

**ECOLOGY** 

ÖKO-INSTITUT e.V. BUNSENSTR. 14 · 6100 DARMSTADT

**BÜRO DARMSTADT** 

Tel: 06151-81910

Fax: 06151-819133

EMail: 07 61 - 47 14 37 [OEKOMAIL.ZER]

Vom Bahnhof mit Linie F bis Haasstraße; von dort ca. 10 Min. Fußweg in das gegenüberliegende Industriegebiet

# nsichts

Folgen schwerer Unfälle im KKW Krümmel

für das Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg und Auswirkungen von Katastrophenschutzmaßnahmen

Im Auftrag der Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg
- Amt für Umweltschutz -EHESTERS 398

#### Autoren:

Dr. rer. nat. Roland Bähr Dipl.-Phys. Christian Küppers

Darmstadt, April 1992

in der Fassung vom 23. Februar 1995

#### GESCHÄFTSSTELLE FREIBURG

Binzengrūn 34a 7800 Freiburg Tel.: 07 61 - 47 30 31

#### **B**ŪRO DARMSTADT

Bunsenstr. 14 6100 Darmstadt

GESCHÄFTSFÜHRUNG

#### VORSTAND

Cornelia Brandes Prof. Dr. Friedhelm Hemmerich Stephan Kohler Dr. Michael Mehnert Wiltrud Rülle-Hengesbach Bärbel Rust Prof. Dr. Elmar Schlich der Geschäftsführer und

#### WISS, KURATORIUM

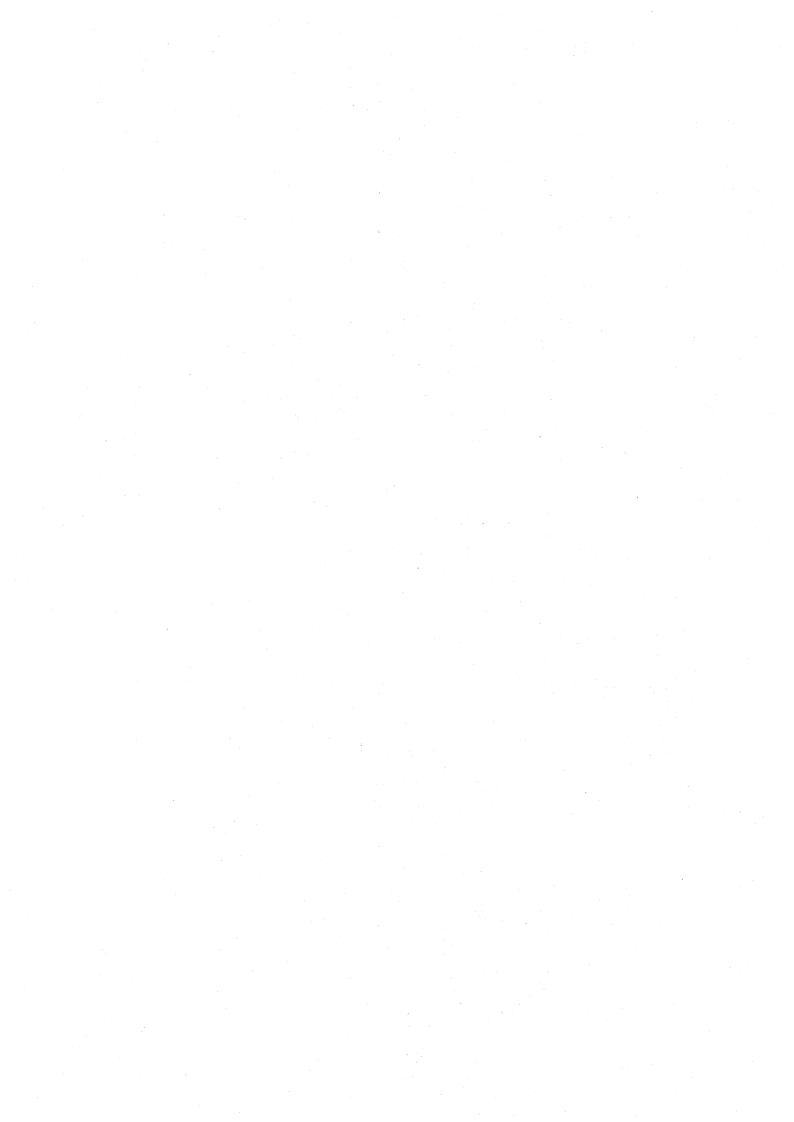
Prof. Dr. Dr. Günter Altner Carl Amery Prof. Dr. Arnim Bechmann Prof. Dr. Hartmut Bossel Edelgard Bulmahn Dr. Erhard Eppler Prof. Pierre Fornallaz Prof. Dr. Ludwig von Friedeburg Prof. Dr. Frederic Vester

Prof. Dr. Robert Jungk Karl Werner Kieffer Dr. Gertrude Lübbe-Wolff Prof. Dr. Peter Cornelius Mayer-Tasch Dr. Hans George Otto Prof. Dr. Eckard Rehbinder Prof. Dr. Udo Ernst Simonis Dr. Hans-Erich Schött Dr. Christian Schütze

#### BANKVERBINDUNG

Öffentliche Sparkasse Freiburg i. Br. (BLZ 68050101) Konto-Nr.: 2063447

Postgirokonto PGiroA Karlsruhe (BLZ 660 100 75)



#### Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	I -	1
		2
2 Auswahl von zwei Szenarien für unfallbedingte Freiset-		
zungen	II -	1
	II -	1
	II -	2
	II -	. 3
	II -	
	II -	3
2.2 Unfallablauf mit Venting und Verhinderung eines Kern- schmelzens	II -	2 -
	II -	
	II -	
2.2.2 Systematisierung von Kernschmelzunfällen bei der	<b>11</b>	ن لم
	II -	1 F
	II -	
	II -	
	<del></del>	
3 Eingreifwerte der Rahmenempfehlungen für den Katastrophen-		
schutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen Angen .	III -	- 1
HANGE BELL HOW WELL OF WA		
UND WAR TO STORE AUTO HE HAMDEN		
<ul> <li>3 Eingreifwerte der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen Auf .</li> <li>4 Modell für die Unfallfolgenberechnung auf .</li> <li>4.1 Auswahl eines Szenarios anhand der meteografiogischen Statistik .</li> </ul>	IV -	1
4.1 Auswahl eines Szenarios anhand der meteoreologischen		
4.1 Auswahl eines Szenarios anhand der meteorelogischen Statistik	T T 7	1
	IV -	_
4.2 Modellierung von Ausbreitung und Strahlenexposition .	LV —	3
5 Flächeneinteilung des Untersuchungsgebiets und Ermittlung		
그는 그는 이 사람이 가는 그림을 하셨다. 그는	v – 1	1.
		•
5.1 Flächeneinteilung	<i>J</i> - 1	
	v – 8	<b>3</b> , .
6 Berechnungsergebnisse	JI -	1
	JI -	1
6.2 Strahlenexposition und Bodenkontamination in den Sektor-		
abschnitten	/I -	
	/I -	
	/I - /I -	
	/ L -	24
6.2.2 Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kern-	7T -	12
	/I - /I -	
	/I -	
O. S. S. S. DOMCHWOHLCHINGTON	, <u>.                                    </u>	$\mathcal{I}$

	7 Auswertung der Berechnungsergebnisse	. VII - 1
	7.1 Notwendige Maßnahmen des Katastrophenschutzes	. VII - 1
	7.1.1 Unfallablauf mit hohem Quellterm	
	7.1.2 Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kern-	
	schmelze	. VII - 20
	7.1.3 Einfluß eines zukünftigen Einsatzes von MOX-Brenn-	. , , ,
	elementen	
	7.1.4 Diskussion von Schutz- und Gegenmaßnahmen	
	7.1.4.1 Zeitrahmen der Ausbreitung	
	7.1.4.2 Vorhersagbarkeit der Expositionssituation	
	7.1.4.3 Zeitpunkte für Maßnahmen	
	7.1.4.4 Schutzfaktoren	
	7.1.4.5 Verhalten der Bevölkerung bei realen Unfällen	
	7.1.4.6 Dosisreduktion in verschiedenen Szenarien	
	, and the second of the second	
a .	7.3.1 Dosiswirkungsbeziehung bei der Berechnung der Zahl	
	von Spätschäden	
	7.3.2 Spätschäden beim Unfallablauf mit hohem Quellterm	
	7.3.3 Spätschäden beim Unfallablauf mit Venting und ver-	
	hinderter Kernschmelze	
	7.4 Nutzbarkeit kontaminierter Gelände	. VII - 71
	8 Zusammenfassung	. VIII - 1
٠,,		
	Literaturverzeichnis	. L - 1

#### 1 Einleitung

Das Öko-Institut wurde am 23.12.1991 von der Umweltbehörde Hamburg - Amt für Umweltschutz - beauftragt, ein Gutachten "Folgen schwerer Unfälle im KKW Krümmel auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg und Anforderungen an den Katastrophenschutz" zu erarbeiten. Dieses Gutachten wird hiermit vorgelegt.

Keines der bisher vorliegenden Gutachten gibt ein umfassendes Bild über die Folgen eines schweren Kernschmelzunfalls im nahegelegenen Kernkraftwerk Krümmel auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg. Auch ein Gutachten des Öko-Instituts zu Folgerungen für den Katastrophenschutz bei Unfällen im KKW Krümmel im Auftrag des Ministers für Soziales, Gesundheit und Energie des Landes Schleswig-Holstein <Öko-Institut 1990> kann nur eingeschränkt übertragen werden, da durch die Wahl der Windrichtung in diesem Gutachten das Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg nur teilweise betroffen ist.

Das vorliegende Gutachten soll unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke (DRS) Phase B <GRS 1989> und der seit 1986 erfolgten Neubewertung des Strahlenrisikos durch internationale Gremien Material und Szenarien zur Optimierung der Katastrophenschutzplanung und -ressourcen in der Freien und Hansestadt Hamburg bereitstellen. Anhand der Ergebnisse des Gutachtens soll prüfbar sein, ob die Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz ausreichend und angemessen sind.

Ein weiterführendes Projekt ist geplant, in dem auch die wirtschaftlichen Folgen eines schweren Unfalls im KKW Krümmel detailliert untersucht werden sollen. Das vorliegende Gutachten berücksichtigt daher bereits Aspekte der weiteren Nutzbarkeit kontaminierter Gebiete, die später vertieft bearbeitet werden können.

In Kapitel 2 des Gutachtens werden zwei Szenarien für unfallbedingte Freisetzungen radioaktiver Stoffe im KKW Krümmel erarbeitet. Die beiden Szenarien sollen die Bandbreite möglicher Freisetzungen abdecken, so daß ein Unfallablauf mit relativ hohen Freisetzungen und ein Unfallablauf mit niedrigen Freisetzungen, bei dem ein Kernschmelzen noch verhindert werden kann, untersucht werden.

In Kapitel 3 werden die Eingreifwerte für verschiedene Maßnahmen des Katastrophenschutzes der "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz" dargestellt. Diese Eingreifwerte werden den Schlußfolgerungen hinsichtlich zu treffender Maßnahmen in den untersuchten Szenarien zugrunde gelegt.

Das Modell für die Unfallfolgenberechnungen wird in Kapitel 4 entwickelt. Es wird ein wahrscheinlichstes meteorologisches Szenario unter der Voraussetzung begründet, daß die radioaktive Wolke nach einem Unfall das Zentrum der Freien und Hansestadt Hamburg überstreicht. Außerdem wird die Modellierung der Ausbreitung und der Strahlenexposition beschrieben.

In Kapitel 5 wird das Untersuchungsgebiet in Sektorabschnitte unterteilt, für die die einzelnen Belastungen bzw. Kontaminationen berechnet werden. Für jeden Sektorabschnitt wird die Wohnbevölkerung der Freien und Hansestadt Hamburg ermittelt.

Die Berechnungsergebnisse der Unfallfolgenberechnungen werden in Kapitel 6 vorgestellt. Dies geschieht anhand von Isodosislinien und tabellarischen Auflistungen der Strahlenexposition und Kontamination in den einzelnen Sektorabschnitten des Untersuchungsgebiets.

In Kapitel 7 werden die Berechnungsergebnisse des Kapitels 6 ausgewertet. Es werden die notwendigen Maßnahmen des Katastrophenschutzes aus den Ergebnissen abgeleitet und der Einfluß eines zukünftigen Einsatzes von MOX-Brennelementen im KKW Krümmel auf den Umfang zu treffender Maßnahmen untersucht. Mögliche Schutz- und Gegenmaßnahmen des Katastrophenschutzes werden hinsichtlich ihrer Effizienz diskutiert. Die Zahl zu erwartender Frühschäden und Spätschäden in den Unfallszenarien wird untersucht. Außerdem werden Aspekte der Nutzbarkeit kontaminierter Gelände diskutiert. Die Ergebnisse des Gutachtens werden in Kapitel 8 zusammengefaßt.

#### 2 Auswahl von zwei Szenarien für unfallbedingte Freisetzungen

Die Unfallfolgenberechnungen in der vorliegenden Studie werden auftragsgemäß für zwei verschiedene Unfallabläufe mit unterschiedlichen Freisetzungsmengen radioaktiver Stoffe in die Umgebung durchgeführt. Da für Katastrophenschutzüberlegungen insbesondere von sehr schweren Unfällen ausgegangen werden muß, wird ein Szenario mit relativ hoher Freisetzungsmenge ausgewählt. Das zweite Szenario ist auftragsgemäß ein Unfallablauf, bei dem nach einer gefilterten Druckentlastung (Venting) des Sicherheitsbehälters dessen Überdruckversagen und ein Kernschmelzen verhindert werden kann.

#### 2.1 Kernschmelzunfall mit hoher Freisetzung

Bisher wurde für das KKW Krümmel oder einen anderen Siedewasserreaktor der KWU-Baulinie '69 keine detaillierte probabilistische Risikostudie mit Freisetzungsbruchteilen bei verschiedenen Unfallabläufen durchgeführt. Die Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke (DRS) <GRS 1979, GRS 1989> hat als Referenzanlage den Druckwasserreaktor Biblis B. Eine vergleichbare Studie für das KKW Krümmel wurde bislang nicht durchgeführt. Auch in den USA durchgeführte Risikostudien für Siedewasserreaktoren können wegen der bau- und anlagentechnischen Unterschiede nicht ohne weiteres auf die KWU-Anlagen der Baulinie '69 übertragen werden.

Detaillierte Aussagen über die zu erwartende Häufigkeit der einzelnen Unfallabläufe sind daher nicht möglich. In zwei deterministisch durchgeführten Untersuchungen wurden aber Freisetzungsbruchteile bei ausgewählten Unfallabläufen im KKW Krümmel ermittelt, auf die im folgenden näher eingegangen wird.

#### 2.1.1 Quelltermuntersuchungen des TÜV Norddeutschland

Die erste deterministische Studie zu schweren Unfällen im KKW Krümmel wurde vom TÜV Norddeutschland angefertigt <TÜV Norddeutschland 1985>. Die Studie untersucht drei ausgewählte Unfallabläufe jeweils in den Siedewasserreaktoren Brunsbüttel und Krümmel. Es handelt sich bei diesen Unfallabläufen um

- einen Notstromfall mit Ausfall der Notstromversorgung,
- einen Ausfall der Nachwärmeabfuhr und
- einen Kühlmittelverluststörfall innerhalb des Sicherheitsbehälters mit Ausfall des Sumpf-Rückförderbetriebs.

Die größten Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umgebung werden vom TÜV Norddeutschland für den dritten Unfallablauf ermittelt. Bei diesem Unfallablauf wird eine Freisetzung von

- 100% Edelgase, Brom, Jod, Rubidium, Cäsium,
- 80% Antimon, Tellur,
- 0,8% Strontium, Barium,
- 0,2% Kobalt, Molybdän, Technetium, Ruthenium, Rhodium, und
- 0,02% Yttrium, Zirkonium, Niob, Lanthaniden und Aktiniden aus der Schmelze in Räume des Reaktorgebäudes angenommen. 100% der Edelgase und 1 bis 10% der sonstigen aus der Schmelze in Räume des Reaktorgebäudes freigesetzten Radionuklide gelangen nach

<TÜV Norddeutschland 1985> in die Umgebung. Diese Freisetzungsbruchteile in die Umgebung (Quellterme) sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Bei den anderen beiden Unfallabläufen werden nach <TÜV Norddeutschland 1985> wesentliche Teile des freigesetzten Inventars in der Wasservorlage der Kondensationskammer zurückgehalten.

#### 2.1.2 Quelltermuntersuchungen des Öko-Instituts

1988 wurden durch das Öko-Institut Folgen schwerer Unfälle in den Reaktoren Brokdorf, Stade, Brunsbüttel und Krümmel untersucht <Öko-Institut 1988>. Referenzfall beim KKW Krümmel ist in dieser Studie ein Ausfall der Hauptwärmesenke mit einem Versagen der Sicherheits- und Entlastungsventile in Schließstellung. In diesem Unfallablauf findet das Kernschmelzen bei bereits zerstörtem Reaktordruckbehälter und Sicherheitsbehälter statt, so daß nennenswerte Rückhaltungen in der Wasservorlage der Kondensationskammer nicht gegeben sind. Außerdem sind bei einem solchen Unfallablauf die Rückhaltewirkungen der Gebäudestruktur deutlich geringer als bei den Unfallabläufen nach <TÜV Norddeutschland 1985>.

Für die Freisetzungsbruchteile werden in <Öko-Institut 1988> Bandbreiten angegeben und vier verschiedene Quellterme für die weiteren Berechnungen ausgewählt. Die Bandbreite der Quellterme erstreckt sich über

- 100% Edelgase,
- 10-80% Jod und Cäsium,
- 10-78% Tellur,
- 5-40% Ruthenium,

- 0,02-2,4% Strontium und Barium, sowie
- 0,002-0,8% Lanthaniden und Aktiniden.

Die Untersuchung des Öko-Instituts wurde von der Hamburgischen Electricitäts-Werke AG und Siemens/KWU kommentiert <HEW 1989>. Zu dieser Stellungnahme liegt eine Beurteilung durch das Öko-Institut vor, die vom Minister für Soziales, Gesundheit und Energie des Landes Schleswig-Holstein in Auftrag gegeben wurde <Öko-Institut 1989a>. Im Hinblick auf die Quelltermanalyse in <Öko-Institut 1988> konnte in <Öko-Institut 1989a> festgestellt werden:

"Auffällig sind aus unserer Sicht die Lücken in beiden Stellungnahmen (von HEW und Siemens; Anm. d. Verf.). Dies betrifft in erster Linie Teil II der Gesamtstudie. Es wird nicht inhaltlich Stellung bezogen zur Diskussion der Phänomene bei Kernschmelzabläufen in Kapitel 3. Ebenso wird inhaltlich nicht Stellung bezogen zur Darstellung der Grundlagen zur Quelltermanalyse in Kapitel 4 und zu der Ableitung von Quelltermen in Kapitel 5.

Hier wird lediglich andeutungsweise versucht, mit formalen Argumenten gegenzuhalten. Immerhin erkennt die Stellungnahme von HEW und Siemens/KWU wenigstens, daß in diesen Bereichen Neuland betreten wurde.

Wir halten die zu diesen Punkten geübte Zurückhaltung für umso auffälliger, als diese Punkte der Schwerpunkt unserer Studie sind und einen beträchtlichen Teil des Umfangs ausmachen." <Öko-Institut 1989a, S. 31>

Die Quelltermanalysen in <Öko-Institut 1988> werden aus diesem Grund auch den Untersuchungen der vorliegenden Studie zugrunde gelegt.

In Tabelle 2.1 sind die Quellterme des Unfallablaufs 3 für das KKW Krümmel aus <TÜV Norddeutschland 1985> und des Unfallablaufs für das KKW Krümmel aus <Öko-Institut 1988> gegenüber gestellt. Innerhalb der jeweils angegebenen Bandbreiten sind die Freisetzungsbruchteile - bis auf Ruthenium - ähnlich. Die tendenziell geringeren Freisetzungsbruchteile beim in <TÜV-Norddeutschland 1985> untersuchten Unfallablauf rühren daher, daß in <TÜV Norddeutschland 1985> keine Unfallabläufe mit einer Zerstörung von Reaktordruckbehälter und Sicherheitsbehälter vor dem Schmelzen des Kerns untersucht wurden. Bei den dort untersuchten Unfallabläufen wird ein wesentlicher Teil der Radionuklide durch die Wasservorlage der Kondensationskammer zurückgehalten.

Tabelle 2.1: Vergleich von Quelltermen aus <TÜV Norddeutschland 1985> und <Öko-Institut 1988> (in % des jeweiligen Inventars)

the state of the s		
Nuklidgruppe	relativer Freisetzungsbruchte TÜV Norddeutschld. Öko-Institu Unfallablauf 3	
Edelgase	100	100
Jod	1 - 10	10 - 80
Cäsium	1 - 10	10 - 80
Tellur	0,8 - 8	10 - 78
Ruthenium	0,002 - 0,02	5 - 40
Strontium	0,008 - 0,08	0,02 - 2,4
Lanthaniden/Aktiniden	0,0002- 0,002	0,002- 0,8

#### 2.1.3 Beschreibung des ausgewählten Unfallablaufs

Als Quellterm mit einer relativ hohen Freisetzung wird für die Unfallfolgenberechnungen in der vorliegenden Studie der in <Öko-Institut 1988> ermittelte Quellterm für den dort untersuchten Unfallablauf im KKW Krümmel mit der höchsten Freisetzung in die Umgebung herangezogen. Dies ist für die Einschätzung der Bandbreite, in der sich der Katastrophenschutz nach schweren Unfällen bewegt, erforderlich.

Auslösendes Ereignis dieses Unfallablaufs ist der Hauptwärmesenke. Die Reaktorschnellabschaltung und der Durchdringungsabschluß funktionieren ordnungsgemäß, ein Versagen der S/E-Ventile in Schließstellung wird unterstellt. Dies führt zu einem Ausfall des Druckbegrenzungssystems und raschem Druckan-Innerhalb von maximal 3 Minuten wird der Versagensdruck des Reaktordruckbehälters erreicht. Bei der resultierenden Zerstörung des Reaktordruckbehälters sind Beschädigungen an Kondensationskammer und Kühlmittelleitungen zu erwarten. Der Sicherheitsbehälter wird zerstört und die Inertisierung des Sicherheitsbehälters geht verloren. Im weiteren Verlauf schmilzt der Kern innerhalb von 2 bis 3 Stunden vollständig. Eine detaillier-Beschreibung dieses Unfallablaufs findet sich in <Öko-Institut 1988>.

In der Zwischenzeit wurde die Auslegung des KKW Krümmel gegen den Ausfall des Systems zur Druckbegrenzung verbessert. Mit dem 7. Nachtrag zur 10. Teilerrichtungsgenehmigung und 7. Nachtrag zur 2. Betriebsgenehmigung <Sozialministerium Schleswig-Holstein 1991> wurden Einbau und Betrieb von 5 Bypass-Ventilen als diversitäres Druckbegrenzungssystem genehmigt. Das System wird als

Notdruckbegrenzung bezeichnet. Die Öffnung von insgesamt drei der Ventile des Systems reicht aus, den Druckanstieg zu begrenzen. Es wurde bei der Genehmigung angenommen, daß sich die Zuverlässigkeit des Druckbegrenzungssystems mit der Nachrüstung der Notdruckbegrenzung um eine bis zwei Größenordnungen verbessert. Mit der Nachrüstung der Notdruckbegrenzung wird der in <Öko-Institut 1988> untersuchte Unfallablauf nicht prinzipiell ausgeschlossen, sondern seine Eintrittswahrscheinlichkeit wird reduziert. Als Beispiel für einen Unfallablauf mit sehr hoher Freisetzung wird dieser Unfallablauf daher auch den Untersuchungen im Hinblick auf den Katastrophenschutz des vorliegenden Gutachtens zugrunde gelegt. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß weitere Unfallabläufe mit Kernschmelzen möglich sind, die zu ähnli-

Es lassen sich im Hinblick auf die zeitliche Abfolge der Freisetzungen des untersuchten Unfallablaufs drei Phasen unterscheiden:

chen Freisetzungen in die Umgebung führen.

- eine Phase der praktisch vollständigen Freisetzung von Edelgasen und der Freisetzung eines großen Teils leicht flüchtiger Radionuklide bei der Zerstörung des Reaktordruckbehälters wenige Minuten nach dem auslösenden Ereignis,
- eine Phase der Freisetzung radioaktiver Stoffe während des Aufheizens und des Schmelzens des Reaktorkerns über 2 bis 3 Stunden nach dem auslösenden Ereignis,
- eine Phase der Freisetzung radioaktiver Stoffe (insbesondere Tellur) während der Beton-Schmelze-Wechselwirkung innerhalb von wenigen Minuten nach dem Durchdringen der Schmelze durch den Sicherheitsbehälter.

Insgesamt erfolgen die wesentlichen Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umgebung innerhalb von 2 bis 4 Stunden nach dem auslösenden Ereignis.

#### 2.1.4 Quellterm des ausgewählten Unfallablaufs

In <Öko-Institut 1988> werden vier verschiedene Quellterme für den untersuchten Unfallablauf angegeben, die sich aus der Kombination unterschiedlicher Randbedingungen ergeben. Da im Rahmen der vorliegenden Studie ein Quellterm mit sehr hohen Freisetzungen und ein Quellterm bei gefilterter Druckentlastung - die im oben diskutierten Unfallablauf nicht möglich ist - zu ermitteln ist, wird für die Unfallfolgenberechnungen aus <Öko-Institut 1988> der dort als Nummer 4 bezeichnete Quellterm ausgewählt. Er bezieht sich auf relativ hohe Freisetzungen aus der Schmelze und eine relativ geringe Rückhaltung von Radionukliden durch Gebäudestrukturen. Der Quellterm ist in Tabelle 2.2 aufgelistet.

Tabelle 2.2: Ausgewählter hoher Quellterm für die Unfallfolgenberechnungen (in % des jeweiligen Inventars)

Nuklidgruppe	relativer Freisetzungsbruchteil		
Edelgase	100		
Jod	80		
Cäsium	80		
Tellur	78		
Ruthenium	40		
Strontium/Barium	2,4		
Lanthaniden/Aktiniden	0,8		

Es sei darauf hingewiesen, daß bei den hier durchgeführten Unfallfolgenberechnungen für die absoluten Freisetzungsmengen nicht die gleichen Mengen wie in <Öko-Institut 1988> zugrunde liegen. Dies hat seinen Grund in den unterschiedlichen Randbedingungen bei der Bestimmung des Radionuklidinventars, da die Brennelemente im KKW Krümmel inzwischen Einsatzzeiten von 5 statt früher 4 Jahren und entsprechend höhere Zielabbrände erreichen. Das Inventar bezieht sich auf das Ende eines solchen Zyklusses.

Der hier den Unfallfolgenberechnungen zugrunde gelegte Quellterm weist hohe Freisetzungsbruchteile für Jod, Cäsium, Tellur und Ruthenium auf. Im Hinblick auf die hohe Rutheniumfreisetzung sei darauf hingewiesen, daß dieser Quellterm für einen Unfallablauf mit Kernschmelzen bei zerstörtem Sicherheitsbehälter verwendet wird. In diesem Fall ergibt sich eine besonders hohe Flüchtigkeit des Rutheniums durch dessen Oxidation bei Sauerstoffzutritt schon in der Aufheizphase. Zur Einordnung der Höhe des Quellterms ist auch ein Vergleich mit der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke möglich, die in ihrer Phase B <GRS 1989> für die Referenzanlage Biblis B den Freisetzungsbruchteil von Jod, Cäsium und Tellur in die Umgebung auf jeweils 50 bis 90% schätzt (Quellterm SBV für Hochdruckkernschmelzen mit frühem Sicherheitsbehälterversagen).

Für die Bestimmung des Inventars ohne den Einsatz von MOX-Brennelementen wurden Ergebnisse aus <Wilson 1988> als Basis herangezogen. Für langlebige Spaltprodukte ergibt sich das Inventar pro Tonne Schwermetall bei vorgegebenem Abbrand relativ genau durch lineare Interpolation zwischen den in <Wilson 1988> angegebenen Daten für bestimmte Abbrände. Für Transurane ist eine lineare Interpolation allerdings weniger genau, mit etwa 15% erwar-

teter maximaler Abweichung allerdings noch ausreichend. Bei kurzlebigen Spaltprodukten kann das Inventar pro Tonne Schwermetall anhand der spezifischen Leistung des KKW Krümmel errechnet werden.

Es werden für die Unfallfolgenberechnungen einige Radionuklide berücksichtigt, deren Inventare in <Wilson 1988> nicht tabelliert wurden, insbesondere Kobalt-58 und Kobalt-60. Für diese wurden Berechnungen mit dem Code Origen 2 <Kirchner 1987> herangezogen.

Für Silber (Ag) und Antimon (Sb) wurde wegen des ähnlichen chemischen Verhaltens der gleiche Freisetzungsbruchteil angenommen wie für Tellur (Te). Technetium (Tc) wird wegen seines ähnlichen chemischen Verhaltens im Hinblick auf die Freisetzung gleich behandelt wie Ruthenium (Ru), Rubidium (Rb) gleich wie Cäsium (Cs). Die Elemente Kobalt (Co), Yttrium (Y), Zirkon (Zr), Niob (Nb), Molybdän (Mo) und Rhodium (Rh) wurden den Lanthaniden zugerechnet, da bei diesen Elementen ein den Lanthaniden ähnliches Freisetzungsverhalten anzunehmen ist.

Tabelle 2.3 zeigt die ermittelten Freisetzungsmengen an 61 Nukliden. Es wurde eine Abklingzeit des Inventars von 10 Minuten für die relativ früh freigesetzten Edelgase und Jodisotope und von 2,5 Stunden für die verzögert freigesetzten übrigen Elemente zwischen Abschaltung des Reaktors und Freisetzung in Rechnung gestellt. Ein Aufbau von Tochternukliden während dieser Zeit wurde für Technetium-99m, Rhodium-105, Tellur-129, Jod-131, Jod-132, Xenon-133, Xenon-135m und Xenon-135 berücksichtigt. Bei allen anderen Radionukliden ist die Nachproduktion während der Zeit zwischen Reaktorabschaltung und Freisetzung ohne Bedeutung.

Tabelle 2.3: Absolute Freisetzungsmengen beim ausgewählten hohen Quellterm (in Becquerel)

Nuklid	Freisetzungs- menge	Nuklid	Freisetzungs- menge
Co-58	7,79E+14	Te-131m	4,81E+17
Co-60	2,64E+15	Te-132	3,59E+18
Kr-85m	8,60E+17	J-131	2,63E+18
Kr-85	3,30E+16	J-132	5,61E+18
Kr-87	1,53E+18	J-133	5,40E+18
Kr-88	2,12E+18	J-134	5,24E+18
Rb-86	2,92E+15	J-135	5,08E+18
Sr-89	7,62E+16	Xe-131m	6,00E+16
Sr-90	6,23E+15	Xe-133m	3,59E+17
Sr-91	8,13E+16	Xe-133	6,79E+18
Y-90	2,08E+15	Xe-135m	1,28E+18
Y-91	3,32E+16	Xe-135	1,76E+18
Zr-95	4,47E+16	Cs-134	3,14E+17
Zr-97	4,03E+16	Cs-136	9,27E+16
Nb-95	4,46E+16	Cs-137	2,96E+17
Mo-99	4,83E+16	Ba-140	1,41E+17
Tc-99m	2,17E+18	La-140	4,67E+16
Ru-103	2,03E+18	Ce-141	4,38E+16
Ru-105	9,24E+17	Ce-143	3,89E+16
Ru-106	6,91E+17	Ce-144	3,24E+16
Rh-105	2,49E+16	Pr-143	4,07E+16
Ag-110m	1,31E+16	Nd-147	1,75E+16
Sb-124	2,45E+15	Np-239	5,18E+17
Sb-125	3,04E+16	Pu-238	4,20E+13
Sb-127	2,16E+17	Pu-239	8,67E+12
Sb-129	5,45E+17	Pu-240	1,35E+13
Te-125m	6,43E+15	Pu-241	2,80E+15
Te-127m	3,40E+16	Am-241	2,84E+12
Te-127	1,81E+17	Cm-242	9,00E+14
Te-129m	1,44E+17	Cm-244	4,60E+13
Te-129	5,58E+17		

Bei dem hier untersuchten Unfallablauf wird der überwiegende Teil des Jods in elementarer Form freigesetzt. Für die Unfallfolgenberechnungen wird daher von einer alleinigen Freisetzung des Jods in elementarer Form ausgegangen. Messungen, die nach dem Unfall in Tschernobyl in der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt wurden, bestätigen, daß selbst nach einem extrem weiten atmosphärischen Transport die elementare Form erhalten bleiben kann.

### 2.2 Unfallablauf mit Venting und Verhinderung eines Kernschmelzens

#### 2.2.1 Zielsetzung des Venting

Nach dem Unfall im sowjetischen Kernkraftwerk Tschernobyl im Jahre 1986 wurden in der Bundesrepublik Deutschland Filtersysteme für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor vorgesehen, bei denen nach bestimmten Unfällen mit Kernschmelzen wenige Tage nach dem Unfall eine gefilterte Druckentlastung möglich sein soll. Bevor es zu einem Überdruckversagen des Sicherheitsbehälters mit nicht mehr filterbaren Freisetzungen kommt, soll bei einem solchen "Venting" der Druck unter dem Versagensdruck des Sicherheitsbehälters gehalten werden. Bei allen Unfallabläufen mit frühem Versagen des Sicherheitsbehälters können die Freisetzungen durch ein Venting dagegen nicht reduziert werden.

Ventingsysteme wurden auch für die Siedewasserreaktoren der Baulinie '69 geplant. Bei dieser Reaktorlinie ist der Sicherheitsbehälter so klein dimensioniert, daß ein spezielles Druckabbausystem erforderlich ist, bei dem Dampf in die Wasservorlage einer Kondensationskammer geleitet wird, wo er kondensiert und seine Energie abgibt. Ohne diese Kondensation würde der Versagensdruck des Sicherheitsbehälters rasch überschritten und es käme zum Kernschmelzen und massiven Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umgebung.

Das Funktionieren des Druckabbausystems hängt entscheidend davon ab, daß es keine größeren Undichtigkeiten zwischen der Druckkammer des Sicherheitsbehälters, in die der Dampf strömt, und dem Luftraum der Kondensationskammer gibt. Undichtigkeiten, die zum

Versagen des Druckabbausystems führen, sind durch ein Versagen der Kondensationskammerklappen oder ein Versagen der Kondensationsrohre möglich. Sowohl die Kondensationskammerklappen als auch die Kondensationsrohre stellen bei der Baulinie '69 Schwachstellen dar, die bei anderen Siedewasserreaktorlinien vermieden wurden.

Ventingsysteme für Siedewasserreaktoren der Baulinie '69 sollen die Zeitspanne verlängern, die für eine Wiederherstellung der Kühlung bei deren Ausfall zur Verfügung steht, indem wenige Stunden nach Unfallbeginn der Luftraum über der Kondensationskammer über das Ventingsystem entlüftet wird. Die Funktionstüchtigkeit des Druckabbausystems während dieser Zeit ist dazu eine Voraussetzung. Wesentlicher Unterschied zur gefilterten Druckentlastung bei Druckwasserreaktoren ist, daß das Venting bei bestimmten Unfallabläufen ein Kernschmelzen verhindern soll, während es bei Druckwasserreaktoren die Folgen von Kernschmelzen auf die Umgebung reduzieren soll.

#### 2.2.2 Technische Ausführung des Ventingsystems

Mit der 15. Teilgenehmigung für das KKW Krümmel <Sozialministerium Schleswig-Holstein 1987a> wurde der Einbau der ersten Teile eines Ventingsystems in diese Anlage genehmigt. Das Ventingsystem besteht im wesentlichen aus einer Filtereinheit mit Venturiwäscher und nachgeschaltetem zweistufigem Trockenfilter aus Metallfaserpaketen sowie den zugehörigen Rohrleitungen und Armaturen vom Sicherheitsbehälter bis zu der oberhalb des Reaktorgebäudedaches liegenden Austrittsöffnung. Auslegungsgrundlage des

Ventingsystems ist insgesamt das von der Reaktorsicherheitskommission auf der 222. Sitzung am 24.6.1987 abschließend gebilligte Konzept einschließlich der zugehörigen Randbedingungen. Mit der 16. Teilgenehmigung <Sozialministerium Schleswig-Holstein 1987b> wurde die Errichtung des Ventingsystems des KKW Krümmel abschließend genehmigt.

Abbildung 2.1 zeigt die prinzipielle Anordnung und Schaltung des Ventingsystems.

Abbildung 2.1: Prinzipielle Anordnung und Schaltung des
Ventingsystems für Siedewasserreaktoren der
Baulinie '69 <Fabian 1988>

By Ord Menometer

Discharge und Wartenockveber

Discharge

Das Venting kann nur bei einem bestimmten Spektrum von Unfällen eine wesentliche Quelltermreduzierung bewirken. Im folgenden Abschnitt werden daher die möglichen Unfallabläufe im Hinblick auf den Zeitverlauf bzw. die Möglichkeit eines Ventings systematisiert dargestellt.

## 2.2.3 Systematisierung von Kernschmelzunfällen bei der SWR-Baulinie '69

Abläufe, die zu Kernschmelzen und Sicherheitsbehälterversagen führen, lassen sich bei den Reaktoren der Baulinie '69 in vier Gruppen einteilen <Öko-Institut 1988>.

Die erste Gruppe mit den schnellsten Zeitverläufen sind Abläufe mit Ausfall der Wärmeabfuhr aus dem Reaktor mit nachfolgendem schnellen Druckaufbau im Reaktordruckbehälter oder Sicherheitsbehälter (durch Versagen der S/E-Ventile oder Versagen der Schnellabschaltung). Sie entsprechen der Gruppe A in Tabelle 2.4. In Gruppe B werden die Abläufe mit sofortigem Ausfall der Einspeisung bei noch funktionierender Wärmeabfuhr in die Kondensationskammer eingeordnet. Sie können durch ein sofortiges Versagen der Einspeisesysteme bei Störfallbeginn ausgelöst werden.

Die Abläufe mit zunächst funktionierender Einspeisung in den Reaktordruckbehälter sind in Fälle mit späterem Versagen der Einspeisung (Gruppe C) und in Fälle mit Versagen der Nachwärmeabfuhr
zu untergliedern (Gruppe D). Der Kühlmittelverluststörfall mit
Versagen des Druckabbausystems muß je nach unterschiedlichem Ablauf einer der beiden Gruppen C bzw. D zugeordnet werden.

Tabelle 2.4: Systematisierung von Kernschmelzabläufen bei Siedewasserreaktoren der Baulinie '69 anhand des Zeitablaufs, jeweils von Unfallbeginn gerechnet

				the state of the s
	Kern geschmolzen	Versagen Reaktor- druckbe- hälter	Versagen Sicherheits- behälter	Beginn Freisetzung
Gruppe A	2 - 3 h	ca. 2 min bzw. 3 h	ca. 2-30 min	gering: 2 min massiv: 1-2 h
Gruppe B	2 h	3 h	3 h	massiv: 3 h
Gruppe C	3 - 4 h	4 - 5 h	4 - 5 h	gering: 1,5 h massiv:>4-5 h
Gruppe D	19 - 58 h max: 4 d	20 - 60 h max: 4 d	15 - 18 h	gering: >15 h massiv: >20 h

Im Hinblick auf die Versagenszeitpunkte des Sicherheitsbehälters können die Abläufe in Siedewasserreaktoren der Baulinie '69 in solche mit frühem Versagen (sofort oder nach einigen Stunden) und solche mit spätem Versagen (nach ca. 15 Stunden) eingeteilt werden. Zur letztgenannten Gruppe zählen alle Abläufe mit Versagen der Nachkühlketten.

Ereignisse, zu deren Beherrschung das Ventingsystem beitragen soll, sind Unfallabläufe mit Ausfall der Nachwärmeabfuhr und Unfallabläufe mit Ausfall der Kernkühlung. In diesen Fällen soll durch die Gasabgabe an die Umgebung der Druck im Sicherheitsbehälter so begrenzt werden, daß ein Versagen des Sicherheitsbehälters nicht eintritt.

Unfallabläufe, bei denen durch das Ventingsystem ein Kernschmelzen verhindert werden kann finden sich unter den Gruppen B, C und D der Tabelle 2.4. Daneben gibt es Unfallabläufe, die durch das Ventingsystem nicht positiv beeinflußt werden können. Hierzu gehören:

- Abläufe mit gestörter Wärmeabfuhr und schnellem Versagen des Sicherheitsbehälters (z.B. Ausfall der Hauptwärmesenke mit nachfolgendem Versagen der Schnellabschaltung oder Ausfall der Hauptwärmesenke mit nachfolgendem Versagen der S/E-Ventile),
- Abläufe mit sofortigem Versagen der Einspeisung (z.B. nach Ausfall der Hauptwärmesenke oder anderen Transienten), sofern eine Notbespeisung des Reaktordruckbehälters vor seinem Versagen nicht gelingt,
- Abläufe mit späterem Versagen der Einspeisung, sofern eine Notbespeisung des Reaktordruckbehälters vor seinem Versagen nicht gelingt,
- Abläufe mit Versagen der Nachwärmeabfuhr, sofern eine Notbespeisung der Kondensationskammer nicht möglich ist.

Der Nutzen des Ventingsystems ist demnach auf einen Teil der auslegungsüberschreitenden Unfälle beschränkt. Darüber hinaus sind im Hinblick auf den Einsatz des Ventingsystems zwei weitere wichtige Aspekte zu beachten:

Der Einsatz des Systems ist eine Maßnahme des Accident Management (interne Notfallschutzmaßnahme). Ob solche Maßnahmen in realen Streßsituationen zuverlässig und sicherheitsgerichtet ausgeführt werden, ist zweifelhaft. Die frühere Auslegungsphilosophie für Leichtwasserreaktoren hat auf solche Maßnahmen bewußt verzichtet und einer Automatisierung von Systemen Vorrang gegeben.

- Zumindest für den Fall "Ausfall der Nachwärmeabfuhr" ist zu unterstellen, daß es bei Einsatz des Ventingsystems zum Versagen von Armaturen oder Rohrleitungen kommt. Die radioaktiven Stoffe würden dann unter Umgehung der Ventingfiltereinrichtungen in die Umgebung freigesetzt <Fischer 1988>.

#### 2.2.4 Beschreibung von Unfallabläufen mit Venting

Bei einem Ausfall der Nachwärmeabfuhr aus der Kondensationskammer führt der Nachwärmeeintrag aus dem Reaktorkern zu einer Aufheizung des Kondensationskammerwassers bis zum Sieden. Nachdem der Inhalt der Kondensationskammer in die Sättigung gelangt ist, beginnt das Ausdampfen des Kühlmittelinhalts des Reaktordruckbehälters in die heiße Kondensationskammer und das Ausdampfen des Kondensationskammerwassers in die Sicherheitsbehälteratmosphäre. Dadurch steigt der Druck im Luftraum der Kondensationskammer und über die Kondensationskammerklappen auch im Druckraum laufend Nach etwa 11 Stunden ist nach < KKK 1987 > der Auslegungsdruck an. des Sicherheitsbehälters überschritten. Dieser Ablauf entspricht der Gruppe D in Tabelle 2.4 des vorangegangenen Kapitels. Durch das Öffnen des Ventingsystems vor Erreichen des Versagensdrucks - bzw. besser des Auslegungsdrucks - über eine halbe Stunde kann in diesem Fall der Druck auf den Auslegungsdruck begrenzt werden. Es kommt dabei zur Abgabe der radioaktiven Stoffe die Umgebung, die sich im Gasraum über dem Kondensationskammer gesammelt haben. Dies sind überwiegend radioaktive Edelgase sowie Jodisotope.

Gelingt während einiger Tage eine Notbespeisung mit Kühlmittel nicht, so ist der Notkühlwasservorrat erschöpft und es kommt zum Kernschmelzen mit Versagen des Sicherheitsbehälters.

