



**Gesellschaft für Reaktorsicherheit**

---

# **Deutsche Risikostudie Kernkraft- werke**

**Fachband 8**

**Unfallfolgenrechnung  
und Risikoergebnisse**

---

**Verlag TÜV Rheinland**



Gesellschaft für Reaktorsicherheit

# Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke

Eine Untersuchung zu dem durch  
Störfälle in Kernkraftwerken  
verursachten Risiko

**Fachband 8**

**Unfallfolgenrechnung  
und Risikoergebnisse**

Studie im Auftrage des Bundesministeriums  
für Forschung und Technologie

**Verlag TÜV Rheinland**

Die Autoren dieses Fachbandes 8 "Unfallfolgenrechnung und Risikoergebnisse" der Deutschen Risikostudie - Kernkraftwerke sind:

Anton Bayer  
Klaus Burkart  
Joachim Ehrhardt  
Frank Horsch  
Wolfgang Hübschmann  
Manfred Schückler<sup>1)</sup>  
Siegfried Vogt

von der Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH,

Wolfgang Jacobi  
Herwig Paretzke  
Klaus Rüdiger Trott

von der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH,  
Neuherberg,

Horst Schnadt  
Jakob Storch

vom Technischen Überwachungs-Verein Rheinland e.V., Köln, und

Eduard Hofer  
Bernard Krzykacz

von der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH.

Die für die Rechnungen verwendeten Bevölkerungsdaten wurden von Bonnenberg & Drescher Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, Aldenhoven, zur Verfügung gestellt.

---

<sup>1)</sup> jetzt TÜV Baden, Mannheim

*Redaktion:*

*H.-J. Danzmann, L.F. Franzen, F.W. Heuser, M. Straßenmeyer*

## Vorwort

Im Frühjahr 1976 hatte der Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) die "Deutsche Risikostudie - Kernkraftwerke" bei der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH in Auftrag gegeben. Unter der wissenschaftlichen Leitung ihres Geschäftsführers, Prof. Dr. A. Birkhofer, wurden die zugehörigen Arbeiten zusammen mit weiteren technisch-wissenschaftlichen Organisationen durchgeführt und die Ergebnisse im August 1979 vorgelegt. Ziel dieser Studie war es, das durch Störfälle in Kernkraftwerken verursachte Risiko unter Berücksichtigung deutscher Verhältnisse in Anlehnung an die amerikanische Reaktorsicherheitsstudie WASH-1400 zu ermitteln.

Die Studie gliedert sich in zwei Arbeitsphasen. Die erste Phase ist abgeschlossen. Die Ergebnisse sind in einer allgemein verständlichen Kurzfassung, herausgegeben vom BMFT, vom 15. August 1979 und in einem Hauptband, erschienen im Verlag TÜV Rheinland, ebenfalls 1979, dokumentiert. Ergänzend zu diesen Veröffentlichungen werden die für die Studie im einzelnen durchgeführten Untersuchungen und ihre Ergebnisse in einer Reihe von Fachbänden zusammengestellt, die im Laufe des Jahres 1980 erscheinen: F1 - Ereignisablaufanalyse, F2 - Zuverlässigkeitsanalyse, F3 - Zuverlässigkeitsdaten und Betriebserfahrungen, F4 - Einwirkungen von außen (einschließlich anlageninterner Brände), F5 - Untersuchung von Kernschmelzunfällen, F6 - Ermittlung der Spaltproduktfreisetzung, F7 - Ergebnisse der anlagentechnischen Untersuchungen, F8 - Unfallfolgenrechnungen und Risikoergebnisse.

Der hier vorliegende Fachband 8 dokumentiert, ausgehend von den in den Fachbänden 1 bis 7 erarbeiteten Freisetzungskategorien radioaktiver Stoffe, die zur Unfallfolgenermittlung eingesetzten Modelle, die zugehörigen Annahmen, Randbedingungen, Ergebnisse und ergänzende Informationen. Er erweitert und belegt die Aussagen des Hauptbandes, Kapitel 7. Das zusammengestellte Material umfaßt die Überlegungen und Rechnungen zur atmosphärischen Ausbreitung der freigesetzten radioaktiven Stoffe, die Ermittlung der potentiellen und (unter Berücksichtigung von Schutz- und

Gegenmaßnahmen) zu erwartenden Dosen, die Darstellung strahlenbedingter Früh- und Spätschäden sowie die Ergebnisse in Abhängigkeit verschiedener Parameter. Die Ergebnisse in Form der komplementären Häufigkeitsverteilungen und Erwartungswerte für Individual- und Kollektivdosen sowie für die von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen werden eingehend diskutiert. Betrachtungen zur Aussagesicherheit der Ergebnisse runden die Darstellung ab. Seit Herausgabe des Hauptbandes wurde das Programmsystem weiterentwickelt und darin enthaltene Fehler beseitigt. Die daraus resultierenden Abweichungen gegenüber dem Hauptband sind geringfügig und verändern nicht die grundsätzlichen Aussagen.

Dank gebührt all denen, die die Arbeiten zum Unfallfolgenmodell der Deutschen Risikostudie mit kritischen Anregungen und Beiträgen unterstützt haben, insbesondere Dr. David Aldrich, Sandia Laboratories, Albuquerque/USA, für Durchsicht und kritische Überarbeitung wesentlicher Teile des Modells. Dieser Dank gilt ebenso der US Nuclear Regulatory Commission, die im Sommer 1978 eine halbjährige Delegation Dr. Aldrichs zum Kernforschungszentrum Karlsruhe ermöglicht hat.

Für das Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen mußten zum Teil Ansätze gemacht werden, die über den Stand der "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen" hinausgehen. Ein besonderer Dank gilt hier Herrn Prof. Dr. K.H. Lindackers, TÜV Rheinland, der in ausführlichen Diskussionen maßgeblich an der Entwicklung dieses Modells mitgewirkt hat.

Köln, im August 1980

Gesellschaft für Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH

### Kurzfassung

Der Fachband 8 enthält die Berechnung der Unfallfolgen und Risiken, die mit Unfällen in Kernkraftwerken verbunden sind. Für diese Rechnungen werden 19 Reaktorstandorte mit insgesamt 25 Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland berücksichtigt.

Ausgangspunkt der Rechnungen sind die Ergebnisse der in den vorangehenden Fachbänden enthaltenen anlagentechnischen Untersuchungen, insbesondere die zu verschiedenen Unfallabläufen (Freisetzungskategorien) nach Art, Größe und Häufigkeit ermittelten Aktivitätsfreisetzungen. Zur Bestimmung der ortsabhängigen Luft- und Bodenkonzentrationen der freigesetzten Radionuklide werden Ausbreitungsrechnungen mit einer statistisch ausreichenden Anzahl von Wetterabläufen für verschiedene Klimazonen vorgenommen. Unter Berücksichtigung dosismindernder Einflüsse, insbesondere abgestufter Schutz- und Gegenmaßnahmen, ermittelt man hieraus organspezifische Personendosen. Für die anschließenden Rechnungen zur Schadensermittlung werden die Bevölkerungsdaten der in der Studie betrachteten Reaktorstandorte zugrunde gelegt. Berechnet werden die Anzahlen der somatischen Früh- und Spätschäden und die genetisch signifikante Dosis. Empfindlichkeitsanalysen sowie Abschätzungen zur Aussagesicherheit der Ergebnisse schließen die Unfallfolgenrechnungen ab.

### Abstract

This appendix 8 contains the analysis of the accident consequences and risks, which are associated with accidents in nuclear power plants. For these analyses, 19 reactor sites with a total of 25 units in the Federal Republic of Germany are considered.

The input for these analyses are the results of the plant-specific studies in the previous appendices, especially the activity releases calculated according to type, size and frequency for the various accident sequences (release categories). To de-

termine the site-dependent concentrations of the released radionuclides in the air and on the ground, dispersion calculations are carried out with a statistically adequate number of weather sequences for various climatic zones. The organ-specific doses to persons are calculated from this, considering the dose reduction factors, especially the graded protection and remedial measures. The subsequent calculation for evaluating the damage is based on the population data for the reactor sites considered in the study. The number of cases of acute and late somatic damages and the genetically significant doses are calculated. The accident consequence analyses are concluded by sensitivity analyses and estimates with respect to the accuracy of the results.

I N H A L T

	Seite
1. Zusammenfassung . . . . .	1
2. Einleitung . . . . .	7
3. Aktivitätsfreisetzung aus dem Sicherheitsbehälter . . . . .	15
3.1    Aktivitätsinventar und Freisetzungskategorien . . . . .	15
3.2    Kurzbeschreibung der Freisetzungskategorien . . . . .	18
3.2.1    Freisetzungskategorie 1 (FK1) . . . . .	18
3.2.2    Freisetzungskategorie 2 (FK2) . . . . .	19
3.2.3    Freisetzungskategorien 3 und 4 (FK3) und (FK4) . . . . .	19
3.2.4    Freisetzungskategorien 5 und 6 (FK5) und (FK6) . . . . .	19
3.2.5    Freisetzungskategorien 7 und 8 (FK7) und (FK8) . . . . .	20
3.3    Häufigkeit der Freisetzungskategorien . . . . .	20
4. Atmosphärische Ausbreitung . . . . .	21
4.1    Längen- und Zeit-"scales" . . . . .	21
4.2    Verhalten von Aktivitätsfahnen . . . . .	22
4.3    Schadstoffkonzentration in der Aktivitätsfahne . . . . .	26
4.4    Ausbreitungsparameter . . . . .	27
4.5    Gebäudeeinfluß . . . . .	36
4.6    Aufstieg der Aktivitätsfahne . . . . .	37
4.7    Windgeschwindigkeit . . . . .	39
4.8    Ablagerung . . . . .	40
4.9    Wetterabläufe . . . . .	44
4.10    Meteorologische Standortregionen . . . . .	46
4.11    Anordnung der Aufpunkte . . . . .	50



4.12	Form der Aktivitätsfahne . . . . .	54
4.12.1	Behandlung der Aktivitätsfahne bis 540 km	54
4.12.2	Behandlung der Aktivitätsfahne jenseits von 540 km . . . . .	59
4.13	Zeitintegral der Aktivitätskonzentration	60
4.13.1	Aktivitätskonzentration einer einstündi- gen Freisetzung . . . . .	60
4.13.2	Aktivitätskonzentration bei länger dau- ernder Freisetzung . . . . .	61
4.14	Genauigkeitsbetrachtungen zum atmosphäri- schen Ausbreitungsmodell . . . . .	61
4.14.1	Übersicht . . . . .	61
4.14.2	Anwendbarkeit des sogenannten "Gauß- modells" . . . . .	62
4.14.3	Besondere meteorologische Situationen .	63
4.14.4	Auswahl und Anzahl der Wetterabläufe . .	63
4.14.5	Einfluß der azimutalen Konzentrationsver- teilung . . . . .	69
4.14.6	Einfluß des thermischen Aufstiegs der Ak- tivitätsfahne . . . . .	69
4.14.7	Einfluß der Mischungsschichthöhe . . . .	73
4.14.8	Einfluß der trockenen und nassen Ablage- rung . . . . .	76
4.14.9	Einfluß der Windscherungen . . . . .	82
4.14.10	Einfluß einer gleichbleibenden Ausbrei- tungsrichtung . . . . .	83
4.14.11	Einfluß einer Windrichtungsgleichvertei- lung . . . . .	86
4.14.12	Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen	86
	Dosismodell . . . . .	88
5.1	Übersicht . . . . .	88
5.1.1	Verknüpfung des Dosismodells mit dem Mo- dell der Schutz- und Gegenmaßnahmen . .	88
5.1.2	Strahlenexposition, Expositionspfade und belastete Organe . . . . .	88
5.1.3	Potentielle Dosen und zu erwartende Dosen	90
5.2	Berechnung der Dosen . . . . .	94
5.2.1	Berechnung der potentiellen Dosen . . .	94
5.2.2	Berechnung der zu erwartenden Dosen . .	98

5.3	Vorgehensweise und Daten . . . . .	107
5.3.1	Berechnung der Konzentrationen . . . . .	107
5.3.2	Berechnung der Dosen; zugehörige Parameter . . . . .	110
5.3.3	Bevölkerungsstatistische Daten . . . . .	127
6.	Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen . . . . .	131
6.1	Grundlagen des Modells . . . . .	131
6.2	Gebiete . . . . .	135
6.3	Maßnahmen . . . . .	141
6.3.1	Anlaufphase . . . . .	141
6.3.2	Berücksichtigung der Abschirmwirkung von Gebäuden gegenüber externer Strahlung .	142
6.3.3	Schutz- und Gegenmaßnahmen im Gebiet A .	148
6.3.4	Schutz- und Gegenmaßnahmen in den Gebieten $B_1$ und $B_2$ . . . . .	149
6.3.5	Maßnahmen in den Gebieten C, $D_1$ und $D_2$ .	154
6.3.6	Verzehr landwirtschaftlicher Produkte .	157
6.3.7	Dekontamination in den Gebieten A, $B_1$ , $B_2$ und C (Spätdekontamination), Rückführung der Bevölkerung . . . . .	158
6.4	Ermittlung der Fahrzeiten für Evakuierung und schnelle Umsiedlung . . . . .	159
6.4.1	Simulation von Bevölkerungsbewegungen .	159
6.4.2	Interpolation zwischen den berechneten Fahrzeiten für schnelle Umsiedlung . . .	166
7.	Modell zur Ermittlung der Gesundheitsschäden durch Strahlung . . . . .	170
7.1	Vorbemerkung . . . . .	170
7.2	Allgemeines zur Strahlenwirkung . . . . .	170
7.3	Somatische Strahlenfrühschäden . . . . .	176
7.3.1	Einleitung . . . . .	176
7.3.2	Erfahrungen mit akuten und chronischen Erkrankungen nach Bestrahlung . . . . .	177
7.3.2.1	Allgemeines . . . . .	177
7.3.2.2	Expositionsbedingungen . . . . .	177
7.3.2.3	Personengruppen, die einer praktisch gleichmäßigen Bestrahlung des ganzen Körpers mit Strahlendosen über 100 rad ausgesetzt waren . . . . .	180

7.3.2.4	Personen, deren Lunge einer Strahlenbelastung ausgesetzt war . . . . .	182
7.3.2.5	Personen, deren Darm einer Strahlenbelastung ausgesetzt war . . . . .	183
7.3.2.6	Personen, deren Schilddrüse einer Strahlenbelastung ausgesetzt war . . . . .	184
7.3.3	Verlauf der Erkrankungen nach Bestrahlung	184
7.3.3.1	Allgemeines . . . . .	184
7.3.3.2	Verlauf der Strahlenkrankheit bei Bestrahlung mit einer Dosis von ca. 100 rad (kurzfristig oder über 24 Stunden akkumuliert) .	185
7.3.3.3	Verlauf der Strahlenkrankheit nach Bestrahlung mit einer Dosis von 200 bis 500 rad (kurzfristig oder über 24 Stunden akkumuliert) . . . . .	186
7.3.3.4	Verlauf der Strahlenkrankheit bei Personen, die mit einer Ganzkörperdosis über 500 rad bestrahlt worden sind . . . . .	189
7.3.3.5	Verlauf der Erkrankung von Personen, deren Lungen mit einer Dosis über 2000 rad über einige Wochen verteilt bestrahlt wurden .	191
7.3.3.6	Verlauf der Erkrankung bei Personen, deren Darm mit einer über einige Tage verteilten Dosis von über 1000 rad bestrahlt wurde .	192
7.3.3.7	Verlauf der Erkrankungen bei Personen, deren Schilddrüse durch aufgenommenes Radiojod zusätzlich bestrahlt wurde . . . . .	193
7.3.4	Probleme der quantitativen Beschreibung der akuten und chronischen Folgen eines Strahlenunfalls . . . . .	196
7.3.5	Die Abhängigkeit der tödlich verlaufenden Strahlenkrankheit von der Strahlendosis .	197
7.4	Somatische Strahlenspätchäden . . . . .	204
7.4.1	Einleitung und Problemstellung . . . . .	204
7.4.2	Form der Dosis/Risiko-Beziehung . . . . .	211
7.4.3	Latenzzeit-Verteilung für Strahlenkrebs .	214
7.4.4	Strahlenkrebsrisiko für einzelne Organe und Gewebe . . . . .	218
7.4.4.1	Rotes Knochenmark (Leukämie) . . . . .	218
7.4.4.2	Weibliche Brust . . . . .	228
7.4.4.3	Lunge . . . . .	240
7.4.4.4	Gesamtheit der Verdauungsorgane . . . . .	248
7.4.4.5	Schilddrüse . . . . .	254
7.4.4.6	Knochen bzw. Knochenoberfläche (Knochenkrebs) . . . . .	263

7.4.5	Gesamtes Krebsrisiko nach Ganzkörperbestrahlung (Atombomben-Überlebende) . . .	267
7.4.6	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen .	272
7.4.A	Anhang: Beziehung zwischen Kerma und Organ Dosen bei n- und $\gamma$ -Bestrahlung . . .	277
7.5	Genetische Strahlenschäden . . . . .	279
7.6	Berechnung der Unfallfolgen . . . . .	280
7.6.1	Übersicht . . . . .	280
7.6.2	Berechnung der Schäden . . . . .	282
7.6.2.1	Berechnung der Frühschäden . . . . .	282
7.6.2.2	Berechnung der Spätschäden . . . . .	283
7.6.3	Vorgehensweise und Daten . . . . .	287
7.6.3.1	Dosis/Wirkungs-Beziehung für Frühschäden	287
7.6.3.2	Dosis/Risiko-Beziehung für Spätschäden .	288
7.6.3.3	Erfassung der Wohnbevölkerung . . . . .	291
8.	Ergebnisse . . . . .	313
8.1	Überblick . . . . .	313
8.2	Charakterisierung "typischer" Wetterabläufe . . . . .	316
8.3	Entfernungsabhängiger Verlauf der potentiellen Kurzzeit-Knochenmarkdosis . . .	320
8.4	Potentielle Dosis durch externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne - nuklidspezifische Aufschlüsselung . . . . .	327
8.5	Zeitabhängiger Verlauf der potentiellen Dosis durch externe Bestrahlung vom Boden	331
8.6	Zeitabhängiger Verlauf der potentiellen Inhalationsdosis . . . . .	337
8.7	Probabilistische Ergebnisse . . . . .	337
8.8	Klassenhäufigkeitsdichten und komplementäre Häufigkeitsverteilungen . . . . .	347
8.8.1	Übersicht . . . . .	347
8.8.2	Frühschäden . . . . .	348
8.8.3	Somatische Spätschäden . . . . .	361
8.8.4	Genetische Belastung . . . . .	378
8.8.5	Von den Gegenmaßnahmen "Evakuierung", "Schnelle Umsiedlung" und "Umsiedlung" betroffenen Flächen und Personen . . . .	391
8.9	Kollektiv- und Individualrisiken sowie Erwartungswerte der Kollektivdosen und von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen . . . . .	404

8.9.1	Übersicht . . . . .	404
8.9.2	Kollektivrisiken für gesundheitliche Schäden . . . . .	405
8.9.3	Erwartungswerte der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen . . . . .	415
8.10	Beiträge der verschiedenen Krebsarten und Expositionspfade zu den Kollektivschäden	418
9.	Aussagesicherheit der Ergebnisse . . . . .	431
9.1	Einführung . . . . .	431
9.1.1	Schätzunsicherheiten . . . . .	431
9.1.2	Quantifikation und probabilistisch-mathematische Modellierung von Schätzunsicherheiten . . . . .	432
9.1.3	Fortpflanzung von Schätzunsicherheiten und Darstellung des Einflusses auf das Ergebnis . . . . .	434
9.2	Auswahl der unsicheren Parameter und Quantifizierung der Unsicherheit . . . . .	438
9.2.1	Die gewählten unsicheren Parameter und die Interpretation ihrer quantifizierten Schätzunsicherheit . . . . .	438
9.2.2	Konstruktion der Verteilungen der Parameter . . . . .	439
9.2.2.1	Die Verteilungen der zu erwartenden Freisetzungshäufigkeiten . . . . .	439
9.2.2.2	Die Verteilungen der übrigen unsicheren Parameter . . . . .	444
9.3	Ermittlung lokaler Vertrauensbereiche . . . . .	454
9.3.1	Allgemeine Überlegungen . . . . .	454
9.3.2	Festlegung der Parameterkombinationen (design) . . . . .	456
9.3.3	Konstruktion der "response"-Funktion . . . . .	464
9.3.4	Simulation und Bestimmung der Vertrauensintervalle für die Häufigkeit . . . . .	472
9.3.5	Vertrauensbereiche für den Schaden . . . . .	477
9.4	Ergänzende Untersuchungen . . . . .	480
9.4.1	"Full three-level factorial design" (Vorstudie) . . . . .	480
9.4.2	Simulationsstudien . . . . .	480
9.4.3	Ein "WEIBULL-Ansatz" als alternative Methode zur Ermittlung von Vertrauensbereichen zur Schadensart "frühe Todesfälle" . . . . .	493

10. Schrifttum . . . . .	497
11. Stichwortverzeichnis . . . . .	531
Anhang: Unterschiede zu den Ergebnissen des Hauptbandes	

BILDER

	Seite
F8, 1-1: Komplementäre Häufigkeitsverteilung der frühen Todesfälle . . . . .	3
F8, 1-2: Komplementäre Häufigkeitsverteilung der späten Todesfälle . . . . .	5
F8, 2-1: Schema des Unfallfolgenmodells . . . . .	9
F8, 4-1: Schematische Darstellung der charakteristischen Längen- und Zeit-"scales" aus /F8, 4-1/ . . . . .	21
F8, 4-2: Auswirkungen der Zeit-"scales" auf das Bild einer von einer kontinuierlichen Quelle emittierten Aktivitätsfahne . . . . .	23
F8, 4-3: Temperaturverlauf und Gestalt einer Aktivitätsfahne . . . . .	24
F8, 4-4: Mäandern der Aktivitätsfahne . . . . .	25
F8, 4-5: $\sigma_y$ für die Rauigkeitsstufe II . . . . .	31
F8, 4-6: $\sigma_z$ für die Rauigkeitsstufe II . . . . .	32
F8, 4-7: $\sigma_y$ für die Rauigkeitsstufe III . . . . .	33
F8, 4-8: $\sigma_z$ für die Rauigkeitsstufe III . . . . .	34
F8, 4-9: Mischungshöhen im Winter in verschiedenen geographischen Breiten (Monatsmittel der Nachmittagswerte) aus /F8, 4-10/ . . . . .	36
F8, 4-10: Summenhäufigkeit der Niederschlagsereignisse in Abhängigkeit von der Andauer aus /F8, 4-68/ . . . . .	44
F8, 4-11: Approximation der Gaußverteilung durch eine vierstufige Treppenkurve . . . . .	51
F8, 4-12: Zuordnung der berechneten Bodenkonzentration zu den mit der Bevölkerungsverteilung kompatiblen Koordinaten . . . . .	53
F8, 4-13: $\sigma_y$ -Bestimmung bei Änderung der Ausbreitungskategorie (schematisch) . . . . .	55
F8, 4-14: Laterale Form der Aktivitätsfahne bei Änderung der Ausbreitungskategorie (schematisch)	56

F8, 4-15:	$\sigma_z$ -Bestimmung bei Änderung der Ausbreitungskategorie (schematisch) . . . . .	57
F8, 4-16:	Form der Aktivitätsfahne . . . . .	57
F8, 4-17:	Statistische Kennzahlen der Frühschäden nach WASH-1400 . . . . .	65
F8, 4-18:	Einfluß der Anzahl der Wetterabläufe . . . . .	67
F8, 4-19:	Statistische Kenngrößen der Knochenmarkdosis in 10 km Entfernung für zwei Wetterablaufkollektive (Freisetzungskategorie 1, Standortregion Oberrhein) . . . . .	68
F8, 4-20:	Höhe des oberen Randes der Aktivitätsfahne (RA) bei Kategorie F ( $h_{\text{eff}} = 10 \text{ m}$ ) . . . . .	74
F8, 4-21:	Optionen zur Berücksichtigung der Windrichtungsänderungen bei einer Freisetzung in drei Phasen . . . . .	84
F8, 4-22:	Häufigkeit der Richtungsdivergenz für einige Zeit- bzw. Wegdistanzen; Fahnenaufstieg entsprechend FK1, meteorologische Daten Oberrheinische Tiefebene, 115 Wetterabläufe . . . . .	85
F8, 5-1:	Schematische Darstellung der Zeitskalen zur Berechnung der potentiellen Dosen . . . . .	95
F8, 5-2:	Schematischer Verlauf der $f(t)$ -Funktion der Schutz- und Gegenmaßnahmen . . . . .	99
F8, 5-3:	Schematische Darstellung der Zeitskalen für die Dosis- und Schadensberechnung . . . . .	101
F8, 5-4:	Schematische Darstellung der Konstruktion repräsentativer Kreisringsektoren . . . . .	108
F8, 5-5:	Geometrische Anordnung zur Ermittlung des Fahnenkorrekturfaktors $k_A$ . . . . .	113
F8, 5-6:	Lebenserwartungs-Dichtefunktion und komplementäre Lebenserwartungs-Verteilungsfunktion für Neugeborene . . . . .	129
F8, 5-7:	Zeugungserwartungs-Dichtefunktion für Neugeborene . . . . .	130
F8, 6-1:	Gebiete der Schutz- und Gegenmaßnahmen (schematisch) . . . . .	134
F8, 7-1:	Reaktionskette der biologischen Strahlungswirkung und Arten von Strahlenschäden . . . . .	171
F8, 7-2:	Form der Dosis/Risiko-Beziehung für stochastische und nichtstochastische Strahlenschäden . . . . .	174



F8, 7-3:	Geschätzte Dosis/Wirkungs-Beziehungen und Datenpunkte nach WASH-1400 für 50-%-Mortalität innerhalb 60 Tagen: pessimistische Kurve (A), den Rechnungen zugrunde gelegte Kurve (B) und optimistische Kurve (C) . . .	199
F8, 7-4:	Sterblichkeit an den akuten Strahlenfolgen in Abhängigkeit von der akuten Knochenmarkdosis (Kurve B: WASH-1400, 1975; Kurve D: Deutsche Risikostudie, 1979) . . . . .	205
F8, 7-5:	Zur Definition des Strahlenkrebsrisikos (schematisch) . . . . .	207
F8, 7-6:	Typen von möglichen Dosis/Risiko-Beziehungen (schematisch) . . . . .	212
F8, 7-7:	Beobachtete zeitliche Änderung der zusätzlichen Mortalitätsrate durch Krebs und Leukämie bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki mit Dosen größer 10 rad, die sich aus einem Vergleich mit der Krebshäufigkeit in der japanischen Bevölkerung (ausgezogene Kurve) bzw. in den gering bestrahlten Atombomben-Überlebenden (Dosis 0-9 rad) ergibt . . . . .	216
F8, 7-8:	Zusätzliche Leukämie-Inzidenz bei den Atombomben-Überlebenden von Nagasaki (alle Altersgruppen) in Abhängigkeit von der mittleren Dosis im roten Knochenmark; die Beobachtungswerte können durch die angegebene linear-quadratische Dosis/Risiko-Ausgleichskurve beschrieben werden (ausgezogene Kurve)	220
F8, 7-9:	Relative Änderung des absoluten Risikoeffizienten für Leukämie bei den Atombomben-Überlebenden mit dem Alter bei Bestrahlung (nach Daten von Beebe, Kato und Land, 1978)	223
F8, 7-10:	Zusätzliches Brustkrebs-Mortalitätsrisiko bei den Atombomben-Überlebenden in Abhängigkeit von der Strahlenexposition (Kerma)	230
F8, 7-11:	Zusätzliche mittlere Inzidenzrate von Brustkrebs und Standard-Abweichungen bei den Atombomben-Überlebenden in Abhängigkeit vom Alter bei Bestrahlung . . . . .	232
F8, 7-12:	Zusätzliche Brustkrebsinzidenz pro Dosis-einheit (mit 90-%-Vertrauensbereich) bei Frauen nach röntgentherapeutischer Bestrahlung . . . . .	237

F8, 7-13:	Zusätzliche Lungenkrebshäufigkeit bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima (oben) und Nagasaki (unten) in Abhängigkeit von der Strahlenexposition (Kerma) . . . . .	241
F8, 7-14:	Zusätzliches Lungenkrebsrisiko in verschiedenen Altersgruppen der Atombomben-Überlebenden . . . . .	243
F8, 7-15:	Beobachtete zusätzliche Lungenkrebshäufigkeit bei Uranbergarbeitern in der CSSR in Abhängigkeit von ihrer Exposition durch kurzlebige Radon-222-Zerfallsprodukte; angegeben sind die Mittelwerte und 95-%-Vertrauensbereiche . . . . .	245
F8, 7-16:	Zusätzliches Krebsrisiko in Verdauungsorganen pro Einheit der Äquivalentdosis bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki in Abhängigkeit vom Alter bei Bestrahlung (Mittelwerte und 90-%-Vertrauensbereich nach Daten der LS-Studie, 1950-1974); berechnet mit $Q = 10$ für Neutronen . . . . .	250
F8, 7-17:	Altersabhängigkeit der Inzidenz von Schilddrüsenkrebs bei den Atombomben-Überlebenden (oberes Bild) und bei den Bewohnern der Marshall-Inseln (unteres Bild) . . . . .	256
F8, 7-18:	Beobachtete Häufigkeit von Knochensarkomen bei Personen nach Inkorporation von Radium-226 in Abhängigkeit von der mittleren $\alpha$ -Dosis im Knochen . . . . .	266
F8, 7-19:	Altersabhängigkeit des Risikokoeffizienten für Leukämie und die Summe aller anderen Krebsarten bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki . . . . .	269
F8, 7-20:	Approximation des differentiellen Risikokoeffizienten für Schäden durch eine Stufenfunktion . . . . .	284
F8, 7-21:	Approximation des differentiellen Risikokoeffizienten für Spätschäden unter Berücksichtigung von Alter und Rest-Lebenserwartung . . . . .	289
F8, 7-22:	Konstruktion der Teilflächen $F^P$ , $F^M$ und $F^{MP}$ für eine Freisetzungsphase . . . . .	292
F8, 8-1:	Andauer labiler bzw. stabiler Ausbreitungskategorien . . . . .	319
F8, 8-2:	Transportzeit der Aktivitätsfahne für 450 km Wegstrecke (Daten aus 115 Wetterabläufen, meteorologische Region Oberrheinische Tiefebene, Freisetzungskategorie FK2) . . . . .	320

F8, 8-3(1):	Kurzzeit-Knochenmarkdosis für vier Wetterabläufe (Freisetzungskategorie FK2) . . .	321
F8, 8-3(2):	Kurzzeit-Knochenmarkdosis für Wetterablauf "neutral", aufgeschlüsselt nach Expositionspfaden (Freisetzungskategorie FK2) .	323
F8, 8-3(3):	Kurzzeit-Knochenmarkdosis für Wetterablauf "Regen", aufgeschlüsselt nach Expositionspfaden (Freisetzungskategorie FK2) . . .	324
F8, 8-3(4):	Potentielle Kurzzeit-Knochenmarkdosis für Wetterablauf "labil", aufgeschlüsselt nach Expositionspfaden (Freisetzungskategorie FK2) . . . . .	325
F8, 8-3(5):	Potentielle Kurzzeit-Knochenmarkdosis für Wetterablauf "stabil", aufgeschlüsselt nach Expositionspfaden (Freisetzungskategorie FK2) . . . . .	326
F8, 8-4:	Knochenmarkdosis für Wetterablauf "zunehmender Regen", Freisetzungskategorie FK2 .	328
F8, 8-5(1):	Externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung unter der Fahnenachse) . . . . .	329
F8, 8-5(2):	Externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "Regen", 100 km Entfernung unter der Fahnenachse) . . . . .	330
F8, 8-6(1):	Zeitliche Entwicklung der Knochenmarkdosis durch externe Bodenstrahlung (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km) . . . . .	332
F8, 8-6(2):	Zeitliche Entwicklung der Knochenoberflächendosis durch externe Bodenstrahlung (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km) . . . . .	333
F8, 8-6(3):	Zeitliche Entwicklung der Lungendosis durch externe Bodenstrahlung (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km) . . . . .	334
F8, 8-6(4):	Zeitliche Entwicklung der Schilddrüsendosis durch externe Bodenstrahlung (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km) . . . . .	335
F8, 8-6(5):	Zeitliche Entwicklung der Ganzkörperdosis durch externe Bodenstrahlung (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km) . . . . .	336

F8, 8-7(1):	Knochenmarkdosis $D_{IH}^{KM}$ durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung) . . . . .	338
F8, 8-7(2):	Knochenoberflächendosis $D_{IH}^{KN}$ durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung unter der Fahnenachse) . . . . .	339
F8, 8-7(3):	Lungendosis $D_{IH}^{LG}$ durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung unter der Fahnenachse) . . . . .	340
F8, 8-7(4):	Schilddrüsendosis $D_{IH}^{SD}$ durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung unter der Fahnenachse) . . . . .	341
F8, 8-7(5):	Ganzkörperdosis $D_{IH}^{GK}$ durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung unter der Fahnenachse) . . . . .	342
F8, 8-8(1):	Klassenhäufigkeitsdichte der Frühschäden (alle FK) . . . . .	349
F8, 8-8(2):	Klassenhäufigkeitsdichte der Frühschäden (nur FK1) . . . . .	350
F8, 8-8(3):	Klassenhäufigkeitsdichte der Frühschäden (nur FK2) . . . . .	351
F8, 8-8(4):	Klassenhäufigkeitsdichte der Frühschäden (nur FK3) . . . . .	352
F8, 8-8(5):	Klassenhäufigkeitsdichte der Frühschäden (nur FK4) . . . . .	353
F8, 8-9(1):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der Frühschäden . . . . .	355
F8, 8-9(2):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der Frühschäden, aufgeschlüsselt nach FK (dt.DWB) . . . . .	356
F8, 8-10(1):	Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (alle FK) . . . . .	362
F8, 8-10(2):	Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK1) . . . . .	363
F8, 8-10(3):	Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK2) . . . . .	364
F8, 8-10(4):	Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK3) . . . . .	365

F8, 8-10(5):	Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK4) . . . . .	366
F8, 8-10(6):	Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK5) . . . . .	367
F8, 8-10(7):	Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK6) . . . . .	368
F8, 8-10(8):	Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK7) . . . . .	369
F8, 8-11(1):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der somatischen Spätschäden, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien . . . . .	371
F8, 8-11(2):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der somatischen Spätschäden . . . . .	372
F8, 8-11(3):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der somatischen Spätschäden sowie der Krebsfälle aufgrund natürlicher und zivilisatorischer Ursachen . . . . .	377
F8, 8-12(1):	Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (alle FK) .	379
F8, 8-12(2):	Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK1) .	380
F8, 8-12(3):	Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK2) .	381
F8, 8-12(4):	Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK3) .	382
F8, 8-12(5):	Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK4) .	383
F8, 8-12(6):	Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK5) .	384
F8, 8-12(7):	Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK6) .	385
F8, 8-12(8):	Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK7) .	386
F8, 8-13(1):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der genetisch signifikanten Kollektivdosis, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien . . . . .	387
F8, 8-13(2):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der genetisch signifikanten Kollektivdosis .	388

F8, 8-14:	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Evakuierung" betroffenen Personenzahl . . . . .	394
F8, 8-15(1):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" betroffenen Flächen bis 24 km (Gebiet B1) . . . . .	395
F8, 8-15(2):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" betroffenen Flächen (Gebiet B1+B2)	396
F8, 8-15(3):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" betroffenen Personenzahl . . . . .	397
F8, 8-16(1):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Umsiedlung" betroffenen Flächen . . . . .	401
F8, 8-16(2):	Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Umsiedlung" betroffenen Personenzahlen . . . . .	402
F8, 8-17(1):	Abstandsabhängige mittlere Individualrisiken in der Schadensart akuter Tod (FS), normiert auf eine Anlage, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien	410
F8, 8-17(2):	Abstandsabhängige mittlere Individualrisiken in der Schadensart Tod durch Leukämie oder Krebs (SS); normiert auf eine Anlage, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien . . . . .	411
F8, 8-17(3):	Abstandsabhängige mittlere Individualrisiken, normiert auf eine Anlage, und Vergleich mit mittleren Individualrisiken aufgrund natürlicher und zivilisationsbedingter Ursachen . . . . .	412
F8, 9-1:	Fortpflanzung von Schätzunsicherheiten durch die Risikorechnung . . . . .	436
F8, 9-2:	Lage lokaler Vertrauensintervalle zu Häufigkeit und Schadensumfang . . . . .	437
F8, 9-3:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der thermischen Energiefreisetzungsraten . . . . .	458
F8, 9-4:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation des Korrekturfaktors zur errechneten Aufstiegshöhe der Aktivitätsfahne . . . . .	459

F8, 9-5:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der Ablagerungsgeschwindigkeiten und "wash-out"-Faktoren . . . . .	460
F8, 9-6:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation des Zeitintervalls bis zum 'Aufsuchen von Häusern' . . . . .	461
F8, 9-7:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der prozentualen Bevölkerungsanteile im Freien . . . . .	462
F8, 9-8:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der Dosis/Wirkungs-Beziehung . . . . .	463
F8, 9-9:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der thermischen Energiefreisetzungsraten . . . . .	465
F8, 9-10:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation des Korrekturfaktors zur errechneten Aufstiegshöhe der Aktivitätsfahne . . . . .	466
F8, 9-11:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der Ablagerungsgeschwindigkeiten und "wash-out"-Faktoren . . . . .	467
F8, 9-12:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation des Zeitintervalls bis zum 'Aufsuchen von Häusern' . . . . .	468
F8, 9-13:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der prozentualen Bevölkerungsanteile im Freien . . . . .	469
F8, 9-14:	Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der Dosis/Risiko-Beziehung . . . . .	470
F8, 9-15:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis) . . . . .	474
F8, 9-16:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis) . . . . .	475
F8, 9-17:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (übertragen auf die Referenzkurve der Studie und "geglättet") . . . . .	478

F8, 9-18:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (übertragen auf die Referenzkurve der Studie und "geglättet") . . .	479
F8, 9-19:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis); Loguniformverteilungen für die Parameter $P_1, \dots, P_t$ . . . . .	482
F8, 9-20:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis); Loguniformverteilungen für die Parameter $P_1, \dots, P_t$ . . . . .	483
F8, 9-21:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis); gestutzte Normalverteilungen für die Parameter $P_1, \dots, P_t$ . . . . .	484
F8, 9-22:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis); gestutzte Normalverteilungen für die Parameter $P_1, \dots, P_t$ . . . . .	485
F8, 9-23:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis); Histogrammverteilungen für die Parameter $P_1, \dots, P_t$ . . . . .	486
F8, 9-24:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis); Histogrammverteilungen für die Parameter $P_1, \dots, P_t$ . . . . .	487
F8, 9-25:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis); Einfluß der Unsicherheit der Freisetzungshäufigkeiten allein . . . . .	489
F8, 9-26:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis); Einfluß der Unsicherheit der Freisetzungshäufigkeiten allein . . . . .	490
F8, 9-27:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis); Einfluß der Unsicherheit der Parameter $P_1, \dots, P_t$ allein . . . . .	491
F8, 9-28:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis); Einfluß der Unsicherheit der Parameter $P_1, \dots, P_t$ allein . . . . .	492
F8, 9-29:	Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis), ermittelt mit dem "WEIBULL-Ansatz" . . . . .	495



TABELLEN

	Seite
F8, 3-1: Kerninventar zum Zeitpunkt des Störfalleintritts . . . . .	16
F8, 3-2: Freisetzungskategorien . . . . .	17
F8, 4-1: Übersicht über einige Ausbreitungsexperimente . . . . .	29
F8, 4-2: Ausbreitungsparameter $\sigma_y$ und $\sigma_z$ für die Rauigkeitsstufe III . . . . .	30
F8, 4-3: Ablagerungsgeschwindigkeit und "washout"-Koeffizient . . . . .	43
F8, 4-4: Standorte der Leichtwasserreaktor-Kernkraftwerke (P > 600 MWe) in der Bundesrepublik Deutschland . . . . .	48
F8, 4-5: Ausbreitungsstatistik, aufsummiert über alle Windrichtungssektoren (Häufigkeit in %) . . . . .	49
F8, 4-6: Radiale Entfernungen (in km) . . . . .	50
F8, 4-7: Stufenbreite sowie Verhältnis der Stufenkonzentration zur Konzentration in der Fahnenachse der Gaußverteilung . . . . .	52
F8, 4-8: Einfluß auf die Ergebnisse bei Variation der Stufenwahl der Treppenkurve (Ersatzfunktion der Gaußverteilung) . . . . .	70
F8, 4-9: Einfluß auf die Ergebnisse bei Variation der Aufstiegshöhe (1 Standort in der Region Oberrheinische Tiefebene, 115 Wetterabläufe) . . . . .	72
F8, 4-10: Einfluß auf die Ergebnisse bei Variation des $\sigma_{z,max}$ (Freisetzungskategorien FK1 bis FK7 unter Berücksichtigung ihrer tatsächlichen Häufigkeiten, alle vier Standortregionen mit je einem Standort, jeweils 115 Wetterabläufe) . . . . .	75
F8, 4-11: Ablagerungsgeschwindigkeit und "washout"-Koeffizient . . . . .	76
F8, 4-12: Niederschlagshäufigkeit in Prozent in Abhängigkeit von der Ausbreitungskategorie und der Niederschlagsintensität (gemessen im Kernforschungszentrum Karlsruhe) . . . . .	78

F8, 4-13:	Einfluß auf die Ergebnisse bei Variation der Parameter der trockenen ( $v_d$ ) und nasalen Ablagerung ( $\lambda_i$ ) (1 Standort in der Standortregion Oberrheinische Tiefebene, 115 Wetterabläufe) . . . . .	80
F8, 4-14:	Einfluß auf die Ergebnisse bei Variation des "washout"-Koeffizienten $\lambda_i$ (Ablagerungsgeschwindigkeit entspricht Referenzwerten) (Freisetzungskategorien FK1 bis FK7 unter Berücksichtigung ihrer tatsächlichen Häufigkeiten; alle vier Standortregionen mit je einem Standort; jeweils 115 Wetterabläufe) . . . . .	81
F8, 4-15:	Einfluß der Parameter bzw. Modellannahmen auf die Erwartungswerte der Kollektivschäden . . . . .	87
F8, 5-1:	Dosisfaktoren für externe Bestrahlung durch die Aktivitätsfahne $g_{EF}$ und durch die Bodenkontamination $g_{EB}$ . . . . .	112
F8, 5-2:	Fahnenkorrekturfaktor $k'_A$ . . . . .	114
F8, 5-3:	Altersabhängige Daten zur Berechnung der Inhalationsdosen . . . . .	117
F8, 5-4:	Gewichtete Inhalations-Dosisfaktoren für Knochenmark zur Berechnung der Frühschäden $g_{IH_{eff}}$ (Gleichung 5.37) . . . . .	118
F8, 5-5(1):	Ganzkörper-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation $g_{IH}$ und Ingestion $g_{IG}$ . . . . .	120
F8, 5-5(2):	Knochenmark-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation $g_{IH}$ und Ingestion $g_{IG}$ . . . . .	121
F8, 5-5(3):	Brust-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation $g_{IH}$ und Ingestion $g_{IG}$ . . . . .	122
F8, 5-5(4):	Lungen-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation $g_{IH}$ und Ingestion $g_{IG}$ . . . . .	123
F8, 5-5(5):	Schilddrüsen-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation $g_{IH}$ und Ingestion $g_{IG}$ . . . . .	124
F8, 5-5(6):	Knochenoberfläche-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation $g_{IH}$ und Ingestion $g_{IG}$ . . . . .	125
F8, 5-5(7):	Gonaden-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation $g_{IH}$ und Ingestion $g_{IG}$ . . . . .	126

F8, 5-6:	Normierte integrale Inkorporation $I_V^O$ [Ci/(Ci/m <sup>2</sup> )] für verschiedene landwirt- schaftliche Produkte und Zeiträume . . . .	127
F8, 6-1:	Zuordnung von Maßnahmen, Gebieten und Zei- ten (genauere Angaben im Text bzw. in Ta- belle F8, 6-3 und -4) . . . . .	133
F8, 6-2:	Dosiskriterien, die in den Rahmenempfeh- lungen angegeben sind bzw. im Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen der deutschen Risikostudie verwendet wurden . . . . .	137
F8, 6-3:	Abschirmfaktoren für externe Strahlung vom Boden (EB) und aus der Aktivitätsfahne (EF) . . . . .	144
F8, 6-4:	Häufigkeitsverteilung der Gebäude, bezogen auf die darin lebenden Personen . . . . .	145
F8, 6-5:	Prozentuale mittlere Aufenthaltshäufigkeit für die Bundesrepublik Deutschland . . . . .	147
F8, 6-6:	Verfügbarkeit von Kellern . . . . .	147
F8, 6-7:	Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen . . .	150
F8, 6-8:	Fahrzeiten während der Umsiedlung . . . . .	153
F8, 6-9:	Abschirmfaktoren gegenüber externer Strah- lung . . . . .	155
F8, 6-10:	Dosiskriterien für den Verzehr landwirt- schaftlicher Produkte . . . . .	158
F8, 6-11:	Bevölkerung und Transportmittel . . . . .	162
F8, 6-12:	Straßennetzverhältnisse . . . . .	162
F8, 6-13:	Kennwerte der Fahrzeitverteilung für zwei Bevölkerungsdichtegruppen . . . . .	165
F8, 6-14:	Kennwerte der Fahrzeitverteilung für drei Bevölkerungsdichtegruppen . . . . .	168
F8, 7-1:	Beobachtete Werte der mittleren Latenz- periode nach therapeutischer Bestrahlung nach /F8, 7-32/ . . . . .	217
F8, 7-2:	Beobachtetes kumuliertes Risiko/Kerma- und Risiko/Dosis-Verhältnis für Leukämie in Nagasaki . . . . .	221
F8, 7-3:	Geschätzte Mittelwerte für das Leukämieri- siko durch Strahlung niedriger LET . . . . .	228

F8, 7-4:	Zusammenstellung der Daten über eine erhöhte Inzidenz von Brustkrebs bei Frauen nach Bestrahlung . . . . .	238
F8, 7-5:	Geschätzte Mittelwerte für das Brustkrebsrisiko (Inzidenz) von Frauen durch Strahlung niedriger LET . . . . .	239
F8, 7-6:	Geschätzte Mittelwerte für das Lungenkrebsrisiko durch Strahlung niedriger LET . .	247
F8, 7-7:	Integrale Krebshäufigkeit pro Kerma-Einheit im Magen-Darm-Trakt und anderen Verdauungsorganen bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki, 1950 bis 1974 (LS-Studie /F8, 7-46/; in Klammern 90-%-Vertrauensbereich) . . . . .	249
F8, 7-8:	Geschätzte Mittelwerte des Krebsrisikos für die Gesamtheit der Verdauungsorgane durch Strahlung niedriger LET . . . . .	253
F8, 7-9:	Risikofaktoren für Inzidenz von Schilddrüsenkrebs bei verschiedenen Gruppen von Kindern (UNSCEAR 1977) . . . . .	259
F8, 7-10:	Beobachtetes Risiko/Kerma-Verhältnis für Leukämie und die Summe aller anderen Krebsarten, summiert über alle Altersgruppen (Hiroshima und Nagasaki) . . . .	268
F8, 7-11:	Erwartete Integralwerte des gesamten Krebsrisikos durch Strahlung niedriger LET, geschätzt aufgrund der Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden . .	271
F8, 7-12:	Erwartungswerte des Risiko/Dosis-Verhältnisses für die Mortalität durch Krebs in den einzelnen Organen bzw. Geweben des menschlichen Körpers durch Strahlung niedriger LET, gemittelt über beide Geschlechter und alle Altersgruppen . . . . .	273
F8, 7-13:	Dosis/Kerma-Konversionsfaktoren (rad/rad) bei allseitiger n- und $\gamma$ -Bestrahlung des menschlichen Körpers (Referenzmensch) . .	278
F8, 7-14:	Mortalitäts-Risikofaktoren für Spätschäden nach ICRP 26 . . . . .	290
F8, 7-15:	Berechnete Mortalitäts-Risikofaktoren für Spätschäden nach /F8, 7-115/ . . . . .	290
F8, 7-16(1):	Bevölkerungsdaten Biblis . . . . .	294
F8, 7-16(2):	Bevölkerungsdaten Philippsburg . . . . .	295

F8, 7-16(3):	Bevölkerungsdaten Neupotz . . . . .	296
F8, 7-16(4):	Bevölkerungsdaten Wyhl . . . . .	297
F8, 7-16(5):	Bevölkerungsdaten Gundremmingen . . . . .	298
F8, 7-16(6):	Bevölkerungsdaten Grafenrheinfeld . . . . .	299
F8, 7-16(7):	Bevölkerungsdaten Isar-Ohu . . . . .	300
F8, 7-16(8):	Bevölkerungsdaten Brokdorf . . . . .	301
F8, 7-16(9):	Bevölkerungsdaten Brunsbüttel . . . . .	302
F8, 7-16(10):	Bevölkerungsdaten Esenshamm . . . . .	303
F8, 7-16(11):	Bevölkerungsdaten Hamm . . . . .	304
F8, 7-16(12):	Bevölkerungsdaten Krümmel . . . . .	305
F8, 7-16(13):	Bevölkerungsdaten Stade . . . . .	306
F8, 7-16(14):	Bevölkerungsdaten Vahnum . . . . .	307
F8, 7-16(15):	Bevölkerungsdaten Borken . . . . .	308
F8, 7-16(16):	Bevölkerungsdaten Grohnde . . . . .	309
F8, 7-16(17):	Bevölkerungsdaten Mülheim-Kärlich . . . . .	310
F8, 7-16(18):	Bevölkerungsdaten Neckarwestheim . . . . .	311
F8, 7-16(19):	Bevölkerungsdaten Würzgassen . . . . .	312
F8, 8-1:	Übersicht der deterministischen Ergebnisse . . . . .	314
F8, 8-2:	Charakteristik der typischen Wetterabläufe . . . . .	317
F8, 8-3:	Charakteristische Größen der Frühschäden (25 Anlagen) . . . . .	357
F8, 8-4:	Eintrittshäufigkeit einer Freisetzung, bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Schaden, Schadenseintrittshäufigkeit und mittlerer Schaden für akute Todesfälle bei verschiedenen Freisetzungskategorien . . . . .	358
F8, 8-5:	Nach Häufigkeiten ausgewählte Punkte der komplementären Häufigkeitsverteilung für Frühschäden (dt.DWB) bei 25 Anlagen . . . . .	360
F8, 8-6:	Charakteristische Größen der Spätschäden (25 Anlagen) . . . . .	373

F8, 8-7:	Nach Häufigkeiten ausgewählte Punkte der komplementären Häufigkeitsverteilung für somatische Spätschäden bei 25 Anlagen . . .	374
F8, 8-8:	Anteil der Todesfälle durch Krebs und Leukämie, die durch unfallbedingte Ganzkörper-Strahlendosen über bzw. unter 5 rem hervorgerufen werden . . . . .	375
F8, 8-9:	Charakteristische Größen der genetisch signifikanten Dosen (25 Anlagen, alle Generationen) . . . . .	389
F8, 8-10:	Vergleich charakteristischer Daten von somatischen Spätschäden und genetisch signifikanten Kollektivdosen . . . . .	390
F8, 8-11:	Charakteristische Größen der von der Gegenmaßnahme "Evakuierung" (Gebiet A) betroffenen Fläche F und Personenzahlen P	393
F8, 8-12:	Charakteristische Größen der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" bis 24 km (Gebiet B <sub>1</sub> ) betroffenen Fläche F	398
F8, 8-13:	Charakteristische Größen der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" (Gebiet B <sub>1</sub> +B <sub>2</sub> ) betroffenen Flächen F und Personenzahlen P . . . . .	399
F8, 8-14:	Charakteristische Größen der von der Gegenmaßnahme "Umsiedlung" (Gebiet C) betroffenen Flächen F und Personenzahlen P	403
F8, 8-15:	Kollektivrisiken der gesundheitlichen Schäden und Erwartungswerte der Kollektivdosen für 25 Anlagen . . . . .	406
F8, 8-16:	Relative Anteile der Freisetzungskategorien an den Kollektivrisiken der gesundheitlichen Schäden und Erwartungswerten der Kollektivdosen für 25 Anlagen . . .	407
F8, 8-17:	Erwartungswerte der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen F für 25 Reaktorblöcke . . . . .	415
F8, 8-18:	Erwartungswerte der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Personen für 25 Reaktorblöcke . . . . .	416
F8, 8-19:	Relative Anteile der einzelnen Freisetzungskategorien an den Erwartungswerten der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen . . . . .	417

F8, 8-20:	Anteile der Expositionspfade an den Fröh-schäden durch die einzelnen Freisetzungskategorien, aufgeschlüsselt aufgrund der Dosisbeiträge . . . . .	419
F8, 8-21(1):	Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden, gemittelt über alle Freisetzungskategorien .	420
F8, 8-21(2):	Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK1 . . . . .	421
F8, 8-21(3):	Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK2 . . . . .	422
F8, 8-21(4):	Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK3 . . . . .	423
F8, 8-21(5):	Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK4 . . . . .	424
F8, 8-21(6):	Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK5 . . . . .	425
F8, 8-21(7):	Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK6 . . . . .	426
F8, 8-21(8):	Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK7 . . . . .	427
F8, 8-21(9):	Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK8 . . . . .	428
F8, 8-22:	Relative Aufteilung der genetisch signifikanten Dosis nach Expositionspfaden .	430
F8, 9-1:	Kondensierte funktionale Ausdrücke $y_1, \dots, y_8$ der Freisetzungshäufigkeiten	440
F8, 9-2:	Zuordnung der Zufallsgrößen in Tabelle F8, 9-1 zu den einzelnen einleitenden Ereignissen und Sicherheitsbehälter-Versagensarten . . . . .	441
F8, 9-3:	Verteilungsparameter der logarithmisch normalverteilten Zufallsgrößen aus Tabelle F8, 9-1 . . . . .	442

F8, 9-4:	Formeln zur Berechnung der Zuschläge aus den Nachbarkategorien . . . . .	443
F8, 9-5:	Kenngrößen der Verteilungen der Freisetzungshäufigkeiten . . . . .	445
F8, 9-6:	Vertrauensgrenzen (90 %) für die aus 1200 simulierten Werten geschätzten Erwartungswerte der Freisetzungshäufigkeiten . . .	446
F8, 9-7:	Vertrauensgrenzen (90 %) für die aus 1200 simulierten Werten geschätzten Mediane der zu erwartenden Freisetzungshäufigkeiten .	447
F8, 9-8(1):	Die quantifizierten Schätzunsicherheiten (ohne Freisetzungshäufigkeiten) . . . . .	449
F8, 9-8(2):	Die quantifizierten Schätzunsicherheiten (ohne Freisetzungshäufigkeiten) . . . . .	450
F8, 9-8(3):	Die quantifizierten Schätzunsicherheiten (ohne Freisetzungshäufigkeiten) . . . . .	451
F8, 9-9:	Verteilungen der unsicheren Parameter (ohne Freisetzungshäufigkeiten) . . . . .	455



## 1. ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von den in den vorangehenden Fachbänden bestimmten Freisetzungskategorien werden im atmosphärischen Ausbreitungsmodell zunächst die Aktivitätskonzentrationen in der Luft und am Boden ermittelt. Daran anschließend werden im Dosismodell die hieraus resultierenden Strahlungsdosen, d.h. die potentiellen Strahlungsdosen, für verschiedene Körperorgane berechnet. Zur Begrenzung möglicher Strahlungsschäden werden verschiedene Schutz- und Gegenmaßnahmen berücksichtigt, die sich weitgehend an Grenzwerten der potentiellen Strahlungsdosen orientieren. Unter Berücksichtigung dieser Maßnahmen werden die potentiellen Strahlungsdosen wesentlich reduziert und die tatsächlich wirksamen Strahlungsdosen, d.h. die zu erwartenden Dosen, berechnet.

