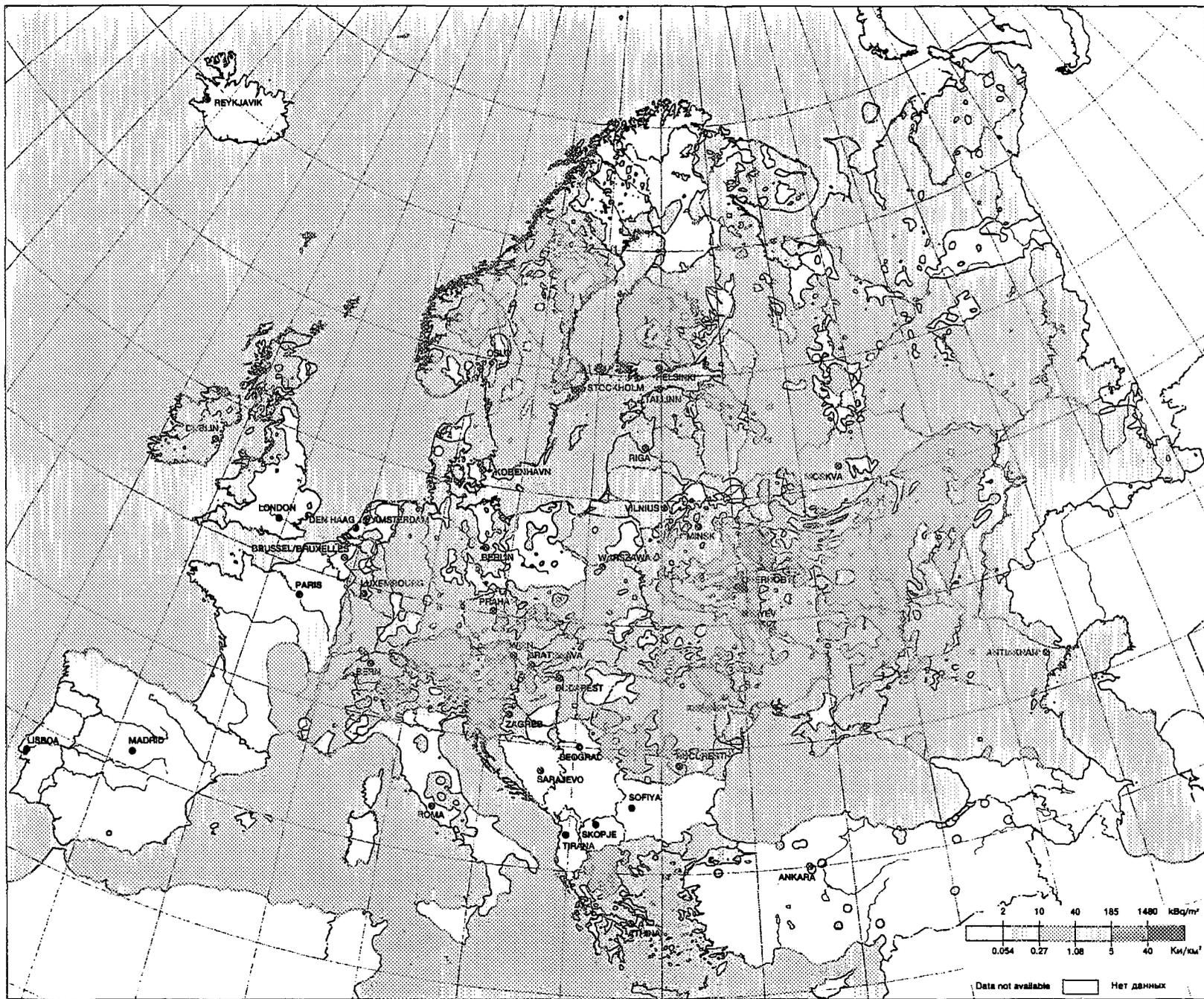


Abb. 4 Anteil der Flächen mit unterschiedlichen <sup>137</sup>Cs-Depositionen in Weißrußland, Rußland und Ukraine <sup>(20)</sup>

Abb. 5 Deposition an  $^{137}\text{Cs}$  in Europa nach dem Tschernobylunfall (nach EU-Atlas <sup>(29)</sup>)



Projection: Lambert Azimuthal    Проекция: Ламбертовская азимутальная

© EC/IGCE, Roshydromet/Minchemobyl (UA)/Belhydromet, 1996

santesten Ergebnisse des Unfalls in Tschernobyl ist somit die Tatsache, daß in einem 1000 km entfernten Land höhere durchschnittliche Depositionswerte auftreten können als in einem Großteil des Territoriums des Ursprungslands der Ausbreitung der Kontaminationswolke.

Die insgesamt Deposition an  $^{137}\text{Cs}$  über Europa als Folge des Fallouts des Tschernobylunfalls ist in Abb. 5 dargestellt. Sie wurde aus vielen Tausend Einzelmessungen in den europäischen Ländern zusammengestellt und im "Tschernobyl Atlas" der EU <sup>(31)</sup> veröffentlicht. In dieser ist deutlich die starke Abnahme der Deposition mit zunehmender Entfernung vom Emissionspunkt zu sehen. Ebenso deutlich sieht man aber auch die schon erwähnten erhöhten Falloutgebiete nördlich und nordöstlich vom Reaktorstandort in Belarus und Rußland, die in einer Entfernung von 150 - 200 km liegen.

Darüber hinaus ist aus dem Atlas (Abb. 5) deutlich zu erkennen, daß auch in großen Entfernungen (1000 km und mehr) Gebiete mit höherer Deposition zu beobachten sind. So werden in Südfinnland, in Mittelschweden und Norwegen, in Österreich, aber auch in der russischen Föderation südlich von Gorki, alle Gebiete in einer Entfernung von 1000 - 1500 km,  $^{137}\text{Cs}$ -Depositionen von mehr als 40 kBq/m<sup>2</sup> beobachtet <sup>(31)</sup>. Die Depositionswerte liegen zwar erheblich niedriger als in der unmittelbaren Umgebung um den Reaktorstandort, stellen aber für diese Entfernungen vergleichsweise hohe Depositionswerte dar. Trotz dieser vergleichsweise hohen Depositionswerte ergibt sich für diese Gebiete nur eine mittlere Dosis von etwa 1 mSv, also Werte, die unterhalb der natürlichen jährlichen Strahlenbelastung liegen (vergl. Kap.4).

In geringeren Entfernungen liegen andererseits Gebiete mit erheblich niedrigeren Depositionen. So finden sich nur etwa 80 km östlich von Tschernobyl weite Landstriche mit Depositionswerten, die erheblich unter diesen Werten liegen, nämlich unter 10 kBq/m<sup>2</sup>. Auch in einem großen Teil der Ukraine werden Kontaminationen von weniger als 40 kBq/m<sup>2</sup> beobachtet. Die baltischen Staaten und Polen, sowie ein beträchtlicher Teil Weißrußlands liegen ebenfalls unter 10 kBq/m<sup>2</sup>. In Österreich werden solche niedrigen Depositionsgebiete nur im Marchfeld beobachtet. Große Teile Polens, die näher als Österreich zu Tschernobyl liegen, weisen Depositionswerte von weniger als 2 kBq/m<sup>2</sup> auf. Solch niedrige Werte wurden z.B. in Österreich praktisch überhaupt nicht beobachtet.

### 3.3 Strahleneffekte in der Bevölkerung

Im Folgenden sollen die durch den Tschernobylfallout verursachten Effekte in der Bevölkerung diskutiert werden.

Bei Bestrahlung mit ionisierender Strahlung ergeben sich grundsätzlich zwei Arten von Schäden:

- Akutschäden, das sind Schäden, die unmittelbar nach der Strahlenbelastung bzw. bis zu etwa 3 Wochen danach auftreten
- Spätschäden (stochastische Schäden), d.s. Schäden, die erst nach Jahren auftreten können.

Akutschäden (z.B. Strahlenkrankheit) treten erst ab einer bestimmten, vergleichsweise sehr hohen Dosis (> 800 - 1000 mSv) auf. Ab diesen Schwellwerten nimmt die Wahrscheinlichkeit, daß der Schaden bei einer exponierten Person auftritt, sehr stark zu, sodaß ab bestimmten, etwas höher liegenden Dosiswerten praktisch 100 % der Bestrahlten betroffen sind. Entsprechend dem bisherigen Erkenntnissen treten ab 1000 mSv vereinzelt Todesfälle auf, die

50 % Lethaldosis liegt bei 3000 mSv, über 7000 mSv ist mit praktisch 100 % Todesfällen zu rechnen <sup>(29)</sup>.

Spätschäden (maligne Erkrankungen, genetische und teratogene Schäden) können bereits bei niedrigeren Dosiswerten auftreten. Sie treten jedoch nur bei einer geringen Anzahl der bestrahlten Personen in Erscheinung. Die Wahrscheinlichkeit, daß es zu einem Spätschaden kommt, hängt dabei von der erhaltenen Dosis ab. Bei den japanischen Atombombenopfern wurden typischerweise bei einer Dosis von 200 mSv ein Risikofaktor von 1 % zusätzlich zum "natürlichen" Krebsrisiko von etwa 20 % beobachtet <sup>(29)</sup>. Das entspricht etwa den Dosiswerten, die die Liquidatoren, die die Aufräumarbeiten in den stark kontaminierten Gebieten durchführten, empfangen haben <sup>(17)</sup>.

### 3.3.1 Akutschäden

Strahlenbelastungen mit so hohen Dosiswerten, daß es zu Akutschäden kommen kann, d.s. Dosiswerte über etwa 800 - 1000 mSv, sind bei Personen *außerhalb* des Kraftwerksgeländes nirgends beobachtet worden. In Pribyat, die dem zerstörten Reaktorblock nächstgelegene Siedlung in einer Entfernung von 5 km, wurde die Bevölkerung zu einem Zeitpunkt evakuiert, bei dem die akkumulierte Dosis etwa 20 mSv betrug. Akutschäden, insbesondere Todesfälle in den ersten Tagen bis Wochen, waren daher nicht zu erwarten und sind auch *nicht* beobachtet worden <sup>(17)</sup>.

Hilfsmannschaften, die am Gelände des Kernkraftwerkes bei der Bekämpfung des Brandes, oder bei der Beseitigung bzw. Reduzierung der Folgen des Unfalls beschäftigt waren, erhielten allerdings zum Teil wesentlich höhere Strahlenbelastungen bis zu einigen 1000 mSv <sup>(30)</sup>. Bei dieser Personengruppe wurden auch Akutschäden beobachtet (siehe Tab. 3), und zwar 134 Fälle von ARS (Acute Radiation Syndrom, Strahlenkrankheit). Von diesen starben 29 Personen an ARS, zwei weitere starben an den schweren Verbrennungen, zum Teil als Folge der hohen Betastrahlung, und eine Person an Herzinfarkt, sodaß die insgesamt Zahl an Todesfällen durch den Tschernobylunfall bei 31 Menschen liegt <sup>(30)</sup>.

Gesamtzahl an Patienten	237
Überlebende der Akutphase	209
Gestorben in Akutphase (1986)	28
<b>Überlebende der Akutphase (bis Feb.1996)</b>	
ARS Grad 1 (mild)	41
ARS Grad 2	49
ARS Grad 3	15
ARS Grad 4 (schwer)	1
ARS nicht bestätigt *	103
<b>Gesamt</b>	<b>209</b>

Tab. 3 Patienten mit Strahlenkrankheit (Acute Radiation Syndrome (ARS)) <sup>(31)</sup>

\* Patienten, die in die Moskauer Klinik mit Verdacht auf ARS eingeliefert wurden, aufgrund klinischer Befunde dies jedoch nicht bestätigt wurde

Die meisten Personen mit ARS wiesen jedoch Dosiswerte unter etwa 3000 mSv auf, sodaß sie die ARS überlebten. Bei dieser Personengruppe kam es erwartungsgemäß zu einer vollständigen Erholung des Patienten, sieht man von Verbrennungsschäden bei einigen Personen ab.

Die Dosiswerte aller übrigen Personen am Kraftwerksgelände, aber auch in die Umgebung lagen unterhalb 700 mSv, sodaß keine Akuteffekte, insbesondere keine Todesfälle auftraten.

### 3.3.2 Spätschäden

#### 3.3.2.1 Somatische Schäden

Wie nach den japanischen Atombombenabwürfen beobachtet, stellt die Erhöhung des Krebs- bzw. Leukämierisikos den wichtigsten unter den oben erwähnten Spätschäden dar <sup>(29)</sup>. Daher wurde nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl bereits sehr frühzeitig der Frage einer Erhöhung der auftretenden malignen Erkrankungen große Beachtung geschenkt. Wegen der zum Teil erheblichen Latenzzeit von einigen Jahren bis Jahrzehnten bis zum Auftreten von strahleninduzierten Krebserkrankungen nach einer erhöhten Bestrahlungsdosis waren allerdings in den ersten Jahren nach dem Unfall keine Erhöhungen zu erwarten und wurden auch nicht beobachtet <sup>(32,33)</sup>.

Ab 1990 wurde jedoch in den höher belasteten Gebieten Weißrußlands, später auch in drei Oblasts in der Ukraine und in Rußland eine Erhöhung der Schilddrüsentumorrate bei Kindern beobachtet. Obwohl eine solche Erhöhung vorher prinzipiell nicht auszuschließen war, überraschte die vergleichsweise hohe Anzahl von Krebsfällen: Pro hunderttausend Kindern wurden etwa 1 - 2 Fälle beobachtet, die 1992 - 1994 auf etwa 4 Fälle anstiegen, während es vor bzw. zum Zeitpunkt des Reaktorunfalls nur 0,2 - 0,4 Fälle je 100000 Kinder waren <sup>(32,34,35)</sup>. Dies war umso erstaunlicher, als nach den Kernwaffendetonationen in Hiroshima und Nagasaki eine wesentlich geringere Erhöhung der Inzidenz von Schilddrüsenkarzinomen beobachtet worden war <sup>(36)</sup>.

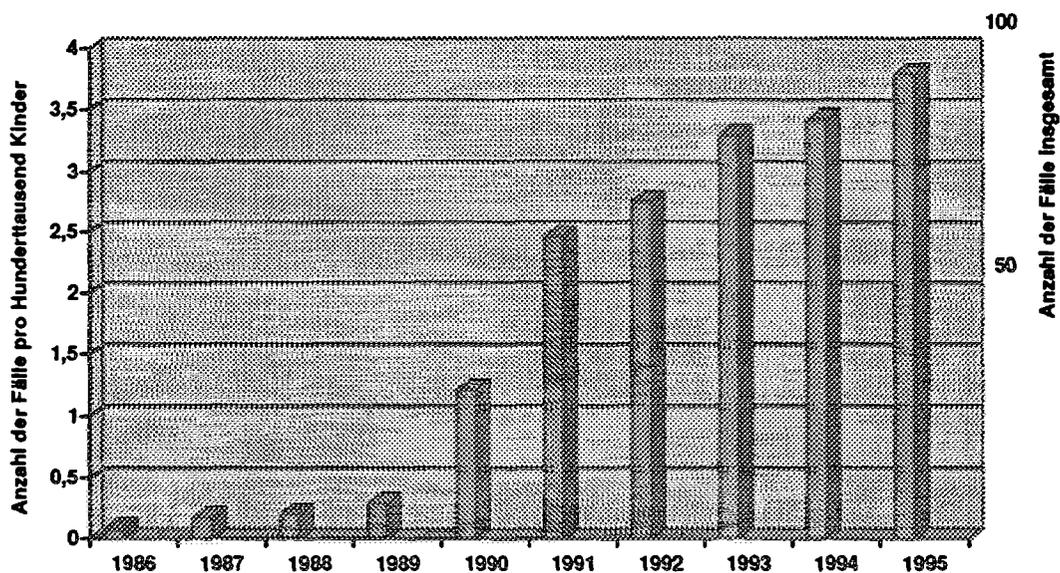


Abb. 6 Schilddrüsenkrebs bei Kindern in Belarus

Bis 1994 wurden 333 Fälle in Belarus, 118 Fälle in der nördlichen Ukraine und 23 Fälle in den hoch belasteten Oblasts von Rußland beobachtet <sup>(34)</sup>. Eine Abschätzung der insgesamt zu erwartenden Zahl ist nach dem heutigen Wissenstand nicht möglich - nicht zuletzt deswegen, weil nach Hiroshima und Nagasaki keine vergleichbaren Effekte vorliegen - jedoch kann davon ausgegangen werden, daß die jährliche Inzidenzrate in den nächsten Jahren kaum zurückgehen wird. Eine Erhöhung der insgesamt auftretenden Zahl an Fällen auf das Acht- bis Zehnfache der heutigen Zahl kann daher nicht ausgeschlossen werden <sup>(32)</sup>.

Es gibt derzeit keine eindeutige Erklärung, warum die Schilddrüsenkrebsrate nach Tschernobyl so deutlich höher als nach Hiroshima ist. Eine der wahrscheinlichsten Erklärungen ist, daß in Japan eine wesentlich bessere Jodversorgung des Menschen (Seeluft, Meerestiere) vorliegt, während die Gebiete in Weißrußland Jodmangelgebiete sind. Bei Sättigung der Schilddrüse mit inaktivem Jod kommt es zu einer erheblich geringeren Aufnahme von radioaktivem Jod im Falle einer Freisetzung. Wenn diese Hypothese stimmt, und das wird in den kommenden Jahren noch genauer zu untersuchen sein, dann kommt der Jodprophylaxe (Jodtabletten), wie sie auf Empfehlung der Strahlenschutzkommission durch das Gesundheitsministerium eingeführt wurde, in einem Jodmangelgebiet wie Österreich ein hoher Stellenwert zu.

