

Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De [catalogus](#) van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde [tijdschriften](#) uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling [video's](#).

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material. Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

The [catalogue](#) of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized [magazines](#) from the Dutch anti-nuclear power movement and a [video-section](#).

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small [donation](#). Thank you.



www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

BBEP-440

DER WWER-440: OSTEUROPAS WICHTIGSTER REAKTOR
Gefahren/ Geheime Störfälle/ Katastrophenszenario

Ein Schwarzbuch

Gruppe Ökologie Hannover, April 1987

im Auftrag von

Greenpeace
Collection Loka foundation

www.laka.org
Digitized 2024

DER WWER-440
OSTEUROPAS WICHTIGSTER REAKTOR

GEFAHREN / GEHEIME STÖRFALLBERICHTE / KATASTROPHENSZENARIO
EIN SCHWARZBUCH

VERFASSEN/INNEN: DR. ILSE ALBRECHT
ULRIKE FINK
DR. KARSTEN HINRICHSSEN
DR. HELMUT HIRSCH
UNTER MITARBEIT VON ROLF SCHÄLIKE

GRUPPE ÖKOLOGIE HANNOVER, APRIL 1987
ERSTELLT IM AUFTRAG VON GREENPEACE E. V.

INHALTSVERZEICHNIS:

	Seite
Zusammenfassung	II
Einleitung	1
<u>TEIL I:</u> Der WWER-440 - Verbreitung, Auslegung und Sicherheitstechnik, bisher eingetretene Störfälle	
1. Kernkraftwerke vom Typ WWER-440 in der Welt	5
2. Technische Grunddaten des WWER-440	10
3. Sicherheitssysteme des WWER-440	15
4. Störfälle in WWER-440 Reaktoren: Eine Auswertung geheimer Störfallberichte der IAEA und der OECD/NEA	29
Literatur zu Teil I	41
<u>TEIL II:</u> Beispielhafte Darstellung von Ablauf und Folgen eines schweren Unfalles in einem WWER-440 am Standort Dukovany (CSSR)	
1. Vorbemerkung zur Wahrscheinlichkeit von Unfällen	43
2. Unfallablauf in der Anlage	44
3. Radiologische Auswirkungen auf die Republik Österreich	52
- Tabellenteil	79
- Anhang: Ergänzende Angaben zum Strahlenrisiko	88
4. Kurze Diskussion der Problematik grenz- überschreitender Unfallauswirkungen	98
Literatur zu Teil II	101

Die Verfasser/innen der einzelnen Abschnitte:

I. Albrecht:	I. Teil, Abschnitt 4.
U. Fink:	II. Teil, Anhang zu Abschnitt 3.
K. Hinrichsen:	II. Teil, Abschnitt 3.
H. Hirsch:	die anderen Abschnitte.

DER WWER - 440: OSTEUPROPAS WICHTIGSTER REAKTOR

Gefahren / Geheime Störfallberichte / Katastrophenszenario
Ein Schwarzbuch

ZUSAMMENFASSUNG:

1. Der WWER-440 zählt zu den weltweit häufigsten Reaktortypen. Fast jeder zehnte aller in Betrieb und in Bau befindlichen Kraftwerksreaktoren zählt zu dieser Baulinie. Er ist der einzige zur Zeit in Bulgarien, der DDR, Polen, Rumänien, der Tschechoslowakei und Ungarn zur Stromerzeugung betriebene Reaktortyp (abgesehen von einem WWER-70), und wurde als einziger in der Sowjetunion entwickelter Reaktor auch in Nicht-RGW-Staaten exportiert (zwei Blöcke nach Finnland). Die Standorte befinden sich häufig in Grenznähe, und auch nahe bei Großstädten (z. B. Berlin, Brno, Wien, Kopenhagen).
2. Ein internationales Expertenkomitee, das im Auftrag von GREENPEACE 1986 das Gefahrenpotential aller heute weltweit kommerziell eingesetzten Kraftwerksreaktoren untersuchte, kam zu dem Schluß, daß sämtliche modernen Reaktortypen in Ost und West in der Größenordnung etwa gleicher (Un-)Sicherheit liegen. Schwere Unfälle mit katastrophalen Auswirkungen - wie in Tschernobyl, und schlimmer - sind bei allen Reaktoren möglich. Das Expertenkomitee konnte keinen Reaktortyp identifizieren, der wesentlich sicherer wäre als der Durchschnitt. Es zeigte jedoch einige Reaktortypen auf, die deutlich schlechter liegen als der Durchschnitt: darunter der WWER-440.
3. Der WWER-440 wurde in der Sowjetunion entwickelt: 1964 ging der erste Vorläufer-Prototyp WWER-210 (Druckwasserreaktor mit 210 MW elektrischer Leistung) in Nowo-Woronesh in Betrieb. Über zwei weitere Prototypen führte die Entwicklung zu dem

ersten standardisierten sowjetischen Reaktortyp WWER-440 (erster Block: Nowo-Woronesh-3, Inbetriebnahme 1971). Bis heute werden fast alle Anlagen von der sowjetischen Atomindustrie errichtet. Eine Ausnahme stellen die tschechoslowakischen Kernkraftwerke ab Bohunice-3 dar, die von der tschechoslowakischen Firma Skoda in Lizenz gebaut werden. Die Weiterentwicklung führte zu dem größeren Typ WWER-1000.

4. Der WWER-440 ist ein Druckwasserreaktor (leichtwassergekühlt und -moderiert, mit zwei Kühlkreisläufen). Sein Reaktorkern enthält rd. 40 t Kernbrennstoff, der dem westlicher Druckwasserreaktoren vergleichbar ist (leicht angereichertes Uran) und wie bei diesen in einem einzigen Reaktordruckbehälter enthalten ist. Er ist mit zwei Turbogeneratoren mit je 220 MW elektrischer Leistung ausgestattet. Es werden stets zwei Reaktoren in einem Gebäude gemeinsam errichtet (Doppelblock-Anlage). Kernkraftwerke mit WWER-440-Reaktoren sollen auch zur Fernwärmeversorgung herangezogen werden; dies wird dadurch begünstigt, daß sie häufig in der Nähe von Ballungszentren lokalisiert sind.
5. Wie bei allen - auch den westlichen - Druckwasserreaktoren ist die Integrität des Reaktordruckbehälters von größter Bedeutung: Sein Versagen (Bersten) kann nicht beherrscht werden, und führt zu einem katastrophalen Unfall. Bei einer Reihe von WWER-440 sind die Schweißnähte des Druckbehälters aufgrund von Verunreinigungen besonders sprödbrechgefährdet. 10 ältere Anlagen weisen überdies keinen Korrosionsschutz im Inneren des Reaktordruckbehälters auf. Eine weitere Schwachstelle bei 17 Anlagen sind die Hauptkühlmittelpumpen.
6. Sämtliche WWER-440 haben einen besonders unzureichenden Sicherheitseinschluß (Containment). Die Druckfestigkeit ist sehr gering. Die Gefahr eines frühzeitigen Versagens durch Aufbau von Überdruck im Reaktorgebäude nach Bruch einer Kühlmittel-

leitung und Ausströmen von Dampf aus dem Primärkühlkreislauf ist besonders groß. Je früher der Sicherheitseinschluß bei einem schweren Unfall versagt, desto größer sind die radioaktiven Freisetzungen und desto weniger Zeit verbleibt für Maßnahmen des Katastrophenschutzes.

7. Bei etwa der Hälfte aller WWER-440 (die erste Generation) sind Notkühl- und Druckabbausysteme nur in Ansätzen vorhanden. Daher können sich schon aus relativ kleinen Lecks und anderen Störungen katastrophale Unfälle entwickeln.
8. Auch die zweite Generation der WWER-440 weist ein erhöhtes Risiko von Kernschmelzunfällen mit frühem Containmentversagen auf. Notkühl- und Druckabbausysteme sind weiter entwickelt und erheblich komplexer als bei der ersten Generation. Das Druckabbausystem ist jedoch anfällig für Störungen (Vibrationen in den Kondensationskammern). Sicherheitstechnisch nachteilig ist weiterhin eine starke Vermaschung von Notkühl- und Druckabbausystem. Der Bruch einer Hauptkühlmittelleitung ("2F-Bruch") sollte von den Sicherheitssystemen der zweiten Generation beherrscht werden. Aufgrund der Wechselwirkung verschiedener Systeme, die in ihrem Funktionieren z. T. voneinander abhängig sind, kann schon eine kleine Panne bewirken, daß auch hier die Situation außer Kontrolle gerät.
9. Die beiden WWER-440 in Loviisa (Finnland) wurden mit westlicher (US-) Sicherheitstechnik nachgerüstet. Sie wurden dabei mit einem Eis-Kondensor-Containment ausgestattet, das von allen Containmenttypen amerikanischer Druckwasserreaktoren die geringste Druckfestigkeit aufweist und auch sonst sehr negativ einzuschätzen ist.

10. Über real aufgetretene Störfälle in WWER-440 wird in der veröffentlichten Literatur so gut wie nichts berichtet. Geheime Störfallberichte aus den Incident Reporting Systems der IAEA und der OECD/NEA belegen jedoch zahlreiche in der Praxis aufgetretene Sicherheitsprobleme: Leckagen im Primärkühlkreislauf, Undichtigkeiten an Dampferzeugern, Störungen und Verschleißerscheinungen bei Ventilen und Dichtungen, Probleme in den elektrischen Systemen.
11. Der gefährlichste der hier erstmals veröffentlichten Störfälle ereignete sich am 21. Februar 1983 in Kozloduy in Bulgarien: Nach einem elektrischen Defekt öffneten zwei Ventile am Druckhalter des Primärkühlkreislaufes. Der Druck im Primärkreislauf sank rasch ab, der Reaktor wurde abgeschaltet. Es gelang nicht, die Ventile wieder zu schließen. Nach weiterem Verlust von Kühlmittel wurde die Notkühlung aktiviert. Ein drittes Ventil konnte geschlossen werden; die Lage war wieder unter Kontrolle. Die Einspeisung von kaltem Notkühlwasser in den heißen Reaktordruckbehälter bedeutete akute Gefahr von Sprödbbruchversagen einer Schweißnaht - der betroffene Block in Kozloduy gehört mit hoher Wahrscheinlichkeit zu jenen Anlagen, deren Schweißnähte dafür besonders anfällig sind.
12. Es ist nicht möglich, die Wahrscheinlichkeit für einen schweren Unfall in einem WWER-440 (oder einem anderen Reaktortyp) zuverlässig zu bestimmen. Die Unsicherheiten und Wissenslücken sind zu groß. Zur groben Orientierung kann aber eine Bandbreite abgeschätzt werden, in der diese Wahrscheinlichkeit liegen könnte. So liegt z. B. die Wahrscheinlichkeit für einen schweren Unfall am Standort Dukovany in der Tschechoslowakei in der Zeitspanne von 1987 bis 2000 bei 0,6% bis 20%. Es ist somit klar, daß es sich keineswegs um ein vernachlässigbares "Restrisiko" handelt.

13. Ein Unfallablauf (von vielen möglichen) könnte, wie in Kozloduy 1983, mit dem Öffnen und Offenbleiben eines Druckhalter-Ventils beginnen. Die kalte Hochdruck-Notkühleinspeisung führt zu starker Belastung der Werkstoffe ("Thermoschock") und zum Abreißen einer Hauptkühlmittelleitung. Eine kleine Nachlässigkeit bei der Überprüfung der Sicherheitssysteme (etwas zu niedriger Wasserstand in einem Tank des Druckabbau-Sprinklersystems) schaukelt sich zum Zusammenbruch des Druckabbau-, und kurz darauf auch des Notkühlsystems auf. (Es handelt sich in dem hier betrachteten Unfallszenario um eine Anlage der zweiten Generation.)
14. Der Sicherheitseinschluß versagt in diesem Falle innerhalb der ersten Unfallminute. Er weist bereits ein großes Leck auf, als im Laufe der nächsten Stunde der Kern schmilzt. Während des Kernschmelzens werden radioaktive Stoffe in großen Mengen an die Atmosphäre freigesetzt. Ein weiterer Freisetzungsschub erfolgt, wenn die Schmelze den Druckbehälter durchdringt und beginnt, mit dem Beton des Gebäudes in Wechselwirkung zu treten. Die radioaktiven Freisetzungen sind vergleichbar denen des Tschernobyl-Unfalles, bei manchen Radionukliden (z. B. Jod-131) sogar deutlich größer, obgleich es sich beim WWER-440 um einen erheblich kleineren Reaktor handelt als beim RBMK-1000.
15. Trotz der hohen Freisetzungen ist der betrachtete Fall noch weit vom schlimmstmöglichen entfernt. Die verstärkende Wirkung von Explosionen während des Unfalles wird nicht berücksichtigt; weiterhin wird angenommen, daß die anderen Blöcke am gleichen Standort nicht in Mitleidenschaft gezogen werden, und daß keine Freisetzung aus dem im Reaktorgebäude befindlichen Lagerbecken für abgebrannten Kernbrennstoff erfolgt.

16. Die radiologischen Auswirkungen eines solchen Unfalles wurden beispielhaft für den Standort Dukovany (CSSR) ermittelt. Entsprechend real häufig anzutreffenden Windverhältnissen wurde eine Ausbreitung der radioaktiven Wolke in Richtung Wien angenommen. Die Wetterlage wurde nicht ausgesprochen ungünstig gewählt (z. B.: kein Regen, der die Strahlenbelastung in Wien und Niederösterreich stark erhöhen könnte). Es sind Wettersituationen möglich, bei denen die Folgen noch erheblich schlimmer sein können. Entsprechend einer Windgeschwindigkeit von 14 km/h erreicht die radioaktive Wolke Wien in rd. 6 Stunden.
17. Die radioaktiven Stoffe in der Wolke werden von den Menschen der betroffenen Gebiete eingeatmet. Dieser Weg der Strahlenbelastung ist vor allem für Jod-131 wichtig, das sich in der Schilddrüse anreichert. In dem hier betrachteten Unfallszenario werden allein aufgrund der Strahlenbelastung durch Inhalation in Wien rund 12.000 Menschen an Schilddrüsenkrebs erkranken. Unter den Betroffenen sind - aufgrund der besonderen Empfindlichkeit - überproportional viele Kleinkinder. Die Schilddrüse eines Kleinkindes in Wien wird mit bis zu 1,9 Sv (190 rem) belastet.
18. Radioaktive Stoffe aus der Wolke lagern sich auf dem Boden ab. Für viele Jahre bestrahlen sie dann die Menschen, wobei vor allem Cäsium-134 und -137 eine Rolle spielen. Der Strahlenpegel liegt weit über der natürlichen Strahlenbelastung. Diese Bodenstrahlung führt in den Jahren nach dem Unfall in Österreich zu insgesamt 4500 Krebs-Todesfällen.
19. Schließlich gelangen radioaktive Stoffe auch in pflanzliche Produkte, und damit in die Nahrungskette. Dies geschieht vor allem durch Boden und Wurzeln, anfangs auch über die Blätter. Die durch Aufnahme von Nahrungsmitteln verursachte Strahlenbelastung kann durch Festsetzen von Grenzwerten und

Aus-dem-Verkehr-Ziehen stärker belasteter Produkte deutlich reduziert werden. Werden alle radioaktiv belasteten Nahrungsmittel verzehrt (sei es, weil keine Grenzwerte gesetzt werden, oder, weil Nahrungsmittel mit Belastungen über dem Grenzwert mit weniger belasteten gemischt und dann auch verzehrt werden), sind in ganz Österreich über 100.000 Schilddrüsenkrebs-erkrankungen (davon rd. 3% mit tödlichem Ausgang), über 5000 Knochenkrebs-erkrankungen (rd. 50% tödlicher Ausgang) sowie weitere Krebs-erkrankungen anderer Art zu erwarten. Die Zahl der tödlichen Krebsfälle liegt insgesamt bei 12.000. Bei Einhalten der Grenzwerte der FAO (Nahrungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen) und ohne "Verdünnen" stark belasteter Nahrungsmittel reduziert sich die Gesamtzahl der tödlichen Krebsfälle auf 1400. Es treten noch über 100 Schilddrüsenkrebs-erkrankungen, sowie über 1400 Knochenkrebs-erkrankungen auf. Gleichzeitig müssen aber in den ersten drei Jahren nach dem Unfall große Mengen an Lebensmitteln weggeworfen (endgelagert) werden: Im ersten Jahr sämtliche auf 1/10 der Fläche Österreichs erzeugten Lebensmittel (d. s. rund 180.000 t Milch, 60.000 t Fleisch und große Mengen pflanzlicher Produkte); und auch im dritten Jahr noch rund 6000 t Fleisch.

20. Natürlich ist nicht nur das Gebiet des Republik Österreich von dem Unfall betroffen. Die radioaktive Wolke wird in Europa einen langen Weg über landwirtschaftlich genutztes und bewohntes Gebiet nehmen. Die gesamten Unfallfolgen werden mindestens das Zehnfache der Folgen für Österreich betragen; bei ungünstigen meteorologischen Bedingungen (verbreiteter Regen) auch erheblich mehr. In bereits stark verdünnter Form wird die Wolke schließlich auch andere Erdteile erreichen.
21. Zusätzlich zu den Krebsfällen werden durch die unfallbedingte Bestrahlung auch genetische Schäden hervorgerufen. Auf diesem Gebiet ist das Wissen noch so lückenhaft, daß eine zah-

lenmäßige Abschätzung unmöglich scheint. Es muß davon ausgegangen werden, daß das genetische Risiko in der gleichen Größenordnung liegt wie das Krebsrisiko. Weiterhin sind Schäden durch Bestrahlung von Föten im Mutterleib - u. a. eine Verringerung der geistigen Fähigkeiten - sowie, aufgrund der allgemeinen Schwächung des Immunsystems durch Bestrahlung, verstärktes Auftreten einer Vielzahl anderer Krankheiten zu erwarten.

22. Die überaus kurze Vorwarnzeit macht Gegenmaßnahmen wie Evakuierungen völlig unmöglich. Selbst eine raschestmögliche und effektive Verständigung der österreichischen Behörden bringt letztlich nur den Vorteil, daß kurzfristig und gezielt mit Messungen begonnen werden kann und Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenbelastung über die Nahrung etwas früher geplant und eingeleitet werden können. Trotz der auf der Sondersitzung der IAEA im September 1986 in Wien beschlossenen Konvention über frühzeitige Benachrichtigung bei einem nuklearen Unfall, die am 27. Oktober 1986 in Kraft trat, darf aber nicht von einem raschen und effizienten Informationsaustausch ausgegangen werden.
23. Es ist fraglich, ob z. B. den tschechoslowakischen Behörden genau bekannt ist, welche Behörden in Österreich zu informieren sind; ob Vorkehrungen für die sofortige Durchgabe aller wichtigen Daten getroffen wurden; und ob gewährleistet ist, daß bei der Übermittlung keine Sprachbarrieren auftreten. Im übrigen ist nicht international verbindlich festgelegt, was als "Unfall", und was als noch zulässiger "Störfall" zu betrachten ist. Der zulässige Störfallgrenzwert für die Ganzkörperdosis beträgt z. B. in der Tschechoslowakei 0,25 Sv (25 rem) pro Störfall. Die österreichische Strahlenschutzverordnung sieht für die Bevölkerung dagegen überhaupt keine speziellen Störfallgrenzwerte vor, es gilt in allen Fällen der Maximalwert von 0,0017 Sv (170 mrem) pro Jahr. Somit kann, was in einem

Land schon als mittelschwerer Unfall angesehen wird, in einem anderen noch als akzeptabler Störfall gelten, über den nicht informiert zu werden braucht.

24. Der Reaktortyp WWER-440 war bisher kaum Gegenstand kritischer Analysen. Die vorliegende Studie will hier den Anfang machen, diese - angesichts der Sicherheitsdefizite des WWER-440 besonders gravierende - Lücke zu schließen. Sie soll jedoch nicht so verstanden werden, daß nur dieser Reaktortyp Anlaß zu Sorgen gebe. Dies trifft keineswegs zu. Nur wer deutlich macht, daß er/sie die Gefährdung ernst nimmt, die von den Atomanlagen des eigenen Landes ausgeht, kann glaubwürdig auf die Gefährdung durch Atomanlagen anderer Länder hinweisen.

EINLEITUNG

Der Unfall von Tschernobyl hat die Gefahren der Atomenergie für hunderte Millionen Menschen hautnah aufgezeigt. Nach kurzer Zeit, während die radioaktive Wolke noch auf Westeuropa zudriftete, begann aber auch schon eine massive Beschwichtigungsoffensive: Die zu erwartenden Gesundheitsfolgen des Unfalles wurden von den Behörden heruntergespielt, viel zu hohe Grenzwerte wurden festgesetzt. Und vor allem: Praktisch in allen Ländern mit einem eigenen Atomprogramm war zu hören: "Bei uns kann so etwas aber nicht geschehen!" Deutsche Druck- und Siedewasserreaktoren, britische gasgekühlte Reaktoren und andere westliche Reaktortypen wurden als sehr viel besser und sicherer als sowjetische Reaktoren dargestellt.

Um hier ein fundiertes Urteil möglich zu machen, beauftragte GREENPEACE im Juni 1986 ein internationales Expertenkomitee - das zum großen Teil aus ehemaligen "Insidern" aus Nuklearindustrie oder Behörden bestand - eine zusammenfassende Bewertung der Gefährdung durch kommerzielle Kraftwerksreaktoren zu erarbeiten. Das Ergebnis dieser umfassenden Studie (International Nuclear Reactor Hazard Study, herausgegeben von der Gruppe Ökologie Hannover, 2. Auflage 1987): Alle modernen Kraftwerksreaktoren liegen im Hinblick auf ihre Gefahren innerhalb der gleichen Größenordnung; zahlreiche Unterschiede in den grundlegenden physikalisch/technischen Eigenschaften wurden identifiziert, ebenso in der Auslegung der Sicherheitssysteme. Diese mögen bedeuten, daß geringe relative Vor- und Nachteile bei einzelnen Reaktortypen bestehen. Sie bewirken jedoch keine fundamentalen Unterschiede; so sind z.B. ein deutscher Druckwasserreaktor, ein britischer Fortgeschrittener gasgekühlter Reaktor oder ein schwedischer Siedewasserreaktor keineswegs um Klassen besser als der sowjetische RBMK-Typ.

Dieses Ergebnis bedeutet, daß kein Land, in dem Atomkraftwerke betrieben werden, das Recht hat, die Möglichkeit katastrophaler Unfälle in seinen Atomanlagen abzustreiten, oder nur theoretisch, mit verschwindend geringer Wahrscheinlichkeit zuzugestehen. Ohne den weltweiten Ausstieg aus der Atomenergie werden weitere Katastrophen eintreten - in Ost und West.

In der genannten Studie konnte kein Reaktortyp gefunden werden, der positiv aus dem durchschnittlichen Gefährdungsspektrum herausfällt. Es wurden aber einige ältere Reaktortypen identifiziert, die aufgrund besonderer Schwächen bei Sicherheitssystemen und/oder Containment besonders negativ einzuschätzen sind - d. h. Reaktortypen, von denen eine überdurchschnittliche große Gefahr ausgeht. Da alle Reaktoren das Potential für katastrophale radioaktive Freisetzungen aufweisen, wäre es völlig falsch, sich ausschließlich auf diese besonders gefährlichen Typen zu konzentrieren. Sie verdienen aber Aufmerksamkeit, speziell dann, wenn sie bisher kaum der Gegenstand kritischer Analyse waren und somit gerade hier ein Defizit besteht.

Daher hat die vorliegende Arbeit den sowjetischen Reaktortyp WWER-440 zum Thema - einen Druckwasserreaktor, der zu den in der internationalen Studie identifizierten Reaktortypen mit besonderen Sicherheitsdefiziten zählt (wie auch der Großteil der britischen Magnox-Reaktoren, sowie japanische und US-Druckwasserreaktoren mit Eis-Kondensör-Containment). Dieser ziemlich häufig gebaute Reaktortyp ist besonders für den Bereich "Osteuropa ohne UdSSR" wichtig - in Bulgarien, der DDR, Polen, Rumänien, der Tschechoslowakei und Ungarn sind zur Zeit nur Atomkraftwerke mit WWER-440 (sowie ein Block eines Vorläufertyps, des WWER-70) in Betrieb. Auch die in diesen Ländern in Bau befindlichen Reaktoren sind überwiegend WWER-440. Zahlreiche weitere

WWER-440 befinden sich in der Sowjetunion, zwei auch in Finnland.

Der Unfall von Tschernobyl hat gezeigt, daß Reaktorunfälle sehr weiträumige Auswirkungen haben können. Tendenziell nimmt aber die Gefährdung durch einen bestimmten Reaktor mit abnehmender Entfernung stark zu - je näher ein Ort, in umso konzentrierterer Form kann er von der radioaktiven Wolke getroffen werden. Tschernobyl hat aber auch gezeigt, daß -abhängig von der Windrichtung und der sonstigen Wetersituation - weiter entfernt liegende Bereiche durchaus stärker belastet sein können als Gebiete in der Nähe des Unfallortes. Unter Berücksichtigung der geographischen Nähe ist es jedenfalls nicht nur die Bevölkerung Osteuropas, die in der höchsten Gefahrenzone der WWER-440 liegt. Oft liegen die Reaktoren in der Nähe von Grenzen, und auch ziemlich nahe zu Großstädten in Skandinavien, Mittel- und Südeuropa. So beträgt die Entfernung vom Atomkraftwerk Rheinsberg (WWER-70) nach Berlin nur rd. 50 km; vom Standort Greifswald (DDR) sind es rd. 160 km nach Malmö, 170 km nach Berlin, 175 km nach Kopenhagen und 220 km nach Hamburg. Die tschechoslowakischen Kernkraftwerkkomplexe Dukovany und Bohunice sind jeweils rd. 100 km von Wien entfernt. Vom Kernkraftwerk Paks (Ungarn) beträgt die Entfernung nach Belgrad rd. 250 km, und Istanbul ist vom bulgarischen Standort Kozloduy rd. 400 km entfernt - etwa die Hälfte der Entfernung von Warschau nach Tschernobyl.

Diese Überlegungen zeigen, daß es zweifellos legitim und auch dringend notwendig ist, sich im westlichen Teil Europas Gedanken über die Gefährdung durch WWER-440-Reaktoren zu machen. Die vorliegende Arbeit, die die Schwachstellen dieses Reaktortyps identifiziert, und auch die möglichen Auswirkungen eines schweren Unfalles in einem grenznahen tschechoslowakischen Kernkraftwerk auf die Millionenstadt Wien als konkretes Beispiel für das Ausmaß der Be-

drohung aufzeigt, ist entstanden, um hier Anstöße für weitere Auseinandersetzung mit dem Thema, und vor allem energisches Handeln der politisch Verantwortlichen, zu geben. Schließlich zeigen auch die in dieser Arbeit erstmals veröffentlichten, geheimen Berichte von IAEA und OECD/NEA über 15 tatsächlich eingetretene Störfälle in WWER-440, daß der bisherige Betrieb dieser Reaktoren keineswegs störungsfrei abgelaufen ist.

Jedoch muß folgendes klar sein: Nur wer auch die Gefährdung des eigenen Landes, sowie der Nachbarländer, durch die eigenen Atomanlagen ernst nimmt, darf erwarten, daß seine Bedenken zur Gefährdung durch ausländische Atomanlagen ernst genommen werden. Schließlich befindet sich z. B. der Standort der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf in der BRD nur rund 30 km von der tschechoslowakischen Grenze entfernt; und das Atomkraftwerk Krümmel liegt noch näher an der Grenze zur DDR. Die beste Position aus moralischer, aber auch aus völkerrechtlicher Sicht, haben gegenüber ausländischen Kernanlagen zweifellos Staaten, die selbst schon auf Atomkraft verzichtet haben - freilich nur solange, wie sie nicht durch Importe von Atomstrom indirekt für die gefährdenden Anlagen mitverantwortlich werden... In diesem Sinne erwarten die Autoren/innen, daß die vorliegende Arbeit Denk- und Handlungsansätze für die Auseinandersetzung mit der Atomenergie insgesamt, und nicht nur mit einem Reaktortyp, liefern wird.