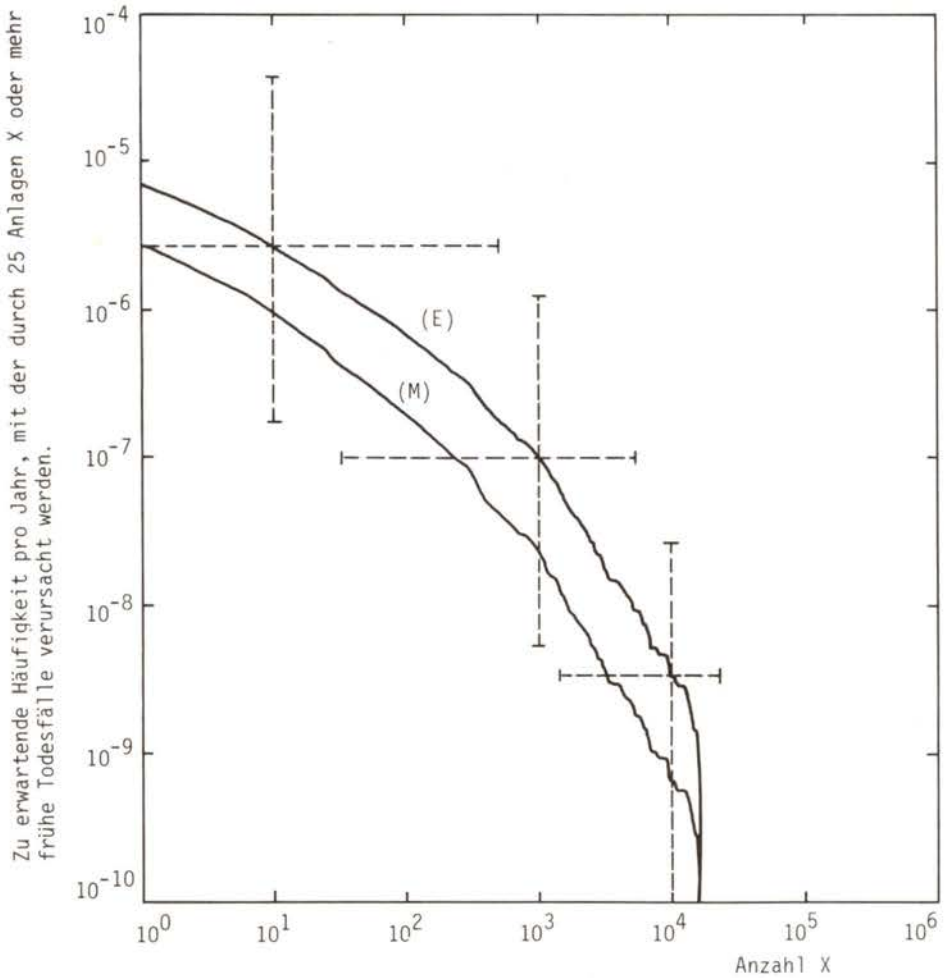
Die jeweilige Anzahl der von akuten und latenten Strahlenschäden betroffenen Personen (frühe bzw. späte Todesfälle) wird unter Berücksichtigung der Bevölkerungsverteilung für 19 in der vorliegenden Studie betrachtete Reaktorstandorte ermittelt. Für Standorte mit Mehrblockanlagen werden dabei die ermittelten Risikobeiträge der Blockzahl entsprechend im Gesamtergebnis der Rechnungen gewichtet und berücksichtigt. Die nach Sektor und Abstand standortspezifische Bevölkerungszahl wird bis zu einer Entfernung von 80 km zugrunde gelegt. Für Entfernungen zwischen 80 und 540 km, womit im wesentlichen Mitteleuropa erfaßt ist, wird mit einer charakteristischen Bevölkerungsdichte von 250 Einwohnern/km<sup>2</sup> gearbeitet, da sich in diesem Bereich lokale oder regionale Unterschiede nicht sehr auf die Untersuchungsergebnisse auswirken. Jenseits dieses Gebietes und bis zu einer Entfernung von 2500 km wird schließlich eine durch zahlreiche dünnbesiedelte Gebiete und Wasserflächen bedingte mittlere Bevölkerungsdichte von 25 Einwohnern/km<sup>2</sup> angenommen.

Die in der vorliegenden Studie verwandte Dosis/Wirkungs-Beziehung für somatische Frühschäden berücksichtigt, daß es in der Bevölkerung Gruppen mit erhöhter Strahlenempfindlichkeit gibt, bedingt etwa durch chronische Infektionen, Magen- und Darmerkrankungen, Verletzungen, Verbrennungen, Operationen und Schwan-

gerschaften. Andererseits sollten jedoch auch die Fortschritte, die in den letzten Jahren in der medizinischen Behandlung erzielt worden sind, berücksichtigt werden. Sie erlauben, für Personen, die einer vergleichsweise hohen Strahlenexposition ausgesetzt worden sind, eine deutlich verbesserte Überlebenschance anzusetzen.

Bild F8, 1-1 zeigt in einem Diagramm "Eintrittshäufigkeit eines Schadens, aufgetragen über dem Schadensumfang" die Ergebnisse der Rechnungen für Frühschäden (frühe Todesfälle durch akute Strahlenkrankheit) unter Berücksichtigung von 25 Anlagen. Die in das Bild eingetragene Kurve, die komplementäre Häufigkeitsverteilung, faßt die Rechenergebnisse bereits zusammen: Sie gibt an, mit welcher Häufigkeit ein bestimmtes Schadensausmaß erreicht oder überschritten wird. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, daß Unfallabläufe, die mit großem Schadensumfang verbunden sind, äußerst selten auftreten. So ergeben sich für Unfallabläufe, die zu 1000 akuten Todesfällen oder mehr führen, Eintrittshäufigkeiten pro Jahr, die unterhalb von 1 : 1 Million liegen. Der größte Kollektivschaden, der in den Rechnungen für die Frühschäden nachgewiesen werden konnte, beträgt 16 600 akute Todesfälle. In den zahlreichen untersuchten Unfallabläufen tritt der Maximumschaden bei einem Unfallablauf auf, der durch ungünstigste Bedingungen für Freisetzung, Wetterablauf und Bevölkerungsverteilung gekennzeichnet ist. Allgemein läßt sich feststellen, daß große Zahlen für Frühschäden nur dann ermittelt werden, wenn große Aktivitätsfreisetzungen mit großer Personenzahl im betroffenen Sektor zusammentreffen und durch Regen eine hohe Bodenkontamination verursacht wird. Akute Todesfälle werden bis zu einem größten Abstand von etwa 20 km errechnet.

In Anlehnung an die Empfehlungen der International Commission on Radiological Protection (1977) wurde in der deutschen Risikostudie für die somatischen Spätschäden (späte Todesfälle aufgrund latenter Strahlenschäden) eine rein proportionale Dosis/Risiko-Beziehung verwandt, die durch den Nullpunkt verläuft und einem Risikofaktor von etwa  $10^{-4}$  pro rem entspricht. Da hierbei von den Beobachtungen bei hohen Dosen auf das mit kleinen Dosen verbundene Risiko extrapoliert wird, dürfte das tat-



Ermittelt mit

- den 50%-Fraktile der zu erwartenden Freisetzungshäufigkeiten (Kurve M) und
- den Erwartungswerten (Kurve E).

Die gestrichelten Balken geben subjektive 90%-Vertrauensbereiche an. Mit 90 % subjektiver Aussagesicherheit liegt der zutreffende Wert innerhalb dieser Bereiche, sofern alle nicht quantifizierten Schätzunsicherheiten vernachlässigbar sind.

Bild F8, 1-1:

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der frühen Todesfälle

sächliche, mit somatischen Spätschäden verbundene Risiko eher über- als unterschätzt werden.

In Bild F8, 1-2 ist die komplementäre Häufigkeitsverteilung für somatische Spätschäden unter Berücksichtigung von 25 Anlagen dargestellt. Für den rechnerisch ermittelten Maximalschaden von rund 108 000 späten Todesfällen gelten die im Zusammenhang mit den Frühschäden gegebenen Erläuterungen analog.

Große Zahlenwerte für die Spätschäden ergeben sich u.a. durch die Berücksichtigung einer großen Anzahl von Personen mit kleinen und kleinsten Strahlenexpositionen. Ein großer Anteil aller errechneten Spätschäden resultiert aus einer unfallbedingten Strahlenexposition von weniger als 5 rem. Diese Dosis entspricht etwa der für eine Person im Laufe eines Lebens aus der natürlichen Strahlung zu erwartenden Strahlenexposition. Die ermittelten Spätschäden würden sich über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten verteilen. Auch würde etwa die Hälfte davon auf Gebiete außerhalb der Bundesrepublik Deutschland entfallen. Dementsprechend läßt sich folgern, daß auch die deutsche Bevölkerung vergleichbaren Risiken durch ausländische Kernkraftwerke ausgesetzt wäre.

Das verwandte Rechenmodell liefert dann umfangreiche Spätschäden, wenn bei großen Aktivitätsfreisetzungen aufgrund spezieller Wetterbedingungen in vergleichsweise großen Gebieten Bodenkontaminationen auftreten, die so gering sind, daß die zugrunde gelegten Referenzwerte für Schutz und Gegenmaßnahmen nicht erreicht werden.

Die für genetische Strahlenschäden ermittelten Ergebnisse sind den für die somatischen Spätschäden berechneten sehr ähnlich. Um möglichen Fehldeutungen vorzubeugen, wurde in der Studie auf eine unmittelbar zahlenmäßige Berechnung von Schadensfällen verzichtet. Es wurde lediglich die für das Ausmaß aller Erbschäden genetisch signifikante Kollektivdosis bestimmt. Für die errechnete Maximaldosis von 344 Mio. man-rem gelten die im Zusammenhang mit den Frühschäden gegebenen Erläuterungen analog. Dergleichen sind auch hier große Zahlenwerte zu erwarten, wenn bei

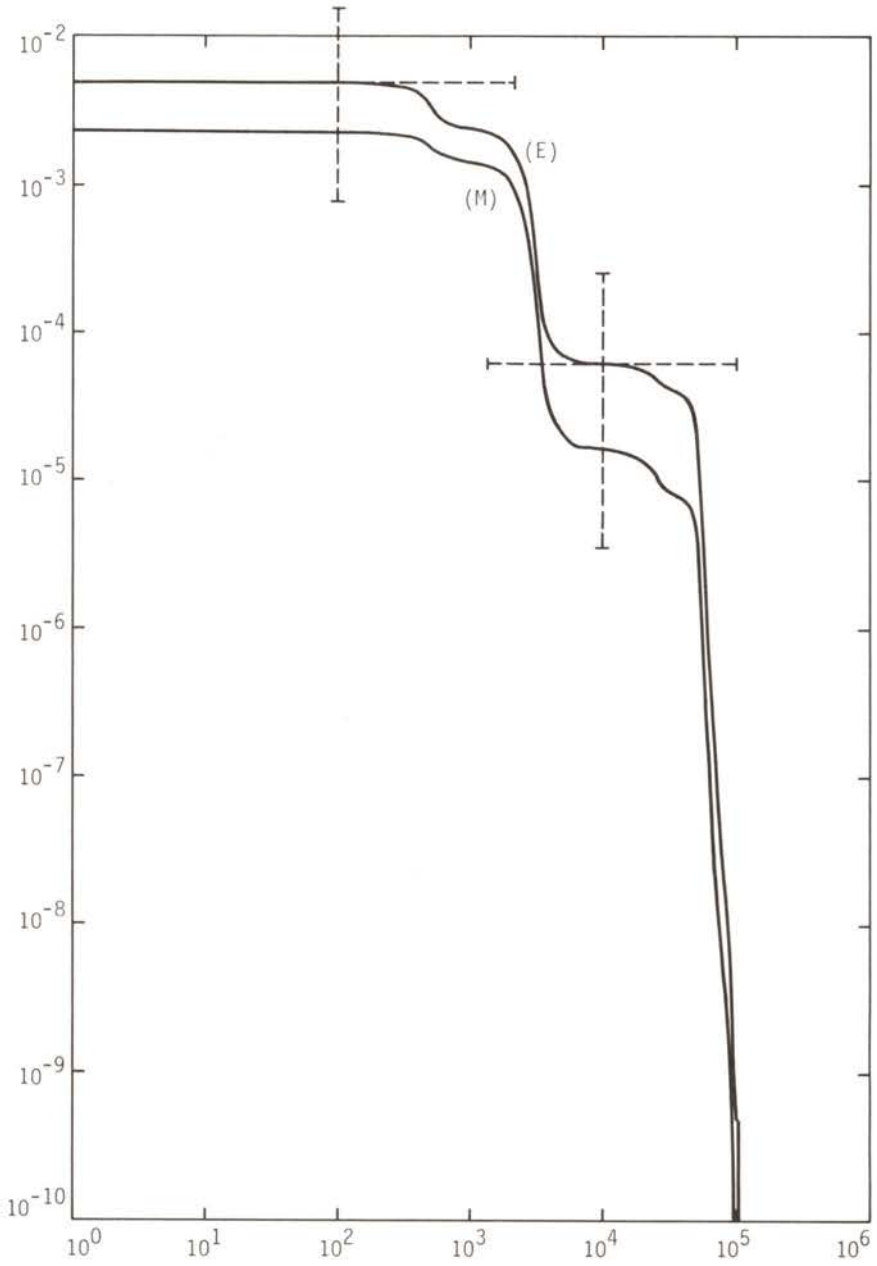


Bild F8, 1-2:

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der späten Todesfälle

großen Aktivitätsfreisetzungen aufgrund spezieller Wetterbedingungen in vergleichsweise großen Gebieten Bodenkontaminationen auftreten, die so gering sind, daß die zugrunde gelegten Referenzwerte für Schutz- und Gegenmaßnahmen nicht erreicht werden.

In den Unfallfolgerechnungen wurden auch Personenzahl und Flächengröße der Gebiete abgeschätzt, die nach Unfällen von Gegenmaßnahmen (Evakuierung, Umsiedlung) betroffen werden können. Die nach den Rahmenrichtlinien für den behördlichen Notfallschutz getroffenen Festlegungen sehen vor, daß bei allen Unfällen die unmittelbare Umgebung der Anlagen und der in Lee liegende Sektor evakuiert werden. Das in seinen Abmessungen vorgegebene Gebiet umfaßt 33 km<sup>2</sup> und weist maximal 40 100, im Mittel 6 300 Personen auf. Strahlendosen, die so hoch wären, daß eine schnelle Umsiedlung zur Verminderung von Frühschäden ratsam erscheinen würde, treten außerhalb des oben genannten Gebietes nur bei den ersten drei Freisetzungskategorien und insgesamt nur bei rund 1 % aller Kernschmelzunfälle auf. Davon könnten zusätzlich maximal 397 km<sup>2</sup>, im Mittel 18 km<sup>2</sup>, bzw. maximal 650 000, im Mittel 4 700 Personen, betroffen sein. Bei fast allen Freisetzungskategorien lassen sich darüber hinaus Gebiete ermitteln, die nicht ausreichend dekontaminiert werden können, so daß im Rechenmodell eine zeitweilige Umsiedlung der Bevölkerung zur Verminderung von Spätschäden zugrunde gelegt werden muß. Als Referenzwert wird eine Strahlendosis, die höher als die während eines Lebens im Mittel aufgenommene natürliche Strahlenexposition ist, festgelegt. Dabei ergeben sich Flächen von maximal rund 3 800 km<sup>2</sup>, im Mittel 610 km<sup>2</sup>, mit einer betroffenen Bevölkerungszahl von maximal 3 150 000, im Mittel rund 153 000. Große Flächen werden fast ausschließlich für Wetterbedingungen, die durch Regenfälle gekennzeichnet sind, ermittelt. Voraussetzung für große Personenzahlen ist eine dichte Besiedlung. In dicht besiedelten Gebieten fließt aber infolge der großen Dach-, Beton- und Asphaltflächen mit dem Regenwasser ein großer Teil der Aktivität in die Kanalisation. Dieser Effekt blieb noch unberücksichtigt.

Abschließend wurden Fehler- und Empfindlichkeitsrechnungen durchgeführt, deren Ergebnisse in den Fehlerbalken der Bilder F8, 1-1 und 1-2 enthalten sind.

## 2. EINLEITUNG

Der Fachband 8 beschreibt die in der Risikostudie benutzten Modelle und Eingabedaten, mit denen die radiologischen Auswirkungen und möglichen Personenschäden nach einem Kernkraftwerksunfall in der Bundesrepublik Deutschland ermittelt wurden.

Ausgangspunkt für die deutsche Risikostudie war die im Jahr 1975 erschienene amerikanische Reaktorsicherheitsstudie /F8, 2-1/ und die Frage, inwieweit die Ergebnisse dieser Studie auf deutsche Verhältnisse übertragen werden können. Hier ergab sich sowohl zur Anlagentechnik als auch im Blick auf die unterschiedlichen Standortverhältnisse eine Reihe von Punkten, die eine unmittelbare Übertragung der Ergebnisse der amerikanischen Studie auf deutsche Verhältnisse nicht zuließen. Es wurde daher eine eigene Studie erforderlich, in der die Anlagentechnik deutscher Kernkraftwerke und die deutschen Standortverhältnisse (Meteorologie, Bevölkerungsverteilung, Schutz- und Gegenmaßnahmen) unmittelbar berücksichtigt werden konnten. Um schrittweise eine Vergleichsbasis für die amerikanischen und deutschen Ergebnisse zu erhalten, wurde die deutsche Risikostudie in zwei Arbeitsphasen (A und B) gegliedert. Für die zur Phase A durchgeführten Untersuchungen wurden dabei auftragsgemäß soweit wie möglich Grundannahmen und Modelle der amerikanischen Studie übernommen.

Die anlagentechnischen Untersuchungen wurden für ein repräsentativ ausgewähltes Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor, die Anlage Biblis B, ausgeführt (Fachbände 1 - 7). Als Ergebnis dieser Untersuchungen erhält man die aus den verschiedenen Unfallabläufen resultierenden Aktivitätsfreisetzungen. Sie sind in einem Satz von 8 Freisetzungskategorien zusammengefaßt. Jede Freisetzungskategorie wird dabei charakterisiert durch den freigesetzten Anteil der betrachteten Radionuklidgruppen, den zeitlichen Verlauf, die freigesetzte thermische Energie und die Eintrittshäufigkeit der Freisetzung. Diese Angaben bilden die Eingangsdaten der Unfallfolgerechnungen. Eine kurze Beschreibung der einzelnen Freisetzungskategorien enthält Kapitel 3.

Für die Unfallfolgerechnungen und zur Risikoermittlung wurden alle Standorte in der Bundesrepublik Deutschland berücksichtigt, an denen zum 1. Juli 1977 Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren mit einer elektrischen Leistung von mindestens 600 MW in Betrieb oder in Bau waren bzw. für die bis zum genannten Stichtag eine atomrechtliche Genehmigung beantragt worden war.

Bild F8, 2-1 zeigt eine schematische Darstellung des gesamten Unfallfolgenmodells. Darin erkennt man die Gliederung in die Modellteile

- atmosphärische Ausbreitung und Ablagerung,
- Dosisberechnung,
- Schutz- und Gegenmaßnahmen sowie
- gesundheitliche Schäden.

Ergebnisse bzw. Zwischenergebnisse sind in rechteckigen Kästchen, Eingabedaten und -parameter in Kästchen mit runden Ecken und Häufigkeits- bzw. Wahrscheinlichkeitszahlen in Rhomben dargestellt. Die anschließenden Erläuterungen folgen dieser schematischen Darstellung.

Ausgehend von den Freisetzungsdaten berechnet das MODELL FÜR DIE ATMOSPHERISCHE AUSBREITUNG UND ABLAGERUNG die zeitliche und örtliche Verteilung der Aktivitätskonzentration in der Luft und der Bodenkontamination in der Umgebung des Unfallorts. Das Modell ist in Kapitel 4 beschrieben; es berücksichtigt

- den Aufstieg der Aktivitätsfahne infolge der freigesetzten thermischen Energie,
- die Einflüsse der Gebäudenachlaufwirbel auf die Verdünnung und das Aufstiegsverhalten der Aktivitätsfahne,
- die zeitliche Variation des Turbulenzzustandes der Atmosphäre, der Windgeschwindigkeit und des Niederschlags (Das Modell berücksichtigt nicht die Windrichtungsänderungen im Verlauf der Ausbreitung.),
- das Abklingen der Radioaktivität als Funktion der Zeit nach dem Unfall,
- die Verarmung der Aktivitätsfahne durch trockene Ablagerung sowie durch Auswaschung bei Niederschlag.



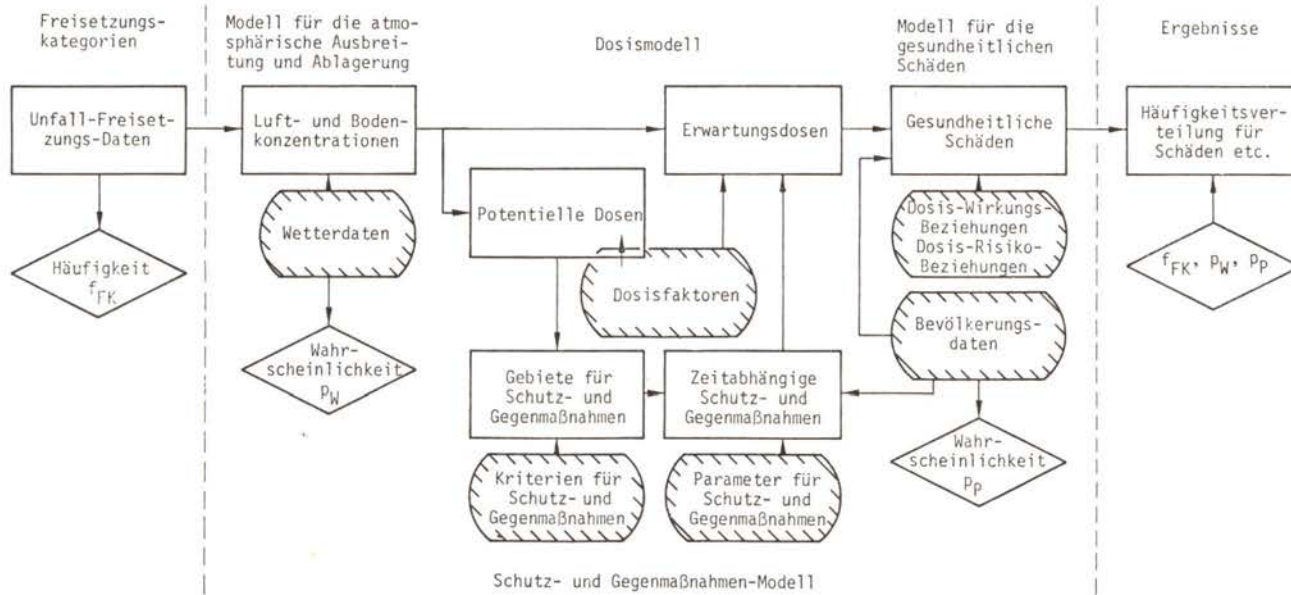


Bild F8, 2-1:  
 Schema des Unfallfolgenmodells

Im DOSISMODELL (Kapitel 5) werden die aus den Aktivitätskonzentrationen resultierenden Strahlungsdosen berechnet. Dabei werden folgende Expositionspfade berücksichtigt:

- externe Bestrahlung durch die vorbeiziehende Aktivitätsfahne,
- externe Bestrahlung durch die Bodenkontamination,
- interne Bestrahlung durch die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität, unterteilt in
  - Inhalation von luftgetragenen Radionukliden aus der Aktivitätsfahne und
  - Inhalation von resuspendierten Radionukliden, die schon am Boden abgelagert waren,
- interne Bestrahlung durch die mit der Nahrung inkorporierte Aktivität.

Ermittelt werden die Dosen für die Organe Knochenmark, Knochenoberfläche, Lunge, Schilddrüse, Brust, Gonaden und für den Ganzkörper. Zunächst werden die "potentiellen" Dosen berechnet, die sich - ohne Berücksichtigung von Schutz- und Gegenmaßnahmen - unmittelbar aus der Konzentration der Aktivitätsfahne und der Bodenkontamination ergeben. Zur weiteren Dosisberechnung wird der Einfluß möglicher Schutz- und Gegenmaßnahmen, die sich weitgehend an Grenzwerten der potentiellen Dosen orientieren, berücksichtigt. Mit dem Einfluß von Schutz- und Gegenmaßnahmen werden die potentiellen Dosen reduziert, man erhält als schadenswirksame Strahlungsdosen die "zu erwartenden" Dosen (Erwartungsdosen).

Im einzelnen wurden bei der Berechnung der zu erwartenden Dosen folgende Arten von SCHUTZ- UND GEGENMASSNAHMEN berücksichtigt:

- Aufsuchen von Gebäuden,
- Evakuierung und Umsiedlung,
- Dekontamination und
- Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte.

Die Kriterien für die Veranlassung dieser Maßnahmen und ihr zeitlicher Ablauf sind in Kapitel 6 beschrieben.

Kapitel 7 enthält die Beschreibung möglicher gesundheitlicher Schäden sowie im weiteren das in der Studie verwendete MODELL FÜR DIE GESUNDHEITLICHEN SCHÄDEN. Folgende Schadensarten werden betrachtet:

- somatische Frühschäden (Tod durch akute Strahlenkrankheit),
- somatische Spätschäden (Tod durch Leukämie und Krebs aufgrund latenter Strahlenschäden) und die
- genetische Belastung.

Für die ersten beiden Schadensarten, die somatischen Schäden, werden zunächst die individuellen Schadenswahrscheinlichkeiten (S) berechnet, mit denen Personen an den jeweiligen Orten aufgrund der nach dem Dosismodell ermittelten zu erwartenden Dosen zu Tode kommen. Im weiteren werden dann mit den Bevölkerungsverteilungen der in der Studie betrachteten Standorte die Kollektivschäden (KS), d.h. die Summe der insgesamt zu erwartenden Schadensfälle ermittelt. Für die genetischen Schäden wurde auf eine unmittelbar zahlenmäßige Berechnung von Schadensfällen verzichtet. Hierzu wurde lediglich die für das Ausmaß aller Erbschäden genetisch signifikante Kollektivdosis bestimmt.

Kapitel 8 enthält die Ergebnisse der Unfallfolgerechnungen und darüber hinaus Angaben zu den von Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen. Des weiteren werden die Ergebnisse in Abhängigkeit wichtiger Parameter aufgeschlüsselt. So werden z.B. die Beiträge der verschiedenen Expositionspfade und Schadensarten zu den Kollektivschäden, aufgeschlüsselt nach den Freisetzungskategorien, angegeben.

Die 19 in der vorliegenden Studie betrachteten Standorte wurden vier meteorologisch repräsentativen Standortregionen zugeordnet. Deren charakteristische Kenngrößen und Meßwerte in Stundenintervallen über ein Jahr wurden für die Berechnung der atmosphärischen Ausbreitung an den jeweils zugeordneten Standorten benutzt. Die Wahl der repräsentativen Daten für die vier Standortregionen wird im Kapitel 4 detailliert beschrieben. Bis 540 km

Entfernung<sup>1)</sup> vom Unfallort wurden die Aktivitätskonzentrationen in der Luft und die Bodenkontaminationen ortsabhängig berechnet. Den somit berechneten Ortsdosen wurden die Bevölkerungsverteilungen unterlegt unter Anwendung der durch die Gegenmaßnahmen gegebenen örtlichen und zeitabhängigen dosismindernden Faktoren. Bis 80 km<sup>1)</sup> wurden standortspezifische und darüber hinaus gemittelte Bevölkerungsdaten benutzt. Die Entfernung 540 km entspricht etwa dem mittleren Radius Mitteleuropas.

Über Entfernungen dieser Größe ändern sich die Ausbreitungsbedingungen und die Bevölkerungsdichte meist entscheidend (Meer, Gebirge usw.). Die Wirkung der über diese Grenze hinausgetragenen Aktivität wird dadurch berücksichtigt, daß - entsprechend WASH-1400 - die radioaktiven Aerosole und das Radiojod auf einer Fläche, die dem Rest Gesamteuropas entspricht, abgelagert werden. Die Durchführung dieses Rechenganges für alle Freisetzungskategorien und 115 repräsentative Wetterabläufe an jedem der 19 Standorte ergab die Gesamtheit der Einzelergebnisse. Von diesen wurden die somatischen Früh- und Spätschäden und die genetisch signifikante Dosis in Form von Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Außerdem wurden die Erwartungswerte für Früh- und Spätschäden und die genetisch signifikante Dosis angegeben. Die Werte für somatische Spätschäden wurden mit den Erwartungswerten für Leukämie und Krebs aufgrund natürlicher und zivilisatorischer Ursachen verglichen.

Die in den Unfallfolgerechnungen ermittelten Ergebnisse entsprechen einer Zusammenfassung von mehr als 600 000 simulierten Unfallabläufen (Kombinationen aus Freisetzungskategorie, Wetterablauf, Windrichtung und Standort). In die Unfallfolgerechnungen, allgemeiner in alle Schritte der Risikoanalyse, gehen an zahlreichen Stellen Schätzungen ein, die mit Unsicherheiten verbunden sind. Sowohl die zu erwartende Häufigkeit eines simulierten Unfallablaufs als auch der zu erwartende Schadensumfang

---

<sup>1)</sup> Diese Entfernungen entsprechen den in WASH-1400 benutzten Abständen von 50 Meilen bzw. 350 Meilen.

sind mit Schätzunsicherheiten für verschiedene Einflußgrößen der Rechnungen behaftet. In Kapitel 9 wird für eine Reihe wichtiger Einflußgrößen versucht, diese Schätzunsicherheiten und ihren Einfluß auf die Aussagesicherheit der Ergebnisse zu quantifizieren.

Das hier beschriebene Modell zur Berechnung der Unfallfolgen enthält Vereinfachungen, wie sie für eine Risikostudie, in der es auf das Ergebnis einer großen Zahl von Fallrechnungen ankommt, gerechtfertigt erscheinen. Eine Anwendung des Unfallfolgenmodells in Standortstudien ist daher nicht unmittelbar möglich.

Die vorliegende Fassung des Unfallfolgenmodells beinhaltet - wie die amerikanische Reaktorsicherheitsstudie WASH-1400 - nicht die Jodtablettenprophylaxe zur Verringerung der Schilddrüsendosis. Dafür gibt es zwei Gründe:

- Die Beurteilung des Risikos durch Jodunverträglichkeit bei Verabreichung von Jodtabletten an eine große Personenzahl ist kontrovers.
- Eine einigermaßen vollständige Erfassung der betroffenen Bevölkerung bei der Verteilung und Veranlassung zur Einnahme der Jodtabletten erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht gewährleistet.

Im Zeitraum von 1 1/2 Jahren zwischen der Veröffentlichung des Hauptbandes dieser Studie und den für die jetzt vorliegenden und im folgenden dargestellten Ergebnisse durchgeführten Rechnungen wurde das Programmsystem UFOMOD einschließlich aller Datensätze und Modellparameter weiterentwickelt. Dabei wurden einige Unstimmigkeiten und Fehler beseitigt; infolgedessen weicht ein Teil der in diesem Fachband wiedergegebenen Kurvenverläufe und Zahlenwerte etwas von denjenigen des Hauptbandes dieser Studie ab. Die Änderungen sind im wesentlichen auf zwei Korrekturen zurückzuführen:

- Abweichungen in den Kurvenverläufen und Zahlenwerten für die Frühschäden (akute Todesfälle) sind bedingt durch den vor

allem im Nahbereich der Standorte korrigierten Datensatz der Bevölkerungsverteilungen.

- Verschiebungen der Zahlenwerte bei den Spätschäden und den von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen ergaben sich nach Korrekturen im Datensatz des Dosismodells und im meteorologischen Modell.

Der Anhang enthält eine detailliertere Darstellung der Unterschiede und ihrer Gründe. Die resultierenden Abweichungen der jetzigen Ergebnisse verändern in keiner Weise die grundsätzlichen Aussagen der Studie.

### 3. AKTIVITÄTSFREISETZUNG AUS DEM SICHERHEITSBEHÄLTER

#### 3.1 Aktivitätsinventar und Freisetzungskategorien

Ausgangspunkt für die Rechnungen mit dem Unfallfolgenmodell ist die Größe und Häufigkeit möglicher Aktivitätsfreisetzungen aus dem Sicherheitsbehälter. Die Analysen hierzu sind in den Fachbänden 1 bis 7 beschrieben. Die Größe der Aktivitätsfreisetzungen wurde als Anteil des Kerninventars zur Zeit des Abschaltens des Reaktors berechnet.

Das Spaltproduktinventar wurde wie in der amerikanischen Reaktorsicherheitsstudie WASH-1400 mit dem Rechenprogramm ORIGEN /F8, 3-1/ errechnet, das auch komplexe Aktivitäts- und Zerfallswegen berücksichtigt. Der zugrunde gelegte Reaktortyp entspricht einem Druckwasserreaktor des Typs Biblis B mit einer thermischen Leistung von 3750 MW. Der Reaktorkern enthält 101,6 t Uran. Bei der Berechnung wurde der Reaktorkern in drei Teile mit unterschiedlichem Abbrand eingeteilt: 10 000, 19 600 und 33 500 MWd/t Uran. Als mittlere Anreicherung zum Zeitpunkt des Abschaltens wurden 1,4 % angenommen.

Für die Berechnung der Unfallfolgen ist nur eine Auswahl der Radionuklide von Bedeutung. In Übereinstimmung mit der amerikanischen Studie wurden die in Tabelle F8, 3-1 zusammengestellten 54 Nuklide der Berechnung der Dosen und gesundheitlichen Schäden zugrunde gelegt.

Neben der freigesetzten Aktivität der die Strahlenbelastung bestimmenden Nuklide werden als Eingangsdaten für das Unfallfolgenmodell noch der Beginn der Freisetzung nach Abschalten des Reaktors, die Dauer bzw. der zeitliche Verlauf, die Freisetzungshöhe und die den Aufstieg der Aktivitätsfahne bestimmende freigesetzte Wärme benötigt. Angaben hierzu finden sich im Fachband 7. Die Vielzahl aller möglichen Unfallabläufe wurde in 8 Freisetzungskategorien in der Reihenfolge der freigesetzten Aktivität eingeordnet. Sie sind in Tabelle F8, 3-2 aufgelistet.

Nuklid	Halbwertszeit (Tage)	Kerninventar (Curie)
Co-58	7,1 E + 01	1,27 E + 06
Co-60	1,9 E + 03	9,63 E + 05
Kr-85m	1,8 E - 01	2,70 E + 07
Kr-85	3,9 E + 03	7,92 E + 05
Rb-86	1,9 E + 01	3,73 E + 04
Kr-87	5,3 E - 02	5,26 E + 07
Kr-88	1,2 E - 01	7,64 E + 07
Sr-89	5,2 E + 01	1,05 E + 08
Sr-90	1,1 E + 04	5,30 E + 06
Y-90	2,7 E + 00	5,72 E + 06
Sr-91	4,0 E - 01	1,28 E + 08
Y-91	5,9 E + 01	1,33 E + 08
Zr-95	6,5 E + 01	1,78 E + 08
Nb-95	3,5 E + 01	1,76 E + 08
Zr-97	7,1 E - 01	1,76 E + 08
Mo-99	2,8 E + 00	1,91 E + 08
Tc-99m	2,5 E - 01	1,66 E + 08
Ru-103	3,9 E + 01	1,37 E + 08
Ru-105	1,8 E - 01	9,79 E + 07
Rh-105	1,5 E + 00	6,59 E + 07
Ru-106	3,7 E + 02	3,96 E + 07
Sb-127	3,9 E + 00	7,93 E + 06
Te-127m	1,1 E + 02	1,51 E + 06
Te-127	3,9 E - 01	7,68 E + 06
Sb-129	1,8 E - 01	4,13 E + 07
Te-129m	3,4 E + 01	6,58 E + 06
Te-129	4,8 E - 02	3,91 E + 07
Te-131m	1,2 E + 00	1,56 E + 07
J-131	8,0 E + 00	1,04 E + 08
Te-132	3,2 E + 00	1,45 E + 08
J-132	9,6 E - 02	1,50 E + 08
J-133	8,7 E - 01	2,02 E + 08
Xe-133	5,3 E + 00	1,99 E + 08
J-134	3,7 E - 02	2,32 E + 08
Cs-134	7,5 E + 02	1,38 E + 07
J-135	2,8 E - 01	1,81 E + 08
Xe-135	3,8 E - 01	4,07 E + 07
Cs-136	1,3 E + 01	4,51 E + 06
Cs-137	1,1 E + 04	7,06 E + 06
Ba-140	1,3 E + 01	1,86 E + 08
La-140	1,7 E + 00	1,93 E + 08
Ce-141	3,2 E + 01	1,80 E + 08
Ce-143	1,4 E + 00	1,59 E + 08
Pr-143	1,4 E + 01	1,55 E + 08
Ce-144	2,8 E + 02	1,09 E + 08
Nd-147	1,1 E + 01	7,32 E + 07
Np-239	2,3 E + 00	2,14 E + 09
Pu-238	3,2 E + 04	1,27 E + 05
Pu-239	8,9 E + 06	2,89 E + 04
Pu-240	2,4 E + 06	3,22 E + 04
Pu-241	5,3 E + 03	6,04 E + 06
Am-241	1,5 E + 05	3,54 E + 03
Cm-242	1,6 E + 02	1,42 E + 06
Cm-244	6,6 E + 03	1,15 E + 05

Kerninventar - Abbrand: 10 000, 19 600, 33 500 Mwd/t Uran

Tab. F8, 3-1:

Kerninventar zum Zeitpunkt des Störfalleintritts



Freisetzungskategorie (FK) Nr.	Beschreibung	Zeitpunkt der Freisetzung h	Dauer der Freisetzung h	Höhe der Freisetzung m	Freigesetzte Energie $10^6$ kJ/h	Häufigkeit der Freisetzung 1/a	Freigesetzter Anteil des Kerninventars							
							Xe-Kr	J <sub>org</sub>	J <sub>2</sub> -Br	Cs-Rb	Te-Sb	Ba-Sr	Ru <sup>2)</sup>	La <sup>1)</sup>
1	Kernschmelzen mit Dampfexplosion	1	1	30	540	$2 \cdot 10^{-6}$	1.0	$7.0 \cdot 10^{-3}$	$7.9 \cdot 10^{-1}$	$5.0 \cdot 10^{-1}$	$3.5 \cdot 10^{-1}$	$6.7 \cdot 10^{-2}$	$3.8 \cdot 10^{-1}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$
2	Kernschmelzen, großes Leck im Sicherheitsbehälter (Ø 300 mm)	1	3	10	15	$6 \cdot 10^{-7}$	1.0	$7.0 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-1}$	$2.9 \cdot 10^{-1}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$	$3.2 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$
3	Kernschmelzen, mittleres Leck im Sicherheitsbehälter (Ø 80 mm)	2	3	10	1	$6 \cdot 10^{-7}$	1.0	$7.0 \cdot 10^{-3}$	$6.3 \cdot 10^{-2}$	$4.4 \cdot 10^{-2}$	$4.0 \cdot 10^{-2}$	$4.9 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$5.2 \cdot 10^{-4}$
4	Kernschmelzen, kleines Leck im Sicherheitsbehälter (Ø 25 mm)	2	3	10	—	$3 \cdot 10^{-6}$	1.0	$7.0 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$5.1 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$6.5 \cdot 10^{-5}$
5 <sup>1)</sup>	Kernschmelzen, Überdrückversagen, Ausfall der Störfallfilter	0	1	10	—	$2 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$1.8 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-7}$	$5.5 \cdot 10^{-9}$	—	—
		1	1	10	—		$2.3 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$9.6 \cdot 10^{-4}$	$6.7 \cdot 10^{-4}$	$6.7 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$	$8.8 \cdot 10^{-6}$
		25	1	10	200		$9.8 \cdot 10^{-1}$	$6.8 \cdot 10^{-3}$	$9.6 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$7.7 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-5}$	$5.3 \cdot 10^{-5}$	$9.5 \cdot 10^{-6}$
6 <sup>1)</sup>	Kernschmelzen Überdrückversagen	0	1	100	—	$7 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-9}$	$1.8 \cdot 10^{-8}$	$4.7 \cdot 10^{-8}$	$3.6 \cdot 10^{-10}$	$5.5 \cdot 10^{-12}$	—	—
		1	1	100	—		$2.3 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$9.6 \cdot 10^{-7}$	$6.7 \cdot 10^{-7}$	$6.7 \cdot 10^{-7}$	$8.0 \cdot 10^{-8}$	$5.5 \cdot 10^{-8}$	$8.8 \cdot 10^{-9}$
		25	1	10	200		$9.8 \cdot 10^{-1}$	$6.8 \cdot 10^{-3}$	$9.6 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$7.7 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-5}$	$5.3 \cdot 10^{-5}$	$9.5 \cdot 10^{-6}$
7	Beherrschter Kühlmittelverluststörfall, großes Leck im Sicherheitsbehälter	0	1	10	9	$1 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$3.7 \cdot 10^{-5}$	$5.3 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$	0.	0.
8	Beherrschter Kühlmittelverluststörfall	0	6	100	—	$1 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$2.1 \cdot 10^{-8}$	$4.1 \cdot 10^{-11}$	$4.1 \cdot 10^{-13}$	0.	0.

<sup>1)</sup> Da die Freisetzung über einen längeren Zeitraum erfolgt, werden die freigesetzten Anteile für drei Zeitintervalle getrennt angegeben.

<sup>2)</sup> enthält Ru, Rh, Co, Mo, Tc

<sup>3)</sup> enthält Y, La, Zr, Nb, Ce, Pr, Nd, Np, Pu, Am, Cm

Tab. F8, 3-2:

Freisetzungskategorien

### 3.2 Kurzbeschreibung der Freisetzungskategorien

#### 3.2.1 Freisetzungskategorie 1 (FK1)

Für die Unfallabläufe dieser Freisetzungskategorie wird unterstellt, daß es nach dem Kernschmelzen, beim Abstürzen geschmolzener Kernmassen in den unteren Teil des Reaktordruckbehälters, zu einer Dampfexplosion kommt, die den Druckbehälter und in unmittelbarer Folge auch den Sicherheitsbehälter zerstört.

Ein solcher Unfallablauf ist äußerst unwahrscheinlich. In den bisherigen Untersuchungen konnte aber noch nicht mit letzter Sicherheit nachgewiesen werden, daß eine Zerstörung des Sicherheitsbehälters durch eine Dampfexplosion ausgeschlossen werden kann. Ein solcher Unfallablauf wurde daher als obere Grenzabschätzung zur Risikoermittlung berücksichtigt. Die Möglichkeit einer Dampfexplosion nach Kernschmelzen, die den Sicherheitsbehälter zerstört, wurde dabei wie in WASH-1400 mit einer bedingten Wahrscheinlichkeit von 1 % bewertet.

Die Unfallabläufe dieser Freisetzungskategorie führen zu den höchsten Spaltproduktfreisetzungen aus der Anlage. Der Hauptanteil der Freisetzung erfolgt unmittelbar nach Abschmelzen des Kerns. Wegen der äußerst kurzen Verweildauer der Spaltprodukte in der Atmosphäre des Sicherheitsbehälters sind deshalb Ablagerungseffekte gering. Des weiteren wird wie in WASH-1400 angenommen, daß die mit einer Dampfexplosion verbundenen Vorgänge im Vergleich zu Kernschmelzunfällen ohne Dampfexplosion zu einer zusätzlichen Spaltproduktfreisetzung führen (Fachband 6). Etwa 80 % des Jodes und 50 % der Alkalimetalle werden freigesetzt. Da der Sicherheitsbehälter zum Zeitpunkt der Zerstörung eine heiße, unter erhöhtem Druck stehende Dampf- und Gasatmosphäre enthält, muß eine relativ hohe Wärmefreisetzung zusammen mit der Aktivitätsfreisetzung angenommen werden. Die Freisetzungshöhe entspricht der der entsprechenden Kategorie der amerikanischen Studie.

### 3.2.2 Freisetzungskategorie 2 (FK2)

Freisetzungskategorie 2 enthält Kernschmelzunfälle, bei denen ein großes Leck (300 mm Ø) im Sicherheitsbehälter angenommen wird. Bei dieser Leckgröße findet langfristig kein Druckaufbau im Sicherheitsbehälter statt. Die aus dem Kernbrennstoff freigesetzte Aktivität gelangt nach relativ kurzer Zeit über das Leck im Sicherheitsbehälter ins Freie. Die Aktivitätsfreisetzung aus der Anlage ist insgesamt niedriger als in Freisetzungskategorie 1.

### 3.2.3 Freisetzungskategorien 3 und 4 (FK3) und (FK4)

Diese Freisetzungskategorien beinhalten Kernschmelzunfälle, bei denen ein mittleres (80 mm Ø) bzw. kleines (25 mm Ø) Leck im Sicherheitsbehälter angenommen wird. Wegen der erheblich kleineren Ausströmraten als bei den vorangegangenen Freisetzungskategorien wird die Verweildauer der Aktivität im Sicherheitsbehälter so groß, daß die Ablagerungseffekte zu einer deutlichen Verringerung der Freisetzung aus der Anlage führen.

### 3.2.4 Freisetzungskategorien 5 und 6 (FK5) und (FK6)

Die Freisetzungskategorien 5 und 6 sind charakteristisch für Kernschmelzunfälle, bei denen der Sicherheitsbehälter zunächst intakt bleibt und erst nach einer Zeitspanne, die von einem Tag bis zu mehreren Tagen dauern kann, durch einen über seine Versagensgrenze ansteigenden Überdruck zerstört wird. Analog zu WASH-1400 wird vor dem Überdruckversagen pessimistisch eine Leckage des Sicherheitsbehälters in Höhe der 10fachen Ausleungsleckage unterstellt. Diese Leckage gelangt in den Ringraum zwischen Sicherheitsbehälter und Betonabschirmung und wird von dort mit Hilfe der Ringraumabsaugung über die Störfallfilter und den Kamin in die Umgebung abgeleitet. Bei FK5 wird im Ge-

gensatz zu FK6 ein Ausfall der Ringraumabsaugung oder der Störfallfilter unterstellt. Die Rechnungen zu den Ereignisabläufen in FK5 und FK6 zeigen, daß die Aktivitätsfreisetzung aus der Anlage über eine große Zeitspanne reicht und dabei für einige Nuklidgruppen die Freisetzung vor dem Überdruckversagen ähnlich hoch ist wie beim Überdruckversagen selbst. Aus diesem Grunde wurden die freigesetzten Anteile für drei Zeitbereiche angegeben.

### 3.2.5 Freisetzungskategorien 7 und 8 (FK7) und (FK8)

Bestimmend für diese Freisetzungskategorien sind vom Notkühlsystem beherrschte Kühlmittelverluststörfälle, die durch einen mittleren oder großen Bruch einer Hauptkühlmittelleitung hervorgerufen worden sind. Bei diesen Störfallabläufen treten lediglich Hüllrohrschäden in begrenztem Umfang auf, ansonsten bleibt der Kern intakt. Es können deshalb nur die in Brennstabhohlräumen angesammelten gasförmigen und leichtflüchtigen Spaltprodukte freigesetzt werden. Im Vergleich zu Kernschmelzunfällen ist diese Freisetzung relativ gering. Für FK7 wurde ein Versagen des Sicherheitsbehälterabschlusses unterstellt. Für FK8 wurde - ebenso wie in WASH-1400 - mit der 10fachen Auslegungsleckage des Sicherheitsbehälters gerechnet, im übrigen ist der Sicherheitsbehälter dicht.

### 3.3 Häufigkeit der Freisetzungskategorien

Alle Unfallabläufe, die zu einer Freisetzung von Aktivität in die Umgebung führen, lassen sich einer der acht Freisetzungskategorien zuordnen. Die Häufigkeiten der einzelnen Freisetzungskategorien ergeben sich aus der Summe der Häufigkeiten der jeweils zugeordneten Ereignisabläufe (Fachband 7).

#### 4. ATMOSPHERISCHE AUSBREITUNG

##### 4.1 Längen- und Zeit-"scales"

Für die Ausbreitung luftgetragener Gase und Aerosole kommt hauptsächlich der als planetarische Grenzschicht bezeichnete Teil der Atmosphäre in Betracht. Die planetarische Grenzschicht kann als eine Schicht (Höhe ca. 1000 m) definiert werden, in der die Luftströmung durch den Druckgradienten getrieben und hauptsächlich durch Bodenreibung, thermische Kräfte infolge Bodenerwärmung bzw. -abkühlung, und Rotation der Erde beeinflusst wird. Die unteren 50 bis 100 m dieser planetarischen Grenzschicht werden als bodennahe Grenzschicht bezeichnet.

Die atmosphärische Ausbreitung erstreckt sich über mehrere Größenordnungen sogenannter Längen- und Zeit-"scales" im Turbulenzspektrum. Ganz grob sind folgende drei "scales" zu erkennen (siehe hierzu auch Bild F8, 4-1 aus /F8, 4-1/):

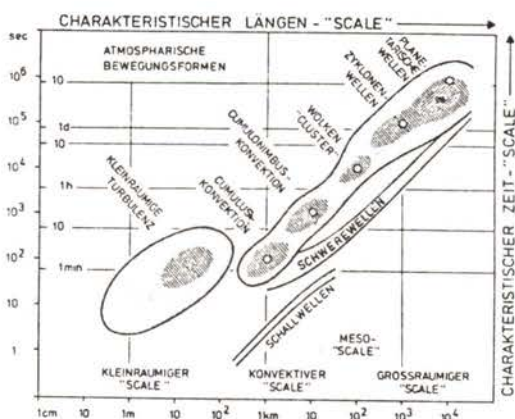


Bild F8, 4-1:

Schematische Darstellung der charakteristischen Längen- und Zeit-"scales" aus /F8, 4-1/

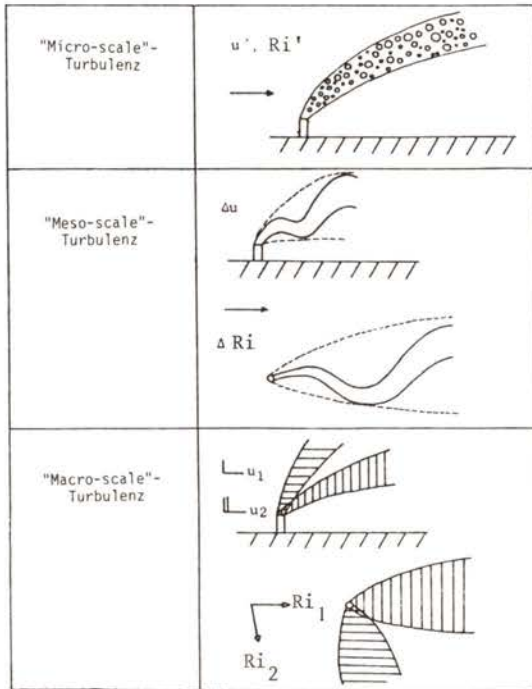
- kleinräumige Turbulenz (micro-scale): zeitliche Schwankungen zwischen Bruchteilen einer Sekunde und knapp 10 Minuten, charakteristische Länge zwischen einigen Zentimetern und knapp hundert Metern. Als Beispiel ist dieser "scale" in Form von kleinen, mit dem Wind driftenden Staubwirbeln zu sehen;
- konvektiver "scale" (meso-scale): Der Zeit-"scale" bewegt sich hier zwischen 10 Minuten und einigen Stunden; der Längen-"scale" liegt zwischen 1 km und einigen hundert Kilometern. Erkennbar ist dieser "scale" an Schönwetterkumuluswolken und dem sogenannten Wolken-"cluster" (zellenförmig auftretende Kumuluswolken vorwiegend in den Tropen);
- großräumiger "scale" (macro-scale): Hier liegen die "scales" zwischen 1 000 und 10 000 km bzw. zwischen 1 und 10 Tagen. Sichtbar wird dieser "scale" durch Tiefdruckgebiete und große planetarische Wellen im Druckfeld.

In Bild F8, 4-2 ist schematisch das Verhalten einer Aktivitätsfahne in diesen drei Bereichen dargestellt. Die Ausführungen gelten für sichtbare Aktivitätsfahnen. Sie sind aber auf die meist unsichtbaren Aktivitätsfahnen übertragbar. Während die Eigenschaften der Fahne im "micro-scale" durch die kleinen Wirbel und die dadurch hervorgerufenen turbulenten Fluktuationen gekennzeichnet sind, rufen größere Wirbel im "meso-scale" die typische Mäanderform von Fahnen hervor; im "macro-scale" werden lediglich die großen Änderungen (wie z.B. der Richtungswechsel) einer Aktivitätsfahne registriert.

#### 4.2 Verhalten von Aktivitätsfahnen

Für Untersuchungen der Ausbreitung von Luftbeimengungen interessiert eine möglichst einfache, aus leicht zu gewinnenden meteorologischen Daten aufgebaute Klassifikation meteorologischer Situationen, die, als Ausbreitungskategorien bezeichnet, die Ausbreitungsvorgänge in parametrisierter Form kennzeichnen.

Am bekanntesten ist die Einteilung von Pasquill /F8, 4-2/. Die Ausbreitungskategorien werden mit Buchstaben von A bis F ge-



$u$  = Windgeschwindigkeit  
 $Ri$  = Richtung

Bild F8, 4-2:

Auswirkungen der Zeit-"scales" auf das Bild einer von einer kontinuierlichen Quelle emittierten Aktivitätsfahne

kennzeichnet, wobei die Turbulenz von A nach F abnimmt. Turbulenzzustände mit überwiegend konvektivem Charakter werden durch die Kategorien A und B beschrieben. D ist die neutrale Kategorie, die vor allem bei starken Winden auftritt und durch die mechanische Turbulenz, verursacht durch die Bodenrauigkeit, geprägt wird. Bei Kategorie C spielt sowohl die mechanische als auch die konvektive Turbulenz eine Rolle. Die Kategorien E und F beschreiben Bedingungen mit stabiler thermischer Schichtung in der Atmosphäre (Bodeninversion).

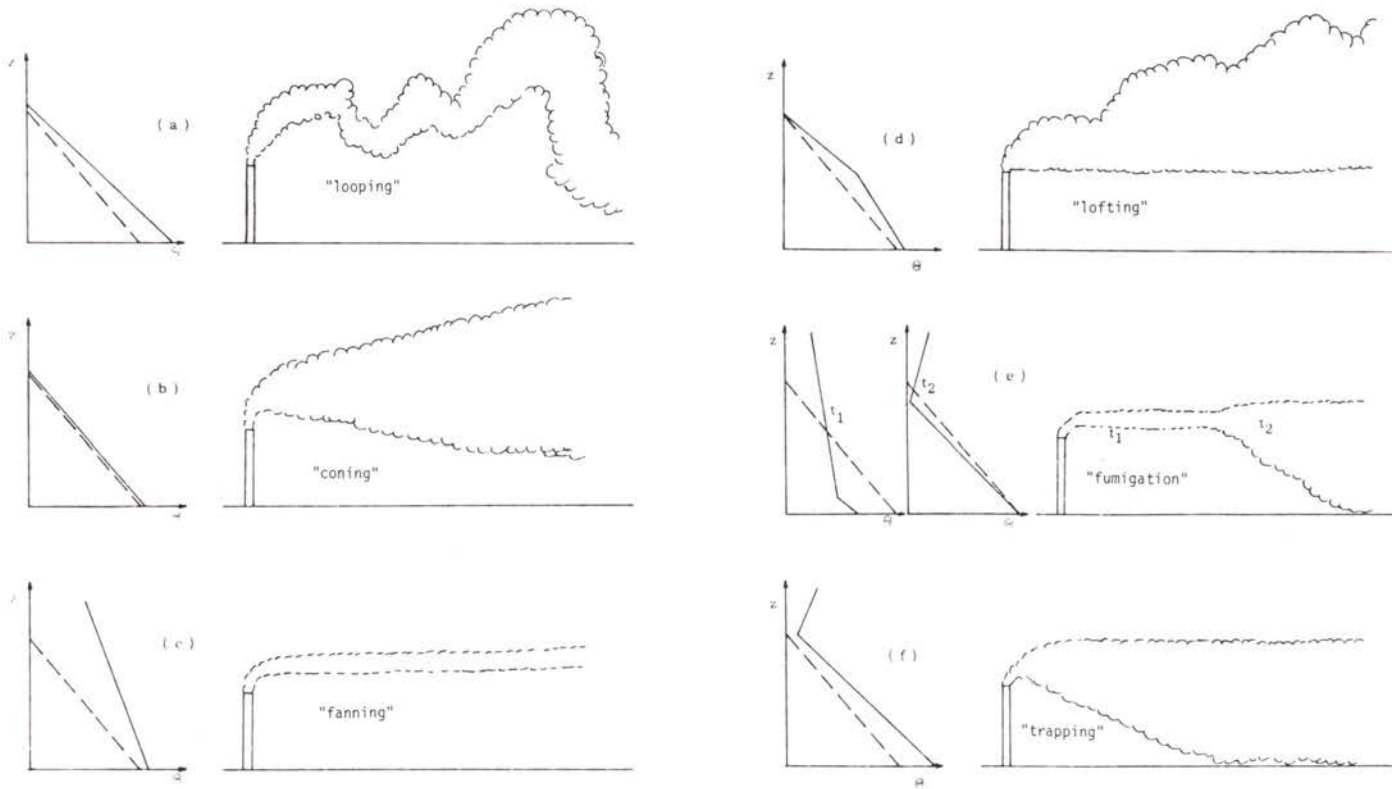


Bild F8, 4-3:  
 Temperaturverlauf und Gestalt einer Aktivitätsfahne



Das Verhalten von Aktivitätsfahnen in der planetarischen Grenzschicht wird in charakteristischer Weise durch die Schichtung der Atmosphäre beeinflusst; umgekehrt liefert die Form einer Aktivitätsfahne einen der einfachsten und deutlichsten Hinweise auf die Art der Schichtung der Atmosphäre.

"looping" (Bild F8, 4-3(a))

Eine wie in Bild F8, 4-3(a) angegebene schleifenförmige Gestalt der Aktivitätsfahne entwickelt sich nur unter instabilen Verhältnissen ( $d\theta/dz < 0$ ,  $\theta$  bedeutet potentielle Temperatur). Sie stellt sich bei Quellen bis max. 100 m Höhe relativ häufig ein, nämlich in bis zu 40 % aller Fälle. Während des "looping" wird in quellnahen Bereichen (innerhalb der ersten 300 m von der Quelle) die größte Bodenkonzentration an Luftbeimengungen erreicht.

"coning" (Bild F8, 4-3(b))

Eine kegelförmige Ausbreitung der Aktivitätsfahne ergibt sich unter neutralen Bedingungen ( $d\theta/dz = 0$ ). Sie liegt über Land in ca. 10 % aller Fälle vor, ist jedoch über Küsten häufiger. Diese Erscheinungsform entwickelt sich bei mäßigen bis starken Winden und bedecktem Himmel und repräsentiert im allgemeinen eine Übergangssituation zwischen stabilen und instabilen Verhältnissen, die meistens am Morgen und am Abend auftritt. Der Querschnitt einer Aktivitätsfahne ist unter neutralen Bedingungen relativ gleichförmig und besitzt die die Anisotropie der atmosphärischen Verhältnisse widerspiegelnde Gestalt einer Ellipse.