Nach dem heutigen Stand der Medizin ist Schilddrüsenkrebs bei Kindern mit hoher Wahrscheinlichkeit (etwa 90 - 95 %) heilbar <sup>(34)</sup>. Entscheidend ist dabei die Früherkennung. Je früher eine maligne Erkrankung bzw. deren Vorläufer erkannt wird, umso höher die Chance, eine vollständige Heilung zu erreichen. Der Ausstattung von Spitälern in diesen Gebieten mit modernsten westlichen Geräten zur Früherkennung und Behandlung, wie von einigen westlichen Staaten, darunter auch Österreich, gefördert, kommt daher eine sehr hohe Bedeutung bei der Hilfe für die betroffene Bevölkerung zu.

Wegen der geringen natürlichen Inzidenz ist neben Schilddrüsenkrebs auch die Leukämierate bei Kindern ein wichtiger Indikator für eine mögliche Erhöhung der Inzidenz maligner Erkrankungen. Die Latenzzeit von Leukämie sollte dabei kürzer als die von Karzinomen sein, sodaß eine eventuelle Erhöhung der Leukämierate bereits früher beobachtbar sein müßte als die von Schilddrüsenkrebs. Im Gegensatz zur Erkrankungsrate an Schilddrüsenkarzinom zeigt

Zahl der Fälle pro 1 Million

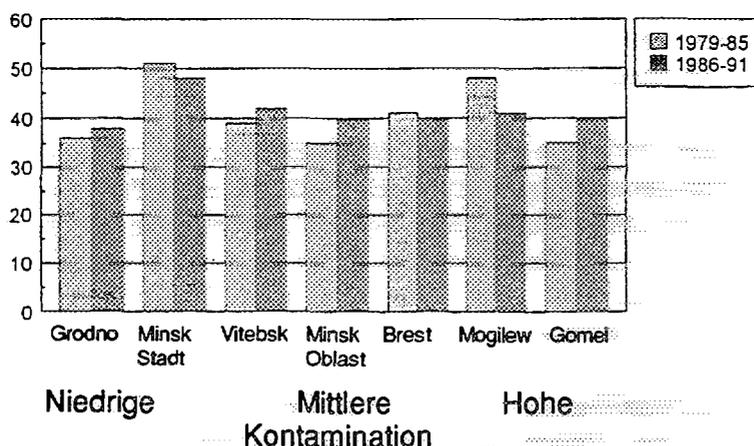


Abb. 7 Leukämierate bei Kindern (0-14 Jahre) in hoch, mittel und niedrig belasteten Gebieten in Belarus <sup>(37)</sup>

sich jedoch bei Leukämie bei Kindern bis heute *keine* Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit (vergleiche Abb. 7) <sup>(37)</sup>. Das Gleiche gilt auch für die Leukämierate bei Erwachsenen der Region, wo ebenfalls keine Erhöhung beobachtbar ist.

Nach den Atombombenabwürfen über den japanischen Städten war zunächst ausschließlich eine Erhöhung der Leukämierate beobachtet worden <sup>(38,39)</sup>. Eine Erhöhung der Krebsrate wurde erst nach einer Latenzzeit von mehr als 10 Jahren beobachtet.

Dieser scheinbare Widerspruch zwischen frühzeitig auftretenden Schilddrüsenkarzinomen und der bis heute nicht beobachtbaren Leukämiezunahme läßt sich zumindest teilweise dadurch erklären, daß eine statistisch signifikante Erhöhung der Leukämierate bei den Hiroshimaopfern erst bei Dosiswerten über 200 mSv beobachtet wurde. Die durchschnittlichen Dosiswerte der durch den Tschernobylunfall betroffenen Bevölkerung in der Umgebung des Kraftwerkes lagen jedoch erheblich unterhalb dieses Wertes. Umgekehrt liegt die Schilddrüsendosis bei Kleinkindern mit 0,4 - 1 Gy offenbar außerhalb dieses Bereiches und somit bereits im linearen Teil der Dosis-Risiko-Beziehung.

Aufgrund der linearen Dosis-Risiko-Beziehung, die heute im Strahlenschutz konservativerweise bis zu sehr niedrigen Dosiswerten angewandt wird, wäre grundsätzlich auch unterhalb dieses Wertes noch eine Erhöhung zu erwarten, die jedoch offensichtlich statistisch derzeit *nicht* beobachtbar ist. Daß eine Erhöhung der Inzidenz der Karzinomrate bisher *nicht* beobachtbar war, ist aufgrund der langen Latenzzeit bei Karzinomen zu erwarten. Eine weitere Verfolgung und Nachuntersuchung ist hier in den nächsten Jahren sicher von großer Bedeutung, denn in Hiroshima und Nagasaki wurde bei der Bevölkerungsgruppe mit Dosiswerten unter 200 mSv sogar ein reduziertes Krebs- und Leukämierisiko im Vergleich zur allgemeinen Bevölkerung beobachtet <sup>(15)</sup>.

Um eine solche Untersuchung zielführend durchführen zu können, bzw. die Evaluierung eines möglichen erhöhten Strahlenkrebsrisikos in der betroffenen Bevölkerungsgruppe zu ermöglichen, können in Belarus, der Ukraine und Rußland vier Gruppen der Bevölkerung mit höheren Strahlenbelastungen unterschieden werden:

- Evakuierte aus der 30 km Zone
- Bewohner "strikt kontrollierter Gebiete" (Deposition > 555 kBq/m<sup>2</sup>)
- Bewohner weiterer kontaminierter Gebiete
- Liquidatoren (Soldaten und Zivilisten, die zu Aufräumarbeiten- und Sicherungsarbeiten in hochkontaminierten Gebieten eingesetzt wurden)

Dabei stellen die Bewohner der strikt kontrollierten Gebiete unter der allgemeinen Bevölkerung die am höchsten exponierte Gruppe dar (durchschnittlich etwa 50 mSv, vgl. Tab. 4). Bei dieser Gruppe müßte eine eventuell erhöhte Krebs- oder Leukämierate am ehesten beobachtbar sein. Für diese Gruppe gelten auch die früher gemachten Aussagen bezüglich einer Erhöhung der Schilddrüsentumorinzidenz, aber auch daß bisher eine Erhöhung von Leukämie oder anderen Krebsarten *nicht nachweisbar* ist.

Die Bewohner der Zone unmittelbar um den zerstörten Reaktor, die Tage bis Wochen nach der Katastrophe evakuiert wurden, erhielten Dosiswerte von durchschnittlich etwa 10 mSv, lagen somit erheblich unter den Werten der Bewohner der strikt kontrollierten Gebiete, sodaß eventuelle Effekte bei dieser Personengruppe wesentlich unwahrscheinlicher als in der ersten Grup-

Bevölkerungsgruppe	Größe der Population	mittlere Dosis	Krebsart	Periode	Krebstodesfälle				Relativer Überschußfaktor**
					durch natürliche <sup>1</sup> Ursachen		vorhergesagt für Tschernobyl		
					Zahl	Anteil*	Zahl	Anteil*	
Liquidatoren 1986 - 87	200000	100 mSv	Krebs	Lebenszeit (95 J.)	41500	21,0 %	2000	1 %	5 %
			Leukämie	Lebenszeit (95 J.)	800	0,4 %	200	0,1 %	20 %
				Erste 10 Jahre	40	0,02%	150	0,08%	79 %
Evakuierte aus 30 km Zone	135000	10 mSv	Krebs	Lebenszeit (95 J.)	21500	16,0 %	150	1 %	0,1 %
			Leukämie	Lebenszeit (95 J.)	500	0,3 %	10	0,01%	2 %
				Erste 10 Jahre	65	0,05%	5	0,008%	7 %
Bewohner strikt kontrol. Gebiete	270000	50 mSv	Krebs	Lebenszeit (95 J.)	43500	16,0 %	1500	0,5 %	3 %
			Leukämie	Lebenszeit (95 J.)	1000	0,3 %	100	0,04 %	9 %
				Erste 10 Jahre	130	0,05%	60	0,02%	32 %
Bewohner anderer Gebiete	3700000	7 mSv	Krebs	Lebenszeit (95 J.)	433000	16,0 %	2500	0,05 %	0,6 %
			Leukämie	Lebenszeit (95 J.)	13000	0,3 %	200	0,01 %	1,5 %
				Erste 10 Jahre	1800	0,05%	100	0,003%	5,5 %

Tab. 4 Potentielle Krebstodesfälle als Folge von Tschernobyl und durch andere Ursachen<sup>(33)</sup>

<sup>1</sup> Hintergrundrate durch natürliche und künstliche Ursachen

\* Anteil an allen Todesfällen

\*\* relativer Überschußfaktor = zusätzliche Zahl / insgesamte Zahl für die gleiche Ursache

pe sind. Sie wurden bisher auch nicht beobachtet. Dies gilt in noch verstärktem Umfang für die Bewohner der weiteren, niedriger kontaminierten Gebiete, wo die Dosiswerte durchschnittlich bei etwa 7 mSv lagen, was etwa dem doppelten natürlichen Strahlenpegel entspricht.

Eine Zusammenstellung der mittleren Dosiswerte der betroffenen Bevölkerungsgruppen und des bei diesen Dosiswerten zu erwartenden Langzeitriskos ist in Tab. 4 gegeben und wird dort mit der "natürlichen" Krebsrate verglichen. Dabei ist anzumerken, daß die Zahl der natürlichen Krebstodesfälle aus der in der Bevölkerung üblichen Hintergrundrate abgeschätzt wurde. Die zusätzlich durch den Tschernobylunfall zu erwartenden Fälle wurden aus den Risikofaktoren, die in den Nachuntersuchungen nach den japanischen Atombombenopfern ermittelt wurden, erhalten. Wie schon früher hingewiesen, wurden diese Faktoren bei höheren Dosiswerten festgestellt und sind nicht ohne weiteres auf niedrigere Dosiswerte übertragbar. Wendet man dennoch eine lineare Extrapolation von höheren Dosiswerten an, so erhält man die in Tab. 4 Spalte 6 rechts angegebenen zusätzlich zu erwartenden malignen Fälle.

Aus Tabelle 4 erkennt man, daß die zusätzliche potentielle Rate an Krebs und Leukämie im Vergleich zur durch andere Ursachen ausgelösten "natürlichen" Krebsrate sehr niedrig ist, wie auch aus den im Vergleich zu Hiroshima und Nagasaki niedrigen Dosiswerten zu erwarten ist. Eine Beobachtung zusätzlicher Krebsfälle wird deshalb nicht einfach sein und bedarf einer peniblen statistischen Untersuchung.

Da Leukämie vor allem in den ersten 10 Jahren (nach einer Latenzzeit von etwa 3 Jahren) erhöht auftritt, wurden in Tabelle 4 für Leukämie auch für die ersten zehn Jahre die zu erwartenden Fällen den durch "natürliche" Ursachen beobachteten Fällen gegenübergestellt. Da die "natürliche" Leukämierate sehr niedrig liegt, müßte hier eine Zunahme besonders deutlich

beobachtbar sein. Gerade in den ersten zehn Jahren ist aber bei *keiner* der vier Bevölkerungsgruppen eine *Zunahme an Leukämie* beobachtbar <sup>(33)</sup>.

Da die Wahrscheinlichkeit, eine erhöhte Krebsrate bei den gleichen Dosiswerten zu beobachten, erheblich geringer ist als für Leukämie, ist zu erwarten, daß es auch in Zukunft *sehr unwahrscheinlich* ist, eine erhöhte Krebsrate in den betroffenen Bevölkerungsgruppen festzustellen. Es muß allerdings ausdrücklich vor voreiligen Schlüssen in dieser Richtung gewarnt werden, da, wie die Schilddrüsenkrebsfälle bei Kindern zeigen, eine Eins-zu-eins Übertragung von den japanischen Atombombenopfern nicht zulässig ist. Dennoch sind die Auswirkungen der erhöhten Strahlenbelastung bei Leukämie und Krebs eher vergleichbar als bei Schilddrüsenkarzinomen, wo der Angriffspunkt ein Organ ist, das durch unterschiedliche Versorgung mit Jod sehr unterschiedliche Auswirkungen in bezug auf die Dosis aufweisen kann.

Wie aus Tab. 4 ersichtlich, müßte eine Erhöhung der Inzidenzrate am ehesten bei Leukämie bei den Liquidatoren beobachtbar sein. Da Leukämie eine vergleichsweise seltene Krankheit ist, ergibt sich eine relative Zunahme von 20 % gegenüber der natürlichen Rate, die eigentlich beobachtbar sein müßte. Noch besser müßte diese Zunahme, wie schon erwähnt, jedoch in den ersten 10 Jahren (79 % Zunahme im Vergleich zur "natürlichen" Rate) und bei den Einwohnern der strikt kontrollierten Zone (32 % Zunahme in den ersten 10 Jahren im Vergleich zur "natürlichen" Rate) erkennbar sein. Bei diesen beiden Gruppen wurde jedoch bisher trotz genauer Untersuchung keine Erhöhung der Leukämierate festgestellt (vergl. Tab. 5).

Die Gruppe der Liquidatoren stellt jedoch in gewissen Sinne einen Sonderfall dar. Ihre Dosis wird auf etwa 100 mSv im Durchschnitt geschätzt, jedoch ist eine genaue Angabe der durchschnittlichen Dosiswerte aus mehreren Gründen kaum möglich. Erstens, trugen nur bestimmte Einsatzgruppen Dosimeter, sodaß eine genaue Dosisbestimmung für viele Gruppen sehr schwierig ist. Die erhaltene Dosis bzw. ein Erreichen der Einsatzdosis wurde in diesem Fall mittels Dosisleistungsmeßgeräten ermittelt. Zweitens, wurden bei vielen Aufräumungstrupps nur ein Dosimeter verwendet, dessen abgelesener Wert für alle Personen herangezogen wurde. Drittens, wurde bei vielen Soldaten das Erreichen der höchstzulässigen Dosis von 250 mSv als Möglichkeit zum vorzeitigen Verlassen der Armee empfunden und daher bewußt angestrebt. Die Eintragung von genau 250 mSv in den Entlassungsdokumenten vieler Soldaten deutet auf

Alle Krebsarten	beobachtet (B)	erwartet (E)	B/E	95% Vertrauens-interval
<i>Männliche Liquidatoren</i>				
Belarus	102	135,6	75	61 - 91
Rußland	449	404,7	111	101 - 121
Ukraine	399	329	121	109 - 133
<i>Bevölkerung in "kontaminierten" Gebieten</i>				
Belarus	9628	9387	103	101 - 105
Rußland	17260	16800	103	101 - 104
Ukraine	22063	22245	99	98 - 101

Tab. 5 Standardisierte Inzidenzrate für Krebs bei Liquidatoren und die allgemeine Bevölkerung <sup>(33)</sup>

bewußte Steuerung der Dosisertragungen zum Zwecke der Entlassung aus der Armee hin<sup>(40,17)</sup>. Dies bedeutet eine vermutlich niedrigere durchschnittliche Dosis der Liquidatoren als registriert, was eine mögliche Erklärung für die Nichtbeobachtung einer Leukämiezunahme ist. Dies würde andererseits bedeuten, daß das Risiko der Liquidatoren bisher überschätzt wurde.

Bei einer durchschnittlichen Dosis von 100 mSv wäre aus der Dosis-Risiko-Beziehung der ICRP, die sich im wesentlichen aus den Nachuntersuchungen der japanischen Atombombenopfer ergibt, eine Zunahme des Krebsrisikos um 1 %, des von Leukämie um 0,1 % zu erwarten (vgl. Tab. 4), entsprechend einer relativen Zunahme gegenüber der natürlichen Rate von 5 % bzw. 20 %. Mit Ausnahme der Ukraine, wo eine solche Zunahme aus den bisherigen Daten statistisch möglich erscheint, wurde jedoch bisher keine statistisch signifikante Zunahme festgestellt. In Belarus wurde sogar eine statistisch signifikante Abnahme, vergleichbar der Zunahme in der Ukraine, beobachtet (Tab. 5).

Eine Bemerkung noch zu den oft in den Medien zu hörenden Meldungen, wonach eine starke Erhöhung der Sterblichkeitsrate unter den Liquidatoren zu beobachten ist, aber auch eine hohe Anzahl von Invaliden festzustellen sei. Die Meldungen über die hohe Sterblichkeitsrate stammt in der Regel von politischen Vertretern, die eine zusätzliche Unterstützung der Liquidatoren aus dem Staatsbudget erreichen möchten. Eine Überprüfung der Todesrate zeigte jedoch, daß diese etwa der Altersstruktur der eingesetzten Personen entspricht und somit nichts Ungewöhnliches darstellt<sup>(41,42)</sup>.

Auch bei der Meldung bezüglich der hohen Zahl von Invaliden unter den Liquidatoren muß man sehr vorsichtig sein. Für die Ukraine wird eine Zahl von 20000 Invaliden unter den Tschernobyl-Liquidatoren angegeben. Hinterfragt man diese Zahl, so stellt sich heraus, daß alle Liquidatoren in einer staatlich konzertierten Aktion untersucht wurden, daß zur Feststellung einer Invalidität jedoch unwesentlich war, ob diese strahlenbedingt ausgelöst sein konnte oder nicht. So wurde Invalidität bei fehlenden Gliedmaßen u.ä. zuerkannt. Es dürfte sich daher eher um eine Art von politisch-sozialer Kompensation handeln. Kausale Zusammenhänge zwischen der Art der Invalidität und der Tätigkeit im Rahmen der Liquidationsarbeiten wurden jedenfalls bei den Untersuchungen nicht festgestellt<sup>(43)</sup>.

Die in den Medien oft kolportierte, starke Zunahme der Sterblichkeitsrate in der allgemeinen Bevölkerung ist, wie statistische Untersuchungen zeigten, nicht nur in den von Tschernobyl hochbelasteten Gebieten feststellbar, sondern ebenso in den weniger belasteten Gebieten der früheren Sowjetunion. Ein *Zusammenhang mit der Strahlenbelastung* ist daher *auszuschließen*. Vielmehr dürfte die Erhöhung der Sterblichkeitsrate eine Folge der drastischen Verschlechterung der Lebensumstände, aber auch der psychologischen Situation in diesen Ländern sein. Dies zeigt sich vor allem auch daran, daß Krebs als Todesursache nur geringfügig und unkorreliert zur Strahlenbelastung, die Todesrate durch Herz-Kreislaufkrankungen, Vergiftungen, Selbstmord u.a. jedoch unverhältnismäßig stärker angestiegen sind<sup>(44)</sup>.