Bei einem Ausfall der Kernkühlung kommt es zu einer Kernaufheizung, da die im Kern entstehende Nachwärme nicht abgeführt werden Nach < KKK 1987 > führt ein großer Kühlmittelverlust mit Ausfall der Kernbespeisung auch bei funktionierendem Druckabbausystem nach etwa drei Stunden zu einer Überschreitung des Auslegungsdrucks des Sicherheitsbehälters (Gruppe B in Tabelle 2.4). Durch das Öffnen des Ventingsystems kann auch in diesem Fall der Druck im Sicherheitsbehälter auf den Auslegungsdruck begrenzt und ein Versagen des Sicherheitsbehälters vermieden werden. Die Druckentlastung sollte innerhalb von 3 Stunden in die Wege geleitet werden. Bei einem zeitlich verzögerten Ausfall der Kernkühlung stünde mehr Zeit für die Einleitung des Ventings zur Verfügung (Gruppe C in Tabelle 2.4). Auch bei diesem Unfallablauf werden durch das Venting radioaktive Edelgase, Jod und weitere Nuklide in die Umgebung emittiert. Als gesamte Zeitdauer des Ventings können 30 Minuten angesetzt werden. Der überwiegende Teil der Freisetzung erfolgt in den Minuten nach Öffnung des Systems. Gelingt es nicht, die Kernkühlung wieder in Gang zu bringen, so ist auch durch das Öffnen der Druckentlastungseinrichtung ein Fortschreiten des Kernschmelzens und damit eine Zerstörung des Sicherheitsbehälters beim Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters nicht zu vermeiden.

#### 2.2.5 Quellterm des ausgewählten Unfallablaufs

Es werden in der Fachliteratur eine Reihe von Untersuchungen zitiert, bei denen die Rückhaltewirkung des Ventingsystems bei ordnungsgemäßer Funktion und Verhinderung eines Kernschmelzens untersucht wurde. Tabelle 2.5 zeigt Freisetzungsanteile beim Venting nach <Fabian 1988>. Die in der Tabelle 2.5 aufgeführten Freisetzungsanteile wurden allerdings nicht im Berichtsband der Jahrestagung Kerntechnik 1988 publiziert, sondern nur auf der Tagung präsentiert.

Tabelle 2.5: Freisetzungsanteile im Sicherheitsbehälter und nach dem Filtersystem beim Venting nach <fabian 1988&gt;</fabian 				
Nuklidgruppe Freisetzungsanteil Freisetzungsanteil nach dem Filtersystem behälter				
Edelgase Cäsium Jod (elementar) Jod (organisch) Jod (Aerosol)	1 4,9·10 <sup>-3</sup> 1,4·10 <sup>-3</sup> 1,2·10 <sup>-3</sup> 4,9·10 <sup>-3</sup>	0,7 3,4·10 <sup>-7</sup> 1,0·10 <sup>-5</sup> 8,3·10 <sup>-4</sup> 3,4·10 <sup>-7</sup>		

Die in Tabelle 2.5 nach <Fabian 1988> zitierten Freisetzungsanteile nach dem Filtersystem ergeben Abscheidegrade des Filtersystems von etwa 99,99% für Aerosol, etwa 99,3% für elementares Jod und etwa 31% für organisch gebundenes Jod.

Eine Versuchsanordnung der Siemens AG für den Test der Filtereinheiten ist in <Eckhard 1988> beschrieben. Versuche ergaben Abscheidegrade zwischen 97,6 und 99,6% für elementares Jod und von größer 99,99% für Aerosol.

Der in der vorliegenden Studie für Unfallfolgenberechnungen verwendete Quellterm für Unfallabläufe mit Venting und Verhinderung einer Kernschmelze beruht auf den Freisetzungsbruchteilen für Edelgase, Cäsium und Jod nach <Fabian 1988> (siehe Tabelle 2.5). Freisetzungsbruchteile anderer Nuklidgruppen werden entsprechend ihrer Flüchtigkeit bei einer Aufheizung des Kerns geringer angesetzt. Für die Unfallfolgen sind alleine die Freisetzungen von Jodisotopen entscheidend.

Die Freisetzungen in den Sicherheitsbehälter beziehen sich auf eine Überhitzung des Kerns, nicht aber auf ein teilweises Kernschmelzen. Bei einem teilweisen Kernschmelzen sind deutlich höhere Freisetzungen in den Sicherheitsbehälter zu erwarten, wie auch der Unfall in Three Miles Island (USA) im Jahre 1979 gezeigt hat. Gemäß dort erfolgten Nachuntersuchungen wurden unter anderem 1,5% des Inventars an Strontium-90, 36% des Inventars an Jod-131, 51% des Inventars an Cäsium-137 und 0,9% des Inventars an Lanthan-140 im Sumpfwasser, im Kühlsystem, an den Wänden des Sicherheitsbehälters sowie im Hilfsanlagengebäude nachgewiesen <Pelletier 1981>. Der Quellterm gilt daher für ein verhindertes Kernschmelzen und nicht für ein Unfallablauf, der zu einem dem Unfall in Three Miles Island ähnlichen Kernschaden führen würde. Die Freisetzungsbruchteile für den Quellterm des Unfalls mit Venting und verhinderter Kernschmelze zeigt Tabelle 2.6 in Form der in die Umgebung freigesetzten Bruchteile des Inventars.

belle 2.7 sind die daraus resultierenden absoluten Freisetzungsmengen aufgelistet, deren Bestimmung gemäß der beim Unfallablauf mit hohem Quellterm beschriebenen Vorgehensweise erfolgt.

Tabelle 2.6: Ausgewählter Quellterm für die Folgenberechnungen eines Unfalls mit Venting und verhinderter Kernschmelze (in % des jeweiligen Inventars)

Nuklidgruppe	relativer Freisetzungsbruchteil
Edelgase	7,0E+01
Jod (elementar)	1,0E-05
Jod (organisch)	8,3E-04
Jod (Aerosol)	3,4E-07
Cäsium	3,4E-07
Tellur	1,0E-07
Ruthenium	3,4E-10
Strontium/Barium	3,4E-10
Lanthaniden/Aktiniden	3,4E-10

Freie und Harreseitadt Harryturg
Freie und Harreseitage und Immiestoreschutzg
Facham für Eriergie und Immiestoreschutzg
Facham für Eriergie und 19539 Harmburg

Tabelle 2.7: Absolute Freisetzungsmengen beim Quellterm für Venting und Verhinderung eines Kernschmelzens (in Becquerel)

Nuklid Freisetzungs- menge		Nuklid	Freisetzungs- menge
Co-58	3,31E+7	Te-131m	5,95E+10
Co-60	1,12E+8	Te-132	4,54E+11
Kr-85m	3,32E+17	J-131 <sub>*</sub>	2,72E+15
Kr-85	2,31E+16	∫ J-132 <sup>*</sup>	3,91E+15
Kr-87	1,33E+17	J-133 <sup>*</sup>	4,99E+15
Kr-88	5,82E+17	J-134*	2,67E+14
Rb-86	1,24E+9	J-135*	3,57E+15
Sr-89	1,08E+9	Xe-131m	4,16E+16
Sr-90	8,83E+7	Xe-133m	2,39E+17
Sr-91	1,03E+9	Xe-133	4,74E+18
Y-90	8,68E+7	Xe-135m	4,77E+17
Y-91	1,41E+9	Xe-135	1,70E+18
Zr-95	1,90E+9	Cs-134	1,33E+11
Zr-97	1,61E+9	Cs-136	3,93E+10
Nb-95	1,89E+9	Cs-137	1,26E+11
Mo-99	2,02E+9	Ba-140	2,00E+9
Tc-99m	1,83E+9	La-140	1,93E+9
Ru-103	1,72E+9	Ce-141	1,86E+9
Ru-105	6,22E+8	Ce-143	1,60E+9
Ru-106	5,87E+8	Ce-144	1,38E+9
Rh-105	1,05E+9	Pr-143	1,72E+9
Ag-110m	1,68E+9	Nd-147	7,40E+8
Sb-124	3,14E+8	Np-239	2,16E+10
Sb-125	3,90E+9	Pu-238	1,78E+6
Sb-127	2,74E+10	Pu-239	3,68E+5
Sb-129	5,49E+10	Pu-240	5,72E+5
Te-125m	8,23E+8	Pu-241	1,19E+8
Te-127m	4,36E+9	Am-241	1,21E+5
Te-127	2,07E+10	Cm-242	3,83E+7
Te-129m	1,84E+10	Cm-244	1,96E+6
Te-129	5,72E+10		
		1	

Von der Aktivität der Jodisotope werden 1,19% in elementarer Form, 98,77% in organisch gebundener Form und 0,04% in aerosolgebundener Form freigesetzt

Escherificted

### 3 Eingreifwerte der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen

Aufgrund der Erkenntnis, daß schwere Unfälle in Kernkraftwerken möglich sind, gibt es in der Bundesrepublik seit 1977 "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen". In diesen Rahmenempfehlungen werden Evakuierungszonen eingeteilt und Eingreifwerte für Maßnahmen des Katastrophenschutzes vorgegeben. Die Rahmenempfehlungen wurden dabei den Erkenntnissen der zur damaligen Zeit in Arbeit befindlichen Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke Phase A angepaßt.

Aufgrund einer längerjährigen Diskussion wurden die Rahmenempfehlungen 1988 novelliert <BMU 1989>. Dabei wurde allerdings auf ältere Zwischenergebnisse der DRS Phase B zurückgegriffen, die sich bei Veröffentlichung der Phase B im Juni 1989 nicht mehr halten ließen. Aufgrund dieser Zwischenergebnisse wurde in den neuen Rahmenempfehlungen die frühere Einteilung in innere Zone, Mittelzone und Außenzone übernommen. Geändert wurden die Eingreifwerte für Maßnahmen, die sich an neueren Erkenntnissen zur Wirkung radioaktiver Strahlung orientieren.

Die "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen" <BMU 1989> sehen die hier in Tabelle 3.1 wiedergegebenen Richtwerte und zugeordneten Maßnahmen vor. Als Maßnahmen sind Verbleiben im Haus, Ausgabe von Jodtabletten sowie die Evakuierung bei Überschreitung bestimmter Richtwerte vorgesehen.

Die Richtwerte orientieren sich an der äußeren Strahlenexposition in den ersten sieben Tagen bzw. der längerfristigen inneren Folgedosis durch die Inhalation von radioaktiven Stoffen in den ersten sieben Tagen nach einem Unfall. Der Ingestionspfad wird nicht berücksichtigt. Es wird also unterstellt, daß keine zusätzliche Dosis durch den Verzehr von kontaminierten Lebensmitteln erfolgt.

Ziel der Maßnahmen des Katastrophenschutzes ist es, das Risiko von Spätfolgen der radioaktiven Bestrahlung (ohne Ingestion) von Personen der Bevölkerung zu reduzieren. Außerdem stellt die Höhe der gewählten Richtwerte sicher, daß nichtstochastische Strahlenschäden bei ordnungsgemäßer Durchführung der Maßnahmen vermieden werden.

Tabelle 3.1: Dosisrichtwerte und Maßnahmen nach Unfällen in kerntechnischen Anlagen nach <bmu 1989=""> (in mSv)</bmu>						
Maßnahme Ganzkörper- Schilddrüsen- Lunge ode des bevor bestrahlt zelorg			orzugt lte Ein-			
	unterer Richt		unterer Richt		unterer Richt	
Verbleiben im Haus Ausgabe von Jodtabletten Evakuierung	5 - 100	50 - 500	50 200 300	250 1000 1500	50 - 300	250 - 1500

<sup>\*</sup> Summe aus externer Bestrahlung und Inhalation Inhalation; keine Berücksichtigung der Hautdosis

Der untere Richtwert der Rahmenempfehlungen bedeutet einen Wert, bei dessen Unterschreitung grundsätzlich die jeweilige aufgeführte Maßnahme nicht für erforderlich erachtet wird. Bei Überschreitung des oberen Richtwertes soll die jeweilige Maßnahme dagegen grundsätzlich vorgenommen werden. Im Bereich zwischen dem unteren und dem oberen Richtwert gibt es demnach einen Ermessensspielraum der Einsatzbehörden.

Die Richtwerte für "Ganzkörperdosis" sowie "Lunge oder jedes bevorzugt bestrahlte Einzelorgan" beziehen sich auf die Summe aus äußerer Bestrahlung und Inhalation bei einem Aufenthalt im Freien über 7 Tage und für die jeweilige kritische – d.h. am höchsten belastete – Bevölkerungsgruppe. Die Einbeziehung der Ingestionsdosis soll laut Rahmenempfehlungen entfallen, wenn Verzehrverbote etc. erlassen wurden. Statt der Ganzkörperdosis soll – unter Beibehaltung des Grenzwerts – die Effektive Dosis zugrunde gelegt werden, falls Dosen von Einzelorganen unterhalb der jeweiligen Schwellenwerte liegen.

Der Richtwert für "Schilddrüsendosis" bezieht sich auf die Inhalation bei sonst gleichen Randbedingungen.

#### 4 Modell für die Unfallfolgenberechnungen

## 4.1 Auswahl eines Szenarios anhand der meteorologischen Statistik

Umfangreiche Erhebungen meteorologischer Daten existieren für die Station am Flughafen Hamburg-Fuhlsbüttel, etwa 37 km vom Standort des KKW Krümmel entfernt. Da die dort erhobenen Daten von ihrer Struktur her aussagekräftiger sind als die am KKW-Standort erhobenen Daten, werden sie im vorliegenden Gutachten der Auswahl eines Referenzszenarios für die Unfallfolgenberechnungen zugrunde gelegt.

Durch den Deutschen Wetterdienst - Seewetteramt - in Hamburg wurden statistische meteorologische Daten der Station Hamburg-Fuhlsbüttel zur Verfügung gestellt. Außerdem wurde durch den Deutschen Wetterdienst ein mittleres vertikales Windprofil für den Standort des KKW Krümmel errechnet. Für die Unterstützung sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Die Unfallfolgenberechnungen werden auftragsgemäß für eine Windrichtung durchgeführt, bei der die radioaktive Wolke nach einem Unfall im KKW Krümmel über die Innenstadt der Freien und Hansestadt Hamburg hinwegzieht. Dies entspricht einem Wind aus 120°-Richtung (etwa Südost).

Nach den Daten des Deutschen Wetterdienstes beträgt die Häufigkeit dieser Windrichtung – bezogen auf das Richtungsintervall von 105° bis 135° – in Hamburg-Fuhlsbüttel im langjährigen Mittel 8,2%. Die häufigste Windrichtung ist dagegen ein Südwestwind des Richtungsintervalls 225° bis 255°, der im langjährigen Mittel mit

der relativen Häufigkeit von 14,9% beobachtet wird. Auch die häufigste Windrichtung ist daher um weniger als einen Faktor 2 wahrscheinlicher als die für das Referenzszenario ausgewählte Windrichtung.

Die Ausbreitungsklasse mit der mit Abstand größten relativen Häufigkeit in Hamburg-Fuhlsbüttel ist die Ausbreitungsklasse III1 nach Klug/Manier bzw. die Diffusionskategorie D in der Terminologie von <SSK 1989, BMU 1990>. Sie wird mit einer relativen Häufigkeit von 50,6% beobachtet. Diese Ausbreitungsklasse wird dem Referenzszenario zugrunde gelegt. Es handelt sich bei der Diffusionskategorie D um diejenige Diffusionskategorie, bei der sich die radioaktive Wolke während des atmosphärischen Transports am wenigsten horizontal senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verbreitert.

Vom Deutschen Wetterdienst wurde auch eine dreidimensionale Statistik mit den relativen Häufigkeiten der Kombinationen von Ausbreitungsklasse, Windrichtung und Windgeschwindigkeit zur Verfügung gestellt. Bezogen auf die Windrichtung von  $120^{\circ}$  ist die häufigste Situation die Ausbreitungsklasse  $III_1$  in Verbindung mit einer Windgeschwindigkeit im Intervall von 8 bis 10 Knoten. Dies entspricht einer mittleren Windgeschwindigkeit von 4,63 m/s. Daher wird im meteorologischen Referenzszenario diese Windgeschwindigkeit verwendet.

Die relative Häufigkeit der ausgewählten meteorologischen Situation beträgt 0,412%. Die geringe Wahrscheinlichkeit ist das Resultat der großen Zahl in der dreidimensionalen Statistik unterschiedenen Bedingungen. Dies wird auch daran deutlich, daß auch die relativ häufigste Situation nach der dreidimensionalen Stati-

stik - Ausbreitungsklasse  ${\rm III}_1$  bei Windrichtung 240° und einer Windgeschwindigkeit im Intervall von 8 bis 10 Knoten - ebenfalls nur eine mit 1,073% relativ geringe Häufigkeit aufweist.

Als meteorologisches Referenzszenario für die Unfallfolgenberechnungen wurde in Absprache mit dem Auftraggeber ein Szenario ohne Niederschläge gewählt. Im langjährigen Mittel fallen in der gewählten Windrichtung nur etwa 3,3% des Jahresniederschlags. Beispielhafte Berechnungen für ein Szenario mit Regen werden für einen flächendeckenden Regen der Intensität 1 mm/h vorgenommen. Niederschläge einer Intensität von 1 mm/h und mehr mit einer Dauer von mindestens 6 Stunden und in den 5 Monaten Mai bis September werden in der Freien und Hansestadt Hamburg im langjährigen Mittel etwa 10 mal pro Jahr beobachtet. Über die Häufigkeit solcher Niederschläge in Verbindung mit der ausgewählten Windrichtung liegen keine Daten vor. Eine solche Situation wäre aber als relativ selten anzusehen.

#### 4.2 Modellierung von Ausbreitung und Strahlenexposition

In die Berechnung der Ausbreitung einer radioaktiven Wolke gehen eine Reihe von Parametern ein. Die wichtigsten sind dabei die sogenannten Ausbreitungsparameter, die Emissionshöhe und die Windgeschwindigkeit. Außerdem sind für die weiteren Schritte im Berechnungsmodell bei der Modellierung von Abreicherungseffekten der radioaktiven Wolke und der einzelnen relevanten Belastungspfade Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung und Inhalation spezifische Parameter zu wählen.

### Ausbreitungsparameter

Ausbreitungsparameter können anhand von Gauß-Ausbreitungsmodellen aus in Jülich und Karlsruhe durchgeführten Experimenten für die einzelnen Diffusionskategorien (Ausbreitungsklassen) bestimmt werden. Das entsprechende Verfahren ist beispielsweise in <BMU 1990> und <SSK 1989> beschrieben. Die Ausbreitungsparameter stellen ein Maß für die Verbreiterung der radioaktiven Wolke senkrecht horizontal und senkrecht vertikal zur Ausbreitungsrichtung und abhängig von der Quellentfernung dar.

Da das KKW Krümmel im norddeutschen Flachland liegt, sind größerflächige schwerwiegende orographische Einflüsse in der gewählten
Ausbreitungsrichtung bei den zu erwartenden thermisch überhöhten
Emissionshöhen nicht zu erwarten. Die lokale Situation ist nach
dem in <BMU 1990> angegebenen Verfahren zur Modellierung besonderer orographischer Verhältnisse bei der zu erwartenden Emissionshöhe ebenfalls nicht zu berücksichtigten, wird hier aber im
Hinblick auf das vertikale Windgeschwindigkeitsprofil modelliert
(siehe unten). Besondere orographische Einflüsse auf die
großräumige Ausbreitung werden im Referenzszenario nicht berücksichtigt.

#### Effektive Emissionshöhe

Die effektive Emissionshöhe ist die Summe aus der Höhe über Grund des Freisetzungsortes der radioaktiven Stoffe in die Umgebung und der thermischen Überhöhung aufgrund der Temperaturdifferenz gegenüber der Umgebungsluft. Bei einer Freisetzung mit starker Luftströmung ist ebenfalls eine Impulsüberhöhung zu berücksichti-

gen. Für den weiteren Aufstieg der radioaktiven Wolke nach Freisetzung ist die Wärmeleistung der enthaltenen radioaktiven Stoffe mitverantwortlich.

Für die Berechnung der thermischen Überhöhung der radioaktiven Wolke wird der Ansatz verwendet, wie er in der DRS Phase A den Unfallfolgenberechnungen zugrunde gelegt wurde. Die entsprechenden Formeln finden sich in Fachband 8 <GRS 1981, S. 37 ff>. Eine exakte Vorhersage der effektiven Emissionshöhe ist beim Quellterm mit hoher Freisetzung schon deshalb nicht möglich, weil schon die Freisetzungshöhe ohne Temperaturüberhöhung – bei nicht über Kamin oder Ventingsystem abgegebenen radioaktiven Stoffen – von Versagensart und -ort des Reaktorgebäudes abhängig ist.

Die thermische Überhöhung bei Diffusionskategorie D nimmt beim Ansatz nach <GRS 1981> bei kleineren Distanzen bis zu einem Maximalwert zu, bei dem die Wolke nicht mehr weiter aufsteigt. In Entfernungen von mehr als einem Kilometer, wie sie hier für die Berechnungen von Unfallfolgen auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg entscheidend sind, ist ein weiteres Ansteigen durch die Thermik der radioaktiven Stoffe nicht mehr zu unterstellen.

Es wird eine effektive Emissionshöhe von etwa 200 m für den hohen Quellterm ermittelt. Die effektive Emissionshöhe beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze ist geringer anzusetzen. Unter Berücksichtigung der kleineren Wärmefracht und des Austrittsimpulses beim Venting wird im Referenzszenario eine effektive Emissionshöhe von 150 m zugrunde gelegt.

Der Einfluß der effektiven Emissionshöhe auf die Belastungen im Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg wurden in vergleichenden Rechenläufen untersucht. Beim Unfallablauf mit hohem Quellterm wäre bei einer effektiven Emissionshöhe von 150 m gegenüber 200 m sowohl die Effektive Dosis durch Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage als auch die Schilddrüsendosis durch Inhalation um einen Faktor 0,84 bis 0,94 geringer, wobei die Abweichung mit dem Abstand von der Anlage zunimmt. Bei einer effektiven Emissionshöhe von 250 m gegenüber 200 m ergibt sich eine um einen Faktor 0,84 bis 0,93 geringere Dosis; in diesem Fall nimmt die Abweichung mit dem Abstand von der Anlage ab.

Die errechneten Dosen beim Unfallablauf mit Venting und Verhinderung einer Kernschmelze sind bei einer effektiven Emissionshöhe von 100 m gegenüber 150 m um einen Faktor 0,61 bis 0,75 geringer. Bei einer effektiven Emissionshöhe von 200 m gegenüber 150 m wären sie um einen Faktor 1,07 bis 1,19 erhöht.

Sämtliche Abweichungen bei variierten Emissionshöhen bewegen sich demnach in einer Bandbreite von etwa -40% bis +20%.

## Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe

Vom Deutschen Wetterdienst wurde ein mittleres vertikales Windprofil am Standort Krümmel unter Berücksichtigung der besonderen Topographie dieses Standorts mit dem mathematischen Modell WASP durchgeführt. Die Windgeschwindigkeit nimmt in größeren Höhen nach diesen Berechnungen etwas weniger stark zu, als sie sich nach der mittleren Windgeschwindigkeit in der Bezugshöhe von 10 m gemäß dem Potenzansatz in <BMU 1990> bzw. <SSK 1989> berechnen würde. Es wird zur Anpassung ein Abschlag von 0,3 m/s in Bezugshöhe 10 m auf die häufigste Windgeschwindigkeit in der gewählten

Ausbreitungsrichtung vorgenommen. Die häufigste Windgeschwindigkeit bei Winden aus der 120°-Richtung ist in Bezugshöhe 10 m etwa 0,33 m/s höher als die mittlere Windgeschwindigkeit.

In einer effektiven Emissionshöhe von 150 m berechnet sich die Windgeschwindigkeit dann zu von 9,24 m/s und in 200 m effektiver Emissionshöhe zu 10,02 m/s.

Abreicherungseffekte in der radioaktiven Wolke/Fallout und Washout

Während des Transports der radioaktiven Stoffe kommt es zu einer Abreicherung durch radioaktiven Zerfall, trockene Ablagerung und gegebenenfalls nasse Ablagerung. Diese drei Abreicherungseffekte werden in den vorliegenden Berechnungen nach dem in <BMU 1990> angegebenen Verfahren berücksichtigt. Aufträgsgemäß werden die Berechnungen der Unfallfolgen generell für ein Szenario ohne Regen durchgeführt, Einflüsse von Niederschlägen werden allerdings beispielhaft diskutiert.

Als Proportionalitätsfaktor  $v_g$  für Fallout wird ein Wert von  $1,0\cdot 10^{-3}$  m/s für Aerosole,  $1,0\cdot 10^{-2}$  m/s für elementares Jod und  $1,0\cdot 10^{-4}$  m/s für organisch gebundenes Jod verwendet, als Washout-koeffizient der Wert  $7\cdot 10^{-5}$  1/s für ungefilterte Aerosole sowie elementares und organisch gebundenes Jod und  $2\cdot 10^{-5}$  1/s für gefilterte Aerosole. Diese Parameter sind <BMU 1990> bzw. <BMI 1983> entnommen.

## Wichtungsfaktor für Windrichtungsänderungen

Bei länger andauernden Emissionen werden nach  $\langle SSK | 1989 \rangle$  zeitabhängige Wichtungsfaktoren für später erfolgende Emissionen definiert. Diese Wichtungsfaktoren errechnen sich zu  $t^{-0}$ ,  $^{33}$  mit t als Zeit in Stunden nach der ersten Emission und können erst für Freisetzungszeitdifferenzen von mehr als einer Stunde angesetzt werden.

Für die hier in ihren Folgen zu untersuchenden Unfallabläufe werden solche Wichtungsfaktoren aufgrund der kurzen Zeitspanne von Beginn des Kernschmelzens bis zur Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung bzw. aufgrund der kurzen Zeitspanne eines Ventings im Falle einer verhinderten Kernschmelze im Referenzszenario nicht eingeführt. Auswirkungen von Windrichtungsänderungen während der Ausbreitungsphase werden aber diskutiert.

#### Dosis durch Gamma-Submersion

Die Gamma-Submersionsdosis ist die durch den Aufenthalt in bzw. in der Nähe einer radioaktiven Wolke im Freien verursachte Dosis durch Gammastrahlung.

Die Dosis durch Gamma-Submersion wird über einen Ausbreitungsfaktor für Gammastrahlung ermittelt, für dessen Errechnung eine räumliche Integration durchzuführen ist. In den Berechnungen wurde wie auch in <SSK 1989> - hinsichtlich von Reichweite etc. - eine Gammaenergie von 1 MeV zugrunde gelegt.

Die Dosisfaktoren der Gamma-Submersion sind der Strahlenschutzverordnung entnommen. Für einjährige Kleinkinder wären die Dosen durch Gamma-Submersion nach <BMU 1990> um einen Faktor 1,2 größer als für Erwachsene, da die Abschirmung innerer Organe gegen Gammastrahlung von außen bei Kleinkindern geringer ist.

#### Dosis durch Gamma-Bodenstrahlung

Die Dosis durch Gamma-Bodenstrahlung rührt von der von am Boden abgelagerten Radionukliden im Freien ausgehenden Gamma-Strahlung her.

Als Dauer der Bestrahlung wird in <SSK 1989> gemäß den "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz" ein Zeitraum von 7 Tagen
angenommen. Die im Hinblick auf die Richtwerte für Maßnahmen des
Katastrophenschutzes relevante Dosis ist dabei die Dosis bei einem Aufenthalt im Freien über den gesamten Zeitraum. Im Rahmen
der vorliegenden Studie werden die Dosen durch Gamma-Bodenstrahlung darüber hinaus für insgesamt vier weitere (kürzere) Zeitspannen berechnet. Die Zeitspannen umfassen den Zeitraum von jeweils 0 bis 3, 12, 24 bzw. 72 Stunden.

Die Dosisfaktoren für Gamma-Bodenstrahlung sind der Strahlenschutzverordnung entnommen. Für einjährige Kleinkinder wären die
Dosen 1,5-fach höher als für Erwachsene, da die Abschirmung innerer Organe bei Kleinkindern geringer ist und diese zusätzlich einen geringeren Abstand vom Boden haben.

#### Dosis durch Inhalation

Die Dosis durch Inhalation ist die Folgedosis, die durch das Einatmen radioaktiver Stoffe beim Aufenthalt im Freien während des Durchzugs der radioaktiven Wolke resultiert.

Hinsichtlich dieser Dosis sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Die 7-Tage-Folgedosis die innerhalb der auf die Inhalation folgenden 7 Tage akkumulierte Dosis - des roten Knochenmarks ist in Bezug auf nichtstochastische Schäden (Strahlenkrankheit) relevant.
- Die 50-Jahre-Folgedosis bei Kleinkindern die 69-Jahre-Folgedosis - durch Inhalation bestimmt das Risiko von Spätschäden.

Ein wichtiger Parameter bei der Berechnung der Inhalationsdosis ist die Atemrate. Sie wird in unseren Berechnungen für Erwachsene zu 3,48°10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/s angesetzt, entsprechend dem Wert in <SSK 1989> für normal arbeitende Erwachsene.

Die 50-Jahre-Folgedosisfaktoren für Inhalation sind der Strahlenschutzverordnung entnommen, die Dosisfaktoren für einen Zeitraum von 7 Tagen <SSK 1989>.

Als Lungenretentionsklasse wird entsprechend <BMU 1990>

- die Klasse D (Ausscheidung innerhalb von Tagen) für Natrium, Rubidium, Strontium, Jod, Cäsium und Barium,
- die Klasse W (Ausscheidung innerhalb von Wochen) für Mangan, Eisen, Nickel, Zirkonium, Technetium, Antimon, Tellur, Lanthan, Europium, Neptunium, Americium und Curium, sowie
- die Klasse Y (Ausscheidung innerhalb von Jahren) für Chrom, Kobalt, Zink, Yttrium, Niob, Molybdän, Ruthenium, Rhodium, Silber, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium und Plutonium verwendet.

# 5 Flächeneinteilung des Untersuchungsgebiets und Ermittlung der Bevölkerungsdichte

Um die Durchführbarkeit von Evakuierungsmaßnahmen und anderen Maßnahmen des Katastrophenschutzes beurteilen zu können, ist die Zahl von einer Maßnahme betroffener Personen von Interesse. Im folgenden Kapitel wird zunächst eine Flächeneinteilung des Gebiets der Freien und Hansestadt Hamburg vorgenommen. Für die einzelnen Flächenteile wird anschließend die Wohnbevölkerung ermittelt.

## 5.1 Flächeneinteilung

Bei der Planung von Katastrophenschutzmaßnahmen wird in der Regel in einem Polarkoordinatensystem gearbeitet, wie es auch in den "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz" <BMU 1989> enthalten ist. Dort ist festgelegt, daß die Mittel- und Außenzone in Sektoren von 30° zu unterteilen ist, wobei diese im Uhrzeigersinn durchnumeriert werden und Sektor 1 symmetrisch zur Nordrichtung liegt. Die Innenzone entspricht einem Kreis von 2 km Radius.

Für die hier durchzuführenden Unfallfolgenberechnungen wird die Einteilung nach den Rahmenempfehlungen übernommen. Das Gradnetz wird auf einen Radius bis zu 50 km ausgedehnt, um das Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg abdecken zu können. Die radiale Unterteilung wird auf 10°-Sektoren verfeinert. Die Expositionen werden für einen Quadranten berechnet, wobei die Ausbreitungsrichtung durch die Winkelhalbierende des mittleren 30°-Sektors dieses Quadranten gebildet wird.

Die drei 30°-Sektoren sind nach der Einteilung der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz die Sektoren 10, 11 und 12. Die 10°-Sektoren werden jeweils im Uhrzeigersinn durch die beigestellten Buchstaben "A", "B" und "C" gekennzeichnet. Der Quadrant umfaßt insgesamt den Winkelbereich von 255° bis 345°.

Innerhalb der gebildeten 10°-Sektoren werden Radialabschnitte in Schritten von jeweils 5 km definiert. Der Bereich 0 bis 5 km bleibt ausgeklammert, da in ihm kein Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg liegt.

Die Dosisberechnung zur Beurteilung der Notwendigkeit von Maßnahmen des Katastrophenschutzes erfolgt in den einzelnen Abschnitten jeweils für den Mittelpunkt der durch den Abschnitt verlaufenden Winkelhalbierenden des jeweiligen 10°-Sektors. In Windrichtung (Sektor 11B) ist dies etwa die maximale Dosis in einem Sektorabschnitt, nicht aber in benachbarten Sektoren. Ob in einem Sektorabschnitt eine Dosis, bei der eine Maßnahme des Katastrophenschutzes erforderlich wäre, nicht im Mittelpunkt, sondern in einem Randbereich überschritten wird, läßt sich anhand der errechneten Isodosislinien ablesen. Für die Berechnungen von Kollektivdosen und Kollektivschäden werden die Dosen über einen Sektorabschnitt gemittelt.

Es ergibt sich die folgende Bezeichnung der Sektoren:

- 10: 30°-Sektor 255-285°,
  - 10A: 10°-Sektor 255-265°,
  - 10B: 10°-Sektor 265-275°,
  - 10C: 10°-Sektor 275-285°,
- 11: 30°-Sektor 285-315°,

```
- 11A: 10°-Sektor 285-295°,
- 11B: 10°-Sektor 295-305°,
- 11C: 10°-Sektor 305-315°,
- 12: 30°-Sektor 315-345°,
- 12A: 10°-Sektor 315-325°,
- 12B: 10°-Sektor 325-335°,
- 12C: 10°-Sektor 335-345°.
```

Die Radialabschnitte werden durch nachgestellte Kleinbuchstaben gekennzeichnet:

```
- a: Radialabschnitt 5 - 10 km,
- b: Radialabschnitt 10 - 15 km,
- c: Radialabschnitt 15 - 20 km,
- d: Radialabschnitt 20 - 25 km,
- e: Radialabschnitt 25 - 30 km,
- f: Radialabschnitt 30 - 35 km,
- g: Radialabschnitt 35 - 40 km,
- h: Radialabschnitt 40 - 45 km,
- i: Radialabschnitt 45 - 50 km.
```

Einen Überblick über Lage und Bezeichnung der zu untersuchenden Einzelflächen gibt Abbildung 5.1. Aus dieser Abbildung ist auch die Lage der Freien und Hansestadt Hamburg im durch die definierten Sektorabschnitte umfaßten Gebiet erkennbar.

In den Tabellen 5.1 bis 5.3 sind die Sektorabschnitte, die Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg betreffen, für die Sektoren 10 bis 12 aufgelistet. Außerdem ist jeweils der Abstand des Ortes, für den die Dosis zur Beurteilung der Notwendigkeit von Maßnahmen

des Katastrophenschutzes ermittelt wird, vom KKW Krümmel und dessen Richtung relativ zum KKW Krümmel angegeben. In den nicht tabellierten Sektorabschnitten ist kein Hamburger Gebiet gelegen.

Abbildung 5.1: Lage und Bezeichnung der untersuchten Einzelflächen

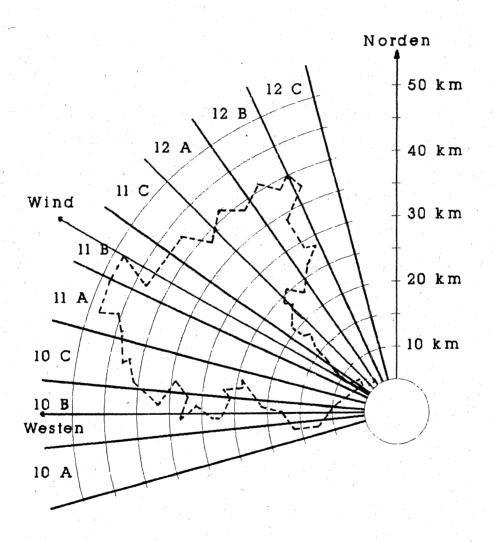


Tabelle 5.1: Koordinaten der Sektoraufpunkte im Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg relativ zum KKW Krümmel (Sektor 10)

Bezeichnung des Sektorabschnitts	Entfernung des Sektor- mittelpunkts vom KKK (in m)	Richtung der Sektor- mittelpunkts (in °)
10Ab 10Ac	12500 17500	260 260
10Bb 10Bc 10Bd 10Be 10Bf 10Bg	12500 17500 22500 27500 32500 37500	270 270 270 270 270 270
10Ca 10Cb 10Cc 10Cd 10Ce 10Cf 10Cg 10Ch	7500 12500 17500 22500 27500 32500 37500 42500	280 280 280 280 280 280 280 280 280

Tabelle 5.2: Koordinaten der Sektoraufpunkte im Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg relativ zum KKW Krümmel (Sektor 11)

	22 (20:1001 -1)	
Bezeichnung des Sektorabschnitts	Entfernung des Sektor- mittelpunkts vom KKK (in m)	Richtung der Sektor- mittelpunkts (in °)
11Aa	7500	290
11Ab	12500	290
11Ac	17500	290
11Ad	22500	290
11Ae	27500	290
11Af	32500	290
11Ag	37500	290
11Ah	42500	290
11Ai	47500	290
11Ba	7500	300
11Bb	12500	300
11Bc	17500	300
11Bd	22500	300
11Be	27500	300
11Bf	32500	300
11Bf	37500	300
11Bg	42500	300
11Bh	47500	300
11Ca	7500	310
11Cb	12500	310
11Cc	17500	310
11Cd	22500	310
11Ce	27500	310
11Cf	32500	310
11Cg	37500	310
11Ch	42500	310

Tabelle 5.3: Koordinaten der Sektoraufpunkte im Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg relativ zum KKW Krümmel (Sektor 12)

Bezeichnung des Sektorabschnitts	Entfernung des Sektor- mittelpunkts vom KKK (in m)	Richtung der Sektor- mittelpunkts (in °)
12Ad	22500	320
12Ae	27500	320
12Af	32500	320
12Ag	37500	320
12Ah	42500	320
12Be	27500	330
12Bf	32500	330
12Bg	37500	330
12Bh	42500	330
12Cg	37500	340

#### 5.2 Wohnbevölkerung in den Sektorabschnitten

Bei der Ermittlung der Wohnbevölkerung in den einzelnen Sektorabschnitten wird in zwei Schritten vorgegangen. Im ersten Schritt wird bestimmt, welche Ortsteile der Freien und Hansestadt Hamburg mit welcher Einwohnerdichte in einem Sektorabschnitt liegen. Dazu wurden aus einer Karte der Freien und Hansestadt Hamburg im Maßstab 1:50.000 die Ortsteile abgelesen, deren Gebiet Teil der einzelnen Sektorabschnitte ist. Die Einwohnerzahl der Ortsteile wurde «Statistisches Landesamt Hamburg 1991» entnommen. Zur Orientierung ist eine Karte im Maßstab 1:150.000 mit Ortsteilgrenzen beigefügt (Anlage 1).

Die Ortsteilgrenzen und die Grenzen der Sektorabschnitte sind nicht deckungsgleich. Deshalb wird im zweiten Schritt die mittlere Bevölkerungsdichte der einzelnen Sektorabschnitte bestimmt. Mit Hilfe graphischer Verfahren wurde der Flächenanteil der verschiedenen Ortsteile der Freien und Hansestadt Hamburg an der Gesamtfläche eines Sektorabschnitts ermittelt. Gemäß ihrem Anteil an der Gesamtfläche geht die jeweilige Einwohnerdichte gewichtet in die Einwohnerdichte des Sektorabschnitts ein. Da die Untersuchung sich ausschließlich auf das Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg und deren Wohnbevölkerung bezieht, werden Bewohner eines Sektorabschnitts, die außerhalb des Hamburger Gebiets leben, nicht mit einbezogen. Größere Wasserflächen – insbesondere das Hafengebiet sowie die Binnen- und Außenalster – wurden bei der Ermittlung der Wohnbevölkerung ausgeklammert.

Für die Berechnung der Einwohnerzahl eines Sektorabschnitts wurde der Ortsteilfläche deren mittlere Einwohnerdichte zugeordnet. Innerhalb eines Ortsteils liegt zwar eine inhomogene Verteilung der Wohnsitze vor, über die Verteilung innerhalb der Ortsteile liegen jedoch keine zugänglichen statistischen Zahlen vor.

In den Tabellen 5.4 bis 5.10 sind die Einwohnerzahlen in den einzelnen Sektorabschnitten sowie die jeweiligen Ortsteile zusammengestellt.