TEIL I: DER WWER-440 - VERBREITUNG, AUSLEGUNG UND SICHERHEITSTECHNIK, BISHER EINGETRETENE STÖRFÄLLE

1. Kernkraftwerke vom Typ WWER-440 in der Welt:

In den Mitgliedsstaaten des Rates für gegenseitige Wirtschaftshilfe (RGW) wird Atomenergie heute in großem Ausmaß zur Elektrizitätserzeugung eingesetzt (vgl. Tabelle 1). Die Atomstromanteile an der produzierten Elektrizität liegen zwar deutlich niedriger als in den in dieser Hinsicht führenden westlichen Industrieländern (1985: Frankreich 64,8%, Belgien 59,8%, Taiwan 52%, Schweden 42,3%), doch liegt immerhin z. B. Bulgarien höher als die Bundesrepublik (31,2%), und die Tschechoslowakei höher als Kanada (12,7%) /1/.

Auch in den kommenden Jahren und Jahrzehnten soll der Ausbau der Atomenergie vorangetrieben werden. In der DDR z.B. soll sich - zumindest nach den bis Mai 1986 gültigen Planungen - die installierte Kernkraftwerksleistung bis Anfang der 90er Jahre verdoppeln und bis zum Jahr 2000 vervierfachen. Nach der Fertigstellung des modernsten (nicht entschwefelten) Braunkohlekraftwerkes Jänschwalde sollen in der DDR nur noch Kernkraftwerke gebaut werden /4/. In der Tschechoslowakei wurden schon 1979 für die ersten Jahre des nächsten Jahrhunderts 24 mögliche Kernkraftwerksstandorte vorausgewählt /5/. In der Sowjetunion soll sich die Kernkraftwerksleistung bis 1990 mehr als verdoppeln. Es erscheint nicht angebracht, davon auszugehen, daß der Unfall von Tschernobyl hier ein grundlegendes Umdenken der politisch Verantwortlichen bewirkt hat: Zumindest die sowjetische Regierung hat bereits erklärt, daß

Tabelle 1: Atomkraftwerke in den RGW-Staaten (Stand: 31.12.1986) /1, 2, 3/.

Land ¹	Reaktoren in Betrieb			Reaktoren in Bau			Reaktoren bestellt ²			Atom- strom- erzeug. 1985(TWh)	Anteil an Elek- tr.erz. 1985
	WWER- 440	WWER- 1000	andere	WWER- 440	WWER- 1000	andere	WWER- 440	WWER- 1000	andere		
Bulgarien	4	-	-	-	2	-	-	2	-	13,1	31,6%
CSSR	7	-	-	5	4	-	?	?	?	10,9	14,6%
DDR	4	-	1 ³	4	2	-	?	?	?	12,2	12 %
Kuba	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-
Polen	-	-	-	2	-	-	2	2	-	-	-
Rumänien	-	-	-	-	-	3 ⁴	1	-	1 ⁴	-	-
UdSSR	10	10	33 ^{5,6}	-	24	8 ⁶	-	28	11 ⁶	152,0	10,3%
Ungarn	3	-	-	1	-	-	-	4	-	6,1	23,6%
gesamt	28	10	34	14	32	11	3	36	12	194.3	rd.10%

Der WWER-1000 hat eine elektrische Leistung von 1000 MW, der WWER-440 440 MW, usw.

1: In der Mongolischen VR sowie in Vietnam sind z. Zt. Kernkraftwerke weder in Betrieb, noch in Bau oder bestellt.

2: Nur z. T. widersprüchliche, unvollständige Angaben verfügbar.

3: WWER-70

4: CANDU (660 MWe)

5: Darunter je 1 WWER-210 und WWER-365

6: Hauptsächlich RBMK-1000 und RBMK-1500, sowie Schnelle Brüter. Geplante RBMK, deren Bau noch nicht begonnen hat, werden wahrscheinlich nach dem Tschernobyl-Unfall nicht mehr realisiert.

1
9
1

der Unfall die Pläne des Kernkraftausbaues in der Sowjetunion nicht beeinträchtigen wird /1/.

Während die Sowjetunion, wo der WWER-440 entwickelt wurde, schon in den letzten zehn Jahren zunehmend Reaktoren vom Typ WWER-1000 (der aus dem WWER-440 hervorgegangen ist) sowie RBMK-1000 (neuerdings auch RBMK-1500) in Betrieb genommen hat und keine WWER-440 mehr errichtet, ist der WWER-440 in den osteuropäischen RGW-Staaten ohne Sowjetunion der dominierende Reaktortyp; abgesehen von den Vorläufer-Prototypen WWER-70 in Rheinsberg (DDR) und dem bereits stillgelegten Schwerwasserreaktor in Bohunice (CSSR) sogar der einzige zur Zeit und bisher betriebene Reaktor. Dies wird sich in den kommenden Jahren nur sehr langsam ändern, da in diesen Staaten auch noch überwiegend WWER-440 in Bau sind. Diese Aussage trifft auf Bulgarien, die CSSR, die DDR, Polen und Ungarn zu. Eine Ausnahmestellung hat Rumänien, das sich in erster Linie auf die Einfuhr kanadischer Reaktoren orientiert hat.

Auch global gesehen ist der WWER-440 ein häufiger Reaktortyp: Rund 9% aller weltweit in Betrieb und in Bau befindlichen Kraftwerksreaktoren sind WWER-440 (einschl. der drei Vorläufer-Prototypen WWER-70, -210 und -365). Etwa jeder sechste in Betrieb befindliche Druckwasserreaktor ist ein WWER-440. Als einziger sowjetischer Reaktortyp wurde er auch in ein Nicht-RGW-Land exportiert (zwei Blöcke nach Finnland). Tabelle 2 gibt einen Überblick über WWER-440 in der Welt. Aufgrund der Zahl der Anlagen, und der besonderen geographischen Nähe, ist die Gefährdung durch WWER-440 Reaktoren somit für die Staaten Skandinaviens, West- und Mitteleuropas ein wichtiges Problem.

Tabelle 2: WWER-440 (sowie -70, -210 und -365) in der Welt (Stand 31.12.1986) /3, 6/.

1. Reaktoren in Betrieb:

Bulgarien	Kozloduy-1	am Netz seit	1974
	-2		1975
	-3		1980
	-4		1982
CSSR	Bohunice-1		1978
	-2		1980
	-3		1984
	-4		1985
	Dukovany-1		1985
	-2		1986
DDR			1986
	Rheinsberg, 70 MWe		1966 (WWER-70)
	Bruno Leuschner-1		1974
	(Greifswald) -2		1975
		-3	1978
		-4	1979
Finnland	Loviisa-1		1977 (mit westlicher
	-2		1981 Sicherheitstechnik nachger.)
UdSSR	Kola-1		1973
	-2		1974
	-3		1981
	-4		1984
	Novo-Voronesh-1, 278 MWe		1964 (WWER-210)
	-2, 365 MWe		1969 (WWER-365)
		-3	1971
		-4	1972
	Oktemberyan-1		1976
	-2		1980
	Rovno-1		1980
	-2		1981
Ungarn	Paks-1		1982
	-2		1984
	-3		1986

Insgesamt: 33 Reaktoren.

...Tabelle 2

2. Reaktoren in Bau:

CSSR	Dukovany-4	ans Netz:	1987
	Mochovce-1		1989
	-2		1990
	-3		1991
	-4		1992
DDR	Bruno Leuschner-5		1987
	-6		1987
	-7		1989
	-8		1990
Kuba	Juragua-1	ca.	1990
	-2	ca.	1992
Polen	Zarnowiec-1		1990
	-2		1991
Ungarn	Paks-4		1987

Insgesamt: 14 Reaktoren

3. Geplante WWER-440:

Polen	Zarnowiec-3	1993
	-4	1994
Rumänien	Olt (Fluß)	?

Nach Angaben der IAEA sollen weiterhin zwei Blöcke in Libyen geplant sein.

2. Technische Grunddaten des WWER-440:

2.1. Beschreibung der Anlage /7/:

Der erste Druckwasserreaktor der WWER-Linie ging 1964 in Nowo-Woronesh in der Sowjetunion in Betrieb (WWER-210). 1966 folgte der WWER-70 in Rheinsberg (DDR), 1969 der WWER-365 in Nowo-Woronesh. Diese Reaktoren waren Prototypen, mit denen Erfahrungen bei Auslegung, Bau und Betrieb von Druckwasserreaktoren gesammelt wurden. Die Bauzeit lag bei jeweils fünf bis sechs Jahren.

Diese Entwicklung führte zu dem ersten in großer Zahl errichteten, standardisierten sowjetischen Reaktor WWER-440. Der erste Block war Nowo-Woronesh-3 (Baubeginn 1966, Inbetriebnahme 1971). Ein Überblick über die WWER-440 in der Welt wurde bereits in Tabelle 2 gegeben. Fast alle Anlagen wurden bzw. werden von der sowjetischen Atomindustrie errichtet (Exporte wickelt die Firma Atomenergoexport ab). Eine Ausnahme stellen die tschechoslowakischen Kernkraftwerke ab Bohunice-3 dar, die von der tschechoslowakischen Firma Skoda in Lizenz gebaut wurden bzw. werden.

Den nächsten Schritt bei den WWER-Reaktoren stellt der WWER-1000 dar; der erste Reaktor dieses Typs ist seit 1980 als Block 5 in Nowo-Woronesh in Betrieb (Baubeginn: 1972). Um WWER-1000 in großer Zahl herstellen zu können, wurde in der Sowjetunion die Fabrik "Atommasch" in Wolgodonsk errichtet. Der WWER-1000 ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Abbildung 1 zeigt einen Schnitt durch das Reaktorgebäude eines WWER-440. Der WWER-440 hat eine thermische Leistung von 1375 MW und eine elektrische Leistung von 440 MW (z.T. liegt letztere aufgrund von standort- oder anlagenspezifischen

schen Gegebenheiten etwas niedriger). Sein zylindrischer Reaktorkern mit einer Höhe von 2,46 m und einem Durchmesser von 2,88 m enthält 41,5 t Kernbrennstoff (Uran mit einer Anfangsanreicherung von max. 3,5%) in insg. 349 Elementen, die aus je 126 Brennstäben bestehen. Die Hüllrohre der Brennstäbe sind aus einer Zirkon-1% Niob-Legierung gefertigt.

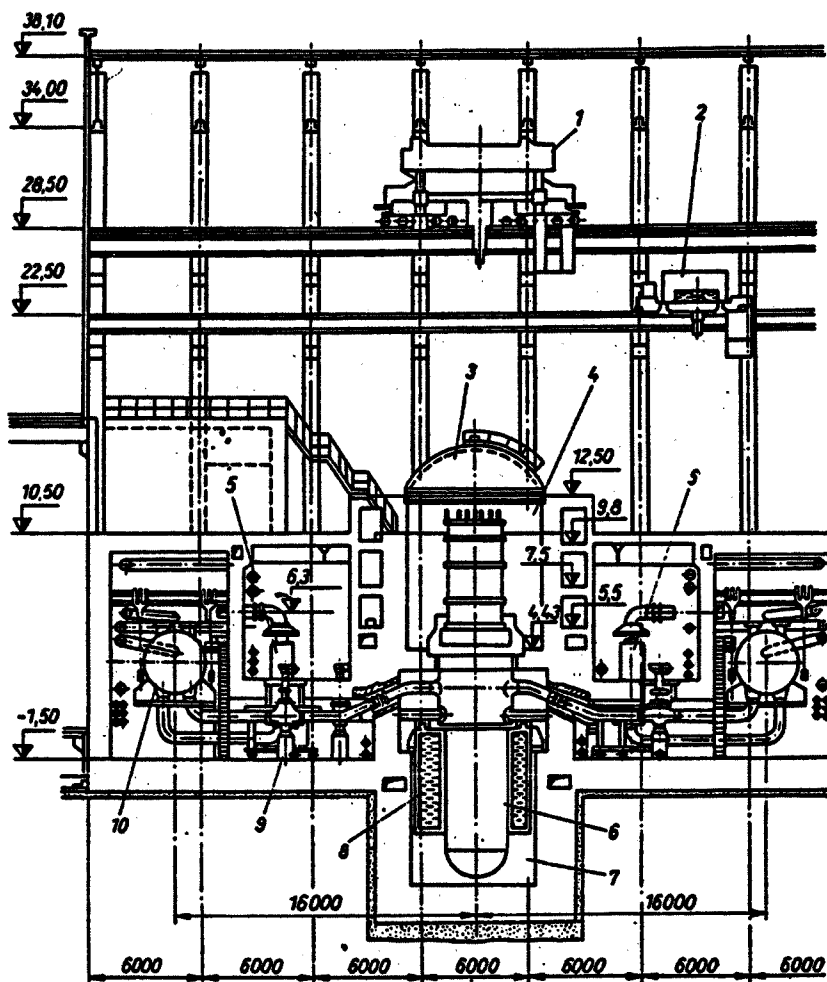


Abbildung 1: Querschnitt durch das Reaktorgebäude eines Kernkraftwerks mit zwei WWER-440 Reaktoren /8/.

1: Brückenkran zur Abnahme des oberen Deckels; 2: Brückenkran für andere Operationen; 3: oberer Deckel; 4: Brennelementwechsel-Becken; 5: Hauptumwälzpumpe; 6: Reaktor; 7: Reaktorschacht; 8: Ringwasserbehälter zur Abschirmung (bei neueren Anlagen: Betonabschirmung); 9: Hauptabsperrentil; 10: Dampferzeuger

Druck und Temperatur des Kühlmittels Wasser im Primärkreislauf liegen mit 12,67 MPa und 268° C bzw. 296° C (am Ein- bzw. Ausgang des Reaktordruckbehälters) etwas niedriger als bei westlichen Druckwasserreaktoren oder beim WWER-1000. Der Primärkühlkreislauf besteht aus sechs Strängen, deren jeder eine Hauptkühlmittelpumpe, einen horizontal liegenden Dampferzeuger, und zwei Absperrventile besitzt. (Der Primärkreislauf des WWER-70 weist drei, der des WWER-210 bzw. -365 sechs bzw. acht Stränge auf. Der WWER-1000 hat, wie z. B. auch die meisten Druckwasserreaktoren in der BRD, vier Stränge.) Der Reaktordruckbehälter besteht aus dem Stahl 15Kh2MFA. Zum Primärkreislauf gehört - wie bei allen Druckwasserreaktoren - ein Druckhalter mit einem Volumen von 38 m³.

Die Dampferzeuger des WWER-440 sind 11,95 m lang und haben einen Innenwanddurchmesser von 3,21 m. Jeder Dampferzeuger enthält 5146 Heizrohre mit 16 mm Außendurchmesser und 1,4 mm Wandstärke. Der Dampfdruck am Ausgang beträgt 4,76 MPa und liegt damit ebenfalls niedriger als bei neueren Baulinien. Jeder WWER-440 hat zwei Turbo-Generatoren mit je 210 MW elektrischer Leistung.

Die Regelung des Reaktors erfolgt hauptsächlich durch Sicherheits- und Kontrollstäbe. Bei den Vorläufer-Prototypen (WWER-70, -210 und -365) setzte man auf eine große Zahl von Kontrollelementen, um effektive Reaktivitätskontrollen zu erzielen. Beim WWER-440 werden langfristige Reaktivitätsschwankungen durch Veränderungen der Borsäurekonzentration im Primärkreislauf ausgeglichen; die Zahl der Kontrollstäbe wurde verringert. Wie bei westlichen Druckwasserreaktoren, sind dadurch die Kontrollstäbe allein nicht hinreichend, um den Reaktor unter allen Umständen unterkritisch zu machen und zu halten.

Der Kernbrennstoff des WWER-440 soll Abbrände von bis zu 30.000 MWd/t erreichen. Jährlich wird rund ein Drittel des Kernbrennstoffes durch frischen Brennstoff ersetzt. Nahe am Reaktor befindet sich ein Lagerbecken für abgebrannte Kernbrennstoffe.

WWER-440 werden stets als Doppelblockanlagen (zwei Reaktoren mit dazugehörigen Systemen in einem Gebäude) errichtet.

Kernkraftwerke mit WWER-440 Reaktoren sollen auch zur Fernwärmeversorgung herangezogen werden. So ist z. B. in der Tschechoslowakei geplant, aus dem 3. und 4. Block von Bohunice 240 MJ/s Wärme für die Stadt Trnava (Entfernung: 23 km) auszukoppeln. Die Anlage in Dukovany soll 690 MJ/s Wärme für die Stadt Brno (43 km) liefern. Für die Versorgung von vier kleineren Städten aus dem im Bau befindlichen Kernkraftwerk Mochovce wurde bereits ein Projekt ausgearbeitet; auch das Kraftwerk Temelin (mit 4 WWER-1000) soll zur Fernwärmeversorgung herangezogen werden /9/. Bemerkenswert dabei ist die oft gegebene Nähe der Kernkraftwerke zu Ballungszentren, die solche Projekte erst attraktiv macht. Die Wärmetauscher dieser Fernwärmesysteme stellen, da sie gleichzeitig als Aktivitätsbarrieren dienen müssen, besonders hohe Anforderungen an Dichtigkeit und Drucküberwachung.

2.2. Schwachstellen und Verbesserungsversuche:

Eine schwerwiegende Schwachstelle des WWER-440 ist die besondere Unzulänglichkeit der Systeme zur Beherrschung bzw. Folgenabschwächung der Kühlmittelverluststörfälle. Darüber wird ausführlich im nächsten Abschnitt berichtet.

Wie bei allen Druckwasserreaktoren, ist auch beim WWER-440 die Integrität des Reaktordruckbehälters von größter Bedeutung. Sein Versagen kann nicht beherrscht werden, und führt zwangsläufig zu katastrophalen Freisetzungen radioaktiver Stoffe. Dennoch kann es auch bei modernen Kernkraftanlagen nicht ausgeschlossen werden /10/.

Bei den WWER-70, -210 und -365, sowie den ältesten WWER-440 sind periodische Kontrollen des Reaktordruckbehälters nach der Inbetriebnahme von außen nicht mehr möglich, da ein als Strahlenabschirmung angebrachter Ringwasserbehälter keinen Zugang erlaubt. Neuere WWER-440 sind mit einer Beton-Abschirmung ausgestattet; zwischen der inneren Betonwand und dem Reaktorgefäß befindet sich ein 720 mm breiter Raum /8/.

Bei einer Reihe von älteren WWER-440 weisen Schweißnähte des Reaktordruckbehälters zu hohe Kupfer- und Phosphorgehalte auf. Dadurch nimmt die Neutronenversprödung des Materials erheblich (etwa um einen Faktor drei) rascher zu als ursprünglich vorgesehen. Vor allem bei Einspeisung von kaltem Notkühlwasser besteht erhöhte Spröbruchgefahr.

Bei den betreffenden Reaktoren (die in der veröffentlichten Literatur aus RGW-Staaten nicht identifiziert werden) wurden zur Senkung des Neutronenflusses in den Schweißnähten Blindelemente am Rande des Reaktorkerns eingesetzt /11/. Bekannt ist, daß dieses Problem auch bei den WWER-440 von Loviisa (Finnland) aufgetreten ist. Neben dem Einsatz von Blindelementen wurden dort auch andere Gegenmaßnahmen, z. B. Vorwärmen des Notkühlwassers, ergriffen /12/. Ähnliche Probleme wurden im Westen z. B. beim KKW Stade bekannt /13/.

Neun ältere WWER-440 sowie der WWER-365 haben keine Plat-

tierung im Inneren des Reaktordruckbehälters, die vor Korrosion schützen soll. Dadurch wird die Einstellung und Überwachung der Wasserchemie im Primärkreislauf sehr kompliziert. Ab der Anlage Loviisa-1 wurde eine Plattierung eingeführt /11/.

Die 17 ältesten WWER sind mit Hauptkühlmittelpumpen mit geringen Schwungmassen ausgestattet. Bei Ausfall des Pumpenantriebes kommen sie daher innerhalb sehr kurzer Zeit (1,5 bis 2 Sekunden) zum Stillstand; es gibt keine längere Auslaufphase, in der die durch Trägheit weiterlaufenden Pumpen noch für Zirkulation des Kühlmittels sorgen. Bei Stromausfall soll die Auslaufenergie des Hauptgenerators, bzw. von speziellen Generatoren am Turbinenschaft, noch für 100 Sekunden ausreichende Elektrizität liefern. Falls dabei Störungen auftreten, kann der Brennstoff rasch unzulässig hohe Temperaturen erreichen /7/. Die neuesten WWER-440, sowie alle WWER-1000, haben Hauptkühlmittelpumpen mit großer Schwungmasse.

Andere Verbesserungsversuche betreffen die interne thermische Abschirmung im Reaktordruckbehälter, die Anordnung der Dampferzeuger um den Reaktor (Verkürzung der Leitungen im Primärkreis) u. a.; auf sie kann hier im einzelnen nicht eingegangen werden. Eine ausführliche Beschreibung von WWER-440 und WWER-1000 ist in /7/ enthalten.

3. Sicherheitssysteme des WWER-440:

3.1. Der größte Auslegungsstörfall beim WWER-440:

Für das Ausmaß der Gefährdung, das von einer kerntechnischen Anlage ausgeht, ist der größte Auslegungsstörfall

eine der wichtigsten Bestimmungsgrößen. Dabei handelt es sich um jenen Störfall, der von den Sicherheitssystemen noch beherrscht werden muß, d. h. der für die Auslegung und Leistungsfähigkeit der Sicherheitssysteme bestimmend ist.

Auch bei einem Störfall, der innerhalb der Auslegungsgrenzen bleibt, ist freilich eine Gefährdung der Bevölkerung nicht ausgeschlossen. "Beherrschen" eines Störfalles bedeutet nicht, daß keine radioaktiven Stoffe freigesetzt werden. Es bedeutet lediglich, daß die in den einschlägigen Richtlinien festgelegten Störfallgrenzwerte der Strahlenbelastung nicht überschritten werden. Diese Grenzwerte liegen z. B. in der Tschechoslowakei für den Ganzkörper bei 0,25 Sv (25 rem) und für die Schilddrüse bei 0,75 Sv (Kinder) bzw. 1,5 Sv (Erwachsene) /5/. Weiterhin kann auch ein Auslegungsstörfall zum Kernschmelzen und zu katastrophalen radioaktiven Freisetzungen führen, da die sehr komplexen Sicherheitssysteme nicht hundertprozentig zuverlässig sind und ganz oder teilweise ausfallen können.

Dennoch kann der für eine Anlage geforderte maximale Auslegungsstörfall mit Einschränkungen als ein Indikator für die Gefährlichkeit einer Anlage angesehen werden: Je weniger schwerwiegend er ist, d. h. je größer das Spektrum an Störfällen ist, für die laut behördlicher Vorschrift keine Vorkehrungen getroffen werden müssen, desto größer ist in der Tendenz bei sonst gleichartigen Anlagen die Gefährdung.

Die drei kleineren WWER-Prototypen (WWER-70, -210 und -365), sowie die erste Generation der WWER-440, sind lediglich gegen den Bruch einer kleinen Anschlußleitung im Primärkreislauf (maximaler Durchmesser 100 mm) ausgelegt.

Erst bei der zweiten Generation der WWER-440 müssen die Sicherheitssysteme so ausgelegt sein, daß der vollständige, momentane Abriß einer Hauptkühlmittelleitung (Durchmesser 500 mm) mit dem damit verbundenen sehr viel rascheren Ausströmen von Dampf und Wasser, und rascheren Druckaufbau in den Zellen, beherrscht werden kann. Dieser sogenannten "2F-Bruch" ist auch Auslegungsstörfall beim WWER-1000 sowie bei den meisten Druckwasserreaktoren in westlichen Ländern. (In der BRD ist aber der älteste Druckwasserreaktor in Obrigheim - Betriebsbeginn 1968/69 - auch nicht gegen einen 2F-Bruch ausgelegt /14/.)

Es ist nicht in allen Fällen mit letzter Sicherheit feststellbar, welche WWER-440 der ersten und welche der zweiten Generation zuzuordnen sind. Zwar wurde bereits 1973 in der Sowjetunion die Vorschrift erlassen, Reaktoren seien gegen 2F-Bruch auszulegen /15/. Weiterhin wird aber angegeben, daß erst Reaktoren mit Betriebsbeginn 1978/79 und später der zweiten Generation angehören /16, 17/. An anderer Stelle wird die Anlage in Rovno (Betriebsbeginn 1980/81) als Beispiel für die zweite Generation angeführt /11/. In einer 1979 in der DDR erschienenen Arbeit wird für Druckwasserreaktoren mit Leistung unter 500 MWe noch vom Abriß einer Anschlußleitung mit Maximaldurchmesser 100 mm als größter Auslegungsstörfall ausgegangen /18/. Die genaueste Aussage befindet sich in einer sowjetischen Arbeit aus dem Jahr 1977, nach der in der Sowjetunion die WWER-440 bis zum Block Kola-2, sowie in anderen RGW-Staaten insg. 5 WWER-Blöcke der ersten Generation angehören sollen /16/. Bei diesen 5 Blöcken kann es sich nur um Kozloduy-1 und -2, Rheinsberg und Bruno Leuschner-1 und -2 handeln. Fest steht weiterhin, daß Bohunice-1 und -2 nicht gegen 2F-Bruch ausgelegt sind /19/, dagegen die finnischen Anlagen Loviisa-1 und -2 schon /20/. Tabelle 3 zeigt das Gesamtbild, das sich aus den verschiedenen Hinweisen für

Tabelle 3: Zuordnung der in Betrieb befindlichen
WWER-Reaktoren mit Leistung kleiner als
500 MWe zur ersten und zweiten Generation.

Land	1. Generation keine Auslegung gegen 2F-Bruch	2. Generation Auslegung gegen 2F-Bruch erforderlich
Bulgarien	Kozloduy-1 -2	Kozloduy-3 -4
CSSR	Bohunice-1 -2	Bohunice-3 -4 Dukovany-1 -2 -3
DDR	Rheinsberg Bruno Leuschner-1 -2 -3 (?) -4 (?)	-
Finnland	-	Loviisa-1 -2
UdSSR	Kola-1 -2 Nowo-Woronesh-1 -2 -3 -4	Kola-3 -4 Oktemberyan-1 (?) -2 (?) Rovno-1 -2
Ungarn	-	Paks-1 -2 -3
Summe	15 Reaktoren	18 Reaktoren

die in Betrieb befindlichen WWER-400 (sowie -70, -210 und -365) ergibt. Bei den noch in Bau befindlichen, bzw. geplanten Anlagen kann davon ausgegangen werden, daß sie sämtlich der zweiten Generation zuzurechnen sind.

Diese Unterscheidung nach dem maximalen Auslegungsstörfall ist wichtig, da sie Hinweise auf das relativ höhere oder etwas niedrigere Gefährdungspotential der einzelnen Reaktoren gibt. Keineswegs bedeutet aber eine Auslegung gegen 2F-Bruch ein akzeptables Maß an Sicherheit. Abgesehen davon, daß auch Auslegungsstörfälle nicht mit absoluter Zuverlässigkeit beherrscht werden können, und jedenfalls Strahlenbelastungen bis zu den Grenzwerten verursachen dürfen (s. oben), ist der 2F-Bruch nicht der schlimmstmögliche Fall des Versagens der Integrität des Primärkreises. Erheblich schlimmer ist das Bersten des Reaktordruckbehälters, dessen Wahrscheinlichkeit umstritten ist, das aber jedenfalls nicht ausgeschlossen werden kann. Kein Reaktor in Ost oder West hat Sicherheitssysteme, die diesen Fall beherrschen sollten und könnten; solche wären auch, wenn überhaupt, nur mit außergewöhnlich großem Aufwand zu verwirklichen.

Abgesehen davon weisen auch bei WWER-440 Reaktoren der zweiten Generation die Sicherheitssysteme schwerwiegende Schwachstellen auf, wie in der Folge gezeigt wird.

3.2. Beschreibung der Sicherheitssysteme:

Die wichtigsten Systeme zur Beherrschung eines schweren Kühlmittelverlustunfalles sind

- Notkühlsystem
- Druckabbausystem
- ein System druckfester Zellen bzw. eine Sicherheitshülle.