Es wurde außerdem gezeigt, daß die häufig berichtete Zunahme der Krebsrate in den betroffenen Gebieten nicht nur dort, sondern überall in der früheren Sowjetunion beobachtet wird<sup>(45)</sup> und somit eher auf die sich verschlechternden Lebensumstände als auf die Strahlung durch Tschernobyl zurückzuführen ist. Ein weiterer Beweis dafür ist, daß die Zunahme in den kontaminierten wie den wenig kontaminierten Gebieten *unabhängig* vom Strahlenpegel beobachtbar ist<sup>(45)</sup>. Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß es für endgültige Aussage bezüglich einer Zunahme der Krebshäufigkeit zum derzeitigen Zeitpunkt zu früh ist, da die Latenzzeit für Krebs bei 10 und mehr Jahren liegt, somit zum derzeitigen Zeitpunkt eine Erhöhung noch gar nicht in Erscheinung treten kann.

Die in manchen Gebieten erhöht auftretende Zahl von Diabetes unter Kindern wurde von einer Gruppe von Ärzten als möglicherweise durch Tschernobyl verursacht gedeutet <sup>(46)</sup>. Die überwiegende Zahl an Experten sieht hier jedoch keinen Zusammenhang, da Diabetes nicht durch ionisierende Strahlung induzierbar angesehen wird und auch bei keiner der bisherigen wesentlich höheren Strahlenexpositionen als Folgeerscheinung beobachtet wurde <sup>(33)</sup>. Wahrscheinlicher ist, daß es sich dabei um eine der Folgeerscheinungen der sich drastisch verschlechternden Lebensumstände und Gesundheitsversorgung in den Nachfolgestaaten der ehemaligen Sowjetunion handelt.

### 3.3.2.2. Genetische Schäden

Aufgrund der intensiven Nachuntersuchungen nach den japanischen Atombombenopfern, bei denen keine Erhöhung der genetischen Schäden festgestellt werden konnte, werden heute die Folgen in bezug auf genetische Schäden generell niedriger als die somatischen Schäden (Krebs- und Leukämierate) angesehen. Auf Grund dieser Untersuchungen wird heute durch die ICRP das Risiko bei einer Dosis von 10 mSv mit etwa 1 Fall pro 10000 Personen abgeschätzt <sup>(29)</sup>. In der gleichen Personenzahl werden jedoch etwa 700 genetische Schäden durch natürliche und andere Ursachen auftreten. Eine Beobachtung eines zusätzlichen Falles bei 700 Fällen ist nicht möglich, auch nicht bei sehr großen Bevölkerungspopulationen.

Es ist daher nicht verwunderlich, daß bisher keine Erhöhung der genetischen Schäden in der betroffenen Bevölkerung beobachtet wurde. Aufgrund des geringen Risikofaktors ist dies auch in Zukunft nicht zu erwarten.

### 3.3.2.3 Teratogene Schäden

Teratogene Schäden treten auf, wenn der Fötus während der 6.-8. Schwangerschaftswoche höheren Dosiswerten ausgesetzt ist. Nach den Kernwaffendetonationen in Hiroshima und Nagasaki wurden solche Schäden erst bei mehr als 100 mSv beobachtet, wobei zusätzlich zur natürlichen Rate 15 geistige Behinderungen und etwa 100 schwächere Mißbildungen auftraten <sup>(47)</sup>.

Nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl wurden keine solchen Effekte beobachtet. Fehlende Gliedmaßen (z.B verkürzte Arme), wie sie öfters in der Presse berichtet wurden, sind jedoch nicht durch Strahlung verursachte Schäden, sondern Folgen von Medikamenteneinwirkung (z.B. Contergan) oder Krankheiten.

### 3.3.3 Psychische Folgen

Ein bisher, auch bei den japanischen Atombombenopfern, *nicht* beobachteter Effekt ist das Auftreten von Stress-Syndromen. Das vom Internationalen Tschernobyl-Projekt bereits 1990 erstmals beschriebene Phänomen, das mit der Bezeichnung PTSD (Post-traumatic Stress Disorder) in die wissenschaftliche Gemeinschaft eingeführt wurde, wurde bei der IAEA-Tagung in Wien durch einen englischen Psychiater mit "Chronic Environmental Stress Disorder" neu definiert, da es mehr auf einem dauernden Umweltzustand bzw. dessen - zum Teil fehlerhaften - Einschätzung beruht als auf einem einmaligen traumatischen Ereignis.

Die dabei auftretenden Symptome (Depression, mangelnde Initiative, Mutlosigkeit) sind nicht strahlenbedingt, sondern eine Folge von Streß. Dies wurde durch mehrere internationale Studien bestätigt. Zur Milderung der Folgen ist ein weiterer Handlungsbedarf, vor allem auch durch westliche Organisationen, gegeben. Dabei kommt der Aufklärung über die vermeintlichen und tatsächlichen Risiken, aber auch der Verbesserung der Lebensbedingungen in allen Bereichen, nicht nur in den hochbelasteten Zonen, hohe Bedeutung zu.

### 3.4 Ökonomische Folgen

Eine Angabe über die ökonomischen Folgen des Reaktorunfalls in Tschernobyl ist äußerst schwierig bis unmöglich. Dafür sind eine Reihe von Gründen maßgebend:

- Bestimmte Kostenfaktoren sind praktisch nicht ermittelbar. So sind beispielsweise die Folgen, die durch die Unterbrechung der täglichen Lebensaktivitäten sowie der ökonomischen Aktivitäten entstanden sind, kaum quantifizierbar. Auch der Schaden, der für ein energiearmes Land durch den Stop des Kernkraftwerksbaus und der daraus resultierenden mangelnden Energieversorgung entstanden ist, ist in Ziffern kaum angebbbar. Auch die Kosten für den Einsatz der Liquidatoren sind nur schwierig quantifizierbar.
- Eine Reihe von Kostenfaktoren wurde durch Maßnahmen hervorgerufen, die nur geringe oder gar keine Dosisreduktionseffekte brachten. Ein typisches Beispiel in dieser Richtung stellt die Festlegung eines Grenzwertes von 350 mSv Lebensdosis dar, die drei Jahre nach dem Unfall ergriffen wurde und zur Absiedlung von weiteren Zehntausenden von Einwohnern führte, obwohl diese Gruppe zu diesem Zeitpunkt bereits mehr als 90 % der Lebensdosis erhalten hatte. Die Dosisersparung durch diese Maßnahme war somit geringer als einige Prozent der Lebensdosis, die Kosten für die Absiedlung jedoch beachtlich.
- Manche Maßnahmen wurden ergriffen ohne mit den Konsequenzen durch die Tschernobylbelastung in irgendeinem kausalen Zusammenhang zu stehen. Ein typisches Beispiel dafür ist die Zahlung einer Invaliditätsrente an Liquidatoren, die unabhängig von irgendwelchen kausalen Zusammenhängen erfolgte.
- Die Folgen für die Landwirtschaft sind nur sehr schwierig quantifizierbar. Die Nichtverkäuflichkeit von bestimmten Produkten, die strahlenschutzmäßig kein Problem darstellen aber als "belastet" gelten, aber auch, weil sie aus bestimmten Gebieten stammen, die in der Öffentlichkeit das Image der höheren "Verstrahlung" haben, fällt ebenso darunter, wie die Kosten, die durch eine rechtzeitige Angabe von Maßnahmenempfehlungen in der Landwirtschaft vermieden hätten werden können. Ein Teil der Folgen resultiert aber auch daraus, daß bei geeigneter Nutzung manche kontaminierten Gebiete weiter nutzbar gewesen wären, bzw. heute bereits wieder nutzbar wären.
- Psychologische Faktoren (Environmental Stress-Syndrom, aber auch Reaktionen in bezug auf das Ergreifen an sich optimaler Gegenmaßnahmen) ergeben enorme ökonomische Effekte, deren Wirkungen kaum abschätzbar sind.

Die Angaben bezüglich der ökonomischen Kosten schwanken daher je nach Quelle und Interesse der jeweiligen Institution um mehrere Größenordnungen. Auf eine Angabe bezüglich der Folgekosten des Tschernobylunfalls wird daher in diesem Zusammenhang verzichtet.

#### 4. Kontamination außerhalb der hochbelasteten Gebiete

In den größeren Teilen Weißrußlands, Rußlands und der Ukraine außerhalb der hochbelasteten Gebiete lagen die Aktivitätsdepositionswerte erheblich niedriger als in der Kernzone. Dies gilt auch für die Territorien in allen übrigen Staaten Europas. Die Depositionswerte lagen in diesen Bereichen unter  $100 \text{ kBq/m}^2$ . In Österreich, das neben Bulgarien das am höchsten belastete Land <sup>(10,12)</sup> außerhalb der ehemaligen Sowjetunion war, betrug die mittlere Deposition  $22 \text{ kBq/m}^2$   $^{137}\text{Cs}$ . Österreich mag daher als typisch für die Länder und Gebiete außerhalb der hochbelasteten Gebiete gelten, auch wenn es eher am oberen Rand unter diesen liegt.

Die durchschnittliche Deposition in der BRD aber auch den übrigen westeuropäischen Ländern war dagegen wesentlich niedriger <sup>(48,49)</sup>. Auch in den osteuropäischen Nachbarländern Tschechien, Slowakei, Ungarn und Polen waren die Depositionen niedriger <sup>(10)</sup>.

Die Strahlenexposition soll daher - stellvertretend für diese Länder - am Beispiel Österreichs dargestellt werden.

Die mittlere Strahlenexposition betrug in Österreich im ersten Jahr nach dem Unfall, d.i. vom 1. Mai 1986 bis 30. April 1987,  $0,54 \text{ mSv}$  <sup>(26,50,51)</sup>. Davon wurden etwa  $0,10 \text{ mSv}$  durch die externe Strahlung aus der Wolke sowie von am Boden abgelagerter Radioaktivität verursacht <sup>(50)</sup>. Der Beitrag durch Inhalation radioaktiver Stoffe in der Luft betrug  $0,03 \text{ mSv}$  und der größte Beitrag zur Dosis stammte von der Ingestion kontaminierter Nahrungsmittel. Dieser Beitrag lag bei  $0,41 \text{ mSv}$ . Mehr als 95 % dieser Dosis wurde durch die beiden Cäsiumisotope  $^{134}\text{Cs}$  und  $^{137}\text{Cs}$  verursacht, zirka  $0,03 \text{ mSv}$  wurde durch  $^{131}\text{J}$  (Radiojod) beigetragen. Bei Kindern war der Beitrag durch  $^{131}\text{J}$  größer, nämlich  $0,2 \text{ mSv}$  <sup>(26,50)</sup>. Messungen an mehr als 1000 Personen am Seibersdorfer Ganzkörperzähler ergaben, daß die tatsächliche Dosis durch kontaminierte Nahrungsmitteln noch erheblich niedriger lag, nämlich bei  $0,25 \text{ mSv}$  statt der aus der durchschnittlichen Aktivitätskonzentration in den Nahrungsmitteln abgeschätzten Dosis von  $0,41 \text{ mSv}$  <sup>(52)</sup>.

Vergleicht man mit anderen Strahlenbelastungen, denen die Bevölkerung typischerweise ausgesetzt ist, so erkennt man, daß diese Dosisbeiträge nicht sehr hoch sind. So führt die natürliche Strahlenbelastung jährlich zu einer Dosis von  $3,8 \text{ mSv}$  <sup>(53)</sup>, also zu etwa dem 8-10fachen der durch Tschernobyl verursachten Dosis. Dieser Strahlenbelastung sind wir jedes Jahr, ein Leben lang, ausgesetzt. Die Belastung durch Tschernobyl erfolgte nur im ersten Jahr nach dem Unfall in dieser Höhe, in den Folgejahren lag der Dosisbeitrag erheblich niedriger, nämlich bei wenigen Prozent des Erstjahreswertes, wie noch im folgenden Kapitel ausführlicher dargelegt wird.

Der nächstgrößte Beitrag zur Strahlenexposition stammt aus der medizinischen Applikation. Sie liegt wesentlich niedriger als die natürliche Strahlenbelastung, beträgt aber mit  $1,2 \text{ mSv}$  pro Jahr noch immer mehr als doppelt soviel wie die durch Tschernobyl verursachte. Dabei wurde die Strahlenbelastung durch die Therapie selbstverständlich nicht mitgerechnet.

Die Belastung durch den Tschernobylunfall stellt somit eine im Vergleich zu anderen Strahlenbelastungen, denen wir dauernd ausgesetzt sind, geringe Exposition dar. Sie lag auch im ersten Jahr nach dem Reaktorunfall in allen Ländern außerhalb der hochbelasteten Gebiete der Ukraine, Belarus und Rußlands unter der natürlichen jährlichen Strahlenexposition, in den Folgejahren bei wenigen Prozent davon.

Dies wird besonders deutlich, wenn man die in den ersten zehn Jahren nach dem Reaktorunfall akkumulierte Dosis mit der aus den anderen wesentlichen Strahlenexpositionen im selben

Zeitraum akkumulierten vergleicht, wie in Abbildung 8 dargestellt. Die durch den Reaktorunfall in Tschernobyl verursachte Dosis beträgt in diesem Zeitraum etwa ein Fünfzigstel der durch die natürliche Strahleneinwirkung verursachten. Sie liegt bei etwa einem Zwanzigstel der durch die medizinische Diagnostik gegebene Dosis.

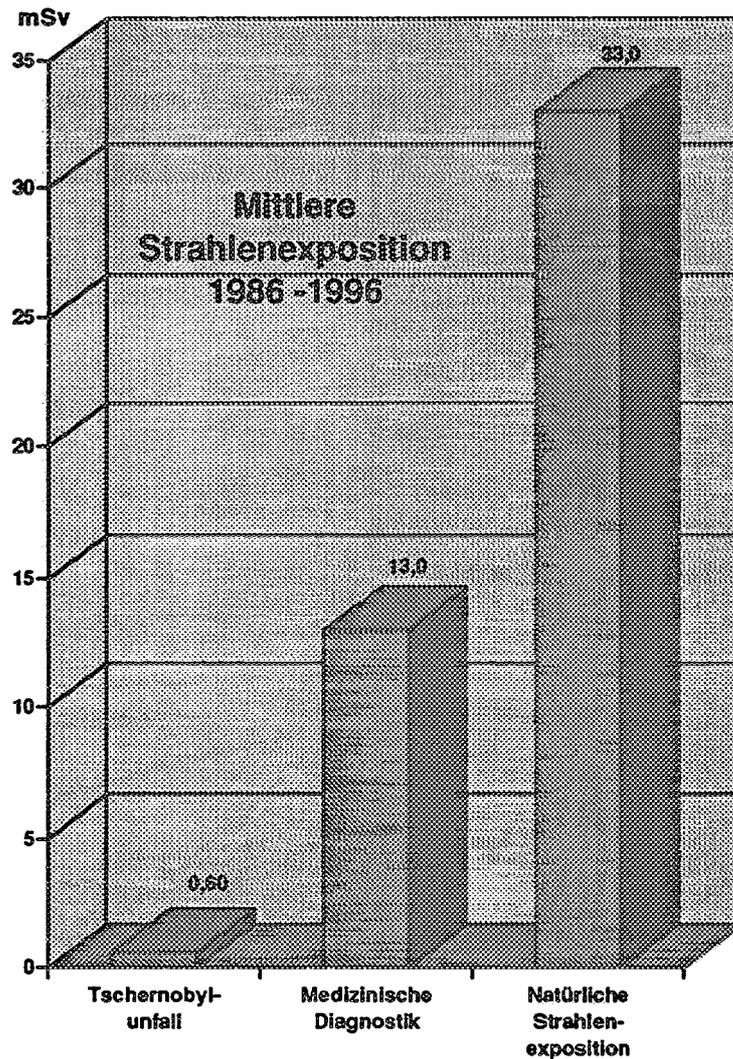


Abb. 8 Die Strahlenexposition durch den Tschernobylunfall in den zehn Folgejahren im Vergleich zur Strahlenexposition durch medizinische Diagnostik und natürliche Strahlung (Mittelwerte in Österreich)

Bei solch niedrigen Dosiswerten sind keine Effekte, weder akute noch Spätfolgen zu erwarten. Sie wurden auch weder in Österreich noch in anderen Ländern beobachtet. Mehrere Studien, die in bezug auf diese Frage angestellt wurden <sup>(54,55,56)</sup>, führten alle zum gleichen Ergebnis:

Es gibt *keine* erhöhten Effekte, weder in bezug auf Mißbildungen oder andere teratogenen Schäden von im Mutterleib bestrahlter Leibesfrucht noch in bezug auf genetische Veränderungen, aber auch nicht in bezug auf eine Erhöhung von Krebs oder Leukämie.

## 5. Die Abnahme der Strahlenbelastung in den Folgejahren

Da die Abnahme der Aktivitätskonzentration in Nahrungsmitteln nach dem Reaktorunfall schneller und steiler erfolgt, als im Bewußtsein der Allgemeinheit bekannt, soll hier kurz der Aktivitätsverlauf, vor allem die Langzeitabnahme der Aktivität betreffend, dargestellt werden.

Nach dem Ende des Fallouts und der daraus resultierenden direkten Kontamination nach etwa 5 - 8 Tagen folgte eine Phase der steilen Abnahme der Aktivitätskonzentration in allen Bewuchsarten und Lebensmitteln. Für die am stärksten kontaminierten Pflanzen wie Blattgemüse, Grünbewuchs und Milch ist dies in Abb. 9 für Österreich dargestellt<sup>(57)</sup>, wurde aber in allen Ländern einschließlich der Staaten der früheren Sowjetunion beobachtet.