		,			
Tabel	le 5.4: Ortsteile 10A und		nbevölkerung	in den 10°-so	ektoren
	St	tadtteil	(Ortsteil)		Einwohner
10Ab	Kirchwerder	(607)			599
10Ac	Kirchwerder	(607)			57
10Bb	Kirchwerder	(607)	Neuengamme	(606)	2048
10Bc	Kirchwerder	(607)			1930
10Bd	Kirchwerder	(607)			6
10Be	Sinstorf Langebek Wilstorf	(708) (707) (705)	Rönneburg Gut Moor Marmstorf	(706) (704) (709)	9575
10Bf	Sinstorf Eißentorf	(708) (710)	Marmstorf	(709)	12249

1723

10Bg

Neugraben-Fischbek(718)

Tabel	le 5.5: Ortsteile	und Wohn	bevölkerung im 10	O°-Sekto	10C
	St	tadtteil	(Ortsteil)		Einwohner
10Ca	Altengamme	(605)			254
10Cb	Curslack Neuengamme	(604) (606)	Altengamme Kirchwerder	(605) (607)	2030
10Cc	Neuengamme Ochsenwerder	(606) (608)	Kirchwerder	(607)	3686
10Cd	Ochsenwerder Neuland	(608) (703)	Kirchwerder Wilhelmsburg	(607) (714)	1424
10Ce	Harburg Neuland Wilstorf Marmstorf Heimfeld Wilhelmsburg	(701) (703) (705) (709) (711) (713)	Harburg Gut Moor Rönneburg Eißentorf Wilhelmsburg Wilhelmsburg	(702) (704) (706) (710) (712) (714)	43682
10Cf	Eißentorf Wilhelmsburg Hausbruch	(710) (712) (717)	Heimfeld Moorburg	(711) (716)	34007
10Cg	Moorburg Neugraben-Fischbek Neuenfeld	(716) (718) (720)	Hausbruch Francop	(717) (719)	31281
10Ch	Neugraben-Fischbek	(718)	Neuenfeld	(720)	8014

	S	tadtteil	(Ortsteil)		Einwohner
11Aa	Altengamme	(605)			504
11Ab	Curslack Neuengamme	(604) (606)	Altengamme	(605)	2053
11Ac	Bergedorf Neuengamme Ochsenwerder Allermöhe	(602) (606) (608) (610)	Curslack Kirchwerder Reitbrook	(604) (607) (609)	5153
11Ad	Rotenburgsort Reitbrook Moorfleet Spadenland	(133) (609) (612) (614)	Ochsenwerder Allermöhe Tatenberg Wilhelmsburg	(608) (610) (613) (714)	3520
11Ae	Rotenburgsort Kleiner Grasbrook Spadenland Wilhelmsburg	(133) (136) (614) (713)	Veddel Tatenberg Wilhelmsburg Wilhelmsburg	(135) (613) (712) (714)	29210
11Af	Kleiner Grasbrook Waltershof Wilhelmsburg Moorburg	(136) (138) (712) (716)	Steinwerder Altstadt Altona Altenwerder	(137) (202) (715)	14253
11Ag	Waltershof Altstadt Altona Ottensen Othmarschen Nienstedten Altenwerder Neuenfeld	(138) (202) (213) (218) (221) (715) (720)	Finkenwerder Ottensen Groß Flottbek Osdorf Moorburg Francop	(139) (211) (217) (220) (716) (719)	31443
11Ah	Finkenwerder Nienstedten Blankenese Sülldorf Neuenfeld	(139) (221) (223) (225) (720)	Osdorf Blankenese Iserbrook Francop Cranz	(220) (222) (224) (719) (721)	37125
11Ai	Blankenese Rissen	(222) (226)	Sülldorf	(225)	12782

	S	tadtteil	(Ortsteil)		Einwohner
11Ba	Altengamme	(605)			315
11Bb	Bergedorf	(603)	Curslack	(604)	9698
	Altengamme	(605)			
11Bc	Lohbrügge	(601)	Bergedorf	(602)	34113
	Bergedorf	(603)	Curslack	(604)	
	Allermöhe	(610)	Billwerder	(611)	
11Bd	Billstedt	(131)	Billbrook	(132)	25932
	Lohbrügge	(601)	Allermöhe	(610)	
	Billwerder	(611)	Moorfleet	(612)	
11Be	Klostertor	(115)	Klostertor	(116)	69549
1	Hammerbrook	(117)	Hammerbrook	(118)	
•	Hammerbrook	(119)	Borgfeld	(120)	
	Borgfeld	(121)	Hamm Nord	(122)	
	Hamm Nord	(123)	Hamm Nord	(124)	
•	Hamm Mitte	(125)	Hamm Mitte	(126)	
	Hamm Süd	(127)	Hamm Süd	(128)	
	Horn	(129)	Horn	(130)	
	Billstedt	(131)	Billbrook	(132)	
	Rotenburgsort	(133)	Rotenburgsort	(134)	
	Veddel	(135)	Kleiner Grasbrook	(136)	
	Hohenfelde	(417)	Lilbek	(501)	
	Lilbek	(502)	Moorfleet	(612)	
l1Bf	Hamburg-Altstadt	(101)	Hamburg-Altstadt	(102)	197568
	Hamburg-Altstadt	(103)	Neustadt	(104)	
	Neustadt	(105)	Neustadt	(106)	
	Neustadt	(107)	St. Pauli	(108)	
	St. Pauli	(109)	St. Pauli	(110)	
	St. Pauli	(111)	St. Pauli	(112)	
	St. Georg	(113)	St. Georg	(114)	
	Klostertor	(115)	Klostertor	(116)	
	Hammerbrook	(117)	Hammerbrook	(118)	
	Borgfeld	(120)	Borgfeld	(121)	
	Kleiner Grasbrook	(136)	Steinwerder	(137)	•
	Altona Altstadt	(201)	Altona Altstadt	(202)	
	Altona Altstadt	(201)	Altona Altstadt	(204)	
	Altona Altstadt	(205)	Altona Altstadt	(204)	
	Altona Nord	(207)	Altona Nord	(208)	
	Eimsbüttel	(305)	Eimsbüttel	(306)	
	Eimsbüttel	(307)	Eimsbüttel	(308)	
- · ,	Eimsbüttel	(307)	Eimsbüttel	(310)	
		•	pelle 5.8 -	(310)	

Tabel	Tabelle 5.8: Ortsteile und Wohnbevölkerung im 10°-Sektor 11B				
		Stadtteil	(Ortsteil)		Einwohner
			e 5.7/Abschnitt		
	Rotherbaum	(311)	Rotherbaum	(312)	
	Harvestehude	(313)	Harvestehude	(314)	
·	Hoheluft West	(315)	Hoheluft West	(316)	P
	Hoheluft Ost	(401)	Hoheluft Ost	(402)	
	Eppendorf	(403)	Eppendorf	(404)	
	Winterhude	(413)	Uhlenhorst	(414)	, i
	Uhlenhorst	(415)	Hohenfelde	(416)	
	Hohenfelde	(417)	Barmbek-Süd	(418)	
	Barmbek-Süd	(420)	Lilbek	(501)	
11Bg	Altona Altstadt	(203)	Altona Nord	(207)	166610
·	Altona Nord	(209)	Ottensen	(210)	
	Ottensen	(211)	Ottensen	(212)	
	Ottensen	(213)	Bahrenfeld	(214)	,
	Bahrenfeld	(215)	Bahrenfeld	(216)	
$r = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{$	Groß Flottbek	(217)	Othmarschen	(218)	
	Lurup	(219)	Eimsbüttel	(301)	
	Eimsbüttel	(302)	Eimsbüttel	(303)	
	Eimsbüttel	(304)	Eimsbüttel	(305)	
	Eimsbüttel	(306)	Eimsbüttel	(307)	
	Hoheluft West	(316)	Lokstedt	(317)	
	Niendorf	(318)	Eidelstedt	(320)	
	Stellingen	(321)	Hoheluft Ost	(401)	
	Eppendorf	(403)	Eppendorf	(405)	
11Bh	Bahrenfeld	(216)	Groß Flottbek	(217)	72011
	Lurup	(219)	Osdorf	(220)	
	Iserbrook	(224)	Sülldorf	(225)	
	Schnelsen	(319)	Eidelstedt	(320)	
11Bi	Sülldorf	(225)	Rissen	(226)	7718

Tabel	le 5.9: Ortsteil	e und Wohn	bevölkerung im	10°-Sekto	r 11C
		Stadtteil	(Ortsteil)		Einwohner
11Ca	Altengamme	(605)			15
11Cb	Bergedorf	(602)	Bergedorf	(603)	1038
11Cc	Lohbrügge	(601)	Bergedorf	(602)	14314
11Cd	Billstedt	(131)	Lohbrügge	(601)	42605
11Ce	Hamm Nord Horn Billstedt Dulsberg Eilbek Wandsbek Wandsbek Wandsbek Marienthal Tonndorf Bramfeld	(123) (129) (131) (425) (503) (505) (507) (509) (511) (513) (515)	Hamm Nord Horn Dulsberg Eilbek Eilbek Wandsbek Wandsbek Marienthal Jenfeld Farmsen-Berne	(124) (130) (424) (502) (504) (506) (508) (510) (512) (514)	124406
11Cf	Eppendorf Eppendorf Winterhude Winterhude Winterhude Uhlenhorst Barmbek-Süd Barmbek-Süd Barmbek-Nord Dulsberg Barmbek-Nord Ohlsdorf Wandsbek Steilshoop	(403) (405) (408) (410) (412) (414) (418) (420) (422) (424) (426) (428) (430) (509) (516)	Eppendorf Alsterdorf Winterhude Winterhude Winterhude Uhlenhorst Barmbek-Süd Barmbek-Süd Dulsberg Barmbek-Nord Barmbek-Nord Eilbek Bramfeld	(404) (406) (409) (411) (413) (415) (419) (421) (423) (425) (427) (429) (501) (515)	181343
11Cg	Lokstedt Schnelsen Eppendorf Alsterdorf Fuhlsbüttel Hummelsbüttel	(317) (319) (405) (407) (431) (520)	Niendorf Eidelstedt Groß Borstel Ohlsdorf Langenhorn	(318) (320) (406) (430) (432)	78206
11Ch	Niendorf Eidelstedt	(318) (320)	Schnelsen	(319)	21355

Tabel	le 5.10: Ortsteile 12A, 12B		nbevölkerung der 1	0°-Sek	toren
	S	tadtteil	(Ortsteil)		Einwohner
12Ad	Jenfeld	(512)	Rahlstedt	(526)	3851
12 <b>A</b> e	Jenfeld Farmsen-Berne	(512) (514)	Tonndorf Rahlstedt	(513) (526)	78006
12Af	Ohlsdorf Bramfeld Wellingsbüttel Poppenbüttel Bergstedt Rahlstedt	(430) (515) (517) (519) (524) (526)	Farmsen-Berne Steilshoop Sasel Hummelsbüttel Volksdorf	(514) (516) (518) (520) (525)	87581
12Ag	Langenhorn Poppenbüttel Lemsahl-Mellingst	(432) (519) .(521)	Sasel Hummelsbüttel Bergstedt	(518) (520) (524)	57999
12Ah	Langenhorn	(432)			1876
12Be	Volksdorf	(525)	Rahlstedt	(526)	28313
12Bf	Sasel Bergstedt	(518) (524)	Wohldorf-Ohlstedt Volksdorf	(523) (525)	20216
12Bg	Lemsahl-Mellingst Wohldorf-Ohlstedt		Duvenstedt Bergstedt	(522) (524)	10263
12Bh	Duvenstedt	(522)			329
12Cq	Wohldorf-Ohlstedt	(523)			632

### 6 Berechnungsergebnisse

Die Berechnungsergebnisse von Folgen der beiden ausgewählten Unfallabläufe werden in diesem Kapitel präsentiert. In Kapitel 6.1 wird zunächst die Betroffenheit von Gebieten anhand von Isodosislinien dargestellt. Kapitel 6.2 enthält die Berechnungsergebnisse von Strahlenexpositionen und Bodenkontaminationen in tabellarischer Form. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse erfolgt in Kapitel 7.

## 6.1 Isodosislinien

Die Größe der bei den beiden untersuchten Unfallabläufen belasteten Gebiete läßt sich vorteilhaft anhand von Isodosislinien überblicken. Daher werden in den nachfolgenden Abbildungen verschiedene Isodosislinien dargestellt.

Als Parameter für die Darstellung dienen die unteren und oberen Eingreifwerte der "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz". Zusätzlich werden Isodosislinien für Dosen des roten Knochenmarks, die für mögliche Frühschäden verantwortlich sind, berechnet.

Als meteorologisches Referenzszenario wurde ein Fall ohne Niederschläge zugrunde gelegt. Indem Isodosislinien auch für einen flächendeckenden Regen der Intensität 1 mm/h berechnet wurden, wird auch für diesen Fall ein Überblick über die potentielle Strahlenexposition gegeben. Die gewählte Niederschlagsintensität

ist für einen flächendeckenden Regen typisch. Bei der gewählten Windrichtung ist allerdings ein solches ausgedehntes Niederschlagsgebiet nur selten zu erwarten.

In den Abbildungen dargestellt werden die Isodosislinien für die Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage von

- 5 mSv (unterer Richtwert "Verbleiben im Haus"),
- 50 mSv (oberer Richtwert "Verbleiben im Haus"),
- 100 mSv (unterer Richtwert "Evakuierung"),
- 500 mSv (oberer Richtwert "Evakuierung"), sowie die Isodosislinien für die Schilddrüsenbelastung (50-Jahre-Folgedosis) Erwachsener durch Inhalation von
- 50 mSv (unterer Richtwert "Verbleiben im Haus"),
- 200 mSv (unterer Richtwert "Ausgabe von Jodtabletten"),
- 250 mSv (oberer Richtwert "Verbleiben im Haus"),
- 300 mSv (unterer Richtwert "Evakuierung"),
- 1000 mSv (oberer Richtwert "Ausgabe von Jodtabletten"),
- 1500 mSv (oberer Richtwert "Evakuierung").

Außerdem werden Isodosislinien für die Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener durch Gamma-Submersion, Inhalation (7-Tage-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage dargestellt. Hierbei ist weniger die Überschreitung von Richtwerten für Maßnahmen des Katastrophenschutzes von Interesse, da sich keine gegenüber den vorangehenden Isodosislinien zusätzlich zu ergreifenden Maßnahmen in einzelnen Sektorabschnitten ergeben. Die Isodosislinien für die Dosis des roten Knochenmarks geben

aber einen Überblick über das mögliche Auftreten nichtstochastischer Gesundheitsschäden. Die Isodosislinien des roten Knochenmarks sind für

- 50 mSv (Dies ist nach <SSK 1989> die Schwellendosis, ab der einzelne Frühschäden ohne tödliche Folgen auftreten können.)
- 250 mSv (Bei dieser Dosis ist mit vorübergehenden Veränderungen des Blutbilds zu rechnen.)
- 300 mSv (Bei dieser Dosis ist vereinzelt mit Übelkeit, Erbrechen und leichter Abgeschlagenheit zu rechnen.)
- 1500 mSv (Bei dieser Dosis sind einzelne frühe Todesfälle zu erwarten.)

dargestellt.

Für den Quellterm mit Venting und verhinderter Kernschmelze werden keine Isodosislinien berechnet, da Eingreifwerte für Maßnahmen des Katastrophenschutzes bei diesem Quellterm nur in einem einzigen Sektorabschnitt überschritten werden (unterer Richtwert "Verbleiben im Haus" der Schilddrüsendosis durch Inhalation im Sektorabschnitt 11Ba).

Die Abbildungen 6.1 bis 6.3 zeigen die Isodosislinien für den Unfallablauf mit hoher Freisetzung im meteorologischen Referenzszenario "ohne Regen", die Abbildungen 6.4 bis 6.6 die entsprechenden Isodosislinien im Szenario "mit Regen". "Mit Regen" bedeutet einen flächendeckenden Regen der Intensität 1 mm/h.

Alle Abbildungen sind zur besseren Vergleichbarkeit im gleichen Maßstab gehalten.

Abbildung 6.1: Isodosislinien der Effektiven Dosis Erwachsener durch Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage für den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Referenzszenario "ohne Regen" (für 5 mSv, 50 mSv, 100 mSv, 500 mSv)

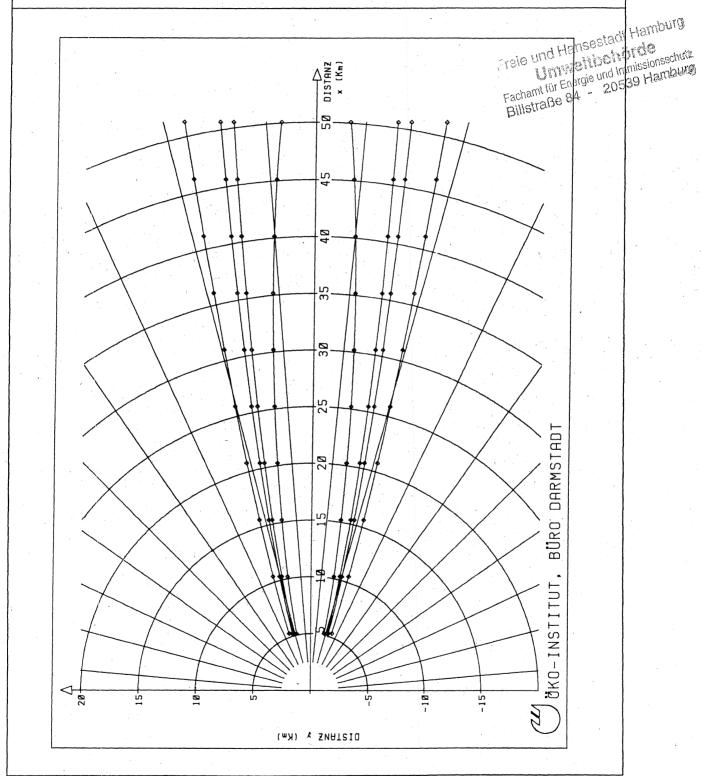


Abbildung 6.2: Isodosislinien der Schilddrüsendosis Erwachsener durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) für den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Referenzszenario "ohne Regen" (für 50 mSv, 200 mSv, 250 mSv, 300 mSv, 1000 mSv, 1500 mSv)

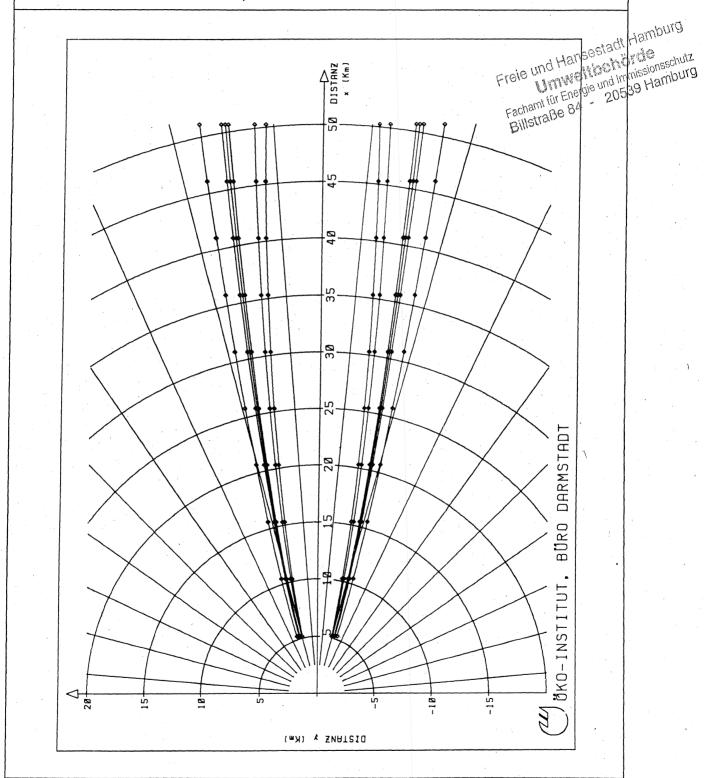


Abbildung 6.3: Isodosislinien der Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener durch Gamma-Submersion, Inhalation (7-Tage-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage für den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Referenzszenario "ohne Regen" (für 50 mSv, 250 mSv, 300 mSv, 1500 mSv)

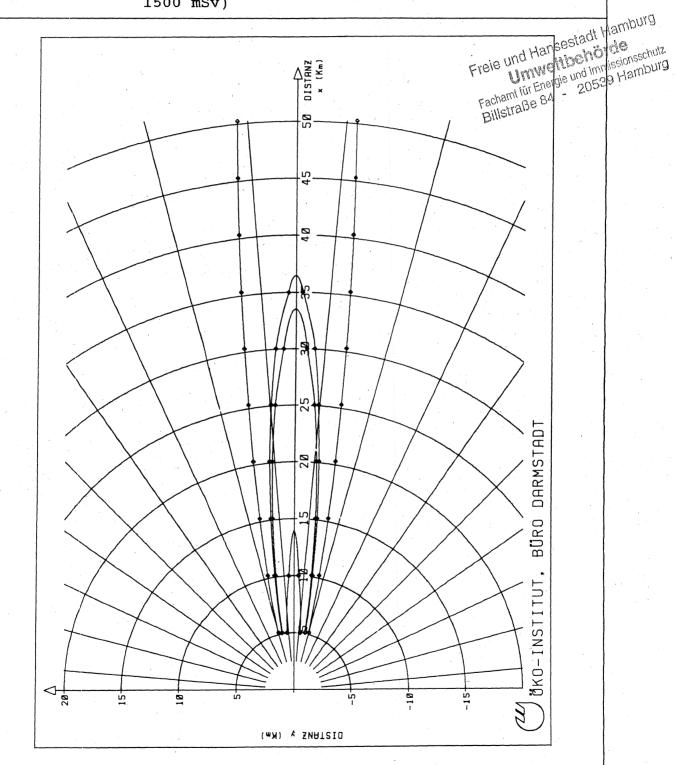


Abbildung 6.4: Isodosislinien der Effektiven Dosis Erwachsener durch Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage für den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Szenario "mit Regen" (für 5 mSv, 50 mSv, 100 mSv, 500 mSv)

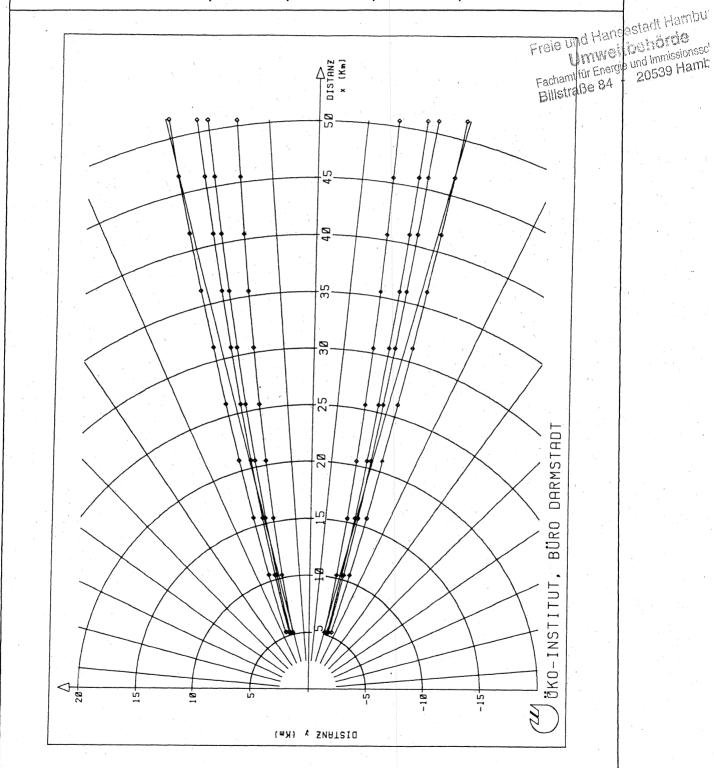


Abbildung 6.5: Isodosislinien der Schilddrüsendosis Erwachsener durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) für den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Szenario "mit Regen" (für 50 mSv, 200 mSv, 250 mSv, 300 mSv, 1000 mSv, 1500 mSv)

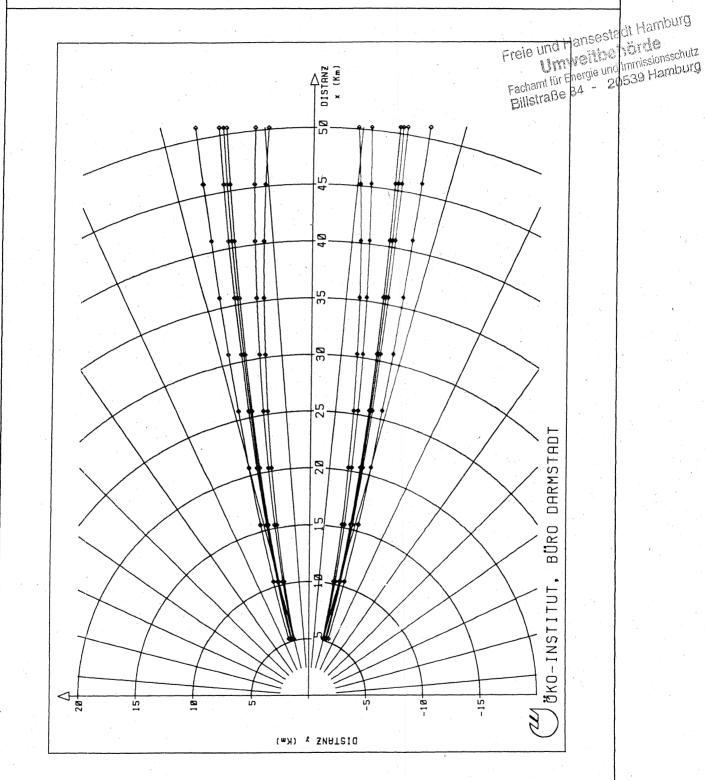
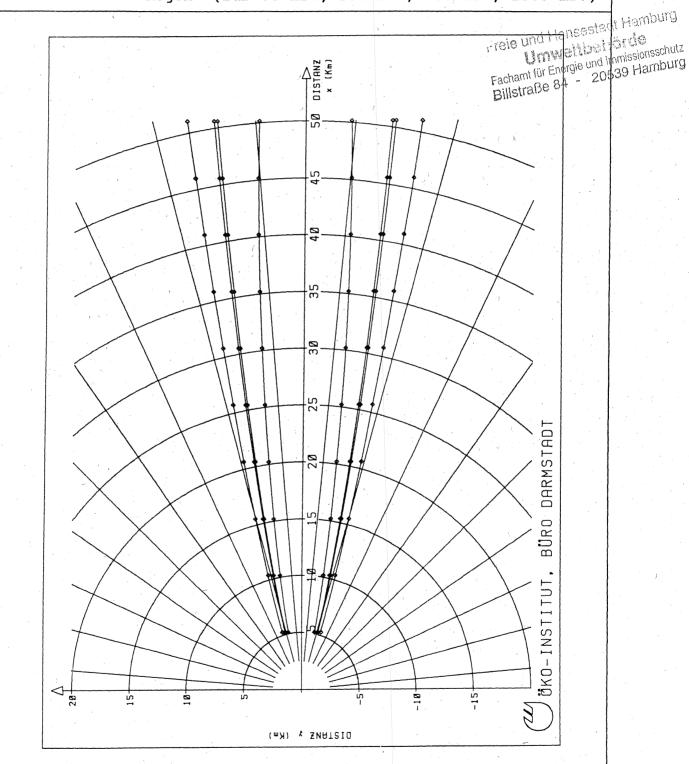


Abbildung 6.6: Isodosislinien der Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener durch Gamma-Submersion, Inhalation (7-Tage-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage für den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Szenario "mit Regen" (für 50 mSv, 250 mSv, 300 mSv, 1500 mSv)



## 6.2 Strahlenexposition und Bodenkontamination in den Sektorabschnitten

## 6.2.1 Unfallablauf mit hohem Quellterm

## 6.2.1.1 Strahlenexposition

In den Tabellen 6.1 bis 6.12 werden für den Kernschmelzunfall mit hohem Quellterm errechnete Strahlendosen aufgelistet. Alle Strahlendosen beziehen sich auf das meteorologische Referenzszenario, in dem es zu keinen Niederschlägen kommt.

Im Hinblick auf Maßnahmen des Katastrophenschutzes sind zwei Expositionen relevant:

- die Summe der Effektiven Dosen aus Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-Jahre-Folgedosis), sowie
- die Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis).

  Durch die erste Expositionsart wird das Risiko bestimmt, das sich aus einem siebentägigen Aufenthalt nach einem Unfall ohne Aufnahme kontaminierter Nahrung ergibt. Für diese Strahlenexposition wie auch für die Strahlenexposition der Schilddrüse sind in den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz Richtwerte für die Einleitung von Maßnahmen angegeben. Die Berechnungen der Dosen erfolgen hier nur für Erwachsene.

Die in diesem Kapitel angegebenen Strahlenexpositionen stellen jeweils die für den Mittelpunkt eines Sektorabschnitts errechneten Belastungen dar. Die Mittelwerte der Expositionen in den einzelnen Sektorabschnitten werden in Kapitel 7 in Zusammenhang mit der Zahl von Spätschäden diskutiert.

Die Summen der Effektiven Dosen aus Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) in den einzelnen Sektorabschnitten werden in den Tabellen 6.1 bis 6.3 für die Sektoren 10 bis 12 aufgelistet. Ebenfalls angegeben ist, in welchen Sektorabschnitten – bezogen auf den jeweiligen Mittelpunkt – untere bzw. obere Richtwerte für Maßnahmen des Katastrophenschutzes überschritten werden. Zur gesamten effektiven Dosis trägt – je nach Sektorabschnitt – die Inhalation etwa 77-78%, die Gamma-Bodenstrahlung etwa 21-22% und die Gamma-Submersion bis 0,5% bei.

Die Schilddrüsendosis (50-Jahre-Folgedosis) in den einzelnen Sektorabschnitten ist in den Tabellen 6.4 bis 6.6 für die Sektoren 10 bis 12 angegeben. Auch für die Schilddrüsendosis sind Überschreitungen der unteren bzw. oberen Richtwerte für Maßnahmen des Katastrophenschutzes ausgewiesen.

Die Dosen durch Gamma-Submersion und Inhalation werden durch den Aufenthalt in der radioaktiven Wolke für die Zeit deren Durchzugs hervorgerufen. Die eigentliche Strahlenbelastung durch Inhalation zieht sich dabei über einen längeren Zeitraum hin - solange noch aufgenommene radioaktive Stoffe im Körper zerfallen -, ist aber nach Durchzug der Wolke nicht mehr abwendbar. Dagegen kann die Dosis aus Gamma-Bodenstrahlung auch nach Durchzug der radioaktiven Wolke durch Aufenthalt in Räumen oder Verlassen eines kontaminierten Gebiets reduziert werden. Um die Wirksamkeit solcher Maßnahmen beurteilen zu können, wird die Gamma-Bodenstrahlung nicht nur für einen Aufenthalt über 7 Tage im kontaminierten Gebiet, sondern auch für Zeiträume von 3 Stunden, 12 Stunden, 1 Tag

und 3 Tage berechnet. In den Tabellen 6.7 bis 6.9 sind diese Dosen der Dosis über 7 Tage für die Sektoren 10 bis 12 gegenüber gestellt.

Das Risiko von Frühschäden wird durch die Strahlendosis bestimmt, die innerhalb einer kurzen Zeit aufgenommen wird. Eine langfristige Belastung nach Aufnahme radioaktiver Stoffe in den Körper ist daher nicht für Frühschäden, sondern für die Spätschäden relevant. Um das Auftreten von Frühschäden auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg beurteilen zu können, werden daher in den Tabellen 6.10 bis 6.12 die Dosen des roten Knochenmarks Erwachsener aus Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (7-Tage-Folgedosis) in den einzelnen Sektorabschnitten angegeben. Die gesamte Dosis des roten Knochenmarks hat ihre Ursache – je nach Sektorabschnitt – zu 95-98% in der Inhalation und zu jeweils bis etwa 2% in Gamma-Bodenstrahlung und Gamma-Submersion.

Tabelle 6.1: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 10

Sektorabschnitt	Effektive Dosis (in mSv)	Maßnahmen * Evak. V.i.H.
10Ab 10Ac	1,00E-17 2,49E-19	
10Bb 10Bc 10Bd 10Be 10Bf 10Bg	5,13E-7 6,72E-8 1,34E-8 3,48E-9 1,10E-9 3,95E-10	
10Ca 10Cb 10Cc 10Cd 10Ce 10Cf 10Cg 10Ch	2,29E+0 5,17E-1 1,71E-1 7,10E-2 3,42E-2 1,83E-2 1,06E-2 6,51E-3	

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

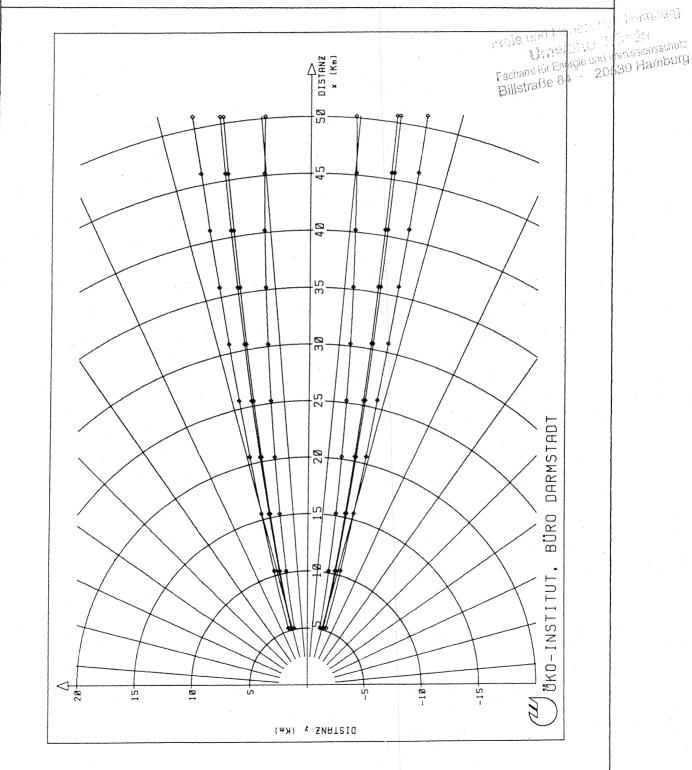
Evak. = Evakuierung

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann erfolgen)

o = oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß erfolgen)

Abbildung 6.6: Isodosislinien der Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener durch Gamma-Submersion, Inhalation (7-Tage-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage für den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Szenario "mit Regen" (für 50 mSv, 250 mSv, 300 mSv, 1500 mSv)



# 6.2 Strahlenexposition und Bodenkontamination in den Sektorabschnitten

### 6.2.1 Unfallablauf mit hohem Quellterm

# 6.2.1.1 Strahlenexposition

In den Tabellen 6.1 bis 6.12 werden für den Kernschmelzunfall mit hohem Quellterm errechnete Strahlendosen aufgelistet. Alle Strahlendosen beziehen sich auf das meteorologische Referenzszenario, in dem es zu keinen Niederschlägen kommt.

Im Hinblick auf Maßnahmen des Katastrophenschutzes sind zwei Expositionen relevant:

- die Summe der Effektiven Dosen aus Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-Jahre-Folgedosis), sowie
- die Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis).

  Durch die erste Expositionsart wird das Risiko bestimmt, das sich aus einem siebentägigen Aufenthalt nach einem Unfall ohne Aufnahme kontaminierter Nahrung ergibt. Für diese Strahlenexposition wie auch für die Strahlenexposition der Schilddrüse sind in den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz Richtwerte für die Einleitung von Maßnahmen angegeben. Die Berechnungen der Dosen erfolgen hier nur für Erwachsene.

Die in diesem Kapitel angegebenen Strahlenexpositionen stellen jeweils die für den Mittelpunkt eines Sektorabschnitts errechneten Belastungen dar. Die Mittelwerte der Expositionen in den einzelnen Sektorabschnitten werden in Kapitel 7 in Zusammenhang mit der Zahl von Spätschäden diskutiert.

Die Summen der Effektiven Dosen aus Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) in den einzelnen Sektorabschnitten werden in den Tabellen 6.1 bis 6.3 für die Sektoren 10 bis 12 aufgelistet. Ebenfalls angegeben ist, in welchen Sektorabschnitten – bezogen auf den jeweiligen Mittelpunkt – untere bzw. obere Richtwerte für Maßnahmen des Katastrophenschutzes überschritten werden. Zur gesamten effektiven Dosis trägt – je nach Sektorabschnitt – die Inhalation etwa 77-78%, die Gamma-Bodenstrahlung etwa 21-22% und die Gamma-Submersion bis 0,5% bei.

Die Schilddrüsendosis (50-Jahre-Folgedosis) in den einzelnen Sektorabschnitten ist in den Tabellen 6.4 bis 6.6 für die Sektoran 10 bis 12 angegeben. Auch für die Schilddrüsendosis sind Überschreitungen der unteren bzw. oberen Richtwerte für Maßnahmen des Katastrophenschutzes ausgewiesen.

Die Dosen durch Gamma-Submersion und Inhalation werden durch den Aufenthalt in der radioaktiven Wolke für die Zeit deren Durchzugs hervorgerufen. Die eigentliche Strahlenbelastung durch Inhalation zieht sich dabei über einen längeren Zeitraum hin – solange noch aufgenommene radioaktive Stoffe im Körper zerfallen –, ist aber nach Durchzug der Wolke nicht mehr abwendbar. Dagegen kann die Dosis aus Gamma-Bodenstrahlung auch nach Durchzug der radioaktiven Wolke durch Aufenthalt in Räumen oder Verlassen eines kontaminierten Gebiets reduziert werden. Um die Wirksamkeit solcher Maßnahmen beurteilen zu können, wird die Gamma-Bodenstrahlung nicht nur für einen Aufenthalt über 7 Tage im kontaminierten Gebiet, sondern auch für Zeiträume von 3 Stunden, 12 Stunden, 1 Tag

und 3 Tage berechnet. In den Tabellen 6.7 bis 6.9 sind diese Dosen der Dosis über 7 Tage für die Sektoren 10 bis 12 gegenüber gestellt.

Das Risiko von Frühschäden wird durch die Strahlendosis bestimmt, die innerhalb einer kurzen Zeit aufgenommen wird. Eine langfristige Belastung nach Aufnahme radioaktiver Stoffe in den Körper ist daher nicht für Frühschäden, sondern für die Spätschäden relevant. Um das Auftreten von Frühschäden auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg beurteilen zu können, werden daher in den Tabellen 6.10 bis 6.12 die Dosen des roten Knochenmarks Erwachsener aus Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (7-Tage-Folgedosis) in den einzelnen Sektorabschnitten angegeben. Die gesamte Dosis des roten Knochenmarks hat ihre Ursache – je nach Sektorabschnitt – zu 95-98% in der Inhalation und zu jeweils bis etwa 2% in Gamma-Bodenstrahlung und Gamma-Submersion.

Tabelle 6.1: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Submersion,
Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation
(50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit hohem
Quellterm im Sektor 10

Sektorabschnitt	Effektive Dosis (in mSv)				Maßna Evak.	hmen * V.i.H.
10Ab 10Ac	1,00E-17 2,49E-19					
10Bb 10Bc 10Bd 10Be 10Bf 10Bg	5,13E-7 6,72E-8 1,34E-8 3,48E-9 1,10E-9 3,95E-10					
10Ca 10Cb 10Cc 10Cd 10Ce 10Cf 10Cg 10Ch	2,29E+0 5,17E-1 1,71E-1 7,10E-2 3,42E-2 1,83E-2 1,06E-2 6,51E-3					

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann

erfolgen)

o = oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß erfolgen)

Tabelle 6.2: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 11

Sektorabschnitt	Effektive Dosis (in mSv)	Maßn Evak.	ahmen * V.i.H.
111			
11Aa	1,48E+3	0	0
11Ab	6,47E+2	0	0
11Ac	3,46E+2	u	0
11Ad	2,10E+2	u	0
11Ae	1,39E+2	u u	0
11Af	9,83E+1		0
11Ag	7,25E+1		0
11Ah	5,54E+1		0
11Ai	4,35E+1		u
11Ba	1,10E+4	0	0
11Bb	5,91E+3	0	0
11Bc	3,66E+3	0	0
11Bd	2,51E+3	0	0
11Be	1,84E+3	0	0
11Bf	1,42E+3	0	0
11Bg	1,12E+3	0	0
11Bh	9,18E+2	0	0
11Bi	7,65E+2	0	0
11Ca	1,48E+3	0	0
11Cb	6,47E+2	0	0
11Cc	3,46E+2	u	0
11Cd	2,10E+2	u	0
11Ce	1,39E+2	u	o
11Cf	9,83E+1		0
11Cg	7,25E+1		0
11Ch	5,54E+1		0

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann

erfolgen)

o = oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß

erfolgen)



Tabelle 6.3: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Submersion,
Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation
(50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit hohem
Quellterm im Sektor 12

Sektorabschnitt	Effektive Dosis (in mSv)	Maßnahmen * Evak. V.i.H.
12Ad 12Ae 12Af 12Ag 12Ah	7,10E-2 3,42E-2 1,83E-2 1,06E-2 6,51E-3	
12Be 12Bf 12Bg 12Bh	3,48E-9 1,10E-9 3,95E-10 1,59E-10	
12Cg	2,20E-23	

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann erfolgen)

erfolgen)

o = oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß erfolgen)

Tabelle 6.4: Schilddrüsendosis Erwachsener durch Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 10

Sektorabschnitt	Schilddrüsendosis (in mSv)	Maßnahmen * Evak. V.i.H. E.v.J.
10Ab 10Ac	5,59E-17 1,39E-18	
10Bb 10Bc 10Bd 10Be 10Bf 10Bg	2,87E-6 3,74E-7 7,44E-8 1,93E-8 6,05E-9 2,18E-9	
10Ca 10Cb 10Cc 10Cd 10Ce 10Cf 10Cg 10Ch	1,27E+1 2,88E+0 9,52E-1 3,94E-1 1,89E-1 1,01E-1 5,83E-2 3,57E-2	

Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

E.v.J. =

Aufforderung zur Einnahme von Jodtabletten unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann

erfolgen)

oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß 0

erfolgen)

Tabelle 6.5: Schilddrüsendosis Erwachsener durch Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 11

Sektorabschnitt	Schilddrüsendosis	Maßnahmen *		
	(in mSv)	Evak.	V.i.H.	E.v.J.
11Aa	8,24E+3	0	0	0
11Ab	3,61E+3	0	0	0
11Ac	1,92E+3	0	0	0
11Ad	1,17E+3	u	0	0
11Ae	7,72E+2	u	0	u
11Af	5,42E+2	u	. 0	u
11Ag	3,99E+2	u	0	u u
11Ah	3,04E+2	u	0	u
11Ai	2,38E+2		u	u
11Ba	6,13E+4	0	0	0
11Bb	3,30E+4	0	0	0
11Bc	2,04E+4	0	0	0
11Bd	1,39E+4	0	0	0
11Be	1,02E+4	0	0	0
11Bf	7,79E+3	0	0	0 2 4
11Bg	6,18E+3	0	, <b>O</b>	0
11Bh	5,03E+3	0	0	0
11Bi	4,19E+3	0	0	0
11Ca	8,24E+3	0	0	0
11Cb	3,61E+3	0	0	0
11Cc	1,92E+3	0	0	- o
11Cd	1,17E+3	u	0	0
11Ce	7,72E+2	u	0	u
11Cf	5,42E+2	u	0	u
11Cg	3,99E+2	u [	0	u 🕆
11Ch	3,04E+2	u	0	u

Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

Evakuierung Evak.

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

E.v.J. =

unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann erfolgen)
oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß erfolgen)
erfolgen) ALIO LA PERSON ILA u

<del>krsis nug</del>

Fachamilia Ge 84 - Toland Innies

Tabelle 6.6: Schilddrüsendosis Erwachsener durch Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 12

Sektorabschnitt	Schilddrüsendosis	1	Maßnahmer	า *
	(in mSv)	Evak.	and the second of the second of	E.v.J.
12Ad	3,94E-1			
12 <b>A</b> e	1,89E-1			
12Af	1,01E-1			
12Ag	5,83E-2			i .
12Ah	3,57E-2			
12Be	1,93E-8			
12Bf	6,05E-9			
12Bg	2,18E-9			
12Bh	8,76E-10			
12Cg	1,22E-22			

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

E.v.J. = Aufforderung zur Einnahme von Jodtabletten

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann

erfolgen)

o = oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß

erfolgen)

Tabelle 6.7: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Bodenstrahlung über verschiedene Zeiträume beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 10 (in mSv)

G = l=+ = = '		T)	:+:		
Sektor- abschnitt	3 h		positionsda   1 d		7 d
10Ab	3,39E-19	7,84E-19	1,09E-18	1,67E-18	2,25E-18
10Ac	8,21E-21	1,92E-20	2,67E-20	4,13E-20	5,58E-20
10Bb	1,72E-8	4,00E-8	5,54E-8	8,55E-8	1,15E-7
10Bc	2,18E-9	5,12E-9	7,13E-9	1,11E-8	1,50E-8
10Bd	4,22E-10	9,99E-10	1,40E-9	2,18E-9	2,96E-9
10Be	1,07E-10	2,55E-10	3,58E-10	5,61E-10	7,64E-10
10Bf	3,25E-11	7,86E-11	1,11E-10	1,74E-10	2,38E-10
10Bg	1,14E-11	2,79E-11	3,94E-11	6,24E-11	8,54E-11
10Ca	7,86E-2	1,81E-1	2,50E-1	3,83E-1	5,15E-1
10Cb	1,72E-2	4,00E-2	5,56E-2	8,58E-2	1,16E-1
10Cc	5,50E-3	1,29E-2	1,81E-2	2,81E-2	3,80E-2
10Cd	2,21E-3	5,26E-3	7,37E-3	1,15E-2	1,56E-2
10Ce	1,03E-3	2,48E-3	3,49E-3	5,48E-3	7,47E-3
10Cf	5,36E-4	1,30E-3	1,84E-3	2,90E-3	3,96E-3
10Cg	3,01E-4	7,37E-4	1,05E-3	1,66E-3	2,27E-3
10Ch	1,79E-4	4,44E-4	6,33E-4	1,01E-3	1,39E-3

VI - 20

| Figure | F mit hohem Quellterm im Sektor 11 (in mSv)

	mic non	cm gucifica	m Im Delicor	11 (11 mbv	<u>'</u>
Sektor-		Ex	positionsda	uer	
abschnitt	3 h	12 h	1 d	3 d	7 d
11Aa	5,07E+1	1,17E+2	1,61E+2	2,48E+2	3,33E+2
11Ab	2,15E+1	5,00E+1	6,94E+1	1,07E+2	1,45E+2
11Ac	1,11E+1	2,61E+1	3,64E+1	5,66E+1	7,67E+1
11Ad	6,51E+0	1,55E+1	2,18E+1	3,40E+1	4,62E+1
11Ae	4,18E+0	1,01E+1	1,42E+1	2,23E+1	3,04E+1
11Af	2,85E+0	6,94E+0	9,82E+0	1,55E+1	2,12E+1
11Ag	2,04E+0	5,01E+0	7,12E+0	1,13E+1	1,55E+1
11Ah	1,51E+0	3,75E+0	5,36E+0	8,56E+0	1,18E+1
11Ai	1,15E+0	2,89E+0	4,14E+0	6,65E+0	9,17E+0
11Ba	3,77E+2	8,67E+2	1,20E+3	1,84E+3	2,48E+3
11Bb	1,96E+2	4,57E+2	6,35E+2	9,81E+2	1,32E+3
11Bc	1,17E+2	2,76E+2	3,86E+2	6,00E+2	8,13E+2
11Bd	7,75E+1	1,85E+2	2,59E+2	4,06E+2	5,52E+2
11Be	5,49E+1	1,32E+2	1,87E+2	2,93E+2	4,00E+2
11Bf	4,08E+1	9,94E+1	1,41E+2	2,23E+2	3,05E+2
11Bg	3,15E+1	7,74E+1	1,10E+2	1,75E+2	2,40E+2
11Bh	2,49E+1	6,20E+1	8,85E+1	1,42E+2	1,95E+2
11Bi	2,02E+1	5,08E+1	7,28E+1	1,17E+2	1,61E+2
11Ca	5,07E+1	1,17E+2	1,61E+2	2,48E+2	3,33E+2
11Cb	2,15E+1	5,00E+1	6,94E+1	1,07E+2	1,45E+2
11Cc	1,11E+1	2,61E+1	3,64E+1	5,66E+1	7,67E+1
11Cd	6,51E+0	1,55E+1	2,18E+1	3,40E+1	4,62E+1
11Ce	4,18E+0	1,01E+1	1,42E+1	2,23E+1	3,04E+1
11Cf	2,85E+0	6,94E+0	9,82E+0	1,55E+1	2,12E+1
11Cg	2,04E+0	5,01E+0	7,12E+0	1,13E+1	1,55E+1
11Ch	1,51E+0	3,75E+0	5,36E+0	8,56E+0	1,18E+1
1				I	1

Tabelle 6.9: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Bodenstrahlung über verschiedene Zeiträume beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 12 (in mSv)

Sektor- abschnitt	3 h		positionsdam 1 d		7 d
12Ad	2,21E-3	5,26E-3	7,37E-3	1,15E-2	1,56E-2
12Ae	1,03E-3	2,48E-3	3,49E-3	5,48E-3	7,47E-3
12Af	5,36E-4	1,30E-3	1,84E-3	2,90E-3	3,96E-3
12Ag	3,01E-4	7,37E-4	1,05E-3	1,66E-3	2,27E-3
12Ah	1,79E-4	4,44E-4	6,33E-4	1,01E-3	1,39E-3
12Be	1,07E-10	2,55E-10	3,58E-10	5,61E-10	7,64E-10
12Bf	3,25E-11	7,86E-11	1,11E-10	1,74E-10	2,38E-10
12Bg	1,14E-11	2,79E-11	3,94E-11	6,24E-11	8,54E-11
12Bh	4,48E-12	1,10E-11	1,56E-11	2,48E-11	3,41E-11
12Cg	6,51E-25	1,58E-24	2,22E-24	3,50E-24	4,78E-24

Tabelle 6.10: Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (7 Tage-Folgedosis) beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 10

Sektorabschnitt	Dosis des roten Knochenmarks (in mSv)
10Ab	2,14E-18
10Ac	5,32E-20
10Bb	1,10E-7
10Bc	1,43E-8
10Bd	2,82E-9
10Be	7,28E-10
10Bf	2,27E-10
10Bg	8,15E-11
10Ca	4,92E-1
10Cb	1,10E-1
10Cc	3,63E-2
10Cd	1,49E-2
10Ce	7,13E-3
10Cf	3,78E-3
10Cg	2,17E-3
10Ch	1,32E-3

Tabelle 6.11: Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (7 Tage-Folgedosis) beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 11

Sektorabschnitt	Dosis des roten Knochenmarks (in mSv)
11Aa 11Ab 11Ac 11Ad 11Ae 11Af 11Ag 11Ah	3,18E+2 1,38E+2 7,32E+1 4,41E+1 2,90E+1 2,02E+1 1,48E+1 1,12E+1 8,76E+0
11Ba 11Bb 11Bc 11Bd 11Be 11Bf 11Bg 11Bh 11Bi	2,41E+3 1,27E+3 7,77E+2 5,26E+2 3,82E+2 2,91E+2 2,29E+2 1,86E+2 1,54E+2
11Ca 11Cb 11Cc 11Cd 11Ce 11Cf 11Cg 11Ch	3,18E+2 1,38E+2 7,32E+1 4,41E+1 2,90E+1 2,02E+1 1,48E+1 1,12E+1

Tabelle 6.12: Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (7 Tage-Folgedosis) beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 12

Sektorabschnitt	Dosis des roten Knochenmarks (in mSv)
12Ad	1,49E-2
12Ae	7,13E-3
12Af	3,78E-3
12Ag	2,17E-3
12Ah	1,32E-3
12Be	7,28E-10
12Bf	2,27E-10
12Bg	8,15E-11
12Bh	3,25E-11
12Cg	4,56E-24

#### 6.2.1.2 Bodenkontamination

Anhand der unfallbedingten Bodenkontaminationen kann die weitere spezifische Nutzbarkeit kontaminierter Flächen beurteilt werden. Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens sind die Folgen eingeschränkter Nutzungsmöglichkeiten nicht zu untersuchen. Es sollen aber Basisdaten für entsprechende weiterführende Untersuchungen dargestellt werden.