Aufgabe des Notkühlsystems ist es, den Reaktordruckbehälter wieder aufzufüllen und die Nachzerfallswärme des Ker-

nes abzuführen. Das Druckabbausystem soll den sich durch aus dem Primärkreislauf ausströmenden Dampf aufbauenden Druck in den Räumen um das Leck senken, um ein Überdruckversagen dieser Räume zu verhindern. (Sprinkler-Systeme haben gleichzeitig die Aufgabe, Radionuklide aus der Gebäudeatmosphäre auszuwaschen.)

Nicht alle Druckwasserreaktoren haben ein solches System, z. B. fehlt es bei KWU-Druckwasserreaktoren. Schließlich sind die den Primärkreislauf umgebenden Räume gegen einen gewissen Überdruck ausgelegt, der bei einem Kühlmittelverluststörfall trotz Druckabbausystem auftritt. Beim WWER-440 handelt es sich dabei um ein System druckfester Zellen; beim WWER-1000 sowie bei westlichen Druckwasserreaktoren um eine Sicherheitshülle (Containment), die den gesamten Primärkreislauf umgibt und als ganzes gegen Überdruck ausgelegt ist.

Abb. 2 zeigt schematisch Notkühl- und Druckabbausysteme von WWER-440 der ersten und zweiten Generation, sowie zum Vergleich auch des WWER-1000.

Die Sicherheitssysteme eines WWER-440 der ersten Generation müssen als rudimentär bezeichnet werden. Es ist nur ein einziges System zur Einspeisung von Notkühlwasser in den Primärkreislauf vorhanden, nicht drei verschiedene (mit hohem, mittlerem und niedrigem Einspeisedruck) wie bei allen neueren Druckwasserreaktoren in Ost und West. Die Einspeisung kann offenbar nur kaltseitig in die Stränge des Primärsystems erfolgen. Das Notkühlsystem verfügt über zwei unabhängige Stränge mit je 3 Pumpen mit je 50 m³/h Durchsatz (eine in Betrieb, eine in Reserve, eine in Reparatur - somit 6 x 50% Redundanz), die Sprinkleranlage über drei Pumpen mit 400 m³/h Leistung (3 x 50% Redundanz), in deren Druckleitung zwei Wärmetauscher einge-

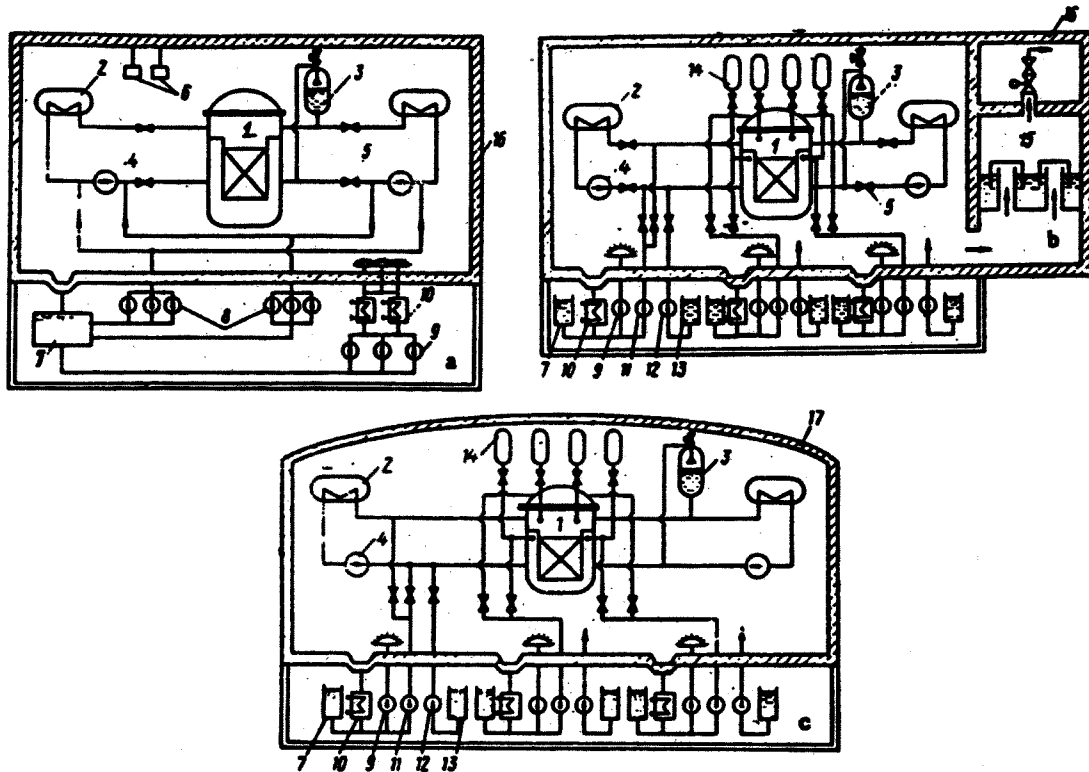


Abbildung 2: Schematisches Diagramm von Notkühl- und Druckabbausystem bei (a) WWER-440 erster Generation; (b) WWER-440 zweiter Generation; (c) WWER-1000 /16/.

1: Reaktor; 2: Dampferzeuger; 3: Druckhalter; 4: Hauptumwälzpumpen; 5: Hauptabsperrventil; 6: Druckabbau-Ventile; 7: Behälter mit boriertem Wasser; 8: Hochdruck-Notkühlumpen; 9: Sprinkler-Pumpen; 10 Kühler; 11: Niederdruck-Notkühlumpen; 12: Hochdruck-Borwassereinspeisepumpen; 13: Reservetanks für konzentrierte Borsäurelösung; 14: Druckspeicher; 15: Kondensationskammer (Barbotage-System); 16: luftdichte Zellen; 17: Hülle.

baut sind. Notkühl- und Sprinklersystem verfügen gemeinsam nur über einen Behälter mit boriiertem Wasser (Fassungsvermögen 800 m³). Ansaugen aus dem Sumpf der Reaktorzelle ist möglich.

Die Zellen, die die Komponenten des Primärkreislaufes einschließen, sind für einen Maximaldruck von etwa 0,2 MPa (2 bar) ausgelegt. Wächst der Druck zu stark an, wird einfach durch Druckentlastungsventile an die Umgebung abgelassen /21/.

Notkühl- und Druckabbausystem eines WWER-440 der zweiten Generation sind erheblich komplexer aufgebaut. Das Notkühlsystem besteht aus drei Teilsystemen. Die Hochdruckeinspeisepumpen treten bei Druckabfall nach Leckage bereits bei einem hohen Druck im Primärkreis (rd. 11 MPa) in Aktion (3 Pumpen mit je rd. 65 m³/h Förderleistung, Redundanz 3 x 50% - d. h. Möglichkeit eines Einzelfehlers, aber ohne Reparaturfall). Jede Pumpe verfügt über einen eigenen Wasserbehälter. Umschaltung auf Sumpfbetrieb ist nicht möglich (im Gegensatz z. B. zu modernen KWU-Druckwasserreaktoren, aber nicht allen westlichen Anlagen - das KKW Stade in der BRD z. B. teilt diese Schwachstelle mit den WWER-440 /13/). Sie können offenbar nur kaltseitig in die Stränge des Primärkreises einspeisen - dies bedeutet erhöhte Gefahr des Berstens des Reaktordruckbehälters, da dabei im Gegensatz zur heißseitigen Einspeisung kaltes Notkühlwasser direkt mit der Behälterwand in Kontakt kommt.

Bei Drücken von 4 bis 6 MPa treten die Druckspeicher (passive Systeme) in Aktion, die direkt in den Reaktordruckbehälter einspeisen (nicht in die Hauptkühlmittelleitungen wie bei westlichen Reaktoren) Es sind 4 Druckspeicher mit je 50 m³ Wasser vorhanden (4 x 50% Redundanz). Bei niedri-

gen Drücken wird das Niederdruckeinspeisesystem eingesetzt. Es verfügt über drei Pumpen, von denen zwei in die Druckspeicher-Einspeiseleitungen speisen; die dritte wahlweise kalt- oder heißseitig in einen der Primärstränge. Jede Pumpe fördert aus einem Tank, der auch jeweils mit einer Sprinklerpumpe verbunden ist. Sumpfansaugung ist möglich. Die Redundanz beträgt wahrscheinlich 3 x 50%; für die neueren tschechoslowakischen Anlagen wird eine Redundanz von 3 x 100% angedeutet.

Das Sprinklersystem verfügt über drei Pumpen und drei Leitungen und kann ebenfalls auf Sumpfansaugung geschaltet werden. Auch hier wird für die neueren tschechoslowakischen Anlagen eine Redundanz von 3 x 100% festgestellt. Diese Sprinkler treten mit einer Verzögerungszeit von zwei Minuten nach dem Zeitpunkt in Aktion, zu dem der Druck in der Zelle über 0,11 MPa (1,1 bar) gestiegen ist /22/. Eine andere Quelle gibt eine Verzögerungszeit von einer Minute an /23/.

Weiterhin sollen die modernen WWER-440-Anlagen ein passives Sprinklersystem besitzen, das innerhalb der ersten Sekunde eines größeren Kühlmittelverluststörfalles anspringt. Es wird aus zwei hochgelegenen Tanks mit insg. 200 m³ Wasservorrat gespeist. Die Auslösung soll durch den Druckanstieg an der Wasseroberfläche der Tanks geschehen, wodurch Wasser in eine Falleitung gepreßt wird. Am unteren Ende dieser Leitung befindet sich der Kollektor mit den Sprinkler-Düsen. Diese sollen den Druckaufbau im Kollektor derart verlangsamen, daß die Auslösung des Sprinklers nicht durch Gegendruck verhindert wird. Bei zu langsamen Druckaufbau in der oberen Zelle, in der sich die Tanks befinden, kommt es nicht zur Auslösung.

Wichtig für den Druckabbau in den Zellen ist ein System

von Kondensationskammern, durch die der bei Kühlmittelverlust freiwerdende Dampf geleitet wird (Barbotage-System). Dieses System besteht aus zwölf Böden, von denen die Hälfte zum Beherrschen eines Auslegungsstörfalles ausreichen soll. Jeweils drei sind übereinander angeordnet. Jeder Boden enthält 153 Durchblase-Einheiten, durch die bei Druckanstieg die Dampf-Luft-Mischung aus den den Primärkreis umgebenden Zellen durchgedrückt wird. Der Dampf kondensiert durch die Abkühlung, und der nicht kondensierte Teil geht in einen großen Raum über dem Reaktor über. Abb. 3 zeigt ein Schema des Sicherheitseinschlusses und der Druckabbausysteme bei WWER-440 der zweiten Generation.

Das Volumen des oberen Teiles des Sicherheitseinschlusses (V_7 in Abb. 3) beträgt 43.000 m^3 , das Gesamtvolumen der anderen Zellen rd. 19.000 m^3 . Damit ist das Verhältnis von Containmentvolumen zu Nachzerfallswärme etwa um den Faktor 2,4 günstiger als z. B. bei modernen **KWU**-Druckwasserreaktoren. Diese relativ günstige Situation wird aber durch die sehr geringe Druckfestigkeit des Sicherheitseinschlusses mehr als ausgeglichen. Über den Druck, den die den Primärkreis enthaltenden Zellen standhalten können, sind in der Literatur verschiedene Angaben veröffentlicht; sie reichen von 0,15 MPa /24/ bis rd. 0,25 MPa /11/. Da veröffentlichte Ergebnisse von Berechnungen der Druckverläufe in den Zellen nach dem größten Auslegungsstörfall Drücke von bis zu knapp über 0,2 MPa zeigen (Abb. 4), ist wohl davon auszugehen, daß die Druckfestigkeit der Zellen bei 0,2 bis 0,25 MPa (2 bis 2,5 bar) liegt. Angaben über den Auslegungsdruck des großen Raumes über dem Reaktor sind in der veröffentlichten Literatur nicht enthalten. Mit hoher Wahrscheinlichkeit liegt er aber nicht über 0,15 MPa.

Ein völlig unterschiedliches Druckabbausystem haben die beiden Blöcke in Loviisa (Finnland). Bei diesen handelt

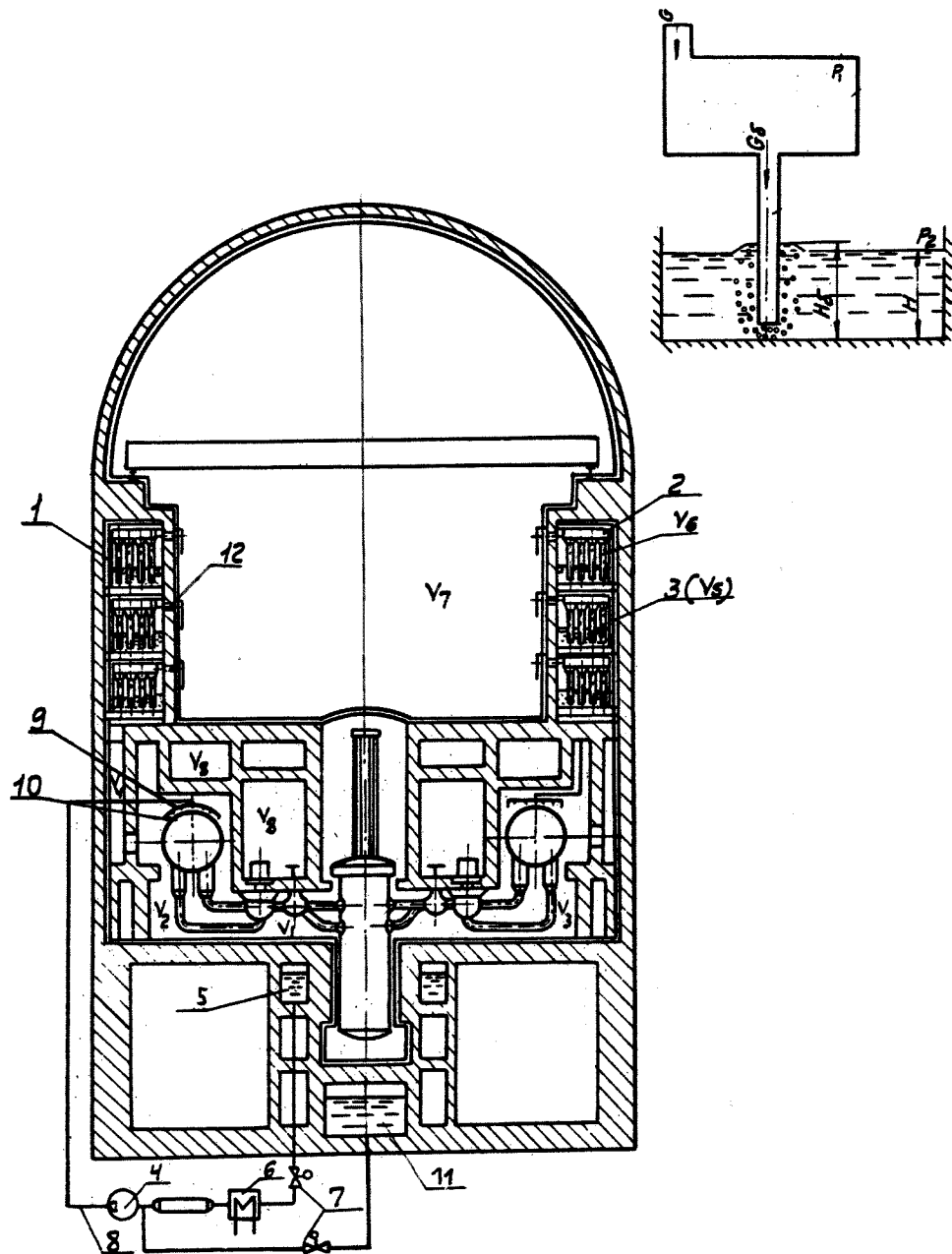


Abbildung 3: Schema von Sicherheitseinschluß und Druckabbausystemen eines WWER-440 zweiter Generation. Kleines Bild: Prinzip des Barbotage-Systems /23/.

1: Barbotage-System; 2: Sammler für zuströmenden Dampf; 3: Leitung für Dampf; 4: Sprinkler-Pumpe; 5: Gebäude-Sumpf; 6: Kühler; 7: Absperrventile; 8: Sprinkler-Leitung; 9: Sprinkler-Anlage; 10: Dampferzeuger; 11: Behälter mit boriiertem Wasser; 12: Ausströmkanal aus Barbotage-System.

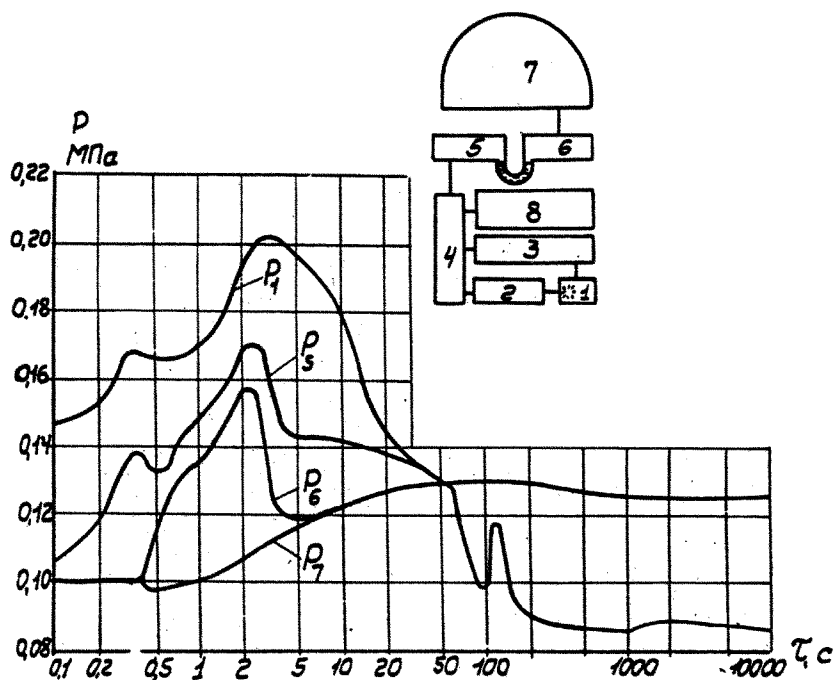


Abbildung 4: Druckverlauf in verschiedenen Zellen und Räumen nach dem maximalen Auslegungsstörfall. Vgl. Abb. 3 zur Lage der einzelnen Volumina; zwischen V₅ und V₆ liegt das Barbotage-System, V₇ ist der große Raum über dem Reaktor /23/.

Druckeinheit: MPa; Zeiteinheit: Sekunden.

es sich vermutlich um Reaktoren der ersten Generation, die von der US-Firma Westinghouse sicherheitstechnisch "nachgerüstet" wurden. Sie verfügen weder über Sprinkler- noch über Barbotagesysteme wie oben beschrieben. Sie haben vielmehr ein sogen. Eis-Kondensor-Containment, bei dem der Dampf durch Eisblöcke, die rund um die Wand der Sicherheitshülle angeordnet sind, abgekühlt und kondensiert wird /20/. Eis-Kondensor-Containments haben ein ungünstiges Verhältnis von Volumen zu Nachzerfallswärmeleistung und sind nur für geringe Überdrücke ausgelegt (rd. 0,18 MPa /25/).

Nicht zwingend vorgesehen ist ein Schutz der Reaktoren gegen Flugzeugabsturz, Erdbeben und andere Einwirkungen von außen. Sicherheit in dieser Hinsicht soll vor allem durch geeignete Standortwahl gewährleistet werden, die solche Einflüsse ausschließen soll /15/. Soweit bekannt, ist von den WWER-440-Anlagen nur das Kraftwerk Oktembryan in der Sowjetunion gegen Erdbeben ausgelegt /7/; z. T. wurden bei schon errichteten Anlagen nachträglich Gegenmaßnahmen durchgeführt.

3.3. Diskussion der Schwachstellen von WWER-440:

Die Hauptschwäche aller WWER-440 ist der Sicherheitseinschluß des Primärkreises. Dessen Druckfestigkeit ist gering; selbst bei Auslegungsstörfällen ist das Funktionieren komplexer Druckabbausysteme erforderlich, um ein Versagen zu verhindern. Diese Schwäche weisen übrigens auch sämtliche westlichen Siedewasserreaktoren, sowie sowjetische RBMK-Reaktoren auf. Sie gilt auch für das Eis-Kondensor-Containment, mit dem neben den WWER-440 in Loviisa auch einige Druckwasserreaktoren in USA und Japan ausgestattet sind.

Störungen im Druckabbausystem können zu frühzeitigem Überdruck-Versagen des Sicherheitseinschlusses führen. Dies wiederum bedeutet besonders hohe Freisetzen bei Kernschmelzunfällen. Bei längerem Standhalten der Sicherheits-hülle schlagen sich die aus dem Kernbrennstoff freigesetzten radioaktiven Stoffe teilweise im Inneren des Gebäudes nieder; die Freisetzen sind dann bei späterem Versagen immer noch sehr schwerwiegend, aber jedenfalls relativ geringer. Offenbar sind auch bei voll funktionierenden Druckabbausystemen die Sicherheitsreserven bei Auslegungsstörfällen gering; die Zellen werden bis fast zur Versa-

gungsgrenze beansprucht. Besonders groß ist die Gefahr natürlich bei den Reaktoren der ersten Generation, die nicht gegen 2F-Bruch ausgelegt sind.

Reaktoren der ersten Generation sind darüber hinaus grundsätzlich durch erhöhtes Kernschmelzrisiko gekennzeichnet, da ein Notkühlsystem nur ansatzweise vorhanden ist. Auch bei Reaktoren der zweiten Generation ist die geringe Redundanz zumindest des Hochdruckteils des Notkühlsystems, sowie die starke Vermaschung seines Niederdruckteils mit dem Sprinkler-System problematisch.

Bei allen Reaktoren mit Hauptkühlmittelpumpen mit geringer Schwungmasse (dazu zählen auch einige der zweiten Generation) besteht weiterhin z. B. bei völligem Stromausfall die Gefahr des raschen Aufheizens des Kerns in der Anfangsphase eines Unfalls.

Moderne Druckwasserreaktoren in Ost und West besitzen meist ein Volldruck-Containment, das ohne Maßnahmen zum Druckabbau einem Auslegungsstörfall standhalten, und auch bei Kernschmelzen erst nach vielen Stunden oder einigen Tagen versagen soll. Z. T. ist bei westlichen Druckwasserreaktoren auch eine höhere Redundanz des Notkühlsystems gegeben. Die Darstellung der besonderen Schwachstellen des WWER-440 soll aber nicht so mißverstanden werden, daß die anderen Reaktortypen ausreichend sicher seien. Katastrophale Unfälle mit Kernschmelzen und großen radioaktiven Freisetzungen sind bei allen Druckwasserreaktoren (wie auch bei allen anderen heute eingesetzten Kraftwerksreaktoren) möglich. Wie schon erwähnt, sind keine Sicherheits-hülle und kein Notkühlsystem gegen das Bersten des Reaktordruckbehälters ausgelegt. Auch Dampfexplosionen können trotz Volldruck-Containment zu einem frühzeitigen Versagen führen. Und auch hochredundante Notkühlsysteme können schon

bei Auslegungsstörfällen z. B. durch sogen. Common Mode Fehler (abhängiges Versagen mehrerer Komponenten) ausfallen, wie etwa durch Konstruktions- und Auslegungsfehler gleicher Bauteile in verschiedenen Redundanzen, Fehlkalibrierung gleichartiger Meßinstrumente, gleichartige Fehlstellung von Ventilen in verschiedenen Strängen nach Wartungsarbeiten u. a.. Die Unterschiede der verschiedenen Druckwasserreaktor-Baulinien sind also letztlich nur graduell, wenn auch gerade die Gefahr des frühzeitigen Versagens des Sicherheitseinschlusses beim WWER-440 besonders ausgeprägt ist.

4. Störfälle in WWER-440 Reaktoren: Eine Auswertung geheimer Störfallberichte der IAEA und OECD/NEA:

Die Störfallberichte, auf denen dieser Abschnitt beruht, wurden den Autoren freundlicherweise vom Nachrichten-Magazin DER SPIEGEL zur Verfügung gestellt.

Informationen über Störfälle zu erhalten, die sich in Kernkraftwerken der RGW-Staaten ereignet haben, ist so gut wie unmöglich, da Berichte darüber in der Regel nicht öffentlich bekannt gemacht werden.

Die Autoren hatten jedoch die Möglichkeit, Einblick in Störfallberichte der Incident Reporting Systems der IAEA (International Atomic Energy Agency) und der OECD/NEA (Kernenergieagentur der OECD) zu erhalten. Das Incident Reporting System der IAEA (IAEA-IRS) arbeitet seit 1983. Ausgangspunkt war der Unfall in Three Mile Island in den USA 1979, der es für die Mitgliedsstaaten der IAEA sinnvoll erscheinen ließ, ein Berichtswesen über sicherheitsrelevante Störfälle in kerntechnischen Anlagen zu entwickeln und darüber einen Erfahrungsaustausch mit anderen

Ländern zu organisieren. Ebenfalls daran beteiligt sind Länder, die über die Atomenergiebehörde der Organisation für ökonomische Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD/NEA) vertreten werden. Es bleibt den Ländern selbst überlassen, was sie an sicherheitsrelevanten Informationen der IAEA übermitteln wollen. Nur die beteiligten Länder erhalten die Berichte des IAEA-IRS, für die allgemeine Öffentlichkeit sind sie nicht zugänglich. Mittlerweile beteiligen sich 15 von 26 Mitgliedsstaaten mit Atomenergieanlagen an dem Incident Reporting System, 7 weitere über OECD/NEA und zwei beteiligen sich lediglich an Treffen der IAEA/IRS. 247 Störfallberichte sind in diesem Rahmen bisher erstellt worden /26, 27/. Das OECD/NEA-IRS besteht seit 1980.

15 von den den Autoren zugänglichen Störfallberichten betreffen Reaktoren vom TYP WWER-440, über die an dieser Stelle ein Überblick gegeben wird. Nach den Recherchen der Autoren sind sie in anderer Form bisher noch nicht veröffentlicht worden. Zunächst sollen diese Störfälle im einzelnen kurz geschildert werden.

(1) Kozloduy, Einheit 1 + 2, 04.03.1977

Im März 77 ereignete sich ein Erdbeben mit dem Epicentrum in den Bergen von Vranča. Kozloduy war davon betroffen, mit einer Stärke von 5-6 nach der Skala von Medvedev-Schponchoyer-Karnic (MSK). Es wurden keine Gebäude und Anlagen zerstört.

In der Zeit, als die Anlage Kozloduy-1 geplant wurde (Ende 1960) wurde an die Erdbebensicherheit der gleiche Maßstab angelegt, der für gewöhnliche Industrieanlagen galt. Gebiete, die von Erdbeben bis zu einer Stärke von 6 nach MSK betroffen sein konnten, galten als erdbebensicher. Für die Gegend von Kozloduy wurden Beben bis zur Stärke von 4-5

angenommen. Nach den Erfahrungen vom März 77 wurde die Anlage einer eingehenden Prüfung unterzogen und Umbaumaßnahmen entwickelt, die für alle vier Einheiten bis Ende 86 abgeschlossen sein sollen.

(2) Kozloduy, Einheit 3, 30.06.1982

Die Hauptkühlmittelpumpe Nr. 1 von Strang 1 des Primärkreislaufes sollte repariert werden. Dazu sollte die Pumpe isoliert werden, indem die beiden Absperrventile 1 MPCIV-1 und 1 MPCIV-2 geschlossen werden sollten. Das Schließen dieser Ventile erfolgt in dieser Anlage durch eine Dichtungswasserpumpe, die in Betrieb gesetzt wurde. Ca. 2 Stunden danach sank der Wasserstand des Kühlmittels in dem Druckhalter rapide und der Druck im Primärkreislauf fiel sehr schnell ab. Ein Kontrollsignal zeigte an, daß Wasser in die Zelle der Dampferzeuger gelangt war. Durch das Betriebspersonal wurde nach einer weiteren Stunde ein Kühlmittelleck in der Zelle des Dampferzeugers entdeckt. Wegen der Hitze und der Strahlung in der Zelle konnte die genaue Ursache für dieses Leck nicht ermittelt werden. Inzwischen war es bereits zu einer Reaktorschnellabschaltung gekommen. Erst 13 Stunden nach Eintritt des Störfalls konnte die eigentliche Ursache für den Kühlmittelverlust erkannt werden. Ein Rohr der Dichtungswasserlinie war gebrochen, und das Kühlwasser trat durch diese Öffnung aus.