"fanning" (Bild F8, 4-3(c))

Diese für stabile Schichtungen ( $d\theta/dz > 0$ ) charakteristische Form einer Aktivitätsfahne tritt nachts in 30 - 40 % aller Fälle auf; ihr Bild ist in der Draufsicht für hinreichend lange Mittelungszeiten  $\tau$  durch eine fächerförmige Verteilung gekennzeichnet. Man spricht hierbei von einem "Mäandern" der Aktivitätsfahne (Bild F8, 4-4).

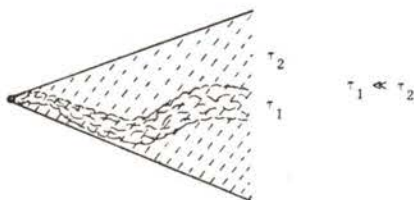


Bild F8, 4-4:

Mäandern der Aktivitätsfahne

"lofting" (Bild F8, 4-3(d))

Hierbei handelt es sich um ein Übergangsphänomen, bei dem die Atmosphäre auf der Unterseite der Aktivitätsfahne stabil, oberhalb davon instabil geschichtet ist.

"fumigation" (Bild F8, 4-3(e))

Diese Erscheinung tritt bevorzugt morgens auf; unter nächtlichen stabilen Bedingungen muß sich dazu eine Form des "fanning" ausgebildet haben. Die Bodenerhitzung durch die aufgehende Sonne verursacht dann in den frühen Morgenstunden, vom Boden her ausgehend, den allmählichen Aufbau einer instabilen Mischungsschicht (in Bild F8, 4-3(e) durch fortschreitende Schrägstriche angedeutet), die beim Erreichen der Aktivitäts-Fahnenhöhe die Erscheinung des "fumigation" (Ausräuchern) bewirkt.

"trapping" (Bild F8, 4-3(f))

Zum Auftreten des "trapping" muß - im Gegensatz zum "lofting" - in Bodennähe eine instabile und darüber eine stabile Schichtung vorliegen. Eine solche Situation tritt häufig über Städten in bis zu 300 m Höhe auf.

#### 4.3 Schadstoffkonzentration in der Aktivitätsfahne

Die Modelle, die die atmosphärische Ausbreitung beschreiben, sind sehr zahlreich und vielfältig, da, wie in Bild F8, 4-1 gezeigt, die Ausbreitungsvorgänge sich über mehrere Größenordnungen der Längen- und Zeit-"scales" erstrecken.

Die Diffusionsgleichung lautet in einem orthotropen Medium:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial C}{\partial z}) \quad (4.1)$$

Dabei bedeutet C die Konzentration an Luftbeimengungen;  $K_x$ ,  $K_y$  und  $K_z$  sind die Diffusionskoeffizienten.

Für den praktischen Gebrauch hat sich eine spezielle Lösung der Diffusionsgleichung als brauchbar erwiesen. Dieses sog. Gaußsche Ausbreitungsmodell wird auch hier verwendet. Die Herleitung dieser Lösung gelingt nur unter einer Reihe von Annahmen und Vereinfachungen /F8, 4-3/. Bei Annahme von Totalreflexion am Erdboden ergibt sich mit dem Gaußschen Ausbreitungsmodell die bodennahe Konzentration  $C_A$  an einem Aufpunkt  $P(x,y,0)$  zu:

$$C_A(x,y,0,h_{\text{eff}}) = \frac{\dot{A}}{\pi \sigma_y(x) \sigma_z(x) \bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{h_{\text{eff}}^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (4.2)$$

Dabei bedeuten  $\dot{A}$  die Quellstärke,  $\sigma_y(x)$  und  $\sigma_z(x)$  den horizontalen bzw. vertikalen Ausbreitungsparameter (Standardabweichung der Gaußschen Glockenkurve),  $\bar{u}$  eine mittlere Windgeschwindigkeit (gültig für die vertikale Schicht, in der die Ausbreitung erfolgt) und  $h_{\text{eff}}$  die effektive Emissionshöhe.

#### 4.4 Ausbreitungsparameter

Der horizontale und vertikale Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  ist ein Maß für Breite und Höhe der Aktivitätsfahne. Von besonderer Bedeutung ist der von Pasquill /F8, 4-3/ angegebene und von Meade und Gifford /F8, 4-4/ fortgeführte Weg zu einer Abschätzung der Ausbreitungsparameter aus einfach zu gewinnenden Meßwerten. Pasquill bestimmte in Diffusionsexperimenten bei bekannter meteorologischer Situation und bekannter Quellstärke durch 10-Minuten-Messungen mit einer Vielzahl von Meßinstrumenten die Bodenkonzentrationsverteilung der emittierten Substanz. Unter der Annahme einer Gaußverteilung konnte er dann Werte für die Streuungen  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  in Abhängigkeit von der Entfernung  $x$  von der Quelle ermitteln und sie den Ausbreitungskategorien zuordnen. Dieses Verfahren stellt das auf dem Gebiet der Luftreinhaltung meist benutzte Schema zur Bestimmung der Ausbreitungsparameter dar.

Da die Messungen im offenen, ebenen Gelände durchgeführt wurden, unterschätzen sie die Diffusion von niedrigen Quellen in bebauten Gegenden. Mittlerweile wurden weltweit mit verschiedenen Tracer-Substanzen Ausbreitungsexperimente durchgeführt. In Tabelle F8, 4-1 sind einige aufgeführt.

Bei allen Experimenten zeigte sich, daß der Untergrund (Rauhigkeit) und die Topographie einen großen Einfluß auf die Ausbreitungsparameter ausüben. Um dem in der Bundesrepublik Deutschland viel stärker gegliederten Gelände gerecht zu werden, führte das Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) eigene Ausbreitungsexperimente durch /F8, 4-5 bis -7/. Als Leitsubstanzen wurden tritiiertes Wasserdampf und halogenierte Kohlenwasserstoffe vom meteorologischen Meßturm oder über einen Kamin in die Atmosphäre emittiert. Die Emissionshöhen betragen 60, 100, 160 und 195 m. Wird die Entfernungsabhängigkeit der Ausbreitungsparameter durch die Potenzansätze der Gleichungen (4.3) und (4.4) ausgedrückt, läßt sich die Konzentrationsverteilung unmittelbar am Erdboden durch eine doppelte Gaußverteilung mit totaler Reflexion am Boden annähern:

$$\sigma_y(x) = (\sigma_t^2 + \sigma_{y0}^2 x^{2p_y})^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

$$\sigma_z(x) = \sigma_{z0} x^{p_z} \quad (4.4)$$

Die Koeffizienten  $\sigma_{z0}$  und  $p_z$  sowie die Koeffizienten  $\sigma_{y0}$  und  $p_y$  eines einfachen Potenzansatzes (analog zu Gleichung 4.3 ohne  $\sigma_t^2$ ) werden durch Approximation der Gleichung (4.2) an die gemessenen Konzentrationen nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt.

Die Koeffizienten  $\sigma_{y0}$  und  $p_y$  wurden so bestimmt, daß  $\sigma_y$  im Bereich des Konzentrationsmaximums in Bodennähe mit dem des einfachen Potenzansatzes übereinstimmt. Das Verfahren ist in /F8, 4-8/ beschrieben. Die Koeffizienten sind in Tabelle F8, 4-2 zusammengestellt. Sie sind gültig für eine in der Umgebung des KfK anzutreffende Rauigkeitslänge  $z_0 = 1,5$  m (Rauigkeitsstufe

Testserie (Projektname)	Tracer	Quelldistanz [m]	Emissions- höhe [m]	Emissions- dauer [min]	Meßhöhe [m]	Zahl der Experi- mente	Referenzen
Harwell, UK (Bepo-Serien)	Ar-41	150 - 10 000	61	40(15 - 60)	0 - 1 000	88	/FB, 4-11/
O'Neill, Nebr. USA (Prärie Grass)	SO <sub>2</sub>	50 - 800	0,46	10	1,5	70	/FB, 4-12 bis -14/
Massachusetts, USA (Round Hill)	SO <sub>2</sub>	50 - 200	0,30	10	1, 5, 2		/FB, 4-15 und -16/
Hanford, Wash. USA (Green Glow u.a.)	ZnS	150 - 25 600	0,35 - 1(65)	30 - 60	1,5(0,2-70)	80	/FB, 4-17 bis -20/
Cape Kennedy, Florida, USA (Ocean Breeze)	ZnS						/FB, 4-21/
Vandenberg, Calif. USA (Dry Gulch)	ZnS						/FB, 4-21/
Arco, Idaho, USA (NRTS-Serie)	Uranin (Ro-59)	150 - 3 400	46	30	1	16	/FB, 4-22 und -23/
Arco, Idaho, USA (FPR-Test I)	ZnS, Spalt- produkte						/FB, 4-24/
Dugway, Idaho, USA (FPR-Test II)	J-131						/FB, 4-25/
Brookhaven, N.Y., USA	Ölnebel, Ar-41	10 - 60 000	2, 108	30 - 90			/FB, 4-26 bis -28/
Brookhaven, N.Y., USA	Uranin (Ro-59)						
Porton, UK	Lycopodium Sporen	100	2	3	0,6	8	/FB, 4-29/
Porton, UK	andere Tracer	"tens of mills"	bis ca. 300		bis 4 000		/FB, 4-2/
Studsvik, Ågesta, Schweden	Rauch (fotogr.)	250 - 4 000	24, 50, 87	60		157	/FB, 4-30/
Cadarache und ande- re Orte, Frankreich	Uranin (Ro-59)	400 - 10 000	5 - 50	30 - 60	1	100	/FB, 4-31 bis -33/
Mainflingen, Deutschland	Natrium- salizylat	5 500	114	45 - 150	2	9	/FB, 4-34 und -35/
Pretoria, Südafrika	ZnCdS	0 - 700	7 - 40	3 - 10	1	27	/FB, 4-36/
Ispra, Italien	SF <sub>6</sub>	130 - 3 500	40	10	1		/FB, 4-37/
Brookhaven, N.Y., USA	Ölnebel (fotogr.)	0 - 1 000	7			18	/FB, 4-38/
KFA Jülich, Deutschland	Cu-64 Ho-166	50 - 11 000	50, 100	30, 60	1	>70	/FB, 4-39 und -40/
St. Louis, Ohio, USA	Zink-Cad- mium-Sulfid	800 - 16 000	bodennah	60	1	42	/FB, 4-41/
KfK, Karlsruhe, Deutschland	HTO, CF <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> CFC <sub>13</sub>	100 - 10 000	60,100, 160,195	20, 30, 60	0,5	73	/FB, 4-5 bis -7/
LASL, Los Alamos USA	Fluoreszie- rende Par- tikel	500 - 6 000	bodennah	8 - 15	1 - 32	13	/FB, 4-42/
NILU, Norwegen	SF <sub>6</sub>	0 - 1 400	1,40	15 - 40	1,2	9	/FB, 4-43/

Tab. F8, 4-1:

Übersicht über einige Ausbreitungsexperimente

Ausbreitungskategorie	$\sigma_t$	$\sigma_{y0}$	$p_y$	$\sigma_{z0}$	$p_z$	$\sigma_{z,max}$ [m]	Windprofil- exponent [p]
A	} 40	} 0,65	} 0,875	0,039	1,42	2 000	0,07
B				0,020	1,38	1 500	0,13
C		0,43		0,052	1,15	} 1 000	0,21
D		} 0,34		0,10	1,01		0,34
E				0,66	0,61		0,44
F				1,30	0,45		0,44

Tab. F8, 4-2:

Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  für die Rauigkeitsstufe III

III, d.h. Wald und hohe Gebäude). Bei Ausbreitungsrechnungen für Gelände der Rauigkeitsstufe II ( $z_0 = 0,3$  m) werden die Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  nach einem in /F8, 4-8/ angegebenen Verfahren transformiert. Gelände der Rauigkeitsstufe I kommt an den betrachteten Standorten nicht vor. In den Bildern F8, 4-5 bis -8 sind die Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  für die Rauigkeitsstufen II und III dargestellt.

Ein Vergleich der Ausbreitungsparameter der Rauigkeitsstufe III mit den in WASH-1400 verwendeten Werten zeigt deutliche Unterschiede. So ist der horizontale Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  der deutschen Studie etwa um das 1,5- bis 2fache größer, für die stabilen Ausbreitungskategorien sogar bis um etwa das 4fache. Der vertikale Parameter  $\sigma_z$  liegt insgesamt noch etwas höher.

Die Unterschiede der Ausbreitungsparameter beruhen auf der Verschiedenartigkeit der Ausbreitungsexperimente, die zur Ermittlung der Parameter durchgeführt wurden. Die in WASH-1400 verwendeten Werte basieren auf Experimenten, die über glattem Gelände (Rauigkeit etwa 0,03 m) mit einer kurzen Sammelzeit von 3 min und mit bodennaher Emission durchgeführt wurden. Außerdem erstreckte sich das Versuchsfeld nur bis etwa 1 km Quelldistanz.

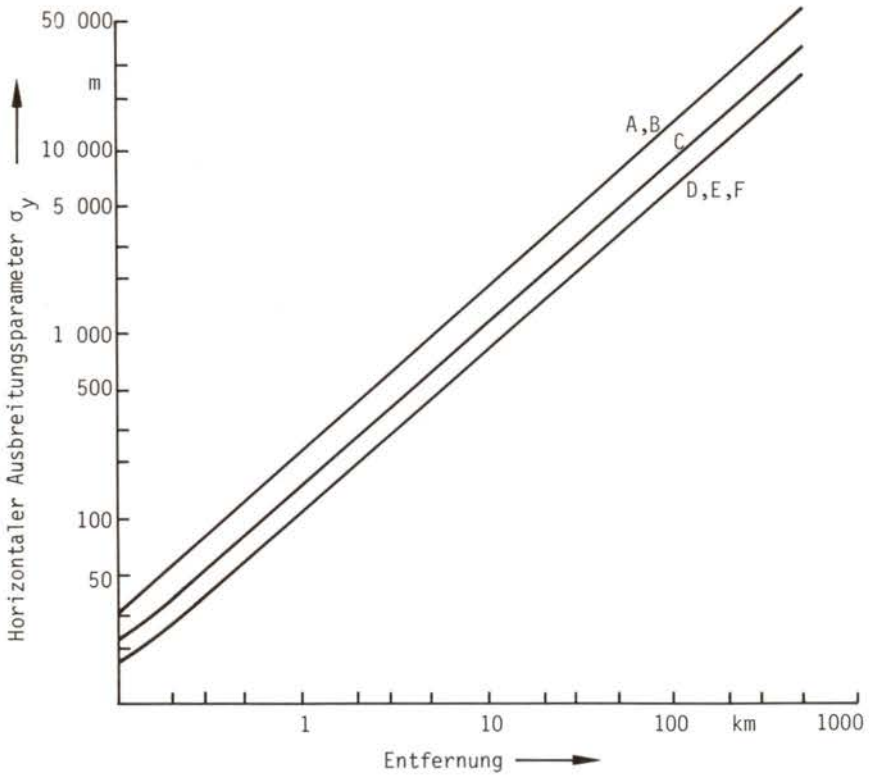


Bild F8, 4-5:

$\sigma_y$  für die Rauigkeitsstufe II

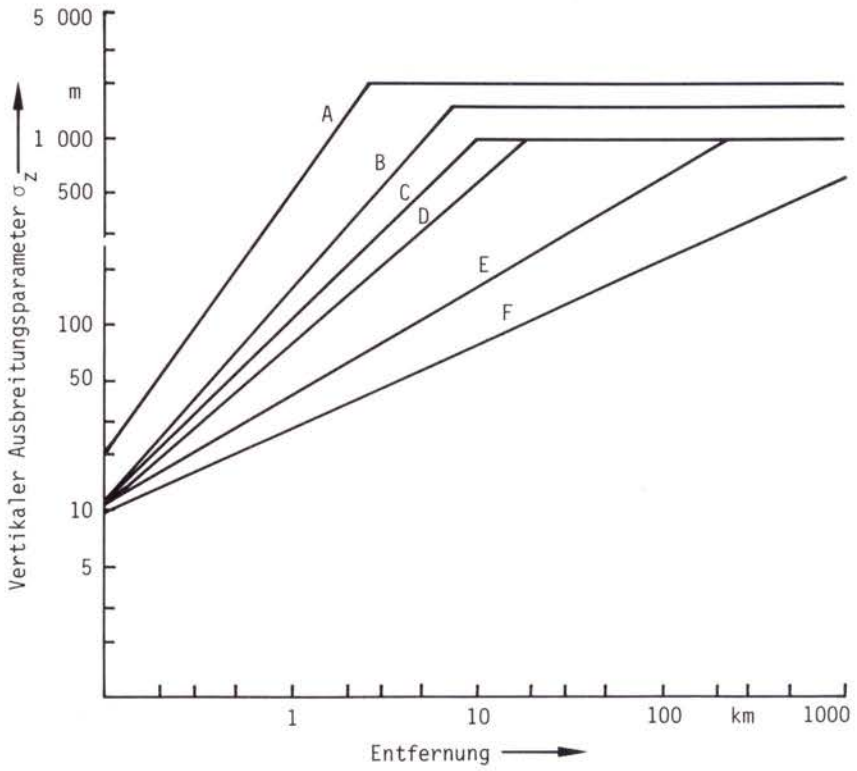


Bild F8, 4-6:

$\sigma_z$  für die Rauigkeitsstufe II



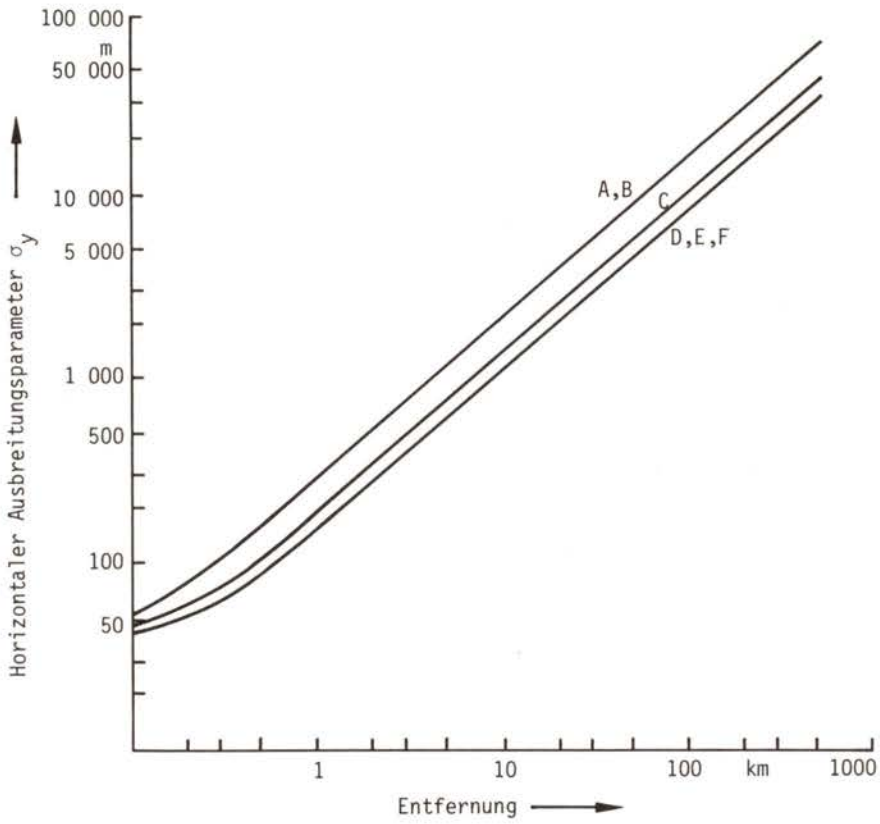


Bild F8, 4-7:

$\sigma_y$  für die Rauigkeitsstufe III

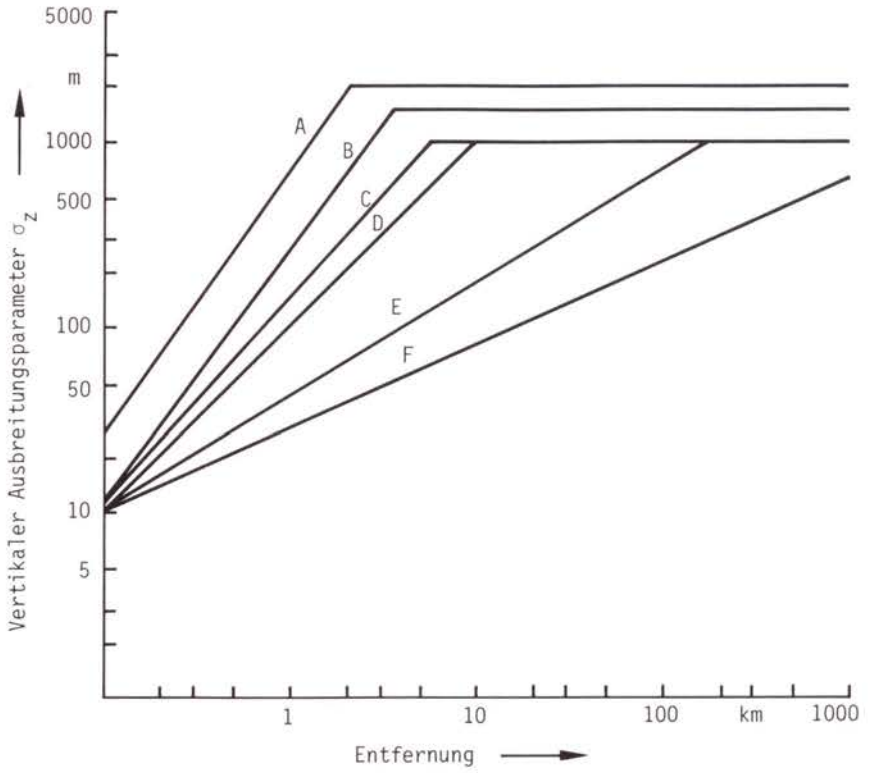


Bild F8, 4-8:

$\sigma_z$  für die Rauigkeitsstufe III

Die deutschen Experimente wurden dagegen über stark strukturiertem Gelände bei einer Sammelzeit von 30 min durchgeführt. Die Emissionshöhen waren mindestens 60 m, und das Versuchsfeld erstreckte sich teilweise über 10 km. Die deutschen Parameter berücksichtigen daher Windrichtungsänderungen während einer halben Stunde besser, außerdem werden sie dem in der Bundesrepublik viel stärker gegliederten Gelände gerecht.

Der vertikale Ausbreitungsparameter  $\sigma_z$  wird bei Erreichen des von der Ausbreitungskategorie abhängigen Wertes  $\sigma_{z,\max}$  konstant gehalten. Eine Verminderung der Bodenkonzentration erfolgt danach nur noch durch die horizontale Ausbreitung. Dies entspricht dem Mischungshöhenkonzept, bei dem eine Sperrschicht den Turbulenzaustausch zu größeren Höhen unterbindet. Nach /F8, 4-9/ besteht zwischen Mischungshöhe  $h_m$  und  $\sigma_{z,\max}$  folgende Beziehung:

$$\sigma_{z,\max} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} h_m \approx 0,8 h_m \quad (4.5)$$

Die Mischungshöhe ist vor allem durch die Sonneneinstrahlung bestimmt. Daher steigt  $h_m$  vom Morgen zum Nachmittag hin an und sinkt im Laufe des Abends und in der Nacht ab. Neben diesem täglichen Gang tritt auch noch eine jahreszeitliche Schwankung mit großen Höhen im Sommer und niedrigen Höhen im Winter auf. Wie die Sonneneinstrahlung, so steigt auch die Mischungshöhe zum Äquator hin an. In Bild F8, 4-9 sind mittlere nachmittägliche Mischungshöhen dargestellt, wie sie im Winter in verschiedenen geographischen Breiten auftreten. Die höchsten Werte und die geringste jahreszeitliche Schwankung zeigt die in den Subtropen gelegene Station Salta in Argentinien ( $25^\circ\text{S}$ ). In Nashville, USA ( $36^\circ\text{N}$ ), liegen die niedrigsten Werte noch bei 1 000 m. In Essen ( $51^\circ\text{N}$ ) dagegen gehen die Werte bis zu 400 m herunter. Man kann dieses Ergebnis extrapolieren: Weiter zum Äquator hin liegt das jahreszeitliche Minimum noch höher und der Jahresgang verflacht noch mehr, während sich zu den Polen hin die Mächtigkeit der Mischungsschicht weiter verringert.

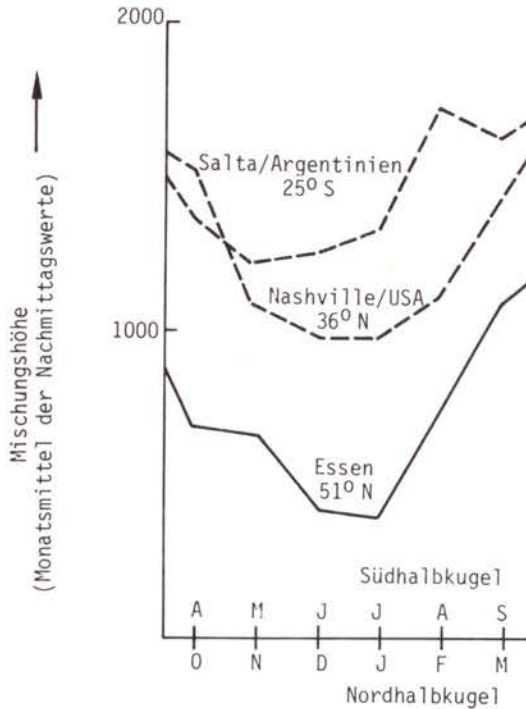


Bild F8, 4-9:

Mischungshöhen im Winter in verschiedenen geographischen Breiten (Monatsmittel der Nachmittagswerte) aus /F8, 4-10/

#### 4.5 Gebäudeeinfluß

Bei Freisetzung in Bodennähe oder in Gebäudehöhe bewirken die an Hindernissen erzeugten Wirbel eine verstärkte atmosphärische Verdünnung. Dies kann sich bis in Entfernungen der 30- bis 50-fachen Gebäudehöhe auswirken. Diese verstärkte Verdünnung wird nach Slade /F8, 4-44/ wie folgt berücksichtigt:

$$\frac{C_A \bar{u}}{\dot{A}} = [\pi \sigma_Y(x) \sigma_Z(x) + c \cdot F]^{-1} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_Y^2} - \frac{h_{eff}}{2\sigma_Z^2}\right) \quad (4.6)$$

mit

- F = angeströmte Fläche
- c = 1,5, wenn  $h_{eff} < 20$  m,
- = 0, wenn  $h_{eff} > 20$  m

#### 4.6 Aufstieg der Aktivitätsfahne

Die effektive Emissionshöhe  $h_{\text{eff}}$  in Gleichung (4.2) setzt sich aus der geometrisch bedingten Freisetzungshöhe  $h_0$  und der Überhöhung  $\Delta h$  infolge der freigesetzten thermischen Energie zusammen.

$$h_{\text{eff}} = h_0 + \Delta h \quad (4.7)$$

Für  $\Delta h$  werden die Ansätze von Briggs /F8, 4-45 und -46/ verwendet, die Nester /F8, 4-47/ für den Fall einer Flächenquelle ( $D_A \neq 0$ ) erweitert hat.

#### ● Ausbreitungskategorie A bis D

Für  $x \leq 6,37 x^*$

$$\Delta h_n(x) = (D_A^3 + (1,6)^3 \cdot F^* \frac{x^2}{u^3})^{1/3} - D_A \quad (4.8)$$

Für  $x > 6,37 x^*$

$$\Delta h_n(x) = \Delta h_n(6,37 x^*) \quad (4.9)$$

Für  $F^* < 55 \frac{m^4}{s^3}$

$$x^* = 13,89 (F^*)^{5/8} \quad (4.10)$$

Für  $F^* \geq 55 \frac{m^4}{s^3}$

$$x^* = 34,22 (F^*)^{2/5} \quad (4.11)$$

Jenseits der Entfernung  $x = 6,37 x^*$  erfolgt kein weiterer Aufstieg der Aktivitätsfahne, da durch Vermischung mit der Umgebungsluft der Auftrieb Null wird.

● Ausbreitungskategorie E und F

$$\Delta h_s = (D_A^3 + (2,9)^3 \frac{F^*}{\bar{u} \cdot s})^{1/3} - D_A \quad (4.12)$$

Falls  $\Delta h_n(x) < \Delta h_s$ , gilt:

$$\Delta h_s = \Delta h_n(x) \quad (4.13)$$

mit 
$$s = \frac{g}{T_O} \frac{\overline{\partial \theta_n}}{\partial z} \quad (4.14)$$

Der Ansatz für  $\frac{\overline{\partial \theta_n}}{\partial z}$  wurde /F8, 4-95/ entnommen.

$$\frac{\overline{\partial \theta_n}}{\partial z} = (0,202 C - 0,032 C^2) \frac{h_{eff}^{0,41} - h_o^{0,41}}{(h_{eff} - h_o) \cdot 0,41} \quad (4.15)$$

Die Symbole bedeuten:

A	Abgasmenge, Nm <sup>3</sup> /h
C	= 2 für Kategorie F bzw. = 1 für Kategorie E
D <sub>A</sub>	Durchmesser eines Kreises, der dieselbe Fläche besitzt, wie das als Rechteck angenommene Reaktorgebäude mit der Breite B und Höhe H, $D = 2 \sqrt{\frac{B \cdot H}{\pi}}$
$\frac{\overline{\partial \theta_n}}{\partial z}$	über die Überhöhung gemittelter Gradient der potentiellen Temperatur in K/m
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Aktivitätsfahne, K
F*	Emissionswert, $F^* = \frac{g}{T_O} \cdot \frac{A \cdot \Delta T}{3600 \cdot \pi} \approx 8,84 \left[ \frac{m^4/s^3}{MW} \right] Q_H$
g	Erdbeschleunigung, m/s <sup>2</sup>
p	Windprofilexponent, abhängig vom Turbulenzzustand der Atmosphäre (Tabelle F8, 4-2)
Q <sub>H</sub>	der Aktivitätsfahne mitgegebene Wärmeleistung, MW
s	Stabilitätsparameter, 1/s <sup>2</sup>
T <sub>O</sub>	273,2 K

$\bar{u}$  über die Höhe  $h_{\text{eff}}$  gemittelte Windgeschwindigkeit  

$$= \frac{h_{\text{eff}} u(h_{\text{eff}}) - h_0 u(h_0)}{(h_{\text{eff}} - h_0) \cdot (p+1)}$$

x Abstand des Aufpunktes von der Quelle, m

Die Berechnung der Aufstiegshöhe  $h_{\text{eff}}$  erfolgt mit Hilfe der obigen Gleichungen auf iterative Weise.

#### 4.7 Windgeschwindigkeit

Zur Berechnung der mittleren Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  wird das Windprofil

$$u(z) = u_0 \left(\frac{z}{h_0}\right)^p \quad (4.16)$$

über die effektive Emissionshöhe  $h_{\text{eff}}$  gemittelt:

$$\bar{u} = \frac{1}{h_{\text{eff}}} \int_0^{h_{\text{eff}}} u(z) dz = \frac{u(h_{\text{eff}})}{1+p} \quad (4.17)$$

mit

$u(h_{\text{eff}})$  = Windgeschwindigkeit in der effektiven Emissionshöhe  $h_{\text{eff}}$ , m/s

$u_0$  = Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe  $h_0$ , m/s

$p$  = Windprofilexponent, abhängig vom Turbulenzzustand der Atmosphäre (Tabelle F8, 3-2)

Wird  $\bar{u} < 1$  m/s berechnet, wird der Wert 1 m/s verwendet. Für  $h_{\text{eff}} < 100$  m wird zur Berechnung von  $\bar{u}$  Gleichung (4.17) bis zu einer repräsentativen Höhe  $h_{\text{rep}}$  integriert.  $h_{\text{rep}}$  teilt die vertikale Konzentrationsverteilung in zwei gleich große Hälften. Die obere Begrenzung für  $h_{\text{rep}}$  wurde zu 100 m gewählt.  $h_{\text{rep}}$  wird so bestimmt, daß eine asymptotische Annäherung an diese obere Begrenzung erfolgt.

Die repräsentative Höhe  $h_{rep}$  wurde eingeführt, um bei niedrigen effektiven Emissionshöhen eine zu niedrige obere Integrationsgrenze zu vermeiden. Für die hier verwendeten großen Queldistanzen (bis 540 km) ist anzunehmen, daß die Ausbreitung der Schadstoffe nicht allein durch die Windgeschwindigkeit in Höhen unter 100 m bestimmt ist.

#### 4.8 Ablagerung

Unter dem Einfluß der Gravitationskraft, durch Auftreffen auf Hindernisse nahe dem Erdboden oder Auswaschen bei Niederschlag werden Aerosole und Jod aus der Atmosphäre entfernt. Alle diese Prozesse nennt man zusammenfassend Ablagerung. Bei Niederschlag spricht man von nasser Ablagerung oder "washout", bei trockener Ablagerung von "fallout". Für Aerosole mit einem Partikeldurchmesser  $> 15 \mu m$  bewirkt die Sedimentation den Haupteffekt der trockenen Ablagerung. Für kleinere Partikel überwiegen die Prozesse der Auswaschung, des Auftreffens und des Abscheidens an Hindernissen. Die Fallgeschwindigkeit ist in diesen Fällen kleiner als die Vertikalbewegungen der Atmosphäre.

In der Freisetzungsmatrix (Tabelle F8, 3-2) wird zwischen elementarem und organischem Jod unterschieden. Da der Anteil des organischen Jods gegenüber dem des elementaren klein ist und außerdem die Ablagerungsgeschwindigkeit organischen Jods nur ein Hundertstel des elementaren Jods beträgt, wird der Anteil des freigesetzten organischen Jods dem des elementaren zugeschlagen. Im folgenden wird daher nur von elementarem Jod gesprochen.

Die Ablagerungsraten hängen von folgenden Parametern ab:

- Beschaffenheit der Vegetation und des Untergrundes,
- physiologischer Zustand der Pflanzen,
- atmosphärische Turbulenz,
- Feuchte,
- Windgeschwindigkeit,
- Beschaffenheit des Niederschlags (Schauer, Aufgleitregen, Niesel, Tropfendurchmesser, Verteilung der Tröpfchen),
- Wasserlöslichkeit der Aerosole, Koagulation,



- Partikeldurchmesser der Aerosole,
- chemische Zusammensetzung und Reaktionsverhalten der Aerosole.

Bis jetzt existieren keine praktikablen Rechenmodelle, die alle diese Einflüsse ihrer Bedeutung nach ausreichend genau modellieren und den Rechenaufwand in vertretbaren Grenzen halten.

#### ● Trockene Ablagerung

Üblicherweise wird daher zur Berechnung der trockenen Ablagerung das sogenannte "source depletion"-Modell nach /F8, 4-48/ verwendet. Ohne die genauen physikalischen und chemischen Vorgänge zu beschreiben, wird Proportionalität zwischen Ablagerungsrate und momentaner bodennaher Luftkonzentration angenommen. Dieses Verhältnis wird Ablagerungsgeschwindigkeit  $v_d$  genannt. Das Aktivitätsinventar der Fahne wird jeweils um den Betrag verringert, der sich ablagert.

Die in der Literatur aufgrund von Feldexperimenten, Windkanaluntersuchungen und theoretischen Überlegungen angegebenen Ablagerungsgeschwindigkeiten schwanken über mehrere Zehnerpotenzen /F8, 4-49/.

Die Ablagerungsgeschwindigkeiten für Jod und Aerosole werden zunächst in Anlehnung an WASH-1400 zu  $1 \cdot 10^{-2}$  m/s angenommen (Edelgase lagern sich nicht ab). Dieser mittlere Wert stützt sich auf /F8, 4-50 bis -66/. In Abschnitt 4.14 wird untersucht, welchen Einfluß geänderte Ablagerungsgeschwindigkeiten auf die Schadensberechnung ausüben. Die Ablagerungsrate der Aktivität ergibt sich zu:

$$\dot{C}_B = v_d C_A(0) \quad (4.18)$$

wobei  $v_d$  die Ablagerungsgeschwindigkeit in m/s und  $C_A(0)$  die Aktivitätskonzentration in der bodennahen Luft in Ci/m<sup>3</sup> ist. Das vertikale Konzentrationsprofil bleibt in diesem Modell unverändert, obwohl der physikalische Vorgang des Abmagerns si-

cherlich eine Veränderung der vertikalen Konzentrationsverteilung bewirkt. Der innerhalb eines Wegintervalles  $\Delta x$  abgelagerte Anteil der Aktivitätsmenge wird vom anfänglichen Quellterm abgezogen. Der Anteil der Aktivitätsmenge, der in der Fahne verbleibt, ergibt sich zu:

$$f_t = \exp\left(-\frac{v_d \Delta x}{\bar{z} \bar{u}}\right) \quad (4.19)$$

Es bedeuten:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x}{\bar{u}} &= \Delta t \text{ Zeit der Aktivitätsfahne im Wegintervall } \Delta x \\ \bar{z} &= \frac{1}{C_A(0)} \int_0^{\infty} C_A(z) dz = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_z \exp \frac{h_{\text{eff}}^2}{2 \sigma_z^2} \end{aligned} \quad (4.20)$$

$\bar{z}$  ist die Höhe, die sich ergibt, sofern die gesamte Aktivität in vertikaler Richtung über einer Flächeneinheit in eine Säule gebracht würde, in der im Gegensatz zum ursprünglichen Konzentrationsprofil eine gleichmäßige Konzentrationsverteilung anzutreffen wäre.

● Auswaschung

Die nasse Ablagerung wird durch den "washout"-Koeffizienten  $\lambda(1/s)$  beschrieben und ähnlich wie die trockene Ablagerung behandelt. Der verbleibende Anteil der Aktivität in der Fahne ist:

$$f_w = \exp(-\lambda \Delta t) \quad (4.21)$$

$\Delta t$  gibt die Dauer des Niederschlags an. Damit ist der Anteil  $fr_k$  der Aktivitätskonzentration, der im  $k$ -ten Entfernungsvall in der Aktivitätsfahne verbleibt:

$$fr_k = \prod_{i=1}^{i=k-1} f_{t_i} \cdot f_{w_i} \quad (4.22)$$

In Tabelle F8, 4-3 werden die Werte für  $\lambda$  in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität aufgelistet. Diese Werte stützen sich auf /F8, 4-44/ und WASH-1400. Edelgase werden nicht ausgewaschen. Für Jod und Partikel werden dieselben "washout"-Koeffizienten angenommen.

		Elementares Jod <sup>1)</sup>	Aerosole	Edelgase
Ablagerungsgeschwindigkeit $v_d$ [m/s]		$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	0
"washout"- Koeffi- zient $\lambda$ [1/s]	Niederschlags- intensität [mm/h]			
	< 1	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0
	1-3	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0
	> 3	$10 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	0

<sup>1)</sup> Der Freisetzungsanteil des organischen Jods wird dem elementaren Jod zugeschlagen.  $v_d$  und  $\lambda$  werden daher nur für elementares Jod angegeben.

Tab. F8, 4-3:

Ablagerungsgeschwindigkeit und "washout"-Koeffizient

Wie Literaturstudien /F8, 4-67/ und Auswertungen am Kernforschungszentrum Karlsruhe /F8, 4-68/ ergaben, liegt die durchschnittliche Niederschlagsdauer deutlich unter einer Stunde.

In /F8, 4-68/ wurden 10-Minuten-Werte des Niederschlages der Jahre 1973 bis 1977 ausgewertet. Die 3 903 Niederschlagsereignisse dieser vier Jahre entsprechen 100 %. In Bild F8, 4-10 ist die Summenhäufigkeit der Niederschlagsereignisse in drei Stufen der Niederschlagssumme aufgeschlüsselt: unter 0,6 mm (insgesamt 78,7 %), unter 4,0 mm (zusätzlicher Anteil 17,9 %), mehr als 4,0 mm (3,4 %). In der Hälfte der Fälle dauert ein Niederschlag bis zu 10 Minuten. Nur etwa 5 % dauerten länger als 2 Stunden. Daher wird angenommen, daß in der mit Niederschlag angezeigten Stunde die Niederschlagsdauer nur 30 Minuten betrug.

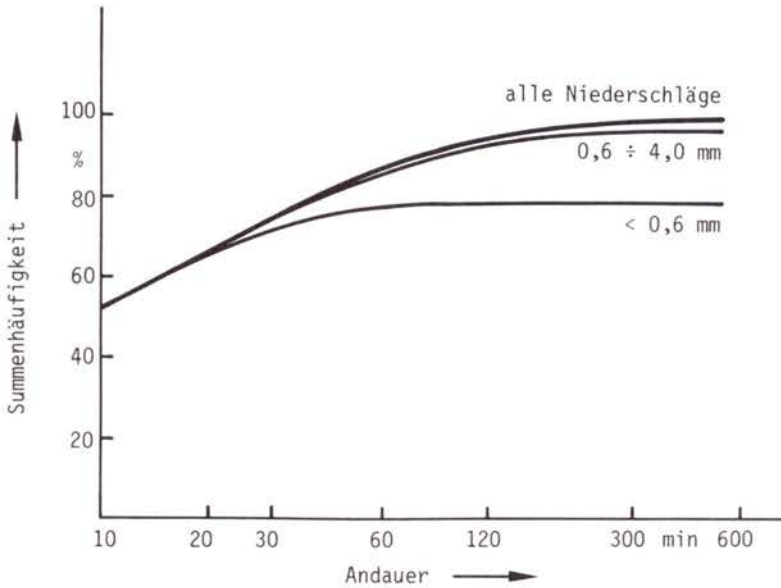


Bild F8, 4-10:

Summenhäufigkeit der Niederschlagsereignisse in Abhängigkeit von der Andauer aus /F8, 4-68/

#### 4.9 Wetterabläufe

Unter Wetterablauf wird im folgenden der zeitliche Verlauf der Ausbreitungsbedingungen während der Ausbreitung verstanden. Die Ausbreitungsbedingungen sind im wesentlichen durch die Windgeschwindigkeit und Windrichtung, durch den Turbulenzzustand der Atmosphäre und durch das Auftreten bzw. das Nichtauftreten von Niederschlag bestimmt. Die Windrichtungsänderung wird zunächst in Anlehnung an WASH-1400 nicht berücksichtigt, d.h., es wird geradlinige Ausbreitung angenommen.

Um das Wettergeschehen kontinuierlich über einen längeren Zeitraum zu registrieren, werden meist Einzelmessungen zu festen Zeiten durchgeführt. Das Meßnetz des Deutschen Wetterdienstes

umfaßt Standorte mit 3- und 1stündigem Beobachtungsrhythmus. Ein 3stündiger Beobachtungsrhythmus stellt für Risikountersuchungen eine zu grobe Einteilung dar. Es werden daher diese Standorte nicht weiter berücksichtigt.

Sollen alle in der Risikostudie betrachteten Standorte eine gemeinsame zeitliche Basis aufweisen, so ist das Wettergeschehen in Stundenwerte einzuteilen. Im Rechenmodell wird daher die Windgeschwindigkeit, die Ausbreitungskategorie und die Information über Niederschlag stündlich entsprechend gemessenen realen Wetterabläufen geändert. Dabei wird angenommen, daß die am Standort gemessenen meteorologischen Größen gleichzeitig dieselben Werte in allen Entfernungen annehmen. Dies ist zwar nicht immer der Fall. Eine derartige Annahme ist aber gerechtfertigt, weil eine Vielzahl mehrstündiger Wetterabläufe betrachtet wird und die Abweichungen von der Realität in den Rechnungen mit einzelnen Wetterabläufen dazu tendieren, sich im zusammengefaßten Ergebnis gegenseitig aufzuheben.

Bei Wetterabläufen mit Niederschlag sind solche Abweichungen unvermeidlich: Niederschläge können durch Aufgleiten der Luftmassen an der Luvseite eines Gebirgszuges ausgelöst werden und beeinflussen die Aktivitätsfahne im allgemeinen nur kurzzeitig; sie können aber auch mit einer durchziehenden Schlechtwetterfront verbunden sein, was zu einem längeren Auswaschen der mitziehenden Aktivitätsfahne führen kann. Beide Effekte können durch Messungen an einem Meßort in ebenem Gelände nicht realistisch beschrieben werden. Dennoch läßt sich zeigen, daß derartige Effekte keine Verfälschung des integralen Ergebnisses bewirken können. Der erste Effekt (Orographie) wird durch geringere Niederschläge im Lee des Gebirgszuges kompensiert. Der zweite Effekt (Schlechtwetterfront) bewirkt im Einzelfall eine größere durch "washout" kontaminierte Fläche, als durch das Modell berechnet. Auch dieser Effekt wird im integralen Ergebnis kompensiert.

Folgende Überlegungen wurden angestellt, um die Anzahl der Wetterabläufe festzulegen: Werden zu wenige Wetterabläufe berück-

sichtigt, so besteht die Gefahr, daß gerade solche Wetterabläufe nicht erfaßt werden, die zu sehr hohen Strahlenbelastungen führen. Sollen dagegen alle Wetterabläufe mehrerer Jahre berücksichtigt werden, so ergeben sich zu lange Rechenzeiten. Daher wird aus der Vielzahl möglicher Wetterabläufe eine Stichprobe zur Risikoberechnung herausgegriffen. Diese Stichprobe muß so gezogen werden, daß die errechneten Endergebnisse in statistischer Hinsicht gesichert sind.

In WASH-1400 wird gezeigt, daß es nicht sinnvoll ist, die Wetterabläufe mit Hilfe eines Zufallsgenerators auszuwählen. Der Grund liegt in der zyklischen Natur des Wettergeschehens. Innerhalb von 24 Stunden unterliegen die Ausbreitungsverhältnisse einem gewissen geordneten Wechsel. In der Nacht herrschen im allgemeinen stabile Lagen vor, die tagsüber in labile Lagen übergehen. Diesem täglichen Verlauf ist ein jährlicher Zyklus überlagert.

Eine Auswahl von Wetterabläufen muß genügend viele Fälle in jedem täglichen und jährlichen Zyklus enthalten. Eine rein zufällige Auswahl erfordert aber eine zu große Anzahl von Wetterabläufen. Deshalb wurde die Auswahl nach dem Gesichtspunkt einer zyklischen Verschiebung getroffen.

Eigene Untersuchungen /F8, 4-69/ zeigten, daß 115 Wetterabläufe in statistischer Hinsicht ausreichend sind. Die systematische Auswahl geschieht derart, daß - beginnend am 1.1. eines Jahres um 1.00 Uhr - alle 77 Stunden ( $\hat{=}$  3 Tage + 5 Stunden) ein neuer Wetterablauf startet. Dadurch werden alle Jahres- und Tageszeiten gleichwertig erfaßt. In Abschnitt 4.14 wird die Auswahl und Anzahl der Wetterabläufe näher untersucht.

#### 4.10 Meteorologische Standortregionen

Für das oben beschriebene Ausbreitungsmodell müssen die stündlichen Werte der Windgeschwindigkeit, der Ausbreitungskategorie und gegebenenfalls der Niederschlagsintensität für mindestens

ein Jahr vorliegen. Derart ausführliche Meßwerte sind - im Unterschied zu den vielfach verfügbaren Ausbreitungsstatistiken - nur an einer begrenzten Zahl von Meßstationen vorhanden. Diesen Stationen stehen die 19 zu betrachtenden Kernkraftwerkstandorte gegenüber, für die bis zum Stichtag, dem 1.7.1977, ein Genehmigungsverfahren für wenigstens einen Leichtwasserreaktor der Mindestgröße von 600 MWe beantragt worden war. Die 19 Standorte werden in vier meteorologische Standortregionen eingeordnet, innerhalb derer jeweils ein Satz meteorologischer Daten benutzt wird. Die Grenzziehung für eine Region ergibt sich aus der Forderung nach einheitlichen Ausbreitungsverhältnissen und geographischer Ähnlichkeit. Die vier Standortregionen und die zugehörigen meteorologischen Meßstationen lauten wie folgt:

- Norddeutsche Tiefebene; Deutscher Wetterdienst (DWD), Station Hannover,
- Oberrheinische Tiefebene; Meßmast des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK),
- Süddeutsche Hochebene; DWD, Station München-Riem,
- Tallagen; Meßmast des Kernkraftwerks Obrigheim im Neckartal.

In Tabelle F8, 4-4 sind alle 19 Standorte, ihre Zuordnung zu den Standortregionen sowie die zugehörige Bodenrauigkeitsstufen aufgeführt. Tabelle F8, 4-5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit und der Ausbreitungskategorie, summiert über alle Windrichtungen. Die Bestimmung der Ausbreitungskategorie basiert für Hannover und München auf den stündlichen synoptischen Beobachtungen und einem Einteilungsschema nach Manier /F8, 4-70/. In Obrigheim werden der Temperaturgradient und die Windgeschwindigkeit zur Bestimmung der Ausbreitungskategorie herangezogen /F8, 4-71/. Im Kernforschungszentrum Karlsruhe dient eine in 100 m Höhe installierte Vektorfahne zur Kategorienbestimmung /F8, 4-71/.

Nr.	Standort	Einheiten	Rauhigkeitsstufe
	<u>Norddeutsche Tiefebene</u>		II
1	Brokdorf	1	
2	Brunsbüttel	1	
3	Esenshamm	1	
4	Hamm-Schmehausen	1	
5	Krümme1	1	
6	Stade	1	
7	Vahnum	2	
	<u>Oberrheinische Tiefebene</u>		III
8	Biblis	3	
9	Neupotz	1	
10	Philippsburg	2	
11	Wyl	1	
	<u>Süddeutsche Hochebene</u>		III
12	Grafenrheinfeld	1	
13	Gundremmingen	2	
14	Isar - Ohu	1	
	<u>Tallagen</u>		III
15	Borken	1	
16	Grohnde	1	
17	Mülheim-Kärlich	1	
18	Neckarwestheim	2	
19	Würgassen	1	

Tab. F8, 4-4:

Standorte der Leichtwasserreaktor-Kernkraftwerke  
(P > 600 MWe) in der Bundesrepublik Deutschland



● Norddeutsche Tiefebene

Windgeschwindigkeitsbereich (Meßhöhe 10 m) [m/s]	Ausbreitungskategorie						Summe
	A	B	C	D	E	F	
0,0 - 0,5	0,08	0,22	0,15	0,21	0,84	1,22	2,72
0,6 - 1,0	0,33	0,32	0,17	0,18	1,29	1,24	3,54
1,1 - 1,5	0,30	0,34	0,83	0,63	2,13	1,45	5,68
1,6 - 2,0	0,48	0,43	0,80	0,72	2,72	2,15	7,29
2,1 - 4,0	1,38	2,33	8,23	16,53	6,05	0,0	34,52
4,1 - 8,0	0,26	1,19	5,89	32,63	0,0	0,0	39,97
8,1 - 15,0	0,05	0,15	0,58	5,48	0,0	0,0	6,26
15,1 - 30,0	0,0	0,0	0,0	0,02	0,0	0,0	0,02
Summe	2,88	4,98	16,65	56,40	13,03	6,06	100,00

● Oberrheinische Tiefebene

Windgeschwindigkeitsbereich (Meßhöhe 60 m) [m/s]	Ausbreitungskategorie						Summe
	A	B	C	D	E	F	
0,0 - 0,5	0,07	0,04	0,12	0,13	0,05	0,15	0,56
0,6 - 1,0	0,21	0,18	0,37	0,54	0,30	0,65	2,25
1,1 - 1,5	0,41	0,49	0,79	1,22	0,67	0,77	4,35
1,6 - 2,0	0,54	0,64	0,97	1,84	1,19	1,30	6,48
2,1 - 4,0	1,39	3,49	4,82	11,63	8,77	8,77	38,87
4,1 - 8,0	0,09	1,71	6,67	22,10	6,93	5,56	43,06
8,1 - 15,0	0,0	0,0	0,31	4,06	0,04	0,01	4,42
15,1 - 30,0	0,0	0,0	0,0	0,01	0,0	0,0	0,01
Summe	2,71	6,55	14,05	41,53	17,95	17,21	100,00

● Süddeutsche Hochebene

Windgeschwindigkeitsbereich (Meßhöhe 10 m) [m/s]	Ausbreitungskategorie						Summe
	A	B	C	D	E	F	
0,0 - 0,5	0,18	0,50	1,05	0,14	1,67	2,44	5,98
0,6 - 1,0	0,61	0,74	0,91	0,24	2,21	2,63	7,34
1,1 - 1,5	0,78	0,79	1,68	0,82	3,90	3,23	11,20
1,6 - 2,0	0,90	0,88	1,63	0,81	3,86	3,00	11,08
2,1 - 4,0	2,27	2,23	7,79	15,83	6,04	0,0	34,16
4,1 - 8,0	0,10	0,58	2,03	21,26	0,0	0,0	23,97
8,1 - 15,0	0,02	0,02	0,25	5,82	0,0	0,0	6,11
15,1 - 30,0	0,0	0,0	0,0	0,16	0,0	0,0	0,16
Summe	4,86	5,74	15,34	45,08	17,68	11,30	100,00

● Tallagen

Windgeschwindigkeitsbereich (Meßhöhe 40 m) [m/s]	Ausbreitungskategorie						Summe
	A	B	C	D	E	F	
0,0 - 0,5	0,47	0,13	0,10	3,66	11,85	4,63	20,84
0,6 - 1,0	0,91	0,23	0,39	5,47	6,86	3,22	17,08
1,1 - 1,5	0,63	0,45	0,91	5,58	1,90	0,66	10,13
1,6 - 2,0	0,66	0,37	0,95	3,43	0,99	0,16	6,56
2,1 - 4,0	1,29	2,06	6,23	14,88	1,77	0,19	26,42
4,1 - 8,0	0,0	0,18	2,87	12,42	0,23	0,02	15,72
8,1 - 15,0	0,0	0,0	0,0	3,17	0,0	0,0	3,17
15,1 - 30,0	0,0	0,0	0,0	0,08	0,0	0,0	0,08
Summe	3,96	3,42	11,45	48,69	23,60	8,88	100,00

Tab. F8, 4-5:

Ausbreitungsstatistik, aufsummiert über alle Windrichtungssektoren (Häufigkeit in %)

#### 4.11 Anordnung der Aufpunkte

Die Berechnung der Aktivitätskonzentrationen wird in einem diskretisierten Raster an 18 repräsentativen Aufpunkten  $\bar{r}_m$  durchgeführt. Die radialen Entfernungen der Aufpunkte  $\bar{r}_m$  sowie  $r_m$  und  $r_{m+1}$  sind in Tabelle F8, 4-6 angegeben. Es wird angenommen, daß die an den Aufpunkten  $\bar{r}_m$  errechnete Aktivitätskonzentration an allen Punkten im m-ten Entfernungsintervall gleich ist.

Nummer [m]	Begrenzende Radien [ $r_m \div r_{m+1}$ ]	Repräsentativer Radius [ $\bar{r}_m$ ]
1	0 ÷ 0,8	0,7
2	0,8 ÷ 1,2	1,0
3	1,2 ÷ 1,6	1,4
4	1,6 ÷ 2,4	2,0
5	2,4 ÷ 3,6	3,0
6	3,6 ÷ 5,4	4,5
7	5,4 ÷ 8,0	6,7
8	8,0 ÷ 12,0	10,0
9	12,0 ÷ 16,0	14,0
10	16,0 ÷ 24,0	20,0
11	24,0 ÷ 36,0	30,0
12	36,0 ÷ 54,0	45,0
13	54,0 ÷ 80,0	67,0
14	80,0 ÷ 120	100
15	120 ÷ 160	140
16	160 ÷ 240	200
17	240 ÷ 360	300
18	360 ÷ 540	450

Tab. F8, 4-6:

Radiale Entfernungen (in km)

In azimuthaler Richtung wird die Verteilung der Aktivitätskonzentration entsprechend einer Gaußschen Glockenkurve angenommen. Diese stetige Verteilung wird durch eine symmetrische Treppenfunktion ersetzt. Die Anzahl der Stufen ist vier (Bild F8, 4-11 und Tabelle F8, 4-7). Die Höhe  $H_i$  jeder Stufe ist der Mittelwert der Gaußverteilung in dieser Stufe:

$$H_i = \frac{1}{y_{i+1} - y_i} \int_{y_i}^{y_{i+1}} P \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) dy \quad (4.23)$$

$P$  stellt den Maximalwert der Verteilung für  $y = 0$  dar. In der letzten Stufe ( $2\sigma_y$  bis  $3\sigma_y$ ) wurde die Verteilung bis  $\infty$  integriert.

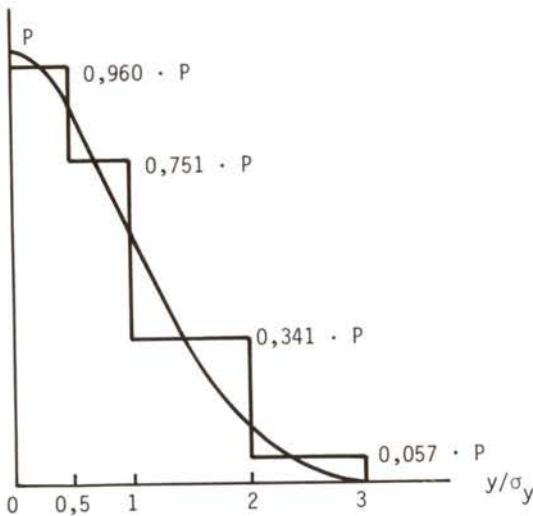


Bild F8, 4-11:

Approximation der Gaußverteilung durch eine vierstufige Treppenfunktion

Nummer [n]	Begrenzende "Strahlen" $y = v_n \sigma_y(r) \div y = v_{n+1} \cdot \sigma_y(r)$	Mittlere Konzentration Konzentration bei $y = 0$
1	$0 \cdot \sigma_y(r) \div \frac{1}{2} \cdot \sigma_y(r)$	0,960
2	$\frac{1}{2} \cdot \sigma_y(r) \div 1 \cdot \sigma_y(r)$	0,751
3	$1 \cdot \sigma_y(r) \div 2 \cdot \sigma_y(r)$	0,341
4	$2 \cdot \sigma_y(r) \div 3 \cdot \sigma_y(r)$	0,057 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die mittlere Konzentration wurde durch Integration der Gaußverteilung von  $2 \sigma_y$  bis  $\infty$  ermittelt.