Bei der Ablagerung radioaktiver Stoffe wird in <BMI 1983> und <BMU 1990> die trockene Deposition (Fallout) und die nasse Deposition (Washout) unterschieden. Auf dem Boden verbleibt jeweils der abgelagerte Teil unbegrenzt. Eine zeitabhängige Reduzierung der Gamma-Bodenstrahlung wird in <BMU 1990> lediglich für ein längerfristiges Eindringen der radioaktiven Stoffe in den Boden simuliert.

Als Leitnuklid für eine kurzfristige Bodenkontamination kann Jod131 mit einer Halbwertszeit von 8,04 Tagen herangezogen werden.
Leitnuklide für Untersuchungen langfristiger Folgen von Reaktorunfällen sind z.B.:

- Cäsium-137 (im Hinblick auf die Ortsdosisleistung und die landwirtschaftliche bzw. kleingärtnerische Lebensmittelproduktion), sowie
- langlebige Plutonium- und Americium-Isotope (Pu-238, Pu-239, Pu-240 und Am-241) im Hinblick auf die Inhalation nach Resuspension.

Durch diese Leitnuklide können spezifische Einschränkungen der Nutzung kontaminierter Gelände hervorgerufen werden. Bei einer Einschränkung in der Produktion von Nahrungsmitteln ergeben die Modellierungen der Bodenkontamination nach <BMI 1983> bzw. <BMU 1990> ausreichend realistische Ergebnisse, da auch nach einem Eindringen in den Boden die radioaktiven Stoffe noch im Wurzelbereich der Pflanzen sind. Eine Berücksichtigung chemischer und mikrobiologischer Vorgänge, die die Pflanzenverfügbarkeit der Radionuklide beeinflussen, ist nicht sinnvoll, da solche Prozesse auch umkehrbar sind. Für die Beurteilung einer uneingeschränkten Nutzbarkeit muß daher als Randbedingung in diesem Fall eine Pflanzenverfügbarkeit unterstellt werden.

Um zu einer realistischen Einschätzung der langfristigen für die Gamma-Bodenstrahlung maßgeblichen Bodenkontamination zu kommen, ist neben einem Eindringen in tiefere Bodenschichten (Abschirmung) auch die Abwitterung, insbesondere durch Niederschläge, zu berücksichtigen. Bei befestigten Flächen spielt die Abwitterung eine besonders große Rolle.

Empirische Untersuchungen der Abwitterung liegen beispielsweise in <Jacob 1990> für Cäsium-Depositionen nach dem Unfall in Tschernobyl im Süddeutschen Raum vor. Die Abwitterung ist nach diesen Untersuchungen umso stärker, je befestigter der Untergrund ist. Auch zeigen die Daten erwartungsgemäß, daß auf befestigtem Untergrund eine geringere Rückhaltung bei der Deposition gegeben ist. Die Auswertung für befestigte Plätze in <Jacob 1990> ergibt nach etwa drei Jahren für die einzelnen Meßorte Reduktionen auf Werte zwischen 4,1% und 12% einer Ortsdosisleistung über einer unendlich ausgedehnten Fläche ohne Oberflächenrauhigkeit und ohne Abwitterung.

Die Befunde in <Jacob 1990> werden auch durch andere Untersuchungen bestätigt. In <IAEA 1989> wird beispielsweise die Abwitterung auf befestigten Flächen mit der Formel

Reduktionsfaktor Q = Dosis mit Abwitterung/Dosis ohne Abwitterung =  $a \cdot (b \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/tW} + 1 - b)$ 

simuliert. Die Zeit nach Deposition ist in dieser Formel mit t bezeichnet. Für die übrigen Parameter werden aufgrund der Erfahrung nach dem Unfall in Tschernobyl die Werte

 $a \approx 0.4$ 

0,4 < b < 1,0

66 Tage  $< t_{\dot{W}} < 92$  Tage

genannt.

Für mittlere Werte von 0,7 für den Parameter b und 75 Tage für den Parameter  $t_W$  ergibt sich ein Zeitverlauf, der mit der Meßreihe in <Jacob 1990>, die zu einer Reduzierung auf 12% nach etwa drei Jahren führt, in guter Übereinstimmung steht. Eine Restakti-

vität von 12% der ursprünglich abgelagerten Aktivität verbleibt in diesem Fall trotz der Abwitterung auch langfristig auf befestigten Flächen. Dieser Reduktionsfaktor wird in unseren Berechnungen der Bodenkontamination unter Berücksichtigung der Abwitterung auf befestigten Flächen verwendet.

In den Tabellen 6.13 bis 6.15 sind für die Sektoren 10 bis 12 die Bodenkontaminationen mit Jod-131 aufgeführt. Die Kontaminationen werden für die Zeitpunkte 3 Tage, 7 Tage, 30 Tage und 91 Tage nach Deposition angegeben. Die Reduzierung der Kontaminationen erfolgt durch den radioaktiven Zerfall des Jod-131 mit einer Halbwertszeit von 8,04 Tagen.

Die errechneten Bodenkontaminationen mit Cäsium-137 sind in den Tabellen 6.16 bis 6.18 für die Sektoren 10 bis 12 tabelliert. Die Kontaminationen werden für die Zeitpunkte unmittelbar nach Deposition sowie 1 Jahr, 10 Jahre, 30 Jahre und 50 Jahre nach Deposition angegeben. Die Reduzierung der Kontamination erfolgt vor allem durch die Abwitterung wärend des ersten Jahres gemäß dem oben beschriebenen Ansatz, aber langfristig auch durch den radioaktiven Zerfall des Cäsium-137 mit einer Halbwertszeit von 30,1 Jahren.

In den Tabellen 6.19 bis 6.21 sind für die Sektoren 10 bis 12 die Bodenkontaminationen mit  $\alpha$ -strahlendem Plutonium (Summe der Isotope Pu-238, Pu-239 und Pu-240) angegeben. Die Kontaminationen wurden für die Zeitpunkte 1 Jahr, 10 Jahre und 50 Jahre nach Deposition errechnet. Im Hinblick auf die Inhalation des Plutoniums nach Resuspension weisen diese drei Isotope sehr ähnliche Dosisfaktoren auf, so daß ihre Summe als Beurteilungsgrundlage für längerfristige Nutzungen dienen kann. Die Reduzierung der Konta-

minationen erfolgt in erster Linie durch die Abwitterung gemäß dem oben beschriebenen Ansatz; der radioaktive Zerfall spielt bei den langen Halbwertszeiten der Isotope - zwischen 87,7 und 24.100 Jahren - eine untergeordnete Rolle.

Die Tabellen 6.22 bis 6.24 zeigen für die Sektoren 10 bis 12 die errechneten Bodenkontaminationen mit Americium-241. Die Kontaminationen wurden für die Zeitpunkte 1 Jahr, 10 Jahre und 50 Jahre nach Deposition errechnet. Wie bei  $\alpha$ -strahlendem Plutonium wird auch bei Americium-241 die Reduzierung der Kontamination in erster Linie durch die Abwitterung hervorgerufen. Die Halbwertszeit des Americium-241 beträgt 433 Jahre. Berücksichtigt wird aber auch die Neubildung des Americium-241 durch den Zerfall des Plutonium-241 (Halbwertszeit 14,4 Jahre).

In den Abbildungen 6.7 und 6.8 sind die Bodenkontaminationen mit Jod-131 (unmittelbar nach Ablagerung) und Cäsium-137 (nach 1 Jahr) im Flächenraster aufgetragen.

Alle in den Tabellen 6.13 bis 6.24 und den Abbildungen 6.7 bis 6.8 angegebenen Bodenkontaminationen beziehen sich auf das meteorologische Referenzszenario, in dem es zu keinen Niederschlägen kommt. Bei nasser Deposition können die Bodenkontaminationen um zwei Größenordnungen ansteigen.

Tabelle 6.13: Bodenkontamination mit Jod-131 nach verschiedenen Zeiträumen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 10 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	Zeitraum				
DER COL ADBOINT CC	3 d	7 d	30 d	91 d	
10Ab	2,67E-12	1,89E-12	2,59E-13	1,33E-15	
10Ac	6,64E-14	4,70E-14	6,44E-15	3,31E-17	
10Bb	1,37E-1	9,67E-2	1,32E-2	6,80E-5	
10Bc	1,78E-2	1,26E-2	1,73E-3	8,87E-6	
10Bd	3,55E-3	2,51E-3	3,44E-4	1,77E-6	
10Be	9,26E-4	6,55E-4	8,98E-5	4,61E-7	
10Bf	2,89E-4	2,05E-4	2,81E-5	1,44E-7	
10Bg	1,04E-4	7,37E-5	1,01E-5	5,18E-8	
10Ca	6,09E+5	4,31E+5	5,90E+4	3,03E+2	
10Cb	1,37E+5	9,72E+4	1,33E+4	6,84E+1	
10Cc	4,54E+4	3,22E+4	4,41E+3	2,26E+1	
10Cd	1,88E+4	1,33E+4	1,83E+3	9,37E+0	
10Ce	9,03E+3	6,39E+3	8,75E+2	4,49E+0	
10Cf	4,83E+3	3,42E+3	4,68E+2	2,40E+0	
10Cg	2,79E+3	1,97E+3	2,70E+2	1,39E+0	
10Ch	1,71E+3	1,21E+3	1,66E+2	8,52E-1	

Freie und Hamer and Immissionschulz Freie und Hamer and Immissionschulz Facham für Enargie und 120539 Hamburg Facham für Enargie BA

Tabelle 6.14: Bodenkontamination mit Jod-131 nach verschiedenen Zeiträumen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 11 (in Bq/m²)

_	m bereot ii	( , , ,				
Sektorabschnitt		Zeitraum				
	3 d	7 d	30 d	91 d		
11Aa	3,94E+8	2,79E+8	3,82E+7	1,96E+5		
11Ab	1,72E+8	1,22E+8	1,67E+7	8,56E+4		
11Ac	9,18E+7	6,50E+7	8,90E+6	4,57E+4		
11Ad	5,57E+7	3,94E+7	5,40E+6	2,77E+4		
11Ae	3,69E+7	2,61E+7	3,58E+6	1,84E+4		
11Af	2,59E+7	1,83E+7	2,51E+6	1,29E+4		
11 <b>A</b> g	1,91E+7	1,35E+7	1,85E+6	9,48E+3		
11Ah	1,46E+7	1,03E+7	1,41E+6	7,26E+3		
11Ai	1,14E+7	8,08E+6	1,11E+6	5,68E+3		
11Ba	2,92E+9	2,07E+9	2,84E+8	1,46E+6		
11Bb	1,57E+9	1,11E+9	1,53E+8	7,83E+5		
11Bc	9,72E+8	6,88E+8	9,43E+7	4,84E+5		
11Bd	6,65E+8	4,71E+8	6,45E+7	3,31E+5		
11Be	4,86E+8	3,44E+8	4,71E+7	2,42E+5		
11Bf	3,72E+8	2,63E+8	3,61E+7	1,85E+5		
11Bg	2,96E+8	2,09E+8	2,87E+7	1,47E+5		
11Bh	2,41E+8	1,70E+8	2,33E+7	1,20E+5		
11Bi	2,01E+8	1,42E+8	1,95E+7	9,98E+4		
11Ca	3,94E+8	2,79E+8	3,82E+7	1,96E+5		
11Cb	1,72E+8	1,22E+8	1,67E+7	8,56E+4		
11Cc	9,18E+7	6,50E+7	8,90E+6	4,57E+4		
11Cd	5,57E+7	3,94E+7	5,40E+6	2,77E+4		
11Ce	3,69E+7	2,61E+7	3,58E+6	1,84E+4		
11Cf	2,59E+7	1,83E+7	2,51E+6	1,29E+4 9,48E+3 44300	'OU	
11Cg	1,91E+7	1,35E+7	1,85E+6	9,48E+3	in.	
11Ch	1,46E+7	1,03E+7	1,41E+6	7,26E+3	ions ions	

Freie und Hamburg Facham für Energie und Immissionsschuld 199 Hamburg Facham für Energie und Immissionsschuld 199 Hamburg Facham für Energie und 199 Hamburg

Tabelle 6.15: Bodenkontamination mit Jod-131 nach verschiedenen Zeiträumen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 12 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	Zeitraum			
	3 d	7 d	30 d	91 d
12Ad 12Ae 12Af 12Ag 12Ah	1,88E+4 9,03E+3 4,83E+3 2,79E+3 1,71E+3	1,33E+4 6,39E+3 3,42E+3 1,97E+3 1,21E+3	1,83E+3 8,75E+2 4,68E+2 2,70E+2 1,66E+2	9,37E+0 4,49E+0 2,40E+0 1,39E+0 8,52E-1
12Be 12Bf 12Bg 12Bh	9,26E-4 2,89E-4 1,04E-4 4,19E-5	6,55E-4 2,05E-4 7,37E-5 2,97E-5	8,98E-5 2,81E-5 1,01E-5 4,06E-6	4,61E-7 1,44E-7 5,18E-8 2,09E-8
12Cg	5,81E-18	4,11E-18	5,63E-19	2,89E-21

Tabelle 6.16: Bodenkontamination mit Cäsium-137 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung der Abwitterung beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 10 (in Bq/m²)

Sektor- ab- schnitt	0 a	1 a	Zeitraum 10 a	30 a	50 a
10Ab	3,97E-14	5,06E-15	3,79E-15	2,39E-15	1,51E-15
10Ac	9,95E-16	1,27E-16	9,49E-17	5,99E-17	3,79E-17
10Bb	2,04E-3	2,60E-4	1,95E-4	1,23E-4	7,76E-5
10Bc	2,68E-4	3,42E-5	2,56E-5	1,61E-5	1,02E-5
10Bd	5,38E-5	6,86E-6	5,13E-6	3,24E-6	2,05E-6
10Be	1,41E-5	1,80E-6	1,34E-6	8,49E-7	5,36E-7
10Bf	4,44E-6	5,66E-7	4,23E-7	2,67E-7	1,69E-7
10Bg	1,61E-6	2,05E-7	1,54E-7	9,70E-8	6,13E-8
10Ca	9,00E+3	1,15E+3 2,61E+2 8,72E+1 3,65E+1 1,76E+1 9,47E+0 5,50E+0 3,39E+0	8,58E+2	5,42E+2	3,42E+2
10Cb	2,05E+3		1,96E+2	1,23E+2	7,80E+1
10Cc	6,84E+2		6,52E+1	4,12E+1	2,60E+1
10Cd	2,86E+2		2,73E+1	1,72E+1	1,09E+1
10Ce	1,38E+2		1,32E+1	8,31E+0	5,25E+0
10Cf	7,43E+1		7,09E+0	4,48E+0	2,83E+0
10Cg	4,31E+1		4,11E+0	2,60E+0	1,64E+0
10Ch	2,66E+1		2,54E+0	1,60E+0	1,01E+0

Tabelle 6.17: Bodenkontamination mit Cäsium-137 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung der Abwitterung beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 11 (in Bq/m²)

	ım se.	ktor II (In	Bd/w_)			
Sektor-			Zeitraum			
ab- schnitt	0 a	1 a	10 a	30 a	50 a	
11Aa	5,82E+6	7,42E+5	5,55E+5	3,51E+5	2,21E+5	
11Ab	2,57E+6	3,28E+5	2,45E+5	1,55E+5	9,78E+4	
11Ac	1,39E+6	1,77E+5	1,33E+5	8,37E+4	5,29E+4	
11Ad	8,47E+5	1,08E+5	8,08E+4	5,10E+4	3,22E+4	
11Ae	5,65E+5	7,20E+4	5,39E+4	3,40E+4	2,15E+4	
11Af	3,99E+5	5,09E+4	3,81E+4	2,40E+4	1,52E+4	
11Ag	2,96E+5	3,77E+4	2,82E+4	1,78E+4	1,13E+4	
11Ah	2,27E+5	2,89E+4	2,16E+4	1,37E+4	8,64E+3	
11Ai	1,78E+5	2,27E+4	1,70E+4	1,07E+4	6,77E+3	
11Ba	4,33E+7	5,52E+6	4,13E+6	2,61E+6	1,65E+6	
11Bb	2,36E+7	3,01E+6	2,25E+6	1,42E+6	8,98E+5	
11Bc	1,47E+7	1,87E+6	1,40E+6	8,85E+5	5,59E+5	
11Bd	1,01E+7	1,29E+6	9,63E+5	6,08E+5	3,84E+5	
11Be	7,44E+6	9,49E+5	7,10E+5	4,48E+5	2,83E+5	
11Bf	5,74E+6	7,32E+5	5,47E+5	3,46E+5	2,18E+5	
11Bg	4,58E+6	5,84E+5	4,37E+5	2,76E+5	1,74E+5	
11Bh	3,76E+6	4,79E+5	3,59E+5	2,26E+5	1,43E+5	
11Bi	3,15E+6	4,02E+5	3,00E+5	1,90E+5	1,20E+5	
11Ca	5,82E+6	7,42E+5	5,55E+5	3,51E+5	2,21E+5	
11Cb	2,57E+6	3,28E+5	2,45E+5	1,55E+5	9,78E+4	
11Cc	1,39E+6	1,77E+5	1,33E+5	8,37E+4	5,29E+4	
11Cd	8,47E+5	1,08E+5	8,08E+4	5,10E+4	3,22E+4	1777
11Ce	5,65E+5	7,20E+4	5,39E+4	3,40E+4	2,15E+4	Hamburo
11Cf	3,99E+5	5,09E+4	3,81E+4	2,40E+4	1,52E+4	Stine Ohn ?
11Cg	2,96E+5	3,77E+4	2,82E+4	1,78E+4	1,13E+4	Principles Chill
11Ch	2,27E+5	2,89E+4	2,16E+4	1,37E+4	8,64E+3	inniesionsschute 0539 Hamburg
					mitur Energy 2	00

Ellietra Be 84

Tabelle 6.18: Bodenkontamination mit Cäsium-137 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung der Abwitterung beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 12 (in Bq/m²)

Sektor- ab- schnitt	0 a	1 a	Zeitraum   10 a	30 a	50 a
12Ad	2,86E+2	3,65E+1	2,73E+1	1,72E+1	1,09E+1
12Ae	1,38E+2	1,76E+1	1,32E+1	8,31E+0	5,25E+0
12Af	7,43E+1	9,47E+0	7,09E+0	4,48E+0	2,83E+0
12Ag	4,31E+1	5,50E+0	4,11E+0	2,60E+0	1,64E+0
12Ah	2,66E+1	3,39E+0	2,54E+0	1,60E+0	1,01E+0
12Be	1,41E-5	1,80E-6	1,34E-6	8,49E-7	5,36E-7
12Bf	4,44E-6	5,66E-7	4,23E-7	2,67E-7	1,69E-7
12Bg	1,61E-6	2,05E-7	1,54E-7	9,70E-8	6,13E-8
12Bh	6,49E-7	8,28E-8	6,19E-8	3,91E-8	2,47E-8
12Cg	8,92E-20	1,14E-20	8,51E-21	5,37E-21	3,39E-21

Tabelle 6.19: Bodenkontamination mit α-Plutonium Pu-238, Pu-239 und Pu-240 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 10 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
10Ab	1,02E-18	9,78E-19	8,08E-19
10Ac	2,57E-20	2,45E-20	2,03E-20
10Bb	5,27E-8	5,03E-8	4,15E-8
10Bc	6,93E-9	6,61E-9	5,47E-9
10Bd	1,39E-9	1,33E-9	1,10E-9
10Be	3,63E-10	3,46E-10	2,86E-10
10Bf	1,14E-10	1,09E-10	9,02E-11
10Bg	4,15E-11	3,97E-11	3,28E-11
10Ca	2,32E-1	2,21E-1	1,83E-1
10Cb	5,30E-2	5,06E-2	4,18E-2
10Cc	1,77E-2	1,69E-2	1,40E-2
10Cd	7,38E-3	7,05E-3	5,82E-3
10Ce	3,57E-3	3,41E-3	2,82E-3
10Cf	1,91E-3	1,83E-3	1,51E-3
10Cg	1,11E-3	1,06E-3	8,79E-4
10Ch	6,87E-4	6,56E-4	5,42E-4

Tabelle 6.20: Bodenkontamination mit α-Plutonium Pu-238, Pu-239 und Pu-240 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 11 (in Bq/m²)

`			
Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
11Aa 11Ab 11Ac 11Ad 11Ae 11Af 11Ag 11Ah 11Ai	1,50E+2 6,65E+1 3,57E+1 2,19E+1 1,46E+1 1,03E+1 7,63E+0 5,85E+0 4,61E+0	1,44E+2 6,35E+1 3,41E+1 2,09E+1 1,39E+1 9,84E+0 7,29E+0 5,59E+0 4,40E+0	1,19E+2 5,25E+1 2,82E+1 1,73E+1 1,15E+1 8,13E+0 6,02E+0 4,62E+0 3,64E+0
11Ba 11Bb 11Bc 11Bd 11Be 11Bf 11Bf 11Bg 11Bh	1,12E+3 6,08E+2 3,79E+2 2,61E+2 1,92E+2 1,48E+2 1,18E+2 9,69E+1 8,13E+1	1,07E+3 5,81E+2 3,62E+2 2,49E+2 1,83E+2 1,41E+2 1,13E+2 9,26E+1 7,76E+1	8,82E+2 4,80E+2 2,99E+2 2,06E+2 1,51E+2 1,17E+2 9,34E+1 7,65E+1 6,41E+1
11Ca 11Cb 11Cc 11Cd 11Ce 11Cf 11Cg 11Ch	1,50E+2 6,65E+1 3,57E+1 2,19E+1 1,46E+1 1,03E+1 7,63E+0 5,85E+0	1,44E+2 6,35E+1 3,41E+1 2,09E+1 1,39E+1 9,84E+0 7,29E+0 5,59E+0	1,19E+2 5,25E+1 2,82E+1 1,73E+1 1,15E+1 8,13E+0 6,02E+0 4,62E+0

Harris estadi Harridura Strate estadi en dunia de securi Strate estadi en dunia de securi

Tabelle 6.21: Bodenkontamination mit  $\alpha$ -Plutonium Pu-238, Pu-239 und Pu-240 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 12 (in Bq/m $^2$ )

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
12Ad	7,38E-3	7,05E-3	5,82E-3
12Ae	3,57E-3	3,41E-3	2,82E-3
12Af	1,91E-3	1,83E-3	1,51E-3
12Ag	1,11E-3	1,06E-3	8,79E-4
12Ah	6,87E-4	6,56E-4	5,42E-4
12Be	3,63E-10	3,46E-10	2,86E-10
12Bf	1,14E-10	1,09E-10	9,02E-11
12Bg	4,15E-11	3,97E-11	3,28E-11
12Bh	1,67E-11	1,60E-11	1,32E-11
12Cg	2,30E-24	2,19E-24	1,81E-24

Tabelle 6.22: Bodenkontamination mit Americium-241 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 10 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
10Ab	1,16E-19	6,11E-19	1,33E-18
10Ac	2,90E-21	1,53E-20	3,34E-20
10Bb	5,94E-9	3,14E-8	6,82E-8
10Bc	7,82E-10	4,13E-9	8,99E-9
10Bd	1,57E-10	8,28E-10	1,80E-9
10Be	4,11E-11	2,17E-10	4,73E-10
10Bf	1,29E-11	6,83E-11	1,49E-10
10Bg	4,70E-12	2,48E-11	5,40E-11
10Ca	2,62E-2	1,39E-1	3,02E-1
10Cb	6,00E-3	3,17E-2	6,89E-2
10Cc	2,00E-3	1,05E-2	2,30E-2
10Cd	8,35E-4	4,41E-3	9,60E-3
10Ce	4,02E-4	2,12E-3	4,62E-3
10Cf	2,17E-4	1,14E-3	2,49E-3
10Cg	1,26E-4	6,65E-4	1,45E-3
10Ch	7,75E-5	4,10E-4	8,92E-4

Tabelle 6.23: Bodenkontamination mit Americium-241 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 11 (in Bq/m²)

	~		1, ,	
Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum   10 a	50 a	
	1 4	10 4	30 u	
11Aa	1,70E+1	8,96E+1	1,95E+2	
11Ab	7,52E+0	3,97E+1	8,64E+1	
11Ac	4,05E+0	2,14E+1	4,66E+1	
11Ad	2,47E+0	1,30E+1	2,84E+1	
11Ae	1,65E+0	8,70E+0	1,89E+1	
11Af	1,17E+0	6,16E+0	1,34E+1	
11Ag	8,62E-1	4,56E+0	9,92E+0	
11Ah	6,61E-1	3,49E+0	7,61E+0	
11Ai	5,20E-1	2,74E+0	5,97E+0	
11Ba	1,26E+2	6,66E+2	1,45E+3	
11Bb	6,87E+1	3,63E+2	7,89E+2	
11Bc	4,30E+1	2,27E+2	4,94E+2	
11Bd	2,95E+1	1,56E+2	3,39E+2	
11Be	2,17E+1	1,15E+2	2,49E+2	
11Bf	1,67E+1	8,83E+1	1,92E+2	
11Bg	1,34E+1	7,05E+1	1,54E+2	
11Bh	1,10E+1	5,78E+1	1,26E+2	
11Bi	9,18E+0	4,85E+1	1,06E+2	
11Ca	1,70E+1	8,96E+1	1,95E+2	
11Cb	7,52E+0	3,97E+1	8,64E+1	
11Cc	4,05E+0	2,14E+1	4,66E+1	
11Cd	2,47E+0	1,30E+1	2,84E+1	
11Ce	1,65E+0	8,70E+0	1,89E+1	
11Cf	1,17E+0	6,16E+0	1,34E+1	Tillie.
11Cg	8,62E-1	4,56E+0	9,92E+0	(100 Sept 100)
11Ch	6,61E-1	3,49E+0	7,61E+0	A Plant
			Field Mildle day	Sold Hambur
			Fedire Lon	
			~	

Tabelle 6.24: Bodenkontamination mit Americium-241 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 12 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
12Ad	8,35E-4	4,41E-3	9,60E-3
12Ae	4,02E-4	2,12E-3	4,62E-3
12Af	2,17E-4	1,14E-3	2,49E-3
12Ag	1,26E-4	6,65E-4	1,45E-3
12Ah	7,75E-5	4,10E-4	8,92E-4
12Be	4,11E-11	2,17E-10	4,73E-10
12Bf	1,29E-11	6,83E-11	1,49E-10
12Bg	4,70E-12	2,48E-11	5,40E-11
12Bh	1,89E-12	9,99E-12	2,18E-11
12Cg	2,60E-25	1,37E-24	2,99E-24

Abbildung 6.7: Bodenkontamination mit Jod-131 (unmittelbar nach Ablagerung) für den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Referenzszenario im Flächenraster der Freien und Hansestadt Hamburg (in Bq/m², Kontaminationen < 1 Bq/m² sind als 0 ausgewiesen)

Freie und Hansestad Hamburg
Umweitbeit Orde
Fachamt für Energie und Immeritation
Billstraße 84 20539 Hamburg

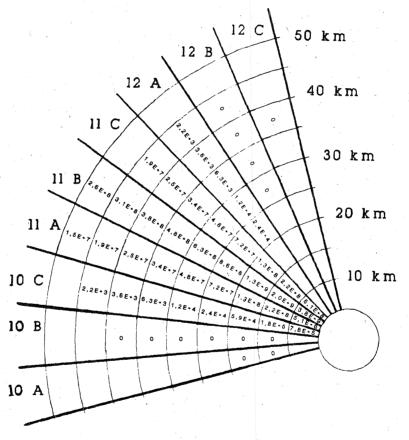
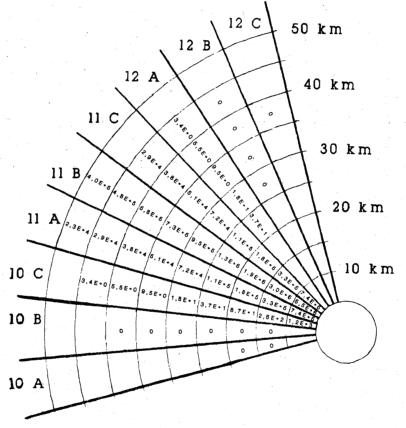


Abbildung 6.8: Bodenkontamination mit Cäsium-137 (1 Jahr nach dem Unfall) für den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Referenzszenario im Flächenraster der Freien und Hansestadt Hamburg (in  $Bq/m^2$ , Kontaminationen < 1  $Bq/m^2$  sind als 0 ausgewiesen)

Freie und Hansestad Framous.
Fachamt für Energie und Immitisionsschutz
Billstraße 84 - 20539 Harnburg



# 6.2.2 Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze

# 6.2.2.1 Strahlenexposition

Die für den Quellterm mit Venting und Verhinderung einer Kernschmelze berechneten Strahlendosen sind in den Tabellen 6.25 bis 6.36 aufgelistet. Die Strahlendosen beziehen sich auf das meteorologische Referenzszenario, in dem es im Untersuchungsgebiet zu keinen Niederschlägen kommt.

Wie bereits bei den Berechnungen für den Unfallablauf mit hohem Quellterm, werden die folgenden Belastungen angegeben:

- die Effektiven Dosen aus Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) in den Tabel-len 6.25 bis 6.27,
- die Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) in den Tabellen 6.28 bis 6.30,
- die Effektive Dosis durch Gamma-Bodenstrahlung über Zeiträume von 3 Stunden, 12 Stunden, 1 Tag und 3 Tage in den Tabellen 6.31 bis 6.33, sowie
- die Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener aus Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (7-Tage-Folgedosis) in den Tabellen 6.34 bis 6.36.

Tabelle 6.25: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 10

Sektor- ab-	E: Gamma-	ffektive D  Inhala-	Dosis (in m  Gamma-	Sv)  Summe	Maßnahmen* Evak. V.i.H.	
schnitt	Boden- strahlung	tion	Submer- sion	der Pfade		
10Ab 10Ac	1,24E-21 1,31E-23	5,71E-20 6,07E-22	2,90E-19 3,16E-21	3,48E-19 3,78E-21		
10Bb 10Bc 10Bd 10Be 10Bf 10Bg	7,86E-12 6,47E-13 8,85E-14 1,66E-14 3,90E-15 1,08E-15	3,61E-10 3,01E-11 4,14E-12 7,83E-13 1,85E-13 5,16E-14	1,83E-9 1,56E-10 2,24E-11 4,24E-12 9,97E-13 2,68E-13	2,20E-9 1,87E-10 2,66E-11 5,04E-12 1,19E-12 3,21E-13		
10Ca 10Cb 10Cc 10Cd 10Ce 10Cf 10Cg 10Ch	1,80E-5 2,84E-6 7,48E-7 2,61E-7 1,09E-7 5,11E-8 2,64E-8 1,45E-8	8,17E-4 1,31E-4 3,48E-5 1,22E-5 5,14E-6 2,44E-6 1,26E-6 7,01E-7	5,27E-3 6,63E-4 1,81E-4 6,65E-5 2,77E-5 1,31E-5 6,59E-6 3,59E-6	6,10E-3 7,96E-4 2,16E-4 7,90E-5 3,30E-5 1,56E-5 7,88E-6 4,30E-6		

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

Evak. = Evakuierung

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann

erfolgen)

o = oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß

erfolgen)

Tabelle 6.26: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 11

Sektor-	E:	ffektive Do	osis (in m	Sv)	Maßnahr	men*
ab- schnitt	Gamma-	Inhala- tion	Gamma- Submer- sion	Summe der Pfade	Evak.	V.i.H.
11Aa 11Ab 11Ac 11Ad 11Ae 11Af 11Ag 11Ah 11Ai	6,13E-3 2,19E-3 1,07E-3 6,07E-4 3,83E-4 2,58E-4 1,84E-4 1,36E-4 1,03E-4	2,79E-1 1,01E-1 4,96E-2 2,85E-2 1,81E-2 1,23E-2 8,85E-3 6,59E-3 5,05E-3	1,80E+0 5,14E-1 2,57E-1 1,55E-1 9,85E-2 6,66E-2 4,62E-2 3,36E-2 2,52E-2	2,09E+0 6,18E-1 3,08E-1 1,84E-1 1,17E-1 7,92E-2 5,53E-2 4,04E-2 3,03E-2		
11Ba 11Bb 11Bc 11Bd 11Be 11Bf 11Bg 11Bh 11Bi	3,77E-2 1,75E-2 1,02E-2 6,79E-3 4,87E-3 3,69E-3 2,90E-3 2,34E-3 1,93E-3	1,71E+0 8,06E-1 4,77E-1 3,20E-1 2,31E-1 1,76E-1 1,40E-1 1,13E-1 9,47E-2	1,11E+1 4,11E+0 2,48E+0 1,73E+0 1,25E+0 9,52E-1 7,28E-1 5,81E-1 4,72E-1	1,28E+1 4,93E+0 2,97E+0 2,06E+0 1,49E+0 1,13E+0 8,70E-1 6,96E-1 5,69E-1		u
11Ca 11Cb 11Cc 11Cd 11Ce 11Cf 11Cf 11Cg 11Ch	6,13E-3 2,19E-3 1,07E-3 6,07E-4 3,83E-4 2,58E-4 1,84E-4 1,36E-4	2,79E-1 1,01E-1 4,96E-2 2,85E-2 1,81E-2 1,23E-2 8,85E-3 6,59E-3	1,80E+0 5,14E-1 2,57E-1 1,55E-1 9,85E-2 6,66E-2 4,62E-2 3,36E-2	2,09E+0 6,18E-1 3,08E-1 1,84E-1 1,17E-1 7,92E-2 5,53E-2 4,04E-2		

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann

erfolgen)

o = oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß erfolgen)



Tabelle 6.27: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 12

Sektor- ab- schnitt	Gamma-	ffektive Do  Inhala-  tion	osis (in m  Gamma-  Submer-  sion	Sv)  Summe  der  Pfade	Maßnahr Evak.	nen* V.i.H.
12Ad 12Ae 12Af 12Ag 12Ah	2,61E-7 1,09E-7 5,11E-8 2,64E-8 1,45E-8	1,22E-5 5,14E-6 2,44E-6 1,26E-6 7,01E-7	6,65E-5 2,77E-5 1,31E-5 6,59E-6 3,59E-6	7,90E-5 3,30E-5 1,56E-5 7,88E-6 4,30E-6		
12Be 12Bf 12Bg 12Bh	1,66E-14 3,90E-15 1,08E-15 3,39E-16	7,83E-13 1,85E-13 5,16E-14 1,63E-14	4,24E-12 9,97E-13 2,68E-13 8,32E-14	5,04E-12 1,19E-12 3,21E-13 9,99E-14		
12Cg	1,01E-28	4,81E-27	2,50E-26	2,99E-26		: -

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann

erfolgen)

o = oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß

Tabelle 6.28: Schilddrüsendosis Erwachsener durch Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 10

Sektorabschnitt	Sektorabschnitt Schilddrüsendosis (in mSv)		Maßnahmen * Evak. V.i.H. E.v.J		
10Ab 10Ac	1,82E-18 1,93E-20				
10Bb 10Bc 10Bd 10Be 10Bf 10Bg	1,15E-8 9,57E-10 1,32E-10 2,50E-11 5,91E-12 1,65E-12				
10Ca 10Cb 10Cc 10Cd 10Ce 10Cf 10Cg 10Ch	2,60E-2 4,16E-3 1,11E-3 3,92E-4 1,64E-4 7,78E-5 4,04E-5 2,24E-5				

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

E.v.J. = Aufforderung zur Einnahme von Jodtabletten

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann

erfolgen)

o = oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß

Tabelle 6.29: Schilddrüsendosis Erwachsener durch Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 11

				1
Sektorabschnitt	Schilddrüsendosis (in mSv)	•	nahmen * '.i.H. E.v.J.	
11Aa 11Ab 11Ac 11Ad 11Ae 11Af 11Ag 11Ah	8,89E+0 3,23E+0 1,58E+0 9,11E-1 5,80E-1 3,95E-1 2,82E-1 2,10E-1 1,61E-1			
11Ba 11Bb 11Bc 11Bd 11Be 11Bf 11Bg 11Bh 11Bi	5,46E+1 2,57E+1 1,52E+1 1,02E+1 7,38E+0 5,63E+0 4,46E+0 3,63E+0 3,02E+0	E4.	u  eie und Hansestadik Hai eie und Hansestadik Hai eie und Hansestadik Hai eie und Immis eachamtur Energie und Immis	Hamp Joursey
11Ca 11Cb 11Cc 11Cd 11Ce 11Cf 11Cf 11Cg 11Ch	8,89E+0 3,23E+0 1,58E+0 9,11E-1 5,80E-1 3,95E-1 2,82E-1 2,10E-1			

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

E.v.J. = Aufforderung zur Einnahme von Jodtabletten

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann

erfolgen)

o = oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß

Tabelle 6.30: Schilddrüsendosis Erwachsener durch Inhalation (50-a-Folgedosis) beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 12

Sektorabschnitt	Schilddrüsendosis (in mSv)	Maßnahmen * Evak. V.i.H. E.v.J		
12Ad 12Ae 12Af 12Ag 12Ah	3,92E-4 1,64E-4 7,78E-5 4,04E-5 2,24E-5			
12Be 12Bf 12Bg 12Bh	2,50E-11 5,91E-12 1,65E-12 5,22E-13			
12Cg	1,54E-25			

<sup>\*</sup> Erfordernis von Maßnahmen nach Dosisrichtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz:

V.i.H. = Aufforderung zum Verbleiben im Haus

E.v.J. = Aufforderung zur Einnahme von Jodtabletten

u = unterer Richtwert überschritten (Maßnahme kann

erfolgen)

= oberer Richtwert überschritten (Maßnahme muß

Tabelle 6.31: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Bodenstrahlung über verschiedene Zeiträume beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 10 (in mSv)

Sektor- abschnitt	3 h		positionsda   1 d		7 d	
10Ab	1,65E-22	4,16E-22	5,85E-22	8,91E-22	1,17E-21	
10Ac	1,71E-24	4,35E-24	6,14E-24	9,37E-24	1,23E-23	
10Bb	1,03E-12	2,61E-12	3,69E-12	5,62E-12	7,37E-12	
10Bc	8,41E-14	2,14E-13	3,02E-13	4,62E-13	6,07E-13	
10Bd	1,13E-14	2,90E-14	4,11E-14	6,29E-14	8,30E-14	
10Be	2,10E-15	5,40E-15	7,66E-15	1,18E-14	1,56E-14	
10Bf	4,86E-16	1,26E-15	1,79E-15	2,76E-15	3,66E-15	
10Bg	1,33E-16	3,45E-16	4,93E-16	7,62E-16	1,01E-15	
10Ca	2,38E-6	6,02E-6	8,47E-6	1,28E-5	1,68E-5	
10Cb	3,72E-7	9,42E-7	1,33E-6	2,02E-6	2,65E-6	
10Cc	9,68E-8	2,46E-7	3,49E-7	5,33E-7	7,02E-7	
10Cd	3,33E-8	8,53E-8	1,21E-7	1,86E-7	2,44E-7	
10Ce	1,36E-8	3,51E-8	4,99E-8	7,70E-8	1,02E-7	
10Cf	6,32E-9	1,64E-8	2,33E-8	3,61E-8	4,79E-8	
10Cg	3,21E-9	8,36E-9	1,20E-8	1,85E-8	2,46E-8	
10Ch	1,75E-9	4,57E-9	6,55E-9	1,02E-8	1,36E-8	

Tabelle 6.32: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Bodenstrahlung über verschiedene Zeiträume beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 11 (in mSv)