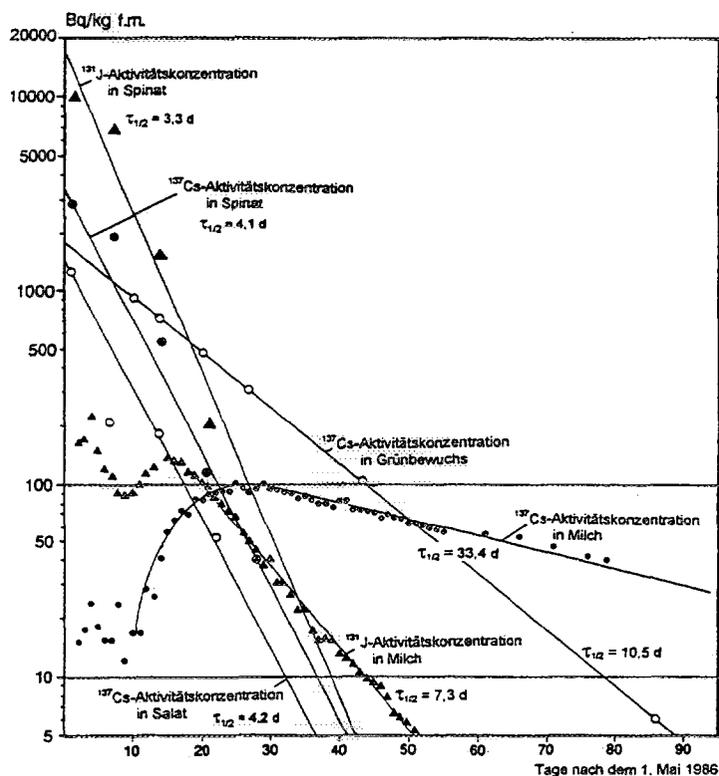


Abb. 9 Aktivitätskonzentration in Grünbewuchs (Gras) und in Milch

Wie in Abb. 9 ersichtlich, lag die effektive Halbwertszeit der wichtigen Radionuklide in Grünbewuchs, auch die der Cäsiumisotope, wie bereits bei Falloutsituationen vor Tschernobyl beobachtet, bei wenigen Tagen. Die effektive Halbwertszeit für  $^{131}\text{J}$  betrug etwa 4,5 Tage, für  $^{137}\text{Cs}$  10,6 Tage<sup>(58)</sup>. Dies ist eine Folge der Verdünnung durch Pflanzenwachstum. Diese sehr kurzen Halbwertszeiten bedeuten nicht nur eine vergleichsweise kurze Phase hoher Aktivitätskonzentration, sondern auch, daß Gegenmaßnahmen nur über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum in der Anfangsphase sehr effektiv waren, zu einem späteren Zeitpunkt nur mehr geringe Dosisreduktionen bewirkten. In Blattgemüse lag die beobachtete effektive Halbwertszeit nur bei 3,3 ( $^{131}\text{J}$ ) bzw. 4,2 Tagen ( $^{137}\text{Cs}$ )<sup>(57)</sup>. Daher waren Gegenmaßnahmen nur in den ersten 2 - 3 Wochen angezeigt, wie sie auch in Österreich von den Behörden ergriffen wurden. Es bedeutete aber weiters auch, daß die  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentration in tierischen Produkten, insbesondere Fleisch, nicht die der hohen Anfangsaktivität entsprechende Gleichgewichtskonzentration erreichte, sondern das Maximum sich bei niedrigeren Werten einstellte.

Die Aktivitätskonzentration in Milch zeigte einen etwas anderen Verlauf. Für  $^{131}\text{J}$  ergab sich in der Anfangsphase eine ähnlich steile Abnahme wie im Grünbewuchs, die Abnahme von  $^{137}\text{Cs}$

folgte dagegen einem etwas langsameren Verlauf entsprechend einer effektiven Halbwertszeit von 33 Tagen <sup>(57,59)</sup> (Abb. 9). Dies ergibt sich aus dem Metabolismus von <sup>137</sup>Cs im Kuhkörper. Die Abnahme mit dieser Halbwertszeit hielt bis Ende Oktober an (Frischfutterfütterungsperiode).

Mit dem Beginn der Heufütterung im Herbst stieg die Aktivitätskonzentration entsprechend den höheren Aktivitäten in Heu, das Mai bis August geerntet worden war, im Vergleich zum zuletzt verfütterten Gras im Oktober wieder an. Allerdings erreichte der durchschnittliche Aktivitätsgehalt in der Winterperiode nur mehr ein 1/3 der Werte des Maximums im Juni. Dies war auch zu erwarten, da das verfütterte Heu im Winter aus der Ernte über den gesamten Sommer und nicht nur aus der Phase hoher Aktivitätskonzentration direkt nach dem Fallout stammte <sup>(59)</sup>.

Im zweiten Jahr ergab sich mit dem Beginn der Grünfütterung (Mai 1987) eine starke Abnahme der <sup>137</sup>Cs-Aktivitätskonzentration in Milch, da das neue Gras bereits erheblich niedrigere Aktivitätskonzentrationen aufwies. Die Abnahme des Aktivitätsgehalts betrug etwa 95 % im Vergleich zu den nach dem Fallout beobachteten Werten <sup>(60,61,62)</sup>. Dies war im wesentlichen auch in allen anderen Nahrungsmitteln zu beobachten, wobei sich eine Abnahme zwischen 90 % (Obst) und 95 % (Getreide) zeigte <sup>(62)</sup>.

Die insgesamt Abnahme der Strahlenbelastung war jedoch wesentlich stärker, da in der Anfangsphase ein erheblicher Teil der externen wie der internen Strahlenbelastung durch Radionuklide mit kürzeren Halbwertszeiten verursacht wurde, die nach wenigen Tagen bzw. Wochen bereits zerfallen waren (<sup>99</sup>Mo, <sup>103</sup>Ru, <sup>131</sup>I, <sup>132</sup>Te, <sup>132</sup>J, <sup>133</sup>J, etc.). Auch die Strahlenexposition durch das zweite Cäsiumisotop <sup>134</sup>Cs sowie von <sup>106</sup>Ru nimmt wegen der kürzeren Halbwertszeit natürlich schneller als die durch <sup>137</sup>Cs ab. Die Dosis in der zweiten Hälfte 1987, also nach dem Ende der Direktkontaminationsphase, betrug somit nur mehr weniger als 1 % der Dosis in der Anfangsphase (erstes Halbjahr 1986) <sup>(63)</sup>.

Auch nach dem ersten Jahr (Ende der Auswirkungen der Direktkontaminationsphase) ergibt jedoch sich eine weitere Abnahme der Aktivitätskonzentration in den Folgejahren (Abb. 10). Sie wird durch zunehmende Bindung des Cäsiums im Boden sowie durch Verlagerung in tiefere Bodenschichten verursacht. Bereits nach den Kernwaffentests der Fünfziger- und Sechziger-

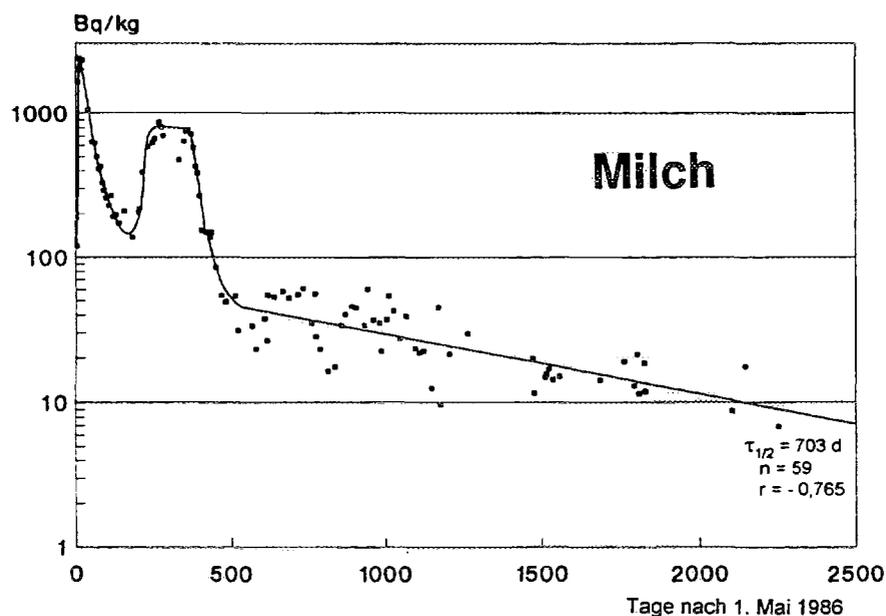


Abb. 10 Abnahme der <sup>137</sup>Cs-Aktivitätskonzentration in Milch nach dem Reaktorunfall

jahre war diese Abnahme beobachtet worden. Nach dem Tschernobylunfall wurde jedoch eine Abnahme mit einer noch kürzeren effektiven Halbwertszeit beobachtet <sup>(60,62)</sup>. Der Grund liegt darin, daß nach den Kernwaffentests der Fallout nicht einmalig und kurzzeitig erfolgte, sondern auch nach dem Ende der großen Testserien ein weiterer Fallout über mehrere Jahre durch den Transport der Aktivität in höhere Atmosphärenschichten sowie durch fortgesetzte Tests von kleineren Nuklearwaffenstaaten gegeben war. Dadurch ergab sich eine langsamere Abnahme der Aktivitätskonzentration in den Nahrungsmitteln als für einen kurzzeitigen Fallout typisch.

Die in einer Studie im Auftrag des Gesundheitsministeriums festgestellte effektive Halbwertszeit liegt bei etwa 1,8 Jahren und ist in praktisch allen Nahrungsmitteln zu beobachten <sup>(62)</sup>. Die physikalische Halbwertszeit des <sup>137</sup>Cs von 30 Jahren, die immer wieder in Verbindung mit den Zeiträumen genannt wird, über die mit radioaktiver Kontamination und Belastung eines Gebietes zu rechnen ist, spielt somit bei der Strahlenbelastung der Bevölkerung keine wesentliche Rolle, auch wenn sie aus Unwissenheit immer wieder fälschlich für die Langzeitbelastung durch den Tschernobylfallout herangezogen wird. Diese nach dem Reaktorunfall beobachtete Langzeitabnahme der Nahrungsmittelkontamination ist typisch für die zu erwartende Abnahme der Aktivitätskonzentration nach einer großräumigen radioaktiven Kontamination.

Eine vergleichbare Abnahme der Aktivitätskonzentration in allen Nahrungsmitteln wurde auch in anderen Ländern beobachtet. Sowohl in Deutschland <sup>(48)</sup> wie in Tschechien <sup>(65,66)</sup>, aber auch in den hochbelasteten Gebieten der russischen Föderation <sup>(67)</sup> wurde eine ähnliche langfristige Abnahme der Aktivitätskonzentration mit vergleichbaren Halbwertszeiten beobachtet. Die in Österreich beobachteten effektiven Halbwertszeiten für die Aktivitätsabnahme können somit als repräsentativ für die generelle Abnahme in allen Ländern der nördlichen gemäßigten Klimazone betrachtet werden <sup>(68)</sup>.

Es ist anzumerken, daß in einigen Nahrungsmitteln bzw. ökologisch besonderen Gebieten sich eine geringere Aktivitätsabnahme im Lauf der Jahre ergibt. Dies gilt für Wald- als auch für Almgebiete. Pilze in Wäldern weisen eine generell geringere Abnahme der Aktivitätskonzentration auf. Auch Milch von Hochalmen weist Aktivitätskonzentrationen auf, die seit dem Jahr 1986 nur mit einer effektiven Halbwertszeit von 2,5 - 5 Jahren abgenommen haben <sup>(61)</sup>. Der Beitrag dieser Milch zur gesamten Ingestionsdosis liegt jedoch bei weniger als 1 % <sup>(62)</sup>. Aber auch der ausschließliche Konsum von Almmilch liefert heute realistischerweise nur eine Ingestionsdosis von 0,01 - 0,02 mSv <sup>(63)</sup>. Ein Konsum von 2 kg Wildpilzen pro Jahr, eine Menge, die höchstens auf echte Pilzsammler zutrifft, nicht jedoch als Bevölkerungsmittelwert zu betrachten ist, ergibt eine Dosis von etwa 4 µSv, also etwa 1 % der Ingestionsdosis durch natürliche Radionuklide <sup>(63)</sup>. Sie ist somit so gering, daß Milch von Hochalmen heute keine Belastung mehr darstellt, auch wenn die Werte noch immer im Vergleich zu Milch aus intensiver Weidenutzung hoch sind.

Durch die wesentlich schnellere Abnahme der <sup>137</sup>Cs-Aktivitätskonzentration nach einem einmaligen Fallout als nach dem langdauernden Fallout der Kernwaffentests beobachtet, ergibt sich auch eine geringere Langzeitfolgedosis als ursprünglich prognostiziert. Die 50 Jahre-Folgedosis durch Ingestion nach einem Reaktorunfall liegt nur bei etwa dem 1,3-fachen der Ingestionsdosis im ersten Jahr <sup>(63)</sup>.

In Österreich beträgt so die Ingestionsdosis des Erwachsenen im Jahr 1993 als Folge der starken Abnahme der Aktivitätskonzentration in allen Nahrungsmitteln nur mehr 5,6 µSv, beim fünfjährigen Kind nur mehr 2,5 µSv. Dies entspricht beim Erwachsenen etwa 1,2 %, beim einjährigen Kind etwa 0,6 % der Ingestionsdosiswerte des Jahres 1986, bzw. etwa 1,9 % der Ingestionsdosis durch natürliche Radionuklide, wie sie in der Nahrung immer zu finden sind.

## 6. Einfluß der Gegenmaßnahmen auf die Strahlenexposition der Bevölkerung

In Österreich wurden nach dem Reaktorunfall eine Reihe von Gegenmaßnahmen ergriffen, um die Strahlenbelastung der Bevölkerung zu minimieren. Diese beschränkten sich fast ausschließlich auf Nahrungsmittel. Wegen der vergleichsweise geringen, zu erwartenden Strahlenbelastung wurden keine Empfehlungen zum Verbleiben in Häusern oder bezüglich Maßnahmen zur Reduktion der Inhalationsdosis gegeben.

Ein erheblicher Teil der Maßnahmen mit dem Ziele der Reduktion der Aktivitätskonzentration in Nahrungsmittel blieb von der Bevölkerung weitgehend unbemerkt, da sie bei den Nahrungsmittelproduzenten bzw. -verarbeitenden Betrieben effektiert wurden. Sie brachten die größten Reduktionen der Aktivitätszufuhr und damit der Ingestionsdosis, während andere in der Öffentlichkeit stärker beachtete Maßnahmen oft nur geringe Dosisreduktionen bewirkten. Aus dieser Erfahrung lernend, soll im Folgenden ein kleiner Rückblick auf die Maßnahmen und die mit ihnen erzielten Dosisersparungen gegeben werden.

In Abb. 11 sind die Beiträge aller nach dem Reaktorunfall in Österreich ergriffenen Maßnahmen zur Dosisreduktion dargestellt <sup>(69)</sup>. Wie ersichtlich, haben im wesentlichen nur drei dieser Maßnahmen zur Reduktion der Dosisbelastung beigetragen:

- Verkaufsverbot für Grüngemüse
- Verbot der Grünfütterung bei Milchkühen
- Auswahl der Frischmilch in den Molkereien

Das Verkaufsverbot für Grüngemüse, eine Maßnahme, die auch in der Öffentlichkeit viel Beachtung fand, brachte einen vergleichsweise hohen Dosisreduktionseffekt. Diese Maßnahme war deswegen besonders effizient, weil die Aktivitätskonzentrationen in Grüngemüse doch erheblich über den Interventionswerten für Nahrungsmittel lagen. Bedeutend für die Effizienz der Maßnahme war jedoch auch, daß die Aktivitätskonzentration eine steile Abnahme mit einer

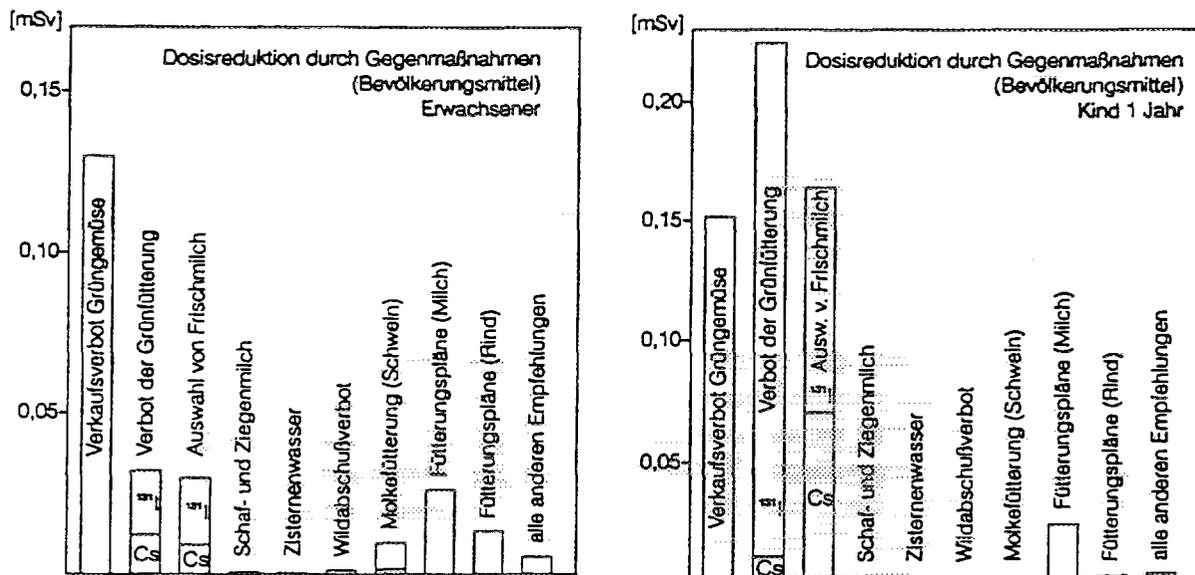


Abb. 11 Die Beiträge der verschiedenen Maßnahmen zur Dosisreduktion nach dem Tschernobylunfall

sehr kurzen Halbwertszeit von etwa 4 Tagen aufwies. Dadurch konnte sie auf die ersten drei Wochen nach dem Fallout beschränkt werden. Dennoch betrug die Dosisreduktion durch diese Maßnahme etwa 0,13 mSv (Erwachsener) bzw. 0,15 mSv (Kind) <sup>(69,70)</sup>.