Tab. F8, 4-7:

Stufenbreite sowie Verhältnis der Stufenkonzentration zur Konzentration in der Fahnenachse der Gaußverteilung

Bei der Wahl der Stufen wurde beachtet, daß das Verhältnis der maximalen zur mittleren Aktivitätskonzentration in keiner der Stufen einen zu großen Wert annimmt, daß der Rand der Konzentrationsverteilung so weit erfaßt und richtig approximiert wird, wie er in Ausbreitungsversuchen durch Messungen belegt ist /F8, 4-5 und -6/ und die Anzahl von 4 Stufen nicht überschritten wird.

Die laterale (seitliche) Ausbreitung der Aktivitätsfahne ist in einem rechtwinkligen  $x,y$ -Koordinatensystem, die Bevölkerungsverteilung dagegen in  $r,\phi$ -Geometrie gegeben. Daher muß auch die Aktivitätskonzentration für Aufpunkte in  $r,\phi$ -Koordinaten berechnet werden. Um keinen ungerechtfertigt hohen Rechenaufwand zu treiben, wird die "Achsenkonzentration" (Konzentration unter der Aktivitätsfahnenachse) für Aufpunkte der radialen Entfernung  $x$  an der reduzierten Entfernung  $x'$  berechnet (Bild F8, 4-12).  $x'$  ist kleiner als  $x$ . Die Differenz  $\Delta x = x - x'$  wird so berechnet, daß der Punkt  $(x',0)$  auf der Ausbreitungsachse den Schwerpunkt der in den 7 Aufpunkten der Entfernung  $x$  konzentrierten Aktivitätsmengen bildet.

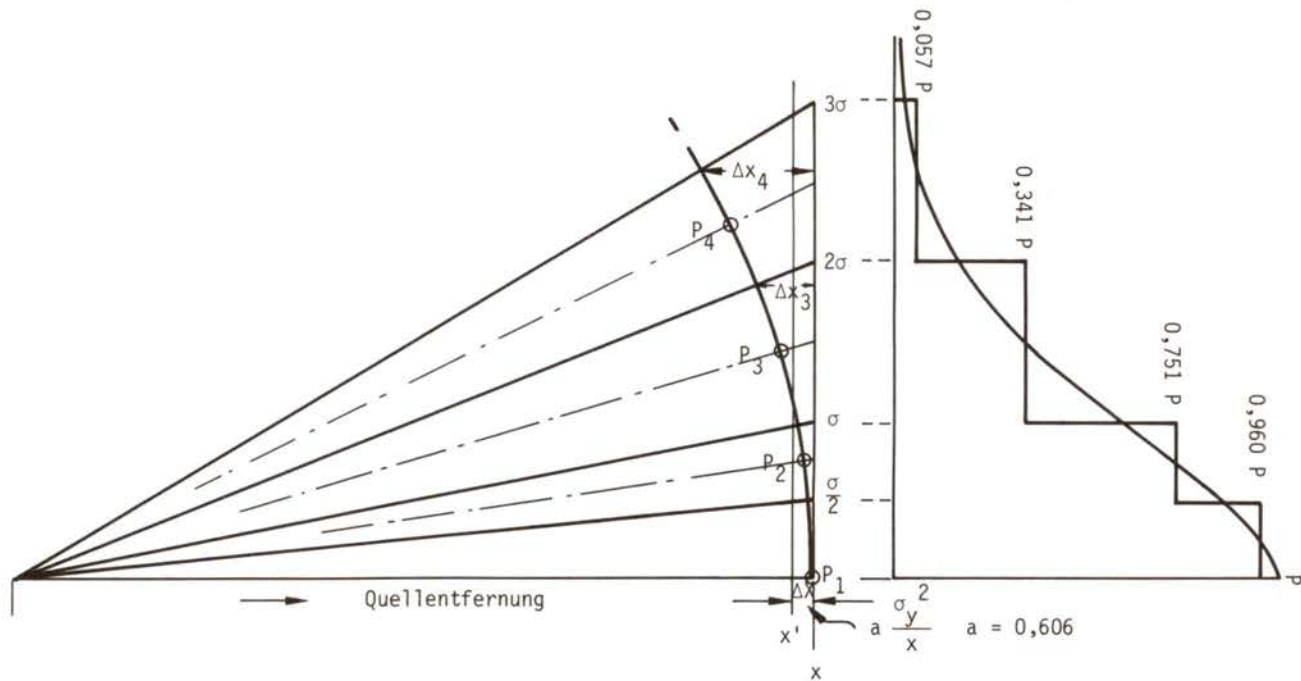


Bild F8, 4-12:

Zuordnung der berechneten Bodenkonzentration zu den mit der Bevölkerungsverteilung kompatiblen Koordinaten

Für die in Bild F8, 4-11 dargestellte Treppenkurve ergibt sich

$$\Delta x = 0,606 \frac{\sigma_y^2(x)}{x} \quad (4.24)$$

#### 4.12 Form der Aktivitätsfahne

##### 4.12.1 Behandlung der Aktivitätsfahne bis 540 km

Der Anfang der Aktivitätsfahne ändert sich exakt nach den stündlich sich ändernden Ausbreitungsverhältnissen. Der horizontale Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  nimmt dabei monoton zu; er nimmt nie ab. Ändert sich am Ende der n-ten Stunde (Zeit  $t_n$ , Entfernung  $x_n$ ) die Ausbreitungskategorie S von  $S_n$  nach  $S_{n+1}$ , dann wird angenommen,  $\sigma_y(x_n)$  hätte seinen Wert an einer Stelle x bei der Kategorie  $S_{n+1}$  erreicht. Die Entfernung, an der dies der Fall wäre, sei  $x_n''$ . Während der n+1-ten Stunde wandert der Fahnenanfang um  $u_{n+1} \cdot 1 \text{ h} = \Delta x_{n+1}$ . Am Ende dieser Stunde nimmt  $\sigma_y$  den Wert  $\sigma_y(x_n'' + \Delta x_{n+1})$  an. Dies gilt sowohl für Stabilisierung als auch für Instabilisierung.

Beispiel (Bild F8, 4-13):

( $x'$  und  $x''$  sind keine tatsächlichen Entfernungen, sondern die im  $\sigma_y$ -Diagramm angenommenen Entfernungen am Ende und zu Beginn jeder Stunde.)

- 1. Stunde, Kategorie C

Der Fahnenanfang erreicht  $x_1 = x_1'$

- 2. Stunde, Kategorie B

$x_1''$  wird so bestimmt, daß gilt:  $\sigma_y(x_1', C) = \sigma_y(x_1'', B)$ .

Die Fahne wandert um  $\Delta x_2 = u_2 \cdot 1 \text{ h}$ , der Fahnenanfang erreicht  $x_2 = x_1 + \Delta x_2$ .  $\sigma_y$  erreicht den Wert  $\sigma_y(x_1'' + \Delta x_2, B)$ .

Es ist  $x_2' = x_1'' + \Delta x_2$ .

- In der 3. Stunde gilt Entsprechendes (Bild F8, 4-13).

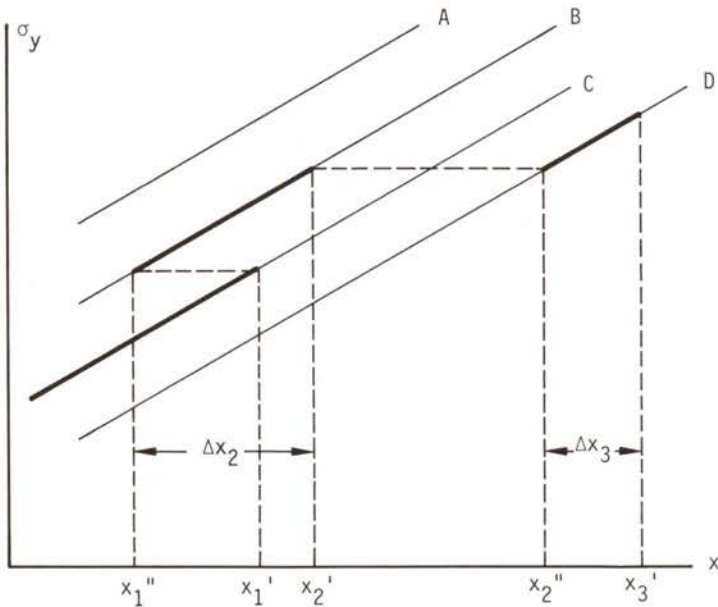


Bild F8, 4-13:

$\sigma_y$ -Bestimmung bei Änderung der Ausbreitungskategorie (schematisch)

In Bild F8, 4-14 ist die laterale Form der Aktivitätsfahne in der Draufsicht für die im obigen Beispiel gezeigte Kategorienentwicklung dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist für die seitliche Erstreckung der Fahne eine  $\sigma_y/2$ -Begrenzung angenommen. Damit ist nur die 1. Stufe der vierstufigen Approximation der lateralen Gaußverteilung gezeigt. In den übrigen Stufen bliebe die Darstellung ähnlich. Die in der ersten Stunde (Kategorie C) überstrichenen drei Flächenelemente sind durch die Aufpunkte aufgespannt:

1. Dreieck  $\overline{AB-OA-OB}$  ( $AB \hat{=} \text{Quellpunkt}$ )
2. Trapez  $\overline{OA-1A-1B-OB}$
3. Trapez  $\overline{1A-2A-2B-1B}$

Das in der zweiten Stunde (Kategorie B) überstrichene Trapez ist  $\overline{2A-3A-3B-2B}$ . In der dritten Stunde herrscht die Kategorie D

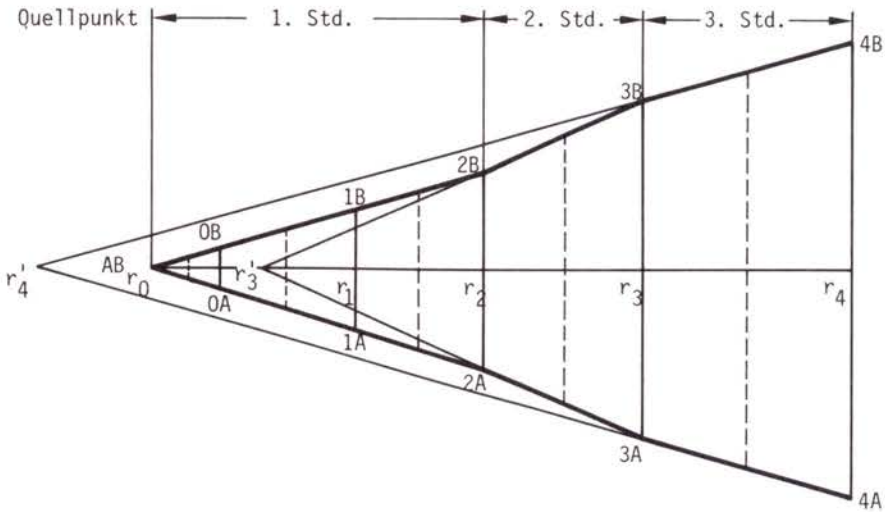


Bild F8, 4-14:

Laterale Form der Aktivitätsfahne bei Änderung der Ausbreitungskategorie (schematisch)

und die überstrichene Fläche ist  $\overline{3A-4A-4B-3B}$ . Zu beachten ist, daß bei Kategorienänderung die neuen virtuellen Quellpunkte  $r_3'$  bzw.  $r_4'$  auftreten.

Der vertikale Ausbreitungsparameter  $\sigma_z$  nimmt monoton zu oder bleibt konstant, aber nimmt nie ab. Ändert sich am Ende der n-ten Stunde (Zeit  $t_n$ , Entfernung  $x_n$ ) die Ausbreitungskategorie von  $S_n$  nach  $S_{n+1}$ , dann wird angenommen,  $\sigma_z(x_n)$  hätte seinen Wert an einer Stelle  $x$  bei der Kategorie  $S_{n+1}$  erreicht. Die Entfernung, an der dies der Fall wäre, sei  $x_n''$ . Während der n+1-ten Stunde wandert der Fahnenanfang um  $u_{n+1} \cdot 1 \text{ h} = \Delta x_{n+1}$ . Am Ende dieser Stunde nimmt  $\sigma_z$  den Wert  $\sigma_z(x_n'' + \Delta x_{n+1})$  an.

Beispiel (Bild F8, 4-15 und -16):

- 1. Stunde, Kategorie C

Fahnenanfang wandert bis  $x_1 = x_1'$ .  $\sigma_z = \sigma_z(x_1', C)$ .



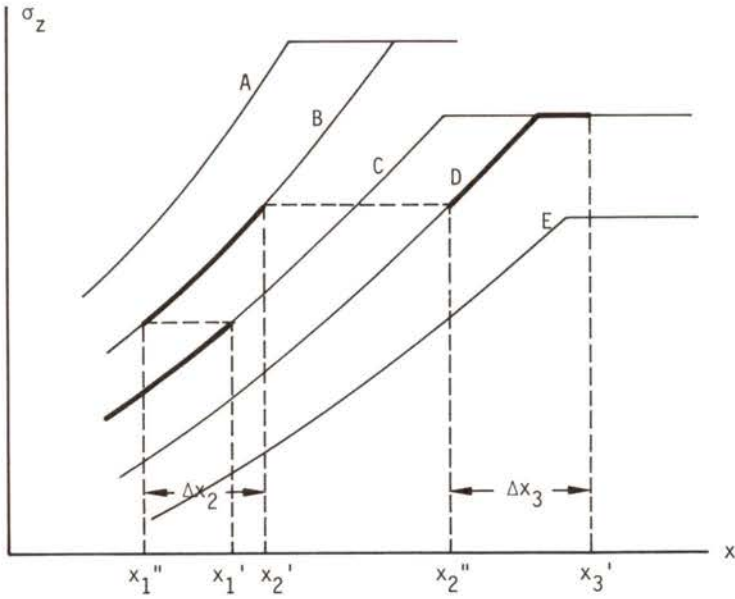


Bild F8, 4-15:

$\sigma_z$ -Bestimmung bei Änderung der Ausbreitungskategorie (schematisch)

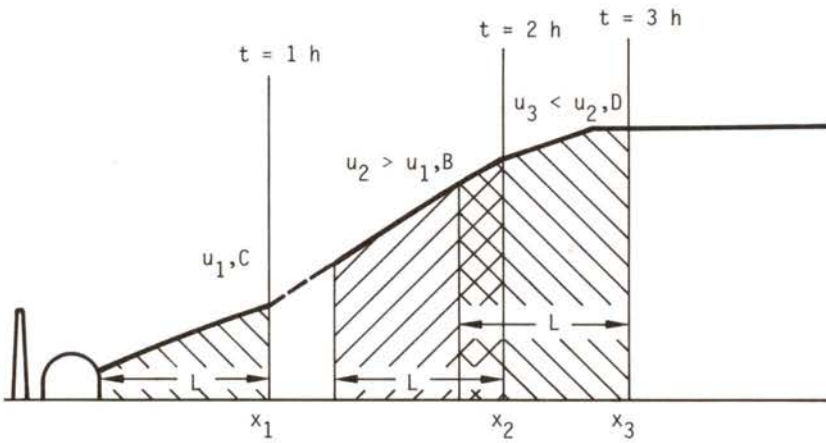


Bild F8, 4-16:

Form der Aktivitätsfahne (L Länge der Fahne)

- 2. Stunde, Kategorie B

$x_1''$  wird so bestimmt, daß  $\sigma_z(x_1', C) = \sigma_z(x_1'', B)$ .

Fahnenanfang wandert um  $\Delta x_2 = u_2 \cdot 1 \text{ h}$  bis  $x_2 = x_1 + \Delta x_2$ .

$\sigma_z$  erreicht den Wert  $\sigma_z(x_1'' + \Delta x_2, B)$ . Es ist  $x_2' = x_1'' + \Delta x_2$ .

#### Fall A:

In der n+1-ten Stunde herrscht eine Kategorie, in der der Wert  $\sigma_z(x'_n)$  nicht erreicht wird wegen der unterschiedlichen Begrenzung des  $\sigma_z$  in den einzelnen Kategorien.

Beispiel:

- 3. Stunde, Kategorie E

$\sigma_z = \sigma_z(x_2', B)$  während der gesamten Stunde.

#### Fall B:

$\sigma_z$  erreicht während der n-ten Stunde einen Grenzwert und behält diesen bis zum Ende des in dieser Stunde zurückgelegten Weges bei. Dieser Fall ist in Bild F8, 4-15 dargestellt.

Beispiel:

- 3. Stunde, Kategorie D

$x_2''$  wird so bestimmt, daß  $\sigma_z(x_2', B) = \sigma_z(x_2'', D)$ .

Der Fahnenanfang wandert um  $\Delta x_3 = u_3 \cdot 1 \text{ h}$  bis  $x_3 = x_2 + \Delta x_3$ .

$\sigma_z$  erreicht den Wert  $\sigma_z(D, \max)$ .

#### Fall C:

Die fest vorgegebenen Aufpunkte liegen so weit voneinander entfernt, daß der Fahnenanfang innerhalb einer Stunde diese Wegstrecke nicht überwinden kann: In diesem Fall werden die Windgeschwindigkeit und die Ausbreitungskategorie der nächsten Stunde bzw. mehrerer Stunden herangezogen und Mittelwerte für Geschwindigkeit und Kategorie gebildet.

Der übrige Teil der Fahne nimmt an jedem Aufpunkt, den er passiert, dieselbe Form an, die der Fahnenanfang an diesem Aufpunkt innehatte. Das bedeutet, daß sich die Änderung der Ausbreitungskategorie nicht der gesamten Fahne zum selben Zeitpunkt mitteilt, sondern daß jeder Teil der Fahne diese Änderung beim Passieren der Entfernung  $x_1, x_2, x_3, \dots$  erfährt.

#### 4.12.2 Behandlung der Aktivitätsfahne jenseits von 540 km

Das Ausbreitungsmodell wird, wie Tabelle F8, 4-6 zu entnehmen ist, bis zu 540 km Entfernung angewendet. Die Fläche dieses Kreises entspricht etwa der Fläche Mitteleuropas. Jenseits dieser Entfernung ändern sich meist die Ausbreitungsbedingungen entscheidend (Meer, Gebirge).

Der Aktivitätsinhalt der Fahne hat sich auch nach Ausbreitung über eine Entfernung von 540 km noch nicht so verringert, daß er nicht weiter verfolgt zu werden brauchte. Im Mittel aller Wetterabläufe passiert die Aktivitätsfahne diese "Grenze" - abhängig von den gewählten Ablagerungskonstanten - mit etwa 40 % ihres ursprünglichen Inhalts langlebiger Radionuklide. Radioaktive Gase und Aerosole tragen auf dem weiteren Reiseweg der Aktivitätsfahne in unterschiedlicher Weise zur Gesamtstrahlenwirkung bei. Die radioaktiven Edelgase erbringen beim ersten Durchzug durch Direktstrahlung nur noch einen verschwindend geringen Beitrag (unter 1 %) zu den Spätschäden. Bei weiteren Durchzügen verteilt sich diese Aktivität global. Die darauf zurückgehende Bevölkerungsdosis kann gegenüber der der übrigen Radionuklide vernachlässigt werden. Radiojod und Aerosole dagegen führen beim ersten Durchzug der Aktivitätsfahne durch ihre Ablagerung auf dem Boden zu einer gegenüber den Edelgasen wesentlich größeren örtlichen Strahlenexposition. Bis zu einer Entfernung von 2500 km werden sie im Mittel zu etwa 99 % abgelagert. Es wird daher die Restwirkung der Radiojod- und Aerosolaktivität dadurch berücksichtigt, daß sie auf einem Kreisring von 2500 km Außenradius - diese Fläche entspricht dem Rest Europas einschließlich der Wasserflächen - abgelagert werden. Dieses Vorgehen entspricht demjenigen in WASH-1400.

#### 4.13 Zeitintegral der Aktivitätskonzentration

##### 4.13.1 Aktivitätskonzentration einer ein- stündigen Freisetzung

Die Dosen aller Expositionspfade sind dem Zeitintegral der Aktivitätskonzentration am Aufpunkt proportional. Unter Vernachlässigung der Ablagerung und des radioaktiven Zerfalls wird dieses Integral in folgender Form gebildet:

$$C_A^f = \int_{t_n}^{t_n + \Delta t_{n+1}} C_A(x, y) dt = \frac{\dot{A} \exp\left\{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{h_{eff}^2}{2\sigma_z^2}\right)\right\}}{u_1 \pi \sigma_y(x_n) \sigma_z(x_n)} \Delta t_{n+1} \quad (4.25)$$

Die Länge der Fahne beträgt  $L = u_1 \cdot 1 \text{ h}$ . Der Fahnenanfang erreicht nach  $n$  Stunden die Entfernung  $x_n$ . Die Dauer des Durchzugs der Aktivitätsfahne am Punkt  $P(x_n, y)$  in der  $n+1$ -ten Stunde beträgt (Bild F8, 4-16):

$$\Delta t_{n+1} = \frac{L}{u_{n+1}} = \frac{u_1}{u_{n+1}} 1 \text{ h} \quad (4.26)$$

Gleichung (4.25) nimmt damit folgende Form an:

$$\int_{t_n}^{t_n + \Delta t_{n+1}} C_A(x_n, y) dt = \frac{\dot{A} \exp\left\{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{h_{eff}^2}{2\sigma_z^2}\right)\right\}}{u_{n+1} \pi \sigma_y(x_n) \sigma_z(x_n)} 1 \text{ h} \quad (4.27)$$

In der Entfernung  $x_n$  wird das Konzentrationsintegral dann richtig berechnet, wenn über 1 h integriert und die Windgeschwindigkeit der  $n+1$ -ten Stunde verwendet wird.

Für Zwischenentfernungen wird bei einer Änderung der Ausbreitungskategorie genau wie bei einer Änderung der Windgeschwindigkeit verfahren: Die Änderung teilt sich nicht der gesamten Fahne im selben Zeitpunkt mit, sondern nur jeweils einem Punkt der Fahne beim Passieren der Entfernung  $x_n$ . Das Ende der Fahne

erfährt eine Änderung der Windgeschwindigkeit wie auch eine Änderung der Ausbreitungskategorie mit einstündiger Verspätung.

Daher gilt Gleichung (4.27) auch für alle Entfernungen  $x_n < x < x_{n+1}$ , wenn in Gleichung (4.27)  $x_n$  durch  $x$  und  $t_n$  durch  $t$  ersetzt wird.

$$t = t_n + \frac{x-x_n}{u_{n+1}} \quad (4.28)$$

#### 4.13.2 Aktivitätskonzentration bei länger dauernder Freisetzung

Dauert die Aktivitätsfreisetzung in die Atmosphäre länger als eine Stunde, so wird die gesamte Freisetzung in Stundenabschnitte unterteilt. Dies ist der Fall für FK2 bis FK6 und FK8. Es entstehen damit einstündige Freisetzungsphasen. Jede Freisetzungsphase erzeugt ein Konzentrations- und Bodenkontaminationsfeld in der oben beschriebenen Weise. Im Referenzmodell wird angenommen, daß sich die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung in der Folgezeit nicht ändert. (Diese Annahme entspricht Option 1 in Abschnitt 4.14.10.) Die Konzentrations- und Bodenkontaminationsfelder aller Freisetzungsphasen werden anschließend überlagert.

### 4.14 Genauigkeitsbetrachtungen zum atmosphärischen Ausbreitungsmodell

#### 4.14.1 Übersicht

Im Kapitel 9 wird die Aussagesicherheit der in dem Kapitel 8 dargestellten Ergebnisse quantifiziert. Diese Quantifizierung der Schätzunsicherheiten erstreckt sich von den Freisetzungshäufigkeiten über die Aufstiegsberechnung der Aktivitätsfahne, die Ablagerung, die Dosis/Wirkungs-Beziehung im Schadensmodell bis hin zu einigen Details im Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen.

Als Ergebnis werden komplementäre Häufigkeitsverteilungen der gesundheitlichen Schäden mit subjektiven 90-%-Vertrauensbereichen angegeben.

Im folgenden Abschnitt werden die Einflüsse der Modellannahmen und Änderungen der Parameterwerte im Teilmodell "Atmosphärische Ausbreitung" diskutiert und teilweise mit Vergleichsrechnungen quantifiziert.

#### 4.14.2 Anwendbarkeit des sogenannten "Gaußmodells"

In allen Entfernungen wird angenommen, daß die Aktivitätsverteilung in der Fahne in vertikaler und horizontaler Richtung einer Gaußverteilung entspricht. Dieses Modell (kurz "Gaußmodell") ist experimentell in einem Bereich bis etwa 25 km abgesichert, sofern keine besonderen meteorologischen Situationen (siehe unten) vorliegen. Es zeigte sich, daß das Auftreten von Frühschäden etwa in diesem Entfernungsbereich zu erwarten ist.

Der Umfang der Spätschäden wird überwiegend durch die freigesetzte Aktivitätsmenge bestimmt. Das atmosphärische Ausbreitungsmodell sowie die darin enthaltenen Modellparameter beeinflussen die Spätschäden nur in geringem Maße. Dies ist im wesentlichen durch die Annahme der linearen Dosis/Risiko-Beziehung ohne Schwellenwert bedingt. Die Anzahl der Spätschäden ist dann in erster Näherung unabhängig davon, ob eine gegebene Aktivitätsmenge bei sonst gleichen Randbedingungen auf einen schmalen oder breiten Sektor verteilt wird. Daher kann dieses sogenannte Gaußmodell auch noch in größeren Entfernungen zur Berechnung der Spätschäden angewendet werden.

Das verwendete Ausbreitungsmodell überschätzt in der Regel in Entfernungen über 25 km die Aktivitätskonzentration. Windrichtungsdrehungen und topographische Gegebenheiten, die im Modell nicht erfaßt sind, vergrößern das beaufschlagte Gebiet, verringern aber gleichzeitig die Aktivitätskonzentration. Im Modell

ist zudem in größerer Entfernung die vertikale Aktivitätskonzentration bis zur Mischungsschichthöhe konstant, darüber gleich null angenommen. Tatsächlich stellt die Mischungsschichthöhe keinen absolut dichten "Deckel" nach oben dar; die Aktivitätskonzentrationsberechnungen sind daher auch in diesem Punkt konservativ.

#### 4.14.3 Besondere meteorologische Situationen

Zu den besonderen meteorologischen Situationen zählen Schwachwindlagen, Windrichtungsscherungen, Höheninversionen, Nebellagen sowie Lagen mit kurzfristiger Änderung des Turbulenzzustandes (kürzer als 1 Stunde). In /F8, 4-72/ ist die Häufigkeit derartiger Situationen angegeben. Teilweise treten diese gleichzeitig auf. Im Jahresmittel ist ihre Häufigkeit etwa 23 %. Die Windrichtungsscherungen dominieren dabei mit 18 %. Die Nichtberücksichtigung der Richtungsscherungen führt zu einer Überschätzung der Aktivitätskonzentration, siehe "Windscherungen". Es verbleiben etwa 5 % der Zeit, in denen die Anwendung des "Gaußmodells" zu Fehlern führen kann. Diese werden angesichts ihrer geringen Häufigkeit in Kauf genommen.

#### 4.14.4 Auswahl und Anzahl der Wetterabläufe

Werden nur einige wenige Wetterabläufe berücksichtigt, so ist die Möglichkeit gegeben, daß gerade solche Wetterabläufe nicht erfaßt werden, die zu sehr hohen Schäden führen. Daher wäre es wünschenswert, alle Wetterabläufe mehrerer Jahre, wenigstens jedoch eines Jahres zu berücksichtigen. Da die Information über die Wetterabläufe in Form von Stundenwerten vorliegt, sind innerhalb eines Jahres 8 760 Wetterabläufe möglich. Die Berücksichtigung aller dieser Wetterabläufe würde zu lange Rechenzeiten erfordern. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, aus allen Wetterabläufen eine Stichprobe herauszugreifen. Die Zahl der benötigten Wetterabläufe sollte nicht wesentlich größer als

100 sein. Das Ziehen dieser Stichprobe kann auf drei Arten erfolgen:

- Reines Zufallsprinzip:

Die Startzeiten der Wetterabläufe werden mittels eines Zufallsgenerators ermittelt. Dieses Verfahren ist zwar relativ einfach, erfordert aber eine große Anzahl von Wetterabläufen. Das Wettergeschehen besitzt eine zyklische Grundstruktur. Innerhalb eines Tages, d.h. innerhalb von 24 Stunden, unterliegen die Ausbreitungsverhältnisse einem geordneten Wechsel: In der Nacht herrschen im allgemeinen stabile Verhältnisse vor, die tagsüber infolge der Sonneneinstrahlung in labile übergehen. Diesem Verlauf ist der jährliche Zyklus überlagert. Die Auswahl muß daher genügend Fälle in jedem täglichen und jährlichen Zyklus enthalten.

- "Geschichtetes" Zufallsprinzip:

Diese Kombination von Zufallsprinzip und systematischer Auswahl wurde in WASH-1400 überprüft. Die Startzeiten werden mittels eines Zufallsgenerators ausgewählt; gleichzeitig wird dafür gesorgt, daß am Tage und in der Nacht sowie in jedem Monat gleichviele Wetterabläufe beginnen. Es wurde festgestellt, daß 96 so ausgewählte Wetterabläufe (8 pro Monat, davon 4 am Tage und 4 in der Nacht) nicht ausreichen. Die Schwankungen des Mittelwerts und der Varianz der gesundheitlichen Schäden sind zwischen unterschiedlichen Wetterablauf-Kollektiven noch zu groß.

- Zyklisches Auswahlverfahren:

Bei diesem Verfahren wird auf das zufällige Auswählen verzichtet. Die Startzeiten der Wetterabläufe werden jeweils zyklisch verschoben.

Das zuletzt genannte Auswahlverfahren, das in WASH-1400 als am besten geeignet befunden wurde, ist auch für die vorliegende Studie übernommen worden. Die eigenen Untersuchungen konzentrierten sich nurmehr auf die Festlegung der optimalen Anzahl der Wetterabläufe. Die schließlich gewählte Anzahl von 115 stützt sich auf folgende Untersuchungen:



- Untersuchungen in den USA

In WASH-1400 wurden 90 Wetterabläufe als ausreichend festgelegt. (Alle vier Tage plus 1 Stunde beginnt ein neuer Wetterablauf.) Variationsrechnungen mit 45 bzw. 180 Wetterabläufen (d.h. alle 8 Tage plus 13 Stunden bzw. 2 Tage plus 13 Stunden beginnt ein neuer Wetterablauf) sind in Bild F8, 4-17 in Form von statistischen Kennzahlen (Mittelwert, Varianz und 3. Moment) aufgetragen. Untersucht wurde dabei der Umfang der Fröhschäden.

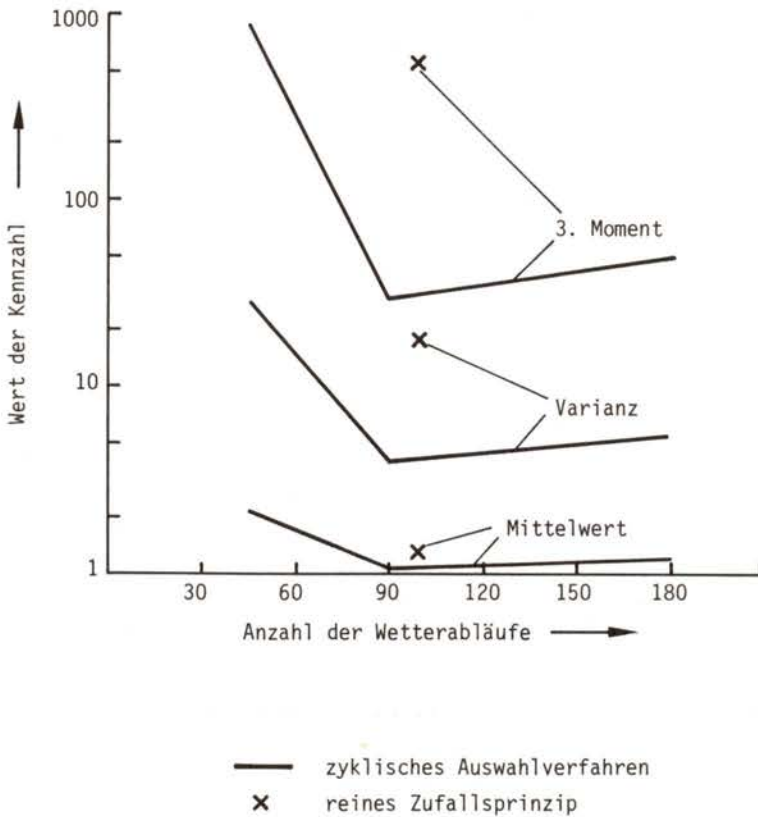


Bild F8, 4-17:

Statistische Kennzahlen der Fröhschäden nach WASH-1400

#### Eigene Variationsrechnungen

Da das Modell der gesundheitlichen Schäden zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen noch nicht festgelegt war, konnte als Beurteilungskriterium für die Anzahl der Wetterabläufe nicht die Zahl der Fröhschäden herangezogen werden. Daher wurde die bodennahe Luftkonzentration  $C_A$  in einer Quelldistanz von 10 km unter der Fahnenachse als Kriterium gewählt. Es wurden Variationsrechnungen für N Wetterabläufe durchgeführt (N = 4300, 660, 348, 175, 30, 70 und 30; der Beginn eines neuen Wetterablaufes verschob sich dabei um 2, 13, 25, 49, 77, 97, 131 bzw. 241 Stunden). In Bild F8, 4-18 ist über der Anzahl  $N_i$  der Wetterabläufe das Verhältnis

$$\frac{\overline{C_A} (4300)}{\overline{C_A} (N_i)}, (N_i = 30, 70, 90, \dots 4300)$$

aufgetragen. Ebenso ist die Varianz dieser Größe eingezeichnet. Nach diesem Ergebnis wäre eine Zahl von mindestens 200 Wetterabläufen optimal.

#### Weitere Untersuchungen

In einer weiteren Untersuchung /F8, 4-69/ wurde als Beurteilungskriterium für die Anzahl der Wetterabläufe die Kurzzeit-Knochenmarkdosis in 10 km Entfernung herangezogen. Im Gegensatz zur vorigen Untersuchung sind als Belastungspfade die externe Strahlung aus der Aktivitätsfahne sowie die externe Strahlung der am Boden abgelagerten Nuklide enthalten. Verglichen wurden zwei Wetterablaufkollektive von 115 bzw. 1 750 Stichproben. Die Stichproben wurden wieder zyklisch ausgewählt, wobei alle 77 bzw. 5 Stunden ein neuer Wetterablauf beginnt. Bild F8, 4-19 zeigt, daß nur in der maximalen Dosis ein Unterschied größer als 10 % besteht. Die mittlere Dosis, die Varianz der Dosen und der Anteil der Dosen, die die Schwelle für akuten Strahlentod überschreiten, sind nahezu gleich in beiden Kollektiven. Mit Rücksicht auf dieses Ergebnis und die Untersuchung in der USA wurde die Anzahl der Wetterabläufe auf 115 festgelegt.

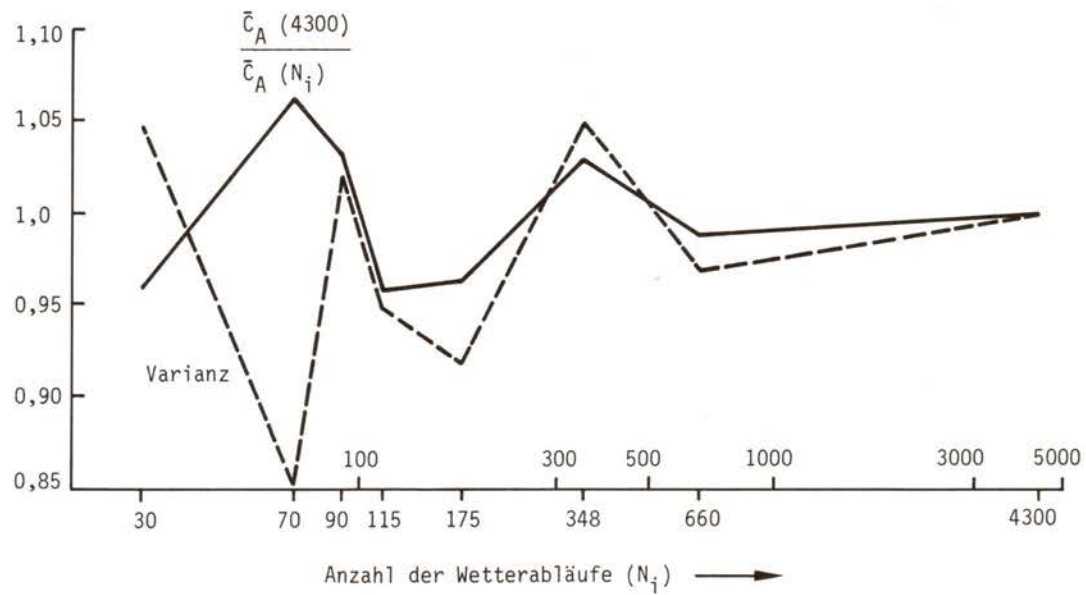


Bild F8, 4-18:

Einfluß der Anzahl der Wetterabläufe

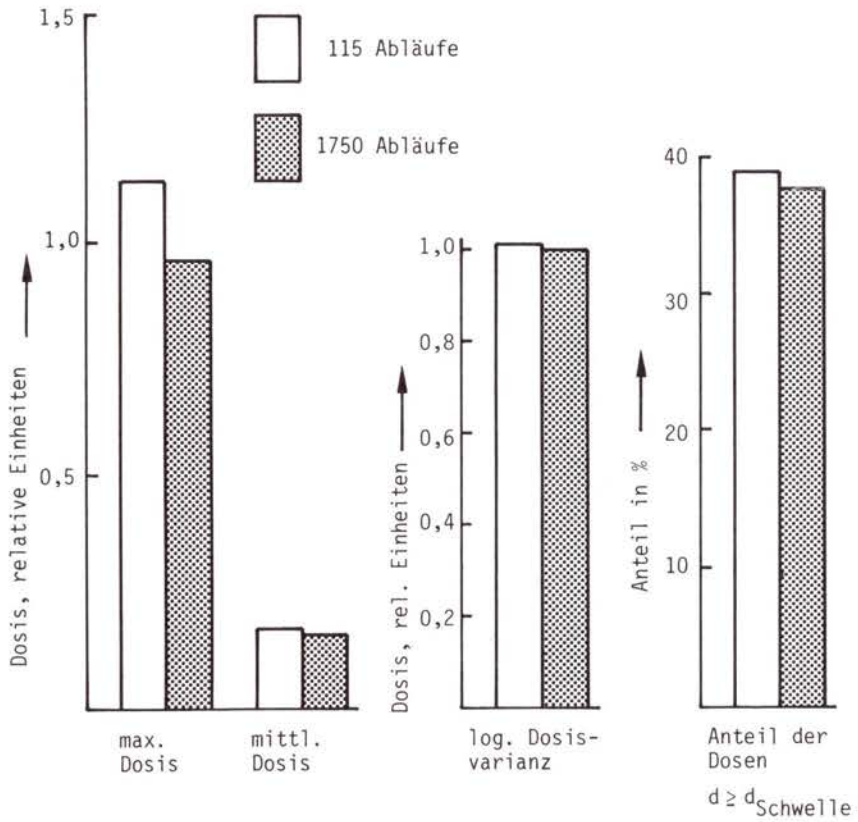


Bild F8, 4-19:

Statistische Kenngrößen der Knochenmarksdosis in 10 km Entfernung für zwei Wetterablaufkollektive (Freisetzungskategorie 1, Standortregion Oberrhein)

#### 4.14.5 Einfluß der azimutalen Konzentrationsverteilung

In azimutaler Richtung wird die Gaußsche Glockenkurve durch eine symmetrische Treppenfunktion ersetzt. Die Anzahl der Stufen ist sieben. Diese Anzahl ist ausreichend, da sich beim Übergang von drei auf sieben Stufen die errechneten Früh- und Spätschäden nur noch wenig ändern (Tabelle F8, 4-8). Voraussetzung ist dabei, daß die Breite der Stufen sinnvoll gewählt wird. Die Tabelle F8, 4-8 ist /F8, 4-73/ entnommen. Die Abkürzung der Freisetzungskategorien entspricht der Bezeichnung in Kapitel 3.

#### 4.14.6 Einfluß des thermischen Aufstiegs der Aktivitätsfahne

Die Formeln zur Berechnung des Aufstiegs einer Aktivitätsfahne aus einem Schornstein sind zahlreich. Die wichtigsten stehen in /F8, 4-46, -74 bis -82/. Zum Teil basieren die Formeln auf theoretischen Überlegungen, zum Teil sind sie aus Beobachtungen abgeleitet.

Der Aufstieg einer Aktivitätsfahne eines Schornsteins wird durch drei Parametersätze beeinflusst:

- Emissionsfaktoren (Geometrie des Schornsteins),
- meteorologische Faktoren (atmosphärische Umgebungsbedingungen),
- physikalische und chemische Eigenschaften der Abluft.

Die Aktivitätsfahne, die sich nach einem schweren Reaktorunfall bildet, unterscheidet sich von Rauchfahnen in vielfacher Art und Weise. Bei Unfällen, in denen der Sicherheitsbehälter beschädigt wird, strömt das unter Umständen unter Überdruck stehende Dampf-Luft-Gemisch in eine nicht bekannte Richtung aus. Neben Wasserdampf enthält die Aktivitätsfahne radioaktive Zerfallsprodukte. Durch Selbstabsorption der  $\beta$ -Strahlung und eines Teils der  $\gamma$ -Strahlung kann ein zusätzlicher Auftrieb erzeugt werden.

Anzahl der Stufen	Breite der Stufen $y/\sigma_y$		Höhe der Stufen (relativ zum Maximalwert)		Frühschäden <sup>1)</sup>				Spätschäden <sup>1)</sup>			
					FK1		FK2		FK1		FK2	
					Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert
7 <sup>2)</sup>	0,5 2,0	1,0 3,0	0,96 0,34	0,75 0,06	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0,5 1,5	1,0 2,5	0,96 0,46	0,75 0,17	1,01	1,00	1,03	1,04	0,99	1,00	0,98	0,99
3	1,0	2,0	0,86	0,40	1,02	1,00	1,00	1,05	0,99	0,98	0,97	0,99
3	1,0	2,5	0,86	0,27	1,00	1,01	0,95	0,96	1,00	1,00	0,99	1,01
1 <sup>3)</sup>	1,5		0,84		1,44	1,42	1,20	1,25	0,95	0,93	0,93	0,91
1	2,0		0,63		0,75	0,80	0,66	0,90	1,00	0,98	0,99	1,00

<sup>1)</sup> normiert auf den Mittelwert bzw. Maximalwert des Modells der vorliegenden Studie. (Die Berechnungen wurden mit konstanter Bevölkerungsdichte durchgeführt.)

<sup>2)</sup> entspricht dem Modell der vorliegenden Studie

<sup>3)</sup> entspricht dem Modell in WASH-1400

Tab. F8, 4-8:

Einfluß auf die Ergebnisse bei Variation der Stufenwahl der Treppenkurve (Ersatzfunktion der Gaußverteilung)

In der vorliegenden Studie wird eine erweiterte Formel nach Briggs /F8, 4-46/ zur Aufstiegsberechnung verwendet. Diese Formel hat gegenüber anderen den Vorteil, daß sie aus theoretisch-physikalischen Überlegungen hergeleitet wurde. Sie beinhaltet nur die pro Zeiteinheit emittierte Wärmemenge und nicht die Geometrie des Schornsteines. Damit ist diese Formel besser als andere Formeln auf unfallbedingte Freisetzungen aus Kernkraftwerken übertragbar.

Bei einem schweren Reaktorunfall werden die Schadstoffe überwiegend nicht über den Kamin, sondern unmittelbar aus dem Sicherheitsbehälter freigesetzt. Die Aktivitätsfahne wird dabei möglicherweise nicht sofort vom Erdboden abheben. Vielmehr werden Wirbelbildungen im Lee des Reaktorgebäudes den Aufstieg vermindern. Daher wurde nach /F8, 4-47/ der aufstiegshemmende Einfluß des Reaktorgebäudes in die Formel eingebaut.

Der Effekt des anfänglichen Impulses, der Einfluß der Umgebungsfeuchtigkeit sowie der zusätzliche Auftrieb infolge der radioaktiven Zerfallswärme werden nicht berücksichtigt. In /F8, 4-83/ wurde gezeigt, daß die beiden zuletzt genannten Effekte die Aufstiegshöhe nur unwesentlich ändern. Lediglich der Impuls kann die Aufstiegshöhe bis zu einem Faktor 2 erhöhen. Da aber weder die Lage des Lecks im Sicherheitsbehälter noch die Ausströmrichtung und -geschwindigkeit bekannt sind, wird in /F8, 4-84/ empfohlen, den Austrittsimpuls zu vernachlässigen.

Unabhängig von dem Vorangegangenen muß betont werden, daß die verwendete Aufstiegsformel den Aufstieg nur angenähert errechnen kann. Um den unmittelbaren Einfluß der Aufstiegshöhe auf den Umfang der Schäden zu zeigen, wurden für die Freisetzungskategorien FK1 und FK2 Rechenläufe mit geänderten Aufstiegshöhen durchgeführt. Die Beschränkung auf zwei Freisetzungskategorien geschah aus folgenden Gründen: Einmal treten nur bei FK1 bis FK4 Frühschäden auf, zum zweiten erfolgt nur bei FK1, FK2, FK6 und FK7 eine nennenswerte thermische Energiefreisetzung. FK6 und FK7 bleiben außer Betracht, da hierbei nur Spätschäden auftreten. Der Einfluß der Aufstiegshöhe auf Spätschäden ist aber gering, wie unten gezeigt wird.

Die Aufstiegshöhe wurde willkürlich um den Faktor 1,75 erhöht, nachdem sie zunächst für die jeweiligen Ausbreitungsbedingungen mit den Referenzwerten der thermischen Energiefreisetzung errechnet wurde. Entsprechend wurde bei der Erniedrigung um den Faktor 0,5 verfahren. Die obere Begrenzung der Aufstiegshöhe (identisch mit dem maximalen Ausbreitungsparameter  $\sigma_{z,max}$  [Abschnitt 4.4]) bzw. die untere Begrenzung auf die geometrische Freisetzungshöhe  $h_0$  gilt auch für die neu errechneten Aufstiegshöhen.

Tabelle F8, 4-9 zeigt bei vergrößertem H eine deutliche Reduzierung des Mittelwertes und des Maximums der Fröhschäden. Eine entsprechende Erhöhung der Fröhschäden tritt bei der Reduzierung der Aufstiegshöhe ein. Die Erhöhung des maximalen Fröhschadens ist allerdings nicht so groß. Spätschäden werden durch eine Änderung der Aufstiegshöhe nicht systematisch beeinflusst; außerdem sind die Änderungen meist gering.

Freisetzungskategorie	Schadensart	A u f s t i e g s h ö h e		
		= H (Referenzfall)	= 1,75 H	= 0,5 H
FK1	MW-FS	1	0,29	2,25
	MW-SS	1	0,98	0,90
	Max-FS	1	0,21	1,16
	Max-SS	1	0,91	1,29
FK2	MW-FS	1	0,04	1,74
	MW-SS	1	1,03	0,87
	Max-FS	1	0,33	1,21
	Max-SS	1	0,98	0,93

MW-FS = Mittelwert / Fröhschäden  
 MW-SS = Mittelwert / Spätschäden  
 Max-FS = Maximaler Wert / Fröhschäden  
 Max-SS = Maximaler Wert / Spätschäden

Tab. F8, 4-9:

Einfluß auf die Ergebnisse bei Variation der Aufstiegshöhe  
 (1 Standort in der Region Oberrheinische Tiefebene, 115 Wetterabläufe)



#### 4.14.7 Einfluß der Mischungsschichthöhe

Die vertikale Ausdehnung der Aktivitätsfahne wird im allgemeinen durch eine Sperrschicht begrenzt, die den Turbulenz-  
austausch zu größeren Höhen unterbindet oder wenigstens stark ein-  
schränkt. Diese Sperrschicht wird Mischungsschichthöhe genannt.  
Im Modell wird sie simuliert, indem der Ausbreitungsparameter  
 $\sigma_z$ , der die vertikale Ausdehnung der Aktivitätsfahne beschreibt,  
bei Erreichen eines von der Ausbreitungskategorie abhängigen  
Wertes  $\sigma_{z,max}$  konstant gehalten wird. Die Mischungsschichthöhe  
 $h_m$  und  $\sigma_{z,max}$  stehen in einem festen Verhältnis zueinander.

$$\sigma_{z,max} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} h_m \approx 0,8 h_m \quad (4.29)$$

Da für die Bundesrepublik Deutschland keine ausreichende Doku-  
mentation über die Mischungsschichthöhe vorhanden ist, wie z.B.  
in den USA /F8, 4-85/, wurden die Maximalwerte von  $\sigma_z$  zunächst  
pauschal festgelegt. Die Unsicherheit bei der Wahl der Begren-  
zung von  $\sigma_z$  beeinflusst die Anzahl der Frühschäden allerdings  
nur geringfügig.

In /F8, 4-86/ konnte dies für die amerikanische Reaktorsicher-  
heitsstudie gezeigt werden. Wird  $h_m$  und damit  $\sigma_{z,max}$  um den  
Faktor 2 erhöht, so ändert sich die Wahrscheinlichkeit für aku-  
ten Strahlentod nicht gegenüber dem Referenzfall. Eine Ernied-  
rigung um den Faktor 2,5 oder sogar 10 erhöht die Wahrschein-  
lichkeit für akuten Strahlentod um einen Faktor von maximal 3;  
dies aber nur bis zu einer Entfernung von etwa 3 km. Jenseits  
dieser Entfernung verringert sich die Erhöhung der Wahrschein-  
lichkeit und stimmt ab etwa 20 km mit der Wahrscheinlichkeit  
des Referenzfalls überein. Die Zahl der tatsächlichen Frühschä-  
den ist noch weniger beeinflusst, da die Bevölkerungsdichte in  
drei Kilometern Umkreis von Kernkraftwerken im allgemeinen ge-  
ringer ist als in größeren Entfernungen.

Diese weitgehende Unabhängigkeit der Frühschäden von der Mi-  
schungsschichthöhe wird wie folgt erklärt: Das Auftreten aku-  
ter Todesfälle ist bei trockenen Wetterabläufen auf Entfernun-

gen von einigen Kilometern begrenzt. Die Obergrenze einer Aktivitätsfahne erreicht die Mischungsschicht aber erst in größeren Entfernungen, wie folgendes Beispiel zeigt: Bei der Ausbreitungskategorie F und einer Freisetzungshöhe von  $h_{\text{eff}} = 10$  m erreicht die Aktivitätsfahne die Mischungsschichthöhe von 500 bis 1000 m erst in einer Entfernung von 110 bzw. 620 km (Bild F8, 4-20). Der obere Rand der Aktivitätsfahne (RA) wird dabei nach /F8, 4-9/ wie folgt berechnet:

$$RA = h_{\text{eff}} + 2,15 \sigma_z(x) \quad (4.30)$$

Der zweite Grund liegt in der Tatsache, daß Fröhschäden überwiegend bei Wetterabläufen mit Niederschlag auftreten. Die starke Strahlung vom Boden ist in derartigen Situationen überwiegend für die Fröhschäden verantwortlich. Die aus der Aktivitätsfahne ausgewaschene Aktivität, die die Strahlung vom Boden erzeugt, ist aber unabhängig von der Mischungsschichthöhe.

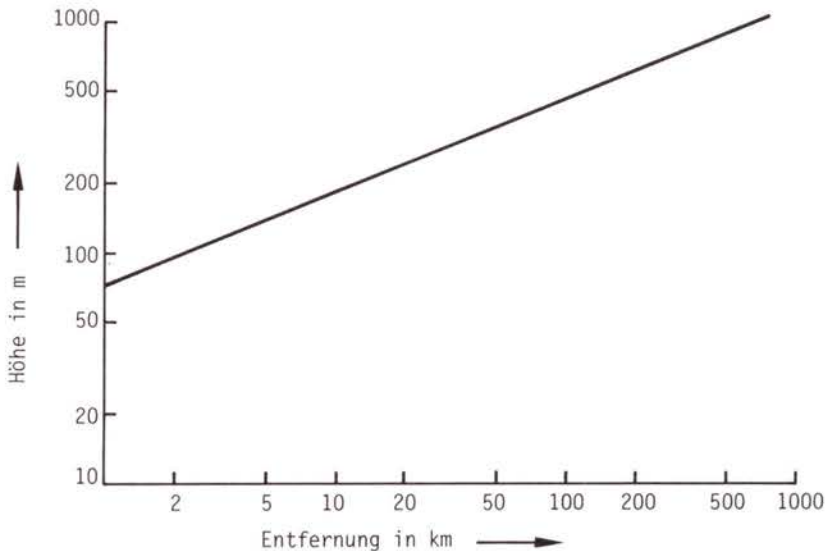


Bild F8, 4-20:

Höhe des oberen Randes der Aktivitätsfahne (RA) bei Kategorie F ( $h_{\text{eff}} = 10$  m)

Unabhängig von den Untersuchungen in /F8, 4-86/, konnte durch eigene Untersuchungen der geringe Einfluß der Mischungsschicht-  
höhe auf die gesundheitlichen Schäden bestätigt werden. Die  
Auswirkung einer geänderten oberen Begrenzung für  $\sigma_{z,max}$  wurde  
wie folgt untersucht: Entsprechend der Tabelle F8, 4-10 wurden  
mit halbierten  $\sigma_{z,max}$ -Werten Unfallfolgenrechnungen für alle  
Freisetzungskategorien und für vier Standortregionen mit je ei-  
nem Standort durchgeführt. Eine Halbierung der Mischungsschicht-  
höhe bewirkt nur eine geringfügige Abnahme der kollektiven Spät-  
schäden. Frühschäden werden ebenfalls nur wenig beeinflusst. Le-  
diglich der Maximalschaden steigt um etwa 8 % an.

Schadensart <sup>1)</sup>	Maximale vertikale Ausbreitungsparameter	
	= $\sigma_{z,max}$ (Kategorie) (Referenzfall) <sup>2)</sup>	= 0,5 $\sigma_{z,max}$ (Kategorie)
EW-FS	1	1,05
EW-SS	1	0,98
Max-FS	1	1,08
Max-SS	1	0,97

- 1) EW-FS = Erwartungswert / Frühschäden  
 EW-SS = Erwartungswert / Spätschäden  
 Max-FS = Maximaler Wert / Frühschäden  
 Max-SS = Maximaler Wert / Spätschäden

- 2)  $\sigma_{z,max}$  (Kategorie A) = 2000 m  
 $\sigma_{z,max}$  (Kategorie B) = 1500 m  
 $\sigma_{z,max}$  (Kategorie C bis F) = 1000 m

Tab. F8, 4-10:

Einfluß auf die Ergebnisse bei Variation des  $\sigma_{z,max}$   
 (Freisetzungskategorien FK1 bis FK7 unter Berücksichtigung ih-  
 rer tatsächlichen Häufigkeiten, alle vier Standortregionen mit  
 je einem Standort, jeweils 115 Wetterabläufe)

#### 4.14.8 Einfluß der trockenen und nassen Ablagerung

Das verwendete Modell der trockenen und nassen Ablagerung ist an die amerikanische Reaktorsicherheitsstudie angelehnt.

Wichtigster Modellparameter der trockenen Ablagerung ist die Ablagerungsgeschwindigkeit  $v_d$ . Die in der Literatur aufgrund von Feldexperimenten, Windkanaluntersuchungen und theoretischen Überlegungen angegebenen Ablagerungsgeschwindigkeiten schwanken über mehrere Zehnerpotenzen /F8, 4-49/. Da das Aerosolgrößenspektrum, das die Ablagerungsgeschwindigkeit stark bestimmt, nicht bekannt ist, wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit die amerikanischen Parameterwerte übernommen (Tabelle F8, 4-11).

		Elementares Jod	Aerosole	Edelgase	
Ablagerungsgeschwindigkeit $v_d$ in m/s		$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	0	
"washout"- Koeffizient $\lambda$ in $s^{-1}$	Diese Studie (DRS)	Niederschlagsintensität in mm/h			
		< 1	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0
		1 - 3	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0
	> 3	$10 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	0	
	WASH-1400	warm frontal storms (Kategorien E - F)	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0
	convective storms (Kategorien A - D)	$10 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	0	

Tab. F8, 4-11:

Ablagerungsgeschwindigkeit und "washout"-Koeffizient

Der wichtigste Modellparameter der nassen Ablagerung ist der "washout"-Koeffizient  $\lambda$ . Die Menge der ausgewaschenen Aktivität ist überwiegend eine Funktion der Niederschlagsdauer und der Niederschlagsintensität. Damit läßt sich der "washout"-Koeffi-

zient  $\lambda$  in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität angeben /F8, 4-44 und -87/.