Sektor-			positionsda		
abschnitt	3 h	12 h	1 d	3 d	7 d
11Aa	8,15E-4	2,05E-3	2,89E-3	4,38E-3	5,74E-3
11Ab	2,88E-4	7,30E-4	1,03E-3	1,57E-3	2,06E-3
11AC	1,37E-4	3,51E-4	4,96E-4	7,58E-4	9,99E-4
11Ad	7,71E-5	1,98E-4	2,81E-4	4,31E-4	5,69E-4
11Ae	4,79E-5	1,24E-4	1,76E-4	2,72E-4	3,59E-4
11Af	3,19E-5	8,27E-5	1,18E-4	1,83E-4	2,42E-4
11Ag	2,22E-5	5,82E-5	8,34E-5	1,30E-4	1,72E-4
11Ah	1,63E-5	4,27E-5	6,12E-5	9,55E-5	1,27E-4
11Ai	1,22E-5	3,22E-5	4,63E-5	7,25E-5	9,68E-5
11Ba	5,00E-3	1,26E-2	1,77E-2	2,70E-2	3,53E-2
11Bb	2,28E-3	5,80E-3	8,18E-3	1,25E-2	1,64E-2
11Bc	1,32E-3	3,36E-3	4,76E-3	7,27E-3	9,60E-3
11Bd	8,62E-4	2,21E-3	3,15E-3	4,82E-3	6,36E-3
11Be	6,08E-4	1,57E-3	2,23E-3	3,45E-3	4,56E-3
11Bf	4,54E-4	1,18E-3	1,68E-3	2,59E-3	3,46E-3
11Bg	3,51E-4	9,17E-4	1,31E-3	2,04E-3	2,72E-3
11Bh	2,80E-4	7,34E-4	1,06E-3	1,65E-3	2,19E-3
11Bi	2,28E-4	6,02E-4	8,68E-4	1,36E-3	1,81E-3
11Ca	8,15E-4	2,05E-3	2,89E-3	4,38E-3	5,74E-3
11Cb	2,88E-4	7,30E-4	1,03E-3	1,57E-3	2,06E-3
11Cc	1,37E-4	3,51E-4	4,96E-4	7,58E-4	9,99E-4
11Cd	7,71E-5	1,98E-4	2,81E-4	4,31E-4	5,69E-4
11Ce	4,79E-5	1,24E-4	1,76E-4	2,72E-4	3,59E-4
11Cf	3,19E-5	8,27E-5	1,18E-4	1,83E-4	2,42E-4
11Cg	2,22E-5	5,82E-5	8,34E-5	1,30E-4	1,72E-4
11Ch	1,63E-5	4,27E-5	6,12E-5	9,55E-5	1,27E-4

Tabelle 6.33: Effektive Dosis Erwachsener durch Gamma-Bodenstrahlung über verschiedene Zeiträume beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 12 (in mSv)

Sektor- abschnitt	3 h		positionsdau   1 d		7 d
12Ad 12Ae 12Af 12Ag 12Ah	3,33E-8 1,36E-8 6,32E-9 3,21E-9 1,75E-9	8,53E-8 3,51E-8 1,64E-8 8,36E-9 4,57E-9	1,21E-7 4,99E-8 2,33E-8 1,20E-8 6,55E-9	1,86E-7 7,70E-8 3,61E-8 1,85E-8 1,02E-8	2,44E-7 1,02E-7 4,79E-8 2,46E-8 1,36E-8
12Be 12Bf 12Bg 12Bh	2,10E-15 4,86E-16 1,33E-16 4,13E-17	5,40E-15 1,26E-15 3,45E-16 1,08E-16	7,66E-15 1,79E-15 4,93E-16 1,54E-16	1,18E-14 2,76E-15 7,62E-16 2,39E-16	1,56E-14 3,66E-15 1,01E-15 3,18E-16
12Cg	1,26E-29	3,25E-29	4,64E-29	7,15E-29	9,47E-29

Tabelle 6.34: Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (7 Tage-Folgedosis) beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 10

Sektor- abschnitt	Dosis ( Gamma- Boden- strahlung	des roten Knod   Inhala-   tion	chenmarks (in   Gamma-   Submer-   sion	mSv) Summe der Pfade
10Ab	1,17E-21	6,63E-22	2,71E-19	2,73E-19
10Ac	1,23E-23	7,01E-24	2,85E-21	2,87E-21
10Bb	7,37E-12	4,19E-12	1,72E-9	1,73E-9
10Bc	6,07E-13	3,45E-13	1,40E-10	1,41E-10
10Bd	8,30E-14	4,73E-14	2,01E-11	2,02E-11
10Be	1,56E-14	8,88E-15	3,80E-12	3,83E-12
10Bf	3,66E-15	2,09E-15	8,93E-13	8,99E-13
10Bg	1,01E-15	5,76E-16	2,40E-13	2,41E-13
10Ca	1,68E-5	9,55E-6	4,76E-3	4,79E-3
10Cb	2,65E-6	1,51E-6	6,20E-4	6,24E-4
10Cc	7,02E-7	4,00E-7	1,63E-4	1,64E-4
10Cd	2,44E-7	1,40E-7	5,97E-5	6,01E-5
10Ce	1,02E-7	5,80E-8	2,49E-5	2,50E-5
10Cf	4,79E-8	2,73E-8	1,18E-5	1,18E-5
10Cg	2,46E-8	1,41E-8	5,89E-6	5,93E-6
10Ch	1,36E-8	7,73E-9	3,20E-6	3,22E-6

Tabelle 6.35: Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (7 Tage-Folgedosis) beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 11

Sektor- abschnitt	Dosis ( Gamma- Boden- strahlung	des roten Knod   Inhala-   tion	chenmarks (in   Gamma-   Submer-   sion	mSv) Summe der Pfade
11Aa 11Ab 11Ac 11Ad 11Ae 11Af 11Ag 11Ah 11Ai	5,74E-3 2,06E-3 9,99E-4 5,69E-4 3,59E-4 2,42E-4 1,72E-4 1,27E-4 9,68E-5	3,26E-3 1,17E-3 5,69E-4 3,25E-4 2,04E-4 1,38E-4 9,81E-5 7,24E-5 5,50E-5	1,63E+0 4,81E-1 2,31E-1 1,39E-1 8,83E-2 5,97E-2 4,13E-2 3,00E-2 2,24E-2	1,64E+0 4,84E-1 2,33E-1 1,40E-1 8,88E-2 6,01E-2 4,16E-2 3,02E-2 2,26E-2
11Ba 11Bb 11Bc 11Bd 11Be 11Bf 11Bg 11Bh 11Bi	3,53E-2 1,64E-2 9,60E-3 6,36E-3 4,56E-3 3,46E-3 2,72E-3 2,19E-3 1,81E-3	2,01E-2 9,33E-3 5,47E-3 3,62E-3 2,60E-3 1,96E-3 1,55E-3 1,25E-3 1,03E-3	1,00E+1 3,84E+0 2,23E+0 1,55E+0 1,12E+0 8,53E-1 6,50E-1 5,18E-1 4,20E-1	1,01E+1 3,87E+0 2,25E+0 1,56E+0 1,13E+0 8,58E-1 6,55E-1 5,21E-1 4,23E-1
11Ca 11Cb 11Cc 11Cd 11Ce 11Cf 11Cg 11Ch	5,74E-3 2,06E-3 9,99E-4 5,69E-4 3,59E-4 2,42E-4 1,72E-4 1,27E-4	3,26E-3 1,17E-3 5,69E-4 3,25E-4 2,04E-4 1,38E-4 9,81E-5 7,24E-5	1,63E+0 4,81E-1 2,31E-1 1,39E-1 8,83E-2 5,97E-2 4,13E-2 3,00E-2	1,64E+0 4,84E-1 2,33E-1 1,40E-1 8,88E-2 6,01E-2 4,16E-2 3,02E-2

Tabelle 6.36: Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (7 Tage-Folgedosis) beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 12

Sektor- abschnitt	Dosis Gamma- Boden- strahlung	des roten Kno   Inhala-   tion	chenmarks (in   Gamma-   Submer-   sion	mSv) Summe der Pfade
12Ad	2,44E-7	1,40E-7	5,97E-5	6,01E-5
12Ae	1,02E-7	5,80E-8	2,49E-5	2,50E-5
12Af	4,79E-8	2,73E-8	1,18E-5	1,18E-5
12Ag	2,46E-8	1,41E-8	5,89E-6	5,93E-6
12Ah	1,36E-8	7,73E-9	3,20E-6	3,22E-6
12Be	1,56E-14	8,88E-15	3,80E-12	3,83E-12
12Bf	3,66E-15	2,09E-15	8,93E-13	8,99E-13
12Bg	1,01E-15	5,76E-16	2,40E-13	2,41E-13
12Bh	3,18E-16	1,81E-16	7,42E-14	7,47E-14
12Cg	9,47E-29	5,40E-29	2,23E-26	2,25E-26

## 6.2.2.2 Bodenkontamination

Analog zu den für den Unfallablauf mit hohem Quellterm berechneten Bodenkontaminationen werden auch die Bodenkontaminationen beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze berechnet.

In den Tabellen 6.37 bis 6.39 sind die Bodenkontaminationen mit Jod-131 angegeben. Die Kontaminationen werden für die Zeitpunkte 3 Tage, 7 Tage, 30 Tage und 91 Tage nach Deposition tabelliert. Die Reduzierung der Kontaminationen erfolgt durch den radioaktiven Zerfall des Jod-131 mit einer Halbwertszeit von 8,04 Tagen. Die errechneten Cäsium-137-Bodenkontaminationen sind in den Tabellen 6.40 bis 6.42 tabelliert. Sie werden für die Zeitpunkte unmittelbar nach Deposition sowie 1 Jahr, 10 Jahre, 30 Jahre und 50 Jahre nach Deposition angegeben. Die Reduzierung der Kontami-

nation erfolgt vor allem durch die Abwitterung gemäß dem Ansatz in Kapitel 6.2.1.2 Ansatz, langfristig auch durch den radioaktiven Zerfall des Cäsium-137.

In den Tabellen 6.43 bis 6.45 sind die Bodenkontaminationen mit α-strahlendem Plutonium (Summe der Isotope Pu-238, Pu-239 und Pu-240) angegeben. Die Kontaminationen wurden für die Zeitpunkte 1 Jahr, 10 Jahre und 50 Jahre nach Deposition errechnet. Die Reduzierung der Kontaminationen erfolgt durch die Abwitterung; der radioaktive Zerfall spielt bei den langen Halbwertszeiten der Isotope - zwischen 87,7 und 24.100 Jahren - eine untergeordnete Rolle.

Die Tabellen 6.46 bis 6.48 zeigen die errechneten Bodenkontaminationen mit Americium-241. Die Kontaminationen wurden für die Zeitpunkte 1 Jahr, 10 Jahre und 50 Jahre nach Deposition errechnet. Wie bei  $\alpha$ -strahlendem Plutonium wird auch bei Americium-241 die Reduzierung der Kontamination durch die Abwitterung hervorgerufen. Die Halbwertszeit des Americium-241 beträgt 433 Jahre.

In den Abbildungen 6.9 und 6.10 sind die Bodenkontaminationen mit Jod-131 (unmittelbar nach Ablagerung) und Cäsium-137 (nach 1 Jahr) im Flächenraster aufgetragen.

Alle in den Tabellen 6.37 bis 6.48 und den Abbildungen 6.9 bis 6.10 angegebenen Bodenkontaminationen beziehen sich auf das meteorologische Referenzszenario, in dem es zu keinen Niederschlägen kommt. Bei nasser Deposition können die Bodenkontaminationen um zwei Größenordnungen ansteigen.

Tabelle 6.37: Bodenkontamination mit Jod-131 nach verschiedenen Zeiträumen beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 10 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	3 d	Zei 7 d	traum   30 d	91 d
10Ab	2,40E-15	1,70E-15	2,33E-16	1,20E-18
10Ac	2,54E-17	1,80E-17	2,47E-18	1,27E-20
10Bb	1,52E-5	1,07E-5	1,47E-6	7,56E-9
10Bc	1,26E-6	8,90E-7	1,22E-7	6,26E-10
10Bd	1,73E-7	1,23E-7	1,68E-8	8,62E-11
10Be	3,27E-8	2,31E-8	3,17E-9	1,63E-11
10Bf	7,72E-9	5,47E-9	7,49E-10	3,84E-12
10Bg	2,15E-9	1,52E-9	2,08E-10	1,07E-12
10Ca	3,44E+1	2,43E+1	3,34E+0	1,71E-2
10Cb	5,47E+0	3,87E+0	5,30E-1	2,72E-3
10Cc	1,46E+0	1,03E+0	1,41E-1	7,24E-4
10Cd	5,12E-1	3,62E-1	4,96E-2	2,55E-4
10Ce	2,14E-1	1,52E-1	2,08E-2	1,07E-4
10Cf	1,02E-1	7,19E-2	9,85E-3	5,06E-5
10Cg	5,26E-2	3,72E-2	5,10E-3	2,62E-5
10Ch	2,92E-2	2,07E-2	2,83E-3	1,45E-5

Tabelle 6.38: Bodenkontamination mit Jod-131 nach verschiedenen Zeiträumen beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 11 (in Bq/m²)

	* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *			
Sektorabschnitt	Zeitraum			
	3 d	7 d	30 d	91 d
11Aa 11Ab 11Ac 11Ad 11Ae 11Af 11Ag 11Ah	1,18E+4 4,25E+3 2,08E+3 1,19E+3 7,58E+2 5,15E+2 3,69E+2 2,74E+2	8,32E+3 3,01E+3 1,47E+3 8,44E+2 5,36E+2 3,64E+2 2,61E+2 1,94E+2	1,14E+3 4,12E+2 2,02E+2 1,16E+2 7,35E+1 4,99E+1 3,58E+1 2,66E+1	5,85E+0 2,12E+0 1,03E+0 5,93E-1 3,77E-1 2,56E-1 1,84E-1 1,37E-1
Freie und Hansestadt Hamburg  11Ba 11Bb 11Bc 11Bd 11Be 11Bf 11Bg 11Bh 11Bi	2,10E+2  7,21E+4 3,38E+4 1,99E+4 1,33E+4 9,64E+3 7,34E+3 5,81E+3 4,73E+3 3,94E+3	1,49E+2 5,10E+4 2,39E+4 1,41E+4 9,44E+3 6,82E+3 5,20E+3 4,11E+3 3,35E+3 2,79E+3	2,04E+1 6,99E+3 3,28E+3 1,93E+3 1,29E+3 9,35E+2 7,12E+2 5,64E+2 4,59E+2 3,82E+2	1,05E-1  3,59E+1 1,68E+1 9,93E+0 6,64E+0 4,80E+0 3,65E+0 2,89E+0 2,35E+0 1,96E+0
11Ca G G G G G G G G G G G G G G G G G G G	1,18E+4 4,25E+3 2,08E+3 1,19E+3 7,58E+2 5,15E+2 3,69E+2	8,32E+3 3,01E+3 1,47E+3 8,44E+2 5,36E+2 3,64E+2 2,61E+2	1,14E+3 4,12E+2 2,02E+2 1,16E+2 7,35E+1 4,99E+1 3,58E+1	5,85E+0 2,12E+0 1,03E+0 5,93E-1 3,77E-1 2,56E-1 1,84E-1

Tabelle 6.39: Bodenkontamination mit Jod-131 nach verschiedenen Zeiträumen beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 12 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	Zeitraum			
	3 d	7 d	30 d	91 d
12Ad 12Ae 12Af 12Ag 12Ah	5,12E-1 2,14E-1 1,02E-1 5,26E-2 2,92E-2	3,62E-1 1,52E-1 7,19E-2 3,72E-2 2,07E-2	4,96E-2 2,08E-2 9,85E-3 5,10E-3 2,83E-3	2,55E-4 1,07E-4 5,06E-5 2,62E-5 1,45E-5
12Be 12Bf 12Bg 12Bh	3,27E-8 7,72E-9 2,15E-9 6,80F-10	2,31E-8 5,47E-9 1,52E-9 4,81E-10	3,17E-9 7,49E-10 2,08E-10 6,60E-11	1,63E-11 3,84E-12 1,07E-12 3,39E-13
12Cg	2,00E-22	1,42E-22	1,94E-23	9,96E-26

Tabelle 6.40: Bodenkontamination mit Cäsium-137 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung der Abwitterung beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 10 (in Bq/m²)

			- • ,		
Sektor-	_		Zeitraum		
ab-	0 a	1 a	10 a	30 a	50 a
schnitt					
10Ab	6,55E-19	8,51E-20	6,36E-20	4,02E-20	2,54E-20
10Ac	6,96E-21	9,05E-22	6,77E-22	4,28E-22	2,70E-22
10Bb	4,14E-9	5,38E-10	4,02E-10	2,54E-10	1,61E-10
10Bc	3,45E-10	4,49E-11	3,36E-11	2,12E-11	1,34E-11
10Bd	4,75E-11	6,18E-12	4,63E-12	2,92E-12	1,85E-12
10Be	9,00E-12	1,17E-12	8,77E-13	5,54E-13	3,50E-13
10Bf	2,14E-12	2,78E-13	2,08E-13	1,31E-13	8,29E-14
10Bg	5,96E-13	7,75E-14	5,80E-14	3,66E-14	2,31E-14
10Ca	9,38E-3	1,22E-3	9,10E-4	5,75E-4	3,63E-4
10Cb	1,49E-3	1,94E-4	1,45E-4	9,16E-5	5,78E-5
10Cc	4,00E-4	5,20E-5	3,89E-5	2,46E-5	1,55E-5
10Cd	1,42E-4	1,84E-5	1,37E-5	8,67E-6	5,48E-6
10Ce	5,92E-5	7,70E-6	5,76E-6	3,64E-6	2,30E-6
10Cf	2,82E-5	3,66E-6	2,74E-6	1,73E-6	1,09E-6
10Cg	1,46E-5	1,90E-6	1,42E-6	8,97E-7	5,67E-7
10Ch	8,15E-6	1,06E-6	7,91E-7	4,99E-7	3,15E-7

Tabelle 6.41: Bodenkontamination mit Cäsium-137 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung der Abwitterung beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 11 (in Bq/m²)

					( )
Sektor- ab- schnitt	0 a	1 a	Zeitraum 10 a	30 a	50 a
11Aa	3,20E+0	4,16E-1	3,11E-1	1,96E-1 7,11E-2 3,50E-2 2,02E-2 1,29E-2 8,79E-3 6,32E-3 4,69E-3 3,60E-3	1,24E-1
11Ab	1,15E+0	1,50E-1	1,13E-1		4,49E-2
11Ac	5,70E-1	7,41E-2	5,54E-2		2,21E-2
11Ad	3,28E-1	4,27E-2	3,19E-2		1,27E-2
11Ae	2,10E-1	2,73E-2	2,04E-2		8,14E-3
11Af	1,43E-1	1,86E-2	1,39E-2		5,55E-3
11Ag	1,03E-1	1,34E-2	1,00E-2		3,99E-3
11Ah	7,64E-2	9,93E-3	7,43E-3		2,96E-3
11Ai	5,87E-2	7,63E-3	5,70E-3		2,28E-3
11Ba	1,96E+1	2,55E+0	1,91E+0	1,20E+0 5,67E-1 3,37E-1 2,26E-1 1,64E-1 1,25E-1 9,94E-2 8,13E-2 6,75E-2	7,61E-1
11Bb	9,23E+0	1,20E+0	8,98E-1		3,58E-1
11Bc	5,48E+0	7,13E-1	5,33E-1		2,13E-1
11Bd	3,68E+0	4,78E-1	3,58E-1		1,43E-1
11Be	2,67E+0	3,47E-1	2,59E-1		1,03E-1
11Bf	2,04E+0	2,65E-1	1,98E-1		7,91E-2
11Bg	1,62E+0	2,10E-1	1,57E-1		6,28E-2
11Bh	1,32E+0	1,72E-1	1,29E-1		5,14E-2
11Bi	1,10E+0	1,43E-1	1,07E-1		4,26E-2
11Ca	3,20E+0	4,16E-1	3,11E-1	1,96E-1	1,24E-1
11Cb	1,15E+0	1,50E-1	1,13E-1	7,11E-2	4,49E-2
11Cc	5,70E-1	7,41E-2	5,54E-2	3,50E-2	2,21E-2
11Cd	3,28E-1	4,27E-2	3,19E-2	2,02E-2	1,27E-2
11Ce	2,10E-1	2,73E-2	2,04E-2	1,29E-2	8,14E-3
11Cf	1,43E-1	1,86E-2	1,39E-2	8,79E-3	5,55E-3
11Cg	1,03E-1	1,34E-2	1,00E-2	6,32E-3	3,99E-3
11Ch	7,64E-2	9,93E-3	7,43E-3	4,69E-3	2,96E-3

Freie und Hansestadt Hamburg Fachamt für Ehergie und Immissionsschutz Billistraße 84 20539 Hamburg

Tabelle 6.42: Bodenkontamination mit Cäsium-137 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung der Abwitterung beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 12 (in Bq/m²)

	<del></del>				
Sektor-			Zeitraum		
ab-	0 a	1 a	10 a	30 a	50 a
schnitt					
P					·
12Ad	1,42E-4	1,84E-5	1,37E-5	8,67E-6	5,48E-6
12Ae	5,92E-5	7,70E-6	5,76E-6	3,64E-6	2,30E-6
12Af	2,82E-5	3,66E-6	2,74E-6	1,73E-6	1,09E-6
12Ag	1,46E-5	1,90E-6	1,42E-6	8,97E-7	5,67E-7
12Ah	8,15E-6	1,06E-6	7,91E-7	4,99E-7	3,15E-7
12Be	9,00E-12	1,17E-12	8,77E-13	5,54E-13	3,50E-13
12Bf	2,14E-12	2,78E-13	2,08E-13	1,31E-13	8,29E-14
12Bg	5,96E-13	7,75E-14	5,80E-14	3,66E-14	2,31E-14
12Bh	1,89E-13	2,46E-14	1,84E-14	1,16E-14	7,34E-15
12Cg	5,55E-26	7,22E-27	5,40E-27	3,41E-27	2,15E-27

Tabelle 6.43: Bodenkontamination mit α-Plutonium Pu-238,
Pu-239 und Pu-240 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim
Unfallablauf mit Venting und verhinderter
Kernschmelze im Sektor 10 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
10Ab	1,72E-24	1,64E-24	1,36E-24
10Ac	1,83E-26	1,75E-26	1,44E-26
10Bb	1,09E-14	1,04E-14	8,60E-15
10Bc	9,07E-16	8,66E-16	7,16E-16
10Bd	1,25E-16	1,20E-16	9,89E-17
10Be	2,37E-17	2,27E-17	1,87E-17
10Bf	5,62E-18	5,37E-18	4,44E-18
10Bg	1,57E-18	1,50E-18	1,24E-18
10Ca	2,46E-8	2,35E-8	1,94E-8 3,11E-9 8,30E-10 2,93E-10 1,23E-10 5,84E-11 3,04E-11 1,69E-11
10Cb	3,94E-9	3,76E-9	
10Cc	1,05E-9	1,00E-9	
10Cd	3,71E-10	3,54E-10	
10Ce	1,56E-10	1,49E-10	
10Cf	7,40E-11	7,07E-11	
10Cg	3,85E-11	3,68E-11	
10Ch	2,14E-11	2,04E-11	

Tabelle 6.44: Bodenkontamination mit α-Plutonium Pu-238, Pu-239 und Pu-240 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 11 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
11Aa 11Ab 11Ac 11Ad 11Ae 11Af 11Ag 11Ah 11Ai	8,41E-6 3,06E-6 1,50E-6 8,64E-7 5,51E-7 3,76E-7 2,70E-7 2,01E-7 1,54E-7	8,03E-6 2,93E-6 1,43E-6 8,25E-7 5,26E-7 3,59E-7 2,58E-7 1,92E-7 1,47E-7	6,64E-6 2,42E-6 1,18E-6 6,82E-7 4,35E-7 2,97E-7 2,13E-7 1,59E-7 1,22E-7
11Ba 11Bb 11Bc 11Bd 11Be 11Bf 11Bf 11Bg 11Bh 11Bi	5,16E-5 2,43E-5 1,44E-5 9,67E-6 7,03E-6 5,36E-6 4,25E-6 3,47E-6 2,90E-6	4,93E-5 2,32E-5 1,38E-5 9,23E-6 6,71E-6 5,12E-6 4,06E-6 3,31E-6 2,77E-6	4,08E-5 1,92E-5 1,14E-5 7,63E-6 5,55E-6 4,23E-6 3,36E-6 2,74E-6 2,29E-6
11Ca 11Cb 11Cc 11Cd 11Ce 11Cf 11Cf 11Cg	8,41E-6 3,06E-6 1,50E-6 8,64E-7 5,51E-7 3,76E-7 2,70E-7 2,01E-7	8,03E-6 2,93E-6 1,43E-6 8,25E-7 5,26E-7 3,59E-7 2,58E-7 1,92E-7	6,64E-6 2,42E-6 1,18E-6 6,82E-7 4,35E-7 2,97E-7 2,13E-7 1,59E-7

Tabelle 6.45: Bodenkontamination mit α-Plutonium Pu-238,
Pu-239 und Pu-240 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim
Unfallablauf mit Venting und verhinderter
Kernschmelze im Sektor 12 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
12Ad	3,71E-10	3,54E-10	2,93E-10
12Ae	1,56E-10	1,49E-10	1,23E-10
12Af	7,40E-11	7,07E-11	5,84E-11
12Ag	3,85E-11	3,68E-11	3,04E-11
12Ah	2,14E-11	2,04E-11	1,69E-11
12Be	2,37E-17	2,27E-17	1,87E-17
12Bf	5,62E-18	5,37E-18	4,44E-18
12Bg	1,57E-18	1,50E-18	1,24E-18
12Bh	4,98E-19	4,76E-19	3,93E-19

Tabelle 6.46: Bodenkontamination mit Americium-241 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 10 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
10Ab	1,95E-25	1,03E-24	2,25E-24
10Ac	2,08E-27	1,10E-26	2,39E-26
10Bb	1,24E-15	6,53E-15	1,42E-14
10Bc	1,03E-16	5,44E-16	1,18E-15
10Bd	1,42E-17	7,51E-17	1,63E-16
10Be	2,69E-18	1,42E-17	3,10E-17
10Bf	6,37E-19	3,36E-18	7,32E-18
10Bg	1,78E-19	9,40E-19	2,05E-18
10Ca	2,79E-9	1,47E-8	3,21E-8
10Cb	4,45E-10	2,35E-9	5,12E-9
10Cc	1,19E-10	6,30E-10	1,37E-9
10Cd	4,20E-11	2,22E-10	4,83E-10
10Ce	1,77E-11	9,34E-11	2,03E-10
10Cf	8,41E-12	4,44E-11	9,67E-11
10Cg	4,36E-12	2,30E-11	5,01E-11
10Ch	2,43E-12	1,28E-11	2,79E-11

Tabelle 6.47: Bodenkontamination mit Americium-241 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 11 (in  $Bq/m^2$ )

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
	ια	τυ α	50 a
11 <b>A</b> a	9,53E-7	5,03E-6	1,09E-5
11Ab	3,47E-7	1,83E-6	3,98E-6
11Ac	1,70E-7	9,00E-7	1,96E-6
11Ad	9,82E-8	5,19E-7	1,13E-6
11Ae	6,24E-8	3,30E-7	7,18E-7
11Af	4,27E-8	2,25E-7	4,90E-7
11Ag	3,06E-8	1,62E-7	3,52E-7
11Ah	2,28E-8	1,20E-7	2,62E-7
11Ai	1,75E-8	9,26E-8	2,02E-7
11Ba	5,86E-6	3,10E-5	6,75E-5
11Bb	2,76E-6	1,46E-5	3,17E-5
11Bc	1,64E-6	8,64E-6	1,88E-5
11Bd	1,10E-6	5,80E-6	1,26E-5
11Be	7,97E-7	4,21E-6	9,17E-6
11Bf	6,09E-7	3,22E-6	7,00E-6
11Bg	4,82E-7	2,55E-6	5,54E-6
11Bh	3,93E-7	2,07E-6	4,51E-6
11Bi	3,28E-7	1,73E-6	3,77E-6
11Ca	9,53E-7	5,03E-6	1,09E-5
11Cb	3,47E-7	1,83E-6	3,98E-6
11Cc	1,70E-7	9,00E-7	1,96E-6
11Cd	9,82E-8	5,19E-7	1,13E-6
11Ce	6,24E-8	3,30E-7	7,18E-7
11Cf	4,27E-8	2,25E-7	4,90E-7
11Cg	3,06E-8	1,62E-7	3,52E-7
11Ch	2,28E-8	1,20E-7	2,62E-7
L			

Tabelle 6.48: Bodenkontamination mit Americium-241 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 12 (in  $Bq/m^2$ )

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
12Ad	4,20E-11	2,22E-10	4,83E-10
12Ae	1,77E-11	9,34E-11	2,03E-10
12Af	8,41E-12	4,44E-11	9,67E-11
12Ag	4,36E-12	2,30E-11	5,01E-11
12Ah	2,43E-12	1,28E-11	2,79E-11
12Be	2,69E-18	1,42E-17	3,10E-17
12Bf	6,37E-19	3,36E-18	7,32E-18
12Bg	1,78E-19	9,40E-19	2,05E-18
12Bh	5,65E-20	2,99E-19	6,50E-19
12Cg	1,66E-32	8,75E-32	1,90E-31

Abbildung 6.9: Bodenkontamination mit Jod-131 (unmittelbar nach Ablagerung) für den Unfallablauf mit Venting und Verhinderung eines Kernschmelzens im meteorologischen Referenzszenario im Flächenraster der Freien und Hansestadt Hamburg (in Bq/m², Kontaminationen < 1 Bq/m² sind als 0 ausgewiesen)

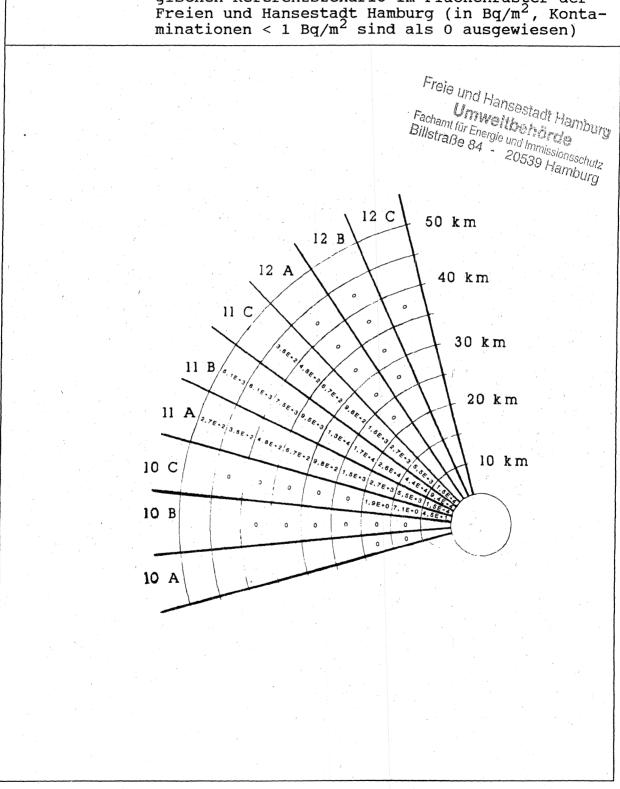
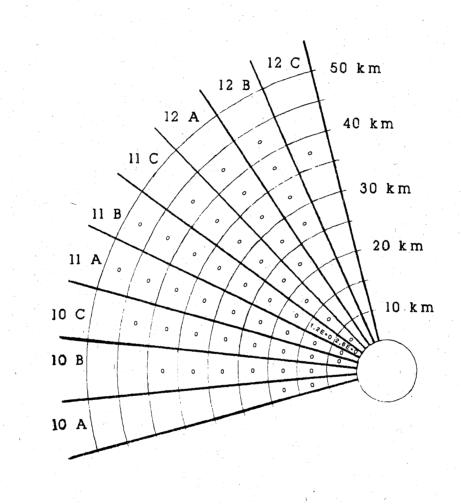


Abbildung 6.10: Bodenkontamination mit Cäsium-137 (1 Jahr nach dem Unfall) für den Unfallablauf mit Venting und Verhinderung eines Kernschmelzens im meteorologischen Referenzszenario im Flächenraster der Freien und Hansestadt Hamburg (in Bq/m², Kontaminationen < 1 Bq/m² sind als 0 ausgewiesen)



## 7 Auswertung der Berechnungsergebnisse

Im nachfolgenden Kapitel werden die Berechnungsergebnisse aus Kapitel 6 ausgewertet.

In Kapitel 7.1 werden die notwendigen Maßnahmen des Katastrophenschutzes aus den Ergebnissen abgeleitet. Dabei wird der Einfluß eines zukünftigen Einsatzes von MOX-Brennelementen im KKW Krümmel untersucht und mögliche Schutz- und Gegenmaßnahmen des Katastrophenschutzes hinsichtlich ihrer Effizienz diskutiert. In Kapitel 7.2 wird die Zahl zu erwartender Frühschäden untersucht, in Kapitel 7.3 die Zahl zu erwartender Spätschäden. Aspekte der Nutzbarkeit kontaminierter Gelände werden in Kapitel 7.4 diskutiert.

## 7.1 Notwendige Maßnahmen des Katastrophenschutzes

Im folgenden Abschnitt werden die Maßnahmen des Katastrophenschutzes, die sich gemäß den Eingreifwerten der "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz" ergeben, aufgezeigt. Dies geschieht zunächst für den Unfallablauf mit hohem Quellterm und anschließend für den Unfallablauf mit Venting und Verhinderung eines Kernschmelzens. Der Einfluß eines Einsatzes von Mischoxid(MOX)-Brennelementen auf die Größe der Gebiete, in denen Maßnahmen erforderlich werden, wird diskutiert.

## 7.1.1 Unfallablauf mit hohem Quellterm

In Kapitel 6 wurden Isodosislinien für verschiedene Eingreifwerte der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz beim Unfallablauf mit hohem Quellterm dargestellt. Diese Isodosislinien werden nachfolgend ausgewertet. Die Auswertung bezieht sich zunächst auf das meteorologische Referenzszenario.

Bei der Auswertung wird prinzipiell davon ausgegangen, daß ein Eingreifwert auch dann in einem Sektorabschnitt als überschritten angenommen wird, wenn er gemäß den Berechnungen nur in einem Teil des Sektorabschnitts überschritten wird. Dies geschieht in Absprache mit dem Auftraggeber, von dem ein solches Vorgehen ebenfalls für sinnvoll gehalten wird. Für ein solches Vorgehen sprechen eine Reihe von Gründen:

- Bei Windrichtungsänderungen während der Ausbreitung kann sich die Grenze, bis zu der ein bestimmter Eingreifwert überschritten wird, rasch verschieben.
- Die Berechnungen wurden für Erwachsene durchgeführt; bei einzelnen Bevölkerungsgruppen sind aber höhere Belastungen möglich, insbesondere bei Kleinkindern.
- Im realen Katastrophenfall ist die freigesetzte Menge radioaktiver Stoffe und damit die zu erwartende Belastung kurzfristig nur mit großer Unsicherheit bestimmbar.

Die genannten drei Effekte bedingen, daß vorsorglich Maßnahmen in einem gegenüber der tabellarischen Darstellung in Kapitel 6.2 erweiterten Gebiet getroffen werden.

Die beschriebene Auswertung führt zu den folgenden Resultaten:

- Überschreitung des unteren Eingreifwerts "Verbleiben im Haus" für die Summe der Effektiven Dosis aus Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage (5 mSv) für Erwachsene in den Sektorabschnitten:
  - 10Ca, 10Cb, 10Cc, 10Cd, 10Ce;
  - 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
  - 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
  - 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch;
  - 12Ad, 12Ae.
- Überschreitung des oberen Eingreifwerts "Verbleiben im Haus" für die Summe der Effektiven Dosis aus Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage (50 mSv) für Erwachsene in den Sektorabschnitten:
  - 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
  - 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
  - 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cq, 11Ch.
- Überschreitung des unteren Eingreifwerts "Evakuierung" für die Summe der Effektiven Dosis aus Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage (100 mSv) für Erwachsene in den Sektorabschnitten:
  - 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
  - 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
  - 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch.

- Überschreitung des oberen Eingreifwerts "Evakuierung" für die Summe der Effektiven Dosis aus Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage (500 mSv) für Erwachsene in den Sektorabschnitten:
  - 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag;
  - 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
  - 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg.
- Überschreitung des unteren Eingreifwerts "Verbleiben im Haus" für die Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) (50 mSv) für Erwachsene in den Sektorabschnitten:
  - 10Ca, 10Cb, 10Cc, 10Cd;
  - 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
  - 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
  - 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch;
  - 12Ad.
- Überschreitung des oberen Eingreifwerts "Verbleiben im Haus" für die Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) (250 mSv) für Erwachsene in den Sektorabschnitten:
  - 10Ca;
  - 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
  - 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
  - 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch.

- Überschreitung des unteren Eingreifwerts "Einnahme von Jodtabletten" für die Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) (200 mSv) für Erwachsene in den Sektorabschnitten:
  - 10Ca;
  - 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
  - 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
  - 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch.
- Überschreitung des oberen Eingreifwerts "Einnahme von Jodtabletten" für die Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) (1000 mSv) für Erwachsene in den Sektorabschnitten:
  - 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
  - 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
  - 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch.
- Überschreitung des unteren Eingreifwerts "Evakuierung" für die Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) (300 mSv) für Erwachsene in den Sektorabschnitten:
  - 10Ca;
  - 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
  - 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
  - 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch.

- Überschreitung des oberen Eingreifwerts "Evakuierung" für die Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) (1500 mSv) für Erwachsene in den Sektorabschnitten:
  - 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
  - 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
  - 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch.

Die Maßnahmen "Verbleiben im Haus" und "Evakuierung" können sowohl aufgrund einer Überschreitung von Eingreifwerten für Effektive Dosen als auch für Schilddrüsendosen erforderlich werden.
Aufgrund der restriktivsten unteren bzw. oberen Eingreifwerte für
die Effektiven Dosen und Schilddrüsendosen müßte die Aufforderung
zum Verbleib in Häusern in den folgenden Sektorabschnitten erfolgen (Sektorabschnitte mit alleiniger Überschreitung des unteren
Eingreifwerts in Klammern):

- 10Ca, (10Cb, 10Cc, 10Cd, 10Ce);
- 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
- 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
- 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch;
- (12Ad, 12Ae).

Die restriktivsten unteren bzw. oberen Eingreifwerte für die Effektiven Dosen und Schilddrüsendosen machen eine Evakuierung in den folgenden Sektorabschnitten erforderlich (Sektorabschnitte mit alleiniger Überschreitung des unteren Eingreifwerts in Klammern):

- (10Ca);
- 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
- 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
- 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch.

Das von den Maßnahmen "Verbleiben im Haus", "Evakuierung" und "Einnahme von Jodtabletten" betroffene Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg ist in den Abbildungen 7.1 bis 7.3 eingezeichnet.

Abbildung 7.1: Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg, in dem beim Unfallablauf mit hohem Quellterm die Bevölkerung zum Verbleib in Häusern aufzufordern ist (im Bereich mit Punktraster ist nur der entsprechende untere Richtwert der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz überschritten, im Bereich mit Strichraster auch der obere Richtwert)

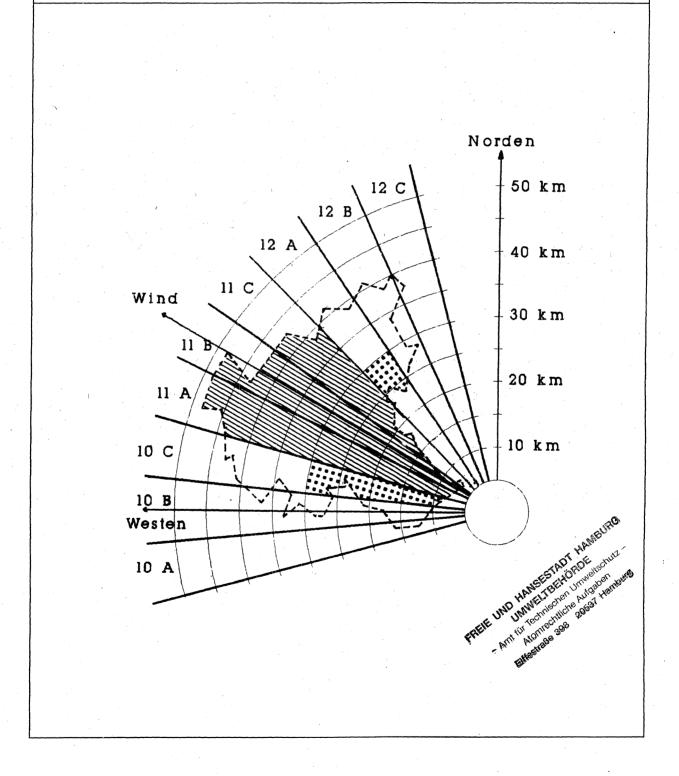


Abbildung 7.2: Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg, in dem beim Unfallablauf mit hohem Quellterm die Bevölkerung zu evakuieren ist (im Bereich mit Punktraster ist nur der entsprechende untere Richtwert der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz überschritten, im Bereich mit Strichraster auch der obere Richtwert)

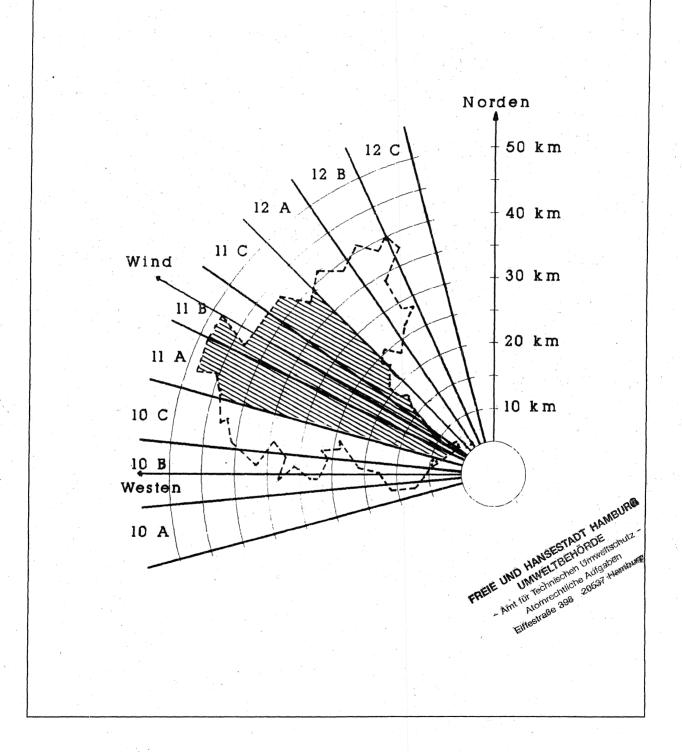
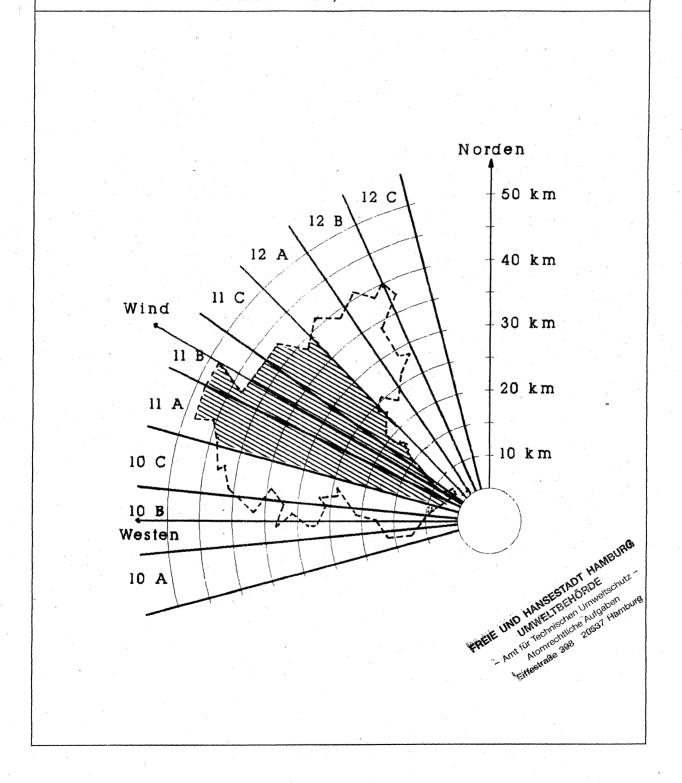


Abbildung 7.3: Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg, in dem beim Unfallablauf mit hohem Quellterm die Bevölkerung zur Einnahme von Jodtabletten aufzufordern ist (im Bereich mit Punktraster ist nur der entsprechende untere Richtwert der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz überschritten, im Bereich mit Strichraster auch der obere Richtwert)



Die von bestimmten Maßnahmen des Katastrophenschutzes betroffenen Gebiete der Freien und Hansestadt Hamburg können ebenfalls auf der Basis von Stadtteilen dargestellt werden.