Die insgesamt Reduktion der Ingestionsdosis durch diese Maßnahme wäre noch höher gewesen, wenn die effektive Halbwertszeit länger als dann tatsächlich beobachtet gewesen wäre. Dies war jedoch zum Zeitpunkt des Ergreifens der Maßnahme nicht absehbar.

Auch die Maßnahme zur Reduktion der Jod-Aktivitätskonzentration in Milch, die in Form eines Grünfütterungsverbot es unmittelbar nach dem Eindringen der Wolke ergriffen wurde, erwies sich als sehr effektiv (Abb. 11). In den Bundesländern, in denen sie prompt und effizient durchgeführt wurde, konnte eine Reduktion der Aktivitätskonzentration um bis zu einem Faktor 10 erreicht werden, und damit vor allem die Schilddrüsenbelastung des Kleinkindes reduziert werden.

Die Reduktion der Dosis durch diese Maßnahme wurde zu etwa 0,22 mSv beim einjährigen Kleinkind (Effektivdosis) abgeschätzt <sup>(69,70)</sup>. Dabei wurde der überwiegende Teil (~ 95 %) durch die Verringerung der <sup>131</sup>J-Aufnahme erreicht, zu einem geringeren Ausmaß wurde auch die Ingestionsdosis durch <sup>137</sup>Cs (0,01 mSv) reduziert. Vergleicht man dies mit der gesamten Erwartungsdosis durch Ingestion für das erste Jahr nach dem Unfall, so zeigt sich, daß durch diese Maßnahme allein die Ingestionsdosis (Effektivdosis) des Kleinkindes um etwa 12 % reduziert wurde. Die Schilddrüsendosis des Kleinkindes wurde um etwa 7 mSv reduziert, dies entspricht einer Reduktion der Schilddrüsendosis um etwa 50 %.

Eine weitere wichtige Maßnahme war die Kontrolle und Selektion der Frischmilch in den Molkereien. Sie wurde durch die tägliche, später 2- bis 3-tägige Messung der Milch in jedem Anliefersammeltank ermöglicht. Dadurch konnten bereits sehr frühzeitig Gebiete mit höheren Aktivitätskonzentrationen in Milch identifiziert werden und bei der weiteren Milchverarbeitung berücksichtigt werden. Auch der zeitliche Verlauf der Aktivitätskonzentration sowie eventuelle Änderungen durch Modifikation der Sammeltour oder Änderungen im Fütterungsverhalten (unterschiedliche Umstellung von Alt- auf Frischfutter zwischen Tal und Almen) war gut erfaßbar. Dadurch konnte in den Molkereien eine Auswahl zwischen Milch mit unterschiedlichem "Belastungsgrad" getroffen, wobei Milch mit höherer Aktivitätskonzentration zur Butter-, Käse- bzw. Trockenmilcherzeugung, solche mit niedrigerem Aktivitätsgehalt zur Frischmilchproduktion herangezogen wurde. Die dadurch erzielte Dosisreduktion wurde auf etwa 0,03 mSv beim Erwachsenen, bzw. 0,16 mSv beim Kleinkind geschätzt <sup>(69,70)</sup>, wobei natürlich die größten Dosisersparungseffekte in der Anfangsphase höchster Kontamination gegeben waren. Auch die Maßnahme der Fütterungspläne in höher belasteten Gebieten, die primär darauf ausgerichtet war, in diesen Gebieten die vorgegebenen Grenzwerte zu unterschreiten, lieferte einen, wenn auch etwas kleineren Beitrag zur Dosisreduktion.

Alle anderen Maßnahmen, auch solche, die in den Medien intensiv kolportiert wurden, brachten nur vergleichsweise geringe Dosisersparungseffekte. Dies folgt zum Teil daraus, daß die Maßnahmen auf bestimmte Bevölkerungsgruppen mit potentiell hoher Einzelbelastung (Schaf- und Ziegenmilch, Zisternenwasser, Wildabschuß) ausgerichtet waren, aber für die allgemeine Bevölkerung nur sehr geringe oder überhaupt keine Dosisreduktion ergaben. Zum Teil folgte es jedoch auch daraus, daß Maßnahmen zur Einhaltung von Grenzwerten ergriffen wurden, die nur kleine Personengruppen oder unbedeutende Nahrungsmittel bzw. kleine Teilmengen eines Nahrungsmittels (Molkeschweine) betrafen, und somit nur wenig zur Reduktion der Bevölkerungsbelastung beitragen konnten.

Insbesondere zeigte sich, daß einzelne Maßnahmen praktisch keinen Beitrag zur Dosisreduktion lieferten. Das Extrembeispiel in diesem Zusammenhang stellt das Verbot der Ausbringung von Klärschlamm mit einer Aktivitätskonzentration über 370 Bq/kg dar. Die dadurch erzielte Dosisreduktion liegt bei etwa 0,0003 mSv <sup>(69)</sup>, ist also äußerst niedrig, sodaß die Maßnahme als nicht gerechtfertigt anzusehen ist. Der Grenzwert für die Ausbringung von Klärschlamm auf Felder wurde bei einem Wert festgelegt, der dem Grenzwert in Nahrungsmitteln vergleichbar ist, obwohl der sehr niedrige Dosisreduktionseffekt wegen des niedrigen Transferfaktors für <sup>137</sup>Cs aus dem Boden in die Pflanze erwartbar gewesen war. Die Kosten der Klärschlamm-beseitigung, bzw. die Probleme, die sich aus einer geänderten Entsorgung ergaben, waren beachtlich.

Insgesamt konnte jedoch durch die ergriffenen Maßnahmen die Ingestionsdosis beim Erwachsenen um etwa 0,3 mSv und beim Kleinkind um 0,5 mSv reduziert werden. Dies entspricht einer 40 %igen Reduktion der Dosis im Verhältnis zu der ohne Maßnahmen zu erwartenden Ingestionsdosis <sup>(69,70)</sup>.

## 7. Die heutige Situation

### 7.1 Die Situation in der Ukraine und Weißrußland

Beim Unfall im Block 4 des Kernkraftwerkes Tschernobyl wurden, wie erwartbar, vor allem leichtflüchtige radioaktive Stoffe wie Tellur, Jod, Molybdän und Cäsium freigesetzt. Ein Großteil der Isotope dieser Elemente besitzt kurze Halbwertszeiten von einigen Stunden bis einige Tage. Dadurch ergibt sich in der Anfangsphase eine vergleichsweise hohe Dosisleistung, in der Folge jedoch ein schnelles Abklingen der Strahlung.

So betrug die Dosisleistung im Freien nach einem Monat nur mehr etwa 12 % der ursprünglichen Maximalwerte am 28./29. April <sup>(26)</sup>. Abgesehen von unterschiedlichen Ausgangsdosisleistungen, gilt dies in Österreich gleichermaßen wie in der Umgebung von Tschernobyl, da es sich im wesentlichen um die gleichen Radionuklide handelt, die in der Ukraine wie in Österreich abgelagert wurden. Anfänglich war die Abnahme in der Ukraine jedoch etwas schneller als in Österreich, da dort der Anteil an kurzlebigen radioaktiven Substanzen etwas größer war.

Auch in der Folge nahm die Dosisleistung weiter beträchtlich ab. Dies ergibt sich aus dem Zerfall einer Reihe weiterer Radionuklide mit Halbwertszeiten von 12 bis 300 Tagen. Nach einem Jahr lag die Dosisleistung nur mehr bei etwa 2 % der anfänglichen Strahlenwerte <sup>(62)</sup>.

Durch variierende meteorologische Bedingungen während der Freisetzungssphase und lokale Niederschläge ergab sich nach dem Unfall eine stark unterschiedliche Verteilung der Deposition und damit der Strahlenbelastung in der Umgebung des Kernkraftwerkes. Während im Norden und Westen auch in 30 km Entfernung in manchen Gebieten anfangs Dosisleistungswerte um 100  $\mu\text{Sv/h}$  und mehr beobachtet wurden, ergaben sich in Kiew Werte, die unter denen lagen, die in Österreich in Gebieten mit höherer Strahlenbelastung beobachtet wurden.

Dies ist auch aus Abbildung 3 und 5 auf Seite 9 und 11 ersichtlich, die die Verstrahlungssituation in der Ukraine sowie in ganz Europa wiedergibt, wie sie von russischen und ukrainischen Experten ermittelt und von internationalen Experten im Rahmen eines internationalen Forschungsprojektes überprüft und verifiziert wurde, bzw. wie sie im Rahmen eines großangelegten EU-Projektes in den einzelnen europäischen Ländern ermittelt wurde.

Durch den radioaktiven Zerfall der meisten als Folge des Reaktorunfalls freigesetzten Radionuklide ist die Dosisleistung durch Strahlung von am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffen bis heute sehr stark zurückgegangen. Sie beträgt zum jetzigen Zeitpunkt nur mehr etwa 0,8 % der seinerzeitigen Maximalwerte <sup>(53)</sup>. Dies ergibt sich aus der Tatsache, daß von den vielen Radionukliden, die nach dem Unfall freigesetzt wurden, praktisch nur mehr Cäsium-137 vorhanden ist und zur Strahlendosis beiträgt. Da dieses Radionuklid in den 9 Jahren seit dem Reaktorunfall von asphaltierten und betonierten Oberflächen im urbanen Bereich weitgehend abgewaschen <sup>(71)</sup> und im Bereich von Grünflächen und Äckern in die Tiefe verlagert wurde <sup>(72)</sup>, ergibt sich auch für dieses Radionuklid eine beträchtliche Verringerung der Strahlenbelastung gegenüber den ursprünglichen Werten.

In Österreich beträgt die externe Strahlenbelastung durch den Tschernobylfallout derzeit *weniger als ein Hundertstel der natürlichen äußeren Strahlenbelastung*. In den meisten Gebieten der Ukraine, in denen vergleichbare Aktivitätsablagerungen verzeichnet wurden, gilt Ähnliches. Insbesondere liegt die Strahlenbelastung in Kiew wegen der geringen Deposition im selben Bereich, d.h. zum jetzigen Zeitpunkt ebenfalls bei etwa ein Prozent der Strahlenbelastung durch natürliche Radioaktivität.

In den Gebieten der Ukraine, in denen höhere Aktivitätsablagerungen nach dem Unfall erfolgt waren (vergleiche die Depositionskarte auf Seite 9), ergeben sich heute durch die starke Abnahme der Dosisleistung seither nur mehr relativ geringe Dosiswerte. In einem Gebiet, in dem beispielsweise eine Deposition von  $550 \text{ kBq/m}^2$  erfolgt war (2. Zone in der Karte), beträgt die zusätzliche jährliche Strahlenbelastung durch externe Strahlung heute durchschnittlich etwa  $0,33 \text{ mSv}$ . Dies entspricht etwa einem *Zehntel* der *natürlichen* jährlichen Strahlenbelastung.

In einem Gebiet, das innerhalb der 4. Zone liegt, wo die Ablagerung  $1500 \text{ kBq/m}^2$  überstieg, beträgt die Strahlenbelastung heute mehr als etwa  $0,9 \text{ mSv}$  pro Jahr. Auch hier ein Vergleich: Die Strahlendosis durch *natürliche* externe Strahlung liegt in Perg in Oberösterreich bei  $1,8 \text{ mSv}$ , in La Paz, der Hauptstadt von Bolivien bei  $3,5 \text{ mSv}$  und in einigen Gebieten Keralas, Indien bei  $10 - 30 \text{ mSv}$  pro Jahr.

Innerhalb der 30 km-Zone um das Kernkraftwerk Tschernobyl gibt es Gebiete, in denen die Ablagerung an Cs-137 über  $5000 \text{ kBq/m}^2$  betrug. Dies entspricht etwa einer jährlichen Strahlenbelastung von mehr als  $3 \text{ mSv}$ . Diese Zone ist allerdings derzeit gesperrt und kann nur mit besonderer Bewilligung betreten werden. Dennoch ist ein zeitlich begrenzter Aufenthalt auch in dieser Zone ohne Probleme möglich. Bei einem Aufenthalt von 5 Tagen in diesem Gebiet ergibt sich eine zusätzliche Dosis von  $0,04 \text{ mSv}$ , d.h. etwa  $1 \%$  der natürlichen jährlichen Strahlenbelastung. Nur bei einem langfristigen Aufenthalt über Jahre oder Jahrzehnte in dieser Zone wäre eine Dosisbelastung gegeben, die eventuell bedenkliche Werte erreichen kann. Daher wurde das Gebiet auch für den langfristigen Aufenthalt, z.B. für ein *permanentes Wohnen* gesperrt, nicht jedoch für einen befristeten Aufenthalt.

Generell gilt natürlich, daß in allen genannten Gebieten bei einem kürzeren Aufenthalt als einem Jahr sich dementsprechend niedrigere Dosiswerte ergeben. So würde die zusätzliche Dosis bei einem einwöchigen Aufenthalt in der 4. Zone außerhalb der Sperrzone nur etwa  $0,01 \text{ mSv}$  betragen, also etwa  $0,3 \%$  der natürlichen jährlichen Strahlendosis in diesem Gebiet.

## 7.2 Kann man in der Ukraine und Weißrußland als Tourist reisen?

Wenn man von den anderen, nicht-strahlenbedingten Risiken eines Touristen in der derzeitigen Situation in der Ukraine und Weißrußland absieht, kann diese Frage mit einem eindeutigen Ja beantwortet werden. In jedem Gebiet der Ukraine außerhalb der 30 km-Sperrzone um den zerstörten Reaktor kann man sich zum heutigen Zeitpunkt vom Strahlenschutzstandpunkt aus unbedenklich bewegen.

Auch innerhalb der Sperrzone ist ein kürzerer Aufenthalt unbedenklich. Dies gilt insbesondere auch für eventuelle Besichtigungen des Kernkraftwerkes in Tschernobyl. Allerdings ist diese Zone nur mit besonderer Bewilligung zu besichtigen und daher für den durchschnittlichen Touristen nicht betretbar.

Besondere Vorsichtsmaßnahmen wie Atemschutz, besondere Körperpflege oder andere Maßnahmen, wie sie unmittelbar nach dem Unfall in Österreich empfohlen wurden, sind wegen der guten Bindung des Cäsiums im Boden heute nicht erforderlich. Lediglich bezüglich Nahrungsmitteln sind bestimmte Empfehlungen zu beachten. Dies wird im Folgenden noch behandelt.

### 7.3 Kann man in der Ukraine oder Weißrußland arbeiten?

Aufgrund des vorher Gesagten ist ein Aufenthalt überall in der Ukraine außerhalb der 30 km-Sperrzone sowie in Weißrußland aus Gründen des Strahlenschutzes zum heutigen Zeitpunkt *unbedenklich*. Dies gilt selbstverständlich auch für Aufenthalte zur Durchführung von Arbeiten in diesem Land. Bei Arbeiten innerhalb der Sperrzone sollten vor Arbeitsantritt die Empfehlungen der lokalen Strahlenschutzorgane (Strahlenschutzbeauftragte, Gesundheitsbehörde, Hygienischer Dienst (C. Sanitaria)) befolgt werden.

Eine Frage, die häufig gestellt wird, ist, ob und welche Schutzmaßnahmen zu empfehlen sind. Dazu gibt es eine einfache Antwort: **Keine**.

Auch in den stärker belasteten Gebieten außerhalb der Sperrzone sind *keine Maßnahmen* bezüglich Staubfreisetzung, Atemschutz oder Dekontamination nach staubigen, erdigen oder schlammigen Arbeiten erforderlich. Zur eventuellen Beweisführung, daß Mitarbeiter bei Arbeiten in der Ukraine unmittelbar um die Sperrzone oder innerhalb dieser keiner höheren Strahlenbelastung ausgesetzt waren, wird Firmen empfohlen, ihren Mitarbeitern für die Zeitdauer der Arbeiten Dosimeter zur Verfügung zu stellen. Diese sind während des Aufenthaltes am Körper zu tragen und dienen als Beweis, daß es während des Aufenthaltes zu keiner erhöhten Strahlenexposition gekommen ist. Die Dosimeter dürfen sich vor allem bei den Kontrollen auf Flughäfen nicht in den Gepäckstücken befinden, da sie sonst bei eventuellen Durchleuchtungen mit vergleichsweise hohen Strahlenbelastungen von einigen 10 mSv bestrahlt werden. Das Gleiche gilt auch für besondere Sicherheitskontrollen beim Betreten von gesicherten Gebäuden (Ministerien, Militärstellen, u.ä.).

### 7.4 Kann man lokale Nahrungsmittel essen?

Die Aktivitätskonzentration in Nahrungsmitteln ist seit 1986 auf etwa 0,8 % der Maximalwerte nach dem Reaktorunfall zurückgegangen <sup>(62)</sup>. Dies gilt in gleicher Weise für die Ukraine, Weißrußland und Rußland wie für Österreich. Aus diesem Grund ist die Aktivitätskonzentration in Nahrungsmitteln in Österreich zum heutigen Zeitpunkt praktisch nicht mehr meßbar, in den höherbelasteten Gebieten der Nachfolgestaaten der Sowjetunion, in denen natürlich noch meßbare Werte gegeben sind, liegen diese jedoch in der Regel unter einigen Zehn bis Hundert Becquerel pro Kilogramm, also unterhalb der EU-Grenzwerte nach dem Reaktorunfall Tschernobyl <sup>(67)</sup>.

Gebiete, in denen bei Anbau von Nahrungsmitteln zu hohe Aktivitätskonzentrationen in diesen resultieren würden, werden heute für die Nahrungsmittelproduktion in der Ukraine und Belarus nicht herangezogen. Dies gilt vor allem für die Gebiete innerhalb der 30 km-Sperrzone.