In WASH-1400 wurde dagegen eine Abhängigkeit des "washout"-Koeffizienten vom Niederschlagstyp angenommen, da das meteorologische Datenmaterial keine Information über die Niederschlagsintensität enthielt. Es war nur die Angabe "Niederschlag" oder "kein Niederschlag" vorhanden. Der Niederschlagstyp wiederum wurde über die Ausbreitungskategorie ermittelt. Danach tritt Aufgleitregen (warm frontal storms) bei den Ausbreitungskategorien E und F auf; schauerartige Niederschläge (convective storms) sind den Ausbreitungskategorien A bis D zugeordnet (Tabelle F8, 4-11).

Eine derartige Zuordnung ist fragwürdig und auf deutsche Verhältnisse nicht übertragbar. Eine Aufschlüsselung der meteorologischen Daten einschließlich der Niederschlagsintensität, die am Kernforschungszentrum Karlsruhe kontinuierlich erfaßt werden /F8, 4-88 und -89/, zeigt dies deutlich. Der Tabelle F8, 4-12 sind die Stundenwerte von Niederschlag und Ausbreitungskategorie zugrunde gelegt. Niederschlag fällt in 10,4 % der Zeit, wobei die Ausbreitungskategorien A bis D 8,4 % und die Kategorien E oder F 2 % beitragen.

Würde der "washout"-Koeffizient nach WASH-1400 festgelegt, so wäre in 8,4 % der Zeit ein hoher "washout"-Koeffizient und nur in 2 % ein niedriger Koeffizient zu wählen. Tatsächlich sind Niederschläge mit geringer Intensität, z.B. bis 0,5 mm/h, mit 6,8 % weitaus häufiger als solche mit hoher Intensität (z.B. > 3 mm/h, Häufigkeit etwa 0,4 %).

Daher wurde in der vorliegenden Studie der "washout"-Koeffizient in Beziehung zur Niederschlagsintensität gesetzt (Tabelle F8, 4-11). Gemäß den Zielsetzungen in Phase A (weitgehende Vergleichbarkeit mit WASH-1400) stimmen die Zahlenwerte für  $\lambda$  mit Ausnahme einer neu eingeführten mittleren Stufe mit den amerikanischen Werten überein.

Niederschlagsintensität in mm/h		Ausbreitungskategorie								Summe
		A	B	C	D	$\Sigma(A-D)$	E	F	$\Sigma(E-F)$	
Bereich	Mittel									
0,02 - 0,5	0,17	0,023	0,081	0,873	4,374	5,351	1,094	0,395	1,489	6,841
0,51 - 3,0	1,17	-	0,046	0,384	2,259	2,689	0,326	0,105	0,431	3,120
> 3,0	5,8	-	0,012	0,117	0,235	0,364	0,035	-	0,035	0,398
Summe		0,023	0,139	1,374	6,868	8,404	1,455	0,500	1,955	10,359

Tab. F8, 4-12:

Niederschlagshäufigkeit in Prozent in Abhängigkeit von der Ausbreitungskategorie und der Niederschlagsintensität (gemessen im Kernforschungszentrum Karlsruhe)

Die Abhängigkeit der Früh- und Spätschäden von der trockenen Ablagerungsgeschwindigkeit  $v_d$  und dem "washout"-Koeffizienten  $\lambda$  wurde anhand der drei Freisetzungskategorien FK1 bis FK3 untersucht; denn es treten nennenswerte Frühschäden nur bei diesen Freisetzungskategorien auf. Weiterhin wurde die Parametervariation auf nur einen Standort der Standortregion Oberrheinische Tiefebene beschränkt.

In jeder Freisetzungskategorie sind die Ergebnisse auf den Mittel- bzw. Maximalwert des Referenzfalls normiert (Tabelle F8, 4-13).

Wird für Aerosole eine um die Hälfte verringerte Ablagerungsgeschwindigkeit angenommen (Variation 1), so reduzieren sich die Frühschäden. Die Reduktion wird um so größer, je geringer die freigesetzte thermische Energie und damit der Aufstieg der Aktivitätsfahne ist. Die Zahl der Spätschäden wird dagegen in allen drei Freisetzungskategorien weit weniger beeinflusst.

Eine drastische Erhöhung von  $v_d$  und  $\lambda$  um den Faktor 5 (Variation 2) bewirkt ein starkes Ansteigen der Frühschäden. Spätschäden werden dagegen hierdurch reduziert.

Eine Erniedrigung von  $v_d$  und  $\lambda$  um den Faktor 5 (Variation 3) reduziert die Frühschäden beträchtlich. Die Spätschäden werden dagegen etwas erhöht. Generell zeigt Tabelle F8, 4-13, daß Frühschäden sensitiver gegenüber Änderungen von  $v_d$  und  $\lambda$  reagieren als Spätschäden.

Werden obige Parametervariationen auf alle Freisetzungskategorien unter Berücksichtigung ihrer Eintrittshäufigkeiten und auf alle Standorte angewendet, so ist zu erwarten, daß die Änderung der Kollektivschäden (sowohl Früh- als auch Spätschäden) nicht im selben Maße erfolgt wie in Tabelle F8, 4-13.

Dies wurde in einer weiteren Parametervariation untersucht. Dabei wurden die Freisetzungskategorien FK1 bis FK7 und alle vier

Freisetzungskategorie	Schadensart <sup>1)</sup>	Referenzwerte <sup>2)</sup>	Variation 1	Variation 2	Variation 3
		$v_{\text{Jod}}$ $v_{\text{Aerosol}}$ $\lambda_i (i = 1,2,3)$	$v_{\text{Jod}}$ $0,5 v_{\text{Aerosol}}$ $\lambda_i$	$5 v_{\text{Jod}}$ $2,5 v_{\text{Aerosol}}$ $5 \lambda_i$	$0,5 v_{\text{Jod}}$ $0,1 v_{\text{Aerosol}}$ $0,5 \lambda_i$
FK1	MW-FS	1	0,93	4,69	0,004
	MW-SS	1	0,96	0,48	1,10
	Max-FS	1	1,00	2,14	0,004
	Max-SS	1	0,92	0,80	1,19
FK2	MW-FS	1	0,66	2,82	0,18
	MW-SS	1	0,93	0,30	1,31
	Max-FS	1	0,58	2,00	0,23
	Max-SS	1	0,96	0,48	1,56
FK3	MW-FS	1	0,30	3,02	0,07
	MW-SS	1	0,92	0,37	1,17
	Max-FS	1	0,43	1,37	0,11
	Max-SS	1	0,89	0,71	1,39

1) MW-FS = Mittelwert / Frühschäden  
 MW-SS = Mittelwert / Spätschäden  
 Max-FS = Maximaler Wert / Frühschäden  
 Max-SS = Maximaler Wert / Spätschäden

2)  $v_{\text{Jod}} = 0,01 \text{ m/s}$        $\lambda_1 = 1 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$   
 $v_{\text{Aerosol}} = 0,01 \text{ m/s}$        $\lambda_2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$   
 $\lambda_3 = 10 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

Tab. F8, 4-13:

Einfluß auf die Ergebnisse bei Variation der Parameter der trockenen ( $v_d$ ) und nassen Ablagerung ( $\lambda_i$ )

(1 Standort in der Standortregion Oberrheinische Tiefebene, 115 Wetterabläufe)



Standortregionen mit je einem Standort in die Berechnung einbezogen. Variiert wurden nur die "washout"-Konstanten (Tabelle F8, 4-14). Die gewählten Werte von  $\lambda$  basieren auf Fig. 5.10 in /F8, 4-45/ und berücksichtigen die Verteilung der Niederschlagsintensität im Kernforschungszentrum Karlsruhe.

Schadensart <sup>1)</sup>	"washout"-Koeffizient <sup>2)</sup>	Referenzwerte	Variation 1	Variation 2
	$\lambda_1$	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,47 \cdot 10^{-4}$	$0,7 \cdot 10^{-4}$
	$\lambda_2$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
	$\lambda_3$	$10 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-4}$
EW-FS		1	0,71	0,87
EW-SS		1	1,04	1,01
Max-FS		1	0,47	0,76
Max-SS		1	1,00	1,00

- 1) EW-FS = Erwartungswert / Frühschäden  
 EW-SS = Erwartungswert / Spätschäden  
 Max-FS = Maximaler Wert / Frühschäden  
 Max-SS = Maximaler Wert / Spätschäden

- 2) Die Zuordnung der "washout"-Koeffizienten  $\lambda_1$  bis  $\lambda_3$  zur Niederschlagsintensität ist Tabelle F8, 4-11 zu entnehmen.

Tab. F8, 4-14:

Einfluß auf die Ergebnisse bei Variation des "washout"-Koeffizienten  $\lambda_1$  (Ablagerungsgeschwindigkeit entspricht Referenzwerten)

(Freisetzungskategorien FK1 bis FK7 unter Berücksichtigung ihrer tatsächlichen Häufigkeiten; alle vier Standortregionen mit je einem Standort; jeweils 115 Wetterabläufe)

Die niedrigeren  $\lambda$ -Werte ergeben sich aus der unteren Kurve in Fig. 5.10, die ihrerseits auf Messungen von /F8, 4-90/ beruhen. Entsprechend sind die höheren  $\lambda$ -Werte aus der oberen Kurve in Fig. 5.10 abgeleitet, die auf theoretischen Überlegungen von Mason /F8, 4-91/ basieren.

Durch die Ergebnisse wird bestätigt, daß eine Änderung von  $\lambda$  die Spätschäden nur unwesentlich beeinflusst. Zum anderen bewirkt die Änderung von  $\lambda$  eine ähnlich deutliche Abnahme der kollektiven Frühschäden, wie sich dies bei der obigen Betrachtung anhand einzelner Freisetzungskategorien andeutete.

#### 4.14.9 Einfluß der Windscherungen

In Höhen oberhalb 500 bis 1000 m werden die Reibungseffekte der Erdoberfläche im allgemeinen vernachlässigbar klein. Dort wird der Wind nur durch den Druckgradienten und die Corioliskraft bestimmt. Dieser sogenannte geostrophische Wind weht parallel zu den Isobaren. In Bodennähe ist die Windgeschwindigkeit infolge der Reibung wesentlich schwächer und zudem noch in der Richtung gedreht. Diese Richtungs- bzw. Geschwindigkeitsänderung mit der Höhe wird als Windscherung bezeichnet. Über dem Meer oder sehr glattem Gelände ist die Windrichtung um etwa  $10 - 30^\circ$  gegenüber den Isobaren gedreht und die Windgeschwindigkeit kann bis zu 90 % der geostrophischen Windgeschwindigkeit erreichen. Über sehr rauher Oberfläche, wie etwa dem Häusermeer einer Stadt, können diese Werte etwa  $35 - 50^\circ$  bzw. weniger als 10 % betragen.

In /F8, 4-92/ wurden für einige ausgewählte Wettersituationen mit einem aufwendigen Ausbreitungsmodell Windscherungen berücksichtigt und Vergleichsrechnungen mit dem in WASH-1400 verwendeten einfachen Ausbreitungsmodell angestellt. Es zeigte sich, daß Frühschäden mit dem einfachen Modell pessimistisch berechnet wurden.

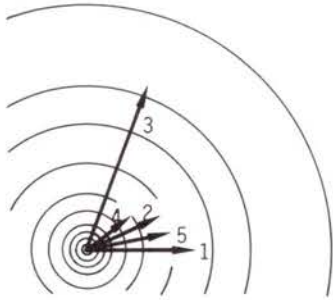
Das in der vorliegenden Studie verwendete Ausbreitungsmodell berücksichtigt Windrichtungsscherungen mit der Höhe nicht explizit. Da jedoch experimentell ermittelte Ausbreitungsparameter verwendet werden, sind Windrichtungsscherungen bis zu einem gewissen Ausmaß im Modell enthalten. Der Windgeschwindigkeitszunahme mit der Höhe wird durch die Vorgabe eines Windprofils und der Mittelung der Windgeschwindigkeit über die Aufstiegs-höhe der Aktivitätsfahne Rechnung getragen.

#### 4.14.10 Einfluß einer gleichbleibenden Ausbreitungsrichtung

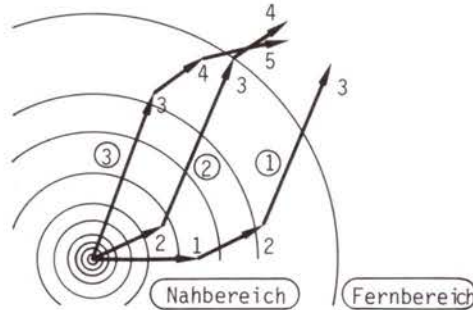
Das Ausbreitungsmodell geht von der Annahme einer geradlinigen Ausbreitung aus. Windrichtungsänderungen während des Ausbreitungsvorganges bleiben unberücksichtigt. Dieses Modell ist in Bild F8, 4-21 als Option 1 dargestellt. Bei Unfällen mit mehrstündiger Freisetzung werden die Ortsdosen hierdurch überschätzt, da die Aktivitätskonzentrationsfelder der einzelnen Stunden vollständig überlagert werden, auch wenn sich die Windrichtung inzwischen geändert hat. Das kann unter Umständen zu einer Überschätzung der Frühschäden führen. Wenn die Dosiswerte in den einzelnen Freisetzungsphasen unterhalb der Schwellwertdosis bleiben, so ist es bei vollständiger Überlagerung möglich, daß die Schwellwertdosis überschritten wird und damit Frühschäden ermittelt werden. Bei Unfällen mit einstündiger Freisetzung tritt diese Überschätzung nicht auf, da in diesem Fall keine Überlagerung erfolgt.

In der Option 2 des Bildes F8, 4-21 wird die während verschiedener Freisetzungsphasen freigesetzte Aktivität mit der jeweils zu Beginn der Phase herrschenden Windrichtung geradlinig transportiert. Die Dosen werden unter Umständen in größerer Entfernung unterschätzt, da ein durch gegenläufige Windrichtungsänderungen verursachtes mehrmaliges Überstreichen einer Fläche durch die Aktivitätsfahnen verschiedener Freisetzungsphasen nicht zugelassen wird. Daher werden die gesundheitlichen Folgen in dieser Modelloption möglicherweise unterschätzt.

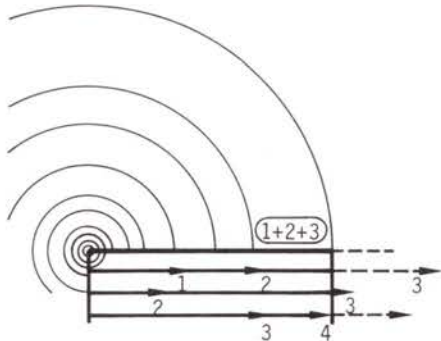
Eine weitere Option 3 ist im Bild F8, 4-21 dargestellt. Die Trajektorie der Aktivitätsfahne wird approximiert durch in jedem Entfernungsbereich azimuthal versetzte radiale Teilstrahlen. Der Winkel der jeweiligen azimuthalen Versetzung hängt vom Winkelbereich des zeitlich korrespondierenden Teils der Trajektorie ab. Mit dieser Option wird der Transportweg am realistischsten beschrieben.



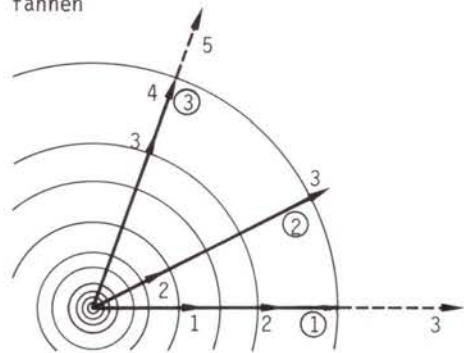
Windvektoren (stündliche Mittelwerte aus kontinuierlichen Messungen)



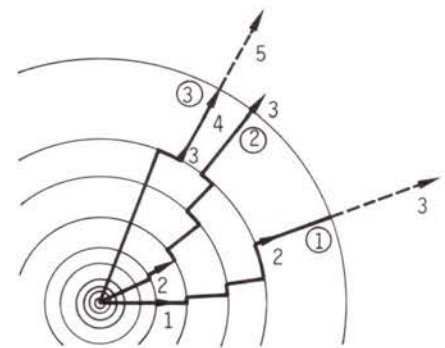
Trajektorien dreier stündlich aufeinanderfolgender Aktivitäten



Option 1:  
Radiale Ausbreitung der drei Aktivitäten in die gleiche Richtung



Option 2:  
Radiale Ausbreitung in die jeweilige Anfangsrichtung



Option 3:  
Radiale Ausbreitung in jeweils azimuthal versetzte Richtungen

Bild F8, 4-21:

Optionen zur Berücksichtigung der Windrichtungsänderungen bei einer Freisetzung in drei Phasen

Eine Vergleichsrechnung zwischen Option 1 und Option 3 ergab /F8, 4-93/: Der Mittel- bzw. Maximalwert für Fröhschäden liegt bei der Modelloption 3 im Fall der Freisetzungskategorie 2 um 36 bzw. 29 % niedriger.

Für die Freisetzungskategorie 1, die Standortregion Oberrheinische Tiefebene und 115 Wetterabläufe wurde eine Auswertung der tatsächlich aufgetretenen Windrichtungsdifferenzen vorgenommen. Dabei wurde für jeden Wetterablauf der Betrag der Richtungsdifferenz für vorgegebene Zeit- bzw. Wegdistanzen untersucht. Nach Bild F8, 4-22 beträgt in 60 % aller Fälle die Differenz zwischen der Windrichtung zu Beginn der Freisetzung und der Windrichtung in der 2. Stunde etwa  $10^{\circ}$ . Die Windrichtung am Freisetzungsort und in 100 km Abstand unterscheidet sich in der Hälfte aller Fälle um weniger als  $20^{\circ}$ .

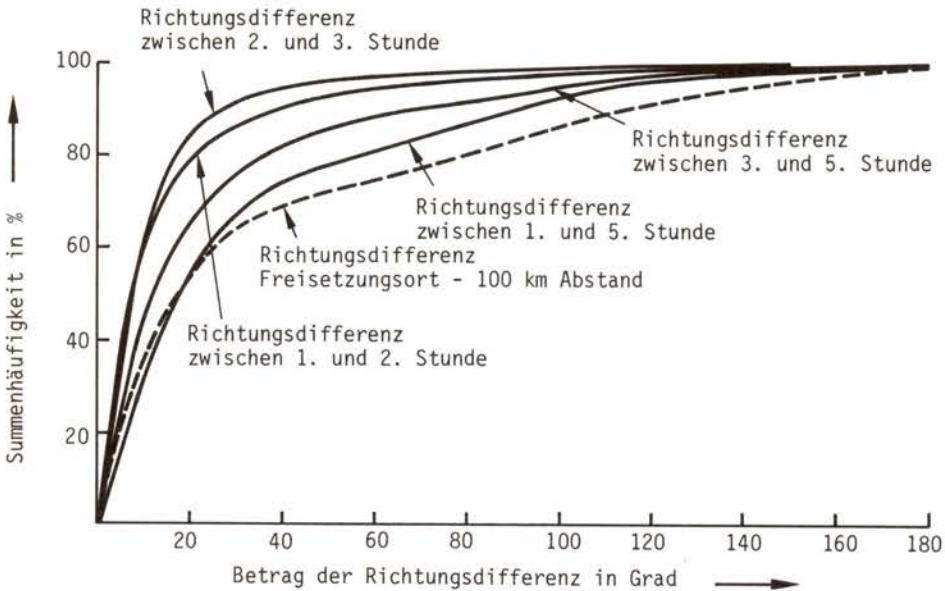


Bild F8, 4-22:

Häufigkeit der Richtungsdifferenz für einige Zeit- bzw. Wegdistanzen; Fahnenaufstieg entsprechend FK1, meteorologische Daten Oberrheinische Tiefebene, 115 Wetterabläufe

#### 4.14.11 Einfluß einer Windrichtungsgleichverteilung

Im Referenzmodell wird angenommen, daß die ausgewählten Wetterabläufe in jeder der vorgegebenen 36 Windrichtungen ( $10^{\circ}$  Abstand) gleich wahrscheinlich sind. Dies gilt für alle Standorte. Im Einzelfall ist dies sicher nicht zutreffend. Da aber 19 Standorte in verschiedenen topographischen Gebieten der Bundesrepublik betrachtet werden, ist anzunehmen, daß positive und negative Korrelationen zwischen Windrichtungshäufigkeit und Bevölkerungsdichte einander die Waage halten. Dies wurde jedenfalls in /F8, 4-94/ für amerikanische Verhältnisse gezeigt. Etwaige Risikoüberschätzungen an einem Standort werden durch entsprechende Unterschätzungen an anderen ausgeglichen. Dies ist in der Bundesrepublik in ähnlicher Weise zu erwarten.

Würde an Stelle der Gleichverteilung der Windrichtung die tatsächliche Richtungsverteilung an den einzelnen Standorten eingesetzt, so bliebe der Schadensumfang unverändert. Es würde sich nur die Eintrittshäufigkeit eines bestimmten Schadensumfangs ändern.

#### 4.14.12 Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen

In Tabelle F8, 4-15 wird zusammenfassend der Einfluß auf die Kollektivschäden gezeigt, der durch Änderung eines Parameterwertes bzw. einer Teilmodellannahme eintreten kann. Die Ergebnisse sind als Relativzahlen bezüglich des Referenzfalles angegeben. Der Referenzfall stellt das meteorologische Teilmodell entsprechend den Abschnitten 4.1 bis 4.13 dar.

Den größten Einfluß auf die Bandbreite der Ergebnisse üben die nasse Ablagerung und die Aufstiegshöhe aus. Deutlich zeigt sich auch, daß Spätschäden im Vergleich zu Frühschäden weit weniger sensitiv sind.

Parameter bzw. Teilmodell	Relative Änderung	
	Frühschäden	Spätschäden
Azimutale Stufenfunktion	0,97 - 1,02	0,98 - 1,01
Anzahl der Wetterabläufe	0,95 - 1,05	0,98 - 1,02
Mischungshöhe bzw. $\sigma_{z,max}$	0,95 - 1,05	0,98 - 1,02
Geradlinige Ausbreitung und Windscherungen	0,85 - 1,05	0,98 - 1,02
Richtungsgleichverteilung	0,95 - 1,05	0,98 - 1,02
Trockene Ablagerung	0,25 - 1,05	0,95 - 1,05
Aufstiegshöhe	0,10 - 2,00	0,95 - 1,05
Auswaschung	0,05 - 3,00	0,50 - 1,25

Tab. F8, 4-15:

Einfluß der Parameter bzw. Modellannahmen auf die Erwartungswerte der Kollektivschäden

## 5. DOSISMODELL

### 5.1 Übersicht

#### 5.1.1 Verknüpfung des Dosismodells mit dem Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen

Wie aus Bild F8, 2-1 ersichtlich, ist das Dosismodell eng mit dem Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen (Kapitel 6) verknüpft. Eine Reihe der in diesem Modell vorgesehenen Maßnahmen, wie

- Umsiedlung,
- Dekontamination,
- Verbot des Verzehrs lokal erzeugter landwirtschaftlicher Produkte,

orientiert sich an Dosiskriterien, d.h., derartige Maßnahmen werden dann ergriffen, wenn die Möglichkeit besteht, daß bestimmte vorgegebene Dosen überschritten werden. Dies macht die Vorausberechnung von Dosen erforderlich. Da sich die Dosiskriterien auf den ununterbrochenen Aufenthalt von Personen im Freien bzw. auf den ständigen Verzehr lokal erzeugter landwirtschaftlicher Produkte beziehen, werden die unter diesen Annahmen vorausberechneten Dosen im folgenden als potentielle Dosen bezeichnet.

Unter Berücksichtigung der im Modell vollzogenen Schutz- und Gegenmaßnahmen werden dann im folgenden Schritt jene Dosen berechnet, die bei Berücksichtigung der die Bestrahlung reduzierenden Wirkungen dieser Maßnahmen zu erwarten sind. Diese Dosen werden deshalb im folgenden als zu erwartende Dosen bezeichnet.

#### 5.1.2 Strahlenexposition, Expositionspfade und belastete Organe

Ist der Körper mit seinen Organen und Geweben einem Strahlenfeld ausgesetzt, so bezeichnet man dies als Strahlenexposition.



Als Kenngröße für die Strahlenexposition wird die Energiedosis  $D$  für spezielle Organe und den Ganzkörper angegeben. Sie ist ein Maß für die pro Organmasse aufgenommene Strahlenenergie. Ihre Einheit ist das "rad"<sup>1)</sup>.

Die Wege, über die aus der freigesetzten Aktivität herrührende Strahlung den Menschen erreicht, bezeichnet man als Expositionspfade. Aus der Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre resultieren im wesentlichen folgende Expositionspfade:

- externe Bestrahlung durch die vorbeiziehende Aktivitätsfahne (EF),
- externe Bestrahlung durch die Bodenkontamination (EB),
- interne Bestrahlung durch die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität (Inhalation), unterteilt in
  - Inhalation von luftgetragenen Radionukliden aus der Aktivitätsfahne (IH) und
  - Inhalation von resuspendierten Radionukliden, die schon am Boden abgelagert waren (IHr),
- interne Bestrahlung durch mit der Nahrung inkorporierte Aktivität (Ingestion) (IG).

Die Berechnung der Strahlenexposition wird für folgende, für die Schadensermittlung wichtigen Organe (O)<sup>2)</sup> durchgeführt:

- Knochenmark (KM),
- Brust (BR),
- Lunge (LG),
- Schilddrüse (SD),
- Knochenoberfläche (KO).

---

<sup>1)</sup> 1 rad = 0,01 J/kg (oder 100 erg/g). Von der Energiedosis mit der Einheit 1 rad leitet sich die Äquivalentdosis ab, die die biologische Wirksamkeit der unterschiedlichen Strahlenarten berücksichtigt. Ihre Einheit ist das "rem". Zur Vereinfachung des Textes wird im folgenden das Wort Dosis auch für die Äquivalentdosis benutzt. Den Dimensionsangaben "rad" bzw. "rem" kann dann entnommen werden, ob es sich um die Energiedosis oder die Äquivalentdosis handelt.

<sup>2)</sup> Die Auswahl dieser Organe wird in Kapitel 7 begründet.

Der Schadensermittlung für die übrigen Organe (Restkörper) wird die Strahlenexposition des Ganzkörpers (GK) zugrunde gelegt.

Zur Ermittlung der genetisch signifikanten Dosis wird die Strahlenexposition der Hoden (Testes (TS)) und Eierstöcke (Ovarien (OV)) berechnet.

### 5.1.3 Potentielle Dosen und zu erwartende Dosen

Zur Entscheidung über Gegenmaßnahmen<sup>1)</sup> werden aufgrund der dabei getroffenen Annahmen - ununterbrochener Aufenthalt im Freien, ständiger Verzehr lokal erzeugter landwirtschaftlicher Produkte - potentielle Dosen berechnet:

Zur Entscheidung über Gegenmaßnahmen zur Verringerung der Fröh-schäden

- die Knochenmarkdosis infolge externer Bestrahlung durch die am Boden abgelagerte Aktivität während der ersten 7 Tage

$$D_{EB}^{KM} (7d)$$

Zur Entscheidung über Gegenmaßnahmen zur Verringerung der somatischen Spätschäden und der genetischen Belastung

- die Ganzkörperdosis infolge externer Bestrahlung durch die am Boden abgelagerte Aktivität während der ersten 30 Jahre

$$D_{EB}^{GK} (30a)$$

und

- die Ganzkörper-, Knochenmark- und Schilddrüsendosis infolge interner Bestrahlung durch die mit den Nahrungsmitteln inkorporierte Aktivität während der ersten 50 Jahre

$$D_{IG}^{GK} (50a), D_{IG}^{KM} (50a), D_{IG}^{SD} (50a)$$

---

<sup>1)</sup> Gegenmaßnahmen bedürfen besonderer Vorbereitung; darunter fallen z.B. alle Bevölkerungsbewegungen (Kapitel 6). Unter Schutzmaßnahmen werden dagegen die ohne besonderen Aufwand durchzuführenden Maßnahmen, wie das Aufsuchen von Häusern, verstanden.

Unter Berücksichtigung der die Strahlung reduzierenden Wirkung der Schutz- und Gegenmaßnahmen werden dann die zu erwartenden Dosen ermittelt:

Zur Ermittlung der Frühschäden

- die Kurzzeit-Knochenmarkdosis; diese setzt sich zusammen aus der Dosis infolge
  - externer Bestrahlung durch die Aktivitätsfahne,
  - externer Bestrahlung durch die Bodenkontamination innerhalb der ersten 7 Tage und
  - interner Bestrahlung durch die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität der Abluftfahne während der ersten 30 Tage, wobei die Dosis, die vom 7. bis zum 30. Tag aufläuft, mit dem Faktor 0,5 gewichtet wird.

$$D^{KM} = f_{EF} \cdot D_{EF}^{KM} + f_{EB} \cdot D_{EB}^{KM}(7d) + f_{IH} \cdot \left\{ D_{IH}^{KM}(7d) + \frac{1}{2} \cdot D_{IH}^{KM}(8d + 30d) \right\} \quad (5.1)$$

Die Faktoren  $f$  sind Reduktionsfaktoren, die die Wirkung der getroffenen Schutz- und Gegenmaßnahmen berücksichtigen. Auf sie wird weiter unten eingegangen.

Zur Ermittlung der somatischen Spätschäden

- die Dosen für die Organe (O)
  - Knochenmark (KM),
  - Knochenoberfläche (KO),
  - Lunge (LG),
  - Schilddrüse (SD),
  - Brust (BR),
  - Ganzkörper (GK)

aufsummiert über alle aus der Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre resultierenden Expositionspfade. Dabei wird die Strahlenexposition sowohl der unmittelbar betroffenen Bevölkerung als auch der nach dem Unfall geborenen Personen berücksichtigt.

$$D^O = f_{EF} \cdot D_{EF}^O + f_{EB} \cdot D_{EB}^O + f_{IH} \cdot D_{IH}^O + f_{IHR} \cdot D_{IHR}^O + f_{IG} \cdot D_{IG}^O \quad (5.2)$$

Bei Entfernungen > 540 km werden, da in diesem Entfernungsbereich die Aktivität als am Boden niedergeschlagen betrachtet wird (Abschnitt 4.12), nur noch die Expositionspfade EB, IHR und IG berücksichtigt.

#### Zur Beurteilung der genetischen Belastung

- die genetisch signifikante Dosis auf die bei den Dosen zur Ermittlung der somatischen Spätschäden beschriebenen Weise.

Die genetisch signifikante Dosis  $D^{GS}$  ist definiert als die Dosis, die - falls sie allen Personen einer Bevölkerung appliziert worden wäre - den gleichen genetischen Schaden in der Bevölkerung hervorrufen würde wie die tatsächlichen Dosen, die den verschiedenen Personen der Bevölkerung appliziert werden /F8, 5-1, Chapter II(27)/.

In ihrer Berechnung wird von UNSCEAR /F8, 5-2/ folgende Formel angegeben (Symbole ebenfalls nach UNSCEAR):

$$D^{GS} = \frac{\sum_j \sum_k (N_{jk}^{(F)} \cdot w_{jk}^{(F)} \cdot d_{jk}^{(F)} + N_{jk}^{(M)} \cdot w_{jk}^{(M)} \cdot d_{jk}^{(M)})}{\sum_k (N_k^{(F)} \cdot w_k^{(F)} + N_k^{(M)} \cdot w_k^{(M)})} \quad (5.3)$$

Dabei ist:

$D^{GS} \hat{=}$  (jährliche) genetisch signifikante Dosis, rem

$N_{jk} \hat{=}$  (jährliche) Anzahl von Personen der Altersklasse  $k$ , die der Bestrahlungsklasse  $j$  zugeordnet werden können

$N_k \hat{=}$  Anzahl von Personen der Altersklasse  $k$

$w_{jk} \hat{=}$  zu erwartende Anzahl an Kindern einer Person der Altersklasse  $k$  nach einer Bestrahlung der Klasse  $j$

$w_k \hat{=}$  zu erwartende Anzahl von Kindern einer durchschnittlichen Person der Altersklasse  $k$

$d_{jk}$  = Gonadendosis der Klasse  $j$  einer Person der Altersklasse  $k$ , rem<sup>1)</sup>)

(F) = weiblich

(M) = männlich

Gleichung (5.3) wird weiter unten der in diesem Fachband üblichen Schreibweise angepaßt.

Es wird die Strahlenexposition sowohl der unmittelbar betroffenen Bevölkerung als auch der nach dem Unfall geborenen Personen berücksichtigt. Zur Berechnung der Gesamtdosis wird Gleichung (5.2) sinngemäß angewandt.

Durch Integration der mit der Anzahl der betroffenen Personen multiplizierten ortsabhängigen Individualdosen über das betroffene Gebiet erhält man schließlich die zu erwartenden Kollektivdosen<sup>2)</sup>, d.h. die Summe aller zu erwartenden Individualdosen.

$$KD^O = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} D^O(r, \phi) \cdot p(r, \phi) d\phi r dr \quad (5.4)$$

mit

$p \hat{=}$  Bevölkerungsdichte<sup>3)</sup>, man/km<sup>2</sup>

1)  $d^{(F)}$  entspricht der Dosis für die Eierstöcke (Ovarien)  $D^{OV}$  und  $d^{(M)}$  der Dosis für die Hoden (Testes)  $D^{TS}$ . Bei gleicher Altersabhängigkeit der demographischen Größen "Altersstruktur" und "Kindererwartung" für beide Geschlechter lassen sich diese beiden Einzeldosen durch eine gemeinsame Gonadendosis  $D^{GN}$  ersetzen

$$D^{GN} = \frac{1}{2} \cdot (D^{OV} + D^{TS})$$

Die Voraussetzungen hierfür sind in Mitteleuropa in guter Näherung erfüllt.

2) Die Kollektivdosis wird in der Einheit man-rad angegeben und die Äquivalent-Kollektivdosis in der Einheit man-rem. Der Zusatz "man" ist keine Dimension im physikalischen Sinne; hiermit soll lediglich zum Ausdruck gebracht werden, daß es sich um die Summe der Individualdosen handelt. Zur Vereinfachung des Textes wird im folgenden das Wort Kollektivdosis auch für die Äquivalent-Kollektivdosis benutzt. Den Dimensionsangaben "man-rad" bzw. "man-rem" kann dann entnommen werden, ob es sich um die Energiedosis oder die Äquivalentdosis handelt.

3) Die Ausführung dieser Integration ist in Abschnitt 7.5 genauer beschrieben.

## 5.2 Berechnung der Dosen

### 5.2.1 Berechnung der potentiellen Dosen

Bei der Berechnung der potentiellen Dosen bleiben das Alter zur Zeit des Unfalleintritts sowie die davon abhängende individuelle Lebenserwartung unberücksichtigt. Die organabhängige Dosis  $D^0$ , die sich nach eingetretenem Unfall bis zu dem Zeitpunkt  $t$  akkumuliert, errechnet sich allgemein wie folgt (aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in den folgenden Gleichungen das Symbol für die Organabhängigkeit unterdrückt)<sup>1)</sup>:

$$D(t) = \int_0^t C(\tau_I) \cdot \dot{I} \cdot \underbrace{\int_0^{t-\tau_I} \dot{g}(\tau_B) d\tau_B}_{\text{Dosis bis zum Zeitpunkt } t \text{ durch Inkorporation von } 1 \text{ Ci zum Zeitpunkt } \tau_I} d\tau_I \quad (5.5)$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Dosis bis zum Zeitpunkt } t \text{ durch Inkorporationen bis zum Zeitpunkt } t}$

mit

- $C \hat{=}$  Konzentration
- $\dot{I} \hat{=}$  Inkorporationsrate
- $\dot{g} \hat{=}$  differentieller Dosisfaktor
- $\tau_I \hat{=}$  Zeitspanne zwischen Unfall und Inkorporation
- $\tau_B \hat{=}$  Zeitspanne zwischen Inkorporation und Bestrahlung

Die Dimensionen dieser Größen werden bei den jeweiligen Expositionspfaden angegeben. Die Anordnung der Zeiten ist der schematischen Darstellung in Bild F8, 5-1 zu entnehmen.

Bei jenen Expositionspfaden, die aus der Aktivität der vorbeiziehenden Fahne resultieren (EF und IH), kann der zeitliche Ver-

<sup>1)</sup> Zur Berechnung der Dosen und Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten siehe /F8, 5-3/.

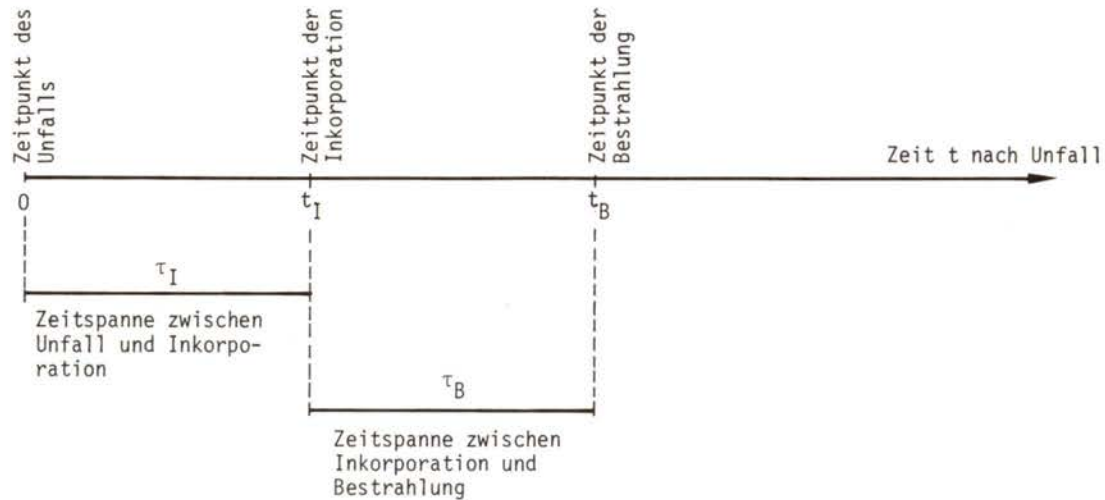


Bild F8, 5-1:

Schematische Darstellung der Zeitskalen zur Berechnung der potentiellen Dosen

lauf der Konzentration vereinfachend mit Hilfe einer  $\delta$ -Funktion beschrieben werden

$$C_A(\tau_I) = C_A^f \cdot \delta(\tau_I) \quad (5.6)$$

wobei

$$C_A^f \hat{=} \text{Zeitintegral der Aktivitätskonzentration}$$

Bei jenen Belastungspfaden, die die externe Bestrahlung berücksichtigen (EF und EB), entfällt durch die direkte Einwirkung von außen die Verzögerung zwischen Inkorporation von radioaktivem Material und Bestrahlung durch den Zerfall innerhalb des Körpers. Der differentielle Dosisfaktor kann hier deshalb mit Hilfe einer  $\delta$ -Funktion beschrieben werden.

$$\dot{g}(\tau_B) = g \cdot \delta(\tau_B) \quad (5.7)$$

Unter Berücksichtigung dieser beiden Sonderfälle berechnen sich für die einzelnen Expositionspfade<sup>1)</sup> die Dosen wie folgt:

Externe Bestrahlung durch die Aktivitätsfahne (EF)

$$D_{EF} = C_A^f \cdot k_A \cdot g_{EF} \quad (5.8)$$

wobei

- $C_A^f \hat{=} \text{Zeitintegral der Aktivitätskonzentration der Abluftfahne in Bodennähe, Ci}\cdot\text{s}/\text{m}^3$
- $k_A \hat{=} \text{Fahnen-Korrekturfaktor, berücksichtigt die endliche Ausdehnung der Aktivitätsfahne sowie ihre Inhomogenität}$
- $g_{EF} \hat{=} \text{Dosisfaktor für externe Bestrahlung aus der Abluftfahne (unendlicher Halbraum mit homogener Konzentration), rem}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{Ci}$

---

<sup>1)</sup> Aus Gründen der Vollständigkeit beinhaltet die folgende Zusammenstellung auch jene Expositionspfade, die nicht zur Berechnung der potentiellen Dosen herangezogen werden.



Externe Bestrahlung durch die Bodenkontamination (EB)

$$D_{EB}(t) = f_{B_{nat}}^S \cdot \int_0^t C_B(\tau_I) \cdot d\tau_I \cdot g_{EB} \quad (5.9)$$

mit

- $f_{B_{nat}}^S$   $\hat{=}$  Abschirmfaktor, Schwächung des Strahlungsfeldes der Bodenkontamination durch die natürliche Rauigkeit des Bodens (Abschnitt 5.3)
- $C_B$   $\hat{=}$  Aktivitätskonzentration am Boden, Ci/m<sup>2</sup>
- $g_{EB}$   $\hat{=}$  Dosisfaktor für externe Bestrahlung vom Boden, rem·m<sup>2</sup>/s·Ci

Interne Bestrahlung durch die mit der Atemluft inkorporierte luftgetragene Aktivität der Abluftfahne (IH):

$$D_{IH}(t) = C_A^f \cdot \dot{H} \cdot \int_0^t \dot{g}_{IH}(\tau_B) \cdot d\tau_B \quad (5.10)$$

mit

- $C_A^f$  siehe Gleichung (5.8), Ci·s/m<sup>3</sup>
- $\dot{H}$   $\hat{=}$  Atemrate, m<sup>3</sup>/s
- $\dot{g}_{IH}$   $\hat{=}$  differentieller Dosisfaktor für Bestrahlung nach Inhalation, rem/s·Ci

Interne Bestrahlung durch die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität, die nach Ablagerung am Boden in die Luft resuspendiert wurde (IHR):

$$D_{IHR}(t) = \int_0^t C_B(\tau_I) \cdot r(\tau_I) \cdot \dot{H} \cdot \int_0^{t-\tau_I} \dot{g}_{IH}(\tau_B) \cdot d\tau_B \cdot d\tau_I \quad (5.11)$$

mit

$C_B$	siehe Gleichung (5.9), Ci/m <sup>2</sup>
$r \hat{=}$	Resuspensionsfaktor, 1/m
$\dot{H}$	siehe Gleichung (5.10), m <sup>3</sup> /s
$\dot{g}_{IH}$	siehe Gleichung (5.10), rem/s·Ci

Interne Bestrahlung durch die mit den Nahrungsmitteln inkorporierte Aktivität (IG)

$$D_{IG}(t) = \int_0^t C_B(\tau_I) \cdot \left( \sum_v T_v \cdot \dot{G}_v \right) \cdot \int_0^{t-\tau_I} \dot{g}_{IG}(\tau_B) \cdot d\tau_B \cdot d\tau_I \quad (5.12)$$

wobei

$C_B$	siehe Gleichung (5.9), Ci/m <sup>2</sup>
$T_v \hat{=}$	Boden-Lebensmittel-Transferfaktor (für das Lebensmittel v), m <sup>2</sup> /kg
$\dot{G}_v \hat{=}$	Verzehrrate (des Lebensmittels v), kg/s
$\dot{g}_{IG} \hat{=}$	differentieller Dosisfaktor für Bestrahlung nach Ingestion, rem/s·Ci

### 5.2.2 Berechnung der zu erwartenden Dosen

Bei der Berechnung der zu erwartenden Organdosen für ein Individuum und für ein Kollektiv werden berücksichtigt:

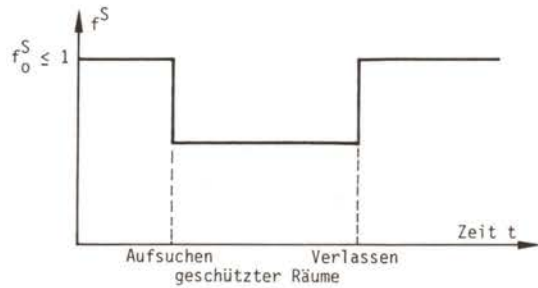
- die getroffenen Schutz- und Gegenmaßnahmen sowie
- die Altersstruktur und Lebenserwartung der Bevölkerung.

Berücksichtigung von Schutz- und Gegenmaßnahmen:

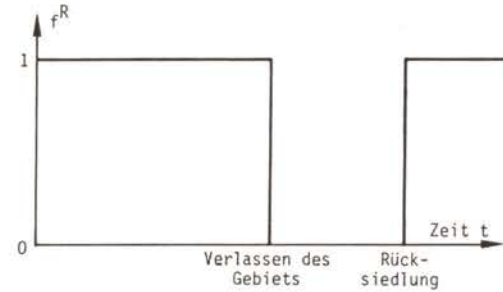
Die oben erwähnten Schutz- und Gegenmaßnahmen

- wirken als Reduktionsfaktoren und/oder
- beschränken die Integrationsgrenzen.

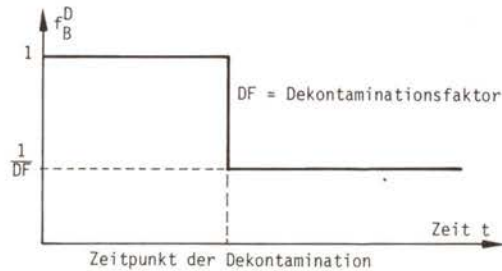
Sie können als zeitabhängige Funktionen  $f(t)$  (mit  $0 \leq f(t) \leq 1$ ) dargestellt werden. Der schematische Verlauf der  $f(t)$ -Funktionen ist in Bild F8, 5-2 dargestellt. Nach Transformation von



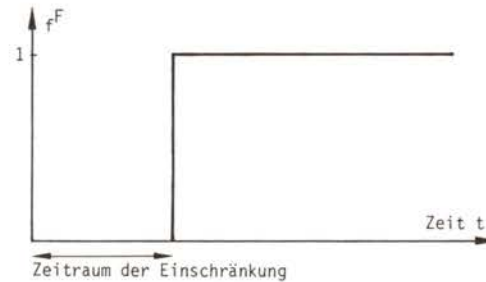
a) Aufsuchen geschützter Räume



b) Bevölkerungsbewegungen (Evakuierung, schnelle Umsiedlung, Umsiedlung)



c) Dekontamination



d) Einschränkung des Verzehrs landwirtschaftlicher Produkte

Bild F8, 5-2:

Schematischer Verlauf der  $f(t)$ -Funktion der Schutz- und Gegenmaßnahmen

der absoluten Zeitskala  $t$  auf die persönliche Zeitskala  $\tau$  (Bild F8, 5-3) sind sie als  $f(\tau_I)$  in die entsprechenden Formeln einzubringen.

Es ergibt sich:

- bei Aufsuchen von Häusern eine Abschirmwirkung gegenüber dem Strahlungsfeld der Aktivitätsfahne:

$$f_A^S(t)$$

$$(0 \leq f_A^S(t) \leq 1)$$

und gegenüber dem Strahlungsfeld der Bodenkontamination:

$$f_B^S(t)$$

$$(0 \leq f_B^S(t) \leq 1)$$

- bei Evakuierung, schneller Umsiedlung und Umsiedlung eine Einschränkung der Verweildauer im Strahlungsfeld der Bodenkontamination

$$f^R(t)$$

$$(f^R(t) = 1 \text{ oder } 0)$$

- bei Dekontamination eine Verminderung des Strahlungsfeldes der Bodenkontamination

$$f_B^D(t)$$

$$\left(\frac{1}{DF} \leq f_B^D(t) \leq 1\right)$$

mit

$DF \hat{=} \text{größtmöglicher Dekontaminationsfaktor}$

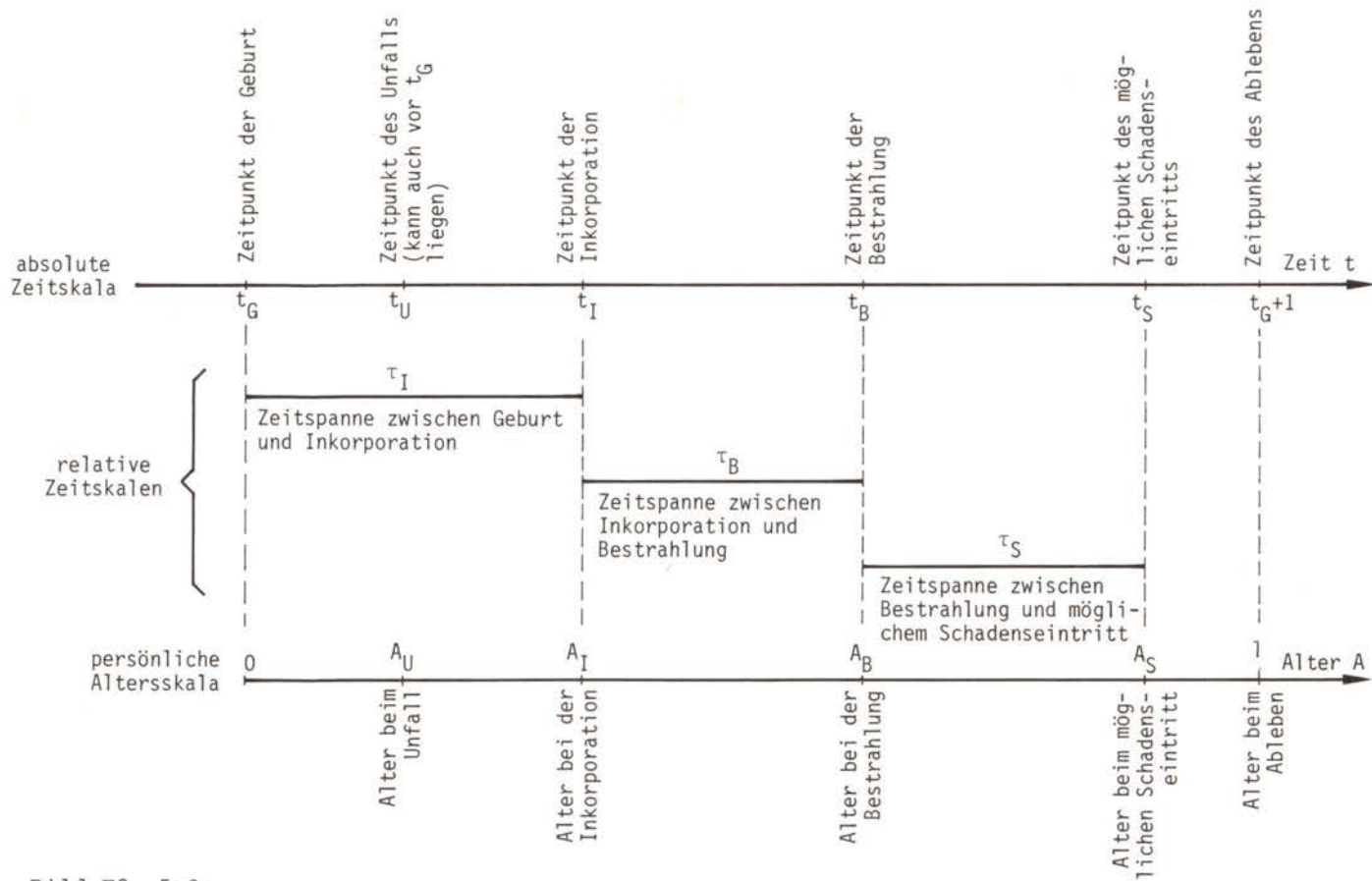


Bild F8, 5-3:

Schematische Darstellung der Zeitskalen für die Dosis- und Schadensberechnung

- bei Verwerfen von Lebensmitteln eine Aussetzung der Belastung über diesen Expositionspfad:

$$f^F(t)$$

$$(f^F(t) = 1 \text{ oder } 0)$$

Anzuwenden sind davon über die verschiedenen Expositionspfade:

- bei externer Bestrahlung durch die Aktivitätsfahne (EF)

$$f_{EF}(t) = f_A^S(t) \cdot f^R(t) \quad (5.13)$$

(zu berücksichtigen bei der Berechnung eines effektiven  $C_A^f$ )

- bei externer Bestrahlung durch die Bodenkontamination (EB)

$$f_{EB}(t) = f_B^S(t) \cdot f^R(t) \cdot f_B^D(t) \quad (5.14)$$

- bei interner Bestrahlung durch die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität der Abluftfahne (IH)

$$f_{IH}(t) = f^R(t) \quad (5.15)$$

(zu berücksichtigen bei der Berechnung eines effektiven  $C_A^f$ )

- bei interner Bestrahlung durch die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität, die nach Ablagerung am Boden in die Luft resuspendiert wird (IHR)

$$f_{IHR}(t) = f^R(t) \cdot f_B^D(t) \quad (5.16)$$

- bei interner Bestrahlung durch die mit Nahrungsmitteln inkorporierte Aktivität (IG)

$$f_{IG}(t) = f^F(t) \quad (5.17)$$

Berücksichtigung von Altersstruktur und Lebenserwartung:

Bei der Berücksichtigung individueller Daten (Zeitpunkt der Geburt  $t_G$  relativ zum Zeitpunkt des Unfalls  $t_U$ , Lebenserwartung  $l$ ) berechnet sich die tatsächlich bis ans Lebensende eines Individuums applizierte Organ-Dosis dann in folgenden Schritten (Bild F8, 5-3):

Die zum Zeitpunkt der Inkorporation  $t_I$  relevante Konzentration  $C$  hängt ab von der Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt des Unfalls  $t_U$  und dem Zeitpunkt der Inkorporation  $t_I$ :

$$C = C(t_I - t_U)$$

Der Zeitpunkt der Inkorporation  $t_I$  ist, gemessen an den persönlichen Daten eines Individuums, gleich dem Zeitpunkt der Geburt  $t_G$  plus der Zeitspanne zwischen Geburt und Inkorporation  $\tau_I$ . Damit ergibt sich

$$C = C(\tau_I - (t_U - t_G))$$

Die Differenz  $t_U - t_G$  ist gleich dem Alter  $A_U$  einer Person zum Zeitpunkt des Unfalls.

Die Dosis  $D(t_U - t_G, l)$ , die einer Person mit dem Alter  $A_U$  zum Zeitpunkt des Unfalls und der Lebenserwartung  $l$  bis ans Lebensende appliziert wird, berechnet sich damit allgemein zu

$$D(t_U - t_G, l) = \int_{t_U - t_G}^l C(\tau_I - (t_U - t_G)) \cdot f(\tau_I - (t_U - t_G)) \cdot \dot{I}(\tau_I) \cdot \underbrace{\int_0^{l - \tau_I} g(\tau_I, \tau_B) d\tau_B}_{\text{Dosis bis ans Lebensende durch Inkorporation von 1 Ci im Alter } \tau_I} d\tau_I$$

Dosis bis ans Lebensende durch Inkorporation von 1 Ci im Alter  $\tau_I$

⏟  
Dosis bis ans Lebensende durch Inkorporation bis ans Lebensende

(5.18)

mit

- C     siehe Gleichung (5.5)
- f = Funktion zur Berücksichtigung der Schutz- und Gegenmaßnahmen (Gleichungen 5.13 bis 5.17)
- $\dot{I}$      siehe Gleichung (5.5)
- $\dot{g}$      siehe Gleichung (5.5)
- $t_U$  = Zeitpunkt des Unfalls
- $t_G$  = Zeitpunkt der Geburt des Individuums
- $\tau_I$  = Zeitspanne zwischen Geburt und Inkorporation  
(= Alter zum Zeitpunkt der Inkorporation)
- $\tau_B$  = Zeitspanne zwischen Inkorporation und Bestrahlung  
( $\tau_I + \tau_B$  = Alter zum Zeitpunkt der Bestrahlung)
- l = Alter zum Zeitpunkt des Ablebens des Individuums

Nach der Berechnung der Dosen für die verschiedenen Radionuklide und die einzelnen Bestrahlungspfade (siehe dazu die Gleichungen 5.8 bis 5.12) ergibt sich die Gesamtdosis durch Aufsummierung dieser Einzelbeiträge (Gleichung 5.2).

Auf dem Weg zur Ermittlung der Kollektivdosen werden im nächsten Schritt die Dosen für das repräsentative Individuum des jeweiligen Kollektivs berechnet. Dabei sind folgende bevölkerungsstatistische Daten zugrunde zu legen:

- Lebenserwartungs-Dichtefunktion für Neugeborene. Diese gibt die Wahrscheinlichkeit für das beim Ableben erreichte Alter an.

$$p(l), 1/a \qquad (5.19)$$

mit

$$\int_0^{\infty} p(l) dl = 1$$

l  $\hat{=}$  Alter beim Ableben, a

Daraus berechnet sich die komplementäre Lebenserwartungs-Verteilungsfunktion für Neugeborene. Diese gibt für jedes Alter l die Wahrscheinlichkeit an, daß dieses Alter erreicht bzw. überschritten wird.



$$P(l) = \int_1^{\infty} p(l') dl' \quad (5.20)$$

mit

$$l \hat{=} \text{Alter, } a$$

und die mittlere Lebenserwartung

$$L = \int_0^{\infty} l \cdot p(l) dl \quad (5.21)$$

Aus der mittleren Lebenserwartung berechnet sich außerdem unter der Annahme einer zeitlich konstanten Bevölkerung die Geburtenrate, normiert auf eine lebende Person, zu  $1/L$ .

- Zeugungserwartungs-Dichtefunktion für Neugeborene. Diese gibt die Wahrscheinlichkeit für das beim Zeugen erreichte Alter an.

$$z(l), 1/a \quad (5.22)$$

mit

$$\int_0^{\infty} z(l) dl = 1$$

$$l \hat{=} \text{Alter bei der Zeugung, } a$$

Mit dieser Funktion berechnet sich das mittlere Zeugungsalter zu

$$Z = \int_0^{\infty} l \cdot z(l) dl \quad (5.23)$$

Die Dosis für das Individuum, das das Kollektiv aller zum Zeitpunkt des Unfalls  $t_U$  lebenden Personen (= 1.G.)<sup>1)</sup> repräsentiert, berechnet sich dann wie folgt:

$$\bar{D}(1.G.) = \int_0^{\infty} \frac{1}{L} \int_{t_U-t_G}^{\infty} p(l) \cdot D(t_U-t_G, l) dl d(t_U-t_G) \quad (5.24)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{mittlere Dosis einer Person mit dem Alter } t_U-t_G \text{ zur Zeit des Unfalls}}$   
 $\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{mittlere Dosis einer zur Zeit } t_U \text{ des Unfalls lebenden Person (1.G.)}}$

<sup>1)</sup> 1.G steht für "erste Generation".