In Tabelle 7.1 sind alle Stadtteile aufgeführt, in denen eine Evakuierung bzw. die Ausgabe von Jodtabletten nach den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz erforderlich ist. In dieser Darstellung und für diese Maßnahmen ergibt sich kein Unterschied bei Anwendung der unteren bzw. oberen Eingreifwerte.

Alle Stadtteile, in denen eine Aufforderung zum Verbleiben in Häusern gemäß den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz erfolgen muß, sind in Tabelle 7.2 aufgelistet. Die Stadtteile, in denen nur der untere Eingreifwert für diese Maßnahme überschritten wird, sind in Klammern gesetzt.

Tabelle 7.1: Stadtteile der Freien und Hansestadt Hamburg, in denen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm eine Evakuierung bzw. die Ausgabe von Jodtabletten nach den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz erforderlich ist (meteorologisches Referenzszenario)

Allermöhe Alsterdorf Altengamme Altenwerder Altona Nord Altstadt Altona Bahrenfeld Barmbek-Nord Barmbek-Süd Bergedorf Billbrook Billstedt Billwerder Blankenese Borgfeld Bramfeld Cranz Curslack Dulsberg Eidelstedt Eilbek Eimsbüttel **Eppendorf** Farmsen-Berne Finkenwerder Francop Fuhlsbüttel Groß Borstel Groß Flottbek Hamburg-Altstadt Hamm Mitte Hamm Nord Hamm Süd Hammerbrook Harvestehude Hoheluft Ost Hoheluft West Hohenfelde Hummelsbüttel Iserbrook

Jenfeld Kirchwerder Kleiner Grasbrook Klostertor Langenhorn Lilbek Lohbrügge Lokstedt Lurup Marienthal Moorburg Moorfleet Neuenfeld Neuengamme Neustadt Niendorf Nienstedten Ochsenwerder Ohlsdorf Osdorf Othmarschen Ottensen Reitbrook Rissen Rotenburgsort Rotherbaum Schnelsen Spadenland St. Pauli Steilshoop Steinwerder Stellingen Sülldorf Tatenberg Tonndorf Uhlenhorst Veddel Waltershof Wandsbek

Wilhelmsburg Winterhude Tabelle 7.2: Stadtteile der Freien und Hansestadt Hamburg, in denen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm eine Aufforderung zum Verbleiben in Häusern nach den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz erforderlich ist (in den Stadteilen in Klammern kann die Maßnahme erfolgen, muß dies aber nicht) (meteorologisches Referenzszenario)

Altengamme Altenwerder Altona Nord Altstadt Altona Bahrenfeld Barmbek-Nord Barmbek-Süd Bergedorf Billbrook Billstedt Billwerder Blankenese Borgfeld Bramfeld Cranz Curslack Dulsberg Eidelstedt Eilbek Eimsbüttel (Eißentorf) **Eppendorf** Farmsen-Berne Finkenwerder Francop Fuhlsbüttel Groß Borstel Groß Flottbek (Gut Moor) Hamburg-Altstadt Hamm Mitte Hamm Nord Hamm Süd Hammerbrook (Harburg) Harvestehude (Heimfeld) Hoheluft Ost Hoheluft West Hohenfelde Horn Hummelsbüttel Iserbrook Jenfeld

Allermöhe

Alsterdorf

Kirchwerder Kleiner Grasbrook Klostertor Langenhorn Lilbek Lohbrügge Lokstedt Lurup Marienthal (Marmstorf) Moorburg Moorfleet Neuenfeld Neuengamme (Neuland) Neustadt Niendorf Nienstedten Ochsenwerder Ohlsdorf Osdorf Othmarschen Ottensen (Rahlstedt) Reitbrook Rissen Rotenburgsort Rotherbaum (Rönneburg) Schnelsen Spadenland St. Pauli Steilshoop Steinwerder Stellingen Sülldorf Tatenberg Tonndorf Uhlenhorst

Veddel Waltershof

Wandsbek Wilhelmsburg

(Wilstorf)

Winterhude

FREE UND HANSESTADT WARRELPEGA

WHO TECHNICATE AND THOMBUTS

ANT TO TECHNICATE 2008 THOMBUTS

EHESTRADE 398

Die von den oben genannten Maßnahmen des Katastrophenschutzes betroffene Wohnbevölkerung der Freien und Hansestadt Hamburg beläuft sich beim Unfallablauf mit hohem Quellterm auf

- etwa 1.183.000 bis 1.316.000 Personen je nach Anwendung des unteren oder oberen Richtwerts für die Maßnahme -, die während des Durchzugs der radioaktiven Wolke zum Verbleib in Häusern aufzufordern sind,
- etwa 1.183.000 Personen, die anschließend zu evakuieren sind, und
- etwa 1.183.000 Personen, an die rechtzeitig Jodtabletten auszugeben sind.

Die genannten Personenzahlen beziehen sich auf die Wohnbevölkerung. Systematische Daten zu Pendlerbewegungen konnten vom Auftraggeber nicht zur Verfügung gestellt werden, wohl aber beispielhafte Daten zum Verhältnis von Wohn- und Tagesbevölkerung in einzelnen Stadtteilen.

Für die beiden Stadtteile Hamburg-Altstadt und Neustadt im Zentrum der Freien und Hansestadt Hamburg (Sektorabschnitt 11Bf) beläuft sich die Wohnbevölkerung auf 2082 bzw. 11.515 Personen, die Tagesbevölkerung dagegen auf 80.834 bzw. 51.954 Personen. In den Stadtteilen Lurup (Sektorabschnitte 11Bg sowie 11Bh) und Wandsbek (Sektorabschnitte 11Ce sowie 11Cf) beträgt die Wohnbevölkerung 30.451 bzw. 21.649 Personen, die Tagesbevölkerung dagegen 20.212 bzw. 23.163 Personen. Dies zeigt, daß in der Hamburger Innenstadt die Tagesbevölkerung die Wohnbevölkerung um etwa einen Faktor 40 übersteigen kann. Die Stadtteile Hamburg-Altstadt und Neustadt, deren Tagesbevölkerung die Wohnbevölkerung um etwa 120.000 übersteigt, sind im meteorologischen Referenzszenario

der Achse höchster Belastung (Ausbreitungsrichtung) sehr nahe gelegen. Eine Evakuierung wäre nur über diese Achse hinweg, also zunächst zu höheren Expositionen hin, möglich.

Die Belastungssituation der Bevölkerung der Freien und Hansestadt Hamburg läßt sich auch anhand einer Einteilung in Dosisklassen darstellen. Dazu wurden Diagramme erstellt, die eine anschauliche Übersicht über Zahl der Personen, die von den zu ergreifenden Schutzmaßnahmen betroffen sind, bieten. Die Einteilung in Dosisklassen ist daher an die Eingreifwerte der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz <BMU 1989> angepaßt. Für jede Dosisklasse (Spanne zwischen einem unteren und oberen Grenzwert) steht ein Balken, der die Anzahl der Personen einer Dosisklasse repräsentiert.

Dargestellt sind die Dosisverteilungen für die Summe der Effektiven Dosis aus Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage, für die Dosis des roten Knochenmarks innerhalb von 7 Tagen und für die Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis).

Die Dosisverteilungen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm sind in den Abbildungen 7.4 bis 7.6 dargestellt.

Für die Ermittlung der Dosisverteilung wurde als Referenzdosis die berechnete Dosis des jeweiligen Sektormittelpunktes verwendet. Im Hinblick auf die Beurteilung der Notwendigkeit, Maßnahmen des Katastrophenschutzes zu ergreifen, ist dies die sinnvolle Referenzdosis (siehe auch im vorliegenden Kapitel weiter oben). Für die Berechnungen der zu erwartenden Zahl von Spätschäden werden dagegen mittlere Dosen der einzelnen Sektorabschnitte zugrunde gelegt.

Abbildung 7.4: Dosisverteilung der Summe der Effektiven Dosis aus Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage Erwachsener beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Referenzszenario

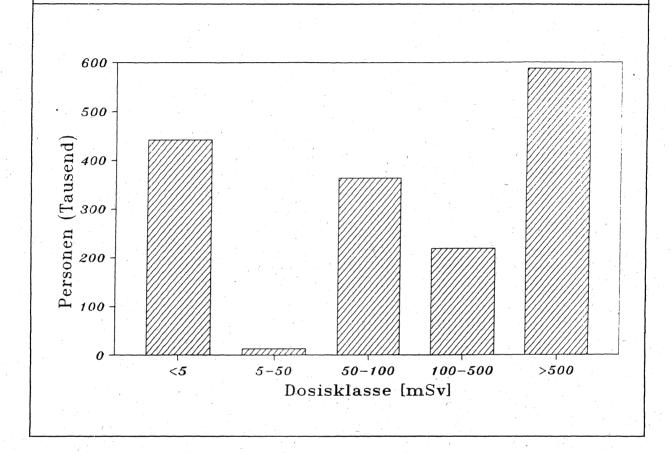
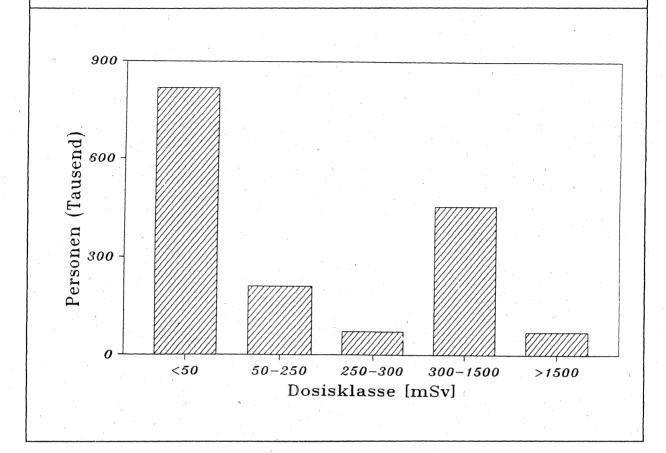
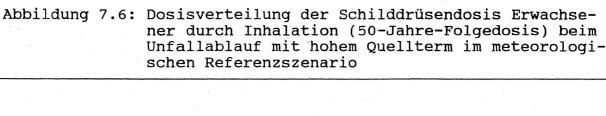


Abbildung 7.5: Dosisverteilung der Dosis des roten Knochenmarks Erwachsener innerhalb von 7 Tagen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Referenzszenario





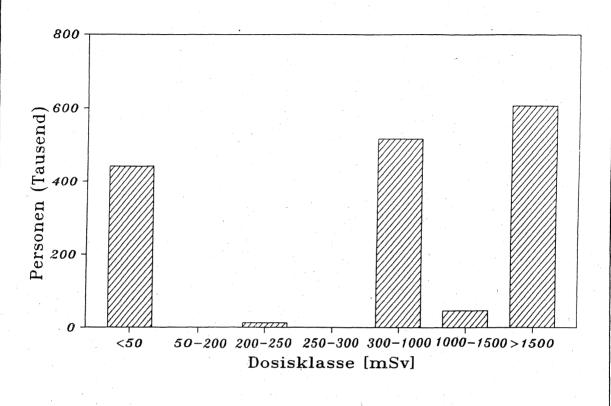


Abbildung 7.4 zeigt, daß bei der zugrunde gelegten Auswertungsmethode etwa ein Viertel der Bevölkerung einer Effektiven Dosis von weniger als 5 mSv ausgesetzt ist. Oberhalb dieser Dosis ist nach <BMU 1989> die Maßnahme "Verbleiben im Haus" möglich. Nahezu die Hälfte der Bevölkerung erhält Dosen oberhalb von 100 mSv und ist damit von der Maßnahme "Evakuierung" betroffen. Bei der Dosis des roten Knochenmarks (Abbildung 7.5) ist mehr als die Hälfte der Bevölkerung einer Dosis unterhalb von 50 mSv ausgesetzt, bei der nach <BMU 1989> keine Maßnahmen zu ergreifen sind. Etwa ein Drittel der Bevölkerung erhält Dosen oberhalb von 300 mSv und sollte daher evakuiert werden.

Für etwa ein Viertel der Bevölkerung liegt nach Abbildung 7.6 die Schilddrüsendosis unterhalb eines Werts von 50 mSv, bei dem nach <BMU 1989> keine Maßnahmen zu ergreifen sind. Mehr als drei Viertel der Bevölkerung erhalten Schilddrüsendosen oberhalb von 300 mSv und sind damit von der Maßnahme "Evakuierung" betroffen.

Im Fall von Niederschlägen ergeben sich durch die dann stärkeren Ablagerungen von Radionukliden am Boden größere von Maßnahmen des Katastrophenschutzes betroffene Gebiete. Einen Überblick über die Ausdehnung der Gebiete zeigen die Isodosislinien der Abbildungen 6.4 bis 6.6. Aus diesen Isodosislinien leiten sich die folgenden Aussagen ab:

Aufgrund der restriktivsten unteren bzw. oberen Eingreifwerte für die Effektiven Dosen und Schilddrüsendosen müßte die Aufforderung zum Verbleib in Häusern im meteorologischen Szenario "mit Regen" in den folgenden Sektorabschnitten erfolgen (Sektorabschnitte mit alleiniger Überschreitung des unteren Eingreifwerts in Klammern):

- 10Ca, 10Cb, (10Cc, 10Cd, 10Ce, 10Cf, 10Cg, 10Ch);
- 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Ag, 11Ah, 11Ai;
- 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
- 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch;
- (12Ad, 12Ae, 12Af, 12Ag, 12Ah).

Die restriktivsten unteren bzw. oberen Eingreifwerte für die Effektiven Dosen und Schilddrüsendosen machen eine Evakuierung im meteorologischen Szenario "mit Regen" in den folgenden Sektorabschnitten erforderlich (Sektorabschnitte mit alleiniger Überschreitung des unteren Eingreifwerts in Klammern):

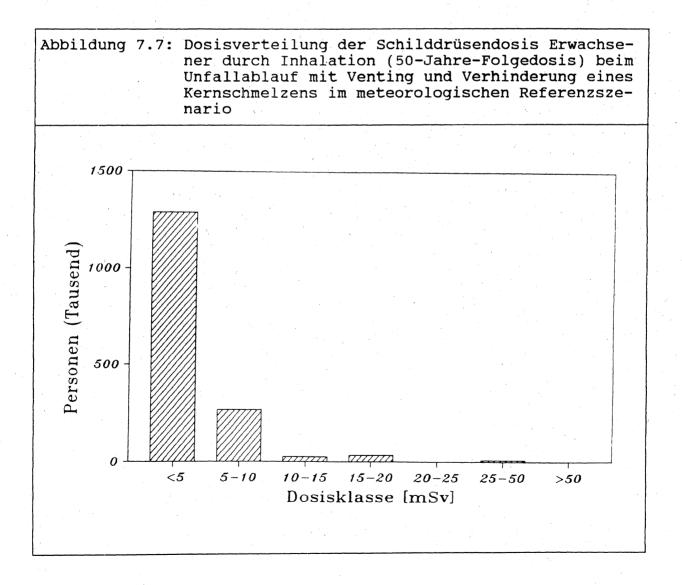
- (10Ca, 10Cb);
- 11Aa, 11Ab, 11Ac, 11Ad, 11Ae, 11Af, 11Aq, 11Ah, 11Ai;
- 11Ba, 11Bb, 11Bc, 11Bd, 11Be, 11Bf, 11Bg, 11Bh, 11Bi;
- 11Ca, 11Cb, 11Cc, 11Cd, 11Ce, 11Cf, 11Cg, 11Ch.

# 7.1.2 Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze

Für den Quellterm mit Venting und verhinderter Kernschmelze wurden keine Isodosislinien berechnet, da Eingreifwerte für Maßnahmen des Katastrophenschutzes bei diesem Quellterm nur in einem einzigen Sektorabschnitt überschritten werden. Überschritten wird dort – im Sektorabschnitt 11Ba – der untere Eingreifwert "Verbleiben im Haus" der Effektiven Dosis und der Schilddrüsendosis. Bei diesem Sektorabschnitt handelt es sich um einen Teil des Stadtteils Altengamme, dem gemäß dem in Kapitel 5 beschriebenen Auswertungsverfahren 315 Einwohner der Freien und Hansestadt Hamburg zugeordnet werden.

Wie bereits für den Unfallablauf mit hohem Quellterm wird auch für den Unfallablauf mit Venting und Verhinderung eines Kernschmelzens die Belastungssituation der Bevölkerung der Freien und Hansestadt Hamburg anhand einer Einteilung in Dosisklassen dargestellt (Abbildung 7.7). Für den Quellterm mit Venting und Ver-

hinderung eines Kernschmelzens wird nur die Dosisverteilung der Schilddrüsendosis durch Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) berücksichtigt, da hinsichtlich Effektiver Dosis und Schilddrüsendosis im gleichen Sektorabschnitt Maßnahmen zu ergreifen sind. Eine Klasseneinteilung gemäß den Grenzwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz ist für die Schilddrüsendosis beim Quellterm mit Venting nicht sinnvoll, da dann nur zwei Klassen ("< 50 mSv" mit etwa 1.600.000 Personen und "> 50 mSv" mit 315 Personen) besetzt wären. In diesem Fall wird daher eine feinere Unterteilung der Dosisklassen gewählt.



Der größte Teil der Bevölkerung erhält nach Abbildung 7.7 eine Schilddrüsendosis von weniger als 5 mSv. Lediglich 315 Personen (im Diagramm nicht erkennbar) sind bei der zugrunde gelegten Auswertungsmethode Dosen von mehr als 50 mSv ausgesetzt und damit von der Maßnahme "Verbleiben im Haus" betroffen.

Dennoch erfordert auch ein Unfallablauf mit Venting weit umfangreichere Maßnahmen des Katastrophenschutzes als die Aufforderung zum Verbleib in Häusern von wenigen hundert Einwohnern.

Zum Zeitpunkt eines Ventings - etwa 4 Stunden nach Unfallbeginn - ist im allgemeinen nicht absehbar, ob eine Kernschmelze verhindert werden kann oder nicht. Wie bereits in Kapitel 2 ausgeführt, dient ein Venting bei den Siedewasserreaktoren der Baulinie '69 dem Zweck, ein frühes Überdruckversagen des Sicherheitsbehälters zu verhindern. Ein Versagen des Sicherheitsbehälters erfolgt aber verzögert, wenn im Anschluß an das Venting die Wärmeabfuhr nicht wiederhergestellt werden kann. Versagt der Sicherheitsbehälter verzögert, so werden weit größere Mengen radioaktiver Stoffe in die Umgebung freigesetzt, als sie dem Szenario des Unfallablaufs mit Venting und verhinderter Kernschmelze zugrunde liegen.

Für Maßnahmen des Katastrophenschutzes auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg steht bei Unfällen im KKW Krümmel nur wenig Zeit - unter Umständen nur wenige Stunden - zur Verfügung. Es kann daher beim Bekanntwerden eines solchen Unfalls, der durch ein Venting eventuell in seinen Folgen gemindert werden kann, nicht abgewartet werden, wie sich der Unfall weiter entwickelt. Der Katastrophenschutz müßte so lange von einer massiven Freisetzung radioaktiver Stoffe ausgehen, wie ein solcher Unfall nicht

sicher abgewendet ist. Dies würde ein vorsorgliches Ergreifen der Maßnahmen "Verbleiben in Häusern", "Ausgabe von Jodtabletten" und "Evakuierung" erzwingen.

# 7.1.3 Einfluß eines zukünftigen Einsatzes von MOX-Brennelementen

Mit Datum vom 1.3.1990 hat die Kernkraftwerk Krümmel GmbH einen Antrag auf Erteilung einer atomrechtlichen Genehmigung zum Einsatz von Mischoxid(MOX)-Brennelementen gestellt. Im vorliegenden Gutachten ist zu untersuchen, welchen Einfluß ein Einsatz dieser Brennelemente auf die Folgen schwerer Unfälle im KKW Krümmel auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg hat.

MOX-Brennelemente enthalten neben Uran von vornherein auch spaltbares Plutonium, das in Uran-Brennelementen erst im Laufe des Einsatzes im Reaktor entsteht. Daraus ergeben sich unter anderem Konsequenzen für das radioaktive Inventar eines Reaktors, in dem diese Brennelemente eingesetzt werden.

Das Inventar an Spaltprodukten (z.B. Strontium-, Jod- und Cäsium-Isotope) ändert sich insbesondere dadurch, daß die Spaltausbeuten an einzelnen Isotopen bei einer Spaltung von Uran-235, Plutonium-239 und Plutonium-241 unterschiedlich sind. Diese Änderungen sind allerdings im Zusammenhang mit Fragen des Katastrophenschutzes als relativ gering zu betrachten. Sie können daher im Rahmen des vorliegenden Gutachtens vernachlässigt werden.

Großen Einfluß hat der Einsatz von MOX-Brennelementen auf das Inventar an Plutoniumisotopen und Isotopen, die durch Neutronenein- .

fang und radioaktiven Zerfall von Plutoniumisotopen entstehen.

Die für Unfallfolgenberechnungen entscheidenden Isotope dieser Kategorie sind:

- Plutonium-238 ( $\alpha$ -Strahler, Halbwertszeit 87,8 Jahre). Das Isotop entsteht beim Einsatz von Uran in Reaktoren durch Neutroneneinfangs- und Zerfallsprozesse aus Uran-235. Es ist im thermischen Reaktor nicht spaltbar, so daß das Inventar wegen seiner langen Halbwertszeit im Laufe der Einsatzzeit der Brennelemente stetig zunimmt.
- Plutonium-239 ( $\alpha$ -Strahler, Halbwertszeit 24100 Jahre). Das Isotop entsteht beim Einsatz von Uran in Reaktoren durch Neutroneneinfangs- und Zerfallsprozesse aus Uran-238. Es ist im thermischen Reaktor spaltbar. Ein Teil des produzierten Plutonium-239 wird daher auch durch Spaltung im Laufe der Einsatzzeit der Brennelemente wieder abgebaut.
- Plutonium-240 ( $\alpha$ -Strahler, Halbwertszeit 6570 Jahre). Das Isotop entsteht in Reaktoren durch Neutroneneinfang aus Plutonium-239. Es ist im thermischen Reaktor nicht spaltbar, so daß das Inventar wegen seiner langen Halbwertszeit im Laufe der Einsatzzeit der Brennelemente stetig zunimmt.
- Plutonium-241 (ß-Strahler, Halbwertszeit 14,4 Jahre).

  Das Isotop entsteht in Reaktoren durch Neutroneneinfang aus Plutonium-240. Es ist im thermischen Reaktor spaltbar. Ein Teil des produzierten Plutonium-241 wird daher auch durch Spaltung und wegen der Halbwertszeit von 14,4 Jahren radioaktiven Zerfall im Laufe der Einsatzzeit der Brennelemente wieder abgebaut. Zerfallsprodukt des Plutonium-241 ist Americium-241.

- Americium-241 (α-Strahler, Halbwertszeit 433 Jahre).
   Das Isotop entsteht durch radioaktiven Zerfall aus Plutonium-241. Wegen seiner langen Halbwertszeit nimmt das Inventar im Laufe der Einsatzzeit der Brennelemente stetig zu.
- Curium-242 ( $\alpha$ -Strahler, Halbwertszeit 163 Tage).

  Das Isotop entsteht im Reaktor durch Neutroneneinfangs- und Zerfallsprozesse aus Plutonium-241 bzw. Americium-241. Das Inventar nimmt entsprechend dem Inventar seiner Ausgangsprodukte im Laufe der Einsatzzeit der Brennelemente im Reaktor zu.
- Curium-244 ( $\alpha$ -Strahler, Halbwertszeit 18,1 Jahre). Das Isotop entsteht im Reaktor durch Neutroneneinfangs- und Zerfallsprozesse aus Plutonium- bzw. Americiumisotopen. Das Inventar nimmt im Laufe der Einsatzzeit der Brennelemente im Reaktor zu.

Das Inventar der genannten Isotope ist demnach teilweise bereits beim Einsatz frischer MOX-Brennelemente (Plutoniumisotope) gegenüber Uran-Brennelementen erhöht. Das Inventar an Americium- und Curiumisotopen nimmt durch das höhere Inventar der Ausgangsstoffe in den MOX-Brennelementen im Laufe der Einsatzzeit im Reaktor stärker zu als in Uran-Brennelementen.

Die aufgelisteten Isotope der Elemente Plutonium, Americium und Curium wirken sich bei Unfallfolgen in zweierlei Hinsicht aus:

- Bei Inhalation während des Durchzugs der radioaktiven Wolke führen die  $\alpha$ -strahlenden Isotope zu relativ hohen Expositionen der Lunge und anderer innerer Organe. Der Anteil dieser Exposition an der Gesamtexposition nimmt daher bei Einsatz von MOX-Brennelementen zu.

- Durch die überwiegend lange Halbwertszeit der α-strahlenden Isotope spielen diese für die langfristige Belastung durch Resuspension (Remobilisierung und Inhalation abgelagerter Aktivität) eine wichtige Rolle. In Fällen, in denen die Möglichkeit einer langfristigen Geländenutzung von diesem Belastungspfad und seiner Exposition abhängt, ergeben sich daher größere Konsequenzen bei Einsatz von MOX-Brennelementen.

Im Detail ist die quantitative Erhöhung der Unfallfolgen beim MOX-Einsatz von einigen Randbedingungen, die die Brennelemente betreffen, abhängig. Eine dieser Randbedingungen ist die Isotopenzusammensetzung des Plutoniums in den frischen MOX-Brennelementen. Diese Isotopenzusammensetzung variiert bei einzelnen verarbeiteten Chargen beim Hersteller dieser Brennelemente. Eine weitere Randbedingung ist die Frage, wieviele MOX-Brennelemente bei einem Unfall im KKW Krümmel gerade eingesetzt sind, da nur ein Teil des Kerns mit MOX-Brennelementen bestückt werden kann. Da für den Einsatz von MOX-Brennelementen noch keine Genehmigung erteilt wurde, ist die quantitative Beschränkung der Zahl von Brennelementen noch nicht geklärt. Hinzu kommt, daß aufgrund der bisherigen Lieferschwierigkeiten des Herstellers für diese Brennelemente (Siemens-Brennelementwerk in Hanau) der mögliche Umfang des Einsatzes offen ist.

Es wurde die Erhöhung der Effektiven 50-Jahre-Folgedosis Erwachsener durch Inhalation unter der Voraussetzung berechnet, daß bei einem Unfall nicht mehr als 20% der Brennelemente durch MOX-Brennelemente ersetzt sind. Der Plutoniumisotopenvektor in den

frischen Brennelementen soll dem Plutoniumisotopenvektor entsprechen, der in den abgebrannten Uran-Brennelementen des KKW Krümmel vorliegt.

Die Effektive 50-Jahre-Folgedosis Erwachsener durch Inhalation erhöht sich beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Untersuchungsgebiet um etwa 65% gegenüber dem ausschließlichen Einsatz von Uran-Brennelementen. Beim Unfallablauf mit Venting und Verhinderung eines Kernschmelzens beträgt die Erhöhung dagegen nur 1-2%, da der Anteil an Plutonium-, Americium- und Curiumisotopen an der Gesamtfreisetzung radioaktiver Stoffe bei diesem Unfallablauf deutlich geringer ist.

Entsprechend der höheren Inhalationsdosis vergrößern sich auch die Gebiete der Freien und Hansestadt Hamburg deutlich, in denen nach einem Unfall mit hohem Quellterm im KKW Krümmel Maßnahmen erforderlich werden. Formal wirkt sich dies im meteorologischen Leitszenario (ohne Regen), nicht aber in Fällen mit flächendeckendem Niederschlag aus, da bei Niederschlägen die im Sinne der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz relevanten Dosen von der dann deutlich höheren Gamma-Bodenstrahlung bestimmt werden. Die Gamma-Bodenstrahlung ändert sich aber durch eine höhere Freisetzung von Plutonium-, Americium- und Curiumisotopen praktisch nicht.

Es wurden Berechnungen der Effektiven Dosis Erwachsener aus Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage bei Einsatz von MOX-Brennelementen durchgeführt. Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Eingreifwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz ergibt, daß der untere Richtwert für eine Aufforderung zum Ver-

Die Berechnungen sind allerdings mit einer Reihe von Randbedingungen verknüpft, die in einer realen Unfallsituation in vielen Fällen nicht oder nicht hinreichend schnell festgelegt werden können:

- Freisetzungsmenge der radioaktiven Stoffe:
  - Beim Unfallablauf mit hohem Quellterm ist die freigesetzte Menge radioaktiver Stoffe nicht meßtechnisch am Reaktor bilanzierbar, da sie über Gebäudeleckagen erfolgt. Sie kann daher kurzfristig nur grob anhand von Ortsdosisleistungen in der Umgebung der Anlage geschätzt werden. Nuklidspezifische Emissionsdaten können kurzfristig nur auf Plausibilitätsüberlegungen beruhen. Beim Unfallablauf mit Venting kann die über das Ventingsystem freigesetzte Menge radioaktiver Stoffe meßtechnisch erfaßt werden, sofern der Meßbereich der Bilanzierungseinrichtung nicht überschritten wird. Offen bleibt aber zunächst, ob durch ein nachfolgendes Kernschmelzen noch weitere und massivere Freisetzungen erfolgen.
- Effektive Emissionshöhe der radioaktiven Stoffe:
  - Die effektive Emissionshöhe ist die Summe aus der Höhe über Grund der Austrittsöffnung radioaktiver Stoffe, der thermischen Überhöhung und gegebenenfalls der Überhöhung durch den Austrittsimpuls. Bei einem Austritt radioaktiver Stoffe über verschiedene Gebäudeleckagen ist die Feststellung der Freisetzungshöhe über Grund problematisch. Die Überhöhung durch Thermik bzw. Austrittsimpuls ist kurzfristig nur grob zu schätzen. Die Berechnungen im vorliegenden Gutachten haben allerdings ergeben, daß innerhalb plausibler Bandbreiten der effektiven Emissionshöhe die Strahlenexposition um weniger als einen Faktor 2 variiert.

## - Ausbreitungsklasse:

Die Ausbreitungsklasse hat Einfluß auf die Verbreiterung der radioaktiven Wolke während des atmosphärischen Transports. Sie ist durch Beobachtung verschiedener meteorologischer Parameter bestimmbar. Das Verfahren ist in <SSK 1989> beschrieben. Die Dosis durch Gamma-Bodenstrahlung und Inhalation ist bei Diffusionskategorie D jeweils etwa zwei- (10 km vom KKK entfernt) bis viermal (50 km vom KKK entfernt) höher als bei Diffusionskategorie C sowie etwa einen Faktor 3,5 größer (10 km vom KKK entfernt) bis etwa einen Faktor 2 zwei kleiner (50 km vom KKK entfernt) als bei Diffusionskategorie E.

# - Windrichtung im Ausbreitungsgebiet:

Die Windrichtung ist relativ schnell meßbar. Problematisch ist aber die Vorhersage der Windrichtung innerhalb der nächsten Stunden nach dem auslösenden Ereignis eines Unfalls. Windrichtungsschwankungen oder -änderungen um 10° verschieben die Gebiete, in denen Maßnahmen zu treffen sind in einiger Entfernung erheblich. Es wären daher alle Maßnahmen unter dem Gesichtspunkt einzuleiten, daß sie plausible Änderungen der Windrichtung unter den jeweiligen meteorologischen Verhältnissen abdecken müssen. Im vorliegenden Gutachten wurde dies in gewissem Rahmen bei der Auswertung der Isodosislinien im Hinblick auf die von Maßnahmen betroffene Personenzahl berücksichtigt.

# - Niederschlagsverhältnisse:

Falls zum Zeitpunkt eines Unfalls keine Niederschläge auftreten und für die nächste Zeit auch nicht zu erwarten sind, gestalten sich Berechnungen der Unfallfolgen im Hinblick auf Parameter "Niederschlagsverhältnisse" einfach. Probleme entstehen dann, wenn bereits Niederschläge auftreten, da deren Intensität er-

heblichen Einfluß auf die Bodenkontamination bzw. resultierende Bodenstrahlung hat und örtlich variiert. Es können dann lokal sehr unterschiedliche Belastungsverhältnisse vorliegen. Wenn Niederschläge zu erwarten sind stellt sich das Problem, daß am Ort lokaler Niederschläge weitergehende Maßnahmen einzuleiten wären, eine Lokalisierung der Niederschläge im Voraus aber naturgemäß nicht möglich ist. Weitergehende Maßnahmen als in einem Fall ohne Regen müßten daher in einem solchen Fall vorsorglich flächendeckend eingeleitet werden.

Die Bodenkontamination und damit auch die Dosis durch Gamma-Bodenstrahlung erhöht sich bei einem Regen der Intensität 1 mm/h um im Mittel etwa einen Faktor 15 gegenüber dem Szenario ohne Regen. Eine Niederschlagsintensität von 3 mm/h gegenüber 1 mm/h führt zu etwa um 50% höheren Belastungen. Bei einer Niederschlagsintensität von 5 mm/h wären die Kontaminationen etwa um 100% gegenüber der Niederschlagsintensität von 1 mm/h erhöht, falls die hohe Niederschlagsintensität nicht auf zu großen Flächen anhält. Bei großflächigen starken Niederschlägen käme es zu einem spürbaren Abreicherungseffekt der radioaktiven Wolke, was in größeren Entfernungen auf Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg zu geringeren Belastungen führen würde.

## 7.1.4.3 Zeitpunkte für Maßnahmen

Der beschriebene Zeitrahmen läßt eine Evakuierung der Bevölkerung vor Eintreffen der radioaktiven Wolke nicht zu. Im untersuchten Szenario überstreicht die Wolke die Freie und Hansestadt Hamburg etwa in Richtung Pinneberg und verläuft damit nördlich der Elbe.

Eine Evakuierung der Bevölkerung im Gebiet zwischen Elbe und Ausbreitungsrichtung ist daher zusätzlich aufgrund der Engpässe bei der Elbunter- bzw. überquerung erschwert.

Auch eine Ausgabe von Jodtabletten im erforderlichen Umfang ist nicht rechtzeitig möglich. Die Einnahme von Jodtabletten würde demnach voraussetzen, daß diese bereits vorher an die Bevölkerung verteilt worden sind. Der Nachteil einer solchen Maßnahme wäre, daß dann auch Teile der Bevölkerung in unbegründeten Fällen zu Jodtabletten greifen, wobei das Risiko den Nutzen überwiegen kann. Die sinnvollste Maßnahme kann daher nur sein, die Bevölkerung zum Aufsuchen von geschlossenen Räumen aufzufordern, bis die Luftkonzentration radioaktiver Stoffe zurückgegangen ist. In der Zwischenzeit wäre die Evakuierung im nötigen Umfang vorzubereiten.

Die Aufforderung zum Aufsuchen bzw. zum Verbleib in geschlossenen Räumen müßte unverzüglich erfolgen. Die Evakuierung wäre beim Unfallablauf mit hohem Quellterm frühestens nach 4 bis 5 Stunden vorzunehmen. Bei einem Unfallablauf mit Venting könnte eine Evakuierung auch sofort in die Wege geleitet werden, wenn der Unfallablauf zur Gruppe der Abläufe mit später Freisetzung bei Kernschmelzen zählt (Gruppe D in Tabelle 2.4).

Der früheste Zeitpunkt, zu dem die erforderlichen Maßnahmen eingeleitet werden könnten, ist das Eintreten des unfallauslösenden Ereignisses im Reaktor. Dies würde allerdings voraussetzen, daß einerseits bereits zu diesem Zeitpunkt die Nichtbeherrschung des Ereignisses erkennbar ist und andererseits die zuständigen Stellen der Freien und Hansestadt Hamburg unverzüglich über das Ereignis informiert werden. Von beiden Voraussetzungen ist in der Realität nicht auszugehen, da im allgemeinen für die Auslösung

eines katastrophalen Unfalls mehrere Sicherheitssysteme versagen müssen. Ein Versagen zur Störfallbeherrschung benötigter Systeme ist aber im allgemeinen bei Eintritt des auslösenden Ereignisses nicht erkennbar. Es ist daher davon auszugehen, daß die Betriebsmannschaft zunächst von einer Beherrschung des Störfalls ausgeht. Beim im vorliegenden Gutachten untersuchten Unfallablauf mit hohem Quellterm entwickelt sich der Unfall so rasch fort, daß sein katastrophales Ausmaß der Betriebsmannschaft aber bereits nach wenigen Minuten (Überdruckversagen des Sicherheitsbehälters) bekannt sein muß.

### 7.1.4.4 Schutzfaktoren

Im folgenden werden zunächst die dosisreduzierenden Aspekte der Maßnahme "Verbleiben im Haus" unter Berücksichtigung der relevanten Belastungspfade Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung und Inhalation vorgestellt. Anschließend wird deren Effektivität diskutiert.

- Die externe Bestrahlung durch Gamma-Submersion aus der radioaktiven Wolke erfolgt hauptsächlich von oben und kann durch Aufsuchen gut abgeschirmter Räume (Keller, Schutzräume), möglichst mit entsprechend dicken Wänden und Decken, während des Durchzugs der Wolke verringert werden.
- Die externe Bestrahlung durch Gamma-Bodenstrahlung erfolgt im wesentlichen von der Erdoberfläche, kontaminierten Wänden und Dächern sowie von kontaminiertem Bewuchs her. Schutz bieten gut abgeschirmte Räume, insbesondere Keller oder spezielle Schutzräume. Fenster der Räume stellen aufgrund ihrer geringen

Abschirmwirkungen Schwachstellen dar. Außerdem ist zu beachten, daß bei trockener Deposition die Kontamination von Bäumen zu einer bis zur dreifach höheren Strahlenbelastung in Räumen mit Fenstern in unmittelbarer Nähe der Bäume führen kann < Meckenbach 1986>.

- Die Inhalation von radioaktivem Jod und Aerosolen aus der Wolke führt zur internen Strahlenbelastung des Körpers. Die Inhalation selbst erfolgt während dem Durchzug der Wolke, während die inhalierten und im Körper deponierten Radionuklide zu längerfristigen Belastungen führen. Dabei muß die Möglichkeit der Inhalation von resuspendierten Aerosolen auch nach Durchzug der Wolke berücksichtigt werden. Sofortigen Schutz bieten luftdicht abgeschlossene Räume oder Atemluftfilter. Zur Vermeidung der nachträglichen Inhalation durch Resuspension muß eine Dekontamination oder Fixierung der abgelagerten Aerosole erfolgen.
- Abschirmung der Gamma-Submersion und Gamma-Bodenstrahlung durch Gebäude:

Die Abschirmfaktoren (Strahlenexposition mit Abschirmung dividiert durch Strahlenexposition ohne Abschirmung) stellen ein Maß für die Abschirmung der äußeren Gammastrahlen im Innern von Gebäuden dar. Die nachfolgend angeführten Werte für Wohngebäude, bezogen auf die Gamma-Submersion und die Gamma-Bodenstrahlung, sind nach verschiedenen Literaturangaben zusammengestellt (<Prêtre 1970>, <GRS 1981>, <Meckenbach 1986>, <Jacob 1991>).

## - Ein- und Zweifamilienhäuser:

In den Wohnräumen von Ein- und Zweifamilienhäusern liegen die Abschirmfaktoren zwischen 0,1 und 0,5, je nach Lage des Wohnraums im Haus. Räume im Erdgeschoß bieten eine bessere Abschirmung, da in den oberen Stockwerken die Strahlung von abgelagerten Nukliden auf den Dächern überwiegt. In den Kellern liegen die Abschirmfaktoren je nach vorhandenen oberirdischen Fenstern zwischen 0,005 und 0,3.

#### - Häuserblöcke:

Die Abschirmfaktoren der Wohnräume in Häuserblöcken liegen zwischen und 0,005 und 0,1, je nach Lage der Wohnräume im Haus. Die ungünstigsten Räume sind die unmittelbar unter dem Dach und im Erdgeschoß gelegenen. Die beste Abschirmung im Wohnbereich von Hochhäusern wird in Räumen erreicht, die wenig oberhalb der mittleren Stockwerke liegen. In den Kellern der Häuserblöcke werden Abschirmfaktoren zwischen 0,001 und 0,02 erreicht.

# - Reduzierung der Inhalationsdosis in Innenräumen:

Die Zunahme der Konzentration von radioaktivem Jod und radioaktiven Aerosolen über die Zeit ist beim Durchzug der radioaktiven Wolke in Innenräumen abhängig von der Austauschgeschwindigkeit der Raumluft mit der Außenluft. Zur Reduzierung der Strahlenbelastung durch Inhalation muß deshalb die Luftwechselrate durch Schließen und Abdichten der Fenster und/oder anderer Verbindungen zur Außenluft – wie Türen, Abzugsschächte, Kamine etc. – reduziert werden. Gegebenenfalls müssen Lüftungs- und Klimaanlagen abgeschaltet und abgedichtet oder auf Umluftbe-

trieb geschaltet werden (klimatisierte Räume sind in der Regel besser gegen die Außenluft abgedichtet als nichtklimatisierte Räume).

Geht man von einer effektiven Luftwechselrate von 0,4 bis - 0,6 pro Stunde in normal belüfteten Räumen aus (d. h. in einer Stunde werden 40% bis 60% der Raumluft gegen Außenluft getauscht), so liegt der mittlere Anteil an kontaminierter Außenluft im betrachteten Zeitraum während dem Durchzug der radioaktiven Wolke über 3 Stunden, zwischen 50% und 70%. Damit ergeben sich Abschirmfaktoren für den Aufenthalt in den Räumen zwischen 0,5 und 0,7, vorausgesetzt, daß nach Durchzug der Wolke wieder gelüftet wird bzw. eine Evakuierung erfolgt.

Bei reduzierten Luftwechselraten zwischen 0,1 und 0,2 pro Stunde, die durch Abdichten der Fenster oder Umschalten der Lüftungs- und Klimaanlagen erreicht werden können, ergeben sich Abschirmfaktoren zwischen 0,14 und 0,33.

- Schlußfolgerungen aus den Schutzfaktoren beim Unfallablauf mit hohem Quellterm:

Nach den Rechenergebnissen der vorliegenden Studie ist bei trockener Ablagerung nach einem Unfallablauf mit hoher Freisetzung, während des Durchzugs der Wolke der Dosisbeitrag durch Inhalation von radioaktivem Jod und radioaktiven Aerosolen etwa 25 mal höher als die Summe der Gamma-Bodenstrahlung und Gamma-Submersion im gleichen Zeitraum. Bei diesem Szenario müssen deshalb die Maßnahmen für den Zeitraum des Durchzugs der radioaktiven Wolke in erster Linie auf die Verminderung der Inhalation ausgerichtet sein. Pauschale Anordnungen zum Aufsuchen von Kellerräumen sind nur dann geeignet, wenn sichergestellt ist,

daß eventuell vorhandene Fenster rechtzeitig ausreichend dicht verschlossen werden können. Da dies häufig nicht gewährleistet ist, sind leicht abdichtbare Räume innerhalb der Wohnung, möglichst ohne Fenster oder sonstigen Kontakt mit der Außenluft - Baderäume, Keller ohne Fenster etc. - besser geeignet.

In der Freien und Hansestadt Hamburg leben nach vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Unterlagen 24,5% der Einwohner in Häusern mit 1 bis 2 Wohnungen, 19% in Gebäuden mit 3 bis 6 Wohnungen und 60,5% in größeren Wohneinheiten. Durch die Maßnahme "Verbleiben in Häusern" könnte die integrale Strahlenbelastung der Bevölkerung durch Gamma-Submersion und Gamma-Bodenstrahlung nach den oben angeführten Abschirmfaktoren auf 1% bis 10% reduziert werden.

Den größeren Anteil zur Strahlenbelastung bei trockener Ablagerung (meteorologisches Referenzszenario) trägt jedoch die Inhalation bei. Eine Reduktion dieser Belastung wird weniger durch die Abschirmwirkung der Wände, als vielmehr durch die mehr oder weniger luftdichte Abschließbarkeit der Räume bewirkt. Die Maßnahme "Verbleiben in Häusern" wird – gemäß den obigen Ausführungen über deren Effektivität – die Inhalationsdosis weniger drastisch reduzieren als die Dosis durch äußere Bestrahlung. Im Mittel dürfte eine Halbierung der Strahlenbelastung und nur in Einzelfällen eine größere Reduzierung zu warten sein.

Das bedeutet, daß auch bei optimaler Einleitung der Aufforderung zum Verbleiben in Häusern und der Akzeptanz einer solchen Aufforderung die Zahl an Spätschäden nur auf etwa die Hälfte

reduziert werden kann. Akute Schäden (Frühschäden) können allerdings im meteorologischen Referenzszenario (ohne Regen) unter der genannten Bedingung weitestgehend vermieden werden.