(3) Kozloduy, Einheit 2, 21.02.1983

Die Druckregulierung über die Druckhalter wird in der Anlage Kozloduy u. a. über mehrere Ventile gesteuert. Zwei dieser Ventile, das Kontrollventil 2KO-7 und das Hauptsicherheitsventil Nr. 2, öffneten sich spontan. Darauf sank der Druck im Primärsystem schnell ab, und das Schutzsystem löste eine langsame Reaktorabschaltung aus.

Der Operator versuchte, das Kontrollventil per Hand zu schließen, was ihm aber nicht gelang. Nach weiterem Druckabfall wurde das Notkühlsystem zur Hochdruckeinspeisung aktiviert und der Reaktor abgeschaltet. Das Abblasen aus dem Druckhalter konnte durch Schließen eines dritten Ventils (2KO-7a) gestoppt werden.

Als Ursache für diesen Störfall erwies sich ein Bruch in der Isolierung des stromführenden Kabels des Kontrollsystems. Dadurch war es zu einer doppelten Erdung gekommen. Durch das Öffnen des Kontrollventils wurde das Öffnen des Hauptsicherheitsventils ausgelöst.

Dieser Störfall ist wahrscheinlich der potentiell gefährlichste der hier dargestellten. Er weist gewisse Ähnlichkeiten mit der Anfangsphase des Unfalles in Three Mile Island, Block 2, 1979, auf: Dort wurden Ablauf und Schadensausmaß durch das Offenbleiben eines Druckhalter-Abblaseventils wesentlich bestimmt. (Auslösendes Moment war in Three Mile Island allerdings der Ausfall der sekundärseitigen Speisewasserpumpen.) Weiterhin gehört der betroffene Block in Kozloduy mit hoher Wahrscheinlichkeit zu jenen Anlagen, deren Schweißnähte wegen Verunreinigungen besonders sprödbuchanfällig sind. 8 Betriebsjahre bis zum Zeitpunkt des Störfalles bedeuten bereits nennenswerte Neutronenversprödung. Die Einspeisung von kaltem Notkühlwasser, das die Wand des Reaktordruckbehälters berührt, bewirkt akute Berstgefahr durch "Thermoschock".

(4) Bohunice, Einheit 1 + 2, 05.01.1984 - 01.05.1984

In Bohunice, Einheit 1 und 2, gab es häufiger Probleme mit den Beschlägen an den Kopfstücken der Eintrittssammler in den Dampferzeugern, wodurch es zu Leckagen kam. Ende 1983 wurden in Einheit 1 alle Beschläge ersetzt, trotzdem traten weitere Lecks auf.

(5) Kozloduy, Einheit 4, 17.02.1984

Durch menschliches Versagen wurde die Speisewasserpumpe (sprinkler pump) zum Homogenisieren des borierten Speisewassers bei geöffnetem Ventil betätigt. 40 m³ boriertes Wasser gelangten dadurch irrtümlicherweise durch die Öffnungen der Sprinkler-Anlage in die Dampferzeugerzellen.

(6) Bohunice, Einheit 2, 12.05.1984

Die Reaktorleistung wurde durch das Reaktorkontrollsystem in unkontrollierter Weise von 80% auf 102% angehoben. Von diesem Wert war die Reaktorleistung gerade vorher manuell herabgefahren worden. Ursache des Störfalls war in einem Bedienungsfehler zu suchen, da das Kontrollsystem in nicht angemessener Weise von Hand- auf Automatikbetrieb umgestellt wurde.

(7) Bruno Leuschner, Einheit 2, 13.08.1984

Im Mannloch des Druckhalters trat ein Leck auf. In dem abgeschlossenen Sektor stieg die Gasaktivität bis zu 110 Bq/l. Ursache des Lecks waren unkorrekt ausgeführte Wartungsarbeiten an Dichtungen des Druckhalters.

(8) Bohunice, Einheit 3, 29.08.1984

Im Anfahrbetrieb wurde entdeckt, daß der Wasserstand in einem Dampferzeuger langsam anstieg, obwohl das Speisewasserventil geschlossen war. Die Ursache bestand nicht, wie zunächst angenommen, in einem Bruch eines Dampferzeugerheizrohres, sondern in einem falschen Sitz des Endschalters des Speisewasserventils.

(9) Paks, Einheit 1 + 2, 07.10.1984

Ein Fehler im elektrischen Verbundnetz führte dazu, daß der südliche Teil des ungarischen Stromnetzes isoliert wurde. Da 500 - 600 MW mehr erzeugt als verbraucht wurden, kam es zu einem raschen Anstieg der Netzfrequenz bis auf 52,3 Hz. Die Situation wurde vom Bedienungspersonal falsch interpretiert und in beiden Einheiten die Leistung der Turbinen bzw. des Reaktors per Hand geregelt. Dadurch kam es schließlich zu einer Reaktorabschaltung und damit ebenfalls zu einer Unterbrechung der externen Stromversorgung.

(10) Bohunice, Einheit 2, 15.10.1984

Der Störfall am 15.10.84 war der zweite Fall des vollständigen Ausfalles der externen Stromversorgung der Anlage Bohunice. Während beim ersten mal im Jahr 1983 die Anlage mit voller Leistung gefahren wurde, war in diesem Fall der Reaktor abgeschaltet und abgekühlt für den Brennelementwechsel. Die Stromversorgung konnte durch Dieselgeneratoren übernommen werden, obwohl einer wegen Wartungsarbeiten nicht einsatzbereit war. Die Trennung der Anlage vom Netz erfolgte durch die irrtümliche Auslösung des Schutzsystems der 6KV-Sammelschiene gegen Funkenüberschlag.

(11) Bruno Leuschner, Einheit 2, 18.10.1984

Eine Nickeldichtung am Flansch der Mündung des Überwachungskanals, der die Auslaßtemperatur des Kühlmittels registriert, war undicht. Dies führte zu einer Leckage von Kühlwasser des Primärkreislaufs, wodurch die Wasser- und Gasaktivität in der Sicherheitshülle anstieg (185 Bq/l).

(12) Loviisa, Einheit 1 + 2, Oktober 1984

Im KKW Loviisa wurden Maßnahmen ergriffen, um die Anlage feuersicher auszulegen. Anlaß für die Umbauten war ein Feuer in der Transformator-Anlage von Kangasala. Die Feuergefährdung für Loviisa wurde darin gesehen, daß sich das Dieselgebäude in unmittelbarer Nähe des Haupttransformators befand.

(13) KKW Rheinsberg (WWE-70), 18.02.1985

Das KKW Rheinsberg wurde mit einem Brennelement für Meßzwecke ausgestattet. Zur Druckübertragung waren Meßinstrumente angebracht, die direkten Kontakt zum Primärkühlmittel hatten. Während dieses Meßsystem in Betrieb war, kam es zu einer Leckage von Primärkühlmittel.

(14) Paks, Einheit 1, 29.03.1985

Während eines periodisch wiederkehrenden Tests wurde eine Speisewasserpumpe abgeschaltet, aber das Rückhalteventil auf der Druckseite der Pumpe schloß wegen Verschleißerscheinungen nicht. Die Speisewasserpumpe in Reserveposition wurde zwar automatisch gestartet, aber bald darauf wurden alle Speisewasserpumpen wegen des niedrigen Drucks abgeschaltet. Der Wasserstand in dem Dampferzeuger erreichte den niedrigst möglichen Stand, durch den das Reaktorschutzsystem ausgelöst wurde. Die oberen Röhrenbündel in den Dampferzeugern waren eine Weile nicht mit Wasser bedeckt. Relativ kaltes Wasser wurde durch die Notspeisewasserpumpen in die Dampferzeuger gepumpt. Schließlich konnte das Personal die Speisewasserpumpen wieder starten. Derartige Verschleißerscheinungen an den Rückhalteventilen waren bereits früher aufgetreten.

(15) Bruno Leuschner, Einheit 2, 09.05.1985

Leckage in den Dampferzeugerheizrohren durch Korrosion, vor allem im Bereich der Halterungen. Die γ -Dosis in der Speisewasserpumpe des dritten Dampferzeugers stieg bis auf $5,5 \mu \text{g/h}$ ($0,55 \text{ mrad/h}$) an.

Die nachfolgende Tabelle soll einen Überblick über die beschriebenen Ereignisse liefern (Tabelle 4).

Ob die Störfälle repräsentativ sind für Reaktoren des Typs WWER-440, kann aufgrund der beliebigen Auswahl der Berichte nicht beurteilt werden. Von Betreiberseite wird - bis auf drei Fälle - angegeben, warum der Störfall für berichtenswert gehalten wird. Als Hauptangabe (in sieben der zwölf verbleibenden Berichte) wird genannt: Tatsächliche oder befürchtete Drucksenkung im Primärkreislauf. In einem Fall trat die Druckerniedrigung tatsächlich ein, in den sechs weiteren Fällen fand sie nicht statt oder es wird darüber keine Angabe gemacht, obwohl eine Druckerniedrigung durch entstandene Lecks - z. B. Störfall 15, Leckage in den Dampferzeugerheizrohren; Störfall 11, undichte Nickeldichtung - zu erwarten ist. Alle diese Ereignisse sind als potentielle Vorläufer schwerer Unfälle anzusehen.

Bei der Betrachtung des Störfallablaufes zeigt sich, daß Ventile und Dichtungen zu den notorischen Schwachstellen gehören. In vier Fällen schlossen Ventile wegen Störungen und Verschleißerscheinungen nicht dicht ab. Zweimal war davon die Anlage Kozloduy betroffen. Beide Male zogen niemals ausschließbare Verschleißerscheinungen (Rohrbruch der Dichtungswasserlinie, Zerstörung der Isolierung eines stromführenden Kabels) weitere Ereignisse nach sich, die schließlich zur Reaktorabschaltung führten.

Tabelle 4: Überblick über die 15 geheimen Störfallberichte von IAEA und OECD/NEA.

AKW	Einheit	Datum	Komponenten	Ventil	Leckagen	Freisetzung Radioaktivität	menschl. Versagen	unnötig. Abschalten v. autom. Regelmechanismen
Kozloduy	1+2	4. 3.77						
Kozloduy	3	30. 6.82	Primärkreislauf	ja	ja	ja		
Kozloduy	2	21. 2.83	Druckhalter	ja				
Bohunice	1+2	5. 1.84- 1.5.84	Dampferzeuger		ja			
Kozloduy	4	17. 2.84	Sprinklerpumpe				ja	
Bohunice	2	12. 5.84	Reaktorkontroll- system	4			ja	
Bruno Leuschner	2	13. 8.84	Druckhalter		ja	ja		
Bohunice	3	29. 8.84	Speisewasser- versorgung	ja				
Paks	1+2	7.10.84	elektr. Ssystem				ja	ja
Bohunice	2	15.10.84	elektr. Strom- versorgung					
Bruno Leuschner	2	18.10.84	Druckbehälter		ja	ja		
Loviisa	1+2	10.84	elektr. System					
Rheinsberg		18. 2.85	Brennelement		ja			
Paks	1	29. 3.85	Speisewasser- versorgung	ja				
Bruno Leuschner	2	9. 5.85	Dampferzeuger		ja			

Der Bericht betr. Loviisa stammt aus dem OECD/NEA-IRS (Nr. 579),
die anderen Berichte aus dem IAEA-IRS (Nr. 26 - Nr. 39).

.....Tabelle 4

AKW	Einheit	Datum	mangelh. durchgef. Wartung/Installation	Versagen von Sicherheitssyt.	Reaktor- abschaltung	ursprüngliche Leistung
Kozloduy	1+2	4. 3.77	ja		nein	100%
Kozloduy	3	30. 6.82			ja	75%
Kozloduy	2	21. 2.83		ja	ja	100%
Bohunice	1+2	5. 1.84- 1.5.84			ja	100% und 0%
Kozloduy	4	17. 2.84				100%
Bohunice	2	12. 5.84			nein	80%
Bruno Leuschner	2	13. 8.84	ja		ja	100%
Bohunice	3	29. 8.84	ja			1,5%
Paks	1+2	7.10.84			ja	100%/80%
Bohunice	2	15.10.84				0%
Bruno Leuschner	2	18.10.84			ja	100%
Loviisa	1+2	10.84	ja			100%
Rheinsberg		18. 2.85			nein	
Paks	1	29. 3.85				97,8%
Bruno Leuschner	2	9. 5.85			ja	90%

Der Störfall am 30.06.1982 betraf ein Ventil, das es in westlichen Anlagen und ebenfalls im WWER-1000 nicht gibt - nämlich ein Absperrventil der Hauptkühlmittelleitung zwischen Druckbehälter und Hauptkühlmittelpumpe. Dieser Fall belegt, daß die allgemeine Anfälligkeit von Ventilen zu Unfällen führen kann, die vermeidbar sind durch den Verzicht des Einbaus derartiger Ventile, auch wenn damit eventuell andere Nachteile verbunden sind. Dabei muß auch bedacht werden, daß eine Rohrabdichtung durch Ventile bei größerem Rohrdurchmesser schwieriger wird. Schließlich weist der beschriebene Störfall darauf hin, daß die Abdichtung nicht wegen eines Lecks im Primärkreislauf erfolgte, sondern um Wartungsarbeiten vornehmen zu können, ohne die Anlage abschalten zu müssen. Das deutet darauf hin, daß diese Absperrventile primär betriebliche und nicht Sicherheitsfunktionen erfüllen sollen.

Weiterhin wurde in diesem Fall radioaktives Kühlmittel frei, unverständlicherweise wurde die radioaktive Belastung nicht angegeben. Durch die Hitze und Strahlenbelastung konnte die Ursache erst sehr spät entdeckt werden.

Mit welcher Verharmlosung ein derartiger Störfall in den offiziellen Verlautbarungen behandelt wird, mag folgende Erklärung belegen: In der atomwirtschaft /28/ heißt es über den Betrieb von Kozloduy im Jahre 82: "Die gesamte Nichtverfügbarkeit von 1012 h/a im Jahre 82 geht auf geplante Stillstände zurück." Dabei trat gerade in diesem Jahr einer der schwersten aller hier beschriebenen Störfälle ein.

In sechs Fällen traten Leckagen auf, bei mindestens drei davon trat radioaktiv belastetes Primärkühlmittel aus. Bei einem dieser drei Fälle wird keine Angabe geliefert, wie hoch die Freisetzung war.

Außerdem fehlen Angaben über Aktivitätswerte außerhalb des Gebäudes, dabei muß ein Ansteigen der Aktivität außerhalb bei Freisetzung von radioaktiven Stoffen innerhalb des Gebäudes sicher erwartet werden, da Freisetzungen über die Lüftungssysteme unvermeidlich sind.

Ob Freisetzungen von radioaktiv belastetem Primärkühlmittel bei den anderen Leckagen ebenfalls eintraten, kann wegen mangelnder Angaben nicht beurteilt werden. Zumindest muß dies für Bohunice 1 + 2, 05.01.84 - 01.05.85 und AKW Rheinsberg 18.02.85 angenommen werden, auch wenn behauptet wird, es wäre keine radioaktive Belastung erfolgt.

Daß menschliches Versagen als Störfallursache immer wieder auftritt, belegen schließlich drei Fälle.

Literatur zu Teil I:

- 1 IAEA-Bulletin 29, Nr. 3, Herbst 1986.
- 2 atomwirtschaft/atomtechnik XXXII, Nr. 3, März 1987.
- 3 Nuclear Power Reactors in the World, IAEA, Reference Data Series No. 2, Wien, April 1986.
- 4 P. Wensierski; Ökologische Probleme und Kritik an der Industriegesellschaft in der DDR heute, Forschungsbericht: 1984-1986.
- 5 Z. Kriz; Site Selection with a view to Emergency Preparedness and Population Distribution, IAEA Safety Codes and Guides (NVSS) in the Light of Current Safety Issues, IAEA, Wien 1985, S. 327-339.
- 6 atomwirtschaft/atomtechnik XXXI, Juni 1986, bis XXXII, März 1987.
- 7 J. Scheer und H. Ziggel; Design and Operational Features, and Hazards of Soviet Reactors, International Nuclear Reactor Hazard Study, Gruppe Ökologie Hannover, 2. Auflage 1987, Teil SU.
- 8 T. Ch. Margulowa; Kernkraftwerke, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1976.
- 9 V. Krizek; Zur Problematik der Wärmeauskoppelung aus Kernkraftwerken mit Reaktoren des Typs WWER, Kernenergie 28, Nr. 11-12, 1985, S. 450-452.
- 10 O. Schumacher; Design and Operational Features, and Hazards of PWRs and BWRs in the Federal Republic of Germany, International Nuclear Reactor Hazard Study, Gruppe Ökologie Hannover, 2. Auflage 1987, Teil D.
- 11 F. Ya. Ovchinnikov et al.; Experience with the Creation, Operation, and Means of Improvement of Nuclear Power Plants with Water-Cooled-Water-Moderated Reactors (VVER), Atomnaya Energiya 54, Nr. 4, April 1983, S. 249-262.
- 12 B. Regnell; Ensuring Safe Operation at the Loviisa Nuclear Power Plant, IAEA Safety Codes and Guides (NVSS) in the Light of Current Safety Issues, IAEA, Wien 1985,, S. 519-532.
- 13 I. Albrecht et al.; Gutachten zu den Schwachstellen des Kernkraftwerks Stade, Gruppe Ökologie Hannover, 1987.
- 14 G. Bachmann et al.; Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung des Atomkraftwerke Obrigheim, Stuttgart 1986.
- 15 V. A. Sidorenko und O. M. Kovalevich; Safety Control of Atomic Energy Sources, Atomnaya Energiya 50, Nr. 2, Februar 1981, S. 93-99.

- 16 V. A. Sidorenko et al., Safety of VVER Reactors, Atomnaya Energiya 43, Nr. 6, Dezember 1977, S. 449-457.
- 17 V.A. Sidorenko et al.; Problems of VVER Reactor Safety, Nuclear Power and Its Fuel Cycle, IAEA, Wien 1977, Vol. 5, S. 247-266.
- 18 E. Adam et al.; Verhalten eines Kernkraftwerkes mit Druckwasserreaktor beim Kühlmittelverlustunfall, Kernenergie 22, Nr. 5, 1979, S. 160-164.
- 19 J. Holub; Design and technical solution of the nuclear power plant V-1 Jaslovské Bohunice, jaderná energia 27, Nr. 4, 1981, S. 122-126 (in tschechischer Sprache).
- 20 L. J. Mattila; Uncertainties in Radioactivity Release from LWR Plants under LOCA Conditions, Nuclear Power and its Fuel Cycle, IAEA, Wien 1977, Vol. 5, S. 413-423.
- 21 K. Gorski, M. Ivanor; Das Kernkraftwerk "Bruno Leuschner" Greifswald, Kernenergie 17, Nr. 7, 1974, S. 200-222.
- 22 J. Dusek, K. Dach, Probabilistic Safety Evaluation in Czechoslovakia, IAEA Safety Codes and Guides (NVSS) in the light of Current Safety Issues, IAEA, Wien 1985, S. 217-227.
- 23 A. M. Bukrinskij; A Bubbling Depressurization Containment System for Limiting the Consequences of a Nuclear Power Plant Accident within a Vacuum Containment Shell, Current Nuclear Power Plant Safety Issues, IAEA, Wien 1981, S. 315-330 (in russischer Sprache).
- 24 G. A. Shashanin et al.; State-of-the-Art and Development Prospects for Nuclear Power Stations Containing Pressurized Water Reactors (VVER), Atomnaya Energiya 56, Nr. 6, Juni 1984, S. 353-359.
- 25 G. Thompson; Design and Operational Features, and Hazards of U. S. PWRs and BWRs, International Nuclear Reactor Hazard Study, Gruppe Ökologie Hannover, 2. Auflage 1987, Teil US.
- 26 IAEA-Bulletin 28, Nr. 4, Winter 1986.
- 27 H. Hirsch; The Role of the IAEA in Reactor Safety, International Nuclear Reactor Hazard Study, Gruppe Ökologie Hannover, 2. Auflage 1987, Teil IAEA.
- 28 atomwirtschaft/atomtechnik XXIX, Nr. 10, Oktober 1984.

TEIL II: BEISPIELHAFTE DARSTELLUNG VON ABLAUF UND FOLGEN EINES SCHWEREN UNFALLES IN EINEM WWER-440 AM STANDORT DUKOVANY (CSSR)

1. Vorbemerkung zur Wahrscheinlichkeit von Unfällen:

Es ist nicht möglich vorherzubestimmen, in welchem Kernkraftwerk wann ein schwerer Unfall eintreten wird. Auch der Ablauf des Unfalles ist nicht vorhersehbar. Die Vielzahl denkbarer auslösender Ereignisse, sowie die Komplexität der dann wechselwirkenden Einzelfaktoren, führt zu sehr vielen möglichen Unfallszenarien.

Fest steht aber, daß Unfälle mit katastrophalen radioaktiven Freisetzungen eintreten können und auch weiterhin werden, wenn Kernkraftwerke weiter betrieben werden. "Tschernobyl" wird kein Einzelfall bleiben. Die Wahrscheinlichkeiten von Unfällen sind umstritten. Die offizielle "Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke" geht von einem Kernschmelzunfall in 10.000 Reaktor-Betriebsjahren aus /1/. Aufgrund zahlreicher Schwächen dieser Studie erscheint diese Zahl aber als zu optimistisch /2/, abgesehen davon, daß angesichts der Schwierigkeit, sämtliche Unfallabläufe exakt zu erfassen, jede Wahrscheinlichkeitsabschätzung mit sehr großen Fehlerbandbreiten behaftet ist /3/. Weiterhin berücksichtigt die genannte Zahl nicht die speziellen Schwachstellen der WWER-440. Es kann also keine belastbare Zahl dafür angegeben werden, wie wahrscheinlich ein schwerer Unfall in einem WWER-440 in den kommenden Jahren ist.

Es ist aber möglich, zur groben Orientierung eine Bandbreite abzuschätzen, innerhalb der die Wahrscheinlichkeit liegen könnte. Wenn der genannte Wert von 1 : 10.000 pro Reaktor-Betriebsjahr als optimistischer Grenzwert angenom-

men wird, und ein Wert von 1 : 300 pro Reaktor-Betriebsjahr als pessimistische Grenze (Anfang 1987 lagen weltweit rd. 300 Betriebsjahre von WWER-440 Reaktoren ohne Kernschmelzunfall vor), so folgt für die Zeit von 1987 bis zum Jahr 2000, daß zwischen 0,06 und 2 schwere Unfälle auftreten werden. Auch die optimistische Variante gibt also noch einen Wahrscheinlichkeitswert von rd. 6%. Für den Standard Dukovany, der im folgenden Unfallszenario beispielhaft ausgewählt wurde, liegen die Werte bei rd. 0,6% bzw. 20%.

Es mag möglich sein, diese Zahlen unterschiedlich zu bewerten; klar ersichtlich ist aber, daß es sich in der Größenordnung keineswegs um ein vernachlässigbares "Restrisiko" handelt.

Wahrscheinlichkeit sagt im übrigen nichts über den Eintrittszeitpunkt aus; mit anderen Worten: Selbst ein mit belastbaren Rechenmethoden als äußerst unwahrscheinlich ermitteltes Ereignis kann morgen eintreten (bzw. natürlich auch ein als ziemlich wahrscheinlich berechnetes erst in 1000 Jahren). Für die Bewertung der Akzeptabilität einer Gefährdung ist daher besonders das mögliche Schadensausmaß von Bedeutung, das in der Folge an einem Beispiel illustriert wird.

2. Unfallablauf in der Anlage:

Die vorliegende Arbeit ist keine Risikostudie, in der alle möglichen Unfälle erfaßt und mit Wahrscheinlichkeitswerten verbunden werden. Hier wird einer von vielen Abläufen beschrieben, die bei einem schweren Unfall möglich sind. Es sind Unfälle mit erheblich geringeren, aber auch solche

mit viel schlimmeren Auswirkungen denkbar. Insoweit handelt es sich hier also um ein realistisches, repräsentatives Szenario:

Der Block 1 des Atomkraftwerkes Dukovany arbeitet mit Vollast. Der Reaktor ist schon viele Jahre in Betrieb. Er ist seit Monaten störungsfrei ununterbrochen am Netz. Ein Zufallsfehler in der Regelektronik löst eine Kette von Ereignissen aus, die zunächst noch beherrscht werden: Ein Abblaseventil am Druckhalter des Primärkreislaufes erhält einen Öffnungsimpuls; Dampf wird abgeblasen, der Druck im Primärkreis sinkt. Wie bei dem Störfall in Kozloduy-2 am 21. Februar 1983 versucht der Reaktoroperator zunächst, durch Aktivierung der elektrischen Heizung im Druckhalter den Druck wieder zu erhöhen. Der Druck fällt jedoch weiter. Der Operator merkt bald, was die Ursache ist; nach etwa einer Minute wird der Reaktor durch das Schutzsystem langsam abgeschaltet, und der Operator versucht - vergeblich - das Ventil zu schließen.

Der Druck sinkt unter 100 bar. Die Hochdruck-Notkühlein- speisung wird eingeschaltet, und funktioniert. Die Abblase- leitung am Druckhalter kann durch ein anderes Ventil ge- schlossen werden.

Die Betriebsmannschaft nimmt bereits an, die Situation voll unter Kontrolle zu haben. Da tritt ein Ereignis ein, zu dem es glücklicherweise in Kozloduy 1983 nicht ge- kommen ist: Die Hauptkühlmittelleitung, in die das Not- kühlwasser eingespeist wird, hält der plötzlichen Abküh- lung von etwa 300° auf (stellenweise) rund 50° C nicht stand. Die Schweißnaht direkt am Reaktordruckbehälter gibt nach. Diese Schweißnaht wurde zwar - wie viele andere - regelmäßig geprüft. Bei diesen Prüfungen, die unter dop- peltem Zeitdruck stattfinden (aus wirtschaftlichen Grün-

den, weil die Anlage möglichst bald wieder in Betrieb gehen soll; und aus Gründen des Strahlenschutzes, da sich das Personal nicht zu lange in diesem Bereich hoher Dosisleistung aufhalten soll), wurden jedoch kleine Risse im Schweißgut übersehen. Wechselnde Beanspruchung durch An- und Abfahren des Reaktors, Korrosion, Neutronenstrahlung aus dem Reaktorkern haben die Schweißnaht weiter geschwächt. Durch die Abkühlung nimmt die Zähigkeit des Materials schlagartig ab - die Versagensgrenze wird überschritten.

Aus dem großen Leck (2F-Bruch) strömen sehr rasch Dampf und Wasser (sogen. "blow-down"). Der Druck in der Zelle steigt innerhalb von Sekunden auf etwa 2 bar. Innerhalb der ersten Sekunde nach dem Bruch setzt das passive Sprinkler-System zum Druckabbau ein. Es arbeitet jedoch nur mit 50% der geplanten Kapazität: seit Jahren ist die Füllstandsanzeige in einem der beiden Tanks defekt und zeigt falsche Werte. Der Tank ist daher etwas zu wenig gefüllt, so daß die auftretenden Druckdifferenzen nicht zum Auslösen des Systems führen. Das passive Sprinklersystem war in den letzten Jahren nur sehr summarisch inspiziert worden, da ein passives System als kaum stör anfällig betrachtet wurde, und man es ohnehin nie benötigte. Durch die geringere Leistung der Sprinkler wird das Barbotage-System (Kondensationskammern), in dem der Dampf in Wasserbehälter eingeleitet wird, stärker belastet als geplant. Es wird nach etwa einer halben Sekunde ausgelöst. Nach wenigen Sekunden kommt es zu heftigen Schwingungen (die Anfälligkeit dieses Systems für Vibrationen ist ein auch bei planmäßiger Belastung gefürchtetes Problem). Einige Rohre schlagen heftig aus und reißen ab; die gesamte Struktur wird erschüttert. Einer der Böden des Systems reißt auf. Der Großteil des Dampfes strömt jetzt, etwa 10 bis 15 Sekunden nach Abriß der Leitung, direkt in den großen Raum

über den Reaktor, ohne zu kondensieren. Die Blow-down-Phase dauert insgesamt etwa 30 Sekunden. Knapp vor ihrem Ende erreicht der Druck im Sicherheitseinschluß etwa 0,15 MPa. Die Wandung des oberen Raumes reißt auf, es entsteht ein Leck, das einige m² groß ist.