Der Ermittlung der genetisch signifikanten Dosis  $\bar{D}^{GS}$  wird die Gonadendosis  $D^{GN}$  (Gleichung 5.3) zugrunde gelegt. Außerdem ist  $p(1)$  zu ersetzen durch  $z(1) \cdot L/Z$ :

$$\bar{D}^{GS}(1.G.) = \int_0^{\infty} \frac{1}{Z} \int_{t_U - t_G}^{\infty} z(1) \cdot D^{GN}(t_U - t_G, l) dl d(t_U - t_G) \quad (5.25)$$

Die Dosis für das Individuum, das das Kollektiv aller betroffenen Personen, d.h. sowohl der zum Zeitpunkt des Unfalls  $t_U$  lebenden Personen als auch aller Nachgeborenen (= a.G.)<sup>1)</sup> repräsentiert, berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned} \bar{D}(a.G.) &= \int_0^{\infty} \frac{1}{L} \int_{t_U - t_G}^{\infty} p(1) \cdot D(t_U - t_G, l) dl d(t_U - t_G) \\ &+ \int_0^{\infty} \frac{1}{L} \int_0^{\infty} p(1) \cdot D(t_G - t_U, l) dl d(t_G - t_U) \end{aligned} \quad (5.26)$$

bzw.

$$\begin{aligned} \bar{D}^{GS}(a.G.) &= \int_0^{\infty} \frac{1}{Z} \int_{t_U - t_G}^{\infty} z(1) \cdot D^{GN}(t_U - t_G, l) dl d(t_U - t_G) \\ &+ \int_0^{\infty} \frac{1}{Z} \int_0^{\infty} z(1) \cdot D^{GN}(t_G - t_U, l) dl d(t_G - t_U) \end{aligned} \quad (5.27)$$

Für

$D(t_U - t_G, l)$  siehe Gleichung (5.18)

$$D(t_G - t_U, l) = \int_0^1 C(\tau_I + (t_G - t_U)) \cdot f(\tau_I + (t_G - t_U)) \cdot \dot{I}(\tau_I) \cdot \int_0^{1 - \tau_I} \dot{g}(\tau_I, \tau_B) dt_B dt_I$$

Der Berechnung der Kollektivschäden wird die ortsabhängige Bevölkerungsdichte  $p(r, \phi)$ , Einw./km<sup>2</sup> unterlegt. Die Kollektivdosis berechnet sich bei Vorliegen der Windrichtung  $\phi_0$  mittels Integration über den Azimutwinkel  $\phi$  und die Entfernung  $r$ .<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> a.G. steht für "alle Generationen".

<sup>2)</sup> Im Laufe der Rechnungen wird die Windrichtung  $\phi_0$  schrittweise variiert ( $\Delta\phi_0 = 10^\circ$ ) und die Kollektivdosis für jeden der vorgegebenen Wetterabläufe ermittelt.

$$KD(\phi_0; 1.G.) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \bar{D}(r, \phi - \phi_0; 1.G.) \cdot p(r, \phi) \, d\phi r dr \quad (5.28)$$

bzw.

$$KD(\phi_0; a.G.) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \bar{D}(r, \phi - \phi_0; a.G.) \cdot p(r, \phi) \, d\phi r dr \quad (5.29)$$

Die Erfassung der Wohnbevölkerung wird in Abschnitt 7.5 beschrieben.

### 5.3 Vorgehensweise und Daten

#### 5.3.1 Berechnung der Konzentrationen

Von dem vorangegangenen Ausbreitungs- und Ablagerungs-Teilmodell werden für Punkte  $\bar{r}_m$  auf der bodennahen Zentrallinie der Aktivitätsfahne (die Abstände Quelle-Aufpunkte  $\bar{r}_m$  sind repräsentativ für Kreisringe mit den Radien  $r_m$  und  $r_{m+1}$ ; sie sind in Tabelle F8, 4-6 zusammengestellt) die Zeitintegrale der Aktivitätskonzentration in der bodennahen Luft  $C_A^{\int}$  für 54 Nuklide sowie eine Reihe weiterer Daten übernommen. Aus diesen wird für die Punkte auf der Zentrallinie die Aktivitätskonzentration des Bodens  $C_B(t)$  sowie die Aktivitätskonzentration in der Luft nach Resuspension  $C_{Ar}(t)$  berechnet.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse für Punkte  $\bar{r}_m$  auf der Zentrallinie werden dann in einem nächsten Schritt die mittleren Konzentrationen für Teilflächen  $F^M$  des von der Abluftwolke überstrichenen Gebiets berechnet. In radialer Richtung werden diese Teilflächen von den Kreisringen mit den Radien  $r_m$  begrenzt (Tabelle F8, 4-6) und in azimutaler Richtung durch Teilstrahlen, die die Kurve der horizontalen Ausbreitungsparameter  $y = v \cdot \sigma_y(r)$  approximieren (Bild F8, 5-4). Die zugrunde gelegten  $y = v \cdot \sigma_y(r)$ -Kurven sowie die Verhältnisse der mittleren Konzentrationen innerhalb dieser so gebildeten Kreisringsektoren zur Konzentration auf der Zentrallinie ( $y = 0$ ) sind ebenfalls in Bild F8, 5-4 angegeben.

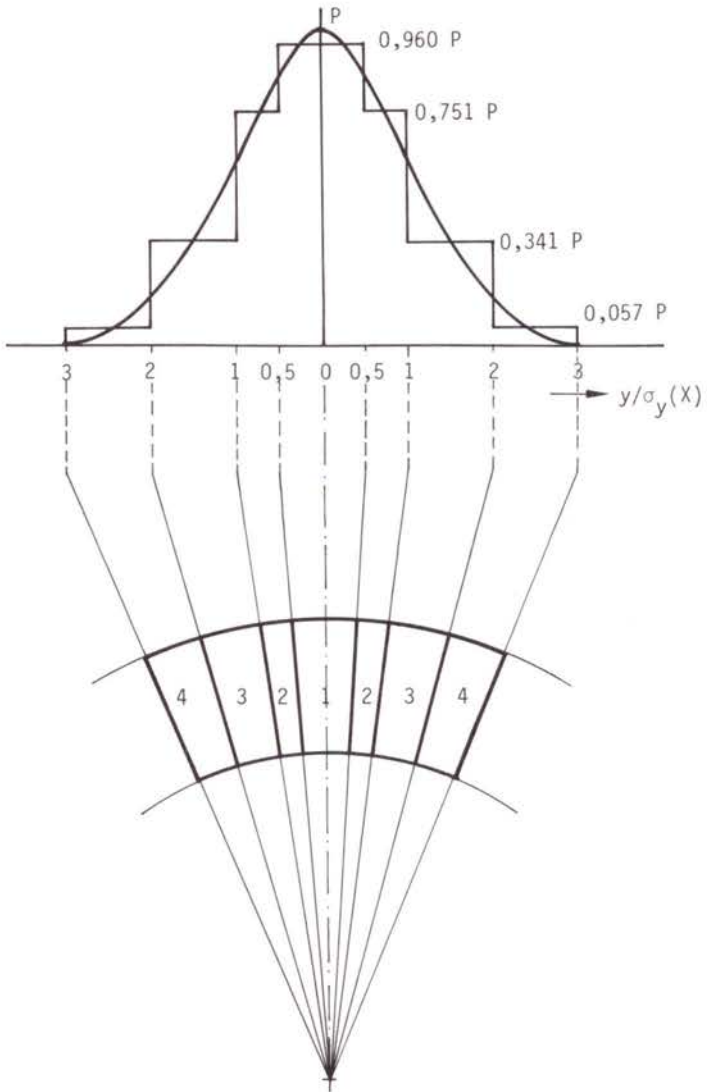


Bild F8, 5-4:

Schematische Darstellung der Konstruktion repräsentativer Kreisringsektoren

Bei längeren Freisetzungsvorgängen, die durch mehrere Freisetzungsphasen angenähert werden können, und während derer sich im allgemeinen auch die Wetterbedingungen ändern, wird der oben beschriebene Vorgang der Teilflächenbildung entsprechend oft durchgeführt. Durch die übereinandergelegten Muster der dadurch erhaltenen Teilflächen  $F_m'$ ,  $F_m''$  usw. werden wegen ihrer voneinander abweichenden Begrenzung in azimuthaler Richtung neue, in ihrer Anzahl erhöhte, aber in der Fläche kleinere Teilflächen gebildet. Innerhalb dieser neuen Teilflächen werden die aufsummierten Konzentrationen wieder als konstant angenommen. Nachstehend werden einige Details der Konzentrationsberechnungen geschildert:

Das zeitabhängige Verhalten der Aktivitätskonzentration am Boden  $C_B(t)$  nach Beendigung des Ablagerungsvorganges wird bestimmt durch den radioaktiven Zerfall und durch die Verwitterung. Bei diesem Prozeß wird angenommen, daß ein Teil des abgelagerten Materials von der Oberfläche abgewaschen wird, während ein anderer durch Transportprozesse in tiefere Bodenschichten gelangt. Alle diese Prozesse werden in Anlehnung an WASH-1400 wie folgt berücksichtigt:

$$C_B(t) = C_B(0) \cdot e^{-\lambda t} (0,63 \cdot e^{-\lambda_1 t} + 0,37 \cdot e^{-\lambda_2 t}) \quad (5.30)$$

mit

$$\begin{aligned} \lambda &\hat{=} \text{radiologische Zerfallskonstante, } 1/s \\ \lambda_1, \lambda_2 &\hat{=} \text{Verwitterungskonstanten, } 1/s \\ \lambda_1 &= 3,58 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} \quad (T_{1/2} = 0,62 \text{ a}) \\ \lambda_2 &= 2,38 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1} \quad (T_{1/2} = 92,2 \text{ a}) \end{aligned}$$

Der Resuspensionsfaktor  $r$  stellt den Zusammenhang zwischen der Aktivitätskonzentration am Boden und der Aktivitätskonzentration der Luft aufgrund der Resuspension her:

$$C_{Ar}(t) = C_B(t) \cdot r(t) \quad (5.31)$$

Sein zeitabhängiges Verhalten wird wie in WASH-1400 wie folgt beschrieben:

$$r(t) = r_o \cdot d^{-\lambda_r \cdot t} + r_e \quad (5.32)$$

mit

$$\begin{aligned} r_o &= 10^{-5} \text{ m}^{-1} \\ r_e &= 10^{-9} \text{ m}^{-1} \\ \lambda_r &= 2,15 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} \quad (T_{1/2} = 1,02 \text{ a}) \end{aligned}$$

Bei Berücksichtigung der Abnahme der Aktivitätskonzentration des Bodens (Gleichung 5.30) führt dies zu

$$C_{Ar}(t) = C_B(0) \cdot e^{-\lambda t} \cdot d(t) \quad (5.33)$$

mit

$$\begin{aligned} d(t) &= 0,63 \cdot e^{-\lambda_1 t} \cdot (r_o \cdot e^{-\lambda_r t} + r_e) \\ &+ 0,37 \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot (r_o \cdot e^{-\lambda_r t} + r_e) \end{aligned}$$

Da selbst unter Vernachlässigung des radioaktiven Zerfalls innerhalb des ersten Jahres bereits 63 % und innerhalb der ersten beiden Jahre 83 % des zeitlichen Konzentrationsintegrals erreicht werden, d.h.

$$1a \quad \int_0^1 d(t) dt / \int_0^{\infty} d(t) dt = 0,63$$

bzw.

$$2a \quad \int_0^2 d(t) dt / \int_0^{\infty} d(t) dt = 0,83$$

wurde aus Gründen der Vereinfachung das Konzentrationsintegral  $C_{Ar}^{\int}$  mathematisch der primären Aktivitätskonzentration der Luft zugeschlagen, sofern die Inkorporation nicht durch Gegenmaßnahmen unterbunden wird.

### 5.3.2 Berechnung der Dosen; zugehörige Parameter

Unter Zugrundelegung der berechneten Konzentrationen und unter Berücksichtigung der Schutz- und Gegenmaßnahmen werden die Or-

gandosen berechnet. Hierzu einige Details in den expositionspfad-spezifischen Berechnungen:

● Externe Bestrahlung durch die Aktivitätsfahne (EF)

Der Berechnung der Dosis über diesen Bestrahlungspfad werden Dosisfaktoren  $g_{EF}$  zugrunde gelegt, wie sie für eine unendlich ausgedehnte Fahne (unendlicher Halbraum) mit homogener Konzentration Gültigkeit haben. Die WASH-1400 entnommenen und hier angewandten Dosisfaktoren sind in Tabelle F8, 5-1 zusammengestellt.

Die endliche Ausdehnung der Abluftfahne sowie ihre Inhomogenität wird mit Hilfe des Fahnenkorrekturfaktors  $k_A$  berücksichtigt.  $k_A$  ist abhängig von der Form der Fahne (gegeben durch den Ausbreitungsparameter  $\sigma$ ) und dem Abstand  $a$  des Empfängers zur Fahnenachse.

$$k_A = k_A(a, \sigma) \quad (5.34)$$

Die geometrischen Verhältnisse sind in Bild F8, 5-5 dargestellt. In Tabelle F8, 5-2 ist der /F8, 5-4/ entnommene Fahnenkorrekturfaktor  $k'_A$  aufgelistet. Dieser bezieht sich auf die Aktivitätskonzentration in der Fahnenachse  $C_{AF}$  und nicht auf die Aktivitätskonzentration in Bodennähe  $C_A$ . Zur Anwendung in obigen Formeln muß er deshalb umgerechnet werden.

$$k_A = k'_A \cdot \frac{C_{AF}}{C_A(y=0)} \quad (5.35)$$

● Externe Bestrahlung durch die Aktivität des Bodens (EB)

Der Berechnung der Dosis über diesen Expositionspfad werden Dosisfaktoren  $g_{EB}$  zugrunde gelegt. Die aus WASH-1400 entnommenen und hier angewandten Dosisfaktoren sind in Tabelle F8, 5-1 zusammengestellt. Diese gelten für eine unendlich ausgedehnte ideal ebene Fläche.

NR.	NUKLID	STRAHLUNG AUS DER FAHNE (rem-m <sup>2</sup> /Ci·s)					STRAHLUNG VOM BODEN (rem-m <sup>2</sup> /Ci·s)						
		[GK]	[KM]	[KO]	[LG]	[SD]	[GN]	[GK]	[KM]	[LG]	[SD]	[GN]	
1	CO-58	2.16E-01	2.40E-01	2.53E-01	2.11E-01	1.71E-01	1.61E-01	3.81E-03	4.28E-03	4.53E-03	3.58E-03	3.06E-03	2.90E-03
2	CO-60	6.00E-01	6.31E-01	6.64E-01	5.67E-01	5.38E-01	5.07E-01	9.75E-03	1.03E-02	1.08E-02	9.25E-03	8.67E-03	7.96E-03
3	KR-85	4.75E-04	5.78E-04	6.03E-04	4.47E-04	5.00E-04	3.50E-04	8.44E-06	1.03E-05	1.08E-05	7.97E-06	8.89E-06	6.24E-06
4	KR-89M	3.64E-02	5.50E-02	5.86E-02	3.22E-02	3.50E-02	3.38E-02	6.28E-04	9.53E-04	1.01E-03	5.58E-04	6.06E-04	5.82E-04
5	KR-87	1.81E-01	1.92E-01	2.04E-01	1.72E-01	1.74E-01	1.40E-01	2.78E-03	2.97E-03	3.17E-03	2.66E-03	2.72E-03	2.17E-03
6	KR-88	4.67E-01	4.83E-01	5.14E-01	4.47E-01	4.31E-01	3.74E-01	6.92E-03	7.14E-03	7.61E-03	6.64E-03	6.42E-03	5.53E-03
7	RB-86	2.07E-02	2.27E-02	2.40E-02	1.94E-02	1.54E-02	1.57E-02	3.44E-04	3.81E-04	4.03E-04	3.25E-04	2.56E-04	2.61E-04
8	SR-89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	SR-90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	SR-91	1.69E-01	1.93E-01	2.03E-01	1.60E-01	1.54E-01	1.29E-01	2.89E-03	3.28E-03	3.47E-03	2.72E-03	2.64E-03	2.21E-03
11	Y-90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	Y-91	6.25E-04	6.39E-04	6.67E-04	5.94E-04	6.22E-04	5.25E-04	1.02E-05	1.05E-05	1.09E-05	9.78E-06	1.02E-05	8.60E-06
13	ZR-95	1.62E-01	1.87E-01	1.97E-01	1.52E-01	1.43E-01	1.32E-01	2.86E-03	3.28E-03	3.47E-03	2.67E-03	2.50E-03	2.14E-03
14	ZR-97	4.22E-02	4.72E-02	4.97E-02	4.00E-02	3.94E-02	3.32E-02	7.11E-04	7.94E-04	8.36E-04	6.72E-04	6.69E-04	5.60E-04
15	NB-95	1.66E-01	1.83E-01	1.94E-01	1.56E-01	1.22E-01	1.17E-01	2.92E-03	3.19E-03	3.39E-03	2.72E-03	2.17E-03	2.21E-03
16	MO-99	3.64E-02	4.44E-02	4.69E-02	3.42E-02	3.56E-02	2.75E-02	7.06E-04	8.56E-04	9.03E-04	6.58E-04	6.83E-04	5.33E-04
17	TC-99M	3.06E-02	5.42E-02	5.83E-02	2.94E-02	3.72E-02	2.07E-02	5.19E-04	9.22E-04	9.94E-04	4.31E-04	6.31E-04	3.50E-04
18	RU-103	1.11E-01	1.36E-01	1.43E-01	1.05E-01	1.17E-01	8.22E-02	2.04E-03	2.48E-03	2.61E-03	1.92E-03	2.13E-03	1.50E-03
19	RU-105	1.79E-01	2.21E-01	2.33E-01	1.67E-01	1.82E-01	1.35E-01	3.14E-03	3.66E-03	4.08E-03	2.92E-03	3.19E-03	2.35E-03
20	RU-106	4.31E-02	5.22E-02	5.47E-02	4.06E-02	4.47E-02	3.18E-02	7.58E-04	9.22E-04	9.69E-04	7.14E-04	7.86E-04	5.61E-04
21	RH-105	1.82E-02	2.14E-02	2.92E-02	1.61E-02	1.73E-02	1.07E-02	3.17E-04	4.81E-04	5.11E-04	2.83E-04	3.06E-04	2.96E-04
22	TE-127	9.36E-04	1.16E-03	1.22E-03	8.78E-04	9.81E-04	7.01E-04	1.67E-05	2.09E-05	2.20E-05	1.58E-05	1.77E-05	1.26E-05
23	TE-127M	1.10E-03	1.79E-03	2.06E-03	5.61E-04	1.15E-03	9.44E-04	8.36E-05	1.37E-04	1.57E-04	4.28E-05	8.83E-05	7.21E-05
24	TE-129	1.47E-02	1.81E-02	1.91E-02	1.35E-02	1.47E-02	1.12E-02	3.25E-04	4.03E-04	4.28E-04	3.03E-04	3.25E-04	2.49E-04
25	TE-129M	7.83E-03	9.92E-03	1.06E-02	6.97E-03	8.17E-03	5.90E-03	2.32E-04	2.92E-04	3.11E-04	2.06E-04	2.42E-04	1.74E-04
26	TE-131M	3.14E-01	3.56E-01	3.78E-01	2.94E-01	2.61E-01	2.47E-01	5.39E-03	6.08E-03	6.44E-03	5.03E-03	4.47E-03	4.21E-03
27	TE-132	4.75E-02	7.31E-02	7.78E-02	4.19E-02	4.58E-02	4.36E-02	8.00E-04	1.23E-03	1.31E-03	7.00E-04	7.75E-04	7.33E-04
28	SB-127	1.51E-01	1.84E-01	1.93E-01	1.43E-01	1.50E-01	1.14E-01	2.69E-03	3.25E-03	3.42E-03	2.52E-03	2.64E-03	2.01E-03
29	SB-129	2.68E-01	2.97E-01	3.14E-01	2.53E-01	2.25E-01	2.07E-01	4.59E-03	5.08E-03	5.36E-03	4.31E-03	3.81E-03	3.51E-03
30	J-131	8.72E-02	1.08E-01	1.14E-01	8.22E-02	9.17E-02	6.50E-02	1.56E-03	1.92E-03	2.02E-03	1.46E-03	1.63E-03	1.16E-03
31	J-132	5.11E-01	5.89E-01	6.19E-01	4.83E-01	4.72E-01	3.90E-01	9.08E-03	1.04E-02	1.10E-02	8.56E-03	8.36E-03	6.90E-03
32	J-133	1.54E-01	1.83E-01	1.92E-01	1.46E-01	1.56E-01	1.17E-01	2.69E-03	3.19E-03	3.36E-03	2.56E-03	2.75E-03	2.05E-03
33	J-134	5.33E-01	5.89E-01	6.19E-01	5.00E-01	4.28E-01	4.07E-01	9.38E-03	1.00E-02	1.06E-02	8.53E-03	7.31E-03	6.94E-03
34	J-135	4.19E-01	4.42E-01	4.64E-01	4.00E-01	3.89E-01	3.43E-01	6.81E-03	7.17E-03	7.53E-03	6.47E-03	6.28E-03	5.56E-03
35	XE-133	9.06E-03	1.59E-02	1.74E-02	6.97E-03	1.07E-02	6.50E-03	2.67E-04	4.67E-04	5.08E-04	2.04E-04	3.14E-04	1.90E-04
36	XE-135	5.67E-02	8.47E-02	9.03E-02	5.06E-02	5.47E-02	5.18E-02	9.81E-04	1.46E-03	1.56E-03	6.72E-04	9.44E-04	8.89E-04
37	CS-134	3.50E-01	4.03E-01	4.25E-01	3.28E-01	3.14E-01	2.62E-01	6.11E-03	7.06E-03	7.44E-03	5.75E-03	5.50E-03	4.61E-03
38	CS-136	4.78E-01	5.42E-01	5.75E-01	4.44E-01	3.81E-01	3.75E-01	8.14E-03	9.28E-03	9.81E-03	7.56E-03	6.50E-03	6.39E-03
39	CS-137	1.22E-01	1.49E-01	1.56E-01	1.15E-01	1.28E-01	8.99E-01	2.78E-03	2.64E-03	2.78E-03	2.04E-03	2.13E-03	1.45E-03
40	BA-140	4.44E-02	5.61E-02	5.92E-02	1.4E-02	4.61E-02	3.40E-02	8.78E-04	1.11E-03	1.17E-03	8.19E-04	9.14E-04	6.71E-04
41	LA-140	5.67E-01	6.06E-01	6.33E-01	5.39E-01	5.47E-01	4.64E-01	9.11E-03	9.72E-03	1.02E-02	8.67E-03	8.78E-03	7.46E-03
42	CE-141	1.83E-02	3.22E-02	3.50E-02	1.50E-02	2.22E-02	1.25E-02	3.22E-04	5.75E-04	6.22E-04	2.66E-04	3.94E-04	2.22E-04
43	CE-143	6.81E-02	9.36E-02	9.94E-02	6.08E-02	6.36E-02	5.69E-02	1.32E-03	1.62E-03	1.94E-03	1.18E-03	1.24E-03	1.11E-03
44	CE-144	4.31E-03	7.61E-03	8.25E-03	3.44E-03	5.14E-03	2.98E-03	8.92E-05	1.58E-04	1.71E-04	7.14E-05	1.07E-04	6.19E-05
45	PA-143	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	ND-147	3.14E-02	4.39E-02	4.67E-02	3.78E-02	3.36E-02	2.34E-02	6.22E-04	8.69E-04	9.28E-04	5.53E-04	6.69E-04	4.64E-04
47	NP-239	3.08E-02	4.97E-02	5.31E-02	2.65E-02	3.22E-02	2.56E-02	7.84E-04	1.27E-03	1.36E-03	6.81E-04	8.25E-04	6.56E-04
48	PJ-238	5.25E-05	4.25E-05	4.94E-05	9.58E-06	7.78E-06	2.39E-05	1.03E-05	8.31E-06	9.69E-06	1.88E-06	1.53E-06	6.69E-06
49	PU-239	2.30E-05	2.17E-05	2.50E-05	5.42E-06	6.00E-06	1.15E-05	4.33E-06	4.11E-06	4.75E-06	1.03E-06	1.14E-06	2.19E-06
50	PU-240	4.64E-05	3.89E-05	4.50E-05	9.17E-06	7.78E-06	2.13E-05	9.06E-06	7.56E-06	8.81E-06	1.79E-06	1.56E-06	4.18E-06
51	PU-241	4.17E-10	8.53E-10	9.22E-10	2.94E-10	4.00E-10	3.06E-10	3.47E-10	7.11E-10	7.69E-10	2.45E-10	3.36E-10	2.55E-10
52	AM-241	4.56E-03	9.33E-03	1.01E-02	3.27E-03	4.99E-03	3.34E-03	2.39E-04	4.86E-04	5.09E-04	3.48E-04	2.31E-04	1.75E-04
53	CM-242	5.00E-05	3.89E-05	4.58E-05	8.31E-06	6.11E-06	2.25E-05	9.17E-06	7.11E-06	8.36E-06	1.52E-06	1.14E-06	4.12E-06
54	CN-244	1.42E-03	2.81E-03	3.03E-03	1.07E-03	1.50E-03	1.02E-03	5.72E-05	1.13E-04	1.21E-04	4.31E-05	6.00E-05	5.10E-05

Tab. F8, 5-1:

Disisfaktoren für externe Bestrahlung durch die Aktivitätsfahne  $g_{EF}$  und durch die Bodenkontamination  $g_{EB}$



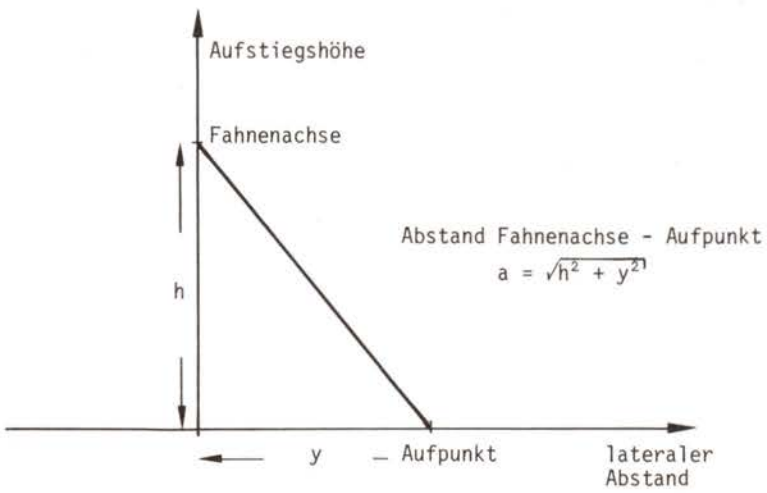


Bild F8, 5-5:

Geometrische Anordnung zur Ermittlung des Fahnenkorrekturfaktors  $k_A$

Vertikaler Ausbreitungs- parameter $\sigma_z$	Verhältnis des Abstands a zum vertikalen Ausbreitungsparameter $\sigma_z$ ( $a/\sigma_z$ )					
	0	1	2	3	4	5
3	0,020	0,018	0,011	0,007	0,005	0,004
10	0,074	0,060	0,036	0,020	0,015	0,011
20	0,150	0,120	0,065	0,035	0,024	0,016
30	0,220	0,170	0,088	0,046	0,029	0,017
50	0,350	0,250	0,130	0,054	0,028	0,013
100	0,560	0,380	0,150	0,045	0,016	0,004
200	0,760	0,511	0,150	0,024	0,004	0,001
400	0,899	0,600	0,140	0,014	0,001	0,001
1000	0,951	0,600	0,130	0,011	0,001	0,001

Zwischenwerte zwischen den Spalten werden im Bereich  $0 \leq (a/\sigma_z) \leq 2,5$  quadratisch, im Bereich  $(a/\sigma_z) > 2,5$  logarithmisch interpoliert.

Zwischenwerte zwischen den Zeilen werden immer logarithmisch interpoliert.

Werte außerhalb der Randwerte werden nicht extrapoliert; es werden in diesen Fällen die Randwerte verwendet.

Tab. F8, 5-2:

Fahnenkorrekturfaktor  $k_A'$

Die Rauigkeit der Bodenfläche stellt jedoch bereits eine Abschirmung der von der Aktivität am Boden ausgehenden Strahlung dar. Für Aufenthalt im Freien wurde diese Abschirmung durch den Faktor

$$f_{B_{nat}}^S = 0,5$$

berücksichtigt, wie es in den meisten Zusammenstellungen<sup>1)</sup> üblich ist. Bei der Berücksichtigung der Abschirmwirkung von Gebäuden (Kapitel 6) ist dieser Faktor  $f_{B_{nat}}^S$  bereits in den Faktoren  $f_B^S(t)$  mit eingearbeitet.

- Interne Bestrahlung durch die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität (IH und IHr)

Die Inkorporationen über diesen Expositionspfad werden mit der Atemrate beschrieben. Bei der Berechnung über lange Zeiträume wird die über den Tagesverlauf gemittelte Atemrate des durchschnittlichen Erwachsenen (Mittelwert für Männer: 23 m<sup>3</sup>/24 h; für Frauen: 21 m<sup>3</sup>/24 h /F8, 5-5/)

$$\bar{H} = 22 \text{ m}^3/24 \text{ h} = 2,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

verwendet.

Bei Evakuierung und schneller Umsiedlung muß mit einer erhöhten Atemrate gerechnet werden. Gemäß ICRP /F8, 5-6/ wird angenommen, daß die Hälfte des täglichen Umsatzes während acht Stunden erhöhter Aktivität erreicht wird. Daraus folgt eine um den Faktor 1,5 erhöhte Atemrate:

$$\hat{H} = 11 \text{ m}^3/8 \text{ h} = 3,82 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

---

<sup>1)</sup> Allgemeine Berechnungsgrundlage für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer (Richtlinie zu § 45 StrlSchV); Gemeinsames Ministerialblatt 21 (1979), S. 371 ff.

Die altersabhängigen Atemraten  $\dot{H}(\tau_I)$  und Zahlenwerte der Verhältnisse  $\dot{H}(\tau_I)/\dot{H}_{\text{Erw}}$  (Erw = Erwachsener) sind in Tabelle F8, 5-3 zusammengestellt.

Bei den Inhalations-Dosisfaktoren  $\dot{g}(\tau_I, \tau_B)$  wird die Altersabhängigkeit durch das Verhältnis  $\dot{g}_{\text{IH}}(\tau_I, \tau_B)/g_{\text{IH,Erw}}(\tau_B)$  berücksichtigt. Die WASH-1400 entnommenen Zahlenwerte sind ebenfalls in Tabelle F8, 5-3 zusammengestellt.

Wie aus dieser Tabelle ersichtlich, wurde die Altersabhängigkeit der Atemrate und des Inhalations-Dosisfaktors nur bei den Radionukliden Sr-89, Sr-90, J-131 und Cs-137 berücksichtigt. Bei allen übrigen wurde angenommen, daß die Daten für Erwachsene eine pessimistische Abschätzung für die übrigen Altersgruppen darstellen, d.h. daß

$$\frac{\dot{H}(\tau_I)}{\dot{H}_{\text{Erw}}} \cdot \frac{\dot{g}(\tau_I, \tau_B)}{\dot{g}_{\text{Erw}}(\tau_B)} \leq 1$$

ist. Bei der Integration der differentiellen Inhalations-Dosisfaktoren für Erwachsene wurden folgende Intervalle zugrunde gelegt:

Für die Berechnung der Frühschäden wurde

$$g_{\text{IH}}(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \dot{g}_{\text{IH,Erw}}(\tau_B) d\tau_B \quad (5.36)$$

mit  $(t_1, t_2) = (0 \text{ d}, 7 \text{ d})$

und  $(t_1, t_2) = (7 \text{ d}, 30 \text{ d})$

ermittelt und aus diesen entsprechend der Rechenvorschrift Gleichung (5.1) die gewichteten Dosisfaktoren

$$g_{\text{IH}_{\text{eff}}} = g_{\text{IH}}(0\text{d}, 7\text{d}) + \frac{1}{2} g_{\text{IH}}(7\text{d}, 30\text{d}) \quad (5.37)$$

gebildet. Diese sind in Tabelle F8, 5-4 zusammengestellt.

Alter $\tau_I$ [a]	Atemrate $\bar{H}(\tau_I)$ [m <sup>3</sup> /s]	Verhältnis der Atemraten <sup>1)</sup> $\frac{\bar{H}(\tau_I)}{\bar{H}_{Erw}}$	Radionuklid	Referenzorgan	Verhältnis der Dosisfaktoren $\frac{\dot{g}_{IH}(\tau_I, \tau_B)}{\dot{g}_{IH,Erw}(\tau_B)}$	Verhältnis <sup>2)</sup> $\frac{\bar{H}(\tau_I) \cdot \dot{g}_{IH}(\tau_I, \tau_B)}{\bar{H}_{Erw} \cdot \dot{g}_{IH,Erw}(\tau_B)}$
1	$4,40 \cdot 10^{-5}$	0,17	J-131	Schilddrüse	5,4	0,9
			Cs-137	Ganzkörper	1,1	0,2
			Sr-89 Sr-90	Knochenober- fläche und Knochenmark	5	0,9
5	$1,11 \cdot 10^{-4}$	0,44	J-131	Schilddrüse	4,6	2,0
			Cs-137	Ganzkörper	1,2	0,5
			Sr-89 Sr-90	Knochenober- fläche und Knochenmark	1	0,4
10	$1,74 \cdot 10^{-4}$	0,68	J-131	Schilddrüse	2,4	1,6
			Cs-137	Ganzkörper	1,1	0,7
			Sr-89 Sr-90	Knochenober- fläche und Knochenmark	1	0,7
20 (Erwach- sener)	$2,55 \cdot 10^{-4}$	1	J-131	Schilddrüse	1	1
			Cs-137	Ganzkörper	1	1
			Sr-89 Sr-90	Knochenober- fläche und Knochenmark	1	1

<sup>1)</sup> Dieses Verhältnis wird auch bei erhöhter Atemrate angewandt.

<sup>2)</sup> Falls das berechnete Verhältnis kleiner als 1 ist, wird wie in WASH-1400 der Faktor 1 angewandt.

Tab. F8, 5-3:

Altersabhängige Daten zur Berechnung der Inhalationsdosen

Nr.	Nuklid	Dosisfaktor [rem/Ci]		
		0 - 7 d	0 - 30 d	gewichtet <sup>1)</sup>
1	Co-58	4,9 E+02	1,1 E+03	8,0 E+02
2	Co-60	1,2 E+03	2,8 E+03	2,0 E+03
3	Kr-85	6,1 E-01	6,1 E-01	6,1 E-01
4	Kr-85m	3,0 E-01	3,9 E-01	3,9 E-01
5	Kr-87	1,3 E+00	1,3 E+00	1,3 E+00
6	Kr-88	3,1 E+00	3,1 E+00	3,1 E+00
7	Rb-86	1,7 E+03	4,8 E+03	3,3 E+03
8	Sr-89	1,7 E+03	5,0 E+03	3,4 E+03
9	Sr-90	2,2 E+03	1,0 E+04	6,1 E+03
10	Sr-91	2,0 E+02	2,3 E+02	2,2 E+02
11	Y-90	4,3 E+02	5,1 E+02	4,7 E+02
12	Y-91	5,7 E+02	2,3 E+03	1,4 E+03
13	Zr-95	4,0 E+02	9,4 E+02	6,7 E+02
14	Zr-97	1,9 E+02	1,9 E+02	1,9 E+02
15	Nb-95	3,8 E+02	7,7 E+02	5,8 E+02
16	Mo-99	1,2 E+02	1,3 E+02	1,3 E+02
17	Tc-99m	1,1 E+01	1,1 E+01	1,1 E+01
18	Ru-103	2,6 E+02	5,5 E+02	4,1 E+02
19	Ru-105	2,4 E+01	2,4 E+01	2,4 E+01
20	Ru-106	2,2 E+02	6,6 E+02	4,4 E+02
21	Rh-105	2,3 E+01	2,3 E+01	2,3 E+01
22	Te-127	3,9 E+00	3,9 E+00	3,9 E+00
23	Te-127m	9,5 E+01	2,7 E+02	1,8 E+02
24	Te-129	1,1 E+00	1,1 E+00	1,1 E+00
25	Te-129m	2,2 E+02	5,3 E+02	3,8 E+02
26	Te-131m	2,9 E+02	3,1 E+02	3,0 E+02
27	Te-132	8,8 E+02	1,0 E+03	9,4 E+02
28	Sb-127	2,9 E+02	3,3 E+02	3,1 E+02
29	Sb-129	4,6 E+01	4,6 E+01	4,6 E+01
30	J-131	1,2 E+02	1,8 E+02	1,5 E+02
31	J-132	5,0 E+01	5,0 E+01	5,0 E+01
32	J-133	9,3 E+01	9,4 E+01	9,4 E+01
33	J-134	2,0 E+01	2,0 E+01	2,0 E+01
34	J-135	9,1 E+01	9,1 E+01	9,1 E+01
35	Xe-133	1,6 E+00	1,6 E+00	1,6 E+00
36	Xe-135	2,1 E+00	2,1 E+00	2,1 E+00
37	Cs-134	2,0 E+03	7,0 E+03	5,0 E+03
38	Cs-136	2,1 E+03	5,0 E+03	3,6 E+03
39	Cs-137	1,3 E+03	5,2 E+03	3,3 E+03
40	Ba-140	1,4 E+03	2,8 E+03	2,1 E+03
41	La-140	6,6 E+02	6,8 E+02	6,7 E+02
42	Ce-141	7,6 E+01	1,5 E+02	1,1 E+02
43	Ce-143	9,1 E+01	1,0 E+02	9,6 E+01
44	Ce-144	1,2 E+02	3,5 E+02	2,4 E+02
45	Pr-143	9,6 E+00	2,6 E+01	1,8 E+01
46	Nd-147	1,1 E+02	1,7 E+02	1,4 E+02
47	Np-239	6,0 E+01	6,4 E+01	6,2 E+01
48	Pu-238	6,3 E+01	2,8 E+02	1,7 E+02
49	Pu-239	5,8 E+01	2,6 E+02	1,6 E+02
50	Pu-240	5,8 E+01	2,6 E+02	1,6 E+02
51	Pu-241	1,2 E-02	7,2 E-02	4,2 E-02
52	Am-241	1,1 E+02	4,2 E+02	2,7 E+02
53	Cm-242	7,6 E+01	3,3 E+02	2,0 E+02
54	Cm-244	7,3 E+01	3,3 E+02	2,0 E+02

$$^1) g_{IH_{eff}} = g_{IH}(0d,7d) + \frac{1}{2} \cdot g_{IH}(7d,30d) = \frac{1}{2} \cdot (g_{IH}(0d,7d) + g_{IH}(0d,30d))$$

Tab. F8, 5-4:

Gewichtete Inhalations-Dosisfaktoren für Knochenmark zur Berechnung der Frühschäden  $g_{IH_{eff}}$  (Gleichung 5.37)

Für die Berechnung der Spätschäden wurden die Dosisfaktoren von WASH-1400 angewandt. Diese liegen für folgende Zeiträume vor:

$$\begin{aligned}(t_1, t_2) &= (0 \text{ a}, 1 \text{ a}) \\ &= (1 \text{ a}, 10 \text{ a}) \\ &= (10 \text{ a}, 20 \text{ a}) \\ &= (20 \text{ a}, 30 \text{ a}) \\ &= (30 \text{ a}, 40 \text{ a}) \\ &= (40 \text{ a}, 50 \text{ a})\end{aligned}$$

Sie sind in Tabelle F8, 5-5 (1) bis (7) zusammengefaßt.

- Interne Bestrahlung durch die mit den Nahrungsmitteln inkorporierte Aktivität (IG)

Über diesen Bestrahlungspfad wird wie in WASH-1400 nur der Einfluß der Radionuklide Sr-89, Sr-90, J-131, Cs-134, Cs-136 und Cs-137 berücksichtigt.

Aus dieser Studie wurden auch die Zahlenwerte für die "normierte integrale Inkorporation  $I_V^O$ " übernommen. Diese beschreibt die Gesamtaufnahme in den menschlichen Körper aufgrund einer einmaligen Bodenkontamination von  $C_B^O = 1 \text{ Ci/m}^2$ . Sie ist mathematisch das Ergebnis des äußeren Integrals von Gleichung (5.12):

$$I_V^O = \int_0^{\infty} C_B^O(\tau_I) \cdot (T_V \cdot \dot{G}_V) \, d\tau_I \quad (5.38)$$

mit

$$C_B^O(\tau_I = 0) = 1 \text{ Ci/m}^2$$

Zahlenwerte liegen für vier Pfade vor:

- v = 1: Konsum von Milch, direkte Ablagerung auf Gras und Weidepflanzen (nur bei der ersten Ernte wirksam)
- v = 2: Konsum von Milch, Aufnahme über die Wurzeln
- v = 3: Konsum von anderen landwirtschaftlichen Produkten, direkte Ablagerung auf Pflanzen (nur bei der ersten Ernte wirksam)

NR.	NUKLID	INHALATION (REM/CI)						INGESTION (REM/CI)				
		0-1 A	1-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A	0-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A
1	CO-58	4.10E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	CO-60	3.00E+04	4.90E+04	2.00E+03	1.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	KR-85	3.10E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	KR-85M	2.60E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	KR-87	1.00E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	KR-88	2.30E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	RB-86	6.60E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	SR-89	4.10E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.91E+03	0.0	0.0	0.0	0.0
9	SR-90	2.80E+04	1.12E+05	5.00E+04	2.00E+04	2.00E+04	1.00E+04	5.52E+04	2.03E+04	7.40E+03	8.00E+02	3.00E+02
10	SR-91	3.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	Y-90	7.80E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	Y-91	5.60E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	ZR-95	5.50E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	ZR-97	5.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	NB-95	1.90E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	MD-99	4.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	TC-99M	9.80E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	Ru-103	1.90E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	RU-105	6.60E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	RU-106	4.00E+04	2.20E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	RH-105	9.60E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	TE-127	3.40E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	TE-127M	2.30E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	TE-129	9.80E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	TE-129M	3.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	TE-131M	5.50E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	TE-132	1.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	Sb-127	7.90E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	Sb-129	1.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	J-131	6.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.79E+02	0.0	0.0	0.0	0.0
31	J-132	7.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	J-133	2.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.70E+02	0.0	0.0	0.0	0.0
33	J-134	3.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	J-135	1.50E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	XE-133	7.00E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	XE-135	1.20E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	CS-134	4.10E+04	6.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	7.14E+04	0.0	0.0	0.0	0.0
38	CS-136	5.90E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.96E+03	0.0	0.0	0.0	0.0
39	CS-137	3.00E+04	6.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	5.49E+04	0.0	0.0	0.0	0.0
40	BA-140	1.90E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	LA-140	9.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	CE-141	1.10E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	CE-143	3.90E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	CE-144	3.20E+04	1.50E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	PR-143	8.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	ND-147	7.60E+02	3.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	NP-239	2.40E+02	0.0	0.0	1.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	PU-238	2.20E+06	1.58E+07	1.70E+07	1.50E+07	1.20E+07	1.10E+07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	PU-239	2.10E+06	1.50E+07	1.80E+07	1.70E+07	1.60E+07	1.50E+07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	PU-240	2.10E+06	1.59E+07	1.80E+07	1.60E+07	1.60E+07	1.50E+07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51	PU-241	1.20E+03	9.88E+04	2.80E+05	3.70E+05	3.50E+05	4.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
52	AM-241	2.20E+06	1.68E+07	1.90E+07	1.70E+07	1.60E+07	1.50E+07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	CM-242	1.30E+06	3.00E+05	1.00E+05	1.00E+05	0.0	1.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	CM-244	2.30E+06	1.47E+07	1.10E+07	8.00E+06	4.00E+06	3.00E+06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tab. F8, 5-5 (1):

Ganzkörper-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation  $g_{IH}$  und Ingestion  $g_{IG}$



NR.	NUKLEID	INHALATION (REM/CI)				INGESTION (REM/CI)						
		0-1 A	1-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A	0-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A
1	CO-58	3.00E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	CO-60	2.10E+04	3.50E+04	1.00E+03	1.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	KR-85	6.10E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	KR-85M	3.90E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	KR-87	1.30E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	KR-88	3.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	KR-89	1.30E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	SR-90	1.10E+05	4.20E+05	1.30E+05	3.00E+04	3.00E+04	1.00E+04	5.26E+03	2.08E+05	5.30E+04	1.30E+04	1.00E+04
9	SR-91	3.10E+02	1.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	Y - 90	5.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	Y - 91	3.50E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	ZR-91	1.90E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	ZR-97	1.40E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	MB-95	1.40E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	MB-95	1.40E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	MO-99	1.30E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	TC-99M	1.10E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	RU-103	1.10E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	RU-106	3.50E+03	2.60E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	RU-106	3.50E+03	2.60E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	RH-105	2.30E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	TE-127	3.90E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	TE-127M	7.50E+02	5.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	TE-129	1.10E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	TE-131M	3.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	TE-131M	1.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	TE-132	3.30E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	SB-127	4.60E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	SB-129	1.90E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	J - 131	1.90E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	J - 132	9.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	J - 133	2.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	J - 134	2.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	J - 135	9.10E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	XE-133	1.60E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	XE-135	2.10E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	CS-134	4.30E+04	5.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	CS-137	3.10E+04	6.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	CS-137	3.10E+04	6.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	BA-140	3.40E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	LA-140	6.80E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	CE-141	2.70E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	CE-143	1.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	PE-143	3.40E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	PE-143	3.40E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	ND-147	1.90E+02	1.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	MP-239	6.40E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	PU-238	6.00E+03	2.24E+05	3.40E+05	3.00E+05	2.30E+05	2.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	PU-239	5.60E+03	2.24E+05	3.40E+05	3.40E+05	3.40E+05	3.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	PU-240	5.60E+03	2.24E+05	3.40E+05	7.50E+03	6.00E+03	9.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51	AM-241	7.20E+03	2.43E+05	3.80E+05	3.60E+05	3.10E+05	3.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
52	AM-241	3.20E+03	2.90E+03	1.20E+03	1.20E+03	1.00E+03	5.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	CM-242	3.20E+03	2.90E+03	1.20E+03	1.20E+03	1.00E+03	5.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	CM-244	6.60E+03	2.03E+05	2.20E+05	1.50E+05	1.00E+05	6.00E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tab. F8, 5-5 (2):

Knochenmark-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation  $g_{IH}$  und Ingestion  $g_{IG}$

NR.	NUKLID	INHALATION (REM/CI)						INGESTION (REM/CI)					
		0-1 A	1-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A	0-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A	
1	CO-58	4.10E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	CO-60	3.00E+04	4.90E+04	2.00E+03	1.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	KR-85	3.10E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	KR-85M	2.60E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	KR-87	1.00E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	KR-88	2.30E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	Rb-86	6.60E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	SR-89	4.10E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.91E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	SR-90	2.80E+04	1.12E+05	5.00E+04	2.00E+04	2.00E+04	1.00E+04	5.52E+04	2.03E+04	7.40E+03	8.00E+02	3.00E+02	
10	SR-91	3.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
11	Y-90	7.80E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12	Y-91	5.60E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
13	Zr-95	5.50E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
14	Zr-97	5.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
15	Nb-95	1.90E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
16	MO-99	4.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
17	TC-99M	9.80E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
18	RU-103	1.90E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19	RU-105	6.60E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
20	RU-106	4.00E+04	2.20E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
21	RH-105	9.60E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
22	TE-127	3.40E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
23	TE-127M	2.30E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
24	TE-129	9.80E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
25	TE-129M	3.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
26	TE-131M	5.50E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
27	FE-132	1.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
28	SB-127	7.90E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
29	SB-129	1.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
30	J-131	6.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.79E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	
31	J-132	7.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
32	J-133	2.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.70E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	
33	J-134	3.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
34	J-135	1.50E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
35	XE-133	7.00E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
36	XE-135	1.20E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
37	CS-134	4.10E+04	6.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	7.14E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	
38	CS-136	5.90E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.96E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	
39	CS-137	3.00E+04	6.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	5.49E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	
40	BA-140	1.90E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
41	LA-140	9.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
42	CE-141	1.10E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
43	CE-143	3.40E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
44	CE-144	3.20E+04	1.50E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
45	PR-143	8.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
46	ND-147	7.60E+02	3.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
47	NP-239	2.40E+02	0.0	0.0	1.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
48	PU-238	2.20E+06	1.58E+07	1.70E+07	1.50E+07	1.20E+07	1.10E+07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
49	PU-239	2.00E+06	1.50E+07	1.80E+07	1.70E+07	1.60E+07	1.40E+07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
50	PU-240	2.10E+06	1.59E+07	1.80E+07	1.60E+07	1.60E+07	1.50E+07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
51	PU-241	1.20E+03	9.88E+04	2.80E+05	3.70E+05	3.50E+05	4.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
52	AM-241	2.20E+06	1.60E+07	1.90E+07	1.70E+07	1.60E+07	1.50E+07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
53	CM-242	1.30E+06	3.00E+05	1.00E+05	1.00E+05	0.0	1.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
54	CM-244	2.30E+06	1.47E+07	1.10E+07	8.00E+06	4.00E+06	3.00E+06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Tab. F8, 5-5 (3):

Brust-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation  $g_{IH}$   
und Ingestion  $g_{IG}$

NR.	NJKLID	INHALATION (REM/CI)						INGESTION (REM/CI)				
		J-1 A	1-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A	0-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A
1	CU-58	5.90E+04	2.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	CU-60	4.63E+05	7.40E+05	1.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	KR-85	1.80E-31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	KR-85M	2.11E-31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	KR-87	9.60E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	KR-88	2.03E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	RB-86	1.40E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	SR-89	7.80E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.81E+02	0.0	0.0	0.0	0.0
9	SR-90	1.63E+04	2.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	3.18E+03	5.40E+02	2.00E+01	0.0	0.0
10	SR-91	4.35E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	Y-90	3.33E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	Y-91	2.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	ZR-95	1.30E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	ZR-97	1.50E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	NB-95	3.10E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	MO-99	1.60E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	TC-99M	8.90E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	RU-103	5.40E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	RU-105	2.20E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	RU-106	2.50E+06	1.40E+06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	RH-105	3.60E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	TE-127	1.63E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	TE-127M	1.23E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	TE-129	5.60E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	TE-129M	1.50E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	TE-131M	1.10E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	TE-132	3.00E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	SB-127	2.50E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	SB-129	3.20E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	J-131	2.40E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.56E+02	0.0	0.0	0.0	0.0
31	J-132	1.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	J-133	3.10E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.58E+02	0.0	0.0	0.0	0.0
33	J-134	5.60E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	J-135	2.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	KE-133	4.10E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	KE-135	9.40E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	CS-134	4.50E+04	6.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	7.31E+04	0.0	0.0	0.0	0.0
38	CS-136	8.20E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.82E+03	0.0	0.0	0.0	0.0
39	CS-137	3.40E+04	6.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	5.59E+04	0.0	0.0	0.0	0.0
40	BA-140	6.30E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	LA-140	1.60E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	CE-141	6.20E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	CE-143	1.35E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	CE-144	2.10E+06	8.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	PR-143	4.90E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	ND-147	3.70E+04	1.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	NP-239	9.20E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	PJ-238	1.23E+08	1.00E+08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	PJ-239	1.20E+08	1.70E+08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	PU-240	1.20E+08	1.70E+08	1.00E+07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51	PU-241	6.40E+04	4.66E+05	3.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
52	AM-241	1.30E+08	1.80E+08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	CM-242	7.60E+07	1.10E+07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	CM-244	1.30E+08	1.80E+08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tab. F8, 5-5 (4):

Lungen-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation  $g_{IH}$   
und Ingestion  $g_{IG}$

NR.	NUKLID	INHALATION (REM/CI)						INGESTION (REM/CI)				
		0-1 A	1-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A	0-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A
1	CO-58	3.20E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	CO-60	2.10E+04	3.70E+04	1.00E+03	1.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	KR-85	1.80E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	KR-85M	2.00E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	KR-87	9.70E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	KR-88	2.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	RB-86	6.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	SR-89	1.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.81E+02	0.0	0.0	0.0	0.0
9	SR-90	5.90E+03	2.10E+03	2.00E+02	0.0	0.0	0.0	3.18E+03	6.00E+01	2.00E+01	0.0	0.0
10	SR-91	2.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	Y-90	2.10E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	Y-91	3.90E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	ZR-95	3.50E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	ZR-97	8.60E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	NB-95	1.30E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	MD-99	1.50E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	TC-99M	4.60E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	RU-103	9.60E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	RU-105	1.50E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	RJ-106	3.60E+03	2.70E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	RH-105	9.90E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	TE-127	3.00E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	TE-127M	2.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	TE-129	8.10E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	TE-129M	3.90E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	TE-131M	9.50E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	TE-132	9.70E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	SB-127	2.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	SB-129	3.80E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	J-131	1.10E+06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.68E+06	0.0	0.0	0.0	0.0
31	J-132	6.60E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	J-133	1.80E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.21E+05	0.0	0.0	0.0	0.0
33	J-134	1.10E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	J-135	4.40E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	XE-133	4.00E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	XE-135	9.10E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	CS-134	4.30E+04	5.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	7.33E+04	0.0	0.0	0.0	0.0
38	CS-136	6.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.23E+03	0.0	0.0	0.0	0.0
39	CS-137	3.10E+04	5.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	5.55E+04	0.0	0.0	0.0	0.0
40	BA-140	1.20E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	LA-140	2.30E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	CE-141	9.20E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	CE-143	2.50E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	CE-144	3.50E+02	2.60E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	PR-143	1.00E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	ND-147	6.90E+01	1.00E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	NP-239	1.50E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	PU-238	5.90E+03	2.24E+05	3.40E+05	2.90E+05	2.40E+05	2.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	PU-239	5.60E+03	2.24E+05	3.50E+05	3.40E+05	2.80E+05	3.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	PU-240	5.60E+03	2.24E+05	3.50E+05	3.40E+05	2.80E+05	3.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51	PU-241	5.30E+00	1.69E+03	5.70E+03	7.80E+03	8.00E+03	3.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
52	AM-241	6.50E+03	2.43E+05	3.70E+05	3.50E+05	3.30E+05	3.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	CM-242	3.20E+03	2.80E+03	1.30E+03	1.20E+03	1.00E+03	5.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	CM-244	6.60E+03	2.03E+05	2.20E+05	1.50E+05	1.00E+05	6.00E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tab. F8, 5-5 (5):

Schilddrüsen-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation  $g_{IH}$  und Ingestion  $g_{IG}$

NR.	NUKLID	INHALATION (REN/CI)						INGESTION (REN/CI) <sup>*)</sup>				
		0-1 A	1-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A	0-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A
1	CO-58	2.50E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	CO-60	1.80E+04	3.00E+04	2.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	KR-85	3.70E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	KR-85M	2.80E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	KR-87	1.00E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	KR-88	2.40E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	RB-86	6.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	SR-89	3.00E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.19E+04	0.0	0.0	0.0	0.0
9	SR-90	2.40E+05	1.06E+06	5.00E+05	2.00E+05	2.00E+05	0.0	6.15E+05	2.57E+05	9.80E+04	1.10E+05	0.0
10	SR-91	3.70E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	Y-90	9.70E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	Y-91	2.00E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	ZR-95	3.30E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	ZR-97	1.30E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	NB-95	1.20E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	MO-99	1.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	TC-99M	1.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	RU-103	8.80E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	RU-105	1.70E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	RU-106	3.40E+03	2.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	RH-105	1.60E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	TE-127	5.40E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	TE-127M	1.90E+03	1.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	TE-129	1.20E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	TE-129M	1.40E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	TE-131M	2.50E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	TE-132	9.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	SB-127	2.60E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	SB-129	3.90E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	J-131	2.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0
31	J-132	4.70E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	J-133	9.20E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.46E+02	0.0	0.0	0.0	0.0
33	J-134	1.90E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	J-135	8.70E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	XE-133	9.20E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	XE-135	1.30E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	CS-134	4.20E+04	5.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	7.24E+04	0.0	0.0	0.0	0.0
38	CS-136	5.90E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.10E+03	0.0	0.0	0.0	0.0
39	CS-137	3.10E+04	5.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	5.58E+04	0.0	0.0	0.0	0.0
40	B4-140	5.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	LA-140	7.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	CE-141	3.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	CE-143	1.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	CE-144	6.70E+03	1.13E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	PR-143	9.30E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	ND-147	1.90E+02	4.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	NP-239	5.20E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	PU-238	6.00E+03	2.24E+05	3.40E+05	3.00E+05	2.30E+05	3.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	PU-239	5.60E+03	2.24E+05	3.50E+05	3.40E+05	2.80E+05	3.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	PU-240	5.70E+03	2.24E+05	3.60E+05	3.40E+05	3.70E+05	3.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51	PU-241	1.10E+01	1.99E+03	6.00E+03	8.00E+03	8.00E+03	9.60E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
52	AM-241	7.30E+03	2.53E+05	3.93E+05	3.50E+05	4.00E+05	3.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	CM-242	3.20E+03	2.90E+03	1.30E+03	1.10E+03	1.00E+03	5.00E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	CM-244	6.60E+03	2.03E+05	2.30E+05	1.50E+05	9.00E+04	6.00E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\*) Hier wurden die Dosisfaktoren für den mineralischen Knochen verwendet.