Grundsätzlich scheint es, daß auch heute in der Ukraine und Weißrußland Nahrungsmittel nur kontrolliert auf den Markt kommen, d.h. aus niedriger belasteten Gebieten bzw. durch Stichproben überprüft. Jedenfalls konnten bisher unter den lokalen Nahrungsmittelproben, die in das Forschungszentrum Seibersdorf gebracht und dort gemessen wurden, keine mit erhöhten Aktivitätskonzentrationen festgestellt werden.

Aus diesem Grund kann der *Genuß von lokalen Nahrungsmitteln*, die in Geschäften, größeren Märkten oder Restaurants angeboten werden, als *unbedenklich* bezeichnet werden.

Gleiches gilt auch für den Konsum von Trinkwasser. Abgesehen von möglichen hygienischen Problemen bei kleinen, lokalen Trinkwasserversorgungen, Dorf- oder Hausbrunnen, kann dieses vom Strahlenschutzstandpunkt generell unbedenklich genossen werden.

Erhöhte Aktivitätskonzentrationen ergeben sich heute nur bei Wild, Fischen und Pilzen in den höher belasteten Gebieten. Dabei sind geringere Mengen, etwa ein Wildgericht oder eine Pilzmahlzeit während des Aufenthaltes als unbedenklich zu bezeichnen, größere Mengen sollten jedoch vermieden werden. Bestimmte Pilze wie Maronenröhrling oder Reispilz, die eine wesentlich höhere Aktivitätskonzentration als der Durchschnitt der Pilze aufweisen, sollten generell vermieden werden. Diese Empfehlung gilt im wesentlichen für die Gebiete, die in der 3. oder 4. Zone der Abbildung 5 liegen ( $> 555 \text{ kBq/m}^2$ ).

## 7.5 Die Situation in Mitteleuropa und Österreich

### 7.5.1 Gibt es noch eine Strahlenbelastung?

Auch in Österreich sind praktisch alle vor zehn Jahren deponierten Radionuklide mit Ausnahme von  $^{137}\text{Cs}$  zerfallen. Die Gesamtaktivität hat allein durch den physikalischen Zerfall auf etwa 3,6 % der Werte im Jahr 1986 abgenommen und beschränkt sich fast ausschließlich auf  $^{137}\text{Cs}$ . Vergleicht man mit den Maximalwerten im Mai/Juni 1986, so liegt die derzeitige Aktivität nur bei etwa 1 % der Werte.

Aber auch die Dosis durch das verbliebene Nuklid hat gegenüber den Maximalwerten im Jahr 1986 sehr stark abgenommen. Rein durch den physikalischen Zerfall hat zwar die  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivität nur um etwa 20 % abgenommen, aber als Folge des geringen Transfers von  $^{137}\text{Cs}$  aus dem Boden in die Pflanze hat die  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentration in allen Pflanzen und damit auch allen tierischen Produkten auf etwa 0,6 % der ursprünglichen Werte abgenommen. Dadurch ist *die Ingestionsdosis auf 0,2 % der Werte im ersten Jahr nach Tschernobyl* zurückgegangen. Sie beträgt 1996 etwa 0,004 mSv. Vergleicht man mit der natürlichen Strahlenexposition von 3,8 mSv pro Jahr, so sieht man, daß die durch Tschernobyl verursachte Dosis 1996 bei etwa *ein Tausendstel der natürlichen Strahlenexposition* liegt.

In diesen Werten sind alle Nahrungsmittel, auch solche mit geringen Verzehrswerten, jedoch höheren Aktivitätskonzentration wie z.B. Wildpilze oder Wild enthalten.

### 7.5.2 Pilze, Wild und Hochalmen

In bestimmten Ökosystemen wird Cäsium nicht so gut im Boden gebunden wie in intensiv genutzten Agrarböden. Dies gilt insbesondere für Böden und Bodenzonen mit hohem organischen Gehalt, geringer Mächtigkeit der organischen Bodenzone und geringem Tonmineralgehalt <sup>(61)</sup>, aber auch für die Laubzone bzw. die Zone abgefallener Nadeln im Wald. In diesem Bereich wird Cäsium nur in geringem Maß gebunden und steht so für die Aufnahme in die Pflanze weitgehend ungehindert auch über längere Zeiträume zur Verfügung. Nahrungsmittel, die von solchen Böden oder Zonen im Boden stammen, weisen auch Jahre nach dem Fallout oft nur eine geringfügige Abnahme der  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentration auf.

Dies gilt vor allem für Wildpilze. Ihr Mycel befindet sich häufig in einer Zone des Bodens mit hohem organischen Anteil (Schicht der abgefallenen Nadeln oder Laub, vermodernde Holzreste). Wegen der geringen Cs-Bindungs-fähigkeit dieser Zone, die sich aus dem hohen organi-

schen Anteil mit geringem Tonmineralgehalt ergibt, bleibt eine höhere Verfügbarkeit des Cäsiums und somit eine höhere Aktivitätskonzentration im Bewuchs oft über Jahre bestehen. So weisen Steinpilze und Eierschwammerln auch heute noch  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentrationen von durchschnittlich 220 Bq/kg bzw. 110 Bq/kg auf, während der auf Wiesen wachsende Champignon eine Abnahme auf etwa 2 Bq/kg zeigt. Einige Pilze, darunter der Maronenröhrling, zeigen praktisch keine Abnahme der Aktivitätskonzentration, sondern sogar eine leichte Zunahme <sup>(62)</sup>.

Aufgrund der geringen Verzehrswerten von Wildpilzen bedeuten diese Konzentrationen dennoch keine signifikante Strahlenbelastung. So beträgt die durchschnittliche Ingestionsdosis durch Wildpilze heute etwa 0,77  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr <sup>(73)</sup>. Damit ist zwar der relative Beitrag von Wildpilzen zur Ingestionsdosis auf etwa 30 % gestiegen <sup>(73)</sup>, die Dosis ist jedoch absolut vernachlässigbar und beträgt nur etwa 0,02 % der natürlichen Strahlenbelastung. Der *Genuß von Wildpilzen* kann daher vom Strahlenschutzstandpunkt als *unbedenklich* bezeichnet werden.

Auch auf hochgelegenen Almböden und höhergelegenen Urgesteinszonen ist durch die geringe Tiefe des Oberbodens, den hohen organischen Gehalt und den geringen Tonmineralgehalt nur eine geringe Abnahme der Aktivitätskonzentration mit der Zeit festzustellen. Dementsprechend weisen Tiere, die mit diesem Grünbewuchs gefüttert werden, heute höhere Aktivitätskonzentrationen in Fleisch und Milch auf als Tiere, die auf agrarisch intensiv genutzten Flächen gehalten werden <sup>(62)</sup>. In der Milch von diesen Hochalmen werden effektive Halbwertszeiten zwischen 1400 und 2000 Tagen beobachtet, also erheblich über den in Tallagen beobachteten Werten von 600 - 800 Tagen.

Obwohl die Werte der Milch dieser Hochalmen 1996 im Vergleich zu allen anderen Nahrungsmitteln eine hohe Aktivitätskonzentration darstellen, ist der Beitrag zur Kollektivdosis bzw. zur Dosis von Einzelpersonen gering. Der Hauptgrund liegt in der Tatsache, daß die Milch dieser Almen nur einen sehr kleinen Anteil an der Gesamtmilchproduktion aufweist. Der Anteil kann auf weniger als 0,01 % geschätzt werden. Er ist laufend im Abnehmen, weil in zunehmenden Maße nur nicht laktierende Rinder auf die Hochalmen getrieben werden, da der Aufwand der Milchproduktion auf Hochalmen zu hoch ist.

Der Beitrag zur Gesamtdosis ist daher gering, da die Milchproduktion dieser Gebiete nur einen Bruchteil der in Österreich produzierten Milch darstellt und die Produktion auf diesen Hochalmen nur über einen relativ kurzen Zeitraum von einigen Monaten pro Jahr erfolgt.

Aber auch Einzelpersonen, die sich ausschließlich von Milch von solchen Hochalmen ernähren, erhalten nur vernachlässigbare Dosiswerte. So würde ein Kind, das während der Sommerferien seinen gesamten Milchkonsum mit Milch dieser Alm deckt, maximal eine Ingestionsdosis von 0,023 mSv erhalten <sup>(63)</sup>. Die Dosis durch natürliche Strahlung würde im gleichen Zeitraum etwa 0,4 bis 0,6 mSv, also etwa 20mal soviel betragen <sup>(61)</sup>.

Ein Bergsteiger, der nach einer Bergtour auf dieser Alm einen halben Liter Milch trinkt, würde eine Ingestionsdosis von etwa 0,0007 mSv erhalten <sup>(63)</sup>. Dies ist weniger als die Dosis alleine durch die Höhenstrahlung während der Tour zuvor. Der Beitrag der Almmilch zur Bevölkerungsdosis als auch zur Dosis von Einzelpersonen ist daher vernachlässigbar.

Wild weist heute generell ähnlich niedrige Aktivitätskonzentrationen wie Rindfleisch oder Lammfleisch auf. Nur in einigen, wenigen ausgedehnten Waldgebieten, in denen das Wild nicht auf umgebende Felder zum Äsen kommt, werden höhere Aktivitätskonzentrationen beobachtet. Der Beitrag dieser Gebiete zur mittleren Ingestionsdosis liegt bei etwa 0,0002 mSv und ist somit vernachlässigbar gering.

## 8. Sicherheitsfragen

### 8.1 Die Sicherheit des RBMK-Reaktors heute

Eine Frage, die man heute häufig gestellt bekommt, ist: Ist der Reaktor heute sicherer als damals? Eine Frage, die durchaus berechtigt ist angesichts der Tatsache, daß 15 Reaktoren dieses Typs heute in den Nachfolgestaaten der Sowjetunion in Betrieb sind, und bedenkt man weiters die Sicherheitsprobleme dieses Reaktortyps, und das völlig andere Transientenverhalten und damit Unfallverhalten, das diesen Reaktortyp von Leichtwasserreaktoren unterscheidet, und das letztendlich die Ursache für den katastrophalen Unfall am 26. April 1986 war.

Diese Frage wird natürlich nicht nur von einer beunruhigten Bevölkerung sondern auch von den Fachleuten gestellt. Ihre Beantwortung muß in mehrere Teile geteilt werden: Die Sicherheit der Reaktordynamik (Transientenverhalten), das Training der Bedienungsmannschaft und die zusätzlichen Sicherheitsbarrieren des Reaktor gegen einen Austritt größerer Aktivitätsmengen im Falle von sehr schweren Unfällen.

Grundsätzlich ist die Frage, ob der Reaktor heute sicherer ist, ziemlich klar mit Ja zu beantworten. Seit der Reaktorkatastrophe wurden die Ursachen eingehend untersucht und der Reaktor in bezug auf das Sicherheits- und Transientenverhalten neu durchleuchtet. Als Folge dessen wurden zahlreiche Nachrüstungen zur Verbesserung der Sicherheit und zur Eliminierung der eigentlichen technischen Gründe für den Unfall durchgeführt. Dabei muß man zwischen den kurzfristig realisierten Nachrüstungen und den langfristig durchgeführten Nachrüstmaßnahmen unterscheiden. Die kurzfristigen betrafen vor allem schnell durchführbare Maßnahmen, die in den ersten Jahre nach dem Unfall realisiert wurden. Die zweite Gruppe von Maßnahmen betraf Nachrüstungen, die längere Zeiträume zur Realisierung benötigen, die jedoch zusätzlich zu einer erheblichen Verbesserung der Sicherheit führten.

#### 8.1.1 Unfallursache und unmittelbare Verbesserungen

Wie weitgehend bekannt, ist der Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl durch eine Kombination von Konstruktionsmängeln des RBMK-Typs als auch durch eine Reihe von Fehlern der Bedienungsmannschaft ausgelöst worden. Ohne jeden einzelnen Fehler der Operatoren wäre es wahrscheinlich nicht zum gravierenden Unfall mit der massiven Kernzerstörung und Aktivitätsfreisetzung nach Außen gekommen <sup>(74)</sup>. Dennoch, die gravierenden Auswirkungen des Unfalls hätten nicht passieren können, wenn der Reaktor günstigere reaktorphysikalische Eigenschaften aufgewiesen hätte und so auf die Fehler der Bedienungsmannschaft "verzeihender" reagiert hätte <sup>(75)</sup>. Einem solchen günstigen Verhalten bei schweren Bedienungsfehlern kommt deswegen hohe Bedeutung zu, weil grundsätzlich davon auszugehen ist, daß Menschen in kritischen Situationen falsch reagieren und damit die Situation noch verschlimmern können anstatt sie zu verbessern. In allen Sicherheitsanalysen wird daher angenommen, daß menschliche Fehler vor allem in Streßsituationen eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit haben, und daher eine Anlage so konstruiert sein muß, daß fehlerhaftes Verhalten in kritischen Situationen nicht zu extrem gravierenden Unfallsituationen oder zu einer Verschlimmerung der Sachlage führt.

Entscheidend für die Hebung der Sicherheit des Reaktors vom RBMK-Typ ist daher eine Verbesserung des reaktorphysikalischen Verhaltens sowie die Reduzierung der Eingriffsmöglichkeiten des Bedienungspersonals in kritischen Situationen. Das reaktorphysikalische Verhalten des RBMK ist durch einen ausgeprägten positiven Dampfblasenkoeffizienten (Void-koeffizienten) gekennzeichnet. Dies bedeutet, daß bei einer Reaktivitätszufuhr, z.B. durch Ziehen der

Regelstäbe, oder bei Eintritt eines warmen Kühlmittels sich die Reaktorleistung nicht nur auf ein neues höheres Leistungsniveau einstellt, sondern überproportional ansteigt und die Tendenz besitzt, davonzulaufen. Eine schnelle Reaktorregelung ist daher für einen solchen Reaktortyp eine der wichtigsten Voraussetzungen.

Trotz dieses positiven Temperaturkoeffizienten ist der Unfall aber erst durch eine Reihe von Eingriffen der Bedienungsmannschaft in das Reaktorsicherheits- und Regelsystem möglich geworden <sup>(74)</sup>. So wurden die Regelstäbe, um den bereits abgeschalteten Reaktor wieder auf Leistung zu bekommen, unzulässig weit aus dem Kern herausgefahren. Es wurden dazu Hubbegrenzungen ausgeschaltet und Grenzscharter überbrückt. Durch diese Eingriffe in das Sicherheitssystem wurde der Reaktor in eine extrem kritische Position gebracht, aus der erst der Unfallablauf möglich war <sup>(76)</sup>.

Um eine Wiederholung des Unfalls zu verhindern, wurden in allen RBMK-Reaktoren in den ersten Jahren nach dem Unfall folgende Nachrüstungen und Verbesserungen vorgenommen <sup>(74)</sup>:

- Zusätzliche Abschaltauslösesignale
- Verringerung der Zugriffsmöglichkeiten des Bedienungspersonals auf Grenzwerteinstellungen und Sicherheitssysteme
- Zusätzliche und verbesserte Betriebsvorschriften
- Verbessertes Operatortraining

Mit diesen Maßnahmen wurden zumindest die unmittelbaren Bedienungsfehler und deren Konsequenzen auf den Tschernobylreakortyp reduziert, nicht jedoch das generell ungünstige reaktorphysikalische Verhalten verbessert.

### 8.1.2 Längerfristige Nachrüstungen und deren Auswirkungen auf die Sicherheit

Wichtiger waren jedoch in bezug auf die Sicherheit des Reaktors die längerfristigen Änderungen. Diese waren vor allem <sup>(74,75)</sup>:

- Verringerung des Voidkoeffizienten durch Einführung von 80 - 90 zusätzlichen Absorberstäben
- Erhöhung des Anreicherungsgrades des Brennstoffs von 2 % auf 2,4 %. Dadurch konnte der Voidkoeffizient von  $5 \beta_{\text{eff}}$  auf  $0,3 - 0,8 \beta_{\text{eff}}$  reduziert werden
- Verbesserungen des Regelsystems des Reaktors (Verringerung der Stabfallzeit von 18 s auf 12 s)
- Eliminierung der Wasserzonen in den Absorberstäben (Eliminierung der positiven Reaktivitätszonen beim Abschalten)
- Installation eines "echten" Schnellabschaltsystems (2,5 s Stabfallzeit)
- Neuer Brennstoff (U-Er Brennelemente) mit selbstabbrennbaren Neutronenabsorbemern zur Reduktion der Überschubreaktivität
- On-line Bestimmung der Überschubreaktivität

Durch alle diese Maßnahmen wurde erreicht, daß ein Durchgehen des Reaktors (Reaktorexkursion), wie am 26. April 1986 passiert, heute nicht mehr möglich ist. Der Reaktor besitzt zwar nach wie vor einen schwach positiven Temperaturkoeffizienten, dieser liegt jedoch so niedrig, daß er problemlos durch das verbesserte Regelsystem bzw. das zusätzliche Schnellabschaltsystem beherrscht werden kann <sup>(74)</sup>.

Die verschiedenen RBMK-Reaktoren sind in unterschiedlichen Stadien des Nachrüstens. Das KKW Ignalina in Litauen und das KKW Leningrad bei St.Petersburg sind in den wesentlichen Punkten vollständig nachgerüstet <sup>(77)</sup>. Die anderen Kraftwerke haben die Nachrüstungen zu einem erheblichen Teil vollzogen. In den nächsten Jahren sind in allen Kernkraftwerken dieses Typs noch zusätzliche Nachrüstungen bezüglich einer Reduktion der Emissionen und der Verbesserung der Feuerschutzeinrichtungen sowie einer Reihe von zusätzlichen Sicherheitseinrichtungen vorgesehen <sup>(75)</sup>.

Dennoch bleiben bei diesem Reaktortyp - zumindest bei den Reaktoren aus der Anfangsphase - gewisse Sicherheitsmängel bestehen. Der wesentlichste ist, daß diese Reaktoren, zumindest die der ersten Generation, kein Containment wie westliche Reaktoren besitzen. Außerdem ergibt sich durch die Druckröhrenaufführung des Reaktors, die als zusätzliche Barriere zur Lokalisierung bei einem Aktivitätsaustritt dient, das Problem, daß bei Versagen einer größeren Zahl von Druckröhren möglicherweise die Absorberstäbe so aus dem Kern gedrückt werden können, sodaß eine Reaktorexkursion nicht ausgeschlossen werden kann <sup>(75)</sup>. Sicherheitstechnische Untersuchungen unter Mitwirkung westlicher Experten werden derzeit durchgeführt, um diese Sicherheitsfrage zu klären.