Die aktiven Sprinkler laufen plangemäß nach etwa einer Minute an - zu spät, um das Versagen des Sicherheitseinschlusses zu verhindern. Die Betriebsmannschaft hat alle drei Stränge aktiviert, um den bereits radioaktiven Dampf im Reaktorgebäude möglichst wirkungsvoll zu kühlen und Freisetzungen nach außen stark zu verringern.

Mittlerweile haben die Druckspeicher den Reaktor wieder geflutet. Noch ist der Brennstoff vom Schmelzen weit entfernt. Die Niederdruck-Notkühlung, die nunmehr für die sichere Abfuhr der Nachzerfallswärme aus dem Reaktor erforderlich ist, wird aktiviert und läuft an. Nach einer Zeitspanne von rd. 10 Minuten sind die Vorratsbehälter mit boriertem Wasser entleert. Dieser Punkt ist früher erreicht, als geplant: Die Vermaschung der Sprinkler-Systeme mit der Notkühlung erweist sich als sicherheitstechnisch nachteilig - da sämtliche Stränge des Sprinkler-Systems mit maximaler Leistung aktiviert wurden, ist der Wasservorrat knapp.

Das Umschalten von Notkühlung und Sprinklern auf Sumpfbetrieb - d. h. auf Ansaugen von Wasser, das sich in der Zwischenzeit unten im Reaktorgebäude angesammelt hat - mißlingt, da die Kontroll- und Schaltsysteme der Sicherheitseinrichtungen durch den Unfall, der längst nicht mehr wie vorhergesehen abläuft, bereits in Mitleidenschaft gezogen wurden. Die komplizierte Wechselwirkung zwischen den einzelnen Sicherheitssystemen hat dazu geführt, daß aufgrund eines kleinen unentdeckten Mangels ein Auslegungs-

störfall nicht mehr beherrscht werden kann.

Der Kern des Reaktors kann nun nicht mehr gekühlt werden. Innerhalb der nächsten Stunde verdampft das Wasser im Reaktordruckbehälter; der Kern schmilzt. Der geschmolzene Kern fällt in den unteren Teil des Behälters. Die Aufheizung des Kerns wird in dieser Phase ab Erreichen einer Temperatur von ca. 950° C durch heftige chemische Reaktionen des in den Hüllrohren der Brennelemente enthaltenen Zirkon mit Wasserdampf stark beschleunigt. Die Wandung des Druckbehälters wird rasch durchgeschmolzen. Die Schmelze ergießt sich auf den Boden unter dem Reaktor und beginnt, mit dem Beton zu reagieren. Nach Durchschmelzen der Reaktorgrube fällt sie in den Sumpf des Gebäudes; der Kontakt mit Sumpfwasser führt zu erneuter Dampfbildung. Schließlich dringt die Schmelzfront langsam immer tiefer in die Fundamente ein.

Während des Aufheiz- und Schmelzvorganges werden große Mengen radioaktiver Stoffe aus dem Brennstoff freigesetzt. Dies beginnt bereits bei Temperaturen unter 1000° C. Nach Versagen der Brennelement-Hüllrohre werden Spaltgase (Edelgase, Jod) und relativ flüchtige Stoffe wie Cäsium bereits zu einigen Prozenten aus dem Brennstoff abgegeben. Beim Schmelzen wird der Großteil des im Reaktor vorhandenen Inventars dieser Stoffe frei; sowie auch bereits nennenswerte Anteile weniger flüchtiger Stoffe (radiologisch wichtig sind vor allem Strontium und Tellur). Ein weiterer Freisetzungsschub findet bei Beginn der Wechselwirkung der rd. 2400° C heißen Schmelze mit dem Beton statt, da das in diesem enthaltene Wasser verdampft. Die Dauer der Freisetzungen beträgt eine Stunde bis drei Stunden.

Eine genaue Abschätzung der an die Umgebung abgegebenen Mengen radioaktiver Stoffe ist aufgrund der sehr komplexen

Vorgänge nicht möglich. Dabei ist auch zu berücksichtigen, daß ein Teil der aus dem geschmolzenen Reaktorkern freigegebenen radioaktiven Stoffe noch innerhalb des Gebäudes niedergeschlagen wird. Dieser Anteil wird jedoch in dem hier betrachteten Szenario niedrig sein, da der Sicherheitseinschluß bereits beim Beginn des Aufheizens des Kerns nicht mehr geschlossen ist, und auch die Sprinkler-Systeme nicht mehr arbeiten. Verstärkt werden können die Freisetzungen durch Wasserstoffexplosionen (Wasserstoff wird bei der Zirkon-Dampf-Reaktion, sowie bei der Wechselwirkung der Schmelze mit dem Beton frei), sowie durch Dampfexplosionen.

Die radioaktiven Stoffe strömen mit einem erwärmten Luft-Dampf-Gemisch nach außen und werden durch den Wärmeeuftrieb über die Gebäudehöhe (rd. 40 m) hinaus nach oben transportiert.

Für die Berechnung der Unfallfolgen wurde angenommen, daß die in Tabelle 1 angegebenen Anteile des Kerninventars (Annahme: 41,5 t Brennstoff, mittlerer Abbrand rd. 18.000 MWd/t) bzw. Radionuklidmengen in Becquerel freigesetzt werden. Dabei war es im Rahmen dieser Arbeit erforderlich, eine Beschränkung auf einige, radiologisch besonders bedeutsame Nuklide vorzunehmen. Weiterhin werden zum Vergleich die entsprechenden Werte für den Tschernobyl-Unfall ausgegeben /4/.

Die Differenzen zu Tschernobyl, auch in der Relation der Freisetzungsraten der einzelnen Nuklide, folgen aus den unterschiedlichen Unfallabläufen: Tschernobyl: prompt-kritische Leistungsexkursion, später teilweises Kernschmelzen (?) mit bereits anlaufenden Gegenmaßnahmen; hier: keine Leistungsexkursion, frühzeitiges Kernschmelzen ohne Möglichkeit rascher Gegenmaßnahmen. Durch die Leistungs-

Tabelle 1: Radioaktive Freisetzungen an die Atmosphäre für das Unfallszenario
"Dukovany" sowie für den Tschernobyl-Unfall

Nuklid	Szenario "Dukovany"		Tschernobyl		Halbwertszeit (Tage)
	% Kerninventar	Menge in Bq	% Kerninventar	Menge in Bq	
Strontium-89	3	4,9 E 16	4,0	8,0 E 16	51
Strontium-90	3	2,1 E 15	4,0	8,0 E 16	11.000
Ruthenium-103	3	5,6 E 16	2,9	1,2 E 17	39
Ruthenium-106	3	1,5 E 16	2,9	5,8 E 16	370
Tellur-132	20	4,2 E 17	15	4,8 E 16	3,2
Jod-131	40	6,4 E 17	20	2,6 E 17	8
Jod-133	40	1,2 E 18	?	?	0,87
Jod-135	40	1,2 E 18	?	?	0,28
Cäsium-134	30	4,5 E 16	10	1,9 E 16	750
Cäsium-137	30	2,7 E 16	13	8,7 E 15	11.000
Barium-140	3	8,4 E 16	5,6	1,6 E 17	13
Plutonium-239	0,025	1,0 E 11	3	2,6 E 13	8.900.000

exkursion wurden in Tschernobyl auch wenig flüchtige Stoffe wie Plutonium in relativ großen Mengen freigesetzt; in dem hier betrachteten Szenario ist dagegen die Freisetzung flüchtiger Stoffe größer. Zu bedenken ist weiterhin, daß aufgrund der größeren Reaktorleistung das Kerninventar in Tschernobyl erheblich größer war.

Aufgrund der genannten Explosionsmechanismen wären auch noch höhere Freisetzungsanteile denkbar. Weitere Faktoren, die bei einem Unfall wie dem hier betrachteten zu zusätzlichen Freisetzungen führen können, sind:

(1) Ist das Brennelement-Lagerbecken mit abgebranntem Kernbrennstoff gefüllt, muß von einem Ausfall der Beckenkühlung ausgegangen werden. Bei dichter Belegung kann auch dieser Brennstoff innerhalb von Tagen Schmelztemperatur erreichen. Ist es bis dahin nicht gelungen, das Gebäude abzudichten, kommt es zu einer erneuten großen Freisetzung (Dabei wird das kurzlebige Jod-131 nur eine geringe Rolle spielen, da es in der Lagerzeit des Brennstoffes zum Großteil abgeklungen ist; langlebige Spaltprodukte wie z. B. Cäsium und Strontium können dagegen im Lagerbecken in Mengen vorhanden sein, die denen im Reaktor vergleichbar sind).

(2) WWER-440-Anlagen werden stets als Doppelblock in einer baulichen Einheit errichtet. In Dukovany (wie an zahlreichen anderen Standorten) befinden sich darüber hinaus noch zwei weitere Blöcke. Selbst wenn diese anderen Reaktoren zunächst sicher abgefahren, dann aber von der Betriebsmannschaft verlassen werden müssen, kann in der Folge der Ausfall von Nachkühlsystemen zu neuen Unfallabläufen führen.

In dieser Studie nicht berücksichtigt sind die Folgen des Durchschmelzens der Gebäudfundamente und des Kontaktes

der Schmelze mit Boden und Grundwasser. Es liegen keine Angaben vor, um die dafür anzusetzende Zeitspanne abzuschätzen.

3. Radiologische Auswirkungen auf die Republik Österreich

3.1. Konzeption der Unfallfolgenberechnungen:

Es werden die auf österreichischem Staatsgebiet zu erwartenden strahlenbedingten Gesundheitsschäden durch den in Abschnitt 2 dargestellten "Super-GAU" am CSSR-Standort Dukovany ermittelt. Auch bei einer bestimmten vorgegebenen Menge radioaktiver Stoffe, die freigesetzt wird, können die Folgen in Abhängigkeit der meteorologischen Gegebenheiten sehr stark schwanken. Wie beim Unfallablauf innerhalb der Anlage, wurden auch bei den Unfallfolgenberechnungen keineswegs sehr pessimistische Annahmen getroffen. Für die zur Berechnung erforderlichen Parameter wurden im mittleren Bereich der Beobachtung liegende Werte verwendet.

Somit sind weitaus größere Unfallfolgen, aber auch wesentlich glimpflichere möglich, als in diesem Bericht mitgeteilt. Für eine Unfallvorsorgeplanung sollten ungünstigere Annahmen und Modellparameter zugrunde gelegt werden.

Die Rechnung läuft folgendermaßen ab:

- (1) Für einen denkbaren Unfallhergang gelangen daraus resultierende Anteile des Nuklidinventars in die Umgebung (Abschnitt 2).
- (2) Die Nuklide werden entsprechend einer vorgegebenen me-

teorologischen Situation verfrachtet und lagern sich am Boden (Vegetation) ab.

- (3) Mit einem radioökologischen Rechenmodell wird der Weg der Nuklide in den menschlichen Körper durch Einatmen und über die Nahrungskette beschrieben. Dazu sind Angaben über die Ernährungsgewohnheiten der Bevölkerung, landwirtschaftliche Produktionsweisen, Transferfaktoren für den Übergang der Nuklide vom Boden über die Wurzeln in die Pflanzen usw. erforderlich. Auch die Gesundheitsschäden durch die Direktstrahlung der am Boden abgelagerten Nuklide werden betrachtet.
- (4) Mit Hilfe von Dosisfaktoren (Strahlenbelastung pro aufgenommenes Bq) kann die individuelle Strahlenexposition für beliebige Entfernungen zum AKW Dukovany ermittelt werden.
- (5) Mit Daten über die Bevölkerungsverteilung können schließlich die in Österreich zu erwartenden strahlenbedingten Krebstodesfälle und Krebserkrankungen berechnet werden. Dabei werden eventuelle Gegenmaßnahmen, die von der Administration (Grenzwertfestlegung, Vermarktungsverbote) ergriffen werden, zu berücksichtigen.

Nach diesem groben Überblick werden in den Kap. 3.2. bis 3.5. die Modellannahmen genauer beschrieben und in den Kap. 3.6. bis 3.9. die Gesundheitsfolgen für die österreichische Bevölkerung berechnet und diskutiert.

3.2. Geographische Situation

Das AKW Dukovany liegt 30 km südwestlich der fast 400.000 Einwohner zählenden Stadt Brno (Brünn) auf ca. 350 m ü NN. Die Staatsgrenze der Volksrepublik Polen liegt ca. 150 km, die der DDR ca. 300 km, der BRD ca. 200 km, der Republik Österreich ca. 30 km und die der Volksrepublik Ungarn ca. 150 km entfernt. Die Landschaft um Dukovany ist topographisch kaum gegliedert und mit ca. 50 Einwohnern pro km² dünn besiedelt /5/. Die grenznahen Teile der Bundesländer Nieder- und Oberösterreichs weisen ebenfalls keine starke topographische Gliederung auf. Der Wiener Wald erreicht bei Wien Höhen von über 500 m ü NN. Er geht gen Südwesten in die ca. 2000 m hohe Schneealpe und den Hochschwab über.

Die Bevölkerungsdichte Oberösterreichs beträgt 100 Einwohner pro km², die Niederösterreichs 70, die des Burgenlandes 65 Einwohner pro km² /6/. Im Bundesland Wien leben ca. 3600 Einwohner pro km².

Die österreichische Landwirtschaft deckt den Inlandbedarf praktisch zu 100% ab. Ausfuhren (z. B. Wein) stehen Einfuhren (z. B. Südfrüchte) gegenüber. Die Anbauanteile verschiedener Feldfrüchte und deren Ertrag/ha variieren von Bundesland zu Bundesland.

Die vorherrschenden Windrichtungen im Bodenniveau werden ganz wesentlich durch die Topographie bestimmt. In Niederösterreich herrschen NW und SO Winde vor. Somit besteht die konkrete Gefahr, daß die radioaktive Wolke nach einem AKW-Unfall in Dukovany auf direktem Weg österreichisches Staatsgebiet passiert. Die Bodendruckverteilung kann die radioaktive Wolke jedoch auch auf gekrümmten Bahnen nach Österreich führen. Bei der hier gewählten Parameterkonfiguration (s. u.) würde dadurch lediglich die längs der

Zugbahn erfolgte Ablagerung von Nukliden sowie deren radioaktiver Zerfall zu einer Verringerung der Unfallauswirkungen führen. Im östlichen (niedrigen) Teil Österreichs, werden geringere Niederschlagsmengen als in den höheren Lagen beobachtet. Das ist hier ohne Belang, da während des Durchzugs der radioaktiven Wolke kein Niederschlag fallen soll. Andererseits - falls es regnen sollte - kann es auch in statistisch trockeneren Landstrichen zu kräftigen Schauern kommen, was zu einer erheblichen Deposition von Nukliden auf Vegetation, Bebauung und Erdboden führen würde.

Die Lage der Wasserscheiden und Flußläufe ist von Bedeutung für die Trinkwasserversorgung, die Bewässerung von landwirtschaftlichen Produktionsflächen und das Tränken von Vieh. Bei der Trinkwasserversorgung dürfte es zu erheblichen Engpässen in Hallstadt, Salzburg und Wien kommen /7/, wenn die radioaktive Wolke das jeweilige Trinkwasserversorgungsgebiet überquert. Die Wasserversorgung wird - trotz der in /8/ genannten großen damit verbundenen Probleme - bei den unten genannten Ergebnissen als nuklidfrei angenommen.

3.3. Freisetzung radioaktiver Stoffe:

Wie in Abschnitt 2. beschrieben, versagt nach einem doppelendigen Abriß (2F-Bruch) der Hauptkühlmittelleitung der Sicherheitseinschluß frühzeitig. Kurz darauf tritt Kernschmelzen ein. Die radioaktiven Freisetzungen aus dem Reaktorgebäude wurden oben in Tabelle 1 angegeben. Angesichts des Unfallablaufes in der Anlage wird angenommen, daß der größte Teil der Freisetzungen innerhalb einer Stunde stattfindet.

3.4. Wetterbedingungen:

Da die Freisetzen hauptsächlic innerhalb einer Stunde erfolgen, können sie mit äußerst ungünstigen Ausbreitungsbedingungen zusammenfallen /9/. Dies soll hier gerade nicht angenommen werden. Vielmehr wird eine Wettersituation zugrunde gelegt, deren Häufigkeit in Österreich besonders groß ist:

Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Flur: 7,2 km/h

Ausbreitungs-kasse: indifferent

Niederschlag: keiner

Höhe der bodennahen Mischungsschicht: 600 m

Die effektive Freisetzungshöhe (d. h. die Höhe, in welcher der Hauptanteil der Nuklide mit dem Wind forttransportiert wird) wird wegen des Wärmeeuftriebs mit $H = 100$ m angenommen. Die Transportgeschwindigkeit ist 14 km/h (höhere Windgeschwindigkeit als in Bodennähe). Die Reisezeit bis Wien beträgt rund 6 Stunden, viel zu kurz, um mit Aussicht auf Erfolg eine Evakuierung zu organisieren /10/.

Es wird eine Windrichtung angenommen, die die radioaktive Wolke geradewegs über Wien hinweg, zum Burgenland und zur Steiermark verfrachtet. Ebenso sind südwestliche Zugbahnen in Richtung Linz, Salzburg und Innsbruck denkbar. Eine Rückkehr der Wolke oder mehrmaliges Passieren österreichischen Staatsgebiets (vagabundierende Abluftfahne) durch wechselnde Windrichtungen wird nicht betrachtet. Ebenso soll das Verwehen wieder aufgewirbelter radioaktiver Stäube unberücksichtigt bleiben. Bei der angenommenen Wetterlage können Bergkämme, die oberhalb ca. 1000 m liegen, unbelastet bleiben.

Als Ausbreitungsparameter wurden die der VDI-Richtlinie

3783 verwendet /11/. Die Rauigkeitslänge beträgt - auch in Wien - 0,8 m. Sie gilt für locker bebautes, offenes Gelände und bedingt für Wien zu geringe Nuklidkonzentrationen in der bodennahen Luft.

Als Ablagerungsgeschwindigkeiten für die verschiedenen Nuklide wurden die in /12/ vorgeschlagenen Werte verwendet. Alle in das Modell eingehenden meteorologischen Parameter sind orts- und zeitabhängig, was zu einer Erhöhung und auch Verringerung der Strahlenbelastung führen kann. Hier wurden die genannten Größen konstant gehalten.

3.5. Das Unfallfolgenmodell:

3.5.1. Radionuklidkonzentrationen in Luft und Boden:

Gemäß /9/ werden radioaktiver Zerfall und eine Verminderung der Nuklidmenge in der Wolke durch trockene Deposition beachtet. Tab. 2 gibt den Ausbreitungsfaktor CHI direkt unter der Nuklidwolke für die Entfernungen 10 bis 310 km in Abständen von 20 km an. (Die Tabellen befinden sich in diesem Abschnitt am Ende des Textes.) Für Jodisotope ($v = 2$ cm/s) und Aerosole ($v = 0,3$ cm/s) ergeben sich wegen der verschiedenen Depositionsgeschwindigkeiten unterschiedliche Werte von CHI. CHI gibt an, um welchen Faktor sich die Nuklidkonzentration gegenüber dem Wert in unmittelbarer Nähe des Freisetzungsortes verringert hat, wenn kein radioaktiver Zerfall zu beachten wäre. Der Abfall mit der Entfernung ist gering wegen der angenommenen Höhe der Mischungsschicht von 800 m.

In Tab. 2 gibt ANTEIL den Teil der Nuklide an, welcher noch in der Wolke verblieben ist, d. h. nach 300 km Transportweg haben sich bei der angenommenen Wetterlage erst

22% der Jodisotope und 4% der Aerosole abgelagert. Somit befindet sich der weitaus größere Anteil der freigesetzten Nuklide noch in der Atmosphäre und wird andere Gebiete verseuchen. Bei nördlichen Winden wird die südliche Staatsgrenze von Österreich nach ca. 210 km erreicht, bei nordöstlichen Winden erst nach mehr als 300 km. Als Transportweg über österreichisches Staatsgebiet wurden 260 km angenommen.

Um den Rechenaufwand zu begrenzen, wurden je 20 km lange Wegintervalle betrachtet. Zusammen mit der Ausdehnung der Wolke quer zur Ausbreitungsrichtung wurden daraus Flächen entsprechend Abb. 1 gebildet. ϕ_y ist ein Maß für die Breite der Wolke: im Abstand $\phi_y = 1$ quer zur Transportrichtung ist die Nuklidkonzentration nur noch ca. 70% des Maximalwertes CHI. Luftkonzentration und Deposition wurden für die Flächen als konstant angesehen. Auf einer weiteren, 4. Fläche beträgt die Nuklidbelegung noch 3% des Maximalwertes. Die Nuklidverdünnung in Transportrichtung ist in diesem Zusammenhang ohne Bedeutung, da die Strahlenexposition eine Funktion des zeitlichen Integrals ist.

Aus dem Verhältnis der Flächen der Rechtecke zur Fläche Österreichs /13/ ergibt sich unter der Annahme einer konstanten Bevölkerungsdichte die Anzahl der betroffenen Personen. Bei der Bestimmung der kollektiven Inhalationsdosis wurde das Überqueren Wiens berücksichtigt

Nach dem Durchgang der Wolke haften die verschiedenen Nuklide entsprechend ihrer Ablagerungsgeschwindigkeit auf der Vegetation, der Bebauung und dem Boden. Die Atmosphäre wird danach als nuklidfrei betrachtet. Bei den Dosisberechnungen wird nur für Wien angenommen, daß eine Dekontamination erfolgt. Die Nuklidbelastung der Pflanzen ändert sich außer durch radioaktiven Zerfall entsprechend einer

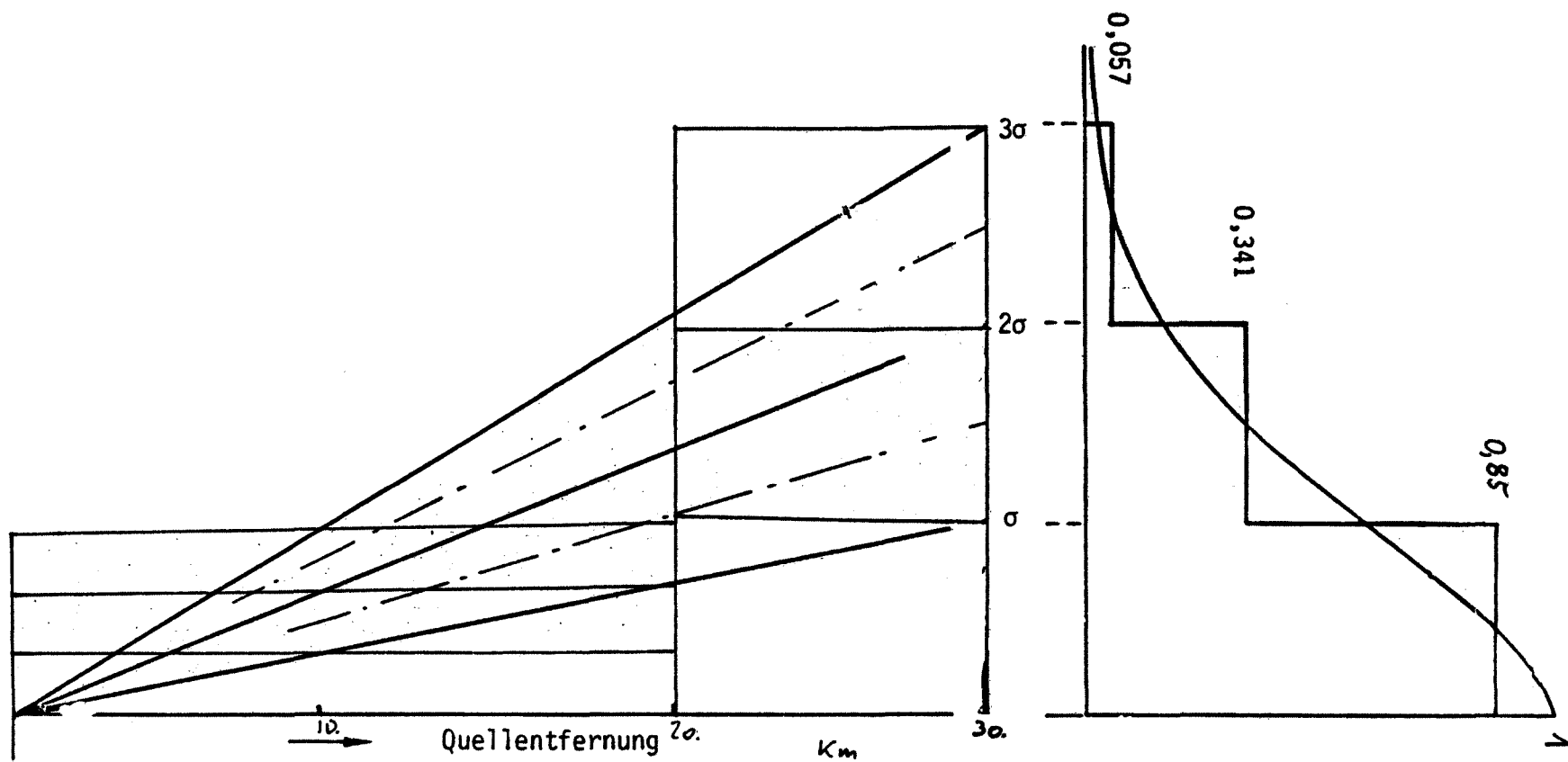


Abbildung 1: Illustration zur Erklärung der Ausbreitungsrichtung

Verweilzeit der Nuklide von 14 Tagen /14/. Für den Erdboden wird Verwitterung berücksichtigt, die sich in Anlehnung an WASH-1400 /15/ folgendermaßen errechnet:

$$C_B(t) = C_B(o) \times \exp(-\lambda_1 t) \times 0,5 \times (\exp(-\lambda_2 t) + \exp(-\lambda_3 t))$$

$C_B(t)$ = Bodenkonzentration zur Zeit t nach dem Unfall

$C_B(o)$ = Bodenkonzentration nach trockener Ablagerung

λ_1 = rad. Zerfallskonstante, $\lambda_1 = \ln 2/T_1$

T_1 = Halbwertszeit

λ_2 = $2,22 \text{ E-}8 \text{ s}^{-1}$, $T_2 = 1 \text{ a}$

λ_3 = $2,22 \text{ E-}10 \text{ s}^{-1}$, $T_3 = 100 \text{ a}$

λ_1 soll Abrasionsvorgänge beschreiben (Wind, Regen).

λ_2 stellt Transportprozesse in tiefere Schichten des Bodens dar.

Besondere lokale Anreicherungsmechanismen (in Talmulden, an Gräben) und Abreicherungs Vorgänge (versiegelte Flächen) werden dadurch vernachlässigt.

3.5.2. Zeitlicher Verlauf der Belastung von Lebensmitteln

Es wird angenommen, daß der Unfall Anfang Mai bei bereits gut entwickeltem Gemüse- und Sommergetreidewuchs passiert. Die Tabellen 3-6 können mit Tabelle 7 verglichen werden, welche die in Österreich nach dem AKW-Unfall in Tschernobyl aufgetretenen Nuklidmengen in Nahrungsmitteln auflistet. Die Daten der Tab. 7 sind /7/ entnommen.

Vier Zeitabschnitte werden betrachtet:

(a) von Mai bis Ende Dezember

Für die Jodbelastung wird davon ausgegangen, daß lediglich der erste Grasschnitt und die erste Gemüseernte belastet sind.

Milch- und Schlachtvieh werden ab Anfang November aufgestellt. Von Mai bis Oktober wird frisches Gras verfüttert. Die Annahmen entsprechen /14/.