Tab. F8, 5-5 (6):

Knochenoberfläche-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation  $g_{IH}$  und Ingestion  $g_{IG}$

NR.	NUKLID	INHALATION (REM/CI)						INGESTION (REM/CI)					
		0-1 A	1-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A	0-10 A	10-20 A	20-30 A	30-40 A	40-50 A	
1	CO-58	1.34E+03	5.00E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	CO-60	5.30E+03	6.25E+03	6.00E+02	5.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	KR-85	1.80E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	KR-85M	2.15E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	KR-87	9.95E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	KR-88	2.20E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	RB-86	6.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	SR-89	1.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.91E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	SR-90	5.90E+03	2.10E+03	2.00E+02	0.0	0.0	0.0	5.52E+04	2.03E+04	7.40E+03	8.00E+02	3.00E+02	
10	SR-91	2.50E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
11	Y-90	2.10E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12	Y-91	3.85E+02	1.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
13	Zr-95	1.31E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
14	Zr-97	3.77E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
15	NB-95	9.25E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
16	MO-99	1.91E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
17	TC-99M	6.95E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
18	RU-103	7.20E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19	RU-105	3.22E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
20	RU-106	2.95E+03	1.95E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
21	RH-105	4.44E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
22	TE-127	3.20E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
23	TE-127M	2.25E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
24	TE-129	6.85E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
25	TE-129M	3.95E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
26	TE-131M	4.40E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
27	TE-132	7.80E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
28	Sb-127	5.25E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
29	Sb-129	5.05E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
30	J-131	9.30E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.79E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	
31	J-132	4.00E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
32	J-133	7.60E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.70E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	
33	J-134	1.55E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
34	J-135	7.45E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
35	XE-133	4.05E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
36	XE-135	9.50E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
37	CS-134	4.70E+04	5.50E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	7.14E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	
38	CS-136	6.25E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.96E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	
39	CS-137	3.25E+04	6.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	5.49E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	
40	BA-140	1.55E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
41	LA-140	8.95E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
42	CE-141	1.08E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
43	CE-143	1.61E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
44	CE-144	1.75E+02	1.70E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
45	PR-143	1.00E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
46	ND-147	1.68E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
47	NP-239	1.02E+02	0.0	5.00E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
48	PU-238	1.39E+04	5.36E+05	7.75E+05	7.20E+05	6.05E+05	5.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
49	PU-239	1.32E+04	5.22E+05	8.45E+05	7.70E+05	7.50E+05	7.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
50	PU-240	1.32E+04	5.22E+05	8.45E+05	8.15E+05	7.50E+05	7.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
51	PU-241	1.25E+01	4.14E+03	1.31E+04	1.78E+04	1.90E+04	1.85E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
52	AM-241	1.52E+04	5.65E+05	8.75E+05	8.45E+05	8.00E+05	6.50E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
53	CM-242	7.85E+03	6.60E+03	2.75E+03	2.65E+03	2.65E+03	2.00E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
54	CM-244	1.58E+04	4.79E+05	5.55E+05	3.35E+05	2.05E+05	1.80E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Tab. F8, 5-5 (7):

Gonaden-Dosisfaktor für interne Bestrahlung infolge Inhalation  $g_{IG}$  und Ingestion  $g_{IG}$

v = 4: Konsum von anderen landwirtschaftlichen Produkten, Aufnahme über die Wurzeln

Sie sind in Tabelle F8, 5-6 wiedergegeben und gelten für das kritische Individuum, wurden aber für die gesamte Bevölkerung als repräsentativ angenommen.

Nuklid	Milch		Andere landwirtschaftliche Produkte	
	1. Jahr $I_1^0$	Folgejahre $I_2^0$	1. Jahr $I_3^0$	Folgejahre $I_4^0$
Sr-89	0,402	0,00682	0,397	0,0136
Sr-90	0,588	0,669	0,505	1,34
J-131	0,692	-	-	-
J-133	0,0042	-	-	-
Cs-134	4,22	0,0547	8,44	0,164
Cs-136	1,42	-	2,84	-
Cs-137	4,22	0,0835	8,44	0,251

- 1 = Oberflächenkontamination - Milch
- 2 = Wurzelaufnahme - Milch
- 3 = Oberflächenkontamination - andere Produkte
- 4 = Wurzelaufnahme - andere Produkte

Tab. F8, 5-6:

Normierte integrale Inkorporation  $I_v^0 [Ci / (Ci/m^2)]$  für verschiedene landwirtschaftliche Produkte und Zeiträume

Bei der Berechnung der Dosen wurden die WASH-1400 entnommenen Ingestions-Dosisfaktoren  $g_{IG}$  angewandt. Diese sind ebenfalls in Tabelle F8, 5-5 (1) bis (7) eingetragen.

### 5.3.3 Bevölkerungsstatistische Daten

Die bevölkerungsstatistischen Daten, die zur Berechnung der Dosen für das repräsentative Individuum erforderlich sind, wurden dem Statistischen Jahrbuch der Bundesrepublik Deutschland /F8, 5-7/ entnommen.

Die Lebenserwartungs-Dichtefunktion für Neugeborene  $p(l)$  (Gleichung 5.19) ist in Bild F8, 5-6 dargestellt. Die daraus herleitbare mittlere Lebenserwartung  $L$  (Gleichung 5.21) beträgt

$$L = 71 \text{ a}$$

und die Geburtenrate unter der Annahme einer zeitlich konstanten Bevölkerung, normiert auf eine lebende Person,

$$1/L = \frac{1}{71} \text{ a}^{-1}$$

Die Zeugungserwartungs-Dichtefunktion  $z(l)$  (Gleichung 5.22) ist - gemittelt über beide Geschlechter - in Bild F8, 5-7 dargestellt. Das daraus herleitbare mittlere Zeugungsalter  $Z$  (Gleichung 5.23) beträgt

$$Z = 28 \text{ a}$$



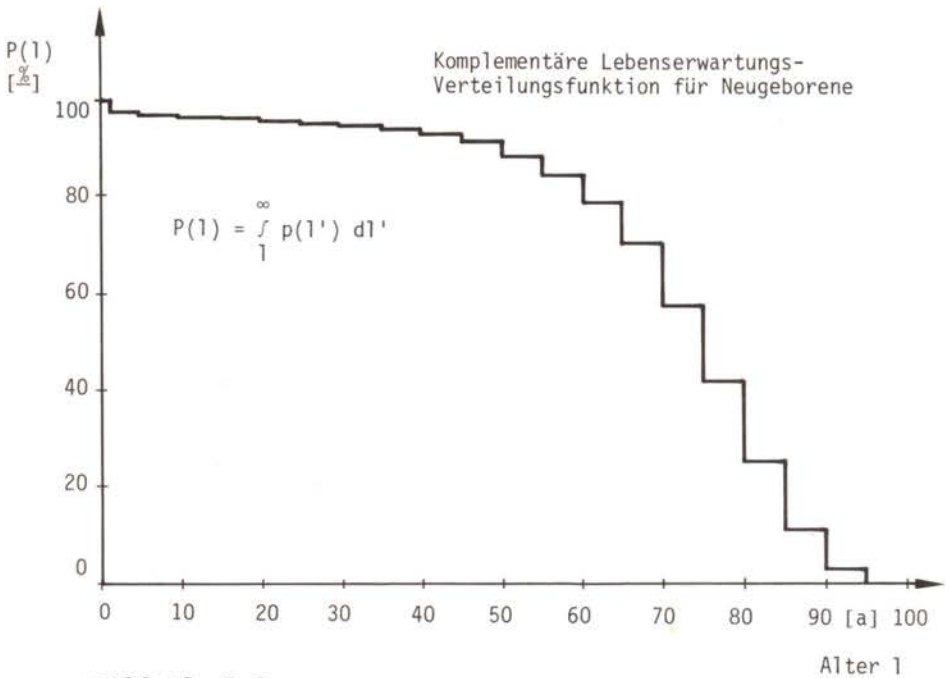
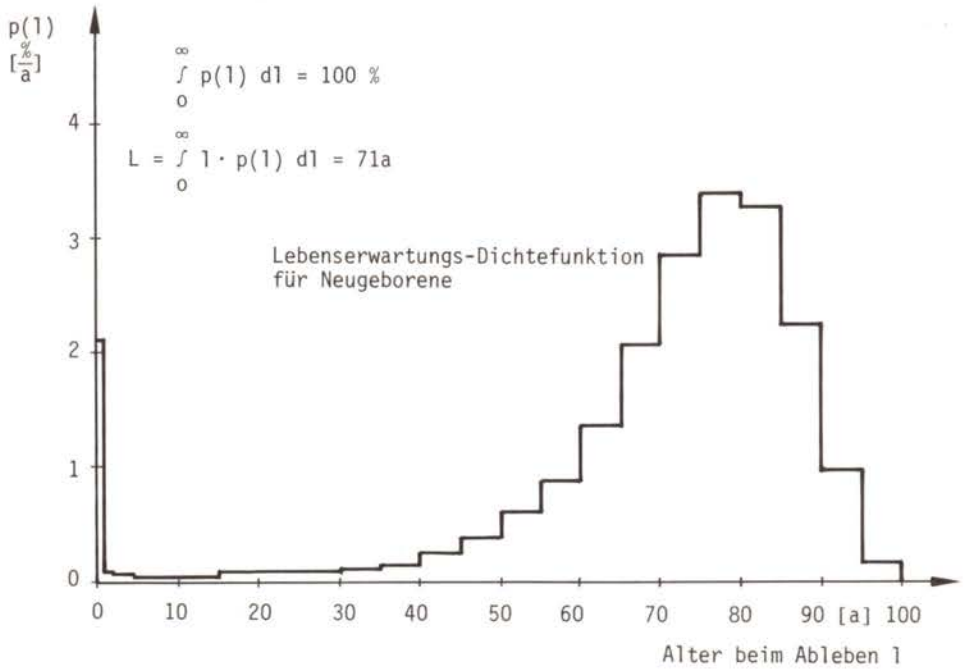


Bild F8, 5-6:

Lebenserwartungs-Dichtefunktion und komplementäre Lebenserwartungs-Verteilungsfunktion für Neugeborene

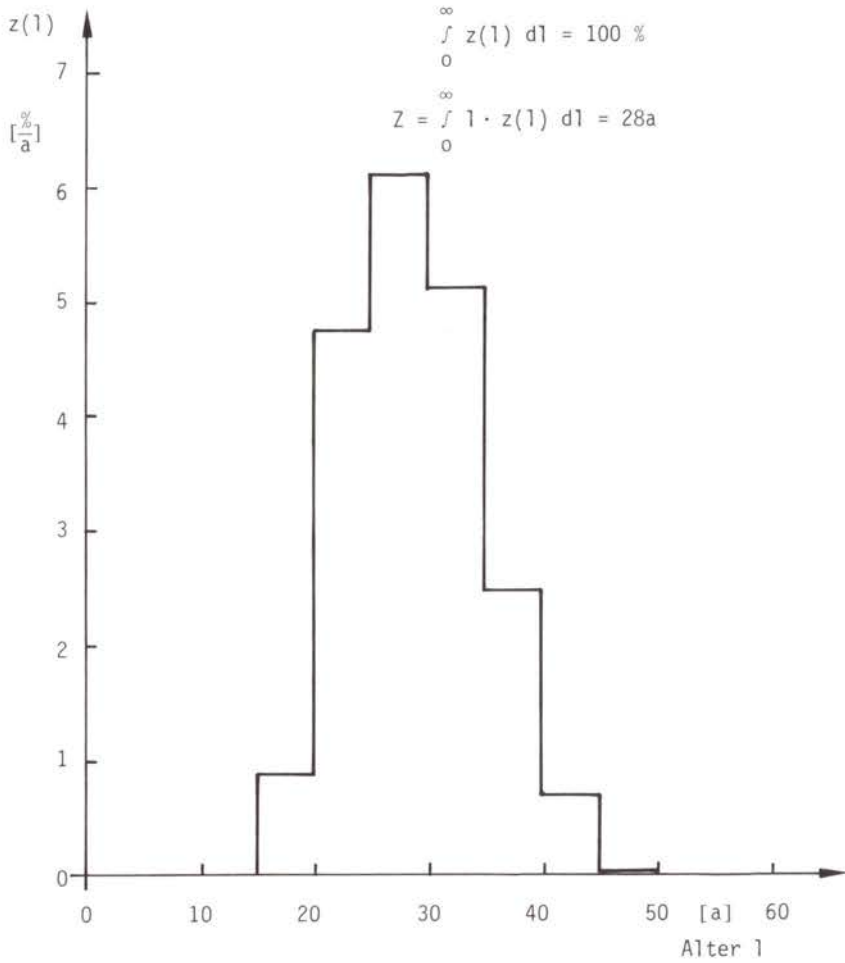


Bild F8, 5-7:

Zeugungserwartungs-Dichtefunktion für Neugeborene

## 6. MODELL DER SCHUTZ- UND GEGENMASSNAHMEN

### 6.1 Grundlagen des Modells

Für alle technischen Einrichtungen mit erhöhtem Gefährdungspotential wie Industrieanlagen, Kernkraftwerke, Lager- und Transportbehälter giftiger oder explosiver Substanzen, Staudämme, Verkehrsanlagen etc. gilt der Grundsatz, daß die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen in der Anlage selbst getroffen werden müssen. Dies geschieht unter anderem durch technische Sicherheitseinrichtungen, durch strenge Aufsicht über Planung, Bau und Betrieb solcher Anlagen und durch Schutz gegen Einwirkung Dritter.

Als zusätzliche Maßnahme im Rahmen ihrer generellen Vorsorgepflicht gegen nicht ausschaltbare Gefahren aus Naturkatastrophen, Zivilisation und Technik erstellen die Bundesländer und deren nachgeordnete Behörden Katastrophenschutzpläne für die Umgebung von Anlagen der oben genannten Art, also auch für Kernkraftwerke. Diese behördlichen Pläne für Kernkraftwerke basieren auf den "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen" /F8, 6-1/, die vom Länderausschuß für Atomkernenergie gemeinsam mit den Innenbehörden der Bundesländer herausgegeben wurden. Da das Ergebnis der vorliegenden Studie sehr wesentlich von den eingearbeiteten Katastrophenschutzmaßnahmen beeinflusst wird, dienen auch hier die Rahmenempfehlungen als Grundlage des Modells der Schutz- und Gegenmaßnahmen.

Eine kurze und allgemein verständliche Zusammenfassung der Rahmenempfehlungen, die auch Ausführungen über persönliche Schutzmaßnahmen der Bevölkerung und Verhaltensregeln bei einem kerntechnischen Unfall enthält, stellen die "Leitsätze für die Unterrichtung der Öffentlichkeit über die Katastrophenschutzplanung in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen" /F8, 6-2/ dar, die in der zuständigen Konferenz der Innenminister und Innensekretäre der Länder beschlossen wurden. Auf den Leitsätzen wiederum basiert eine Reihe von Broschüren /F8, 6-3 bis -5/, die von den zuständigen Behörden an die Öffentlichkeit verteilt wurde. In den Rahmenempfehlungen /F8, 6-1/ und Leitsätzen /F8, 6-2/

ist festgelegt, daß die Bevölkerung bei kerntechnischen Unfällen aufgefordert wird, Häuser aufzusuchen und Radio- bzw. Fernsehapparate einzuschalten. Als anschließende Maßnahmen sind im Bedarfsfall in bestimmten Gebieten die Evakuierung, die Dekontamination oder das zeitweilige Verbot des Verzehrs lokal erzeugter landwirtschaftlicher Produkte vorgesehen. Falls es die Strahlenbelastung der Bevölkerung erfordert und die Auswirkungen des Unfalls gemildert werden können, wird die Katastrophenschutzleitung auch weitergehende Maßnahmen, wie die Umsiedlung innerhalb weniger Tage oder Wochen (schnelle Umsiedlung) oder die Umsiedlung im Verlauf mehrerer Monate (Umsiedlung), anordnen.

Von diesen Empfehlungen und Erwägungen ausgehend, werden in der vorliegenden Studie insgesamt die folgenden Schutz- und Gegenmaßnahmen zu einem Modell zusammengefaßt:

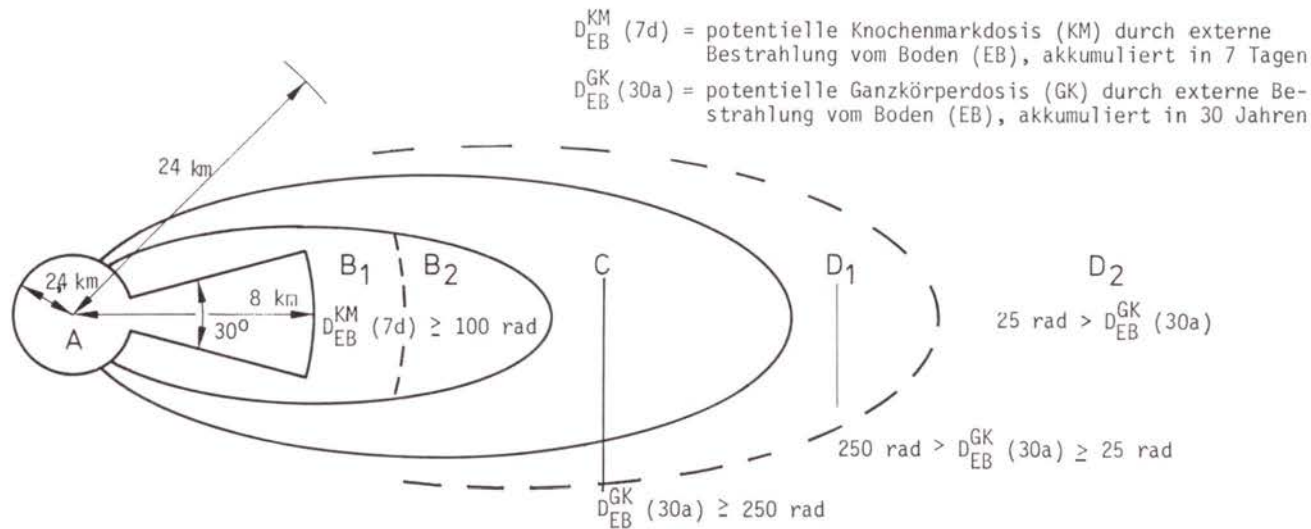
- Aufsuchen von Häusern,
- Evakuierung,
- schnelle Umsiedlung,
- Umsiedlung,
- Dekontamination,
- Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte.

Die Art und Dringlichkeit der Schutz- und Gegenmaßnahmen sind von Ort zu Ort verschieden. Dies führt zu einem Schema von Gebieten, Maßnahmen und Zeitabläufen, das in den folgenden Abschnitten (6.2 Gebiete/6.3 Maßnahmen) besprochen wird. Einen Überblick vermitteln Tabelle F8, 6-1 und Bild F8, 6-1. In den Zeitabläufen sind Anlauf- und Meßzeiten sowie der Zeitbedarf für das Heranführen von Personal, Meßgerät und Transportmitteln enthalten. Die Verkehrsstrukturen, die bei Bevölkerungsbewegungen von Bedeutung sind, werden nur pauschal berücksichtigt, indem zwischen Standorten mit städtischer, durchschnittlich besiedelter oder ländlicher Umgebung unterschieden wird. Einige Teilmodelle, z.B. das für die Ingestion, werden unverändert aus WASH-1400 übernommen. Ebenfalls in Anlehnung an WASH-1400 wird die Einnahme von Jodtabletten und die damit verbundene Dosisreduktion nicht berücksichtigt.

Gebiet → Zeit, Zweck Maßnahme ↓	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	Zeitliche Reihenfolge	Hauptmotiv der Maßnahme ist die Vermeidung von:
Information und Vorbereitung (Anlaufphase)							0 - 2 h	
Aufenthalt in Häusern	○	○					ab 2 h	Frühschäden durch Wolken- und Bodenstrahlung
Evakuierung Schnelle Umsiedlung	○	○	○				2 - 14 h nach 14 h	Frühschäden durch Bodenstrahlung
Umsiedlung Dekontamination				○	○		ab 30 d ab 30 d	Spätschäden durch Bodenstrahlung
Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte	○	○	○	○	○	○	sofort gemäß Kriterien	Spätschäden durch interne Strahlung nach Ingestion
Späte Dekontamination	○	○	○	○			vor Rückkehr der Bevölkerung	Spätschäden durch Bodenstrahlung

Tab. F8, 6-1:

Zuordnung von Maßnahmen, Gebieten und Zeiten (genauere Angaben im Text bzw. in Tabelle F8, 6-3 und -4)



Gebiet A ist durch Winkel und Entfernungen definiert und bei allen Freisetzungskategorien gleich. Für dieses Gebiet wird die Existenz vorbereiteter Evakuierungspläne vorausgesetzt.

Die Gebiete  $B_1$ ,  $B_2$ , C und  $D_1$  werden durch Isodosislinien definiert. Ihr Auftreten hängt somit von der Art der Freisetzung und der dann herrschenden Wetterlage ab.

In der Mehrzahl der Fälle bleiben die Dosen außerhalb des Gebiets A unter den Definitionswerten für die Gebiete  $B_1$  und  $B_2$ . Dann entfallen diese Gebiete und die zugehörigen Schutz- und Gegenmaßnahmen. Darüber hinaus entfallen in vielen Fällen auch die Gebiete C und  $D_1$ .

Bild F8, 6-1:

Gebiete der Schutz- und Gegenmaßnahmen (schematisch)  
 Erläuterungen siehe Text und Tabelle F8, 6-3

## 6.2 Gebiete

Die Betreiber von Kernkraftwerken und die zuständigen Behörden sind verpflichtet, vorsorglich die nötigen Vorkehrungen zu treffen, damit während und nach einer Freisetzung radioaktiver Stoffe die räumliche Verteilung der Dosisleistung in der Umgebung gemessen oder geschätzt werden kann. Ausgehend von dem Ergebnis solcher Messungen oder Schätzungen bei einem Unfall, ordnet dann die Katastrophenschutzleitung unter Anwendung der Kriterien, die in den Rahmenempfehlungen angegeben sind, die erforderlichen Schutz- und Gegenmaßnahmen an.

In analoger Weise verfährt die vorliegende Studie. Zuerst wird die räumliche Verteilung der Dosis im Freien - im folgenden potentielle Dosis genannt - berechnet. Danach werden - falls die Dosen die vorgegebenen Referenzwerte überschreiten - ausgewählte Linien gleicher Dosis (Isodosislinien) verwendet, um 5 Gebiete ( $B_1$ ,  $B_2$ , C,  $D_1$  und  $D_2$ ), in denen unterschiedliche Maßnahmen zur Anwendung kommen, zu definieren und gegeneinander abzugrenzen. Schließlich werden nach der Festlegung der Gebiete und unter Berücksichtigung der entsprechenden Schutz- und Gegenmaßnahmen die zu erwartenden Dosen berechnet und daraus die Personenschäden bestimmt.

Zu den bereits erwähnten 5 Gebieten kommt ein weiteres Gebiet A, das die unmittelbare Umgebung des Kernkraftwerks umfaßt, wo hohe Dosen auftreten können und bei großer Aktivitätsfreisetzung und ungünstigen Ausbreitungsbedingungen keine Zeit für Aktivitäts- und Dosisleistungsmessungen und deren Auswertung zur Verfügung steht. Es ist daher durch vorgegebene Winkel und Entfernungen begrenzt (siehe "Gebiet A", unten).

In der Mehrzahl der Fälle bleiben die Dosen außerhalb des Gebietes A unter den Definitionswerten für die Gebiete  $B_1$  und  $B_2$  oder sogar unter denen für die Gebiete C oder  $D_1$ . Dann entfallen diese Gebiete und die zugehörigen Schutz- und Gegenmaßnahmen.

Die Gebiete  $B_1$  und  $B_2$  sind so gewählt, daß sie zusammen mit dem Gebiet A alle Bereiche überdecken, in denen von der Dosis her Frühschäden möglich sind. Da diese Schadensart praktisch ausschließlich von der Knochenmarkdosis bestimmt wird, werden auch die Grenzen der Gebiete  $B_1$  und  $B_2$  auf der Basis der Knochenmarkdosis festgelegt. In den Gebieten C,  $D_1$  und  $D_2$  treten nur Spätschäden auf. Da die Spätschäden ungefähr zu den Ganzkörperdosen proportional sind, werden dort Linien gleicher potentieller Ganzkörperdosis zur Gebietsdefinition verwendet.

Ein weiterer Gesichtspunkt bei der Wahl der Gebietsgrenzen ist die Frage, ob Bevölkerungsbewegungen nötig sind oder nicht. Dazu sind in Tabelle F8, 6-2 die Angaben in den Rahmenempfehlungen mit den in der vorliegenden Studie verwendeten Dosiskriterien verglichen.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit bei der Anwendung der Rahmenempfehlungen besteht darin, daß die dort angegebenen Dosiswerte für einen relativ unbestimmten Zeitraum gelten (Tabelle F8, 6-2, Fußnote 1). Zeiträume von einigen Stunden und einigen Tagen unterscheiden sich ungefähr um einen Faktor 24. Wenn man annimmt, daß die in den Rahmenempfehlungen angegebenen Werte für einen Expositionszeitraum von ca. 7 Tagen gelten, ist die Gefährdungsklasse I durch einen oberen Grenzwert der Dosis von 25 rem in 7 Tagen oder ca. 250 rem in 30 Jahren und die Gefährdungsklasse III durch eine untere Grenzdosis von 100 rem in 7 Tagen definiert. Dazwischen liegt die Gefährdungsklasse II.

Auch in der vorliegenden Studie sind bei Dosen unterhalb von 250 rem in 30 Jahren (Gebiet  $D_1$  und  $D_2$ ) keine Bevölkerungsbewegungen vorgesehen<sup>1)</sup>. Ebenso sind die Definitionen für die Gefährdungsklasse III bzw. für die Gebiete  $B_1$  und  $B_2$  gleich, wobei allerdings hier von der Knochenmarkdosis und in den Rahmenempfehlungen von der Ganzkörperdosis ausgegangen wird. Die Bewohner der Gebiets C fallen in die Gefährdungsklasse II.

1

---

<sup>1)</sup> Bei  $250 \text{ rad} > D(30a) \geq 25 \text{ rad}$  wird dekontaminiert.



RAHMENEMPFEHLUNGEN				DEUTSCHE RISIKOSTUDIE	
Gefährdungs- klasse	Ganzkörper- dosis <sup>1)</sup> [rem]	Empfohlene Notfallschutz- maßnahmen		Gebiete	Akkumulations- zeitraum für potentielle Dosis <sup>2)</sup>
		Verbleiben im Haus	Räumung		
I	bis 25	zweckmäßig	nein	D <sub>1</sub> nach Dekonta- mination, D <sub>2</sub>	30a
II	25 - 100	erforder- lich	zweckmäßig	C	30a
III	über 100	erforder- lich bis zur Räu- mung	erforder- lich	B <sub>1</sub> und B <sub>2</sub>	7d

<sup>1)</sup> Die angegebenen Ganzkörperdosiswerte resultieren aus einer Exposition im Freien bei einer Aufenthaltsdauer von einigen Stunden bis zu einigen Tagen, unabhängig von Alter oder Geschlecht. Eventuell geringere Wirkungen bei Teilabschirmung des Körpers oder längerer zeitlicher Verteilung der Strahlenbelastung sind außer acht gelassen (Originaltext der Rahmenempfehlungen).

<sup>2)</sup> Für Vergleichszwecke kann man davon ausgehen, daß die Dosis, die sich nach den schwersten Freisetzungen an einem vorgegebenen Ortspunkt im Verlauf von 30 Jahren akkumulieren würde, ca. 10mal (30mal) größer ist als die entsprechende Dosis nach einem Akkumulationszeitraum von 7 Tagen (einem Tag).

Tab. F8, 6-2:

Dosiskriterien, die in den Rahmenempfehlungen angegeben sind bzw. im Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen der deutschen Risikostudie verwendet wurden

Aus den oben genannten Gründen (relativ unbestimmter Expositionszeitraum) wären auch andere Dosisgrenzen mit den Rahmenempfehlungen verträglich.

Es ist zu unterscheiden zwischen dem Zeitraum, über den die potentielle Dosis aufsummiert wird, um zu einer Gebietsdefinition zu gelangen (Akkumulationszeitraum für die potentielle Dosis), und dem Zeitraum bis zum Abschluß der Bevölkerungsbewegung, der viel kürzer ist. Zum Beispiel sind als Akkumulationszeitraum für die potentielle Dosis zur Definition der Gebiete  $B_1$  und  $B_2$  7 Tage gewählt (Bild F8, 6-1), während - wie später gezeigt wird (Tabelle F8, 6-7) - die unterstellten Bevölkerungsbewegungen im Gebiet A nach ca. einem halben Tag und in den Gebieten  $B_1$  und  $B_2$  nach maximal einem Tag beendet sind.

Die Gebietsgrenzen hängen von der Art der Freisetzung und dem jeweiligen Wetterablauf ab. Es werden 8 Freisetzungskategorien und 115 Wetterabläufe (je Standortregion) berücksichtigt. Damit ergeben sich 920 Fälle pro Standortregion, zu denen die Gebietsgrenzen unterschiedlich verlaufen. Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, daß die Dichte der betroffenen Bevölkerung, die für jeden Standort (19) und jede Windrichtung (36) verschieden ist, den Ablauf der Gegenmaßnahmen beeinflußt. Daher umfaßt die Berechnung der Folgen, die unter Berücksichtigung der Schutz- und Gegenmaßnahmen durchgeführt wird, insgesamt 629 280 verschiedene Kombinationen aus Reaktorstandort, Freisetzungskategorie, Wetterablauf und Windrichtung (= Bevölkerungsverteilung).

$D_{EB}^{KM}(T)$  und  $D_{EB}^{GK}(T)$  sind diejenigen Dosen, die das Knochenmark (KM) oder der Ganzkörper (GK) einer Person, die sich während des Zeitraums T ununterbrochen im Freien aufhält, durch externe Strahlung vom Boden (EB) erhalten würde. Da es wenig wahrscheinlich ist, daß sich Menschen in einem stark kontaminierten Gebiet tage- oder wochenlang ausschließlich im Freien aufhalten und daß darüber hinaus keinerlei Gegenmaßnahmen zur Durchführung gelangen, werden die so definierten Größen "potentielle Dosen" genannt (Kapitel 5). Sie können nicht zur Berechnung von Schäden dienen, stellen aber eine geeignete Grundlage für die gegenseitige Abgrenzung der Maßnahmen dar, da sie aus Dosisleistungsmessungen berechenbar sind.

Grundsätzlich kann sich das Modell der Gegenmaßnahmen dann auf Isodosislinien stützen, wenn zwischen der Kontamination und der Durchführung der Maßnahmen genügend Zeit zur Verfügung steht, um die nötigen Ortsdosismessungen vorzunehmen. In Anbetracht dieser Forderung wurde in das Gegenmaßnahmenmodell neben der absoluten Zeitskala ( $t_{abs}$ ), deren Nullpunkt durch den Eintritt des Unfalls bestimmt ist, auch eine relative Zeitrechnung ( $t_{rel}$ ) eingeführt, deren Nullpunkt mit dem Eintreffen der Aktivitätsfahne am Aufpunkt zusammenfällt. Nach diesen allgemeinen Vorbemerkungen werden nun die Grenzen der verschiedenen Gebiete beschrieben.

● Gebiet A

Das Gebiet A hat die Form eines Schlüsselochs. Es umfaßt einen Vollkreis von 2,4 km Radius, dessen Mittelpunkt durch das Reaktorgebäude festgelegt ist, und einen Kreissektor, der sich bis zu einer Entfernung von  $r = 8$  km erstreckt, symmetrisch zur Ausbreitungsrichtung liegt und einen Öffnungswinkel von  $30^\circ$  besitzt. Seine Fläche beträgt  $33,3 \text{ km}^2$ . Der Einschluß eines Vollkreises ist nötig, weil Wirbel und Diffusionsvorgänge in der unmittelbaren Umgebung des Kernkraftwerks einen Aktivitätstransport über kurze Distanzen in allen Richtungen bewirken können und die Strahlung aus der Aktivitätsfahne mit begrenzter Reichweite nach allen Richtungen hin emittiert wird.

Da die schwersten Unfälle vornehmlich im Gebiet A sehr hohe Dosen zur Folge haben können, wird angenommen, daß die Gegenmaßnahmen dort zügig abgewickelt und nicht von Dosismessungen und deren Auswertung abhängig gemacht werden. Form und Ausdehnung des Gebietes A sind dosisunabhängig und für alle Unfallkategorien und Wetterlagen gleich.

Die Ausdehnung des Gebiets A orientiert sich an den Rahmenempfehlungen /F8, 6-1/. Dort wird im Abschnitt C.II.6 unter anderem folgendes empfohlen (Zitate):

"6.1 Die Umgebung kerntechnischer Anlagen ist zur Abgrenzung vorbereitender Maßnahmen grundsätzlich in folgende Zonen

zu unterteilen:

- eine Zentralzone,
- eine Mittelzone,
- eine Außenzone.

- 6.2 Die Zentralzone umschließt die kerntechnische Anlage unmittelbar. Ihre Grenzen sind den jeweils vorliegenden örtlichen Gegebenheiten anzupassen und sollten einen Abstand von 2 km von der Anlage möglichst nicht überschreiten.
- 6.3 Die Mittelzone umschließt die Zentralzone. Ihre äußere Begrenzung soll durch einen Kreis mit einem Radius bis zu etwa 10 km festgelegt werden.
- 6.4 Die Außenzone umschließt die Mittelzone. Ihre äußere Begrenzung soll durch einen Kreis mit einem Radius bis zu etwa 25 km festgelegt werden.
- 6.6 Die Mittelzone und die Außenzone sind zweckmäßig in Sektoren von  $30^\circ$  oder  $22,5^\circ$  zu unterteilen ...
- 6.8 Für jede Zone müssen die erforderlichen Alarmmaßnahmen vorbereitet werden ..."

Der kreissektorförmige Teil des Gebiets A geht somit über die Mittelzone nicht hinaus, während der Vollkreis von 2,4 km etwa der Zentralzone entspricht. In beiden Zonen kann die Existenz vorbereiteter Alarmmaßnahmen vorausgesetzt werden.

● Gebiete  $B_1$  und  $B_2$

Während die Größe des Gebiets A nicht von der Art des Unfalls abhängt, ist das Gebiet  $B_1$  durch eine untere Grenze der potentiellen Knochenmarkdosis definiert, die bei  $D_{EB}^{KM}(7d) = 100 \text{ rad}$  liegt.

Da der Verlauf dieser Isodosislinie von der Art der Freisetzung und vom jeweiligen Wetterablauf abhängt, könnten sich bei Berücksichtigung von 8 Unfallkategorien, 4 Klimazonen und 115 Wetterabläufen im Prinzip  $8 \cdot 4 \cdot 115 = 3\,680$  Gebiete  $B_1$  verschiedener Größe und Gestalt ergeben. Die Rechnungen zeigen jedoch, daß nur bei den größten Freisetzungen (ca. 33 % der Wetterab-

läufe bei Unfall FK1, 38 % bei FK2 und 3 % bei FK3) potentielle Knochenmarkdosen erreicht werden, die zur Definition eines Gebiets  $B_1$  führen.

Bei Freisetzungen der Kategorien FK1 und FK2 umfaßt die Isodosislinie  $D_{EB}^{KM}(7d) = 100$  rad für einige Wetterlagen auch Gebiete, die mehr als 24 km vom Reaktor entfernt sind. Solche Teilgebiete werden von  $B_1$  abgetrennt und mit  $B_2$  bezeichnet (Abschnitt 6.3). Als Grenze zwischen  $B_1$  und  $B_2$  dient somit der Kreisbogen  $r = 24$  km.

● Gebiete C,  $D_1$  und  $D_2$

Die Festlegung der Gebiete C,  $D_1$  und  $D_2$  basiert auf der potentiellen Ganzkörperdosis durch Strahlung vom Boden, akkumuliert in 30a. So gelten für das Gebiet C die Schranken  $D_{EB}^{GK}(30a) > 250$  rad und  $D_{EB}^{KM}(7d) \leq 100$  rad, im Gebiet  $D_1$  ist  $250 \text{ rad} \geq D_{EB}^{GK}(30a) > 25$  rad und im Gebiet  $D_2$  liegt die potentielle Ganzkörperdosis  $D_{EB}^{GK}(30a)$  unterhalb ( $\leq$ ) 25 rad. Das Gebiet  $D_2$  erstreckt sich bis zur Berechnungsgrenze. Eine zusammenfassende Charakterisierung der Gebiete A,  $B_1$ ,  $B_2$ , C,  $D_1$  und  $D_2$  und ihrer Grenzen wurde in Bild F8, 6-1 gegeben. Die zugehörigen Maßnahmen werden im folgenden Abschnitt besprochen.

## 6.3 Maßnahmen

### 6.3.1 Anlaufphase

Der Zeitplan, der dem Schutz- und Gegenmaßnahmenmodell zugrunde liegt, ist so aufgebaut, daß sich der Einsatz an Gerät und Personal jeweils auf ein Gebiet konzentriert. Es wurde bereits erwähnt, daß sowohl eine absolute ( $t_{abs}$ ) als auch eine relative ( $t_{rel}$ ) Zeitskala Verwendung findet. Nullpunkt der absoluten Zeitskala ist der Eintritt des Unfalls, während der Nullpunkt der relativen Zeitskala durch den Zeitpunkt definiert ist, an dem die Aktivitätsfahne einen vorgegebenen Ort erreicht. Die absolute Zeitskala ist ortsunabhängig und dient vor allem dazu,

Zeitintervalle festzulegen, die für technische und administrative Vorbereitungen benötigt werden. Die Anwendung der ortsabhängigen, relativen Zeitskala ist vor allem im Zusammenhang mit jenen Maßnahmen nötig, die von der Unfallkategorie und der Wetterlage abhängen oder die auf Meßwerten basieren.

Nach dem Eintritt des Unfalls wird eine Anlaufphase von 2 Stunden unterstellt, in deren Verlauf die lokalen und regionalen Entscheidungsträger benachrichtigt, Stäbe gebildet und das Standardsignal für Katastrophenfälle allgemeiner Art (einminütiger Sirenenheulton) ausgelöst werden. Durch das Sirenensignal (und Lautsprecherwagen) wird die Bevölkerung der Gebiete A und gegebenenfalls  $B_1$  aufgefordert, Gebäude aufzusuchen oder darin zu verbleiben und Rundfunk- oder Fernsehapparate einzuschalten. Falls bereits in diesem Zeitraum von 2 Stunden einzelne Teilgebiete mit radioaktiven Stoffen beaufschlagt werden, findet bei 97 % der Personen ein gemittelter Abschirmfaktor Anwendung, der einem Mischaufenthalt in großen und kleinen Gebäuden und im Freien entspricht. Von 3 % der Bevölkerung wird angenommen, daß sie sich permanent im Freien aufhalten.

Schutz- und Gegenmaßnahmen, die später als zum Zeitpunkt  $2 h_{abs}$  ergriffen werden, sind gebietsspezifisch und werden in den Abschnitten 6.3.3 bis 6.3.7 nach Gebieten getrennt dargestellt. Zuvor werden in Abschnitt 6.3.2 die Abschirmfaktoren behandelt.

### 6.3.2 Berücksichtigung der Abschirmwirkung von Gebäuden gegenüber externer Strahlung

Die Berechnung der Exposition durch externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne (EF, Gleichung 5.8) und von der am Boden abgelagerten Aktivität (EB, Gleichung 5.9) erfolgt zunächst für eine Person, die sich in einem unendlichen Halbraum (EF) bzw. auf einer unendlichen ausgedehnten ebenen Fläche (EB) befindet. Die Abweichungen von diesen idealisierten Zuständen, d.h. die Abschwächung der Strahlung durch die natürlichen Bodenebenenheiten und die Bebauung, werden durch Abschirmfaktoren  $f^S$  berücksichtigt.

$$f^S = \frac{\text{Strahlenexposition mit Abschirmung}}{\text{Strahlenexposition ohne Abschirmung}}$$
$$= \frac{D}{D_0}$$

so daß gilt

$$D = f^S \cdot D_0 \quad (6.1)$$

In Tabelle F8, 6-3 sind Literaturwerte der Abschirmfaktoren für verschiedene Aufenthaltsorte zusammengestellt. Bei den Rechnungen zur vorliegenden Studie werden spezifische Faktoren für

- Aufenthalt in kleinen Gebäuden an geschützten Stellen,
- Aufenthalt in größeren Gebäuden an geschützten Stellen oder in Kellern von Gebäuden aller Art,
- Aufenthalt im Freien,
- normale Tätigkeit (= Aufenthalt in verschiedenartigen Gebäuden und im Freien, gemittelt über die Bevölkerung und die Zeit)

verwendet. Unter geschützten Stellen werden innenliegende Räume und Orte abseits von Türen und Fenstern - aber keine Schutzräume - verstanden. In der Bundesrepublik Deutschland sind die meisten Häuser mit Kellern ausgestattet. In Tabelle F8, 6-6 sind Zahlenwerte aus /F8, 6-8/ über die Verfügbarkeit von Kellerräumen - bezogen auf die Personenzahlen - angegeben. Wie ersichtlich, kann man davon ausgehen, daß der überwiegende Teil der Bevölkerung Zugang zu Kellern und somit die Möglichkeit hat, sich wirkungsvoll vor der Strahlung zu schützen. Da die vorliegenden Zahlenwerte der Abschirmfaktoren einerseits eine erhebliche Bandbreite aufweisen, andererseits Unsicherheit bezüglich der Aufenthaltsorte der Personen während der Schutzphase bestehen, werden für die Studie Abschirmfaktoren für die Maßnahme "Aufsuchen von Häusern" verwendet, die als pessimistisch angesehen werden können (Tabelle F8, 6-9).

Aufenthaltsort <sup>1)</sup> Tätigkeit	Schrifttum						Deutsche Risikostudie	
	/F8, 6-1/ EF	/F8, 6-6/ EB	/F8, 6-7/ EB   EF		/F8, 6-11/ EB   EF		EB	EF
	Im Freien			0,5	1	0,47 - 0,85	1	0,5
In Fahrzeugen			0,33	0,67	0,4 - 0,6	1	0,5	1
In Wohnräumen von								
- Ein- und Zweifamilien- häusern	0,1 - > 0,5	0,1 - 0,67	0,10	0,20	0,04 - 0,4	0,4 - 0,7	0,20	0,33
- größeren Wohngebäuden	0,02 - 0,1	0,02 - 0,1	0,05	0,1	0,01 - 0,08		0,15	0,25
- Hochhäusern, Büroge- bäuden		0,004 - 0,02			0,001 - 0,01	0,1 - 0,3	0,10	0,20
In Kellern von								
- Ein- und Zweifamilien- häusern	0,1 - 0,5				0,03 - 0,07	0,1 - 0,5	0,05	0,20
- größeren Wohngebäuden	0,004 - 0,02				0,001 - 0,07		0,02	0,10
- Hochhäusern, Büroge- bäuden		0,001 - 0,004			0,001 - 0,015			
Normale Tätigkeit			0,12	0,24	0,33	0,75	0,25	0,30

<sup>1)</sup> Die Zuordnung zu den hier gewählten Aufenthaltsorten ist aufgrund der im Schrifttum angegebenen Klassifikationen nicht immer eindeutig möglich. Es wird auf die darin angegebenen Ortsdefinitionen hingewiesen.

Tab. F8, 6-3:

Abschirmfaktoren für externe Strahlung vom Boden (EB) und aus der Aktivitätsfahne (EF) Schrifttum /F8, 6-1, -6, -7 und -11/ und die in dieser Studie verwendeten Werte



Gemeindegröße (Einwohner)	Gebäudegröße (Anzahl der Wohnungen/Gebäude)						Teilsumme
	1	2	3	4-6	7-12	≥ 13	
< 20 000	16,3	15,1	4,0	4,8	1,7	0,7	42,6
≥ 20 000	2,9	3,5	1,5	2,8	1,6	0,6	12,9
< 50 000							
≥ 50 000	1,2	1,5	1,0	2,2	1,9	0,6	8,4
< 100 000							
≥ 100 000	3,4	3,6	2,5	7,9	12,1	6,6	36,1
Teilsumme	23,8	23,7	9,0	17,7	17,3	8,5	100,0

Tab. F8, 6-4:

Häufigkeitsverteilung der Gebäudegrößen, bezogen auf die darin lebenden Personen

Zur Berechnung von mittleren Abschirmfaktoren für Mischaufenthalt

$$\overline{f^S} = \sum_{i=1}^n h_i \cdot f_i^S \quad (6.2)$$

mit

$h_i$  = relative Aufenthaltsdauer am Ort  $i$

$f_i^S$  = Abschirmungsfaktor des Aufenthaltsortes  $i$

werden Daten über die relative Aufenthaltsdauer (Tabelle F8, 6-5, /F8, 6-9/) und über die Verteilung der Gebäudegrößen, bezogen auf die darin lebende Bevölkerung (Tabelle F8, 6-4, /F8, 6-10/), herangezogen. Mit diesen Daten ergibt sich

$$f_{EB}^S = 0,19$$

$$f_{EF}^S = 0,33$$

Auch hier wurden in der Studie leicht pessimistische Werte von 0,25 (EB) und 0,4 (EF) verwendet (Tabelle F8, 6-9).

Der Abschirmfaktor für Aufenthalt im Freien (EB) hängt stark von der Bodenrauigkeit ab. In der vorliegenden Studie wurde der Wert 0,5 benutzt, der für mitteleuropäische Verhältnisse repräsentativ ist. Er wird auf die Personengruppe von 3 %, die der Aufforderung, Häuser aufzusuchen, nicht Folge leistet, und zur Berechnung der Strahlenexposition bei der Evakuierung und schnellen Umsiedlung angewendet. Auch in WASH-1400 wurde der Abschirmfaktor 0,5 bei Aufenthalt im Freien benutzt.

Aufenthaltsort	Relative Aufenthaltsdauer [%]
Zu Hause	74,4
In Büro, Schule etc.	17,1
Im Freien	5,7
In Fahrzeugen	2,8

Tab. F8, 6-5:

Prozentuale mittlere Aufenthaltshäufigkeit für die Bundesrepublik Deutschland

Gebäudegröße (Anzahl der Wohnungen/ Gebäude)	Prozentsatz der Personen in Gebäuden			Teilsomme
	voll unterkellert	teilweise unterkellert	nicht unterkellert	
1	15,0	12,9	4,2	32,1
2	14,1	6,5	1,4	22,0
≥ 3	39,8	4,7	1,4	45,9
Teilsomme	68,9	24,1	7,0	100,0

Tab. F8, 6-6:

Verfügbarkeit von Kellern

### 6.3.3 Schutz- und Gegenmaßnahmen im Gebiet A

Hauptzweck der Maßnahmen im Gebiet A ist es, den Umfang der akuten Schäden zu vermindern oder sie ganz zu vermeiden. Dieses Gebiet hat im allgemeinen ländlichen Charakter. Die Studie geht davon aus, daß nach 2 Stunden ca. zwei Drittel (65 %) der Bevölkerung größere Gebäude oder die Keller kleinerer Gebäude aufgesucht haben und dort an geschützten Stellen, d.h. abseits von Fenstern und Türen, verbleiben, während ca. ein Drittel (32 %) kleine Gebäude aufgesucht hat, aber dort nicht in die Keller gehen kann oder will. Von 3 % der Bevölkerung wird angenommen, daß sie trotz Warnung im Freien verbleiben. Dies ist dieselbe Bevölkerungsgruppe, für die auch in der Anlaufphase Aufenthalt im Freien angenommen wird.

Die Schutzmaßnahme "Aufsuchen von Häusern" ist mit relativ wenig Aufwand verbunden. Da sie in großen Gebieten durchgeführt werden kann, werden die Behörden sie als präventive Maßnahme auch für solche Gebiete anordnen, die aufgrund der Wetterbedingungen zum Zeitpunkt des Unfalls nicht unmittelbar gefährdet erscheinen. Nach der Freisetzung und Ausbreitung der radioaktiven Stoffe liegt die Ausbreitungsrichtung und damit das Gebiet A fest, nach Dosisleistungsmessung und Dosisberechnung lassen sich alle weiteren Gebiete definieren. Im Modell wird nur innerhalb der Gebiete A und B<sub>1</sub> ( $r \leq 24$  km) der dosisreduzierende Effekt der Maßnahme "Aufsuchen von Häusern" berücksichtigt.

Bei Aufenthalt in Häusern oder Kellern ist die Belastung durch Strahlung aus der Luft oder vom Boden wegen der größeren Distanz zu den radioaktiven Stoffen und der Abschirmwirkung des Mauerwerks und des Bodens (Keller) kleiner als im Freien.

Da bei nahezu allen Wetterlagen im Gebiet A die höchsten Dosisleistungen auftreten und dann keine Zeit für die Durchführung und Auswertung von Messungen zur Verfügung steht, geht die Studie davon aus, daß die Katastrophenschutzleitung dort nach jedem Unfall die Evakuierung anordnet. Darüber hinaus wird vorsichtshalber angenommen, daß für die Evakuierung dieses relativ

kleinen Gebiets von 33 Quadratkilometern 12 Stunden benötigt werden, d.h., zwischen der 2. und 14. Stunde besteigen die Bewohner ihre Autos oder andere Transportmittel und verlassen nach einer Fahrzeit (einschließlich Vorbereitungszeit) von 1,5 Stunden diese potentielle Gefahrenzone für akute Schäden. Für die Rechnungen wird vereinfachend angenommen, daß die Evakuierung simultan zum Zeitpunkt  $t = 8 \text{ h}_{\text{abs}}$  stattfindet. Die Fahrzeit wird wie ein unabgeschirmter Aufenthalt im Freien behandelt, und es wird während der ganzen Fahrt mit der Ortsdosisleistung am Wohnort gerechnet, die im allgemeinen der höchsten Dosisleistung entspricht, die auf eine Person einwirkt. In der vorliegenden Studie wird unterstellt, daß das Gebiet A in jedem Fall, d.h. auch nach Freisetzungen, die in die Kategorien 7 und 8 fallen, ohne Dosismessung evakuiert wird. Die Zweckmäßigkeit dieser Maßnahme muß in Phase B überprüft werden.

#### 6.3.4 Schutz- und Gegenmaßnahmen in den Gebieten $B_1$ und $B_2$

In der Mehrzahl der Fälle gibt es keine Gebiete  $B_1$  und  $B_2$ . Falls jedoch die Aktivitätsfreisetzungen und -ablagerungen bei einem Unfall so groß sind, daß ein Gebiet  $B_1$  definiert werden kann (Tabelle F8, 6-7), sind auch dort Frühschäden möglich. Deshalb sieht die Studie wie im Gebiet A Schutz- und Gegenmaßnahmen, einschließlich Bevölkerungsbewegungen, vor, wobei die Maßnahme "Aufenthalt in Häusern" in beiden Gebieten (A und  $B_1$ ) identisch ist.

Da es sich um eine präventive Maßnahme handelt, muß die Größe des Gebiets, in dem die Bevölkerung aufgefordert wird, Häuser aufzusuchen und darin zu verbleiben, von der Katastrophenschutzleitung zu einem Zeitpunkt festgelegt werden, an dem noch keine Dosismessungen vorliegen. Der Umfang dieser Maßnahme wird mit Sicherheit von der Schwere des Unfalls und von den meteorologischen Bedingungen abhängen. Um das Modell nicht zu unübersichtlich zu gestalten und aus Mangel an allgemein anerkannten Kriterien wird der dosisreduzierende Effekt dieser Maßnahme in der vorliegenden Studie nur im Gebiet  $B_1$  (und A) berücksichtigt. Da die

Gebiet	Gebietsdefinition		Präventive Maßnahmen (unabhängig von Unfallart und Wetterlage außer Windrichtung)	Dosisabhängige Maßnahmen <sup>2)3)</sup>
	Begrenzung durch Winkel und Entfernungen <sup>1)</sup>	Begrenzung durch Linien gleicher potentieller Dosis		
A	$r \leq 2,4 \text{ km}$ $\times 360^\circ$ sowie $2,4 < r < 8 \text{ km}$ $\times \leq \pm 15^\circ$	—	Aufsuchen von Häusern <sup>4)</sup> nach $2 h_{\text{abs}}$ . Verbleiben in Häusern bis zur Evakuierung. Vorbereitungs- plus Fahrzeit 1,5 h	—
B <sub>1</sub>	$r \leq 24 \text{ km}$	$D_{\text{EB}}^{\text{KM}}(7d_{\text{rel}}) \geq 100 \text{ rad}$  (soweit nicht zu A gehörig)	Aufsuchen von Häusern <sup>4)</sup> nach $2 h_{\text{abs}}$ . Verbleiben in Häusern mindestens bis $14 h_{\text{abs}}$ .	Verbleiben in Häusern bis min. [schnelle Umsiedlung $26 h_{\text{abs}}$ ]. Schnelle Umsiedlung nach max. [2 h <sub>rel</sub> , 14 h <sub>abs</sub> ] <sup>5)6)</sup>
B <sub>2</sub>	$r > 24 \text{ km}$		—	Normale Tätigkeit. Dann schnelle Umsiedlung nach max. [2 h <sub>rel</sub> , 14 h <sub>abs</sub> ]
C	—	$D_{\text{EB}}^{\text{GK}}(30a) > 250 \text{ rad}$	—	Normale Tätigkeit. Danach Umsiedlung, beginnend nach 30 d, durchschnittlich ca. 5 km <sup>2</sup> pro Tag
D <sub>1</sub>	—	$250 \text{ rad} \geq D_{\text{EB}}^{\text{GK}}(30a) > 25 \text{ rad}$	—	Normale Tätigkeit zu jeder Zeit. Dekontamination derart, daß $D_{\text{EB}}^{\text{GK}}(30a) = 25 \text{ rad}$ im ganzen Gebiet
D <sub>2</sub>	—	$25 \text{ rad} \geq D_{\text{EB}}^{\text{GK}}(30a)$	—	Normale Tätigkeit zu jeder Zeit, Dosis bis Lebensende

Tab. F8, 6-7:

Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen

Anmerkungen zu Tabelle F8, 6-7:

EB Externe Bestrahlung vom Boden

KM Knochenmark

GK Ganzkörper

<sup>1)</sup> Winkeleinteilung für Gebiet A relativ zur Ausbreitungsrichtung

<sup>2)</sup> Zu den genannten dosisabhängigen Maßnahmen kommen die ebenfalls dosisabhängigen Einschränkungen beim Verzehr lokal erzeugter, landwirtschaftlicher Produkte und die Dekontamination.

<sup>3)</sup> Die Rückführung der Bevölkerung erfolgt, wenn  $D_{EB}^{GK}(30a) \leq 25$  rad.

<sup>4)</sup> Von 0 - 2 h<sub>abs</sub> wird bei 97 % der Bevölkerung mit einem Abschirmfaktor für normale Tätigkeit gerechnet (Tabelle F8, 6-9). Normale Tätigkeit schließt Aufenthalte im Freien und in verschiedenartigen Gebäuden ein. Von 3 % wird angenommen, daß sie sich während dieser 2 Stunden permanent im Freien aufhalten und auch danach keine Häuser aufsuchen.

Unter Berücksichtigung der letztgenannten Annahmen bedeutet "Aufsuchen von Häusern", daß sich 3 % im Freien, 32 % in kleinen Gebäuden an geschützten Stellen und 65 % in größeren Gebäuden an geschützten Stellen aufhalten (Abschirmfaktoren siehe Tabelle F8, 6-9).

<sup>5)</sup> t<sub>abs</sub>: absolute Zeitskala, Nullpunkt = Zeitpunkt des Unfalls

t<sub>rel</sub>: relative Zeitskala (für jeden Ortspunkt)  
Nullpunkt = Durchzug der Aktivitätsfahne

<sup>6)</sup> Expositionszeiten während des Transports (Fahrzeiten) gemäß Tabelle F8, 6-8.

Schutzmaßnahme "Aufsuchen von Häusern" mit relativ wenig Aufwand verbunden ist, kann angenommen werden, daß sie von den Behörden in einem ausreichend großen Gebiet angeordnet wird, das in jedem Fall  $B_1$  (und A) einschließt.

Um die Strahlenbelastung der Bevölkerung möglichst gering zu halten, wird die Katastrophenschutzleitung bemüht sein, die Bevölkerungsbewegung zügig durchzuführen, d.h. in Form einer schnellen Umsiedlung. Die vorliegende Studie geht jedoch vorsichtshalber davon aus, daß ausgearbeitete Pläne nicht vorhanden sind und deshalb die schnelle Umsiedlung erst nach Eintritt des Unfalls vorbereitet wird. Dies führt zu der Annahme, daß die schnelle Umsiedlung der Bewohner des Gebiets  $B_1$  frühestens 14 Stunden nach dem Unfalleintritt, d.h. erst nach Beendigung der Evakuierung des Gebiets A, beginnt. Die lange Vorbereitungszeit erlaubt es, die Bevölkerung über Rundfunk und Fernsehen ausführlich zu unterrichten und Hilfspersonal und Transportmittel heranzuführen.

Zur Berechnung der Gesamtdosis werden die Fahrzeiten während der schnellen Umsiedlung benötigt. Zu diesem Zweck unterscheidet die Studie zwischen städtischen, durchschnittlich besiedelten und ländlichen Gebieten  $B_1$ . Mit Hilfe eines Rechenprogramms zur Simulation von Bevölkerungsbewegungen (Abschnitt 6.4.1) wurde für die Gebietstypen "städtisch" und "ländlich" je ein Fahrzeitspektrum ermittelt. Danach wurden beide Fahrzeitspektren jeweils durch 3 Fahrzeiten so approximiert, daß jede Fahrzeit für ein Drittel der betroffenen Bevölkerung gilt. Die entsprechenden 3 Fahrzeiten für die "durchschnittlich besiedelten" Gebiete wurden durch Interpolation gewonnen (Abschnitt 6.4.2). Tabelle F8, 6-8 gibt eine Zusammenfassung der zu den einzelnen Gebietstypen gehörenden Bevölkerungsdichten und Fahrzeiten.