Auch der Nachrüstung eines Confinements zur Reduktion möglicher Quellterme bei schweren Kernbeschädigungen bei der ersten Generation dieses Reaktortyps kommt erhebliche Bedeutung zu und ist derzeit in Planung bzw. teilweise in Ausführung.

## 8.2 Die Sicherheit des Sarkophags

Um die Aktivitätsfreisetzung aus dem zerstörten Block 4 des Kernkraftwerkes Tschernobyl zu reduzieren, wurde über den zerstörten Reaktor ein Betongebäude ("Ukrytiye", Umschließung) errichtet, das im Westen den Spitznamen "Sarkophag" erhielt. Dieser Sarkophag wurde unter erheblichen Schwierigkeiten und bei vergleichsweise hohen Dosisleistungen errichtet. Dadurch ergaben sich eine Reihe von Problemen sowohl bei der Fundamentierung wie bei den aufbauenden Betonierarbeiten. Die Decke des Sarkophags besteht aus quer über die betonierten Seitenteile gelegten Stahlzylindern. Durch die Schwierigkeiten bei der Errichtung ist die Bauausführung nicht mit der eines normalen Bauwerks vergleichbar. Deshalb war diese Umhüllung des

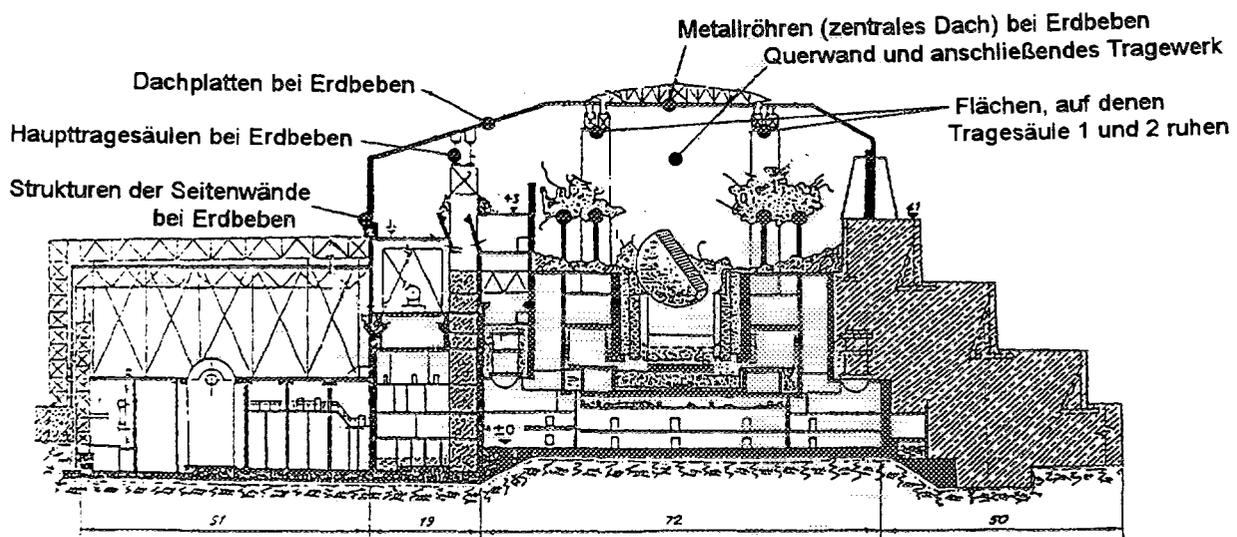


Abb. 12 Tschernobyl Block 4 Utkrytiye (Sarkophag) und die möglichen Probleme aus ukrainischer Sicht

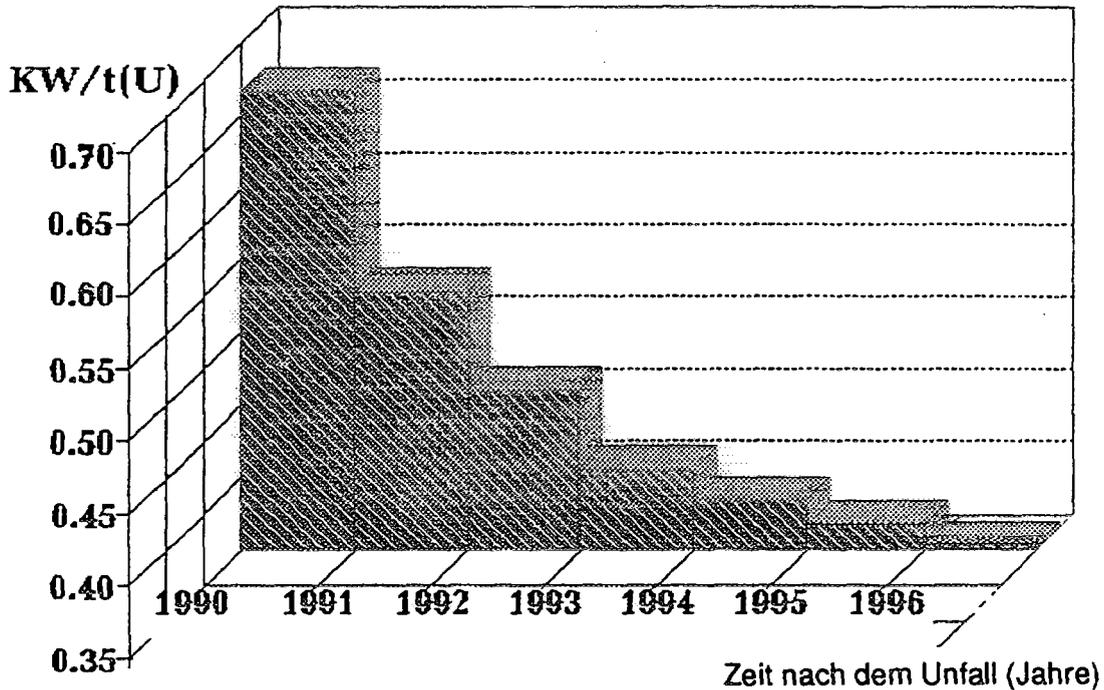


Abb. 13 Wärmeleistung im zerstörten Reaktorkern von Tschernobyl Block 4

zerstörten Reaktorblocks nie hundertprozentig dicht und es wurde immer eine kleine, wenn auch gegenüber der ursprünglichen Emissionsrate äußerst geringe Freisetzungsrate <sup>(78)</sup> beobachtet. Seit Beginn werden am Sarkophag Spalten und Risse beobachtet und es gibt Befürchtungen der Genehmigungsbehörde, daß bei einem Erdbeben das Gebäude oder Teile davon einstürzen könnten.

Abb. 12 zeigt den Sarkophag in seiner heutigen Gestalt und die von den Betreibern als mögliche Sicherheitsprobleme erachteten Details der Konstruktion. Die wesentlichen Punkte beziehen sich dabei auf die mögliche Einwirkung von seismischen Kräften, für die die Konstruktion nicht vollständig ausgelegt war. Die Gefahr, daß der Sarkophag nur durch sein Gewicht in sich zusammenstürzen könnte, wird hingegen nach dem derzeitigen Wissenstand als gering erachtet <sup>(78)</sup>.

Doch auch bei einem Kollaps des Gebäudes wären die Auswirkungen begrenzt. Dafür sprechen mehrere Gründe: Erstens ist die Leistung des Reaktors von den ursprünglichen 3000 MW auf etwa 0,3 %, das sind derzeit etwa 10 MW zurückgegangen (vergl. Abb. 13). Auch die Temperatur des Reaktorkerns ist auf etwa 200 °C abgesunken <sup>(78)</sup>, sodaß eine Freisetzung von leichtflüchtigen Substanzen praktisch nicht mehr erfolgen kann. Der größte Teil des Kerns (etwa 80 %) liegt als geschmolzene Masse vor <sup>(78)</sup>, aus der eine weitere Freisetzung kaum mehr möglich ist. Ein Teil der Radioaktivität liegt als Staub vor und könnte bei einem Kollaps des Gebäudes freigesetzt werden. Die Auswirkungen blieben in diesem Fall jedoch auf das Kraftwerksgelände und die nächste Umgebung beschränkt. Dies ist auch aus Abbildung 14 ersichtlich, in der die abgeschätzte Dosis in der Umgebung bei einem Kollaps des Sarkophags dargestellt wurde. In einer Entfernung von mehr als 2 km würde die Dosis bei einem hypothetischen Kollaps unter 100 mSv liegen, sodaß keine bedrohlichen Auswirkungen außerhalb dieser Zone anzunehmen sind <sup>(78)</sup>.

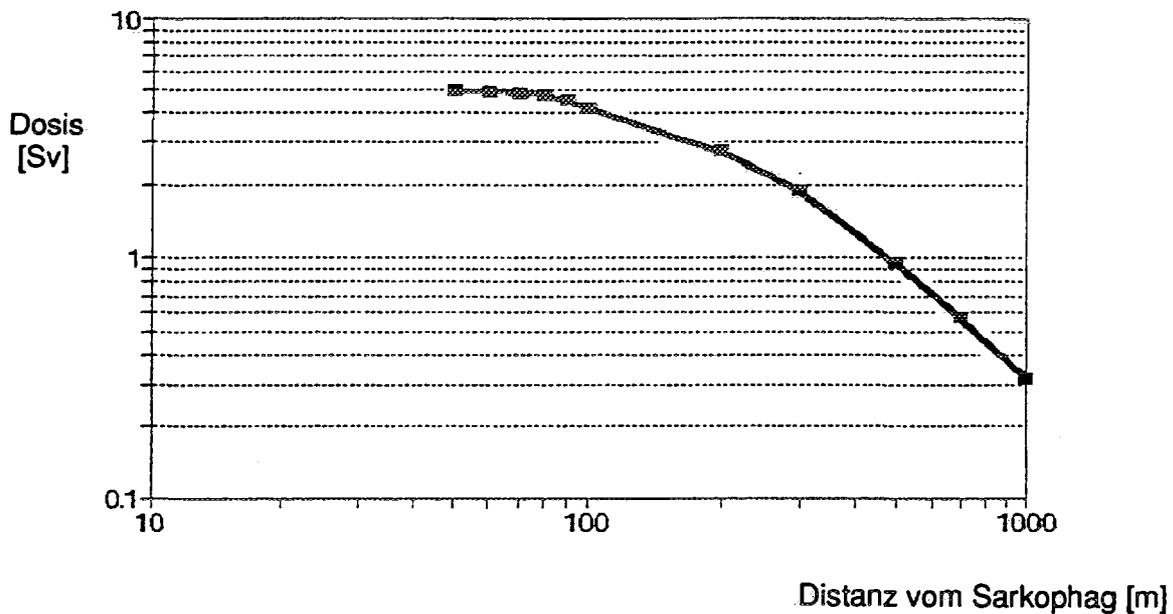


Abb. 14 Dosis in der Umgebung bei Kollaps des Ukrytiye (Sarkophags) <sup>(78)</sup>

Auswirkungen auf weiter entfernte Gebiete, insbesondere *auf Österreich* sind *nicht zu befürchten*.

Die von manchen Personen geäußerten Befürchtungen, daß bei einem Kollaps des Sarkophags auch der daneben befindliche Reaktorblock 3 beschädigt werden könnte und es dann zu ähnlichen Auswirkungen wie 1986 kommen könnte, entbehren jeder Grundlage. Denn einerseits ist 1986 eine Explosion mit über 80 bar Druck im Reaktorgebäude erfolgt, die das Gebäude des Blocks 4 völlig zerstört hat, den im selben Gebäude daneben befindlichen Block 3 des Kraftwerkes, der damals nicht so gut gegen Block 4 abgeschirmt und geschützt war wie jetzt, jedoch nicht beschädigte. Außerdem ist bei einem Kollabieren des Gebäudes ein wesentlich geringerer Impakt auf den Reaktorkern zu erwarten.

Allerdings sind mögliche Auswirkungen durch Eindringen von Wasser in den Kernbereich, die zu einer lokalen Rekritikalität führen könnten, nicht hundertprozentig auszuschließen, obgleich solche Auswirkung aus verschiedenen Gründen extrem unwahrscheinlich sind. Um solche Folgen mit Sicherheit ausschließen zu können, ist eine Sanierung des Sarkophags erforderlich.

Daher wurde die Renovierung des Ukrytiye und Überführung in einen sicheren und ökologisch vertäglichen Zustand in einer Machbarkeitsstudie 1990 gezeigt, die jedoch durch den Zusammenbruch der UdSSR aufgrund der geringen Finanzmittel der Ukraine nicht durchgeführt werden konnte. So wurde im Rahmen eines TACIS-Programm 1995 neuerlich der Sarkophag untersucht und eine neue Feasibilitystudie erstellt <sup>(79)</sup>. Eine endgültige Entscheidung über die Aufbringung der erforderlichen Geldmittel ist noch nicht gefallen.

## 9. Zusammenfassung

Die zahlreichen wissenschaftlichen Tagungen aus Anlaß des zehnjährigen Jahrestages des Unfalls im Kernkraftwerk Tschernobyl ergeben ein Bild, das sich nicht unerheblich von dem unterscheidet, das sich die Öffentlichkeit heute - zum Teil durch nicht korrekte Berichterstattung in den Medien verursacht, zum anderen aber auch durch Verfolgung von Partikulärinteressen bestimmter Gruppen in den Nachfolgestaaten der Sowjetunion, zum Teil aber auch als Folge der ökonomisch katastrophalen Situation in diesen Staaten - macht.

Durch den Unfall kam es in unmittelbarer Umgebung um das Kernkraftwerk. zu einer Deposition an  $^{137}\text{Cs}$  von über  $1500 \text{ kBq/m}^2$ , die erhebliche Anstrengungen zum Schutze der Bevölkerung erforderlich machten. Auch in einer Entfernung von 150 km wurden noch Depositionswerte von mehr als  $500 \text{ kBq/m}^2$  beobachtet. In diesen Gebieten lag die durchschnittliche Dosis bei etwa 10 mSv im ersten Jahr. Andererseits betragen in Kiew die Depositionswerte nur  $30 \text{ kBq/m}^2$ , lagen also unter den Maximalwerten in Österreich. Generell lagen in weiten Teilen der Ukraine die Depositionswerte unter den durchschnittlichen Werten in Österreich. Für Gebiete außerhalb der früheren Sowjetunion ergaben sich mittlere Depositionswerte von weniger als  $20 \text{ kBq/m}^2$ , sodaß die Dosis durch den Tschernobylunfall unter 1 mSv im ersten Jahr blieb, ein Wert, der weniger als ein Drittel der natürlichen jährlichen Strahlendosis beträgt.

Durch den Unfall ergaben sich bis heute 31 Todesfälle. Diese wurden ausschließlich unter den Rettungs- und Hilfsmannschaften am Kraftwerksgelände verursacht. In der weiteren Umgebung wurde bis heute keine erhöhte Zahl an Todesfällen als Folge des Unfalls festgestellt. Die kolportierten erhöhten Raten an Todesfällen oder Invalidität dürften nicht durch den Reaktorunfall verursacht sein, sondern sind ein generelles Problem der heutigen Nachfolgestaaten oder stellen offenbar eine soziale Kompensation dar.

In den drei hauptbetroffenen Staaten Ukraine, Weißrußland und Rußland wurde eine Erhöhung von Schilddrüsenkrebs bei Kindern beobachtet, die erheblich über den Werten liegt, die nach den Atombombenabwürfen beobachtet wurden. Eine eindeutige Erklärung ist bis zum heutigen Zeitpunkt nicht gegeben, jedoch wird als wahrscheinlichster Grund der Jodmangel in diesen Gebieten angenommen. Dies bedeutet, daß der Jodprophylaxe in Jodmangelgebieten wie z.B. Österreich bei einem eventuellen Anlaßfall erhebliche Bedeutung zukommt.

Entgegen den häufig zu findenden Pressemeldungen wurden jedoch bis zum jetzigen Zeitpunkt keine Erhöhung von Leukämie und anderen Krebsarten, weder in der Bevölkerung der betroffenen Regionen noch unter den Liquidatoren, im Vergleich zur Bevölkerung in nicht belasteten Gebieten beobachtet. Ein Beobachtungszeitraum von 10 Jahren ist jedoch zu kurz, um eine endgültige Aussage bezüglich der Spätschäden durch den Tschernobylunfall zu machen. Weitere Nachuntersuchungen sind erforderlich, um diese Frage eindeutig klären zu können.

Aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen folgt, daß möglicherweise die Spätfolgen durch den Tschernobylunfall, vor allem in Hinblick auf die mögliche Auslösung von Leukämie und anderer Krebsarten außer Schilddrüsenkrebs, überschätzt wurden. Auch aus diesem Grund ist eine weitere Nachuntersuchung der Folgen besonders wichtig.

Die Abnahme der Aktivitätskonzentration seit dem Reaktorunfall bis heute war durch die starke Fixierung des Cäsiums im Boden aber auch durch die Einwaschung sehr stark, sodaß die Dosis als Folge des Reaktorunfalls heute nur weniger als 0,8 % der Dosis im ersten Jahr beträgt. Aus diesem Grund liegt heute die Strahlenexposition in Österreich bei weniger als 0,3 % der natürlichen Strahlenbelastung. Auch in den am meisten betroffenen Staaten Ukraine, Weiß-

rußland und Rußland war eine vergleichbare Abnahme zu beobachten, sodaß heute in all diesen Staaten, außerhalb der 30 km-Sperrzone, ein unbegrenzter Aufenthalt problemlos möglich ist.