Der Bodentransfer ist allerdings gegenüber den Angaben in /14/ halbiert, da die Nuklide den Wurzelbereich noch nicht erreicht haben. Radioaktiver Zerfall und Verwitterung werden berücksichtigt. Tabelle 3 gibt die zu erwartende Nuklidmenge in Bq/kg beispielhaft für 110 km Entfernung vom AKW Dukovany in den Lebensmitteln an, die direkt unter der Wolke angebaut werden. Gemäß Abbildung 1 nimmt die Belastung quer zur Zugrichtung der Wolke ab. Bei Pflanzen (Getreide, Gemüse, Kartoffeln, Obst) wurde von 25% Dekontaminationswirkung durch die Zubereitung ausgegangen /7/.

Auch durch den Bodentransfer ergeben sich ganz erhebliche Kontaminationen (siehe Tabelle 3). Bei Milch und Blattgemüse wird eine 1-tägige Verzögerungszeit zwischen Melken bzw. Ernte und Verzehr vorausgesetzt. Fleisch wird 20 Tage nach dem Schlachten verzehrt, pflanzliche Produkte nach 2 Monaten Lagerung gegessen.

(b) 2. Jahr

Im 2. Jahr wird noch 4 Monate verseuchtes eingelagertes Futter zur Milch- und Fleischproduktion verwendet. Die landwirtschaftlichen Produkte nehmen nur noch über Bodentransfer Nuklide auf. Für Grünland wird eine Eindringtiefe der Nuklide von 2,5 cm angenommen. Alle anderen Parameter entsprechen /14/, auch die der Ertragsmengen. In Tabelle 4

sind die in den pflanzlichen Produkten des 1. Jahres nach 6 Monaten Lagerung enthaltenen Nuklide angegeben. Milch und Fleisch sind durch die Verfütterung von Silage und Heu belastet.

(c) 3. Jahr

Alle Parameter entsprechen /14/. Wie Tabelle 5 zu entnehmen ist, gelangen Nuklide nur noch über die Wurzeln in die Nahrungsmittelkette. Es kommt dennoch zu erheblichen Anreicherungen.

(d) 4.-50. Jahr

Unter der Annahme einer mittleren Lebenserwartung von 50 Jahren wird die Summe der in diesen 47 Jahren aufgenommenen Nuklide bestimmt. Tabelle 6 gibt die Werte an. Die Jahre 4, 5 usw. tragen wesentlich mehr zu den Nuklidmengen bei, als die späteren Jahre 40-50.

3.5.3. Verzehrmengen

Die Verzehrmengen wurden aus den Hinweisen in /7/, Seite 183, abgeleitet. Sie stammen aus den Ernährungsbilanzen 1985/86 des Österreichischen statistischen Zentralamts.

Als jährliche Verzehrmengen für Erwachsene wurden angenommen:

- 210 kg pflanzliche Produkte (die Hälfte des Obstes sind unbelastete Südfrüchte) (100)
- 20 kg Blattgemüse
- 140 kg Milch und Milchprodukte (93)
- 95 kg Fleisch (einschließlich Eiern) (50).

In Klammern sind die Verzehrsmengen radioaktiv belasteter Produkte im 1. Jahr angegeben. Für Blattgemüse und Milch wurde zusätzlich beachtet, daß nur $1/8$ der Menge über den ersten Schnitt (Ernte) zu einer Jodkontamination beiträgt, d. h. es werden lediglich 1,5 kg Blattgemüse bzw. 12 kg Milchprodukte verzehrt.

Für Kleinkinder wurde ausschließlich ein Milchkonsum von 250 kg zugrunde gelegt, was einer konservativen Abschätzung entspricht. Im ersten Jahr gelten die gleichen Modifikationen wie bei der Nahrungsaufnahme bei Erwachsenen.

3.5.4. Bevölkerungsdaten

Im Rahmen dieser Untersuchung reicht es aus, für die Ingestionsbelastung eine gleichverteilte Bevölkerungsdichte anzunehmen. Für die Berechnung der Kollektivdosen über Inhalation und Bodenstrahlung wurde die größere Bevölkerungsdichte Wiens in Rechnung gestellt. Nach /6/ leben in Österreich 6,5 Millionen Menschen unter 65 Jahren. Für ältere Personen wird angenommen, daß sich die Folgen der radioaktiven Bestrahlung bei ihnen nicht mehr manifestieren. Als Kleinkinder werden in Ermangelung detaillierterer Daten 0-4jährige angesehen. Für diese Personengruppe gelten andere Verzehrsmengen (s. 3.5.3.) und Dosisfaktoren /14/ als für Erwachsene.

Die höhere Strahlenempfindlichkeit besonderer Risikogruppen (Föten, Embryos, Kranke) wird vernachlässigt. Gefährdende Tätigkeiten (Spielen in der Sandkiste, Feldbearbeitung, Straßenarbeiter, usw.) bleiben unberücksichtigt. Spezielle Ernährungsweisen (Selbsterzeuger, Bioköster, Beeren- und Pilzsammler, usw.) bleiben außer Betracht.

3.5.5. Gegenmaßnahmen

Gemäß angenommener Wetterbedingungen wird in Österreich nach dem Unfall ein schmaler Streifen hoch belasteter Nahrungsmittel erzeugt. Er ist an der tschechoslowakischen Grenze 10 km, an der südlichen Landesgrenze ca. 70 km breit. Das ca. 8000 km² große Gebiet entspricht knapp 1/10 des österreichischen Staatsgebiets. Es entspricht der Größe des Bundeslands Salzburg. Es werden die Auswirkungen von drei Strategien der österreichischen Regierung untersucht, um eine Strahlenminimierung zu erzielen.

- (1) Um ein Verbot des Vertriebs von wirtschaftlichen Produkten zu vermeiden (was Regreßansprüche nach sich ziehen würde) und um zu verhindern, daß Gebiete mit einem extremen Anstieg von Strahlenschäden entstehen (die radiologischen Auswirkungen würden zu offenbar und hätten eventuell soziale Unruhen zur Folge), werden die belasteten Nahrungsmittel gleichmäßig über die Republik verteilt. Mit dem Transport niedrig belasteter Lebensmittel hat die österreichische Regierung nach dem Unfall von Tschernobyl gute Erfahrungen gemacht /7/.

Diese Annahme ist bezüglich der Auswirkung auf die Kollektivdosis gleichbedeutend damit, daß die Lebensmittel bis unterhalb der festgesetzten Grenzwerte mit weniger belasteten vermischt werden.

- (2) Alle Lebensmittel, welche die nach dem AKW-Unfall in Tschernobyl erlassenen Grenzwerte überschreiten, werden vernichtet (wie, sei dahingestellt). Um einen vollständigen Grenzwertsatz, s. Tab. 8, zu erhalten, wurden Analogieschlüsse gezogen:

Für Strontium und die Jodisotope 133 und 135 waren von der Österreichischen Regierung nämlich keine Grenzwerte festgelegt worden. Hier wurde folgendes angenommen:

Sr-90 = 1/5 des Werts, der im Jan. 1987 von der FAO (Nahrungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen) vorgeschlagen wurde. Da der Dosisfaktor von Sr-89 nur 1% desjenigen von Sr-90 beträgt, wurde der Grenzwert für Sr-89 entsprechend 100mal höher angenommen. Ebenso wurde bzgl. der Grenzwerte von J-133 und J-135 vorgegangen, die jeweils entsprechend ihrer radiologischen Bedeutung im Vergleich zu J-131 gewählt wurden.

Für Schweine- und Geflügelfleisch war Ende Nov. 1986 in Österreich für die Summe aus Cs-134 und -137 ein Grenzwert von 185 Bq/kg, für andere Fleischsorten von 592 Bq/kg festgesetzt worden. Aus der unterschiedlichen radiologischen Bedeutung von Cs-134 und -137 sowie der mengenmäßigen Zusammensetzung des Fleischkonsums ergeben sich die Grenzwerte der Tab. 7. Für pflanzliche Produkte (Getreide und Wurzelgemüse) war nach Tschernobyl kein Grenzwert festgesetzt worden. Hier wurde derjenige für Obst und Gemüse verwendet.

Das Rechenprogramm ermöglicht es, die betroffene landwirtschaftliche Produktionsfläche zu ermitteln. Bei Nordwind ergeben sich in den Bundesländern Niederösterreich, Burgenland und Steiermark die in Tab. 9 angegebenen Mengen an landwirtschaftlichen Produkten, die aus dem Markt genommen werden müssen (Anbau und Ernte entsprechen der Erhebung 1985). Der Ausfall der Fleischproduktion kann über den Pro-Kopf-Verbrauch abgeschätzt werden, wenn angenommen wird, daß die Tier-

haltung in Österreich annähernd gleich verteilt ist. Tab. 9 gibt auch die nicht zum Verzehr freigegebenen Fleischmengen an.

Die Berechnung der Absatzverluste für die milcherzeugenden Betriebe basieren auf den Angaben in /6/. Entsprechende Daten standen für Blattgemüse nicht zur Verfügung.

Für die angegebenen Mengen dürfte auf österreichischem Staatsgebiet keine ausreichende Zwischen- bzw. Endlagermöglichkeit vorhanden sein. In den von der radioaktiven Wolke betroffenen Gebieten (bis 36 y quer zur Wolkenachse, s. Abb. 1) muß im 1. Jahr die gesamte landwirtschaftliche Produktion vernichtet werden. Erst mit der 2. und 3. Ernte können im Randbereich wieder Lebensmittel erzeugt werden, die die österreichischen Grenzwerte unterschreiten. Die zu entsorgenden Mengen sind dann nur noch ca. 1/3 so groß wie bei der 1. Ernte, falls in den betreffenden Gebieten überhaupt Landwirtschaft betrieben wird.

Der wirtschaftliche Schaden bei der Ausfuhr von Saatgetreide, Wein und luftgetrockneten Arzneimitteln sowie beim Fremdenverkehr sei nur am Rande erwähnt. Die Untersuchung erfolgte entsprechend Kap. 2.5.2. nur bis einschließlich dem 3. Jahr nach dem Unfall. Ohne Zweifel sind auch in den darauffolgenden Jahren in einigen Gebieten gewisse landwirtschaftliche Produkte oberhalb der Grenzwerte belastet.

- (3) Es werden lediglich Lebensmittel verworfen, welche die von der FAO im Jan. 1987 empfohlenen Grenzwerte überschreiten. Diese Grenzwerte sind in Tab. 8, letzte Spalte, genannt.

Die Grenzwertfestlegung zeigt, daß sie unter dem Eindruck der Folgen des Unfalls im AKW Tschernobyl auf Westeuropa erfolgte. Der Unfall in einem wesentlich näher gelegenen AKW wird offensichtlich ausgeschlossen, sonst wären auch für kurzlebige Nuklide Grenzwerte empfohlen worden. In der Modellrechnung wurden deshalb zusätzliche Grenzwerte angenommen, wobei die relative radiologische Bedeutung verglichen mit den langlebigeren Isotopen in Rechnung gestellt wurde (entsprechend der in (2) beschriebenen Vorgehensweise).

Die Grenzwerte der FAO liegen durchweg höher als die im Nov. 1986 in Österreich festgesetzten. Deshalb müssen im 3. Jahr keine pflanzlichen Produkte mehr vernichtet werden.

Die Auswirkungen der Strategien (1) und (3) auf die kollektive Strahlenbelastung werden in Kap. 3.8. dargestellt. Die Strategie (2) führt nur zu einer unwesentlich geringeren Strahlenbelastung als (3).

3.5.6. Dosisfaktoren und Dosis-Risikobeziehungen

Zur Ermittlung der individuellen Strahlenexposition wurden 50 Jahre-Folge-Dosisfaktoren für Bodenstrahlung, Inhalation und Ingestion verwendet /14/. Akute Strahlenschäden werden also nicht betrachtet.

Der Bestimmung des Kollektivrisikos, an Krebs zu erkranken bzw. zu sterben, liegen folgende Dosis-Risiko-Beziehungen zugrunde:

Schilddrüsenkarzinom:	170 E-6/rem, /16/
Knochenkrebs und Leukämie:	50 E-6/rem, /17/

Lungenkarzinom:	100 E-6/rem, /17/
Mortalität/Grenzkörper:	400 E-6/rem, /18/

Für Risikogruppen wurden keine erhöhten Faktoren benutzt. Bei den drei erst genannten Krebsarten handelt es sich um Krebsinzidenzen. Es wird angenommen /17/, daß ca.

3% der Schilddrüsenkarzinome,
50% der Knochenkrebs und Leukämiefälle,
20% der Lungeninzidenzen

zum Tode führen. Diese tragen - neben den Erkrankungen anderer Organe, deren Häufigkeit nicht berechnet wurde - zur Mortalität bei. Die Häufigkeit des Auftretens genetisch signifikanter Schäden entspricht etwa der des Krebsrisikos.

3.6. Inhalation

3.6.1. Individualdosis

Tabelle 10 gibt die durch Inhalation radioaktiver Stoffe hervorgerufene Strahlenbelastung in 110 km (Wien Süd) vom AKW Dukovany an. Die Inhalationsdosen unterscheiden sich für Erwachsene und Kleinkinder durch verschiedene Atemraten und Dosisfaktoren. Angenommen ist der Aufenthalt im Freien bei leichter Tätigkeit direkt unter der Nuklidwolke. Die Inhalationsdosis ist wesentlich niedriger als in /19/; eine Folge der zugrundegelegten Wetterbedingungen.

Bei Aufenthalt in Gebäuden oder im Randbereich der Wolke vermindert sich die Strahlenbelastung. Bei schwerer körperlicher Arbeit und ungünstigeren Wetterbedingungen sind auch höhere Dosen möglich.

Die Schilddrüse ist - bedingt durch die Jodisotope - der höchsten Strahlenbelastung ausgesetzt. Zur Exposition des Ganzkörpers, der Knochen und der Lunge tragen mehr oder weniger alle Nuklide bei.

Tabelle 11 listet die Inhalationsdosis als Summe über alle Nuklide in Abhängigkeit vom Freisetzungsort auf.

In unmittelbarer Nähe des Unfallortes treten Inhalationsdosen bis 2000 rem auf. Noch in 250 km Entfernung kann die Schilddrüsenexposition eines Kleinkindes bei der angenommenen Wettersituation mehr als 40 rem betragen. Für beruflich strahlenexponierte Personen gelten in Österreich folgende Jahres-Grenzwerte /7/ durch künstlich erzeugte Radioaktivität:

Ganzkörper:	5 rem
Schilddrüsen, Knochen, Gonaden:	30 rem
Lunge:	9 rem

Diese Grenzwerte werden noch in großen Entfernungen allein durch Inhalation überschritten, siehe Tabelle 11, und sind somit unvermeidbar.

3.6.2. Kollektivdosis

In Tabelle 12 sind die allein durch Inhalation zu erwartenden Krebsinzidenzen von Schilddrüse, Knochen und Lunge sowie Krebstoten aufgelistet. Das Stadtgebiet von Wien erstreckt sich von 80 - 120 km. Die Mittelpunkte der zugehörigen Flächen liegen in 90 und 110 km Entfernung vom AKW Dukovany. Wegen der kurzen Reisezeit der Wolke kann die Kollektivdosis nicht gezielt durch Evakuierung reduziert

werden. In der Nacht bildet die Abschirmwirkung von Gebäuden einen gewissen Schutz.

In Wien sind demnach allein aufgrund inhalierter Nuklide ca.

- 200 Todesfälle
- 11.000 Schilddrüsenkarzinome
- 200 Knochenkrebs/Leukämiefälle
- 500 Lungenkrebsfälle

sowie andere hier nicht aufgeführte organische und genetische Erkrankungen zu befürchten.

3.7. Bodenstrahlung

3.7.1. Individualdosis

Die Abnahme der Nuklidkonzentration im Boden wurde in Kap. 3.5.1. dargestellt. Da Gebäude die Bodenstrahlung zum Teil abschirmen, wurde von folgenden Lebensgewohnheiten ausgegangen:

Aufenthalt im Freien: 4 Stunden/Tag, Aufenthalt in Gebäuden mit einem Abschirmfaktor von 5:20 Stunden/Tag. Darüber hinaus wurde für die Bodenunebenheiten ein zusätzlicher Abschirmfaktor von 2 berücksichtigt. Diese Annahmen sind für viele Menschen zu optimistisch gewählt: Für Personen mit überwiegender Tätigkeit im Freien, für Kinder, für Aufenthalt in Gebäuden leichter Bauweise. Tabelle 13 gibt die nuklidspezifische Ganzkörperbestrahlung in 110 km von AKW Dukovany für verschiedene Zeiträume an. Die β -Strahler liefern keinen Beitrag, ab dem 2. Jahr sind praktisch allein die Cs-Isotope für die Bodenstrahlung verantwortlich.

Im 1. Jahr wird der Grenzwert für Personen, die in strahlenexponierten Berufen tätig sind, erreicht. Noch in den darauffolgenden 50 Jahren ist die Bevölkerung einer Bodenstrahlung von ca. 0,32 rem/a ausgesetzt, d. h. der in Österreich geltende Grenzwert von 167 mrem/a für beruflich nicht strahlenexponierte Menschen wird um das Zweifache überschritten. Dennoch dürfte die österreichische Bundesregierung - zumindest in so großer Entfernung vom Unfallort - von einer großflächigen Dekontamination absehen, so daß auch die Gesundheitsgefahren durch Bodenstrahlung als unabdingbar anzusehen sind.

3.7.2. Kollektivdosis

Bei der Berechnung der Kollektivdosis, s. Tabelle 14, wurde beachtet, daß in der CSSR ca. 50 Einwohner/km² (10 und 30 km) und in Wien 3600 Einwohner/km² wohnen. Außerdem fanden die Großstadtverhältnisse Wiens belastungsreduzierend in die Rechnung Eingang. Es wurde angenommen, daß eine Hälfte des Gebiets des Bundeslands Wien versiegelt ist (Gebäude, Straßen, Plätze). Für diesen Teil wurde eine ideale Dekontamination angenommen, d. h. alle Nuklide werden entfernt. Beide Annahmen sind sehr optimistisch.

Die durch die Bodenstrahlung bedingten Todesfälle sind in Tabelle 14 aufgelistet. Es handelt sich um die im 1., 2. und 4.-50. Jahr applizierte Bodenstrahlung, die in den folgenden 50 Jahren zum Tode führt. Die Todesfälle im 3. Jahr entsprechen denjenigen des 2. Jahres, s. Tab. 13.

Für Kleinkinder wurden die gleichen Dosisfaktoren wie für Erwachsene verwendet.

Zusätzlich werden durch die Bodenstrahlung Krebserkrankun-

gen an Organen und Körperteilen verursacht, auf die hier nicht eingegangen wird.

3.8. Ingestion

3.8.1. Individualdosis

Tabelle 15 gibt die Ingestiondosis für 110 km Entfernung vom AKW Dukovany für "Selbsterzeuger" an, d. h. es wurde angenommen, daß alle Nahrungsmittel (Ausnahmen s. Kap. 3.5.2.) aus der näheren Umgebung stammen. Für pflanzliche Produkte wurde ein Dekontaminationseffekt von 25% durch die Zubereitung (z. B. Mahlen von Korn, gründliches Waschen) vorausgesetzt.

Angegeben ist die Belastung für Erwachsene und Kleinkinder (diese trinken ausschließlich Milch, s. Kap. 3.5.3.) für verschiedene Zeiträume, die in Kap. 3.5.1. definiert wurden. Außerdem enthält Tabelle 15 die Anteile der Belastung, die über die Blätter direkt in die Nahrungsmittel (gekennzeichnet durch "OBEN") und die andererseits über die Wurzeln durch Bodentransfer ("UNTEN") in die Nahrungsmittel gelangen. Zum Vergleich ist die Belastung über Bodenstrahlung ("BODEN") angegeben. Sie wirkt auf alle Organe gleichermaßen.

Ab dem 3. Jahr gelangen Nuklide nur noch über die Wurzeln in die Nahrung, weil dann die Ernte des 1. Jahres verzehrt ist. Bis auf die Ganzkörper- und die Schilddrüsendosis im 2. Jahr ist die Strahlenbelastung von Kleinkindern durchweg höher als die von Erwachsenen.

Der Bodentransfer führt zu einer erheblich geringeren Verseuchung der Nahrungsmittel als die direkte Ablagerung der

Nuklide auf den Blättern. Jedoch dauert diese (wesentlich geringere) Belastung über Jahrzehnte an.

Außer für die Schilddrüse von Kleinkindern (deren Dosis im wesentlichen durch die kurzlebigen Jodisotope in der Milch verursacht wird) ist die Strahlenbelastung der anderen Organe über den Bodentransfer im 2. Jahr größer als im 1.. Das findet seine Erklärung in den Annahmen der Kap. 3.5.1. - 3.5.3..

Für einige Organe (Lunge, Schilddrüse) ist die Bodenstrahlung ab dem 3. Jahr von größerer Bedeutung als die Nuklidaufnahme über Lebensmittel.

Die extrem hohe Schilddrüsenbelastung von Kleinkindern im 1. Jahr kommt trotz der Aufnahme von nur 20 l jodkontaminierter Milch zustande. Darauf gründet sich die Empfehlung, rechtzeitige und umfassende Vermarktungsverbote zu erlassen, was nach dem Unfall im AKW Tschernobyl den Behörden in Österreich wesentlich besser gelang, als z. B. in der Bundesrepublik Deutschland. Selbsterzeuger sollten aufgeklärt werden, daß sie ihre Kinder nicht mit Eigenprodukten füttern sollten; denn die unmittelbar nach dem Durchzug der radioaktiven Wolke gewonnenen landwirtschaftlichen Produkte sind besonders hoch belastet, s. Tabelle 3.

3.8.2. Kollektivdosis

In Tabelle 16 sind die Krebsinzidenzen von Schilddrüse, Knochen und Lunge sowie die Krebstoten ("GANZK") angegeben, die in Österreich nach einem Unfall im AKW Dukonavy bei der beschriebenen Wetterlage, Jahreszeit usw. auftreten werden, wenn keine Vermarktungsverbote erlassen werden. Für die Kollektivdosis ist es nahezu unerheblich, ob

die verseuchten landwirtschaftlichen Produkte gleichmäßig über das ganze Bundesgebiet verteilt werden oder lediglich mit unbelasteten Lebensmitteln gemischt werden, bis die geltenden Grenzwerte unterschritten werden. Allerdings stehen im ersten Jahr kaum ausreichende Mengen unbelasteter Nahrungsmittel zur Verfügung, um die z. B. von der FAO empfohlenen Grenzwerte einhalten zu können.

Die für die verschiedenen Zeiträume angegebenen Kollektivdosen beziehen sich auf die in dem genannten Zeitraum applizierte Strahlenbelastung und geben die in den darauffolgenden 50 Jahren zu erwartenden Krebsinzidenzen bzw. Todesfälle an.

Die Kollektivdosen durch Ingestion wurden ermittelt als Summe über alle bestrahlten Nuklide (s. Tabelle 1). Besonders auffällig ist die hohe Schilddrüseninzidenz: 1% der Erwachsenen und jedes 10. Kleinkind Österreichs erkranken aufgrund der im 1. Jahr applizierten Strahlenbelastung an Schilddrüsenkrebs, wenn keine Verzehrerbote erlassen werden. Die Schilddrüsenbelastung der folgenden Jahre fällt dagegen kaum ins Gewicht, auch wenn noch ca. 3000 zusätzliche Schilddrüsenkarzinome auftreten werden.

Die Krebssterblichkeit ("GANZK") durch Ingestion ist zu ca. 90% durch den Verzehr der 1. Ernte bedingt. Zu den in Tabelle 16 genannten ca. 11.000 an Krebs sterbenden Erwachsenen und ca. 900 Krebstoten bei den zum Unfallzeitpunkt lebenden 0-4jährigen Kinder sind noch die durch Bodenstrahlung bedingten Krebstoten, s. Tabelle 14 (ca. 4000 Erwachsene, ca. 300 Kleinkinder) und die durch Einatmen radioaktiver Stoffe bedingten Todesfälle, s. Tabelle 12, hinzuzurechnen.

Ein Vergleich der Tabellen 16 und 14 zeigt, daß ab dem

3. Jahr durch die Bodenstrahlung vergleichbar viele Krebstote verursacht werden wie durch Ingestion.

Auf die ebenfalls in Tabelle 16 genannten Krebserkrankungen des Knochenbaues und der Lunge soll hier nicht weiter Bezug genommen werden. Auf die Karzinombildungen in anderen Organen und die manifestierten genetischen Schäden soll nur hingewiesen werden.

Tabelle 17 gibt die durch Ingestion in Österreich verursachten Krebserkrankungen von Organen und Mortalität an, wenn alle Nahrungsmittel, welche die im Jan. 1987 vorgeschlagenen Grenzwerte der FAP überschreiten, konsequent aus dem Verkehr gezogen werden. Vorausgesetzt wird dabei, daß keine stark verseuchten mit nahezu unbelasteten Produkten vermischt werden und Selbsterzeuger sich "vernünftig" verhalten.

Eine drastische Reduktion der Kollektivdosis über Ingestion ist erreichbar. Die Schilddrüsenkrebserkrankungen bei Kleinkindern können fast auf Null gesenkt werden, bei Erwachsenen um einen Faktor 400. Die unfallbedingte Mortalität ("GANZK") sinkt auf 10%. Dennoch wird eine erhöhte Krebssterblichkeit und Krebsinzidenz auftreten, weil im Randbereich der radioaktiven Wolke erzeugte Lebensmittel unterhalb der Grenzwerte belastet und somit vermarktungsfähig sind. Statistisch werden sie jedoch kaum nachweisbar sein. Im 3. Jahr müssen nur noch geringe Mengen landwirtschaftlicher Produkte aus dem Markt genommen werden, s. Tab. 9, falls die FAO-Grenzwerte auch im 3. Jahr noch gelten (was Verlautbarungen zu Folge jedoch nicht erwogen wird).

Ab dem 4. Jahr werden praktisch keine die Grenzwerte überschreitenden Nahrungsmittel mehr erzeugt, was jedoch bei

anderen als den angenommenen Wetterbedingungen (z. B. Niederschläge) nicht zuzutreffen braucht.

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

Durch ein konsequentes Vernichten der 1. Ernte in dem von der Wolke betroffenen Gebiet können in Österreich ca. 10.000 zusätzliche Krebstote und ebensoviele Schädigungen der Erbanlagen, ca. 100.000 Schilddrüsentumore, ca. 4000 Knochenkarzinom/Leukämiefälle, ca. 700 Lungenkrebsfälle sowie Karzinome anderer Organe vermieden werden.

3.9. Diskussion der Ergebnisse

Die in den Kap. 3.6. - 3.8. mitgeteilten radiologischen Auswirkungen eines AKW-Unfalles in Dukovany auf Österreich ergeben sich aufgrund der in den Kap. 3.3. getroffenen Annahmen. Als wesentliche, die radioaktive Belastung bestimmende Parameter sind zu nennen:

- Freigesetztes Inventar
- Windrichtung
- Wetterlage
- radiologische Parameter
- Gegenmaßnahmen
- Dosis-Faktoren und Dosis-Risikobeziehungen

In der Modellrechnung wurde eine Ausbreitungssituation angenommen, bei der weniger als 4% der freigesetzten Aerosole und rd. 20% der Jodnuklide auf österreichischem Staatsgebiet deponiert werden. Bei Niederschlägen kann es zu einer erheblich höheren Nuklidablagerung kommen. Bei einer anderen als der vorgegebenen Windrichtung würden andere Gebiete Österreichs, oder andere europäische Staaten betroffen sein. Sollte die radioaktive Wolke einen sehr lan-

gen Weg über landwirtschaftlich genutztes und bewohntes europäisches Gebiet nehmen, so sind die gesamten Unfallfolgen ca. 10mal höher als die für Österreich, bei ungünstigen Witterungsbedingungen noch deutlich über diesem Wert.

Ist die Freisetzungsdauer nur kurz, kann eine Evakuierung nicht rechtzeitig erfolgen, und da die Regierung von einer großflächigen Dekontaminierung Abstand nehmen wird, ist die Strahlenbelastung durch Inhalation und Bodenstrahlung praktisch nicht reduzierbar.

Allein die Ingest ionsdosis kann durch administrative Maßnahmen gesenkt werden, und zwar ganz wesentlich. Das ist mit großen Kosten verbunden und erfordert Akzeptanz von Erzeugern und Verbrauchern. Die Verringerung der Kollektivdosen (vergleiche Tabelle 16 und 17) kann - bei dem angenommenen Szenario - als Maximum dessen angesehen werden, was durch Vermarktungsverbote in Österreich erreichbar erscheint. Auf die logistischen Anforderungen sollten die Behörden vorbereitet sein.