Bei einem Szenario mit Regen würden die Nuklide der radioaktiven Wolke auch ausgewaschen und naß abgelagert. Dies führt zur einer höheren Gamma-Bodenstrahlung im betroffenen Gelände gegenüber der trockenen Ablagerung. Die Inhalationsdosis ist dann nur noch etwa 2 bis 4 mal höher als die Summe von Gamma-Submersion und Gamma-Bodenstrahlung während des Durchzugs der Wolke. Die Schutzmaßnahmen müßten deshalb bei nasser Ablagerung verstärkt die Abschirmung der Gamma-Bodenstrahlung - unter Beachtung der von Wänden und Dächern ausgehenden Strahlung - berücksichtigen.

## 7.1.4.5 Verhalten der Bevölkerung bei realen Unfällen

Die Diskussion der Schutz- und Gegenmaßnahmen erfolgte bisher unter dem Gesichtspunkt der Optimierung des Schutzes der Bevölkerung. Ein perfektes Funktionieren des Katastrophenschutzes ist dabei vorausgesetzt. In realen Unfallsituationen ist aber auch damit zu rechnen, daß bei großen Teilen der Bevölkerung die notwendigen Maßnahmen nicht greifen. Dies kann anhand einiger Beispiele verdeutlicht werden:

- Es ist anzunehmen, daß nicht alle Personen, die sich in den betroffenen Gebieten aufhalten, eine Aufforderung zum Verbleib in geschlossenen Räumen bzw. zu deren Aufsuchen wahrnehmen.

- Bei Personen, die gerade außerhalb ihres Wohngebiets unterwegs sind, besteht die Gefahr, daß nicht nächstliegende geschlossene Räume aufgesucht werden, sondern die eigene Wohnung aufgesucht wird. Dies ist besonders dann zu erwarten, wenn sich dort die Familie aufhält.
- Bei Personen mit eigenem PKW besteht die Gefahr, daß sie statt geschlossene Räume aufzusuchen, das betroffene Gebiet verlassen wollen. Sie können durch den Gedanken, daß dies vor dem Anlaufen der offiziellen Evakuierung noch leichter sei, dazu veranlaßt werden. Diese Personen setzen sich damit in vielen Fällen einer höheren Strahlenexposition aus, da die Abschirmung der äußeren Strahlung und der Schutzfaktor für Inhalation in einem PKW relativ gering ist. Falls dieses Verhalten zu einem Verkehrschaos führt, können diese Personen die betroffenen Gebiete darüber hinaus nicht schnell genug verlassen. Personen im Gebiet zwischen Ausbreitungsrichtung im meteorologischen Referenzszenario und Elbe, die die Passage der Elbe vermeiden wollen, würden in das Zentrum der radioaktiven Wolke hinein fahren.

#### 7.1.4.6 Dosisreduktion in verschiedenen Szenarien

Ziel der Maßnahmen des Katastrophenschutzes muß es sein, die Strahlenexposition der Bevölkerung zu minimieren. Optimale Zeitpunkte für einzelne Maßnahmen wurden bereits in Kapitel 7.1.4.3 diskutiert. Nachfolgend soll analysiert werden, wie sich Maßnahmen und deren Zeitpunkte auf die Dosis auswirken. Dazu werden vier Szenarien detaillierter untersucht:

Szenario 1: Aufforderungen an die Bevölkerung, geschlossene Räume aufzusuchen, werden nicht befolgt. Der überwiegende Teil der Bevölkerung versucht das Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg nach Norden oder Süden zu verlassen.

Es wird unterstellt, daß sich die Referenzperson vom Zentrum der radioaktiven Wolke senkrecht zur Ausbreitungsrichtung fortbewegt. Sie setzt sich der Inhalation und Gamma-Submersion sowie der Gamma-Bodenstrahlung (über 0,5 Stunden) im benachbarten Sektorabschnitt aus. Diese Annahmen sind insofern optimistisch, als ein relativ guter Verkehrsfluß und eine günstige Wahl der Fluchtrichtung zugrunde gelegt wird.

Szenario 2: Der Aufforderung zum Verbleib in Häusern wird vor dem Durchzug der radioaktiven Wolke Folge geleistet. Jodtabletten werden rechtzeitig vor Eintreffen der radioaktiven Wolke eingenommen. Nach dem Durchzug der radioaktiven Wolke wird die Evakuierung begonnen. Für den Aufenthalt im Haus wird ein Schutzfaktor von Inhalation und 20 für Gamma-Submersion und für Gamma-Bodenstrahlung zugrunde gelegt. Dies setzt ein dichtes Verschließen der aufgesuchten Räume voraus. Die Bodenstrahlung wirkt für die Dauer des Durchzugs der radioaktiven Wolke zuzüglich einer halben Stunde Eine weitere halbe Stunde ist die Referenzperein. son der Gamma-Bodenstrahlung im angrenzenden Sektorabschnitt vom Zentrum der Wolke entfernt ausgesetzt. Die Schilddrüsendosis wird durch die Einnahme von Jodtabletten um einen Faktor 100 reduziert, wie er nach <SSK 1989> für eine vorsorgliche Einnahme - vor dem Eintreffen der radioaktiven Wolke - erreicht werden kann.

Szenario 3: Der Ablauf ist analog Szenario 2, allerdings erfolgt die Evakuierung erst 12 Stunden nach Unfallbeginn.

Die Referenzperson soll in diesem Szenario den gleichen Strahlenexpositionen ausgesetzt sein, wie in Szenario 2. Hinzu kommt eine Gamma-Bodenstrahlung am Aufenthaltsort über 12 Stunden.

Szenario 4: Der Ablauf ist analog Szenario 2, die Evakuierung erfolgt aber erst 24 Stunden nach Unfallbeginn.

In Szenario 4 soll die Referenzperson den gleichen Strahlenexpositionen ausgesetzt sein, wie in Szenario 2. Die Gamma-Bodenstrahlung am Aufenthaltsort über 24 Stunden kommt hinzu.

Für die einzelnen Szenarien werden die Dosen von Einzelpersonen berechnet. Diese sind teilweise abhängig von der geographischen Lage relativ zum KKW Krümmel. Es werden, um die Bandbreite der Exposition und der Auswirkungen der unterschiedlichen Verhaltensweisen bzw. Maßnahmen zu erfassen, Dosen für die folgenden Standorte innerhalb der Flächen, für die eine Aufforderung zum Verbleib in Häusern nach den Richtwerten der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in Frage kommt, ermittelt:

- 7,5 km vom KKW Krümmel entfernt in Ausbreitungsrichtung (Mittelpunkt des Sektorabschnitts 11Ba),
- 27,5 km vom KKW Krümmel entfernt in Ausbreitungsrichtung (Mittelpunkt des Sektorabschnitts 11Be),
- 47,5 km vom KKW Krümmel entfernt in Ausbreitungsrichtung (Mittelpunkt des Sektorabschnitts 11Bi),
- 7,5 km vom KKW Krümmel entfernt um 10° gegen die Ausbreitungsrichtung gedreht (Mittelpunkt des Sektorabschnitts 11Aa bzw. 11Ca),
- 27,5 km vom KKW Krümmel entfernt um 10° gegen die Ausbreitungsrichtung gedreht (Mittelpunkt des Sektorabschnitts 11Ae bzw. 11Ce),
- 47,5 km vom KKW Krümmel entfernt um 10° gegen die Ausbreitungsrichtung gedreht (Mittelpunkt des Sektorabschnitts 11Ai),
- 27,5 km vom KKW Krümmel entfernt um 20° gegen die Ausbreitungsrichtung gedreht (Mittelpunkt des Sektorabschnitts 10Ce bzw. 12Ae).

Alle Angaben beziehen sich auf den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Leitszenario (ohne Regen).

In den Tabellen 7.3 und 7.4 sind die Ergebnisse der Berechnungen aufgelistet.

Nach den in den Tabellen 7.3 und 7.4 aufgeführten Ergebnissen ergibt sich in den einzelnen Szenarien folgendes Bild:

## Szenario 1

Die Effektive Dosis durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung und Inhalation ist gegenüber einem Aufenthalt im Freien über 7 Tage auf 11% und weniger reduziert.

Tabelle 7.3: Reduktion der Effektiven Dosis durch Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung und Inhalation in verschiedenen Szenarien gegenüber einem Aufenthalt im Freien über 7 Tage

Freien über / Tage						
Sektorabschnitt	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4		
Effektive Dosis (in mSv)						
11Ba	1,16E+3	1,24E+3	1,25E+3	1,27E+3		
11Be	1,10E+2	2,09E+2	2,12E+2	2,15E+2		
11Bi	3,46E+1	8,77E+1	8,88E+1	8,99E+1		
11Aa	1,79E+0	1,66E+2	1,69E+2	1,71E+2		
11Ae	2,70E-2	1,58E+1	1,61E+1	1,63E+1		
11Ai	4,03E-3	4,97E+0	5,04E+0	5,11E+0		
11Ca	1,79E+0	1,66E+2	1,69E+2	1,71E+2		
11Ce	2,80E-2	1,58E+1	1,61E+1	1,63E+1		
10Ce	2,30E-9	3,87E-3	3,94E-3	3,99E-3		
12Ae	2,30E-9	3,87E-3	3,94E-3	3,99E-3		
Bruchteil der Dosis in den einzelnen Szena- rien gegenüber der Dosis bei einem Aufent- halt im Freien über 7 Tage (in %)						
11Ba	10,56	11,26	11,41	11,56		
11Be	5,98	11,38	11,54	11,69		
11Bi	4,52	11,47	11,61	11,75		
11Aa	0,12	11,20	11,42	11,57		
11Ae	0,02	11,33	11,53	11,68		
11Ai	0,01	11,43	11,60	11,75		
11Ca	0,12	11,20	11,42	11,57		
11Ce	0,02	11,33	11,53	11,68		
10Ce	#	11,33	11,53	11,67		
12Ae	#	11,33	11,53	11,67		

# Reduktion auf weniger als  $10^{-5}$ %

Tabelle 7.4: Reduktion der Schilddrüsendosis durch Inhalation in verschiedenen Szenarien gegenüber einem Aufenthalt im Freien während des Durchzugs der radioaktiven Wolke

tiven Wolke					
Sektorabschnitt	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	
Schilddrüsendosis (in mSv)					
11Ba 11Be 11Bi 11Aa 11Ae 11Ai 11Ca 11Ce 10Ce 12Ae	8,24E+3 7,72E+2 2,38E+2 1,27E+1 1,89E-1 5,43E-2 1,27E+1 1,89E-1 1,93E-8 1,93E-8	8,76E+1 1,46E+1 5,99E+0 1,18E+1 1,10E+0 3,40E-1 1,18E+1 1,10E+0 2,70E-4 2,70E-4	8,76E+1 1,46E+1 5,99E+0 1,18E+1 1,10E+0 3,40E-1 1,18E+1 1,10E+0 2,70E-4 2,70E-4	8,76E+1 1,46E+1 5,99E+0 1,18E+1 1,10E+0 3,40E-1 1,18E+1 1,10E+0 2,70E-4 2,70E-4	
Bruchteil der Dosis in den einzelnen Szena- rien gegenüber der Dosis bei einem Aufent- halt im Freien während des Durchzugs der radioaktiven Wolke (in %)					
11Ba 11Be 11Bi 11Aa 11Ae 11Ai 11Ca 11Ce 10Ce 12Ae	13,44 7,57 5,68 0,15 0,02 0,02 0,15 0,02 #	0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14	0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14	0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14	

# Reduktion auf weniger als 10<sup>-5</sup>%

Die Reduktion ist umso größer, je weiter von der Anlage und von der Ausbreitungsachse entfernt der betrachtete Ort liegt. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß durch die gewählte Art der Einteilung in Sektorabschnitte der in diesem Szenario zurückgelegte Weg – bis zum Zentrum des senkrecht zur Ausbreitungsrichtung benachbarten Sektorabschnitt – mit dem Abstand von der Anlage zunimmt. In 7,5 km Entfernung vom KKW Krümmel beträgt der Weg etwa 1,3 km, in 27,5 km Entfernung etwa 4,8 km und in 47,5 km Entfernung etwa 8,3 km. Die unterschiedliche Reduktion kann daher

auch möglichen Fortbewegungsarten zugerechnet werden. So könnten Personen, die sich zu Fuß fortbewegen 1,3 km in einer halben Stunde zurücklegen, Radfahrer 8,3 km.

Bei den weiter von der Ausbreitungsachse entfernten betrachteten Aufpunkten ergibt sich eine zusätzlich verstärkte Reduktion dadurch, daß der Rückgang der Exposition gegenüber der Ausbreitungsrichtung bei einer seitlichen Abweichung um 10° deutlich kleiner ist, als bei einem Übergang von einer Abweichung von 10° auf eine Abweichung von 20° (Form der Gaußverteilung der Dosis quer zur Ausbreitungsrichtung).

In diesem Szenario wurden Personen betrachtet, denen die Flucht in weniger belastetes Gebiet gelingt. Die Effektive Dosis reduziert sich dagegen in allen Sektorabschnitten nur auf etwa 50% der Dosis eines Aufenthalts im Freien über 7 Tage, wenn unterstellt wird, daß eine Person etwa 2 bis 3 Stunden in einem Stau in der Nähe des Ausgangspunkts der Flucht steht und dann zügig das belastete Gebiet verläßt. Dies hat seine Ursache darin, daß dann nur die Reduktion durch eine geringere Zeitdauer der Exposition durch die Gamma-Bodenstrahlung zum tragen kommt.

Im Hinblick auf die Reduktion der Schilddrüsendosis in Szenario 1 ist festzustellen, daß die Reduktion etwas geringer ist, als die Reduktion der Effektiven Dosis. Bei einem Szenario mit Verkehrsstau wäre keine Reduktion gegenüber einem Aufenthalt im Freien zu erreichen, wenn die radioaktive Wolke während der Standzeit durchzieht.

## Szenario 2

In diesem Szenario reduziert sich die Effektive Dosis durchgängig auf etwa 11-12% der Dosis bei einem Aufenthalt im Freien über 7 Tage. Die Reduktion ist damit im allgemeinen geringer als im Fall eines zügigen Verlassens des entsprechenden Gebiets vor Eintreffen der radioaktiven Wolke. Gegenüber einem Szenario mit Verkehrsstau über 2-3 Stunden in der Nähe des Ausgangsorts der Flucht ist die erreichte Reduktion um etwa einen Faktor 7 größer. Die Schilddrüsendosis durch Inhalation wird in Szenario 2 durchgängig auf 0,14% der Dosis bei Aufenthalt im Freien und ohne Einnahme von Jodtabletten vor dem Eintreffen der radioaktiven Wolke reduziert. Der größte Teil der Reduktion beruht auf der Einnahme von Jodtabletten. Würden Jodtabletten erst 2 Stunden nach dem Eintreffen der radioaktiven Wolke eingenommen, so wäre die Schilddrüsendosis etwa 20mal größer <SSK 1989>.

#### Szenario 3 und Szenario 4

Die Reduktion der Effektiven Dosis in den Szenarien 3 und 4 unterscheidet sich nur geringfügig von der Reduktion in Szenario 2. Die Ursache ist darin zu sehen, daß die Effektive Dosis überwiegend durch Inhalation hervorgerufen wird. Eine um 12 bzw. 24 Stunden verlängerte Aufenthaltszeit nach Durchzug der radioaktiven Wolke wirkt sich daher nur sehr begrenzt auf die Höhe der Effektiven Gesamtdosis aus. In einem meteorologischen Szenario mit Niederschlägen während des Durchzugs der radioaktiven Wolke wären die Verhältnisse anders, da dann – abhängig von der Niederschlagsintensität – der Beitrag durch die Gamma-Bodenstrahlung den der Inhalation übersteigen kann.

Eine Änderung der Reduktion der Schilddrüsendosis gegenüber Szenario 2 ergibt sich in den Szenarien 3 und 4 nicht, da die Menge der inhalierten radioaktiven Stoffe in den drei Szenarien die gleiche ist.

#### 7.2 Frühschäden

Eine Gruppe möglicher Strahlenschäden sind die nichtstochastischen akuten Schäden (Frühschäden), die innerhalb einiger Wochen zum Tode führen können. Eine Erholung ist je nach Dosis mehr oder weniger wahrscheinlich. Diese akuten Erkrankungen zeigen sehr unterschiedliche Ausprägungen und zeitliche Verläufe. Die Art und die Schwere der Erkrankung hängen von der Strahlendosis, der Dosisverteilung, der Dosisleistung und vom allgemeinen Gesundheitszustand der betroffenen Personen ab. Die Angabe des Schadensausmaßes gestaltet sich deshalb insbesondere für diese frühen Auswirkungen schwierig.

Die folgenden Beispiele somatischer Frühschäden stellen die Bandbreite der gesundheitlichen Beeinträchtigungen dar (zusammengestellt nach <GRS 1981>, <UNSCEAR 1988>, <Leitgeb 1990>, <Lange 1990>, <Ehrhardt 1991>, <ICRP 1991> und <Weibezahn 1992>). Die Daten wurden anhand von Untersuchungen über die Auswirkungen von Unfällen, Atombombenexplosionen und Radiotherapien ermittelt. Es wird in der ausgewerteten Literatur teilweise die Einheit Gray (Gy) und teilweise die Einheit Sievert (Sv) verwendet. Die Originaleinheiten werden hier übernommen.

## - Bestrahlung des Magen-Darm-Trakts

Die ersten spürbaren Reaktionen innerhalb der ersten 48 h nach einer Bestrahlung sind Übelkeit und Erbrechen. Die Wirkungen und der Zeitpunkt des Eintritts der Symptome sind dosisabhängig. Zwischen einer Dosis von 0,5 und 1,5 Gy ist Erbrechen bei etwa 10% der betroffenen Personen zu erwarten. Dosen von 2 Gy führen zu Symptomen bei 50% der Betroffenen nach einer mittleren Latenzzeit von 3 h. Hohe Dosen von 10-50 Gy verursachen Appetitlosigkeit, gesteigerte Lethargie, erhöhte Infektionsanfälligkeit sowie Diarrhö und führen in der Regel zum Tod innerhalb der zweiten Woche nach der Bestrahlung.

### - Bestrahlung des roten Knochenmarks

Als untere Schwelle für das Auftreten nichtstochastischer Frühschäden wird in  $\langle SSK | 1989 \rangle$  eine Dosis von 500 mSv innerhalb von 7 Tagen genannt. Bestrahlungen zwischen 1 und 10 Gy verursachen ein Knochenmarksyndrom mit dosisabhängiger Wirkung und Stärke. Die betroffenen Personen neigen zur erhöhten Infektionsanfälligkeit, verursacht durch Schädigungen des Immunsystems und der Beeinträchtigung der Blutbildung. Unterhalb eine Dosis von 2,3 Sv treten keine Todesfälle auf. Nach Bestrahlungen mit mindestens 4 Sv muß mit 50% Todesfällen innerhalb von 60 Tagen gerechnet werden ( $LD_{50/60}$ -Wert). Oberhalb einer Dosis des roten Knochenmarks von 6 Gy kann kaum noch mit einem Überleben gerechnet werden. Eine intensive ärztliche Behandlung kann die Überlebenswahrscheinlichkeit erhöhen, ist aber aus Kapazitätsgründen auf einen kleinen Personenkreis beschränkt.

## - Bestrahlung der Haut

Die radioaktive Bestrahlung der Haut verursacht Hautrötungen, abnormes Haarwachstum (bei 10% der betroffenen Personen nach einer Bestrahlung mit 0,75 Gy, bei 50% der betroffenen Personen nach einer Bestrahlung mit 1,5 Gy und bei 100% der betroffenen Personen nach einer Bestrahlung mit 2,5 Gy - nach etwa 10 Tagen), Haarausfall (temporär nach 3-5 Gy - permanent nach 7 Gy) sowie leichte Hautverbrennungen. Höhere Strahlendosen als 12 Gy führen zu tieferreichenden Hautschädigungen und Abschuppungen der abgestorbenen Hautzellen.

## - Bestrahlung der Schleimhaut

Die Schädigungen der Schleimhäute im Mund und in den Atemwegen verursachen Entzündungen und Anschwellen mit Geschwürbildung und Absterben von Gewebe hauptsächlich im Wangen- und im Gaumenbereich. Durch lokale Bestrahlungen von 4-5 Gy treten Ödeme nach 4-5 Tagen und Geschwürbildung nach 8-12 Tagen auf. Eine Erholung der Schleimhäute erfolgt nach 2-3 Wochen. Bei einer Dosis von 10-20 Gy erfolgt eine Erholung erst nach 1,5 bis 2 Monaten.

#### - Bestrahlung der Speicheldrüsen

Speicheldrüsen reagieren empfindlich auf radioaktive Bestrahlungen. Nach Dosen über 2,25 Gy erfolgt ein Rückgang der Speichelabgabe bei der Ohrspeicheldrüse, während ab 6 Gy Entzündungen in diesem Organ auftreten. Nach Dosen zwischen 2,4 und 4 Gy treten zunehmend Verluste der Geschmacksempfindung auf.

## - Bestrahlung der Augen

Akute Effekte durch Bestrahlung der Augen sind Hautrötungen der Augenlider nach einer Dosis von 2 Gy oder bei höheren Dosen von 4 bis 10 Gy Bindehautentzündungen nach 20 bis 40 Tagen. Insbesondere bei Strahlung mit hohem linearen Energietransfer kann eine Trübung der Augenlinse (Katarakt) auftreten. Nachweisbare Trübungen werden bereits zwischen Dosen von 0,5 und 2 Sverwartet. Bei einer Dosis von etwa 3 Svertreten Katarakte bei 50% der betroffenen Bevölkerung auf. Der Katarakt kann in seiner Entstehung auch einige Jahre verzögert auftreten.

### - Bestrahlung der Lunge

Schädigungen der Lunge treten nach Bestrahlungen oberhalb von 5 Sv auf. Die Schädigung kann erst 1 bis 3 Monate verzögert sichtbar werden.

#### - Bestrahlung der Keimdrüsen

Männer: Besonders empfindlich reagieren die Hoden auf radioaktive Bestrahlungen. Schon nach einer Dosis von 0,15 Gy (untere Schwelle) kann ein temporärer Rückgang der Spermien nach 46 Tagen auftreten. Nach Bestrahlungen bis zu 1 Gy können nach etwa 10 Wochen die Spermien völlig ausbleiben und eine zeitlich begrenzte Unfruchtbarkeit bewirken. Bei noch höheren Dosen von 1 Gy bis 4 Gy treten zunehmend Fälle dauerhafter Sterilität auf. Oberhalb einer Bestrahlung von 6 Gy zeigen nahezu alle betroffenen Männern eine dauerhafte Unfruchtbarkeit.

Bei Frauen können Dosen zwischen 2,5 und 6 Sv zur Sterilität führen. Ältere Frauen reagieren aufgrund der geringeren Ovarienzahl entsprechend empfindlicher.

## - Wirkungen pränataler Bestrahlungen

Die wahrscheinlichsten Folgen von Entwicklungsstörungen durch pränatale Bestrahlungen sind körperliche und geistige Behinderungen (z.B. Gaumen- und Kiefernspalte, Verminderung des IQ, Down-Syndrom). Erfolgt die Bestrahlung innerhalb der ersten 8 Wochen nach der Befruchtung, so ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten geistiger Behinderungen gering. Die maximale Wahrscheinlichkeit liegt bei Bestrahlungen im Zeitraum zwischen der 8. und 15. Woche nach der Befruchtung. Sie fällt zwischen der 16. und 25. Woche wieder ab, und nach Bestrahlungen ab der 25. Woche wurden für Dosen unterhalb 1 Sv keine Fälle geistiger Behinderung beobachtet. Unter der Annahme einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung ergibt sich eine Eintrittswahrscheinlichkeit für die Fruchtschädigung von 0,4 pro Sv zwischen der 8. und 15. Woche und 0,1 pro Sv zwischen der 16. und 25. Woche nach der Befruchtung.

Neben Schädigungen des ungeborenen Lebens bestehen Gefahren für die Mutter durch die absterbende Frucht. Die Schwellendosis für Mortalität in utero beträgt etwa 0,3 Sv (Dosis des Uterus) bzw. etwa 2 Sv (Knochenmarksdosis). Schwangerschaftsunterbrechungen sind aufgrund der Risiken gegebenenfalls in Betracht zu ziehen.

Die klinischen Frühsymptome nichtstochastischer Strahlenwirkungen auf den Menschen nach kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung lassen sich dosisabhängig wie folgt charakterisieren (<UNSCEAR 1988>, <SSK 1989>, <Leitgeb 1990>):

- Dosisbereich 0,1 bis 0,3 Gy

Das Wohlbefinden wird nicht beeinträchtigt, es kann aber eine vorübergehende geringfügige Veränderung des Blutbildes (Verringerungen der Granulozyten- und Leukozytenzahl) auftreten. Bei Männern kann zeitlich begrenzt die Spermienzahl verringert sein.

### - Dosisbereich 0,3 bis 1 Gy

Nach 2 bis 6 Stunden können vereinzelt Übelkeit, Erbrechen und leichte Abgeschlagenheit auftreten. Es muß damit gerechnet werden, daß sich bestehende bakterielle Infektionen verschlimmern. Bei einigen Personen ist das Auftreten eines vorübergehenden Haarausfalls möglich. Die Spermienzahl bei Männern wird weiter verringert, wobei eine vorübergehende Unfruchtbarkeit möglich ist.

## - Dosisbereich 1 bis 3 Gy

In seltenen Fällen treten bei unbehandelten Patienten Komplikationen auf. Die Sterblichkeitsrate liegt unterhalb 20%. Übelkeit und Erbrechen bei mäßiger Abgeschlagenheit sind die Regel. Weiterhin können kurzzeitige Kopfschmerzen, leichte Hautrötungen und leichte Bindehautentzündungen auftreten. Bei Männern sind vermehrt Fälle von dauerhafter Unfruchtbarkeit zu erwarten, während bei Frauen eher eine temporäre Unfruchtbarkeit auftritt. Die Wahrscheinlichkeit von Fruchtschädigungen im Mutterleib ist so hoch, daß akute Gefahren für Mutter und Kind bestehen.

#### - Dosisbereich 3 bis 6 Gy

Ohne ärztliche Behandlung bestehen nur unsichere Überlebenschancen. Die Sterblichkeitsrate liegt höher als 50%. Aber auch nach einer ärztlichen Behandlung muß mit Todesfällen gerechnet werden. Die Patienten zeigen eine ausgeprägte Abgeschlagenheit mit mehrmaligem starken Erbrechen ab etwa 0,5 bis 2 Stunden nach der Bestrahlung. Die Kopfschmerzen sind in diesem Dosisbereich ständig anwesend. Bindehautentzündungen treten nach 3 bis 6 Stunden, Hautrötungen nach 6 bis 12 Stunden auf. Bei einigen Patienten sind leichte Temperaturerhöhungen zu erwarten. Eine dauerhafte Unfruchtbarkeit tritt in diesem Dosisbereich auch bei Frauen auf.

## - Dosisbereich 6 bis 10 Gy

Die Überlebenschancen sind gering (nahezu 100% Sterblichkeit) und auch nach ärztlicher Behandlung unsicher. Schon nach 10 Minuten setzt häufiges und starkes Erbrechen zusammen mit einer stark ausgeprägten Abgeschlagenheit ein. Das Bewußtsein ist getrübt, begleitet von ständig bohrenden Kopfschmerzen. Hautrötungen und Bindehautentzündungen setzen schon nach 1 bis 6 Stunden ein, leichtes Fieber ist die Regel.

## - Dosisbereich über 10 Gy

Auch nach ärztlicher Behandlung gibt es bei Dosen oberhalb 10 Gy keinerlei Überlebenschance. Schon nach 5 Minuten erfolgt ein unstillbarer Brechreiz. Das Bewußtsein ist benommen, die Kopfschmerzen sind quälend.

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens soll die Zahl von zu erwartenden frühen Todesfällen im meteorologischen Referenzszenario ermittelt werden. Da dieses Referenzszenario keine Niederschläge beinhaltet, ist die Zahl früher Todesfälle wegen der gegenüber einem Szenario mit flächendeckenden Regenfälle weit niedrigeren Gamma-Bodenstrahlung gering.

Die relevanten Expositionen des roten Knochenmarks sind für den Unfallablauf mit hohem Quellterm in den Tabellen 6.10 bis 6.12 aufgelistet, für den Unfallablauf mit Venting und Verhinderung einer Kernschmelze in den Tabellen 6.34 bis 6.36.

Ein Vergleich mit den Berechnungsergebnissen der Dosis des roten Knochenmarks zeigt, daß nur im Unfallablauf mit hohem Quellterm und nur im Sektorabschnitt 11Ba (Entfernung bis 10 km vom Reaktor) eine Überschreitung des unteren Schwellenwerts für frühe Todesfälle zu erwarten ist. In diesem Sektor wohnen auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg nach im Kapitel 5 beschriebenen Auswertungsverfahren insgesamt 315 Personen. Die für den Mittelpunkt des Sektorabschnitts errechnete Dosis des roten Knochenmarks beträgt 2,41 Sv.

Zur Berechnung der frühen Todesfälle wurde folgender Ansatz verwendet:

Die Dosis-Risikobeziehung für nichtstochastische Schäden mit tödlichem Ausgang zeigt eine "S"-förmigen Verlauf. Unterhalb einer Dosisschwelle ist das Individualrisiko gleich Null. Mit steigender Dosis wächst das Risiko rasch an, bis es einen Maximalwert erreicht, bei dem keine Überlebenschancen mehr bestehen. Charak-

terisiert wird diese Abhängigkeit durch die Steigung der Kurve (Zunahme des Risikos pro Gray) und dem  $LD_{50}$ -Wert, also durch die Dosis, bei der eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50% besteht.

Diese Beziehung läßt sich mathematisch durch eine Weibull-Funktion (vergleiche <GRS 1979> und <Ehrhardt 1991>) annähern. Oberhalb eines Schwellenwerts, bei dem die ersten Todesfälle auftreten, wird eine exponentielle Abhängigkeit des Schadensrisikos von der Dosis angenommen.

Wird der Schwellenwert überschritten, wird der funktionale Zusammenhang durch die Funktion

$$R=1-e^{-H}$$

beschrieben.

Es bedeuten:

 $H = \ln 2 \cdot ((D/D_{50})^{V})$ 

R = Individualrisiko für eine bestimmte Schadensart

D = Organdosis

 $D_{50} = LD_{50} = Organdosis mit Tod als Folge in 50% der Fälle$ 

V = Formfaktor, abhängig vom bestrahlten Organ

Multipliziert man das ermittelte Risiko mit der Anzahl der betroffenen Personen, die der zugrundegelegten Dosis ausgesetzt sind, so erhält man die Anzahl der zu erwartenden Todesfälle.

Nach diesen Ansätzen sind für das meteorologische Referenzszenario beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektorabschnitt 11Ba etwa 4 frühe Todesfälle unter der Bevölkerung der Freien und Hansestadt Hamburg zu erwarten.

#### 7.3 Zahl der Spätschäden

Im folgenden Abschnitt wird die Zahl an Spätschäden durch die beiden Unfallabläufe, für die Unfallfolgenberechnungen durchgeführt wurden, untersucht. Es werden dabei als "Spätschäden" nur Fälle von Leukämie und soliden Tumoren mit tödlichem Ausgang bezeichnet. Insbesondere Krebsfälle, die geheilt werden können und nicht zum Tode führen, und genetische Schäden kämen als weitere Gesundheitsschäden hinzu. Die Zahl von Gesundheitsschäden in Form von nicht zum Tode führenden Tumoren ist deutlich höher als die Zahl der Tumoren mit Todesfolge.

Zunächst werden in Kapitel 7.3.1 Dosiswirkungsbeziehungen definiert, die den Schadenszahlberechnungen zugrunde gelegt werden. Die Berechnungsergebnisse der Schadenszahlen folgen für den Unfallablauf mit hohem Quellterm in Kapitel 7.3.2 und für den Unfallablauf mit Venting und Verhinderung einer Kernschmelze in Kapitel 7.3.3.

# 7.3.1 Dosiswirkungsbeziehung bei der Berechnung der Zahl von Spätschäden

Zur Berechnung der Zahl von Spätschäden ist - bei Anwendung einer linearen Dosiswirkungsbeziehung - zunächst die Kollektivdosis der Bevölkerung zu bestimmen. Durch Multiplikation der Wohnbevölkerung eines Sektorabschnitts mit der für den jeweiligen Sektorabschnitt berechneten mittleren Effektiven Dosis läßt sich diese Kollektivdosis in den Sektorabschnitten und im gesamten Gebiet

der Freien und Hansestadt Hamburg ermitteln. Durch Multiplikation der Kollektivdosis mit einem Risikokoeffizienten kann die Zahl zu erwartender somatischer Spätschäden bestimmt werden.

Die heutigen Kenntnisse über Risikokoeffizienten für Spätschäden nach einer Bestrahlung mit ionisierender Strahlung basieren weitgehend auf den Untersuchungen an den Überlebenden der Atombombenabwürfe über Hiroshima und Nagasaki. Ergebnisse der dort durchgeführten Untersuchungen liegen seit langem den Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) und anderer Gremien zugrunde.

Ende der achtziger Jahre mußten die auf den Untersuchungen an den Atombombenüberlebenden basierenden Risikokoeffizienten deutlich nach oben korrigiert werden. Dies hatte seine Ursache in der Dosimetrie und in den beobachteten Fallzahlen. Geringere Strahlenexpositionen ergeben sich in der neuen Dosimetrie (DS86) gegenüber der alten (T65D) durch geringere Neutronenstrahlung, da ursprünglich unzutreffende Annahmen im Hinblick auf das Strahlenfeld einer Atomwaffenzündung getroffen worden waren, und aufgrund einer nun höher bewerteten abschirmenden Wirkung der genüber der Strahlung. Eine einhergehende Erhöhung der Gammastrahlendosis im Freien und höhere Organdosen je Kerma freiin-Luft wiegen die genannten Effekte bei weitem nicht auf. Die beobachteten Spätschäden müssen daher auf geringere Strahlenbelastungen zurückgeführt werden, als dies früher angenommen wurde. Hinzu kommt, daß der lange Beobachtungszeitraum und die weiter gestiegenen Fallzahlen mittlerweile die Beurteilung der altersabhängigen Krebsinzidenz nach einmaliger Bestrahlung erlauben. Für alle Krebsarten außer Leukämie hat sich das "Modell des relativen Risikos" als geeignet erwiesen, für Leukämie das "Modell des

absoluten Risikos". Beim Modell des relativen Risikos wird angenommen, daß nach einmaliger Bestrahlung und nach Verlauf einer gewissen Latenzzeit die spontane und mit dem Alter ansteigende Tumorrate dosisabhängig erhöht ist. Im Modell des absoluten Risikos wird dagegen eine nach einmaliger Bestrahlung und einer Inzidenzzeit ansteigende und dann wieder abfallende zusätzliche Tumorwahrscheinlichkeit angenommen.

Heute ist in der Fachwelt unstrittig, daß eine Strahlenbelastung daher ein höheres Gefahrenpotential hat, als es von der ICRP noch in der Empfehlung Nr. 26 <ICRP 1977>, die Grundlage des überwiegenden Teils nationaler Strahlenschutznormen sind, angenommen wurde.

Die neueren japanischen Untersuchugnen haben zusätzlich weitere Konsequenzen. Die Begründung einer potentiellen Überschätzung durch Extrapolation von hohen Dosen in den Niedrigdosisbereich ist durch die neuen Erkenntnisse zumindest in der alten Weise nicht mehr möglich. In der alten Dosimetrie wurden in Nagasaki (Plutoniumbombe) quadratische Dosis-Wirkungs-Zusammenhänge gefunden und in Hiroshima (Uranbombe) lineare Zusammenhänge. Der lineare Zusammenhang wurde auf die – damals erheblich überschätzte – Neutronenstrahlung zurückgeführt, der quadratische als angemessen für locker ionisierende Gammastrahlung verwendet. Nach den neueren Ergebnissen ist der Kurvenverlauf für beide Städte etwa gleich und eher linear. Reduktionsfaktoren für die Extrapolation in den Niedrigdosisbereich sind daher aus den japanischen Daten nicht mehr ableitbar.

Die größte Zahl der im Rahmen der vorliegenden Studie errechneten Schadenszahlen beruht im übrigen auf Expositionen, die nicht mehr im eigentlichen Niedrigdosisbereich liegen. Es werden daher im vorliegenden Gutachten Risikokoeffizienten nach linearem Ansatz und auch ohne Berücksichtigung eines Dosis-Raten-Effektivitäts-Faktors (DREF), wie er für geringe Dosisleistungen diskutiert wird, verwendet.

Die Zahl der Spätschäden wird anhand von drei verschiedenen Risikokoeffizienten berechnet:

- 5·10<sup>-2</sup>/Personen·Sv: Dieser Wert entspricht der Empfehlung der Internationalen Strahlenschutzkommission in ICRP-60 <ICRP 1991>. Er wird dort für Berechnungen von Spätschäden in einer Gesamtbevölkerung (Mittel über beide Geschlechter und alle Altersstufen) empfohlen.
- 8,85·10<sup>-2</sup>/Personen·Sv: Dieser Wert beruht auf einer Auswertung der Untersuchungen an den Atombombenüberlebenden in Japan durch das vom US-amerikanischen National Research Council eingesetzte BEIR-Committee <BEIR 1990>. Von diesem Committee wird seit vielen Jahren regelmäßig eine Bewertung des Risikos von Spätschäden durch ionisierende Strahlung abgegeben. Der gewählte Risikokoeffizient wird im Bericht BEIR V <BEIR 1990> für eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung und im Mittel über beide Geschlechter und alle Altersstufen begründet.
- 12,0·10<sup>-2</sup>/Personen·Sv: Dieser Wert ist ebenfalls <BEIR 1990> entnommen. Er bezieht sich auf die obere Grenze des 90%-Konfidenzintervall für eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung und im Mittel über beide Geschlechter sowie alle Altersstufen. Konfidenzintervalle (Vertrauensintervalle) existieren bei allen statistischen Untersuchungen. Bei den Untersuchungen der Atombombenüberlebenden wird deren Größe vor allem

durch die geringen Fallzahlen bei den hohen Altersgruppen und die noch laufende Beobachtungszeit bei den jungen Altersgruppen hervorgerufen.

Die hier untersuchten Spätschäden gehören zur Gruppe von Schäden, wie sie aufgrund der Beobachtungen an den Atombombenüberlebenden in Japan seit langem diskutiert und erwartet werden. Aus heutiger Sicht müßten allerdings weitere Schäden erwartet werden, die sich nach dem Unfall in Tschernobyl in der dortigen Bevölkerung abzeichnen. Es handelt sich dabei um verschiedene gesundheitliche Auswirkungen, die zeitlich zwischen den schon seit langem bekannten Früh- und Spätschäden anzusiedeln sind. Eine quantitative Behandlung solcher zusätzlicher Schäden ist allerdings bisher nicht möglich, da noch keine zuverlässigen quantitativen Auswertungen der Gesundheitsfolgen des Unfalls in Tschernobyl vorliegen.

## 7.3.2 Spätschäden beim Unfallablauf mit hohem Quellterm

Für den Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Referenzszenario (ohne Regen) ist in den Tabellen 7.5 bis 7.7 für die Sektoren 10 bis 12 die Zahl errechneter Spätschäden wiedergegeben. Den Berechnungen liegt die mittlere Effektive Dosis Erwachsener aus Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) in einem Sektorabschnitt zugrunde. Belastungen durch eine Aufnahme von Radionukliden mit der Nahrung sind nicht berücksichtigt, ebenfalls keine dosisreduzierenden Maßnahmen wie ein Aufenthalt in geschlossenen Räumen.

Tabelle 7.6: Zahl somatischer Spätschäden mit tödlichem Ausgang beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 11

Sektor- ab- schnitt	Wohnbevöl- kerung*	Zal <icrp 1991=""></icrp>	hl der Todesfä   <beir   mittel</beir 	lle <b>**</b> 1990> hoch
11Aa 11Ab 11Ac 11Ad 11Ae 11Af 11Ag 11Ah 11Ai	504 2053 5153 3520 29210 14253 31443 37125 12782	51 105 150 65 373 133 223 210 58	91 185 265 115 659 236 395 371	123 251 359 156 894 319 536 503 139
11Ba 11Bb 11Bc 11Bd 11Be 11Bf 11Bf 11Bg 11Bh 11Bi	311 9698 34113 25932 69549 197568 166610 72011 7718	246 2435 5250 2704 5311 11462 7671 2677 239	262 4309 9292 4785 9400 20288 13578 4739 423	311 5843 12599 6489 12746 27509 18411 6426 574
11Ca 11Cb 11Cc 11Cd 11Ce 11Cf 11Cg 11Ch	15 1038 14314 42605 124406 181343 78206 21355	2 53 416 788 1587 1693 556 121	3 94 736 1395 2809 2997 984 214	4 127 998 1891 3808 4064 1334 290

Die Zahl von zu erwartenden Frühschäden wurde gegebenenfalls abgezogen
Zur Definition der zugrunde gelegten Dosiswirkungsbezieh neschulz ungen siehe Text

Billstraße 84

Tabelle 7.7: Zahl somatischer Spätschäden mit tödlichem Ausgang beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 12

Sektor- ab- schnitt	Wohnbevöl- kerung*	Zal <icrp 1991=""></icrp>	hl der Todesfä   <beir   mittel</beir 	lle** 1990>   hoch
12Ad 12Ae 12Af 12Ag 12Ah	3851 78006 87581 57999 1876	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
12Be 12Bf 12Bg 12Bh	28313 20216 10263 329	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
12Cg	632	0	0	0

<sup>\*</sup> Die Zahl von zu erwartenden Frühschäden wurde gegebenenfalls abgezogen

Zur Definition der zugrunde gelegten Dosiswirkungsbeziehungen siehe Text

Mögliche Einflüsse von dosisreduzierenden Maßnahmen auf die Strahlenbelastung werden in Kapitel 7.1.4 diskutiert, am Ende des vorliegenden Kapitels im Hinblick auf die Zahl von Spätschäden. Die erwarteten Spätschäden beschränken sich auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg auf den Sektor 11, das heißt auf den 30°-Sektor in Ausbreitungsrichtung.

In diesem Sektor wohnen auf Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg nach im Kapitel 5 beschriebenen Auswerteverfahren insgesamt 1.182.835 Personen. Die Zahl zu erwartender später Todesfälle beläuft sich in diesem Personenkollektiv und im meteorologischen Referenzszenario (ohne Regen) auf

- 44.579 (3,77% der Bewohner) bei der Dosiswirkungsbeziehung nach <ICRP 1991>,
- 78.728 (6,66% der Bewohner) bei der Dosiswirkungsbeziehung nach <BEIR 1990> (mittlerer Wert), und

- 106.704 (9,02% der Bewohner) bei der Dosiswirkungsbeziehung nach <BEIR 1990> (oberer Wert des 90%-Konfidenzintervalls).

Die genannten Schadenszahlen basieren alleine auf der Dosis durch Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage. Ein weiterer Aufenthalt in den betroffenen Gebieten würde zu einer höheren Dosis durch Gamma-Bodenstrahlung und damit zu höheren Schadenszahlen führen. Ebenso würde ein Verzehr kontaminierter Nahrungsmittel die Zahl von Spätschäden erhöhen.

Schutz- und Gegenmaßnahmen und deren Effizienz wurden in Kapitel 7.1.4 diskutiert. Eine Reduzierung der Schadenszahlen um mehr als einen Faktor 2 durch Schutz- und Gegenmaßnahmen kann realistisch nicht erwartet werden.

## 7.3.3 Spätschäden beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze

Für den Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im meteorologischen Referenzszenario (ohne Regen) ist in den Tabellen 7.8 bis 7.10 für die Sektoren 10 bis 12 die Zahl errechneter Spätschäden wiedergegeben. Den Berechnungen liegt die mittlere Effektive Dosis Erwachsener in einem Sektorabschnitt aus Gamma-Submersion, Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage und Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) zugrunde. Belastungen durch eine Aufnahme von Radionukliden mit der Nahrung sind nicht berücksichtigt, ebenfalls keine dosisreduzierenden Maßnahmen wie ein Aufenthalt in geschlossenen Räumen.