## 10. Literatur

1. Adamov E.O., Cherkashov Yu.M., Podlazov L.N., Nikitin Yu.M., Stenbok I.A., Novoselsky O.Yu., Ionov A.I., Ponomarev-Stepnoi N.N., Bourlakov E.V., Malkin S.D., Krayushkin A.V., Babaitsev M.N., Checherov K.P., Abagyan A.A., Vasekin V.N., Kisil I.M.:  
Chernobyl Accident Causes: Overview of Studies over the Decade, in Intern. Forum "One decade after Chernobyl: Nuclear Safety Aspects", IAEA, Wien, 1.-3.April 1996
2. Smidt D.: Reaktortechnik, Verl.Braun, Karlsruhe, 1971
3. Sidorenko V.O.: Safety of RBMK Reactors:  
Major Results and Prospects, in Intern. Forum "One decade after Chernobyl: Nuclear Safety Aspects", IAEA, Wien, 1.-3.April 1996
4. USSR State Comm.on the Utiliz.of Atomic Energy:  
The Accident at the Chernobyl NPP and its consequences. Post Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident, IAEA, Wien, Sept 1986; Safety Series N 75-INSAG-1; 1986
5. Devell L., Güntay S, Powers D.A.:  
The Chernobyl Reactor Accident Source Term, Development of a Consensus View, in Int. Conf. One Decade after Chernobyl, Wien, 8.-12.April 1996
6. Hosemann J.P.:  
Wechselwirkungen mit der Containmentstruktur und Spaltproduktfreisetzung,  
Atomwirtschaft 27 (1982) 516 - 522
7. Goswami S., Ziegler A.:  
TMI-2-Störfall: Neue Daten und Erkenntnisse, Atomwirtschaft 12 (1979) 578 - 582
8. Wolf H., Philipsborn H., Steinhäusler F.:  
Hot Particles from the Chernobyl Fallout, Int. Workshop in Theuren, 28.-29. Okt.1987, Berg- und Industriemuseum Ostbayern, Band 16, 1988
9. Glasstone S., Dolan Ph.J.:  
The effects of nuclear weapons, U.S.Dep. of Defense, Energy Research and Development Administration (1977)
10. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR):  
Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly 1988
11. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR):  
Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly 1977
12. Mück, K.:  
Global fallout after the Chernobyl accident. In: Proceedings of Conference Cevre-91, Istanbul, 4-7 Sep.1991, also published in: OEFZS--4595 (1991)
13. Mück K.:  
Optimierung der Maßnahmen zum Schutze der Bevölkerung im städtischen Bereich bei schwersten Reaktorunfällen, OEFZS-A--3302 (1995)

14. Shimizu Y., Kato H., et al.:  
Studies of the mortality of A-bomb survivors. 9. Mortality, 1950-1985: Part 2. Cancer mortality based on the recently revised doses (DS86). *J.Radiat.Res.* **121** (1996) 120-141
15. Muckerheide J.:  
The health effects of low-level radiation: Science, data, and corrective action, *Nuclear News* Sept. 1995, 26 - 34
16. Mück K.:  
Reduktion der Aktivitätskonzentration in der Atemluft im Inneren von Gebäuden im Vergleich zu der im Freien, OEFZS--4742 (1995)
17. Likhtarev I.A., Chumak V.V., et al.:  
Retrospective reconstruction of individual and collective external gamma doses of population evacuated after the Chernobyl accident. *Health Physics* **66** (1994) 643-652
18. Kozubov G.M., Taskaev A.I., Fedotov I.S. et al.:  
A map illustrating the radiation induced pine forests injury after the Chernobyl accident, *Sykytyvkar. Inst. Biol. Komi Sci. Tsentra UO, Nat.Acad. Sci.* (in Russisch) (1991)
19. Shigematsu, I. et al.:  
The International Chernobyl Project, Assessment of Radiological consequences and evaluation of protective countermeasures, IAEA, Vienna, 1991; ISBN 92-0-129191-4
20. Dreicer M., Aarkrog A., Alexakhin R., Anspaugh L., Arkhipov N.P., Johansson K.J.:  
Consequences of the Chernobyl accident for the natural and human environments, Background paper, session 5. In: *Int. Conf. "One Decade after Chernobyl"* der Europ. Commission, IAEA und WHO, Wien, 8.-12.April 1996
21. Prister B.S., Belli M., et al.:  
Behaviour of Radionuclides in Meadows including Countermeasures Application, in *Proc. First Int. Conf. on the Radiological Consequences of the Chernobyl Accident*, Minsk, 18.-22. März 1996
22. Alexakhin R.M., Sazapultsev I.A., Spizin E.V., Udalov D.B.:  
Formation of the dose burdens in farm animals after the Chernobyl accident and the effect of animal evacuation on the absorbed dose. *Dokl.Rus.Acad.Science* **323/3** (1992) 576-578
23. Nuclear Energy Agency Org. for Economic Cooper. and Development:  
Chernobyl - Ten years on - Radiological and Health Impact. An appraisal by the NEA Committee on Radiation protection and Public Health, Paris (1995)
24. Likhtarev I.A., Gulko G.M., Sobolev B.G., Kairo I.A., Chepurnoy N.I., Pröhl G., Henrichs K.:  
Thyroid dose assessment for the Chernigov region (Ukraine): Estimation based on <sup>131</sup>J thyroid measurements and extrapolation of the results to districts without monitoring. *Radiat.Environ.Biophys.* **33/2** (1994) 149-166
25. Likhtarev I.A., Shandala N.K., Gulko G.M., Kairo I.A., Chepurnoy N.I.:  
Ukrainian Thyroid doses after the Cheronbyl accident, *Health Phys.* **64** (1993) 594-599
26. Die Auswirkungen des Reaktorunfalls von Tschernobyl auf Österreich. *Beiträge 2/88*, Bundeskanzleramt, Sekt. VII, 1988

27. Bossew, P.; Ditto, M.; Falkner, Th.; Henrich, E.; Kienzl, K., Rappelsberger U.:  
Cäsiumbelastung der Böden Österreichs. Umweltbundesamt Wien, BMin. für Gesundheit und  
Konsumentenschutz, Monographien **60**, 1996
28. De Cort, M.; Kelly, G.N.:  
Atlas of Caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident, EUR-Report 16733,  
EC-Office of Publications, Luxembourg (1996)
29. ICRP Publication 60:  
1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.  
Annals of the ICRP **21** / 1-3 (1990)
30. Baranov A.E., Guskova A.K.:  
Acute radiation disease in Chernobyl accident victims. In: The medical basis for radiation accident  
preparedness II. Elsevier, New York (1990) 79-86
31. Wagemaker G., Guskova A.K., Bebesko V.G., Griffiths N.M., Krishenko N.A.:  
Clinically observed effects in individuals exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident.  
Background paper, session 1. In: Int. Conf. "One Decade after Chernobyl" der Europ. Commis-  
sion, IAEA und WHO, Wien, 8.-12. April 1996
32. Williams E.D., Becker D., Dimidchik E.P., Nagataki S., Pinchera A., Tronko N.D.:  
Effects on the thyroid in populations exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident.  
Background paper, session 2. In: Int. Conf. "One Decade after Chernobyl" der Europ. Commission,  
IAEA und WHO, Wien, 8.-12. April 1996
33. Cardis E., Anspaugh L., Ivanov V.K., Likhtariiev I., Mabuchi K., Okeanov A.E., Prisyazhniuk A.:  
Estimated long term health effects of the Chernobyl accident. Background paper, session 3. In: Int.  
Conf. "One Decade after Chernobyl" der Europ. Comm., IAEA und WHO, Wien, 8.-12. April 1996
34. Baverstock, K.:  
Thyroid Cancer in the regions contaminated after the Chernobyl accident, In: "Zehn Jahre nach  
Tschernobyl, eine Bilanz" Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Strahlenschutz-  
kommission, München, 6.-7. März 1996
35. Williams D., Pinchera A., Karaoglou A., Chadwick K.H.:  
Thyroid Cancer in children living near Chernobyl. Expert panel on the consequences of the  
Chernobyl accident. EC-Report (1993)
36. Nagataki S., Shibata Y., Inoue S., Yokoyama N., Izumi M, Shimaoka K.:  
Thyroid diseases among atomic bomb survivors in Nagasaki. *J. Amer. Med. Assoc.* **272/5** (1994)  
364-370
37. Ivanov E.P. et al.:  
Childhood leukemia in Belarus before and after the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Biophys.*  
(1996)
38. Preston D.L., Kusumi S., et al.:  
Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma,  
1950-1987. *Radiat. Res.* **137** (1994) 68-97
39. Pierce D.A., Shimizu Y., et al.:  
Studies of the mortality of A-bomb survivors. Part II: Cancer: 1950-1990. *Radiat. Res.* (in press)

40. Likhtarev I.A.:  
persönliche Kommunikation (1996)
41. Sokolowski, E.:  
Excess Mortality among emergency workers after Chernobyl? Kärnkraftsäk.o.Utbild.AB (1990)
42. Okeanov A.E., Cardis E., et al.:  
Health Status and Follow-up of Liquidators in Belarus. In First Intern. Conf. on the radiological consequences of the Chernobyl accident, Minsk, 18.-22.März 1996
43. Stepanova E.I.:  
Centre of Radiat. Medicine, Ukrain. Akad. Med. Wissenschaften, Kiew, Persönliche Kommunikation (1996) und Beitrag in Int. Conf. "One Decade after Chernobyl" der Europ. Comm., IAEA und WHO, Wien, 8.-12.April 1996
44. Nénot J.C., Stavrov A.I., Sokolowski E., Waight P.J. :  
The Chernobyl accident: The consequences in perspective. Background paper, session 8. In: Int. Conf. "One Decade after Chernobyl" der Europ. Comm., IAEA und WHO, Wien, 8.-12.April 1996
45. Prisyazhniuk A.E, Fedorenko Z. et al.:  
Epidemiology of Cancer in population living in contaminated territories of Ukraine, Belarus and Russia after the Chernobyl accident. In: First Intern. Conf. on the radiological consequences of the Chernobyl accident, Minsk, 18.-22. März 1996
46. Tschernobyl - 10 Jahre danach: Eine aktuelle Bilanz der Folgen, Intern. Konferenz des Otto Hug Strahleninst. und Ärzte für die Verhütung des Atomkrieges, München, 1996
47. Otake M., Schull W.J. et al.:  
A Review of forty five years study of Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivors. II Biolog. effects. I. Microcephalus, mental retardation and intelligence, J.Radiat.Res.32 (1991) 249-264
48. Umweltpolitik, Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung. Annual Report 1986, German Min. for the Environm., Nature Prot. and Reactor Safety; Bonn Univ. Print. 1987
49. The radiological Impact of the Chernobyl Accident in OECD countries. Nuclear Energy Agency, OECD, Paris 1987
50. Mück, K.:  
Abschätzung der Strahlenexposition der österreichischen Bevölkerung nach dem Reaktorunfall Tschernobyl. OEFZS--4406 (1987)
51. Duftschmid, K.; Mück, K.; Steger, F.; Vychytil, P.; Zechner, J.:  
The exposure of the Austrian population due to the Chernobyl accident. Rad.Prot.Dosim. 19/4 (1987) 213-222
52. Steger, F.; Mück, K.; Duftschmid, K.E.:  
Comparison of dose estimates derived from whole body counting and intake calculations based on average food activity concentration. In: "Environmental contamination following a major nuclear accident", IAEA-Symposium, Vienna, IAEA-SM-306/6, 1990
53. Radioaktivitätsmessungen in Österreich 1992 und 1993, Daten und Bewertung, Austrian Min. for Health and Consumer Protection. Beiträge 5/95; 1995

54. Schaller, A.; Vutuc, Ch.; Bartsch, F.; Bodingbauer, G.; Bodingbauer, J.:  
Modellstudie Oberösterreich. Zur Ermittlung der Häufigkeit und Inzidenz angeborener Fehlbildungen, Wiener Med. Wochenzeitschrift 7/8 (1987) 149
55. Vutuc, Ch.; Schaller, A.:  
Mißbildungs-Inzidenz in Oberösterreich 1985-1986. In: 21. Jahrestagung Hygiene, Mikrobiologie und Präventivmedizin, Baden, Juni 1988
56. Grosche, B.; Kaul, A.:  
Epidemiologische Untersuchungen in Deutschland nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl. in "Zehn Jahre nach Tschernobyl, eine Bilanz", Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz und d. Strahlenschutzkommission, München 6.-7.März 1996, BfS-Schriftenreihe (in Druck)
57. Mück, K.:  
Aktivitätskonzentration in Lebensmitteln nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl. Ernährung/Nutrition 20/4 (1996) 207-216
58. Mück, K.; Roth K., Gerzabek, M.H., Oberländer H.E.:  
Effective half-lives of I- and Cs-isotopes shortly after fallout. J.Environmental Radioactivity 24 (1994) 127-143
59. Mück, K.; Zechner J.:  
Die Strahlenexposition der österreichischen Bevölkerung nach dem Reaktorunfall und die Maßnahmen zu deren Reduktion, in "Zehn Jahre nach Tschernobyl, eine Bilanz", Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz und d. Strahlenschutzkommission, München 6.-7.März 1996, BfS-Schriftenreihe (in Druck)
60. Mück, K.:  
Longterm reduction of caesium concentration in milk after nuclear fallout. Science Tot.Environment. 162 (1994) 63-73
61. Mück, K.; Gerzabek, M.H.:  
Trends in caesium activity concentrations in milk from agricultural and semi-natural environments after nuclear fallout. Die Bodenkultur 46/4 (1995) 1-17
62. Mück, K.:  
Langzeitfolgedosis nach großräumiger Kontamination. OEFZS-A--3605, 1995
63. Mück, K.:  
Die Abnahme der Strahlenexposition nach Tschernobyl. Atomwirtschaft 38/2 (1993) 138-145
64. Mück, K.; Gerzabek, M.H.:  
Long-term reduction of root uptake of Cs-isotopes after nuclear fallout. In: Ten years terrestrial radioecological research following the Chernobyl accident. Proc.of Int. Symp.Austrian Soil Society, Vienna. 22-24 April 1996.
65. Drabova, D.; Rulik, P.; Malatova, I.; Bucina, I.; Hölgye, Z.:  
Monitoring of fallout radionuclides in milk in Czechoslovakia after the Chernobyl Accident. In: Environmental contamination following a major nuclear accident, Symposium IAEA, Vienna; 1990.
66. Komarek, L. (ed.):  
Zprava o radiacni situaci na uzemi CR a SR v roce 1986 - 1993. Acta Hygenia Epidemiologica et Microbiologica, State Office of Hygiene annual reports, Prague; 1987 - 1994.

67. Balonov, M.; Jacob, P.; Liktarev, I.; Minenko, V.:  
Pathways of the exposure of the population after the Chernobyl accident. In: Intern.Minsk Conf, Minsk, March 18-22, 1996
68. Mück, K.:  
The longterm reduction of caesium concentration after nuclear fallout.  
Health Phys. 6 (1996) 63-73
69. Mück, K.:  
Abschätzung der Effektivität der nach dem Reaktorunfall ergriffenen Gegenmaßnahmen.  
BEITRÄGE 6/89, Bundeskanzleramt Sekt.VII (1988) 141-275, oder OEFZS-A-1297
70. Mück, K.:  
Estimate of dose reduction effects due to countermeasures after the Chernobyl accident.  
Rad.Prot.Dosim. 35/2 (1991) 99-114
71. Mück, K.; Steger, F.: Washoff effects in urban areas. Rad. Prot. Dosim.37/3 (1991) 189-194
72. Müller, H.J.; Meisel, S.; Graller, P.; Kahr, G.; Ninaus, W.; Oswald, K.; Gerzabek, M.; Mück, K.; Steger, F.; Streit, S.:  
Verteilung und Wanderung von Radionukliden in Böden und deren Aufnahme in Pflanzen nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl, BEITRÄGE, Bundeskanzleramt / Sekt.VII (1989)
73. Mück, K.:  
Fallout and exposure of the population in Austria after the Chernobyl accident. Kerntechnik 61 (1996)
74. Adamov, E.O., Cherkashov, Yu.M., Ponomarev-Stepnoi, N.N., Bourlakov, E.V.:  
Upgrading of RBMK Reactors: Safety Enhancement Measures, in Intern. Forum "One decade after Chernobyl: Nuclear Safety Aspects", IAEA, Wien, 1.-3.April 1996
75. Kotthoff, K., Adamchik, S., Hayns, M., Reichenbach, D.:  
A View of RBMK Safety, in Intern. Forum "One decade after Chernobyl: Nuclear Safety Aspects", IAEA, Wien, 1.-3.April 1996
76. Adamov, E.O., Cherkashov, Yu.M., Podlazow, L.N., Nikitin, Yu.M., Stenbok, I.A., Novoselsky, O.Yu., Ionov, A.I.:  
Chernobyl Accident Causes: Overview of Studies over the Decade, in Intern. Forum "One decade after Chernobyl: Nuclear Safety Aspects", IAEA, Wien, 1.-3.April 1996
77. Eperin, A.P.:  
Implementation of post-Chernobyl first-priority safety improvements measures at the Leningrad NPP, in Intern. Forum "One decade after Chernobyl: Nuclear Safety Aspects", IAEA, Wien, 1.-3.April 1996
78. Borovoi A.A.:  
Chernobyl Sarcophagus: Safety Problems, in Intern. Forum "One decade after Chernobyl: Nuclear Safety Aspects", IAEA, Wien, 1.-3.April 1996
79. Jampsin B., LeMao J.L.:  
Current Status and Prospects of the Chernobyl Ukritiye, in Intern. Forum "One decade after Chernobyl: Nuclear Safety Aspects", IAEA, Wien, 1.-3.April 1996

Als Manuskript vervielfältigt.

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

**OEFZS-Berichte**

**ISSN 0253-5270**

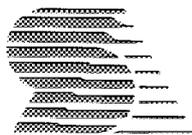
Herausgeber, Verleger, Redaktion, Hersteller:  
Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf  
Ges.m.b.H.

A-2444 Seibersdorf, Austria

Telefon 02254-780-0, Fax 02254-74060

Email [seibersdorf@arcs.ac.at](mailto:seibersdorf@arcs.ac.at)

Server <http://www.arcs.ac.at/>



SEIBERSDORF