Die Werte der Dosisfaktoren bestimmen die Höhe der individuellen Strahlenbelastung. Von den Werten der Dosis-Risiko-Beziehungen hängt die Kollektivdosis ab. In der Literatur werden sowohl höhere als auch niedrigere als die in der hier vorgelegten Rechnung verwendeten Werte genannt.

Die mitgeteilten Individualdosen stellen wegen des o. g. lediglich eine Abschätzung der zu erwartenden Größenordnung dar; denn darüber hinaus haben auch individuelle Gegebenheiten einen erheblichen Einfluß auf die Strahlenbelastung:

- Ernährungsgewohnheiten
- Produktionsweise

- örtliche geographische und klimatische Gegebenheiten
- Strahlenempfindlichkeit
- Alter, Geschlecht usw.

Wie gezeigt, kann durch die Festlegung von Grenzwerten aktiv auf die radiologischen Unfallauswirkungen eingewirkt werden. Die konkreten Maßnahmen laufen letztlich auf eine Abwägung zwischen den Kosten für den wirtschaftlichen Produktionsausfall und der dadurch erzielbaren Reduzierung von Krebskranken und Krebstoten hinaus.

Abschnitt 3 (radiologische Folgen): Tabellenteil

Tabelle 1 befindet sich im Abschnitt 2.

ENTF KM	AEROSOL JOD		AEROSOL JOD	
	ANTEIL		CHI	
	V=0.3 CM/S	V=2 CM/S	V=0.3 S/M**3	V=2 S/M**3
10.	.99	.94	.11E-06	.10E-06
30.	.99	.90	.44E-07	.40E-07
50.	.98	.88	.29E-07	.26E-07
70.	.98	.86	.21E-07	.19E-07
90.	.98	.85	.16E-07	.14E-07
110.	.97	.84	.13E-07	.11E-07
130.	.97	.83	.10E-07	.87E-08
150.	.97	.82	.84E-08	.71E-08
170.	.97	.81	.70E-08	.59E-08
190.	.97	.80	.59E-08	.49E-08
210.	.97	.80	.51E-08	.42E-08
230.	.97	.79	.44E-08	.36E-08
250.	.96	.79	.39E-08	.32E-08
270.	.96	.78	.34E-08	.28E-08
290.	.96	.78	.31E-08	.25E-08
310.	.96	.77	.27E-08	.22E-08

TAB. 2: AUSBREITUNGSFAKTOR UND IN DER
NUKLIDWOLKE VERBLIEBENER ANTEIL
AN JOD UND AEROSOLEN

NUKLID	AUFNAHME UEBER DIE BLAETTER				AUFNAHME UEBER DEN BODEN			
	PFLANZEN	BLATTGEMUESE	MILCH	FLEISCH	PFLANZEN	BLATTGEMUESE	MILCH	FLEISCH
SR 89	.11E+05	.32E+05	.86E+04	.20E+04	.43E+02	.96E+02	.32E+02	.75E+01
SR 90	.13E+04	.16E+04	.53E+03	.16E+03	.14E+02	.14E+02	.58E+01	.17E+01
J 131	.47E+04	.12E+07	.14E+07	.83E+05	.32E+00	.54E+02	.81E+02	.47E+01
J 133	.34E-15	.15E+06	.19E+06	.19E-01	.15E-19	.46E+01	.70E+01	.70E-06
J 135	.10E-59	.66E+04	.80E+04	.19E-16	.45E-64	.19E+00	.29E+00	.70E-21
CS 134	.26E+05	.34E+05	.66E+05	.16E+06	.33E+02	.35E+02	.82E+02	.20E+03
CS 137	.17E+05	.21E+05	.41E+05	.10E+06	.23E+02	.23E+02	.56E+02	.14E+03
PU 239	.63E-01	.77E-01	.13E-05	.18E-03	.43E-06	.43E-06	.87E-11	.12E-08
RU 103	.92E+04	.35E+05	.46E+01	.65E+04	.75E+00	.21E+01	.35E-03	.50E+00
RU 106	.82E+04	.11E+05	.18E+01	.34E+04	.18E+01	.21E+01	.40E-03	.77E+00
TE 132	.11E+00	.60E+05	.15E+04	.99E+04	.37E-03	.14E+03	.41E+01	.28E+02
BA 140	.11E+04	.36E+05	.18E+04	.52E+04	.22E-01	.52E+00	.32E-01	.94E-01

TAB. 3: SPEZIFISCHE NUKLIDGEHALTE AUSGEWAHLTERNAHRUNGSMITTEL
UEBER BLAETTER UND WURZELN IN 110 KM ENTFERNUNG IN BQ/KG
1. JAHR

NUKLID	AUFNAHME UEBER DIE BLAETTER				AUFNAHME UEBER DEN BODEN			
	PFLANZEN	BLATTGEMUESE	MILCH	FLEISCH	PFLANZEN	BLATTGEMUESE	MILCH	FLEISCH
SR 89	.21E+04	0.	.90E+02	.21E+02	.62E+00	.73E+01	.79E+01	.18E+01
SR 90	.13E+04	0.	.18E+03	.53E+02	.41E+02	.41E+02	.67E+02	.20E+02
J 131	.11E+00	0.	.42E-04	.24E-05	.11E-13	.77E-07	.41E-06	.24E-07
J 133	.12E-57	0.	.16E-88	.16E-95	0.	0.	0.	0.
J 135	.13-191	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
CS 134	.24E+05	0.	.18E+05	.44E+05	.65E+02	.77E+02	.69E+03	.17E+04
CS 137	.17E+05	0.	.14E+05	.34E+05	.66E+02	.67E+02	.64E+03	.16E+04
PU 239	.63E-01	0.	.43E-06	.60E-04	.13E-05	.13E-05	.10E-09	.14E-07
RU 103	.10E+04	0.	.16E-01	.23E+02	.23E-02	.58E-01	.31E-04	.44E-01
RU 106	.65E+04	0.	.38E+00	.73E+03	.25E+01	.35E+01	.24E-02	.47E+01
TE 132	.31E-12	0.	.22E-22	.15E-21	0.	0.	0.	0.
BA 140	.15E+01	0.	.43E-03	.13E-02	.15E-09	.25E-05	.52E-06	.15E-05

TAB. 4: SPEZIFISCHE NUKLIDGEHALTE AUSGEWAHLTERNAHRUNGSMITTEL
UEBER BLAETTER UND WURZELN IN 110 KM ENTFERNUNG IN BQ/KG
2. JAHR

NUKLID	AUFNAHME UEBER DIE BLAETTER				AUFNAHME UEBER DEN BODEN			
	PFLANZEN	BLATTGEMUESE	MILCH	FLEISCH	PFLANZEN	BLATTGEMUESE	MILCH	FLEISCH
SR 89	0.	0.	0.	0.	.25E-01	.56E-01	.15E-01	.34E-02
SR 90	0.	0.	0.	0.	.40E+02	.40E+02	.16E+02	.49E+01
J 131	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
J 133	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
J 135	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
CS 134	0.	0.	0.	0.	.53E+02	.56E+02	.13E+03	.32E+03
CS 137	0.	0.	0.	0.	.65E+02	.65E+02	.16E+03	.39E+03
PU 239	0.	0.	0.	0.	.13E-05	.13E-05	.26E-10	.36E-08
RU 103	0.	0.	0.	0.	.34E-04	.98E-04	.12E-07	.17E-04
RU 106	0.	0.	0.	0.	.16E+01	.18E+01	.33E-03	.64E+00
TE 132	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
BA 140	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

TAB. 5: SPEZIFISCHE NUKLIDGEHALTE AUSGEWAHLTERNAHRUNGSMITTEL
UEBER BLAETTER UND WURZELN IN 110 KM ENTFERNUNG IN BQ/KG
3. JAHR

NUKLID	AUFNAHME UEBER DIE BLAETTER				AUFNAHME UEBER DEN BODEN			
	PFLANZEN	BLATTGEMUESE	MILCH	FLEISCH	PFLANZEN	BLATTGEMUESE	MILCH	FLEISCH
SR 89	0.	0.	0.	0.	.19E-03	.43E-03	.11E-03	.26E-04
SR 90	0.	0.	0.	0.	.12E+04	.12E+04	.48E+03	.14E+03
J 131	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
J 133	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
J 135	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
CS 134	0.	0.	0.	0.	.13E+03	.14E+03	.33E+03	.81E+03
CS 137	0.	0.	0.	0.	.19E+04	.19E+04	.46E+04	.12E+05
PU 239	0.	0.	0.	0.	.62E-04	.62E-04	.13E-08	.18E-06
RU 103	0.	0.	0.	0.	.58E-07	.17E-06	.20E-10	.29E-07
RU 106	0.	0.	0.	0.	.17E+01	.19E+01	.35E-03	.67E+00
TE 132	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
BA 140	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

TAB. 6: SPEZIFISCHE NUKLIDGEHALTE AUSGEWAHLTERNAHRUNGSMITTEL
UEBER BLAETTER UND WURZELN IN 110 KM ENTFERNUNG IN BQ/KG
4-50 JAHR

NUKLID	GETREIDE	BLATTGEMUESE	MILCH	FLEISCH
SR 90			3	
J 131		25000	550	
CS 134	70			220
CS 137	100	3700	300	330

TAB. 7: BELASTUNG VON NAHRUNGSMITTELN IN OESTERREICH
IM JAHR 1986 IN BQ/KG NACH /3/

NUKLID	PFL.PRODUKTE	BLATTGEMUESE	MILCH	FLEISCH	ALLE LEBENSMITTEL
SR 89	(1400)	(1400)	(1400)	(1400)	(7000)
SR 90	(14)	(14)	(14)	(14)	70
J 131	74	74	185	74	400
J 133	(270)	(270)	(675)	(270)	(1540)
J 135	(880)	(880)	(2200)	(880)	(5030)
CS 134	65	65	110	150	350
CS 137	110	110	185	200	500
PU 139	-	-	-	-	10

TAB. 8: GRENZWERTE FUER NAHRUNGSPRODUKTE IN BQ/KG
WERTE IN KLAMMERN: IM MODELL ZUSAETZLICH VERWENDETE WERTE

Landwirt. Produkt	Österreich (Nov. 1986)		FAO (Jan.1987)
	1. Ernte	3. Ernte*	3. Ernte
Weizen	240.000	80.000	0
Roggen	60.000	20.000	0
Gerste	240.000	80.000	0
Hafer	24.000	5.000	0
Körnermais	240.000	80.000	0
Kartoffeln	160.000	50.000	0
Zuckerrüben	400.000	150.000	0
Äpfel	32.000	10.000	0
Kirschen	3.000	1.000	0
Pfirsiche	2.000	1.000	0
Aprikosen	2.000	1.000	0
Walnüsse	1.000	400	0
Birnen	5.000	2.000	0
Zwetschen u.ä.	9.000	3.000	0
Ribiseln r.+w.	1.500	500	0
Ribiseln schw.	1.200	400	0
Erdbeeren	1.500	500	0
Fleisch	60.000	12.000	6.000
Milch	180.000	30.000	0

Tab. 9: Mengen landw. Produkte, die oberhalb der
Grenzwerte belastet sind
Angaben in Tonnen

* rd. 1/3 der 1. Ernte (bis auf Milch und Fleisch)

NUKLID	INH ERW		INH KLEINKIND		INH ERW		INH KLEINKIND	
	GANZK	SCHILDD	GANZK	SCHILDD	KNOCHEN	LUNGE	KNOCHEN	LUNGE
SR 89	.40E-010		.67E-030		.16E+01	.77E+00	.24E-01	.13E+01
SR 90	.15E+000		.19E-010		.17E+01	.16E+00	.31E+00	.36E+00
J 131	.93E-01	.56E+02	.15E+00	.10E+03	.93E-01	.84E+00	.22E+00	.15E+00
J 133	.44E-01	.25E+02	.56E-01	.44E+02	.44E-01	.33E+00	.13E+00	.56E-01
J 135	.10E-01	.54E+01	.14E-01	.93E+01	.10E-01	.94E-01	.30E-01	.14E-01
CS 134	.23E+00	.23E+00	.36E-01	.36E-01	.14E+00	.16E+01	.24E+00	.47E-01
CS 137	.69E-01	.69E-01	.13E-01	.13E-01	.12E+00	.83E+00	.21E+00	.29E-01
PU 239	.10E-020		.90E-040		.52E-01	.16E-02	.36E-02	.22E-02
RU 103	.36E-02	.36E-02	.36E-04	.36E-04	.87E-02	.29E+00	.10E-03	.35E+00
RU 106	.26E-020		.19E-030		.24E-01	.12E+01	.16E-02	.26E-02
TE 132	.39E-01	.12E+00	.68E-04	.11E-03	.12E+00	.87E+00	.14E-03	.16E+01
BA 140	.42E-01	.42E-01	.27E-03	.27E-03	.62E+00	.87E+00	.53E-02	.15E+01

TAB. 10: NUKLIDSPEZIFISCHE INHALATIONSODOSIS FUER
AUSGEWAHLTE ORGANE IN 110 KM ENTFERNUNG IN REM
INH: INHALATION, ERW: ERWACHSENE

ENTF KM	INH ERW		INH KLEINKIND		INH ERW		INH KLEINKIND	
	GANZK	SCHILDD	GANZK	SCHILDD	KNOCHEN	LUNGE	KNOCHEN	LUNGE
10.	6.6	917.8	2.9	1631.2	39.9	70.9	10.8	47.9
30.	2.6	345.2	1.1	613.5	15.9	28.0	4.2	19.0
50.	1.7	215.0	.7	382.1	10.3	18.0	2.7	12.3
70.	1.2	153.3	.5	272.4	7.6	13.2	2.0	9.0
90.	.9	113.3	.4	201.4	5.8	10.1	1.5	6.9
110.	.7	86.7	.3	154.0	4.6	7.9	1.2	5.4
130.	.6	68.2	.2	121.1	3.7	6.3	.9	4.3
150.	.5	54.5	.2	96.9	3.0	5.1	.8	3.5
170.	.4	44.4	.2	78.9	2.5	4.3	.6	2.9
190.	.3	36.8	.1	65.4	2.1	3.6	.5	2.5
210.	.3	30.9	.1	54.9	1.8	3.1	.4	2.1
230.	.2	26.3	.1	46.7	1.6	2.7	.4	1.8
250.	.2	22.5	.1	40.1	1.4	2.3	.3	1.6

TAB. 11: INHALATIONSODOSIS FUER AUSGEWAHLTE ORGANE
ALS FUNKTION DER QUELLENTFERNUNG IN REM
SUMME ALLER NUKLIDE
INH: INHALATION, ERW: ERWACHSENE

	INH ERW		INH KLEINKIND		INH ERW		INH KLEINKIND	
	GANZK	SCHILDD	GANZK	SCHILDD	KNOCHEN	LUNGE	KNOCHEN	LUNGE
10.	3.	194.	0.	24.	3.	9.	0.	1.
30.	3.	190.	0.	22.	3.	8.	0.	1.
50.	6.	340.	0.	42.	5.	17.	0.	1.
70.	6.	321.	0.	39.	5.	16.	0.	1.
90.	102.	5254.	3.	606.	79.	275.	1.	12.
110.	94.	4749.	2.	547.	73.	253.	1.	11.
130.	5.	238.	0.	29.	4.	13.	0.	1.
150.	4.	214.	0.	26.	3.	12.	0.	1.
170.	4.	194.	0.	24.	3.	11.	0.	1.
190.	4.	176.	0.	21.	3.	10.	0.	0.
210.	3.	161.	0.	20.	3.	9.	0.	0.
230.	3.	147.	0.	18.	3.	9.	0.	0.
250.	3.	135.	0.	17.	2.	8.	0.	0.

TAB. 12: DURCH INHALATION INDUZIERTES TODESFAELLE
UND KREBSERKRANKUNGEN AUSGEWAELTER ORGANE
ALS FUNKTION DER QUELLENTFERNUNG
INH: INHALATION, ERW: ERWACHSENE

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	4.-50. Jahr
SR 89	0.	0.	0.	0.
SR 90	0.	0.	0.	0.
J 131	.15E+01	.11E-08	0.	0.
J 133	.34E+00	0.	0.	0.
J 135	.31E+00	0.	0.	0.
CS 134	.13E+01	.14E+01	.10E+01	.26E+01
CS 137	.30E+00	.44E+00	.43E+00	.13E+02
PU 239	.49E-08	.73E-08	.73E-08	.36E-06
RU 103	.15E+00	.21E-02	.35E-05	.60E-08
RU 106	.52E-01	.44E-01	.22E-01	.23E-01
TE 132	0.	0.	0.	0.
BA 140	.31E-01	.73E-07	0.	0.

TAB. 13: NUKLIDSPEZIFISCHE BELASTUNG DURCH BODENSTRAHLUNG
FUEHR VERSCHIEDENE ZEITRAUEME IN 110 KM ENTFERNUNG
IN REM

	1. Jahr		2. Jahr		4.-50. Jahr	
ENTF KM	ERW	KK	ERW	KK	ERW	KK
10.	20.	2.	8.	1.	65.	5.
30.	19.	2.	8.	1.	129.	9.
50.	36.	2.	16.	1.	128.	9.
70.	34.	2.	16.	1.	124.	9.
90.	282.	19.	133.	9.	1060.	73.
110.	257.	18.	123.	8.	982.	67.
130.	26.	2.	13.	1.	101.	7.
150.	24.	2.	12.	1.	93.	6.
170.	22.	1.	11.	1.	86.	6.
190.	20.	1.	10.	1.	80.	6.
210.	18.	1.	9.	1.	75.	5.
230.	17.	1.	9.	1.	70.	5.
250.	16.	1.	8.	1.	66.	5.

TAB. 14: DURCH BODENSTRAHLUNG VERURSACHTE TODESFAELLE
ALS FUNKTION DER ENTFERNUNG
IM 1., 2., UND 4. - 50. JAHR
ERW: ERWACHSENE, KK: KLEINKINDER

Die Werte für das 3. Jahr sind - abgesehen
von Abweichungen von wenigen Prozent -
gleich denen für das 2. Jahr

Jahr	ING ERW GANZK	OBERN SCHILDD	ING KLEINKIND GANZK	OBERN SCHILDD	INH ERW GANZK	SCHILDD	INH KLEINKIND GANZK	SCHILDD	ING ERW GANZK	UNTEN SCHILDD	ING KK GANZK	UNTEN SCHILDD	BODEN
1	65.4	1588.2	84.3	16885.3	.7	86.7	.3	154.0	.1	.6	.3	7.6	4.0
2	48.7	39.4	25.2	15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	1.0	4.3	.6	1.9
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.6	.2	1.0	.1	1.5
4.-50.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0	3.4	27.9	1.8	15.2

Jahr	ING ERW KNOCHEN	OBERN LUNGE	ING KLEINKIND KNOCHEN	OBERN LUNGE	INH ERW KNOCHEN	SCHILDD	INH KLEINKIND KNOCHEN	SCHILDD	ING ERW KNOCHEN	UNTEN LUNGE	ING KK KNOCHEN	UNTEN LUNGE	
1	155.2	17.1	575.4	80.5	4.6	7.9	1.2	5.4	.9	.0	1.8	.1	1
2	145.8	10.2	185.0	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	.3	20.6	1.0	98
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	.1	4.9	.2	1
4.-50.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	118.8	.8	128.5	3.7	

TAB. 15: INGESTIONSDOSIS IN VERSCHIEDENEN ZEITRAUMEN
IN 110 KM ENTFERNUNG IN REM
OHNE VERMARKTUNGSVERBOTE
ING: INGESTION, ERW: ERWACHSENE

Jahr	GANZK ERW	SCHILDD ERW	GANZK KK	SCHILDD KK	KNOCHEN ERW	LUNGE ERW	KNOCHEN KK	LUNGE KK
1	5633.	58766.	501.	42948.	1676.	369.	426.	119.
2	4321.	1474.	174.	40.	1649.	225.	152.	38.
3	52.	9.	6.	0.	45.	1.	4.	0.
4	1205.	126.	164.	5.	1275.	17.	95.	5.
1 - 50	11211.	60374.	845.	42993.	4645.	612.	676.	163.

TAB. 16: KREBSFAELLE IN VERSCHIEDENEN ZEITRAUEMEN
IN OESTERREICH DURCH INGESTION
OHNE VERMARKTUNGSVEBOTE
ERW: ERWACHSENE, KK: KLEINKINDER

- 87 -

Jahr	GANZK ERW	SCHILDD ERW	GANZK KK	SCHILDD KK	KNOCHEN ERW	LUNGE ERW	KNOCHEN KK	LUNGE KK
1	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
2	30.	11.	4.	0.	41.	0.	2.	0.
3	23.	3.	2.	0.	24.	0.	1.	0.
4	1205.	126.	164.	5.	1275.	17.	95.	5.
1 - 50	1258.	139.	171.	5.	1340.	17.	98.	6.

TAB. 17: KREBSFAELLE IN VERSCHIEDENEN ZEITRAUEMEN
IN OESTERREICH DURCH INGESTION
VERMARKTUNGSVEBOTE NACH FAO
ERW: ERWACHSENE, KK: KLEINKINDER

Anhang zu Abschnitt 3: Ergänzende Angaben zum Strahlenrisiko:

Sämtliche zahlenmäßigen Abschätzungen der Folgen einer unfallbedingten Bestrahlung von Menschen sind mit Unsicherheiten behaftet. So können auch die hier angegebenen Zahlenwerte für Krebserkrankungen und -todesfälle nur als Richtwerte genommen werden; die tatsächlichen Auswirkungen können auch deutlich höher liegen. Dies liegt nicht daran, daß die hier verwendete Methodik zur Folgenabschätzung unzulänglich wäre; es liegt vielmehr an groben noch bestehenden Wissenslücken bei der wissenschaftlichen Untersuchung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen. Diese bestehen schon im Hinblick auf die krebserzeugende Wirkung; und in noch stärkerem Maße bei den genetischen Schäden. Aufgrund der großen Bedeutung dieses Themas folgen einige grundsätzliche Erläuterungen über den Kenntnisstand zum Strahlenrisiko

Ionisierende Strahlung wirkt schädigend auf den Menschen. Bei sehr hoher Dosis (500 rem Ganzkörperdosis und mehr) tritt innerhalb von kurzer Zeit nach der Bestrahlung der Tod ein. Bestrahlung im Bereich von 100 rem führt - ungeachtet der Spätfolgen - zu Strahlenfrühschäden wie Darmerkrankungen und Schilddrüsenentzündungen. Niedrige Dosen (weniger als 50 rem) erzeugen mit einer von der Strahlungsintensität abhängigen Wahrscheinlichkeit Tumore und genetische Effekte sowie oberhalb einer bestimmten Dosischwelle weitere Schäden. Vorgeburtliche Bestrahlung führt neben Krebs zu Mißbildungen, Wachstums- und Entwicklungsstörungen.

Einer allgemein üblichen Einteilung zufolge lassen sich stochastische und nichtstochastische Strahlenschäden unterscheiden. Nichtstochastische, also nicht-zufällige Strahlenschäden, treten erst oberhalb eines bestimmten Schwellenwertes auf und sind in ihrem Ausmaß von der Dosis abhängig. Dazu gehören Katarakte (Trübungen der Augenlinse), Kapillarschäden der Haut und Beeinträchtigungen der Fruchtbarkeit. Für stochastische (zufällige) Strahlenschäden gilt dagegen, daß mit zunehmender Dosis die Wahrscheinlichkeit des Auftretens ansteigt. Es existiert kein Schwellenwert, unterhalb dessen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens solcher Schäden wie Krebserkrankungen oder Erbgutveränderungen Null beträgt.

1. Genetische Strahlenschäden

Mutationen in den Keimzellen, also Veränderungen des Erbmateri- als, durch ionisierende Strahlung gehören zu den stochastischen Strahlenschäden, deren Folgen - anders als bei somatischen Effekten - nicht am bestrahlten Menschen selbst sichtbar werden. Im Gegensatz zu den strahleninduzierten Krebsfolgen ist die Datenbasis in diesem Bereich sehr schmal, und die Risikoabschätzungen für den Menschen basieren weitgehend auf tierexperimentellen Be-

funden (Drosophila, Maus). Die Spanne genetischer Schäden reicht von spontanem Abort über schwere Mißbildungen und Enzymdefekte bis hin zu Veränderungen, die für das Individuum ohne nachteilige Folgen sind. Ionisierende Strahlung führt zu einer Erhöhung der spontanen Mutationsrate - ein Vorgang, der nach Ansicht der meisten Genetiker als für die Folgegenerationen nachteilig angesehen wird (vergl. z. B. /20/).

Es ist methodisch sehr schwierig, Erbgutschädigungen quantitativ zu erfassen. Als Gründe dafür sind vor allem zu nennen:

- bei der Abschätzung der Spontanrate bestehen große Unsicherheiten (vergleiche Tabelle 1)
- wir besitzen nur unvollkommene Kenntnis darüber, welche Krankheiten genetisch bedingt sind oder eine erbliche Komponente aufweisen
- nur bei bestimmten Vererbungsarten werden die Schäden bereits in der 1. Folgegeneration sichtbar
- die Technik zum Nachweis von kleinsten Veränderungen ist unvollkommen.

Die Einteilung der im folgenden beschriebenen Vererbungsmodi folgt der Klassifikation des BEIR-Reports von 1980 /20/.

Bei autosomal dominanten Erbkrankheiten führt der Ausfall eines Gens zur Krankheit. Zur Zeit sind einige hundert gut definierte Erbanomalien mit dominantem Erbgang bekannt. Dazu gehört z. B. die Polydactylie (zusätzliche Finger oder Zehen).

Befindet sich das entsprechende Gen auf dem X-Chromosom, spricht man von geschlechtsgebundenen Erbkrankheiten. Beispiele für diese nur bei Männern auftretenden Anomalien sind die Bluterkrankheit oder die Rot-Grün-Farbenblindheit.

Für die Ausprägung von rezessiven Erbkrankheiten müssen beide Gene, die des Vaters und der Mutter, Ausfälle zeigen. Die Krankheit oder Stoffwechselstörung tritt erst dann auf, wenn zwei veränderte Gene zusammentreffen und auf diese Weise den Verlust der Aktivität von Enzymen oder Rezeptor- bzw. Transportproteinen verursachen (Beispiel: Phenylketonurie). Das kann jedoch sehr viele Generationen dauern. Allerdings stellt sich häufig bei genauerer Untersuchung heraus, daß die Krankheit nur in erster Näherung rezessiv vererbt wird und auch bei Heterozygoten verminderte Aktivität zu beobachten ist.

Bei Untersuchungen von Mäusen wurde für strahlen- und chemoinduzierte Mutationen ein Verhältnis dominant zu rezessiv von 1:10 gefunden /21/ - ein Hinweis darauf, daß das Ausmaß der rezessiven Erbkrankheiten bisher möglicherweise unterschätzt worden ist.

Unter chromosomalen Schäden versteht man mikroskopisch sichtbare Veränderung der Chromosomenstruktur als Folge von Brüchen und

Austausch (strukturelle Chromosomenabberationen) und Veränderungen der Chromosomenzahl (numerische Chromosomenabberationen). Bekanntestes Beispiel ist die Trisomie 21 (Down Syndrom), die zu schweren Schäden - geistige und körperliche Retardierung - führt. Die vorliegenden Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Strahlenbelastung und Trisomie 21 sind widersprüchlich. Während bei den Kindern der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki kein erhöhtes Auftreten beobachtet werden konnte, wurde an der irischen Westküste bei zwischen 1963 und 1972 geborenen Kindern eine ungewöhnliche Häufung festgestellt. Ein Zusammenhang mit dem Unfall in der Wiederaufarbeitungsanlage Windscale im Jahre 1957 kann vermutet werden /22/.