Tabelle 7.8: Zahl somatischer Spätschäden mit tödlichem Ausgang beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 10

Sektor- ab- schnitt	Wohnbevöl- kerung*	Zal <icrp 1991=""></icrp>	hl der Todesfä   <beir   mittel</beir 	lle** 1990> hoch
10Ab 10Ac	599 57	0 0	0 0	0 0
10Bb 10Bc 10Bd 10Be 10Bf 10Bg	2048 1930 6 9575 12249 1723	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0
10Ca 10Cb 10Cc 10Cd 10Ce 10Cf 10Cg 10Ch	254 2030 3686 1424 43682 34007 31281 8014	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0

Da keine Frühschäden zu erwarten sind, braucht die Wohnbe-völkerung nicht um deren Zahl reduziert zu werden Zur Definition der zugrunde gelegten Dosiswirkungsbezieh-

ungen siehe Text

Tabelle 7.9: Zahl somatischer Spätschäden mit tödlichem Ausgang beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 11

Sektor- ab- schnitt	Wohnbevöl- kerung*	Zal <icrp 1991=""></icrp>	nl der Todesfä   <beir   mittel</beir 	lle** 1990> hoch
11Aa	504	0,07	0,13	0,17
11Ab	2053	0,10	0,18	0,24
11Ac	5153	0,13	0,24	0,32
11Ad	3520	0,06	0,10	0,14
11Ae	29210	0,31	0,55	0,75
11Af	14253	0,11	0,19	0,26
11Ag	31443	0,17	0,30	0,41
11Ah	37125	0,15	0,27	0,37
11Ai	12782	0,04	0,07	0,10
11Ba	315	0,18	0,31	0,42
11Bb	9698	2,03	3,60	4,88
11Bc	34113	4,25	7,52	10,20
11Bd	25932	2,21	3,92	5,31
11Be	69549	4,30	7,61	10,32
11Bf	197568	9,17	16,22	22,00
11Bf	166610	5,94	10,52	14,27
11Bh	72011	2,03	3,59	4,87
11Bi	7718	0,18	0,31	0,43
11Ca	15	0	0	0,01
11Cb	1038	0,05	0,09	0,12
11Cc	14314	0,37	0,65	0,89
11Cd	42605	0,69	1,22	1,65
11Ce	124406	1,33	2,36	3,20
11Cf	181343	1,36	2,42	3,28
11Cg	78206	0,42	0,75	1,02
11Ch	21355	0,09	0,16	0,21

<sup>\*</sup> Da keine Frühschäden zu erwarten sind, braucht die Wohnbevölkerung nicht um deren Zahl reduziert zu werden

\*\* Zur Definition der zugrunde gelegten Dosiswirkungsbeziehungen siehe Text

Tabelle 7.10: Zahl somatischer Spätschäden mit tödlichem Ausgang beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze im Sektor 12

Sektor- ab- schnitt	Wohnbevöl- kerung*	kerung* <icrp 1991=""> <beir 1990=""></beir></icrp>		lle <b>**</b> 1990> hoch
12Ad	3851	0	0	0
12Ae	78006	0	0	0
12Af	87581	0	0	0
12Ag	57999	0	0	0
12Ah	1876	0	0	0
12Be	28313	0	0	0
12Bf	20216	0	0	0
12Bg	10263	0	0	0
12Bh	329	0	0	0
12Cg	632	0	0	О

<sup>\*</sup> Da keine Frühschäden zu erwarten sind, braucht die Wohnbevölkerung nicht um deren Zahl reduziert zu werden

Die erwarteten Spätschäden beschränken sich auch beim Unfallablauf mit Venting und verhinderter Kernschmelze auf dem Gebiet der
Freien und Hansestadt Hamburg auf den Sektor 11, das heißt auf
den 30°-Sektor in Ausbreitungsrichtung. Die zu erwartende Zahl
von Schäden ist in vielen Fällen als deutlich unterhalb dem Wert
"1" angegeben. Das bedeutet, daß im jeweiligen Sektorabschnitt
auch ein einzelner später Todesfall nur mit geringer Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist.

Die Zahl zu erwartender später Todesfälle beläuft sich im untersuchten Personenkollektiv auf

- etwa 36 bei der Dosiswirkungsbeziehung nach <ICRP 1991>,
- etwa 63 bei der Dosiswirkungsbeziehung nach <BEIR 1990> (mittlerer Wert), und

<sup>\*\*</sup> Zur Definition der zugrunde gelegten Dosiswirkungsbeziehungen siehe Text

- etwa 86 bei der Dosiswirkungsbeziehung nach <BEIR 1990> (oberer Wert des 90%-Konfidenzintervalls).

Den genannten Schadenszahlen liegt alleine die Dosis durch Gamma-Submersion, Inhalation (50-Jahre-Folgedosis) und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage zugrunde. Ein weiterer Aufenthalt in den betroffenen Gebieten – wie er beim Unfallablauf mit Venting und Verhinderung eines Kernschmelzens auch anzunehmen ist – würde zu einer höheren Dosis durch Gamma-Bodenstrahlung und damit zu höheren Schadenszahlen führen. Ebenso führt der Verzehr kontaminierter Nahrungsmittel zu einer höheren Zahl von Spätschäden.

#### 7.4 Nutzbarkeit kontaminierter Gelände

Einschränkungen der Nutzbarkeit kontaminierter Gelände können aus

- zu hohen Ortsdosisleistungen,
- zu hohen Dosen bei Nahrungsmittelproduktion, und
- zu hohen Dosen beim Aufenthalt durch Inhalation remobilisierter lpha-Strahler (Resuspension)

resultieren.

Eine Untersuchung des gesamten Spektrums möglicher Einschränkungen und gegebenenfalls möglicher Schutzmaßnahmen kann im Rahmen des vorliegenden Gutachtens nicht erfolgen.

Eine Bewertung der in Kapitel 6 berechneten Kontaminationen erfolgt hier anhand folgender ausgewählter Kriterien:

#### - Ortsdosisleistung

Würde eine Ortsdosisleistung von 5 mSv pro Jahr in einem kontaminiertem Gebiet überschritten, so soll dieses Gebiet unter keinen Bedingungen zur weiteren Nutzung freigebbar sein. Es kämen auch deutlich niedrigere Grenzwerte für die Beurteilung der weiteren Nutzbarkeit in Betracht; aus dem Umgang mit den großen kontaminierten Gebieten aus dem Uranabbau in Sachsen und Thüringen durch offizielle Stellen ist aber ableitbar, daß nach einer realen Unfallsituation erst bei Dosisleistungen in dieser Größenordnung offiziell Aufenthaltseinschränkungen empfohlen werden.

Für die Berechnung der Ortsdosisleistung sind alle Gammastrahler zu berücksichtigen. Normiert auf die Cäsium-137-Kontamination beim Unfallablauf mit hohem Quellterm entspricht eine Ortsdosisleistung von 5 mSv/a (für die Summe aller Gammastrahler) einer Cäsium-137-Kontamination in den Tabellen 6.16 bis 6.18 (unter Berücksichtigung der Abwitterung) von 8,8·10<sup>4</sup> Bq/m<sup>2</sup>  $2.8 \cdot 10^5$  Bq/m<sup>2</sup> Jahr, nach nach einem 10 Jahren sowie  $3.2 \cdot 10^5$  Bq/m<sup>2</sup> nach 30 und 50 Jahren. Die Zunahme der auf Cäsium-137 normierten Kontamination ergibt sich daraus, daß der größte Teil der Gammastrahler deutlich kürzere Halbwertszeiten aufweist als Cäsium-137. Der relative Beitrag der übrigen Gammastrahler zur Ortsdosisleistung ist daher über die Zeit rückläufig.

## - Nahrungsmittelproduktion

In <Öko-Institut 1989b> wurden Kriterien für die Nutzung von Kleingärten zur Erzeugung von pflanzlichen Produkten, Lamm-fleisch, Schaffleisch, Ziegenfleisch, Hühnerfleisch und Hühner-

eiern entwickelt. Auf die Situation der Freien und Hansestadt Hamburg können diese Kriterien übertragen werden. Es kann von einer Nutzungsbeschränkung für Kleingärten oder landwirtschaftliche Flächen mit vergleichbaren Produkten ausgegangen werden, wenn die Bodenkontamination mit Cäsium-137 nach den Tabellen einen Wert von 2,7·10<sup>5</sup> Bq/m² übersteigt. Um auch andere langlebige Radionuklide (z.B. Strontium-90) zu berücksichtigen, wird der Grenzwert hier auf 1,25·10<sup>5</sup> Bq/m² reduziert. Dieser Wert soll die Einhaltung der Grenzwerte des § 45 Strahlenschutzverordnung gewährleisten.

Der genannte Grenzwert enthält keine Abwitterung. Er ist dann überschritten, wenn in den Tabellen 6.16 bis 6.18 – mit Berücksichtigung der Abwitterung auf befestigten Flächen – die Kontamination nach einem Jahr  $1,5\cdot 10^4$  Bq/m<sup>2</sup> übersteigt.

## - Resuspension

Einen Überblick über die zeitabhängige und zivilisatorisch unbeeinflußte Remobilisierung abgelagerter  $\alpha$ -Strahler gibt <Linsley 1983>. Längerfristig ist mit einem Resuspensionsfaktor von  $10^{-9}$  1/m zu rechnen. Der Resuspensionsfaktor gibt das Verhältnis der über dem Boden in der Luft befindlichen Aktivität (Bq/m³) zur am Boden abgelagerten Aktivität (Bq/m²) an. Eine Effektive Dosis durch Resuspension von 5 mSv pro Jahr würde beim Aufenthalt in einem Gebiet überschritten, das eine Aktivität von mehr als  $1,4\cdot 10^6$  Bq/m² der in den Tabellen 6.19 bis 6.21 aufgelisteten  $\alpha$ -Strahler aufweist. Ein solches Gebiet wäre nicht nutzbar.

In einem Gebiet, das mit mehr als 6 Bq/m² der in den Tabellen 6.19 bis 6.21 aufgelisteten  $\alpha$ -Strahler kontaminiert ist, wäre eine mit verstärkter Remobilisierung (Resuspensionsfaktor  $10^{-3}$  1/m) - beispielsweise durch Verkehr, Personenbewegungen etc. - verbundene Tätigkeit nicht mehr möglich.

Eine Auswertung der Tabellen 6.16 bis 6.21 im Hinblick auf die genannten Grenzwerte zeigt Tabelle 7.11. Dort sind sowohl die von Einschränkungen betroffenen Sektorabschnitte zeitabhängig aufgeführt als auch die jeweils betroffenen Flächen des Gebiets der Freien und Hansestadt Hamburg angegeben.

Tabelle 7.1	Tabelle 7.11: Nutzbarkeitsbeschränkungen auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Referenz-szenario (Sektorabschnitte mit Beschränkungen)					
10°-Sektor	Sektorab- schnitte nach 1 a	Sektorab- schnitte nach 10 a	Sektorab- schnitte nach 30 a	Sektorab- schnitte nach 50 a		
Zl	ı hohe Ortsdos	sisleistungen	beim Aufentha	alt		
11A 11B 11C	a bis d a bis i a bis d (≈ 250 km²)	a a bis i a (≈ 180 km²)	a a bis f a (≈ 110 km <sup>2</sup> )	a bis d (≈ 60 km²)		
fi	ir Nahrungsmit	telerzeugung	nicht geeigne	et		
11A 11B 11C	a bis i a bis i a bis h (≈ 480 km²)	a bis i a bis i a bis h ( $\approx$ 480 km <sup>2</sup> )	a bis g a bis i a bis g (≈ 410 km²)	a bis f a bis i a bis f (≈ 350 km²)		
zu hohe Resuspension bei zivilisatorischen Einflüssen						
11A 11B 11C	a bis h a bis i a bis h (≈ 460 km²)	a bis g a bis i a bis g (≈ 410 km²)	a bis g a bis i a bis g ( $\approx$ 410 km <sup>2</sup> )	a bis g a bis i a bis g (≈ 410 km²)		

Die Ausdehnung der von Nutzungseinschränkungen betroffenen Gebiete der Freien und Hansestadt Hamburg (Gesamtfläche: 747,5 km²) beim Unfallablauf mit hohem Quellterm, die in Tabelle 7.11 aufgelistet sind, ist sehr umfangreich:

- Aufgrund hoher Ortsdosisleistung kann eine Fläche von etwa  $250~{\rm km}^2$  nach einem Jahr und etwa  $60~{\rm km}^2$  nach 50 Jahren nicht genutzt werden.
- Eine Fläche von etwa 480 km<sup>2</sup> nach einem Jahr und etwa 350 km<sup>2</sup> nach 50 Jahren ist nicht mehr für die Nahrungsmittelproduktion verwendbar.
- Auf einer Fläche von etwa 460 km<sup>2</sup> nach einem Jahr und etwa 410 km<sup>2</sup> nach 50 Jahren wäre bei zivilisatorischen Einflüssen (Straßenverkehr etc.) die Remobilisierung radioaktiver Partikel zu groß.

Diese Flächenangaben beziehen sich auf das meteorologische Referenzszenario, in dem es zu keinen Niederschlägen während der Ausbreitung der radioaktiven Wolke kommt. Bei Niederschlägen können am Ort dieser Niederschläge um zwei Größenordnungen höhere Kontaminationen auftreten.

Andererseits ist in gewissem Umfang eine Dekontamination möglich. Aussagen zu Dekontaminationstechniken und deren Effektivität sind beispielsweise in <IAEA 1989> zusammengestellt.

Es sind eine Reihe von Dekontaminationstechniken eingeführt, die allerdings meist bei der Stillegung kerntechnischer Anlagen eingesetzt wurden und für eine großflächige Anwendung aus Kostengründen nicht in Frage kommen. Größerflächige Dekontaminationsarbeiten wurden in der Vergangenheit überwiegend bei durch Atomwaffenfallout kontaminierten Gebieten durchgeführt. Die Partikelgröfen

Ben des Atomwaffenfallouts sind aber meist sehr viel größer als  $10~\mu\mathrm{m}$  und diese Partikel sind damit leichter entfernbar als die Partikel nach einem Kernkraftwerksunfall, die Größen von wenigen  $\mu\mathrm{m}$  aufweisen.

Bei den erforderlichen Apparaturen zur Dekontamination stellt sich auch die Frage nach deren kurzfristiger Verfügbarkeit in großer Zahl, wenn sie nach einem Kernkraftwerksunfall in einer Großstadt eingesetzt werden sollen.

Zu dekontaminieren wären im wesentlichen:

- Gebäude (Oberflächen aus Stein, Beton, Holz, Metall, Kunststoff etc.),
- Dächer (Oberflächen aus Beton, Ziegel etc.),
- Straßen (Oberflächen aus Asphalt, Beton, Steinpflaster etc.),
- Fahrzeuge, Maschinen etc.,
- Grünanlagen, Gärten etc.

Es handelt sich dabei um die verschiedenartigsten zu dekontaminierenden Oberflächen, die auch hinsichtlich ihres Erhaltungszustands (glatt, brüchig, rostig etc.) stark variieren. Die Effektivität einer Dekontamination eines städtischen Gebiets hängt dabei von den am schwierigsten zu reinigenden Bereichen ab, da daraus mittelfristige Querkontaminationen durch meteorologische, zivilisatorische und biologische Einflüsse resultieren können.

Als Dekontaminationsfaktor DF wird das Verhältnis der Oberflächenkontamination chenkontamination vor einer Maßnahme zur Oberflächenkontamination nach Durchführung der Maßnahme definiert. Übliche Geräte der Straßenreinigung erreichen bei den bei Kernkraftwerksunfällen zu erwartenden Partikelgrößen ein DF von weniger als 1,2 (weniger als 15% der Aktivität können entfernt werden). Mit aufwendigen Sonderausrüstungen könnten günstigenfalls DF von 10 erreicht wer-

den. Dabei ist allerdings zu bedenken, daß die Dekontaminierbarkeit mit der Zeit durch das Eindringen radioaktiver Partikel in
die Oberflächenstrukturen abnimmt. Geräte, die nicht in kurzer
Zeit zur Verfügung stehen, können dann nur noch eingeschränkte
Wirksamkeit entfalten.

In großer Zahl würden nach einem Unfall zunächst Wasserspritzen der Feuerwehr zur Verfügung stehen. Bei der Dekontamination von Straßen in einem in Dänemark durchgeführten Versuch, bei dem Cäsium-134, Rubidium-86 und Ruthenium-103 gelöst aufgetragen worden waren, war für einmaliges Spritzen ein DF von maximal 2 erreichbar, nach 30 bis 40 Tagen war Rubidium praktisch nicht mehr entfernbar und für Ruthenium wurde zeitunabhängig ein DF von 1,2 ermittelt. Für Cäsium-137 auf Dächern ist mit Feuerwehrspritzen ein DF von 2 gefunden worden <IAEA 1989>.

Der Einsatz von Feuerwehrspritzen ist bei glatten Flächen relativ gut geeignet, sonst wenig effektiv. Problematisch ist, daß beim Abspritzen von Dächern die radioaktiven Wässer entweder aufgefangen werden müssen oder in Gebäudenähe den Boden verstärkt kontaminieren. Dies kann zu höheren Belastungen der Bewohner führen, als sie ohne diese Maßnahme auftreten würden.

Für Hochdruckwasserspritzen (2800 bis 4900 kPa) wurden Dekontaminationsfaktoren von etwa 10 für Asphaltflächen und etwa 4 bis 40 für Betonflächen bestimmt <IAEA 1989>.

Eine Dekontamination von Grünflächen in Städten könnte in einem Umpflügen von Gelände und Abholzen von Bäumen und Sträuchern bestehen. Die Kontamination von Grünflächen kann – bezogen auf die Grundfläche – nach einem Unfall 10fach höher sein als die Kontamination von Gebäuden und Dächern. Im Hinblick auf eine Nutzbarkeit zur Nahrungsmittelproduktion werden Maßnahmen wie Pflügen,

Auftragen von unkontaminiertem Boden oder Abtragen von kontaminiertem Boden eine wirtschaftliche Nutzbarkeit kaum wiederherstellen, da die Produkte auf Akzeptanzprobleme bei den potentiellen Abnehmern stoßen würden.

Im folgenden wird die Größe der Gebiete bestimmt, die auch bei Dekontaminationsmaßnahmen nicht weiter nutzbar sein werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die in Kapitel 6 errechneten Kontaminationen mit Cäsium-137 und  $\alpha$ -Strahlern bereits die normalen Abwitterungseffekte berücksichtigt haben. Im Hinblick auf Ortsdosisleistung langfristig vor allem durch Cäsium-137 verursacht - kann von einem effektiven DF von etwa 5 ausgegangen werden. Im Hinblick auf die Nahrungsmittelproduktion - die im übrigen im Untersuchungsgebiet nur eine untergeordnete Rolle spielt - ist auch nach Dekontaminationsmaßnahmen eine Vermarktung kaum möglich, so daß keine Reduzierung der für die Nahrungsmittelproduktion ungeeigneten Flächen durch Dekontaminationsmaßnahmen angenommen wird. Im Hinblick auf die Resuspension wird ein DF von 10 zugrunde gelegt, da die für die Resuspension entscheidende remobilisierbare Fraktion der Ablagerungen nicht nur durch Dekontamination, sondern auch durch Fixierung oder Abdeckung unwirksam gemacht werden kann.

Die Gebiete, deren Nutzung nach Dekontamination mit den oben genannten Dekontaminationsfaktoren dennoch eingeschränkt ist, sind in Tabelle 7.12 aufgelistet. Beim Unfallablauf mit Venting und Verhinderung einer Kernschmelze sind im meteorologischen Referenzszenario keinerlei Nutzungseinschränkungen auf Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg zu erwarten.

Tabelle 7.12: Nutzbarkeitsbeschränkungen auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im meteorologischen Referenz- szenario; unter Berücksichtigung von Dekontamina- tionsmaßnahmen (Sektorabschnitte mit Beschrän- kungen)					
10°-Sektor	Sektorab- schnitte nach 1 a	Sektorab- schnitte nach 10 a	Sektorab- schnitte nach 30 a	Sektorab- schnitte nach 50 a	
Zl	ı hohe Ortsdos	sisleistungen	beim Aufentha	alt	
11A 11B 11C	a a bis h a (≈ 160 km²)	a bis c (≈ 20 km²)	a (≈ 4 km²)	a (≈ 4 km²)	
fi	ir Nahrungsmit	telerzeugung	nicht geeigne	et	
11A 11B 11C	a bis i a bis i a bis h (≈ 480 km²)	a bis i a bis i a bis h ( $\approx 480 \text{ km}^2$ )	a bis g a bis i a bis g (≈ 410 km²)	a bis f a bis i a bis f (≈ 350 km <sup>2</sup> )	
zu hohe Resuspension bei zivilisatorischen Einflüssen					
11A 11B 11C	a bis b a bis i a bis b (≈ 190 km²)	a bis b a bis i a bis b (≈ 190 km²)	a a bis i a (≈ 180 km²)	a a bis i a $(\approx 180 \text{ km}^2)$	

Der bereits in Kapitel 7.1.3 diskutierte vom Betreiber zukünftig beabsichtigte Einsatz von MOX-Brennelementen im KKW Krümmel wirkt sich auf die Bodenkontamination nach Unfällen und den Umfang notwendiger Nutzungseinschränkungen aus. Wichtigster Aspekt ist wegen des bei Einsatz von MOX-Brennelementen höheren Plutonium- und Americium-Inventars die Nutzungseinschränkung aufgrund zu hoher Dosen durch Resuspension der langlebigen  $\alpha$ -Strahler. In den Ta-

bellen 7.13 bis 7.18 sind die Kontaminationen mit  $\alpha$ -strahlendem Plutonium und Americium-241 für das meteorologische Referenzszenario und den Unfallablauf mit hohem Quellterm aufgelistet.

Tabelle 7.13: Bodenkontamination mit  $\alpha$ -Plutonium Pu-238, Pu-239 und Pu-240 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns und bei Einsatz von MOX-Brennelementen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 10 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
10Ab	5,72E-18	5,49E-18	4,53E-18
10Ac	1,44E-19	1,37E-19	1,14E-19
10Bb	2,96E-7	2,82E-7	2,33E-7
10Bc	3,89E-8	3,71E-8	3,07E-8
10Bd	7,80E-9	7,46E-9	6,17E-9
10Be	2,04E-9	1,94E-9	1,60E-9
10Bf	6,40E-10	6,11E-10	5,06E-10
10Bg	2,33E-10	2,23E-10	1,84E-10
10Ca 10Cb 10Cc 10Cd 10Ce 10Cf 10Cg 10Ch	1,30E+0 2,97E-1 9,93E-2 4,14E-2 2,00E-2 1,07E-2 6,23E-3 3,85E-3	1,24E+0 2,84E-1 9,48E-2 3,96E-2 1,91E-2 1,03E-2 5,95E-3 3,68E-3	1,03E+0 2,34E-1 7,85E-2 3,27E-2 1,58E-2 8,47E-3 4,93E-3 3,04E-3

Tabelle 7.14: Bodenkontamination mit  $\alpha$ -Plutonium Pu-238, Pu-239 und Pu-240 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns und bei Einsatz von MOX-Brennelementen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 11 (in Bq/m²)

	1, ,		,
Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum   10 a	50 a
11Aa 11Ab 11Ac 11Ad 11Ae 11Af 11Ag 11Ah 11Ai	8,42E+2 3,73E+2 2,00E+2 1,23E+2 8,19E+1 5,78E+1 4,28E+1 3,28E+1 2,59E+1	8,08E+2 3,56E+2 1,91E+2 1,17E+2 7,80E+1 5,52E+1 4,09E+1 3,14E+1 2,47E+1	6,68E+2 2,95E+2 1,58E+2 9,71E+1 6,45E+1 4,56E+1 3,38E+1 2,59E+1 2,04E+1
11Ba 11Bb 11Bc 11Bd 11Be 11Bf 11Bg 11Bh 11Bi	6,28E+3 3,41E+3 2,13E+3 1,46E+3 1,08E+3 8,30E+2 6,62E+2 5,44E+2 4,56E+2	6,00E+3 3,26E+3 2,03E+3 1,40E+3 1,03E+3 7,91E+2 6,34E+2 5,19E+2 4,35E+2	4,95E+3 2,69E+3 1,68E+3 1,16E+3 8,47E+2 6,56E+2 5,24E+2 4,29E+2 3,60E+2
11Ca 11Cb 11Cc 11Cd 11Ce 11Cf 11Cg 11Ch	8,42E+2 3,73E+2 2,00E+2 1,23E+2 8,19E+1 5,78E+1 4,28E+1 3,28E+1	8,08E+2 3,56E+2 1,91E+2 1,17E+2 7,80E+1 5,52E+1 4,09E+1 3,14E+1	6,68E+2 2,95E+2 1,58E+2 9,71E+1 6,45E+1 4,56E+1 3,38E+1 2,59E+1

Janouro Janouro

Tabelle 7.15: Bodenkontamination mit  $\alpha$ -Plutonium Pu-238, Pu-239 und Pu-240 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns und bei Einsatz von MOX-Brennelementen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 12 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
12Ad	4,14E-2	3,96E-2	3,27E-2
12Ae	2,00E-2	1,91E-2	1,58E-2
12Af	1,07E-2	1,03E-2	8,47E-3
12Ag	6,23E-3	5,95E-3	4,93E-3
12Ah	3,85E-3	3,68E-3	3,04E-3
12Be	2,04E-9	1,94E-9	1,60E-9
12Bf	6,40E-10	6,11E-10	5,06E-10
12Bg	2,33E-10	2,23E-10	1,84E-10
12Bh	9,37E-11	8,98E-11	7,41E-11
12Cg	1,29E-23	1,23E-23	1,02E-23

Tabelle 7.16: Bodenkontamination mit Americium-241 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns und bei Einsatz von MOX-Brennelementen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 10 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
10Ab	8,62E-19	2,89E-18	5,83E-18
10Ac	2,16E-20	7,27E-20	1,47E-19
10Bb	4,43E-8	1,48E-7	2,99E-7
10Bc	5,83E-9	1,95E-8	3,94E-8
10Bd	1,17E-9	3,91E-9	7,89E-9
10Be	3,07E-10	1,02E-9	2,08E-9
10Bf	9,64E-11	3,23E-10	6,52E-10
10Bg	3,50E-11	1,17E-10	2,37E-10
10Ca	1,95E-1	6,56E-1	1,32E+0
10Cb	4,47E-2	1,50E-1	3,02E-1
10Cc	1,49E-2	4,98E-2	1,00E-1
10Cd	6,21E-3	2,08E-2	4,19E-2
10Ce	2,99E-3	1,00E-2	2,02E-2
10Cf	1,61E-3	5,40E-3	1,09E-2
10Cg	9,38E-4	3,14E-3	6,32E-3
10Ch	5,76E-4	1,93E-3	3,89E-3

Tabelle 7.17: Bodenkontamination mit Americium-241 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns und bei Einsatz von MOX-Brennelementen beim Unfallablauf mit höhem Quellterm im Sektor 11 (in Bq/m²)

			100
Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	Sillstant film tans
11Aa 11Ab 11Ac 11Ad 11Ae 11Af 11Ag 11Ah	1,26E+2 5,61E+1 3,01E+1 1,84E+1 1,23E+1 8,69E+0 6,42E+0 4,92E+0 3,88E+0	4,23E+2 1,88E+2 1,01E+2 6,16E+1 4,11E+1 2,91E+1 2,15E+1 1,65E+1 1,30E+1	8,54E+2 3,79E+2 2,03E+2 1,24E+2 8,29E+1 5,87E+1 4,33E+1 3,32E+1 2,62E+1
11Ba 11Bb 11Bc 11Bd 11Be 11Bf 11Bf 11Bg 11Bh 11Bi	9,39E+2 5,13E+2 3,20E+2 2,20E+2 1,62E+2 1,25E+2 9,96E+1 8,16E+1 6,84E+1	3,14E+3 1,72E+3 1,07E+3 7,33E+2 5,41E+2 4,18E+2 3,33E+2 2,73E+2 2,28E+2	6,35E+3 3,46E+3 2,16E+3 1,48E+3 1,09E+3 8,43E+2 6,73E+2 5,52E+2 4,61E+2
11Ca 11Cb 11Cc 11Cd 11Ce 11Cf 11Cf 11Cg 11Ch	1,26E+2 5,61E+1 3,01E+1 1,84E+1 1,23E+1 8,69E+0 6,42E+0 4,92E+0	4,23E+2 1,88E+2 1,01E+2 6,16E+1 4,11E+1 2,91E+1 2,15E+1 1,65E+1	8,54E+2 3,79E+2 2,03E+2 1,24E+2 8,29E+1 5,87E+1 4,33E+1 3,32E+1

Tabelle 7.18: Bodenkontamination mit Americium-241 nach verschiedenen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Abwitterns und bei Einsatz von MOX-Brennelementen beim Unfallablauf mit hohem Quellterm im Sektor 12 (in Bq/m²)

Sektorabschnitt	1 a	Zeitraum 10 a	50 a
12Ad 12Ae 12Af 12Ag 12Ah	6,21E-3 2,99E-3 1,61E-3 9,38E-4 5,76E-4	2,08E-2 1,00E-2 5,40E-3 3,14E-3 1,93E-3	4,19E-2 2,02E-2 1,09E-2 6,32E-3 3,89E-3
12Be 12Bf 12Bg 12Bh	3,07E-10 9,64E-11 3,50E-11 1,41E-11	1,02E-9 3,23E-10 1,17E-10 4,71E-11	2,08E-9 6,52E-10 2,37E-10 9,52E-11
12Cg	1,93E-24	6,50E-24	1,31E-23

Ein Vergleich der beim Quellterm mit Einsatz von MOX-Brennelementen resultierenden Nutzungseinschränkungen durch zu hohe Resuspension bei zivilisatorischen Einflüssen mit den entsprechenden Einschränkungen im Fall ohne MOX-Einsatz ergibt, daß nach einem Jahr statt etwa  $460~\rm{km}^2$  (siehe Tabelle 7.11) etwa  $480~\rm{km}^2$  nicht zu nutzen sind. Nach 10, 30 und 50 Jahren erhöht sich die nicht nutzbare Fläche von etwa  $410~\rm{km}^2$  auf  $460~\rm{km}^2$ .

Werden Dekontaminationsmaßnahmen berücksichtigt, so ist für den Zeitraum von einem Jahr bis zu 50 Jahren eine Fläche von insgesamt etwa 300 km² in seiner Nutzbarkeit eingeschränkt. Im Fall ohne Einsatz von MOX-Brennelementen betrug diese Fläche etwa 190 km² nach einem Jahr und nach 10 Jahren sowie etwa 180 km² nach 30 und 50 Jahren. Die Größe der Fläche mit eingeschränkter Nutzbarkeit erhöht sich daher durch einen Einsatz von MOX-Brennelementen deutlich.

## VIII - 1

#### 8 Zusammenfassung

Das der Freien und Hansestadt Hamburg nächstgelegene Kernkraftwerk ist das KKW Krümmel, ein Siedewasserreaktor der Baulinie '69. Die Anlage ist an der Elbe südwestlich der Freien und Hansestadt Hamburg gelegen.

Es werden zwei mögliche Unfallabläufe im KKW Krümmel im Hinblick auf ihren Zeitverlauf und ihre Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung untersucht. Einer dieser Unfallabläufe führt zu frühzeitigen und massiven Freisetzungen radioaktiver Stoffe. Beim zweiten untersuchten Unfallablauf wird der Sicherheitsbehälter vor einem Überdruckversagen über ein gefiltertes System druckentlastet (Venting). Es steht dann mehr Zeit zur Verfügung, durch Wiederherstellung der Kühlbarkeit des Reaktors eine Kernschmelze zu verhindern. Der Erfolg dieser Maßnahme wird angenommen. Es kommt daher beim zweiten untersuchten Unfallablauf nur zu relativ geringen Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umgebung.

Es wird ein meteorologisches Referenzszenario für die Unfallfolgenberechnungen entwickelt. In diesem Szenario werden die radioaktiven Stoffe in Richtung des Zentrums der Freien und Hansestadt
Hamburg transportiert. Für diesen Fall werden die häufigsten meteorologischen Parameter ermittelt; Niederschläge werden im Referenzszenario daher nicht angenommen.

Das Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg wird in 10°-Sektoren unterteilt, die in Ausbreitungsrichtung im 5 km-Abstand in Sektorabschnitte gegliedert werden. Für dieser Sektorabschnitte wird jeweils die Wohnbevölkerung ermittelt. Die Berechnungen von Unfallfolgen werden für dieses Flächenraster vorgenommen.

#### VIII - 2

04038089214

Etwa 1.183.000 bis 1.316.000 Einwohner der Freien und Hansestadt Hamburg wären beim Unfallablauf mit hoher Freisetzung nach den "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz" - je nach Anwendung des unteren oder oberen Richtwerts der Effektiven Dosis und Schilddrüsendosis für die Maßnahme - während des Durchzugs der radioaktiven Wolke zum Verbleib in Häusern aufzufordern. Etwa 1.183.000 Personen wären anschließend zu evakuieren, da für diese auch der obere Richtwert für eine Evakuierung überschritten wird. Eine Vergleichsrechnung mit Berücksichtigung eines derzeit beantragten Einsatzes von Mischoxid(MOX)-Brennelementen im KKW Krümmel ergibt, daß dann etwa 120.000 Personen zusätzlich zum Verbleib in Häusern aufgefordert werden sollten.

Beim Unfallablauf mit Venting und ohne Kernschmelzen wären ähnliche Maßnahmen erforderlich wie beim Unfallablauf mit Kernschmelzen und hoher Freisetzung, falls nicht rechtzeitig bekannt ist,
ob ein Kernschmelzen tatsächlich verhindert werden kann. Kann ein
Kernschmelzen als zuverlässig verhindert betrachtet werden, so
sind keine Maßnahmen des Katastrophenschutzes auf Gebiet der
Freien und Hansestadt Hamburg zu ergreifen.

Die Zahl zu erwartender früher Todesfälle unter der Bevölkerung der Freien und Hansestadt Hamburg ist mit etwa 4 auch beim Unfallablauf mit hoher Freisetzung relativ gering, da ein Szenario ohne Niederschläge zugrunde gelegt wird. Die Zahl zu erwartender später Todesfälle wurde zu etwa 44.600 bis 106.700 berechnet. Durch Schutzmaßnahmen läßt sich die Zahl eventuell auf die Hälfte reduzieren. Beim Unfallablauf mit Venting und ohne Kernschmelzen sind 36 bis 83 späte Todesfälle zu erwarten. Die genannten Schadenszahlen basieren alleine auf der Dosis durch Gamma-Submersion, Inhalation und Gamma-Bodenstrahlung über 7 Tage. Ein weiterer

Aufenthalt in den betroffenen Gebieten würde zu einer höheren Dosis durch Gamma-Bodenstrahlung und damit zu höheren Schadenszahlen führen. Ebenso würde ein Verzehr kontaminierter Nahrungsmittel die Zahl von Spätschäden erhöhen.

Aufgrund hoher Ortsdosisleistung bzw. hoher Inhalationsdosen bei Staubentwicklung durch Straßenverkehr etc. kann beim Unfallablauf mit hoher Freisetzung eine Fläche von etwa 460 km² nach einem Jahr und etwa 410 km² nach 50 Jahren nicht genutzt werden. Durch aufwendige Dekontaminationsmaßnahmen könnte diese Fläche auf 190 km² bzw. 180 km² reduziert werden. Eine Fläche von etwa 480 km² nach einem Jahr und etwa 350 km² nach 50 Jahren ist nicht mehr für die Nahrungsmittelproduktion verwendbar. Beim Unfallablauf mit Venting und ohne Kernschmelzen kommt es zu keinen Nutzungseinschränkungen auf Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg.

#### Literaturverzeichnis

- <Baggenstos 1988>: M. Baggenstos et al.: Notfallschutz in der Umgebung der Kernkraftwerke. - Bundesamt für Energiewirtschaft der Schweiz, März 1988
- <BEIR 1990>: Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR): Health Effects of Exposure for Low Levels
  of Ionizing Radiation, BEIR V. Washington D.C., 1990
- <BMI 1983>: Der Bundesminister des Innern: Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien des BMI zur Beurteilung der
  Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gemäß § 28 Abs. 3
  StrlSchV. Bundesanzeiger Nr. 245a vom 31.12.1983
- <BMU 1989>: Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz
  in der Umgebung kerntechnischer Anlagen. Bonn 1.12.1988,
  GMBl 1989, S. 71 ff
- <BMU 1990>: Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger Nr. 64a vom 31.3.1990
- <Eckhardt 1988>: B. Eckhardt et al.: Gefilterte Druckentlastung
   mittels Venturiwäscher im Gleitdruckbetrieb. Jahrestagung
   Kerntechnik 1988, S. 151 ff
- <Ehrhardt 1991>: J. Ehrhardt: Probabilistische Unfallfolgenabschätzungen. - In: Kernforschungszentrum Karlsruhe: Radioaktivität - Risiko - Sicherheit, Karlsruhe 1991, S. 51 ff
- <Fabian 1988>: H. Fabian et al.: Schadensdämmende Maßnahmen am
   Sicherheitsbehälter für SWR-Anlagen der KWU-Baulinie '69 für
   auslegungsüberschreitende Ereignisse. Jahrestagung Kern technik 1988, S. 147 ff
- <Fischer 1988>: B. Fischer: Gutachten im Auftrag von Rechtsanwalt
   M.-P. Rhode im Klageverfahren gegen die 16. TG des KKK. Dezember 1988
- <GRS 1979>: Gesellschaft für Reaktorsicherheit: Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke. - Verlag TÜV Rheinland, Köln 1979
- <GRS 1981>: Gesellschaft für Reaktorsicherheit: Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachband 8, Unfallfolgenrechnung und Risikoergebnisse. - Verlag TÜV Rheinland, Köln 1981
- <GRS 1989>: Gesellschaft für Reaktorsicherheit: Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke Phase B. - GRS-A-1600, Köln 1989

- <HEW 1989>: Hamburgische Electricitäts-Werke AG, Siemens/KWU: Stellungnahme der Hamburgischen Electricitäts-Werke AG und Siemens/KWU zum Gutachten des Öko-Instituts e.V., Büro Darmstadt, Untersuchung über die Sicherheit der im Hamburger Umland gelegenen Kernkraftwerke Brunsbüttel und Krümmel. Januar 1989
- <IAEA 1989>: International Atomic Energy Agency: Cleanup of Large
   Areas Contaminated as a Result of a Nuclear Accident. Technical Reports Series No. 300, Wien 1989
- <ICRP 1977>: International Commission on Radiological Protection:
   Recommendations of the International Commission on Radiolo gical Protection. ICRP Publication No. 26, 1977
- <ICRP 1991>: International Commission on Radiological Protection:
   1990 Recommendations of the International Commission on Ra diological Protection. Publication No. 60, 1991
- <Jacob 1990>: P. Jacob et al.: Abnahme der abgelagerten künstlichen Radioaktivität in städtischer Umgebung. GSF-Bericht
  17/90, Neuherberg 1990
- <Jakob 1991>: P. Jacob: Externe Strahlenexposition nach der Ablagerung künstlicher Radionuklide. Atomwirtschaft-Atomtechnik, Juli 1991, S. 328 ff
- <Kirchner 1987>: G. Kirchner: Berechnungen mit dem Code ORIGEN 2
   zum Inventar von Kernbrennstoff. Uni Bremen. Unveröffentlicht, freundlicherweise vom Autor zur Verfügung gestellt
- <KKK 1987>: KKK: Wirksamkeit der SHB-Druckentlastung bei Störund Unfällen. Arbeitsbericht 098 TK/T 1987, 31.8.1987
- <Lange 1990>: F. Lange: Strahlenexposition, biologische Wirkungen und Gesundheitsschäden nach Strahlenexposition - Vermeidung oder Begrenzung von folgenschweren Ereignissen, Teil 2: Notfallschutz außerhalb der Anlage. - Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Köln, Mai 1990
- <Leitgeb 1990>: N. Leitgeb: Strahlen, Wellen, Felder. Georg
  Thieme-Verlag, Stuttgart 1990
- <Linsley 1983>: G.S. Linsley: Resuspension in Vegetated Environments and its Radiological Significance. In: CEC: Seminar
  on Transfer of Radioactive Materials in the Terrestrial
  Environment Subsequent to an Accidental Release to Atmosphere, Dublin, 1983, Vol. 1, S. 79 ff, Luxembourg 1983
- <Meckenbach 1986>: R. Meckenbach et al.: Abschirmung von Gammastrahlung durch Gebäude. - IVth European Congress - XIIIth Regional Congress of IRPA, Salzburg, September 1986, S. 741 ff
- <Öko-Institut 1988>: Öko-Institut: Untersuchung über die Sicherheit der im Hamburger Umland gelegenen Kernkraftwerke Brokdorf, Brunsbüttel, Krümmel und Stade Teil 2. Darmstadt,
  1988

- <Öko-Institut 1989a>: Öko-Institut: Beurteilung der Stellungnahmen von HEW und Siemens zum Gutachten 'Untersuchung über die Sicherheit der im Hamburger Umland gelegenen Kernkraftwerke Brokdorf, Brunsbüttel, Krümmel und Stade' des Öko-Instituts. Darmstadt, Mai 1989
- <Öko-Institut 1989b>: Öko-Institut: Gefährdung von Einrichtungen
   und Liegenschaften der Stadt Nürnberg durch Unfälle in dem
   bei Wackersdorf geplanten Komplex nuklearer Anlagen. Darm stadt, März 1989
- <Öko-Institut 1990>: Öko-Institut: Umsetzung der Erkenntnisse aus der Phase B der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke auf ausgewählte Belange des Katastrophenschutzes". - Im Auftrag des Ministers für Soziales, Gesundheit und Energie des Landes Schleswig-Holstein, Darmstadt, Oktober 1990
- <Pelletier 1981>: Pelletier et al.: Iodine-131 Behaviour During
   the TMI-2 Accident. NSAC 30, September 1981
- <Prêtre 1970>: S. Prêtre: Zwölf Faustregeln für das richtige Verhalten im Schutzraum bei bestrahlter Umgebung. Forschungsinstitut für militärische Bautechnik, Zürich, FMB 70-1
- <Sozialministerium Schleswig-Holstein 1987a>: Der Sozialminister
   des Landes Schleswig-Holstein: 15. Teilgenehmigung für das
   Kernkraftwerk Krümmel. IX 640 416.755.441, 26. Juni 1987
- <Sozialministerium Schleswig-Holstein 1987b>: Der Sozialminister
   des Landes Schleswig-Holstein: 16. Teilgenehmigung für das
   Kernkraftwerk Krümmel. IX 640 416.755.541, 6. Oktober
   1987
- <Sozialministerium Schleswig-Holstein 1991>: Der Sozialminister des Landes Schleswig-Holstein: 7. Nachtrag zur 10. Teiler-richtungsgenehmigung/7. Nachtrag zur 2. Betriebsgenehmigung Genehmigung nach § 7 Atomgesetz (AtG) zur Errichtung und zum Betrieb einer diversitären Reaktordruckbegrenzungseinrichtung (Notdruckbegrenzung) im Kernkraftwerk Krümmel (KKK). IX 613 416.756.494, 25. September 1991
- <SSK 1989>: Strahlenschutzkommission: Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 13, Stuttgart 1989
- <Statistisches Landesamt Hamburg 1991>: Statistisches Landesamt
  der Freien und Hansestadt Hamburg: Statistische Berichte für
  das Jahr 1989. Hamburg, 7.3.1991
- <TÜV Norddeutschland 1985>: TÜV Norddeutschland e.V.: Untersuchungen zu Ereignisabläufen mit Kernschmelzen und Aktivitätsfreisetzungen in den DWR-Anlagen KKS und KBR sowie in den SWR-Anlagen KKB und KKK. - Hamburg, 1985

- <UNSCEAR 1988>: United Nations Scientific Committee on the
   Effects of Atomic Radiation: Sources, Effects and Risks of
   Ionizing Radiation 1988 Report to the General Assembly. New York 1988
- <Weibezahn 1992>: K.-F. Weibezahn: Biologische Grundlagen des
   Strahlenschutzes. Atomwirtschaft-Atomtechnik, Februar
   1992, S. 78 ff
- <Wilson 1988>: W.B. Wilson et al.: Calculated Radionuclide Inventories of High-Exposure LWR Fuels. - Nuclear Safety Vol. 29 (1988) No 2, S. 177 ff