Multifaktoriell bedingte Erbkrankheiten (polygene oder irreguläre Vererbung): Die Ausbildung einer Reihe von Merkmalen wird nicht nur von einer Erbanlage, sondern durch additive Wirkung von mehreren Genen gesteuert (polygen). Ausfälle eines davon können für das Auftreten verschiedenster Krankheiten verantwortlich sein bzw. für Dispositionen zu Krankheiten, die sich erst im Lauf des Lebens in Abhängigkeit von bestimmten äußeren und inneren Einflüssen manifestieren. Eine Reihe von Mißbildungen (die etwa ein Drittel aller Erbschäden darstellen) sind bereits als polygen bedingt identifiziert worden, z. B. Klumpfuß und Lippengaumenspalte. Problematisch wird die Einschätzung bei den Krankheiten, die sich erst in späteren Lebensjahren z. B. aufgrund von Umwelteinflüssen ausprägen. Im BEIR I Report von 1972 - Grundlage für spätere Abschätzungen dieses Gremiums - werden beispielsweise Anämie, Diabetes, Schizophrenie und Epilepsie zu den polygen vererbten Krankheiten gerechnet; es ist jedoch bekannt, daß auch Herzkrankheiten, Allergien (Asthma, Heuschnupfen) oder Schwäche des Immunsystems (Disposition zu Infektionskrankheiten und zu Tumoren) eine genetische Komponente enthalten.

Der Genetiker Adam schätzt die Situation folgendermaßen ein: "Diese Art von Erbschäden ist auch Teilursache der gewöhnlichen Krankheiten und bestimmt damit unsere allgemeine Lebensfähigkeit. ... Man kann daher bildlich sagen, die etwa 1% aller Geburten mit monogenischen Erbschäden sind nur die Spitze des Eisbergs an Erbschädigung, der sich bei den polygenischen Mutationen sozusagen in der Tiefe der graduellen Abstufung im 'Normalen' verliert, also nicht mehr leicht zu erfassen ist." /23/

Quantifizierung von Erbschäden: Eine häufig verwendete Methode zur Abschätzung des strahlengenetischen Risikos ist die Angabe der Verdopplungsdosis; das ist die Dosis, die innerhalb einer Generation die Spontanrate von Erbveränderungen verdoppelt. In BEIR III wird von einer Verdopplungsdosis von 50-250 rem, in UNSCEAR 1982 von 100 rem ausgegangen.

In Tabelle 1 sind verschiedene Schätzungen zur gegenwärtigen Häufigkeit des spontanen Auftretens von Erbkrankheiten aufgeführt, jeweils bezogen auf 1 Million Lebendgeburten.

Klassifikation der Erbkrankheiten	UNSCEAR	BEIR	Bertell
Autosomal dominant und geschlechtsgebunden	10.000	10.000	10.000
Rezessiv			
-homozygot	1.100	1.100	1.100
-heterozygot	-	-	64.900
Chromosomenabberationen	3.400	6.000	4.000 - 6.000
Irreguläre Vererbung	90.000	90.000	90.000 - 450.000
Gesamthäufigkeit	105.900	107.100	170.000 - 532.000

Tabelle 1: Spontane Häufigkeit von Erbkrankheiten pro 1 Million Lebendgeburten /20, 24, 25/.

Tabelle 2 zeigt das geschätzte strahlengenetische Risiko im Gleichgewicht, wenn eine Generation mit 100 rem (locker ionisierende Strahlung) bestrahlt wird. Die z. T. erheblichen Differenzen beruhen auf unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Spontanrate, der Verdopplungsdosis und des genetisch bedingten Anteils an irregulär vererbten Krankheiten.

Klassifikation der Erbkrankheiten	UNSCEAR	BEIR	Bertell
Autosomal dominant und X-gebunden	10.000	4.000 - 20.000	4.000 - 83.000
Rezessiv			
-homozygot	sehr geringer Anstieg	sehr geringer Anstieg	900 - 18.300
-heterozygot	-	-	26.000 - 538.700
Chromosomenabberationen	400	Anstieg nur gering	1.600 - 49.800
Irreguläre Vererbung	4.500	2.000 - 90.000	18.000 - 1.870.000
Gesamthäufigkeit	14.900	6.000 - 110.000	50.000 - 2.560.000

Tabelle 2: Geschätztes strahlengenetisches Risiko (zusätzliche Erbkrankheiten) durch 100 rem pro Generation pro 1 Million Lebendgeburten im Gleichgewicht /20, 24, 25/.

Diese großen Spannbreiten illustrieren deutlich, wie wenig wir über die Auswirkungen ionisierender Strahlung auf das Erbgut wissen. Zuverlässige Aussagen über das genetische Risiko sind nach dem heutigen Kenntnisstand nicht möglich.

Daß diese Schäden erst in späteren Generationen offenbar werden können, läßt die Unsicherheiten umso schwerer wiegen.

2. Strahlenkrebs

Während viele Jahrzehnte lang die genetischen Strahlenschäden als die bedeutsamsten angesehen wurden, ist seit den 60er Jahren zunehmend die Krebsinduktion durch ionisierende Strahlung im Bereich niedriger Dosen als ebenso wichtig erkannt worden. Mittlerweile liegen sehr viele Befunde aus diesem Bereich vor. Sie beruhen im wesentlichen auf den Untersuchungen folgender Personengruppen:

- Überlebende der Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki
- Kinder, die vorgeburtlich bestrahlt wurden
- Patienten, die aus medizinischen Gründen bestrahlt wurden
- beruflich strahlenexponierte Personen
- Menschen, die dem Fallout von Atombombenversuchen ausgesetzt waren.

Trotz dieser umfangreichen Datenbasis wird die Höhe der zu erwartenden Spätschäden auch innerhalb wissenschaftlicher Gremien sehr kontrovers abgeschätzt. Dies liegt u. a. darin begründet, daß unser heutiges Wissen über die Entstehung von Krebs immer noch sehr dürftig ist, und daß die Induktion einer Krebserkrankung abhängt von vielen Faktoren wie Alter und Geschlecht, der Strahlenempfindlichkeit des betroffenen Organs und der biologischen Wirksamkeit der Strahlung. Allerdings drängt sich die Vermutung auf, daß ein erbitterter Streit um einen Faktor 2 oder 4 im biologisch-medizinischen Bereich nicht mehr nur allein aus wissenschaftlichen Differenzen heraus begründet werden kann, sondern eher politische und wirtschaftliche Hintergründe hat.

Beispielhaft soll hier die Auseinandersetzung um das Zustandekommen des 1980 erschienenen Reports der amerikanischen Akademie der Wissenschaften, BEIR III, angeführt werden. Unter den Mitgliedern des ursprünglichen Komitees konnte keine Einigung darüber erzielt werden, ob die Dosis-Wirkungs-Beziehung für locker ionisierende Strahlung mit einem linearen oder mit einem linear-quadratischen Verlauf zu beschreiben sei - ein Streit, der deshalb von großer Bedeutung ist, weil sich mit der Annahme eines linear-quadratischen Verlaufs eine Reduktion des Krebsrisikos um den Faktor 2 bis 3 im Bereich niedriger und mittlerer Dosis ergibt (unterhalb von 100 rem).

In der ersten, 1979 vorliegenden Version war das Komitee unter Annahme einer linearen Beziehung ohne Schwellenwert zu wesentlich höheren Gefahrenangaben gekommen als beispielsweise die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP (vergleiche Tabelle 3). Nachdem jedoch vom Präsidenten der Akademie eine veränderte personelle Zusammensetzung vorgenommen worden war, kam das Komitee unter Zugrundelegung der linear-quadratischen Dosis-Wirkungs-Beziehung wieder zu kleineren Schätzungen für das Krebsrisiko.

Aufgrund der vorliegenden empirischen Daten, auch derjenigen aus Hiroshima (nach der Dosisrevision) und aus Nagasaki, auf die sich die internationalen wissenschaftlichen Gremien wesentlich stützen, läßt sich heute die Dosiswirkungsabhängigkeit am besten durch einen linearen Verlauf beschreiben. Die Annahme eines Reduktionsfaktors - und damit einer geringeren Strahlenwirkung - im Bereich von Dosen kleiner als 100 rem ist deshalb nicht angemessen. Diese Einschätzung vertritt auch E. P. Radford, ursprünglich Vorsitzender des BEIR-Gesamtkomitees und des Unterkomitees für somatische Effekte /18/. Weiterhin ist er der Ansicht, daß die gängigen Risikoabschätzungen fehlerhaft sind, weil sie nur die Mortalität (Sterblichkeit), nicht aber die Inzidenz (Auftreten) von Karzinomen berücksichtigen. Radford kommt so zu Risikoangaben, die - gemittelt über beide Geschlechter - um ein fünffaches über den Angaben der ICRP liegen.

Tabelle 3 stellt Schätzungen verschiedener wissenschaftlicher Gremien bzw. Autoren zum gesamten somatischen Strahlenrisiko für Krebs und Leukämie durch locker ionisierende Strahlung zusammen. Angegeben wird das absolute Risiko, also die Anzahl der durch die Bestrahlung bedingten zusätzlichen Krebsfälle (Todesfälle oder Erkrankungen) pro 1 Million Personen-Rem (10^4 Personen-Sv). Wie ersichtlich, differieren die Angaben in einem weiten Bereich. (Bei RERF handelt es sich um das japanisch-amerikanische Forschungsinstitut Radiation Effects Research Foundation, vormals die Atomic Bomb Casualty Commission.)

Leukämie hat von allen Krebsarten die kürzeste Latenzzeit (ca. 5 bis 10 Jahre) und galt deshalb lange Zeit als einzige Strahlen-spätfolge. Für strahleninduzierte Leukämie existieren Untersuchungen über eine Vielzahl von Altersgruppen und Menschen unterschiedlicher Nationalität. In mehreren Studien wurde beobachtet, daß werdendes Leben besonders strahlenempfindlich ist: Im Mutterleib bestrahlte Kinder wiesen eine vielfach höhere Leukämie-sterblichkeit auf, verglichen mit dem "Durchschnitt". Auch für Kinder besteht ein erhöhtes Risiko. In Tabelle 4 sind - z. T. erheblich differierende - Risikoangaben für die Krebsgefahr nach einer Bestrahlung des roten Knochenmarks (Leukämie) aufgeführt.

Bestrahlung der empfindlichen Zellen der Knochenoberfläche kann zu Knochenkrebs führen. Für locker ionisierende Strahlung sind die Angaben von ICRP-26 /27/ (5 Todesfälle pro 1 Million Personen-Rem) und Bertell /25/ (2 bis 8 Fälle pro 1 Million Personen-Rem) nahezu identisch.

Tabelle 3: Schätzungen zum somatischen Strahlenrisiko (Krebs und Leukämie) für locker ionisierende Strahlung

Quelle	Fälle pro 1 Million Personen pro rem	Bemerkungen
<u>MORTALITÄT</u>		
BEIR 1972 /26/	180 (Bereich 90-450)	
UNSCEAR 1977 /26/	300 100	für hohe Dosis für niedrige Dosis
ICRP 1977 /27/	125	alle Altersklassen; linear-quadratische Dosis-Wirkungs-Beziehung
GRS 1980 /1/	70-200	
Schmitz-Feuer- hake 1981 /28/	300 (150-750)	
Stewart 1970 /30/	600	bei Bestrahlung "in utero"
BEIR 1980 /20/	67-226 158-501	linear-quadr. Modell linear ohne Schwellenwert
RERF Life Span Study 1950-78, Atombombenüber- lebende, alte Dosisabschät- zung /29/	115	
RERF Life Span Study 1950-78, Atombombenüber- lebende mit Do- sisrevision /29/	230	
<u>INZIDENZ</u>		
BEIR 1972 /26/	360 (Bereich 180-1000)	
Schmitz-Feuer- hake 1979 /26/	600 (Bereich 300-1500)	
Radford 1983 /18/	800	
Bertell 1986 /25/	549-1648	

Tabelle 4: Risikoschätzungen für strahleninduzierte Leukämie bei Kindern und Erwachsenen

Quelle	Fälle pro 1 Million Personen pro rem	Bemerkungen
<u>MORTALITÄT</u>		
BEIR 1972 /28/	50 25	für <10 J. bei Bestrahlung für >10 J. bei Bestrahlung
UNSCEAR 1977 /28/	15-25	
ICRP 1977 /27/	20	gemittelt über alle Altersklassen
GRS 1980 /1/	10-40	
Stewart 1970 /30/	50-150	
Stewart 1970 /30/	300	bei Bestrahlung im Mutterleib
Bross 1972 /30/	300-3000	bei Bestrahlung im Mutterleib
Schmitz-Feuer- hake 1981 /28/	60 (Bereich 40-120)	innerhalb von 30 Jahren nach Bestrahlung
<u>INZIDENZ</u>		
Bertell 1986 /25/	25-85 20-48	Altersgruppe 0-9 Jahre gemittelt über alle Altersklassen

Das Risiko für Lungenkrebs nach Bestrahlung wird von Bertell mit 25 bis 150 Fällen (Inzidenz) pro 1 Million Personen-Rem abgeschätzt; der in ICRP 26 angegebene Wert (20 Todesfälle) stützt sich auf ältere Untersuchungen. Im Zeitraum 1975 - 1978 hat die Anzahl der Lungenkrebsfälle unter den Atombombenopfern in Japan den bisher höchsten Stand erreicht. Man muß also mit einer mittleren Latenzzeit von über 33 Jahren rechnen /31/.

Die Schilddrüse gehört zu den strahlenempfindlichsten Organen des menschlichen Körpers. Bösartige und gutartige Tumore sowie Erkrankungen (Schilddrüsenentzündungen, Unterfunktion u. a.) konnten bei vielen Menschen nach Bestrahlung festgestellt werden. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schilddrüsentumors ist entsprechend sehr hoch. Im UNSCEAR Report von 1977 werden 100 Fälle pro 1 Million Personen-Rem angegeben; Schmitz-Feuerhake /16/ schätzt 170 Fälle (Bereich 50-440) pro 1 Million Personen-Rem. Dagegen ist das Mortalitätsrisiko relativ gering, was hauptsächlich auf die Möglichkeiten erfolgreicher medizinischer Behandlung zurückzuführen ist. In /17/ wird angenommen, daß 3% der Erkrankten sterben; andere Autoren gehen von 5 - 10% aus /32/.

Dementsprechend nimmt die ICRP einen Risikofaktor von $5 \cdot 10^{-6}$ /rem an. An dieser Stelle wird besonders deutlich, wie unangemessen und unakzeptabel Abschätzungen über die Strahlenwirkung sind, die nur den Tod als "Risiko" betrachten und alle körperlichen, seelischen und sozialen Leiden ausklammern.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß bei Risikoabschätzungen normalerweise keine Kombinationswirkungen berücksichtigt werden. Wirken ionisierende Strahlung und Chemikalien gemeinsam auf einen Organismus ein, können sich multiplikative Effekte ergeben (Synergismus). Solche Wirkungen sind in einer Reihe von Fällen nachgewiesen worden; insgesamt ist unser Kenntnisstand darüber jedoch sehr gering.

3. Strahlenwirkung und Nachkommenschaft

Nach Bestrahlung der männlichen und weiblichen Keimdrüsen können Beeinträchtigungen der Fruchtbarkeit auftreten. So führt bereits eine Gonadendosis von etwa 10 rem beim Mann zu einer Abnahme der Samenzellen; Belastungen von mehr als 50 rem bewirken eine zeitweilige Sterilität, die nur sehr langsam wieder zurückgeht /33/.

Werdendes Leben ist sehr strahlenempfindlich. Nach vorgeburtlicher Exposition muß - in Abhängigkeit vom Bestrahlungszeitpunkt und von der Dosis - mit Fehlgeburten, Totgeburten, Mißbildungen und später auftretenden Entwicklungsstörungen gerechnet werden. Von bestimmten Schädigungen weiß man, daß zur Auslösung eine Minstdosis nötig ist; für andere gilt das nicht.

Als besonders kritische Phasen gelten die Organogenese, in der die meisten Organe angelegt werden, und die frühe fetale Periode. Das empfindlichste Organ scheint das Zentralnervensystem einschließlich des Gehirns zu sein. So wurde bei den Kindern der Überlebenden aus Hiroshima ein erhöhtes Auftreten von Mikrozephalie beobachtet (Verkleinerung von Schädel und Gehirn).

Allgemein sind bestimmte Strahlenschäden im zentralnervösen Bereich wie beispielsweise eine Verringerung der geistigen Fähigkeiten nur sehr schwer nachzuweisen, weil solche Effekte durch andere Umweltbedingungen überlagert und beeinflußt werden.

Weitere Spätschäden nach Bestrahlung im Mutterleib sind bereits im Abschnitt "Strahlenkrebs" angesprochen worden: bis in den Bereich sehr geringer Dosis (weniger als 1 rem) zeigte sich ein erhöhtes Krebsrisiko für die Kinder. Die Beziehung zwischen Dosis und Wirkung ist für diesen Fall linear, und es gibt keinen Schwellenwert.

4. Kurze Diskussion der Problematik grenzüberschreitender Unfallauswirkungen:

Nach dem Unfall von Tschernobyl wurden auf der Sondersitzung der Generalkonferenz der IAEA am 26. September zwei internationale Abkommen beschlossen: Die Konvention über frühzeitige Benachrichtigung bei einem nuklearen Unfall, sowie die Konvention über gegenseitige Hilfeleistung im Falle eines nuklearen Unfalles oder einer radiologischen Notsituation. Diese Konventionen traten am 27. Oktober 1986 bzw. am 26. Februar 1987 in Kraft. Das erstere Abkommen ist für die Tschechoslowakei bereits bindend gültig /34/. Zwischen Österreich und der Tschechoslowakei besteht weiterhin schon seit 1984 ein entsprechendes bilaterales Abkommen.

Trotz der darin festgelegten raschestmöglichen Verständigung betroffener Nachbarstaaten können die Konvention über frühzeitige Benachrichtigung und das bilaterale Abkommen in einem Unfallszenario wie dem hier betrachteten, in dem die radioaktive Wolke innerhalb von 6 Stunden Wien erreicht, nur teilweise zur Milderung der Unfallfolgen in Österreich beitragen. Die Belastungen durch Inhalation beim Durchzug der Wolke sind unvermeidlich. Allenfalls kann - unter Annahmen optimaler Verhältnisse bei der Informationsweitergabe - die Bevölkerung zum Aufenthalt in geschlossenen Räumen aufgefordert werden, was eine gewisse, aber nicht sehr wesentliche Reduzierung der Inhalationsdosis bewirkt. Im betroffenen grenznahen Raum scheint selbst dies unmöglich. Weiterhin kann eine effizient, rasch und gründlich durchgeführte Benachrichtigung der österreichischen Stellen es sehr erleichtern, kurzfristig und gezielt mit Messungen zu beginnen und Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenbelastung durch Ingestion frühzeitig zu planen und einzuleiten, evtl. auch Umsiedlungsmaßnahmen im grenznahen

Raum zur Verringerung der Belastung durch Bodenstrahlung.

Es muß jedoch daran gezweifelt werden, ob selbst diese begrenzten Vorteile wirksam werden können. Dies würde ein ideales Funktionieren des Informationsprozesses voraussetzen. Eine genaue Untersuchung dieses Themenkreises sprengt den Rahmen der vorliegenden Arbeit. Von besonderem Interesse wäre die Beantwortung folgender Fragen:

- Ist den tschechoslowakischen Behörden bekannt, welche Stellen in Österreich (und anderen Staaten) zu informieren sind? Sind Vorkehrungen für sofortige Durchgabe aller wichtigen Daten getroffen? Sind Vorkehrungen getroffen, daß keine Sprachbarrieren bei der Übermittlung bestehen?
- Sind bei den österreichischen Stellen die Kompetenzen klar geregelt? Sind die Behörden in der Lage, sofort zu reagieren? Ist sofortige Information der Bevölkerung gewährleistet?

Analoge Fragen stellen sich natürlich auch bei Unfällen in anderen Ländern.

Nicht zu vergessen sind im übrigen auch Probleme, die mit der Hilfeleistung nach dem Unfall zusammenhängen. Es ist nicht bekannt, ob gewährleistet ist, daß die Grenzen kurzfristig geöffnet werden, falls die Wetter- und geographischen Verhältnisse eine rasche Evakuierung der Bevölkerung in der Nähe der kerntechnischen Anlage nach Österreich erfordern. Fraglich ist, ob die österreichischen Stellen für einen solchen Fall vorbereitet sind.

Es kann auch nicht davon ausgegangen werden, daß - bei Unfällen, die geringere Auswirkungen als der hier beschriebene

haben - stets eine Information anderer Staaten für erforderlich gehalten wird. Die "Störfallgrenzwerte" - d. h. die Grenzwerte der Strahlenbelastung, bis zu denen ein Unfall noch als beherrscht gilt - wurden von der IAEA nicht vereinheitlicht und variieren z. T. stark. In der Tschechoslowakei gilt z. B. ein Wert von 0,25 Sv (25 rem) für die Ganzkörperdosis; in der BRD ein solcher von 0,05 Sv. Die österreichische Strahlenschutzverordnung sieht Störfallgrenzwerte für die Bevölkerung überhaupt nicht vor; es gilt in jeden Fall der Maximalwert von 1,7 mSV (170 mrem) pro Jahr. Somit kann ein Ereignis, das in einem Land noch als beherrschte Panne angesehen (und daher nicht prompt gemeldet) wird, für ein anderes bereits als mittelschwerer Unfall gelten.

Besonders einseitig stellen sich solche unterschiedlichen Auffassungen natürlich für Länder dar, die selbst keine Atomanlagen betreiben, weil ihre Bevölkerung das damit verbundene Risiko grundsätzlich nicht auf sich zu nehmen gewillt ist.

Letzlich zeigen diese Überlegungen, und die Ergebnisse der Unfallfolgenberechnung im vorigen Abschnitt, nur eines: Die Gefährdung durch Kernkraftanlagen ist derart, daß ein wirksamer Schutz durch Abkommen, Katastrophenplanung und Grenzwerte nicht möglich ist. Solche Maßnahmen können zwar im günstigsten Falle die Konsequenz merklich mindern. Der verbleibende Schaden ist aber immer noch derart, daß es eine völlig rationale Reaktion der betroffenen Menschen ist, das mit Kernenergieanlagen verbundene Risiko als unakzeptabel anzusehen.

Literatur zu Teil II:

- /1/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit; Deutsche Risiko-
studie Kernkraftwerke, Hauptband und 8 Fachbände,
herausgegeben vom Bundesminister für Forschung und
Technologie, Verlag TÜV Rheinland, Köln 1979/80.
- /2/ Risikountersuchungen zu Leichtwasserreaktoren, Öko-
Bericht Nr. 24, Öko-Institut Freiburg 1983.
- /3/ J. Benecke; Criticism of Probabilistic Risk Analysis,
International Nuclear Reactor Hazard Study, Gruppe
Ökologie Hannover, 2. Auflage 1987, Teil PRA.
- /4/ Summary Report on the Post-Accident Review Meeting
on the Chernobyl Accident, IAEA-Safety Serie No. 75
- INSAG - 1, Wien 1986.
- /5/ Geographie in Übersichten, Volkseigener Verlag, Ber-
lin 1986.
- /6/ Statistisches Handbuch der Republik Österreich für
1986, Wien 1986.
- /7/ Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz;
Tschernobyl und die Folgen für Österreich, vorläufi-
ger Bericht, Wien, November 1986.
- /8/ Atomenergiebehörde der UdSSR; Der Unfall im AKW
Tschernobyl und seine Folgen, Bericht für die IAEA-
Expertenkonferenz vom 25.-29.8.1986 in Wien, Überset-
zung des Department of Energy, NE-40.
- /9/ Bundesminister des Inneren; Störfallberechnungsgrund-
lagen für die Leitlinien des BMI zur Beurteilung des
Auslegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreakto-
ren gemäß § 28.3 Strahlenschutzverordnung, Bonn 1983.
- /10/ Freie und Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde; Presse-
erklärung über das Drei-Stunden-Gutachten: Neue Aus-
breitungs- und Dosisberechnungen besorgniserregend,
27.01.1987.
- /11/ Ausbreitung von störfallbedingten Freisetzungen - Si-
cherheitsanalyse, VDI-3783, Blatt 1, September 1986.
- /12/ Gutachter-ARGE Wiederaufarbeitungsanlage Bayern; Gut-
achten für das atomrechtliche Genehmigungsverfahren
über die Sicherheit der Wiederaufarbeitungsanlage bei
Wackersdorf, Teil: Radio-Ökologie-Gutachten, 2. Sta-
tusbericht, erstellt im Auftrag des Bayerischen
Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umwelt-
fragen, Mai 1985.

- /13/ Fischer Weltalmanach 1986.
- /14/ Bundesministerium des Inneren; Allgemeine Berechnungsgrundlage für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer (Richtlinie zu § 45 StrSchV) 1979, Berichtigungen 1982 und 1985.
- /15/ N. C. Rasmussen; Reactor Safety Study, WASH-1400, NUREG-75/014, 1975.
- /16/ I. Schmitz-Feuerhake et al.; Risk Estimation of Radiation-Induced Thyroid Cancer in Adults, Late Biological Effects of Ionising Radiation, Proc. Vol. I, S. 219-229, IAEA, Wien 1978.
- /17/ siehe /1/, Fachband 8.
- /18/ E. P. Radford; Report on Joint Japanese-American Workshop Held on February 16-17, 1983, in Nagasaki, Japan, Concerning Reassessment of Radiation Doses Received from Atomic Bombs in Hiroshima and Nagasaki, August 1945, University of Pittsburg 1983.
- /19/ Fichtner Beratende Ingenieure Stuttgart; Abschätzung der Strahlenbelastung von Personen im Stadtgebiet von Hamburg nach unterstellten schweren Störfällen in den Kernkraftwerken Brokdorf, Brunsbüttel, Krümmel und Stade, im Auftrag der Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg, 1987.
- /20/ Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations; The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: 1980, National Academy Press, Washington, D. C. 1980.
- /21/ U. H. Ehling; Hat die Strahlenbelastung Auswirkungen auf spätere Generationen? in: GSF (Hrsg.), Mensch und Umwelt, 12/1986.
- /22/ P. M. E. Sheehan & I. B. Hillary; An Unusual Cluster of Babies with Down's Syndrome Born to Former Pupils of an Irish Boarding School, Brit. Med. Journal 287 (1983), 1428.
- /23/ G. Adam; Zur Frage der polygenischen Mutationen im Hinblick auf genetische Schäden beim Menschen, Der Strahlenrundbrief Nr. 4, Universität Bremen 1986.
- /24/ United Nations Scientific Committee on the Effects of Ionizing Radiation, Report 1982, zitiert nach /21/.

- /25/ R. Bertell; Handbook for estimating Health Effects from Exposure to Ionizing Radiation, 2. Aufl., Toronto/Buffalo/Birmingham 1986.
- /26/ zitiert nach I. Schmitz-Feuerhake u. a.; Abschätzungen zum somatischen Strahlenrisiko und die Empfehlungen der ICRP - Publikation Nr. 26 (1977), Fortschr. Röntgenstr. 131 (1979), 84.
- /27/ International Commission on Radiological Protection; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, Oxford 1977.
- /28/ I. Schmitz-Feuerhake; Das Strahlenrisiko. Beantwortung eines Fragenkatalogs für die Enquete-Kommission 'Zukünftige Kernenergiepolitik' des Deutschen Bundestages, Bremen 1981.
- /29/ I. Schmitz-Feuerhake; Der BEIR-III-Skandal und die Bedeutung der Dosisrevision bei den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki für die Bewertung des Strahlenrisikos, Strahlenrundbrief Nr. 1, Bremen 1985.
- /30/ zit. nach K. Z. Morgan; Cancer and Low Level Ionizing Radiation, Bull. of the Atom. Scient., Sept. 1978, 30.
- /31/ Öko-Institut e. V., Risikountersuchungen zu Leichtwasserreaktoren. Analytische Weiterentwicklung zur 'Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke', Band III, Freiburg 1983.
- /32/ W. Jacobi; Das neue ICRP-System der Dosisbegrenzung, in: Fachverband für Strahlenschutz, Tagung "Radioaktivität und Umwelt, 2.-6.10.1978, Norderney, 417.
- /33/ J. Kiefer; Biologische Strahlenwirkung, Berlin/Heidelberg/New York 1981.
- /34/ IAEA-Newsbriefs 2.1. und 2.2., 1987.

Collection *Laka* foundation

www.laka.org
Digitized 2024