Die Bevölkerungsdichte ist im verwendeten Modell das einzige Merkmal der genannten Gebietstypen. Sie wird für jede einzelne Kombination aus Standort, Freisetzungskategorie, Wetterlage und Windrichtung aus der Fläche des Gebiets  $B_1$  und der darin wohnenden Bevölkerung bestimmt.



Bevölkerungs- anteil	Ländliches Gebiet <sup>1)</sup>	Durchschnittlich besiedeltes Gebiet <sup>1)</sup>	Städtisches Gebiet <sup>1)</sup>
1/3	0,10 h	0,30 h	0,50 h
1/3	0,25 h	1,25 h	2,00 h
1/3	1,00 h	4,50 h	7,00 h

<sup>1)</sup> Bevölkerungsdichte (p):

ländliches Gebiet:  $p \leq 100 \text{ Einw./km}^2$   
 durchschnittlich besiedeltes Gebiet:  $100 < p \leq 400 \text{ Einw./km}^2$   
 städtisches Gebiet:  $p > 400 \text{ Einw./km}^2$

Expositionszeit = Vorbereitungszeit (0,25 h) + Fahrzeit

Dosis während der Expositionszeit =  $D_{EB}$  am Wohnort

Tab. F8, 6-8:

Fahrzeiten während der Umsiedlung

Die Fahrzeiten werden bei der Dosisberechnung als Aufenthalt im Freien am Wohnort gewertet. Zu den Fahrzeiten wird eine einheitliche Vorbereitungszeit von 0,25 h bei voller Strahlung vom Boden zugezählt. Eine örtliche oder zeitliche Staffelung der schnellen Umsiedlung wird nicht in Betracht gezogen (Abschnitt 6.4.1). Nach dem Verstreichen der Vorbereitungs- und Fahrzeit haben die Bewohner des Gebietes  $B_1$  die Gefahrenzone verlassen und erhalten keine Dosis mehr, die zu Frühschäden beitragen kann.

Die Freisetzungskategorie 1 in Verbindung mit ca. 15 % der Wetterlagen und die Freisetzungskategorie 2 in Verbindung mit ca. 3 % der Wetterlagen führen zu einer 100-rad-Isodosislinie (potentielle Knochenmarkdosis durch externe Strahlung vom Boden, akkumuliert in 7 Tagen), die Teilgebiete einschließt, deren Entfernung zum Reaktor mehr als 24 km beträgt. Da im allgemeinen für diese Gebiete keine Notfallschutzplanung erforderlich ist, wird in der vorliegenden Studie pessimistisch angenommen, daß die Bewohner dieser Teilgebiete  $B_2$  bis zu einer schnellen Umsiedlung ihrer normalen Tätigkeit nachgehen, die durch den Abschirmfaktor für Mischaufenthalt gekennzeichnet ist.

Die schnelle Umsiedlung wird in den Gebieten  $B_1$  und  $B_2$  gemeinsam durchgeführt. Zur Berechnung der Bevölkerungsdichte, aus der die Fahrzeiten für die schnelle Umsiedlung resultieren, werden die Einwohnerzahlen der Gebiete  $B_1$  und  $B_2$  addiert und die Summe durch die Gesamtfläche dividiert.

Hinsichtlich der Maßnahme "Aufenthalt in Häusern" war für die Freisetzungskategorien 5 und 6 eine Sonderbehandlung vorgesehen. Diese Kategorien führen erst sehr spät (nach  $25 h_{abs}$ ) zu größeren Aktivitätsfreisetzungen. In solchen Fällen ist es denkbar, daß Teile der Bevölkerung nach ca. einem Tag zeitweilig die Gebäude verlassen. Daher wurde ab  $25 h_{abs}$  der Abschirmfaktor für Mischaufenthalt vorgesehen. Die Rechnungen ergaben jedoch, daß in Verbindung mit den Kategorien 5 und 6 keine Gebiete  $B_1$  oder  $B_2$  existieren.

#### 6.3.5 Maßnahmen in den Gebieten C, $D_1$ und $D_2$

In den Gebieten C,  $D_1$  und  $D_2$  werden keine Dosen erreicht, die zu Fröhschäden führen. Ziel der Gegenmaßnahmen in diesen Gebieten ist es daher, die Spätschäden niedrig zu halten. Dies geschieht durch Umsiedlung, Dekontamination oder Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte. In Anlehnung an WASH-1400 wird davon ausgegangen, daß bei potentiellen Dosen durch Strahlung vom Boden auf den Ganzkörper ( $D_{EB}^{GK}$ ), die unter 25 rad in 30a liegen, außer Einschränkungen beim Verzehr von Lebensmitteln keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden (Gebiet  $D_2$ ). Gemäß Tabelle F8, 6-9 entspricht dieser potentiellen Dosis eine effektive Ganzkörperdosis von 12,5 rad in 30a bei Mischaufenthalt in verschiedenartigen Gebäuden und im Freien.

In Gebieten mit höherem Strahlenpegel muß dekontaminiert werden (Gebiet  $D_1$ ). Ist die Kontamination jedoch so hoch, daß der Wert von  $D_{EB}^{GK}(30a) = 25$  rad nur mit Hilfe eines Dekontaminationsfaktors

$$DF = \frac{\text{Radioaktivität vor der Dekontamination}}{\text{Radioaktivität nach der Dekontamination}}$$

Aufenthalt	Abschirmfaktoren	
	Strahlung vom Boden	Strahlung aus der Wolke
im Freien <sup>1)</sup>	0,5	1
in kleinen Gebäuden an geschützten Stellen	0,2	0,3
in größeren Gebäuden an geschützten Stellen	0,1	0,15
Normale Tätigkeit <sup>2)</sup>	0,25	0,40

<sup>1)</sup> Abschirmung nur durch Bodenrauigkeit

<sup>2)</sup> Normale Tätigkeit = Aufenthalt in verschiedenartigen Gebäuden und im Freien, gemittelt über die Bevölkerung (Mischaufenthalt)

Tab. F8, 6-9:

Abschirmfaktoren gegenüber externer Strahlung

größer als 10 erreicht werden kann (Gebiet C), wird die Dekontamination im Modell auf einen späteren Zeitpunkt verschoben (Spätdekontamination) und die Bevölkerung zeitweilig umgesiedelt.

Die Umsiedlung im Gebiet C beginnt nach 30 Tagen und erstreckt sich täglich auf ein Gebiet von durchschnittlich 5 km<sup>2</sup>. Sie beginnt in den Teilgebieten, die dem Reaktor am nächsten liegen, und schreitet zu größeren Entfernungen hin fort. Im gesamten Zeitraum von der Freisetzung bis zur Umsiedlung geht die Bevölkerung einer normalen Tätigkeit nach, d.h., es wird der Abschirmfaktor für Mischaufenthalt angewandt.

Das dieser Studie zugrunde gelegte Kriterium für die Umsiedlung führt im Extremfall zu einem sehr großen Personenkreis, der von dieser Maßnahme betroffen ist.

Dabei ist jedoch folgendes zu beachten:

- In der Studie werden Abschirmfaktoren verwendet, die für eine durchschnittliche Mischung großer, mittlerer und kleiner Häuser gelten. Große Personenzahlen werden jedoch für Groß-

städte und Ballungsgebiete errechnet, wo mehrstöckige Häuser vorherrschen, die eine bessere Abschirmung bieten. Hier müßten andere Abschirmfaktoren Anwendung finden.

- Sehr große Personenzahlen ergeben sich bei den Rechnungen bevorzugt - wenn nicht gar ausschließlich - in Verbindung mit Regenfällen. In dicht besiedelten Gebieten mit großen Dach-, Beton- und Asphaltflächen fließt mit dem Regenwasser ein großer Teil der Aktivität in die Kanalisation und befindet sich damit auf einem viel weniger effektiven Belastungspfad. Die Studie enthält kein Regenablaufmodell, berücksichtigt diesen Effekt also nicht.
- In der Studie ist dann die Umsiedlung vorgesehen, wenn auch nach der Dekontamination die in 30 Jahren bei normaler Tätigkeit akkumulierte Ganzkörperdosis 12,5 rad übersteigen würde (25 rad potentielle Ganzkörperdosis). Dieser Wert entspricht dem 2 1/2fachen Jahresdosisgrenzwert für beruflich exponierte Personen und ist damit relativ niedrig. Es wird im Verlauf der Phase B der vorliegenden Studie nochmals zu überlegen sein, ob für Bevölkerungsbewegungen von derart großem Ausmaß eine so niedrige Auslöseschwelle gerechtfertigt ist.

Die beiden zuerst genannten Mängel des Modells haben in Großstädten und Ballungsräumen eine Überschätzung der Dosen zur Folge. Ihre Behebung führt ohne Änderung des Gegenmaßnahmenmodells zu einer geringeren Anzahl betroffener Personen. Darüber hinaus erscheint aber auch eine Überprüfung des Kriteriums angezeigt, das im Modell die Umsiedlung auslöst.

Die Kontamination im Gebiet  $D_1$  ist so niedrig, daß die potentielle Ganzkörperdosis, summiert über 30 Jahre, durch Dekontamination überall auf einen Wert unter 25 rad gebracht werden kann. Deshalb wird in der vorliegenden Studie davon ausgegangen, daß keine Bevölkerungsbewegungen stattfinden und die Bewohner dieses Gebiets zu jedem Zeitpunkt ihrer normalen Tätigkeit nachgehen. Die Dekontamination wird so vorgenommen, daß die potentielle Ortsdosis  $D_{EB}^{GK}$  (30a) im gesamten Gebiet  $D_1$  einheitlich 25 rad beträgt. Der Dekontaminationsfaktor ist also ortsabhängig und der größte Dekontaminationsaufwand wird in den Teilgebieten mit der

stärksten Kontamination getrieben. In den ersten 30 Tagen nach dem Unfall wird pessimistisch ein Dekontaminationsfaktor von 1 angenommen.

Im gesamten Gebiet  $D_2$  liegen definitionsgemäß die potentiellen Ortsdosen  $D_{EB}^{GK}$  (30a) unterhalb von 25 rad. Als einzige Gegenmaßnahme betrachtet die Studie Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte. Dabei wird ein vorläufiges Modell unverändert aus WASH-1400 übernommen. Die Kriterien werden im nächsten Abschnitt angegeben.

Tabelle F8, 6-7 gibt einen Überblick über alle Gegenmaßnahmen (außer den Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte) in den Gebieten A,  $B_1$ ,  $B_2$ , C,  $D_1$  und  $D_2$ .

#### 6.3.6 Verzehr landwirtschaftlicher Produkte

Die Kontamination landwirtschaftlicher Produkte wird hauptsächlich verursacht durch die direkte Ablagerung der radioaktiven Stoffe auf oberirdischen Teilen von Pflanzen (radioaktive Belastung der Bevölkerung im ersten Jahr) oder indirekt über den Weg Boden-Wurzel-Pflanze (Belastung in den Folgejahren). Kontaminierte Pflanzen wiederum können unmittelbar Bestandteil der menschlichen Nahrung sein oder zur Kontamination tierischer Produkte führen. Besondere Bedeutung hat dabei der Weide-Kuh-Milch-Pfad.

Für die genannten Pfade und Zeiträume wurden die Dosiskriterien in Anlehnung an WASH-1400 festgelegt. Wie Tabelle F8, 6-10 zeigt, basieren diese Kriterien auf der Belastung des Ganzkörpers, des Knochenmarks oder der Schilddrüse.

Wenn eines oder mehrere Kriterien überschritten werden, nimmt die Studie an, daß die zugehörigen Belastungspfade während des betreffenden Zeitraumes durch Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte unterbrochen sind.

Organ	Weide-Kuh-Milch-Pfad	Andere landwirtschaftliche Produkte
Ganzkörper	3,3 rem/50a	2 rem/50a
Knochenmark	3,3 rem/50a	2 rem/50a
Schilddrüse	10 rem/50a	-

Tab. F8, 6-10:

Dosiskriterien für den Verzehr landwirtschaftlicher Produkte

6.3.7 Dekontamination in den Gebieten  
A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> und C (Spätdekontamination),  
Rückführung der Bevölkerung

Falls nach einem Unfall Gebiete C, B<sub>2</sub> oder B<sub>1</sub> existieren, ist dort die potentielle Dosis, die sich in den unmittelbar folgenden 30 Jahren durch Strahlung vom Boden auf den Ganzkörper akkumulieren würde, größer als 250 rad. Auch im Gebiet A wird dieser Wert bei einer Reihe von Wetterlagen überschritten.

Im Laufe der Zeit nimmt die potentielle Dosis als Folge des radioaktiven Zerfalls und witterungsbedingter Effekte kontinuierlich ab. Sobald sie in Teilgebieten von C, B<sub>2</sub>, B<sub>1</sub> oder A den Wert von 250 rad in (den nun folgenden) 30 Jahren unterschreitet, werden dort eine Dekontamination um den Faktor DF = 10 und die Rückkehr der Bevölkerung unterstellt.

Nach der Dekontamination verbleibt eine potentielle Dosis von 25 rad in 30 Jahren. Die entsprechenden Spätschäden - berechnet aus den zu erwartenden Dosen - werden berücksichtigt, auch soweit sie die nach dem Unfall geborenen Personen betreffen. Ist die Rückkehr allerdings erst nach mehr als 10 Jahren möglich, dann wird im Modell analog zu WASH-1400 die Bestrahlung nach der Rückkehr nicht mehr berücksichtigt.

## 6.4 Ermittlung der Fahrzeiten für Evakuierung und schnelle Umsiedlung

### 6.4.1 Simulation von Bevölkerungsbewegungen

#### ● Problemstellung

Ein Teil der in dieser Studie betrachteten Unfallabläufe würde für die in der Umgebung existierende Bevölkerung so schwerwiegende Folgen haben, daß zu ihrem Schutz, sollten derartige Unfälle in der Realität auftreten, sicherlich Katastrophenabwehrmaßnahmen getroffen würden.

Man kann davon ausgehen, daß an allen Standorten von kerntechnischen Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland besondere Katastrophenabwehrpläne entsprechend den "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen" /F8, 6-1/ vorliegen. Für die hier angestellten Betrachtungen ist wesentlich, daß nach den "Rahmenempfehlungen" derzeit Schutzmaßnahmen in der Außenzone, d.h. in Entfernungen ab etwa 10 km bis etwa 25 km, und darüber hinaus planmäßig nicht vorbereitet werden müssen.

Im Gegenmaßnahmenmodell werden in zeitlicher und örtlicher Differenzierung u.a. die Effekte von Evakuierung, "schneller Umsiedlung" sowie "Umsiedlung" berücksichtigt. Über die Zeitspanne, die für die Evakuierung bzw. schnelle Umsiedlung benötigt wird, liegen praktisch keine empirisch gesicherten Daten vor. Grundlage für die in die Studie einzuarbeitenden Zeitschätzungen mußten daher durch Modellrechnungen geschaffen werden. Diese Rechnungen werden unten beschrieben.

Außerdem war die Frage zu klären, in welchem zeitlichen Rahmen eine Umsiedlung erheblichen Ausmaßes realistischere Weise stattfinden könnte.

### ● Rechenmodell

Die Modellrechnungen wurden mit Hilfe des Evakuierungssimulationssystems EVAS /F8, 6-12/ vorgenommen. Dieses Rechenprogramm ermöglicht die Simulation eines Evakuierungsablaufs bei einer willkürlich vorgegebenen Gefahrensituation an einem konkreten Standort. Simuliert wird im wesentlichen der Verkehrsablauf, wobei Absperrungsmaßnahmen sowie Verkehrslenkungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Das Verhalten von Personen wird durch vorgegebene Zeitparameter nachgebildet. Beispielsweise kann die Rückkehr von Familienvätern vom Arbeitsplatz zur Wohnung berücksichtigt werden, ebenso die Reaktion der Bevölkerung auf die Warnung in Form von Zeitvorgaben, nach denen die Personen vom Aufenthaltsort aufbrechen.

### ● Evakuierung

Entsprechend den Festlegungen wird von Evakuierung dann gesprochen, wenn die Bevölkerung im Gebiet A betroffen ist. Da dieses Gebiet innerhalb der Mittelzone nach /F8, 6-1/ liegt, kann die Existenz vorbereiteter Evakuierungspläne vorausgesetzt werden.

Die Ergebnisse der bisher durchgeführten Simulationsrechnungen, bei denen die Ausdehnung der zu räumenden Gebiete in der Größenordnung des Evakuierungsgebietes lag und bei denen ländliche Gebietsstrukturen betrachtet wurden, lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Gesamtdauer des Evakuierungsvorganges hängt wesentlich davon ab, wieviel Zeit vom Erkennen des Unfalls bis zur Warnung der Bevölkerung vergeht (Gesamtdauer = Wartezeit + Evakuierungsdauer).
- Aus verkehrstechnischer Sicht ergeben sich kaum Probleme, sofern nicht völlig unvernünftige Zuordnungen zwischen Evakuierungsorten und Aufnahmeorten und entsprechende Evakuierungsrouten gewählt werden. Solche Probleme lassen sich vorhersehen und vermeiden. Die vorhandenen Verkehrsnetze sind in den



betrachteten ländlichen Gebieten normalerweise großzügig dimensioniert.

- Es ist zu erwarten, daß ein Gebiet, dessen Bevölkerung ausreichend gewarnt und unterrichtet ist, in höchstens 6 Stunden weitgehend geräumt sein kann.
- Die größten vorkommenden Fahrzeiten liegen bei etwa 2 Stunden.
- Bei gleichbleibender Personenzahl geht eine Verlängerung der Evakuierungsdauer mit einer Verkürzung der Fahrzeiten einher (Entzerrung der Belastungsspitzen).
- Unter der Voraussetzung, daß genügend Busse bereitgestellt werden, ergeben sich durch den Einsatz von Bussen anstatt privater PKW keine wesentlichen Veränderungen der Evakuierungsdauer.

#### ● Schnelle Umsiedlung

In dem von einer "schnellen Umsiedlung" betroffenen Gebiet kann die Existenz entsprechender Pläne nicht vorausgesetzt werden. Die Veranlassung und Durchführung entsprechender Maßnahmen müßten dementsprechend ad hoc erfolgen.

Im folgenden werden die Simulationsrechnungen beschrieben, mit deren Hilfe der Zeitbedarf für die Durchführung schneller Umsiedlungen abgeschätzt werden kann.

#### ● Bei der schnellen Umsiedlung betrachtete Gebietsstrukturen

Der von EVAS vorgegebene Bezug auf einen jeweils vorzuziehenden konkreten Standort machte es erforderlich, einen oder mehrere solcher Standorte für die Durchführung der Modellrechnungen zu benennen. Eine repräsentative Auswahl war allerdings in der Phase A dieser Studie wegen der beschränkten Zeit nicht möglich. Es wurde daher festgelegt, daß Modellrechnungen jeweils für ein dicht besiedeltes Gebiet (eher städtische Struktur) und für ein

dünn besiedeltes Gebiet (ländliche Struktur) durchgeführt werden sollten. Erfahrungen haben nämlich gezeigt, daß die Besiedlungsdichte einen erheblichen Einfluß auf den Ablauf der Räumung hat. Die schließlich gewählten Gebiete sind lediglich darauf abgestimmt, daß sie den geschilderten Bedingungen genügen, ansonsten aber in bezug auf Kernkraftwerksstandorte fiktiv. Ihre Größe wurde mit etwa 10 · 30 km<sup>2</sup> so festgelegt, daß damit die vermutlich größten betroffenen Gebiete abgedeckt wurden. Charakterisierende Angaben für die betrachteten Gebietsstrukturen ergeben sich aus den folgenden Tabellen:

Struktur	Größe [km <sup>2</sup> ]	Bevölkerung [Personen]	Bevölkerungsdichte [Personen/km <sup>2</sup> ]	Verfügbare PKW [PKW/1000 Pers.]
städtisch	308	196 753	638,8	262
ländlich	297	26 258	88,4	213

Tab. F8, 6-11:

Bevölkerung und Transportmittel

Struktur	Überörtliche Straßen		Verkehrsknoten	
	Länge	Länge/Fläche	Anzahl	Anzahl/Fläche
städtisch	468 km	1,5 km <sup>-1</sup>	261	0,85 km <sup>-2</sup>
ländlich	274 km	0,9 km <sup>-1</sup>	166	0,56 km <sup>-2</sup>

Tab. F8, 6-12:

Straßennetzverhältnisse

Zur Bevölkerungsdichte ist zu sagen, daß mit rd. 640 Personen/km<sup>2</sup> nicht die höchsten an Kernkraftwerksstandorten in der Bundesrepublik vorkommenden Werte erreicht werden. Ebenso werden mit 88 Personen/km<sup>2</sup> ebenfalls nicht die ganz niedrigen vorkommenden

Besiedlungsdichten erfaßt. Für die Mehrzahl der in der Studie zu betrachtenden Sektoren dürften die o.a. Gebietsstrukturen jedoch typisch sein.

Bei der Planung von Evakuierungsmaßnahmen wird normalerweise davon ausgegangen, daß die verfügbare Kapazität von privaten PKW ausgenutzt wird und daß mit Bussen der zusätzliche Bedarf abgedeckt wird. Abhängig von der Tages- und Wochenzeit schwankt jedoch die Zahl der verfügbaren PKW. Speziell an Werktagen ergibt sich die Situation, daß in ländlichen Gebieten der Anwesenheitsbevölkerung weniger private PKW zur Verfügung stehen, da ein Teil der Erwerbstätigen mit dem PKW zur Arbeit in die Städte fährt. Für die Modellrechnungen wurde daher die Werktagssituation angenommen.

● Ablaufvorgaben bei den Modellrechnungen zur "schnellen Umsiedlung"

Entsprechend dem Gegenmaßnahmenmodell wird davon ausgegangen, daß schnelle Räumung frühestens 14 Stunden nach dem Unfallbeginn einsetzt. Es kann angenommen werden, daß zu diesem Zeitpunkt die von den Behörden getragene Katastrophenabwehr voll einsatzfähig ist und daher planvoll vorgehen kann. Insbesondere dürfte die Bevölkerung vollständig gewarnt und über die vorgesehenen Schutzmaßnahmen unterrichtet sein, so daß von daher wesentliche Probleme nicht zu erwarten sind. Eine Wartezeit wird daher nicht angenommen.

Bei der schnellen Umsiedlung müssen die Transportwege und Aufnahmeorte im allgemeinen ohne entsprechend ausgearbeitete Pläne festgelegt werden. Eine mögliche und wahrscheinliche Lösung dieser Aufgabe besteht darin, für einzelne gefährdete Gebiete die empfohlenen Aufnahmeorte zu benennen, allenfalls noch Empfehlungen über zu benutzende Routen zu geben. Für die Modellrechnungen wurden daher Routen und Orte so festgelegt, daß die gefährdete Bevölkerung jeweils quer zur Ausbreitungsrichtung den zeitkürzesten Weg, so wie er sich aus ihrer Alltagserfahrung darstellt, wählt. Eine Einschränkung besteht darin, daß für ein

als abgeschlossen zu betrachtendes Gebiet (z.B. ein Dorf, ein Stadtbezirk) jeweils ein gemeinsamer Zielort mit einer einzigen dorthin führenden Route festgelegt wird.

Zur Steuerung des Räumungsablaufs könnte man daran denken, nach Teilgebieten gestaffelt zu räumen, um so eine Entzerrung des Verkehrs zu erreichen. Für die Modellrechnungen wurde eine solche Staffelung versuchsweise in der Weise eingeführt, daß in Teilgebieten von etwa 4 x 10 km Fläche in Abständen von 90 Minuten mit der Evakuierung begonnen wurde. Hierbei wurden die Teilgebiete in der Nähe der (angenommenen) Lage des Kernkraftwerkes zuerst geräumt.

Alternativ wurde der gleichzeitige Start aller betroffenen Personen betrachtet. Es wurde angenommen, daß dies zur maximalen Belastung des Straßennetzes und somit zu Stauungen und Verzögerungen führt.

● Ergebnisse der Modellrechnungen zur "schnellen Umsiedlung"

Das erste wichtige Ergebnis ist, daß durch die Staffelung des Räumungsbeginns, zumindest in der betrachteten Version, weder im ländlichen noch im städtischen Bereich eine erkennbare Verbesserung des Ablaufs der schnellen Umsiedlung bewirkt wird. Der Grund besteht offensichtlich darin, daß die in der Mitte des betrachteten Sektors befindlichen Personen auf ihrem Weg zum Sektorrand durch diejenigen in den Randzonen, die noch nicht das gefährdete Gebiet verlassen haben, an der Weiterfahrt behindert werden. Es handelt sich also um eine Folge der relativ breit gewählten Sektorsegmente und der radialen Staffelung des Räumungsbeginns. Andere, hier nicht betrachtete Räumungsstrategien sind möglicherweise günstiger.

Im folgenden wird daher die Staffelung des Räumungsbeginns nicht mehr betrachtet. Die Unterschiede in den Umsiedlungsabläufen der ländlichen und der städtischen Gebiete sind erwartungsgemäß beträchtlich. Die schnelle Umsiedlung im ländlichen Gebiet dauert rund 2 Stunden, im städtischen Gebiet nahezu 14 Stunden. Von be-

sonderem Interesse sind hier die Fahrzeiten von Personen, da entsprechend dem Gegenmaßnahmenmodell während dieser Zeitspanne eine Ortsdosisexposition angesetzt wird. Im folgenden werden die Verteilungen der Fahrzeiten in ausgewählten Perzentilen angegeben:

Perzentil	städtische ländliche Gebietsstruktur	
	15	19 min
50	106 min	14 min
85	425 min	48 min
100	658 min	105 min

Tab. F8, 6-13:

Kennwerte der Fahrzeitverteilung für zwei Bevölkerungsdichtegruppen

● Umsiedlung

Das Gegenmaßnahmenmodell sieht für Gebiete, bei denen die Dosis einen vorgegebenen Wert überschreitet, die Umsiedlung vor. Sieht man von den durch Kriegsereignisse hervorgerufenen Umsiedlungen ab, sind Daten über vergleichbare Ergebnisse kaum vorhanden. In /F8,6-13/ wird beispielsweise über Umsiedlungen im rheinischen Braunkohlenrevier berichtet. Danach wurden innerhalb eines Zeitraums von 30 Jahren ca. 21 000 Bewohner von 51 Orten umgesiedelt. Derartige Angaben lassen sich auf die hier betrachteten Ereignisse natürlich nicht anwenden. Was im oben geschilderten Fall ein langsamer, geplanter Prozeß ohne allzu schwerwiegende Einschränkungen für die Betroffenen war, muß bei einem kerntechnischen Unfall zügig als Katastrophenabwehrmaßnahme durchgeführt werden. In diesem Fall wäre es durchaus denkbar, sowohl den direkt Betroffenen, aber auch anderen Bevölkerungsteilen Einschränkungen zuzumuten. Beispielsweise könnte ein wesentlicher Anteil der verfügbaren Transportkapazität (etwa des Möbelfern- und Möbelnahverkehrs) für eine solche Umsiedlung herangezogen werden. Die Kapazität ist nach der amtlichen Statistik über Bevölkerungs-

bewegungen und der Statistik der Arbeitsgemeinschaft Möbeltransport /F8, 6-14/ (ca. 850 000 Umzüge pro Jahr) sicher verfügbar, wenn auch nur nach Einschränkungen nicht direkt Betroffener.

Nach eingehender Diskussion wurde daher festgelegt, bei der rechnerischen Ermittlung der Unfallfolgen so zu verfahren, als würde im Rahmen der (langsamen) Umsiedlung täglich ein Gebiet von ca. 5 km<sup>2</sup> geräumt. Hierbei kann vorausgesetzt werden, daß die Behörden durchaus in der Lage sind, die am stärksten betroffenen Bevölkerungsteile zuerst umzusiedeln.

#### 6.4.2 Interpolation zwischen den berechneten Fahrzeiten für schnelle Umsiedlung

In Tabelle F8, 6-13 sind Kennwerte von Fahrzeitverteilungen angegeben, die mit Hilfe von Simulationsläufen für Bevölkerungsdichten von 638,8 (städtisches Gebiet) und 88,4 Personen/km<sup>2</sup> (ländliches Gebiet) berechnet wurden. Nicht variiert wurde die Gebietsgröße, die in beiden Fällen ca. 300 km<sup>2</sup> betrug. Aus den genannten Kennwerten wurden die Fahrzeiten für die schnelle Umsiedlung (Gebiet B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub>) abgeleitet. Da der Verlauf einer schnellen Umsiedlung nicht nur von der Bevölkerungsdichte abhängt, besteht kein Zweifel darüber, daß diese Datenbasis zu klein ist. Weitere Daten waren jedoch nicht verfügbar. Um zu einer optimalen Nutzung der vorhandenen Daten zu gelangen, wurde geprüft, ob eine Interpolation zwischen den genannten Bevölkerungsdichten von 88,4 und 638,8 Einwohnern/km<sup>2</sup> und eine Extrapolation zu höheren Dichten hin durchgeführt werden sollte. Dazu dienten die folgenden Überlegungen:

In der vorliegenden Studie wird für jede Kombination aus Freisetzungskategorie und Wetterablauf die Größe der Gebiete B<sub>1</sub> und gegebenenfalls B<sub>2</sub> berechnet. In einem anschließenden Schritt wird daraus für 36 Windrichtungen pro Standort die gebietsspezifische Bevölkerungsdichte bestimmt. Erwartungsgemäß tritt der Fall "hohe Bevölkerungsdichte gepaart mit einem kleinen betroffenen Gebiet" relativ häufig auf. Je größer aber das betroffene Gebiet,

desto näher liegt im allgemeinen die zugehörige Bevölkerungsdichte beim Durchschnittswert der Bundesrepublik Deutschland (250 Einwohner/km<sup>2</sup>). Außerdem zeigt es sich, daß Gebiete wie B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub>, die dicht besiedelt und gleichzeitig größer als 100 km<sup>2</sup> sind, nur mit extrem geringer Wahrscheinlichkeit auftreten können, da in diesem Fall die schwersten Unfälle, die ohnehin sehr unwahrscheinlich sind, zusätzlich auf genau definierte Ausbreitungsbedingungen treffen müssen, deren Auftreten als spezielle Kombination von Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Trockenheit, zu einem genau definierten Zeitpunkt beginnender Niederschlag etc. ebenfalls eine kleine Wahrscheinlichkeit besitzt.

Aufgrund der genannten Überlegungen wird in der vorliegenden Studie davon ausgegangen, daß die für die eingangs erwähnte Gebietsgröße und Bevölkerungsdichte von ca. 300 km<sup>2</sup> bzw. 638 Einwohnern/km<sup>2</sup> errechneten Parameter auch auf jene relativ häufigen Fälle angewendet werden können, in denen die Dichte der betroffenen Bevölkerung zwar größer, das zugehörige Gebiet aber wesentlich kleiner ist. Eine Extrapolation würde hier zu falschen Ergebnissen führen.

Im Gegensatz dazu wurde eine Interpolation für nützlich erachtet, da sich die genannten Bevölkerungsdichten von 88 und 638 Einwohnern/km<sup>2</sup> um nahezu eine Größenordnung unterscheiden. Es wurde der zusätzliche Gebietstyp "durchschnittlich besiedelt" eingeführt, der die Bevölkerungsdichten zwischen 88 und 638 Personen/km<sup>2</sup> umfaßt und sich damit an der mittleren Bevölkerungsdichte der Bundesrepublik orientiert. Durch lineare Interpolation zwischen den Kennwerten der Fahrzeitverteilung für 88 und 638 Einwohner/km<sup>2</sup> wurden die Werte für 412 Personen/km<sup>2</sup> bestimmt. Es ergab sich die Tabelle F8, 6-14.

Nach dem Übergang zu glatten Zahlen und der Zuordnung der Werte für die 15, 50 und 85 Perzentile zu je einem Drittel der Bevölkerung gelangt man zu Tabelle F8, 6-15. Wie die Tabelle zeigt, wurden die Fahrzeiten für eine vorgegebene Bevölkerungsdichte berechnet bzw. interpoliert, aber dann im wesentlichen auf nied-

rigere Bevölkerungsdichten angewandt. Damit ist ein zusätzlicher Sicherheitsspielraum vorhanden.

Perzentil	Kennwerte der Fahrzeitverteilung [Minuten]		
15	4	13	19
50	14	68	106
85	48	270	425
100	105	430	658
Bevölkerungsdichte [Personen/km <sup>2</sup> ]	88	412	638

Tab. F8, 6-14:

Kennwerte der Fahrzeitverteilung für drei Bevölkerungsdichtegruppen

Bevölkerungsanteil [%]	Fahrzeiten bei der schnellen Umsiedlung [Stunden]		
33 1/3	0,1	0,3	0,5
33 1/3	0,25	1,25	2
33 1/3	1	4,5	7
Bevölkerungsdichte [Personen/km <sup>2</sup> ]	100	100-400	400

Tab. F8, 6-15:

Fahrzeiten bei der schnellen Umsiedlung

Den in Tabelle F8, 6-15 genannten Fahrzeiten geht eine Vorbereitungszeit voraus, in der die Bevölkerung die geschützten Räume verlassen hat und sich an beliebigen Stellen im Haus, in der Garage oder im Freien befindet. Die dabei empfangene Dosis wird einheitlich durch eine viertelstündige Exposition im Freien approximiert. Dies entspricht einer halbstündigen Exposition bei



Mischaufenthalt (Tabelle F8, 6-9). Es wirkt sich günstig auf die Dauer der Rüstzeit aus, daß zwischen dem Erkennen der bevorstehenden Freisetzung und dem Beginn der schnellen Umsiedlung eine Zeitspanne von mindestens 14 Stunden liegt, in der die Bevölkerung auf die Abfahrt vorbereitet wird und sie planen kann.

Für große Flächen mit hoher Bevölkerungsdichte, die mit geringer Wahrscheinlichkeit in einigen Extremfällen auftreten, sind zusätzliche Überlegungen und Rechnungen während der Phase B dieser Studie nötig.

## 7. MODELL ZUR ERMITTLUNG DER GESUNDHEITSSCHÄDEN DURCH STRAH- LUNG

### 7.1 Vorbemerkung

Zur Ermittlung der gesundheitlichen Auswirkungen von Aktivitätsfreisetzungen aus Kernkraftwerksunfällen und der dadurch bedingten Strahleneinwirkung auf die in der Umgebung lebende Bevölkerung ist es erforderlich, aufgrund der vorliegenden Erfahrungen Modelle zur Abschätzung der Strahlenwirkung bzw. des Strahlenrisikos als Funktion der empfangenen Dosis zu entwickeln. Zur Einführung in diese Zusammenhänge wird im folgenden nochmals der bereits im Hauptband enthaltene Text zu den biologischen Strahlenwirkungen und den Arten von Strahlenschäden wiedergegeben. Die daran anschließenden Abschnitte 7.3 und 7.4 geben einen detaillierten Überblick über den gegenwärtigen Kenntnisstand zu den somatischen Früh- und Spätschäden, soweit er für die Herleitung der Dosis/Wirkungs- bzw. Dosis/Risiko-Beziehung wichtig ist. Dabei konnte auch noch nach Veröffentlichung des Hauptbandes erschienenenes Schrifttum berücksichtigt werden. Die allgemeinen Ausführungen über genetische Strahlenschäden in Abschnitt 7.5 wurden der Vollständigkeit halber unverändert aus dem Hauptband übernommen.

### 7.2 Allgemeines zur Strahlenwirkung

Die Absorption von Strahlenenergie in einer lebenden Zelle bzw. in einem Gewebe löst eine Kette von physikalischen, chemischen und biologischen Reaktionen aus, an deren Ende ein gesundheitlicher Schaden des bestrahlten Individuums bzw. im Falle der Bestrahlung der Gonaden (Hoden, Eierstöcke) eine Schädigung seiner Nachkommen auftreten kann. In Bild F8, 7-1 ist die Reaktionskette der biologischen Strahlenwirkungen in einem Organismus und die möglichen Arten von Strahlenschäden schematisch dargestellt. Da die Zelle und der Organismus über sehr wirksame Mechanismen zur Reparatur bzw. Eliminierung der primären biologischen Strahlenwirkungen verfügen, hat die Absorption

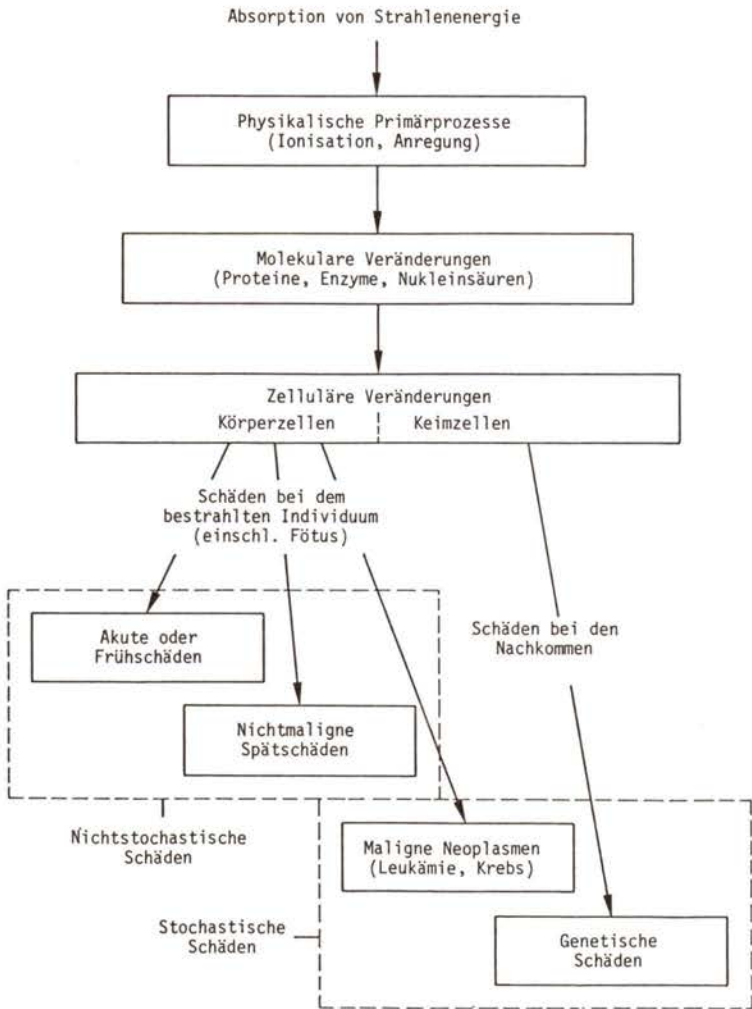


Bild F8, 7-1:

Reaktionskette der biologischen Strahlenwirkung und Arten von Strahlenschäden

von Strahlung in einem Organ bzw. Gewebe des Körpers - ausgenommen bei hohen Dosen - nicht zwangsläufig die spätere Manifestation eines relevanten Strahlenschadens zur Folge. Es besteht deshalb nur die Möglichkeit für das Eintreten eines Strahlenschadens, die als Strahlenschadensrisiko bezeichnet wird. Das Strahlenrisiko für ein bestrahltes Gewebe gibt somit die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung eines die Gesundheit beeinträchtigenden Schadens infolge der Bestrahlung dieses Gewebes an.

Nach Bild F8, 7-1 sind vier Arten von Strahlenschäden zu unterscheiden:

- akute oder Frühschäden, die kurzzeitig nach der Bestrahlung auftreten (z.B. die akute Strahlenkrankheit),
- nichtmaligne Spätschäden, die Jahre nach der Bestrahlung bei den bestrahlten Individuen erkennbar werden (z.B. fibrotische Gewebsveränderungen, Trübung der Augenlinse),
- maligne Spätschäden, die sich erst nach einer Latenzperiode von Jahren bis Jahrzehnten in dem bestrahlten Gewebe manifestieren (z.B. Leukämie infolge Bestrahlung des roten Knochenmarks sowie Tumoren in anderen Körpergeweben),
- genetische Schäden, die als Folge spezifischer Mutationen von Keimzellen nach Bestrahlung der Gonaden (Hoden, Eierstöcke) bei den Nachkommen des bestrahlten Individuums auftreten können (z.B. Skelettanomalien, geistige Behinderung, Veränderung der Augenfarbe, Erbkrankheiten).

Die drei erstgenannten Schadensarten sind somatische Schäden, da sie bei dem bestrahlten Individuum auftreten können. Hierzu sind auch Schäden zuzuordnen, die infolge einer Bestrahlung im Mutterleib auftreten können.

Die kanzerogenen und genetischen Effekte werden als stochastische, d.h. zufallsmäßige Strahleneffekte bezeichnet, da bei diesen Schadensarten die Wahrscheinlichkeit ihrer strahleninduzierten Inzidenz und nicht die Schwere des Schadens von der Strahlendosis abhängt. Demgegenüber hängt bei den akuten Schäden und nichtkanzerogenen Spätschäden vor allem die Schwere

des Schadens von der Dosis ab: Sie werden unter dem Überbegriff "nichtstochastische Effekte" zusammengefaßt.

Die Gesundheitsschädigung eines Individuums oder der gesamten Population infolge Strahleneinwirkung darf somit nicht an der Gesamtinzidenz von Strahlenschäden bewertet werden, sondern muß die Häufigkeit und den Schweregrad der einzelnen Schadensarten berücksichtigen. Zum Beispiel ist dem Auftreten einer vorübergehenden, akuten Veränderung des Blutbildes ein geringerer Schadensgrad zuzumessen als einer schweren, akuten Strahlenkrankheit mit letalem Ausgang. Entsprechend ist der Bildung eines papillaren oder follikularen Krebsknotens in der Schilddrüse, die in den meisten Fällen weder bemerkt wird noch zu einer Beeinträchtigung der Gesundheit führt, ein anderes Gewicht beizumessen als einer Leukämie, die in der Regel kurzfristig zum Tode führt.

Für die Bewertung der Gesundheitsschädigung durch ionisierende Strahlen ist daher das Risiko von Schadensarten entscheidend, die zu einer strahleninduzierten Lebensverkürzung führen (Mortalitätsrisiko). Hierzu gehören die schwere, akute Strahlenkrankheit, die durch Bestrahlung der blutbildenden Organe mit hohen Dosen verursacht wird, sowie bösartige Tumore, wie z.B. Lungenkrebs und Leukämie.

Die Analyse der möglichen Schadensfolgen durch Bestrahlung setzt die Kenntnis der Beziehung zwischen der Dosis in einem Gewebe und der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Strahlenschadens in diesem Gewebe voraus. Hinsichtlich der Form dieser Dosis/Wirkungs- bzw. Dosis/Risiko-Beziehung besteht ein grundsätzlicher Unterschied zwischen stochastischen Strahlenschäden (Krebs, genetische Schäden) und nichtstochastischen Schäden (akute Schäden, nichtkanzeröse Spätschäden), der im Bild F8, 7-2 schematisch dargestellt ist.

Bei nichtstochastischen Schäden existiert eine Schwellendosis, bei deren Unterschreitung eine gesundheitliche Schädigung nicht auftritt. Demgegenüber weisen die Erfahrungen über die kanzer-

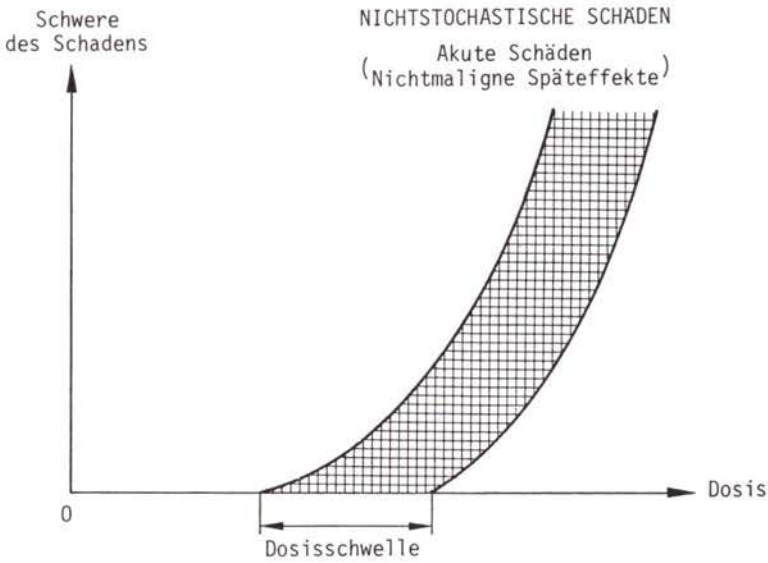
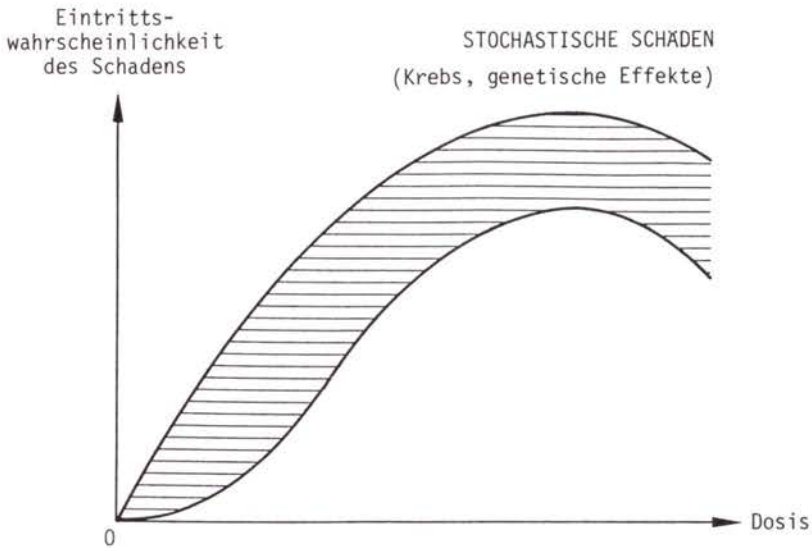


Bild F8, 7-2:

Form der Dosis/Risiko-Beziehung für stochastische und nichtstochastische Strahlenschäden

rogene und genetische Wirksamkeit der Strahlung darauf hin, daß bei diesen Schadensarten keine derartige Schwellendosis existiert: Somit können diese Schadensarten auch bei niedrigen Dosen auftreten, wobei jedoch mit sinkender Dosis die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines solchen Schadens abnimmt. Bei Dosen unterhalb etwa 100 rad im Falle einer kurzzeitigen Ganzkörperbestrahlung wird daher die Gesundheitsschädigung durch Strahlung praktisch nur durch das kanzerogene und genetische Strahlenschadensrisiko bestimmt. Bei sehr hohen Dosen nimmt die Wahrscheinlichkeit von Strahlenkrebs wieder ab, da dann nichtstochastische Effekte für die Lebensverkürzung entscheidend sind.

Die Form der Dosis/Risiko-Beziehung hängt nicht nur von der absorbierten Strahlenenergie, d.h. von der Energiedosis in dem betrachteten Gewebe, sondern auch von der zeitlichen Verteilung der aufgenommenen Dosis und von der Art bzw. Qualität der Strahlung ab. Letztere wird charakterisiert durch die lokale Dichteverteilung der Ionisationsereignisse in der Spur der geladenen Teilchen. Ionisierende Teilchen mit hoher Ionisationsdichte längs der Teilchenbahn, d.h. hohem linearen Energietransfer (LET), haben bei gleicher Energiedosis im allgemeinen eine höhere biologische Wirksamkeit als locker ionisierende Teilchen, d.h. Teilchen mit niedrigem LET. Zu ersteren gehören zum Beispiel  $\alpha$ -Teilchen, während zu den locker ionisierenden Strahlenarten Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlen sowie Elektronen- bzw.  $\beta$ -Strahlen gehören.

Diesem Sachverhalt wird im Strahlenschutz durch Einführung eines Qualitätsfaktors  $Q$  Rechnung getragen, der für locker ionisierende Strahlen (Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlen,  $\beta$ - und Elektronenstrahlen) auf den Wert 1 und für  $\alpha$ -Teilchen in der Strahlenschutzverordnung auf 10 festgelegt ist<sup>1)</sup>. Das Produkt aus Energiedosis  $D$  (Einheit: 1 rad =  $10^{-2}$  Joule/kg) und Qualitätsfaktor  $Q$  gibt die sogenannte Äquivalentdosis  $H$  (Einheit: 1 rem)

---

<sup>1)</sup> Die International Commission of Radiological Protection (ICRP) empfiehlt neuerdings für  $\alpha$ -Teilchen einen Qualitätsfaktor von 20.

der jeweiligen Strahlenart in dem betrachteten Gewebe an:  
 $h(\text{rem}) = Q \times D(\text{rad}).^1)$

Es sei darauf hingewiesen, daß Radionuklide, die bei Stör- bzw. Unfällen aus Kernkraftwerken freigesetzt werden können, fast ausnahmslos  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen emittieren. Unter diesen Bedingungen ist der Anteil der Strahlenexposition der Bevölkerung durch die  $\alpha$ -Strahlung von Aktiniden sehr gering, so daß die nach dem Dosismodell ermittelten Gesamtwerte der Äquivalentdosis in Körpergeweben der Energiedosis in diesen Geweben entsprechen.

Wie oben erwähnt, hängt auch die Form der Dosis/Risiko-Beziehung von der Art bzw. Qualität der Strahlung ab. Die im folgenden beschriebenen Dosis/Wirkungs-Beziehungen für akute Schäden und für somatische Spätschäden, die bei der Analyse der Unfallfolgen zugrunde gelegt werden, beziehen sich daher in erster Linie auf die Einwirkung locker ionisierender Strahlung bzw. Strahlung mit niedrigem LET.

### 7.3 Somatische Strahlenfrühschäden

#### 7.3.1 Einleitung

Die Einwirkung der Strahlung aus der Luft und vom Boden sowie durch eingeatmete, radioaktive Stoffe auf die Menschen, die von einem Strahlenunfall betroffen sind, kann bei diesen zu unterschiedlichen Erkrankungen führen. Manche dieser Krankheiten setzen bereits innerhalb weniger Stunden nach Bestrahlung ein, andere aber erst Monate und Jahre später. Entscheidend für die Art und den Schweregrad der Erkrankungen ist die Strahlendosis, die die jeweilige Person erhalten hat, die Verteilung der Dosis im Körper und der Zeitraum, über den hin die Dosis akkumuliert wurde. Im folgenden werden die verschiedenen Krankheiten,

---

<sup>1)</sup> Die neuen SI-Einheiten "Gray" bzw. "Sievert" sind 100mal größer als die bisherigen Einheiten "rad" bzw. "rem".



die in diesem Zusammenhang diskutiert werden müssen, ausführlich dargestellt sowie ihre Entstehung (Pathogenese) und ihr voraussichtlicher Verlauf (Prognose) besprochen, um schließlich ein geeignetes Maß für die quantitative Darstellung der Unfallfolgen abzuleiten. Dabei umfaßt dieses Kapitel alle möglichen gesundheitlichen Strahlenfolgen eines Unfalls mit Ausnahme der durch die Strahlung hervorgerufenen Krebserkrankungen und Erbschäden (Abschnitt 7.4 und 7.5).

### 7.3.2 Erfahrungen mit akuten und chronischen Erkrankungen nach Bestrahlung

#### 7.3.2.1 Allgemeines

Über die Folgen einer Bestrahlung der Bevölkerung mit den bei Unfällen möglichen Strahlendosen lassen sich aus ärztlichen Beobachtungen an einer Vielzahl von Personengruppen wichtige Erkenntnisse gewinnen. Strahlenbiologische Tierexperimente ergänzen diese dort, wo eine unmittelbare Analyse der Unfallfolgen aus klinischen Erfahrungen nicht möglich erscheint oder unsicher ist. Bezüglich der nicht karzinogenen akuten und chronischen Strahlenfolgen reagieren nämlich verschiedene Tierarten wesentlich gleichartiger als bezüglich der karzinogenen Strahlenfolgen. Bevor die einzelnen Personengruppen, deren Bestrahlungsfolgen analysiert werden sollen, im einzelnen beschrieben werden, sollen zunächst die möglichen Expositionsbedingungen zusammenfassend erläutert werden, um die Kriterien für die Auswahl der klinischen Befunde darzustellen.

#### 7.3.2.2 Expositionsbedingungen

Als Folge eines der in Tabelle F8, 3-2 beschriebenen Unfälle in einem Kernkraftwerk kann es zu verschiedenartigen Strahlenexpositionen kommen:

- Gammastrahlung aus der Aktivitätsfahne

Aus der mit den verschiedenen radioaktiven Stoffen beladenen Aktivitätsfahne, die sich in der Atmosphäre ausbreitet, kommt es zur Bestrahlung mit Betateilchen und Gammastrahlen. Die Betateilchen haben nur eine sehr begrenzte Eindringtiefe und belasten im wesentlichen die Haut, wobei nur Strahlendosen weit unterhalb der Schwellendosis für die Auslösung von Hautschäden auftreten können. Diese Strahlendosen bleiben deshalb unberücksichtigt. Die Gammastrahlung aus der Aktivitätsfahne führt zu einer praktisch gleichmäßigen Strahlenbelastung aller Organe des Körpers. Die maximale Strahlenbelastung einzelner Personen im Freien an ungünstigen Stellen kann mehrere hundert rad erreichen. Diese Dosis wird während des nur wenige Stunden dauernden Durchzugs der Aktivitätsfahne aufgenommen.

- Gammastrahlung vom Boden

Von den am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffen wird nur die Gammastrahlung wirksam. Auch sie führt zu einer praktisch gleichmäßigen Strahlenbelastung aller Organe der betroffenen Menschen. Die Höhe der Strahlenexposition hängt entscheidend von der Aufenthaltsdauer in den entsprechenden Strahlungsfeldern ab und wird somit vor allem von der Effektivität der Gegenmaßnahmen (Kapitel 6) beeinflusst. Die Gammastrahlung vom Boden ist der für die gesamte Strahlenbelastung der betroffenen Bevölkerung schließlich entscheidende Faktor. Außerhalb eines Abstandes von 25 km können nur unter ganz besonderen Wetterbedingungen Strahlendosen von über 100 rad am ersten Tag vorkommen, im näheren Umkreis können in den ersten 24 Stunden Strahlendosen von über 1000 rad erreicht werden.

- Interne Strahlenbelastung

Zusätzlich zu der Bestrahlung von außen, d.h. aus der Aktivitätsfahne und aus den Ablagerungen am Boden (externe Strahlenbelastung) führt das Einatmen mit radioaktiven Gasen und Stäuben kontaminierter Luft zur Bestrahlung der betroffenen Menschen von innen (interne Strahlenbelastung). Die dadurch bedingte Strahlenbelastung hängt vor allem von den in der Atem-

luft enthaltenen Radionukliden ab. Zunächst wird die Lunge bestrahlt, da sie das Aufnahmeorgan ist. Ins Blut aufgenommene Stoffe werden entsprechend ihrem Verhalten im Stoffwechsel in die verschiedenen Organe verteilt. Dabei kommt es vor allem zu einer selektiven Anreicherung und Strahlenbelastung der Schilddrüse durch Radiojod. Nicht bis zu den Lungenbläschen gelangende radioaktive Aerosole werden durch die Flimmerhärchen der Bronchialschleimhaut in die Speiseröhre transportiert und führen somit zu einer Strahlenbelastung des Magens und des Darms. Als Folge der verschiedenen Unfälle kann es zusätzlich zur externen Strahlenbelastung noch zu einer etwa fünfmal höheren internen Strahlenbelastung der Lunge, zu einer Bestrahlung des Dickdarms mit gleicher Dosis sowie zur etwa fünfzigfachen Schilddrüsenbelastung kommen. Diese Strahlenexpositionen dauern auch dann noch an, wenn die betroffene Person sich nicht mehr im gefährdeten Bereich befindet, und klingen unterschiedlich schnell ab. Die angegebenen Dosen sind deshalb die über die gesamte Abklingzeit akkumulierten zusätzlichen Strahlendosen der genannten 3 Organe. Andere Organe, die ebenfalls durch inkorporierte radioaktive Stoffe zusätzliche Strahlendosen erhalten, spielen für die Entstehung akuter oder chronischer Strahlenfolgen bei einem Kernkraftwerksunfall keine Rolle. Sie können jedoch für die Krebsgefährdung der betroffenen Bevölkerung bedeutsam sein und werden deshalb berechnet und in ihrer krebsauslösenden Wirksamkeit bewertet.

Entsprechend den aufgeführten Expositionsbedingungen sind Erfahrungen an folgenden Personengruppen für die Bewertung der Strahlenexposition durch die genannten Unfälle entscheidend:

- Personen, die einer praktisch gleichmäßigen Bestrahlung des ganzen Körpers mit Strahlendosen über 100 rad ausgesetzt waren;
- Personen, deren Lunge einer Strahlenexposition bis zu mehreren tausend rad ausgesetzt war;
- Personen, deren Darm einer Strahlenexposition bis zu mehreren tausend rad ausgesetzt war;
- Personen, deren Schilddrüse Strahlenexpositionen über 10 000 rad ausgesetzt war.

- 2.2.3 Personengruppen, die einer praktisch gleichmäßigen Bestrahlung des ganzen Körpers mit Strahlendosen über 100 rad ausgesetzt waren

- Erfahrungen im Zusammenhang mit den Atombombenabwürfen in Japan und Testexplosionen

Das verheerende Ausmaß der kombinierten Wirkung von Strahlung, Hitze und Druckwelle einer Atombombe wurde in Hiroshima und Nagasaki 1945 deutlich. Es liegen erschütternde Berichte über die akuten Strahlenfolgen, wie insbesondere auch über die schrecklichen Wirkungen der Kombination von Strahlung und Verbrennung vor /F8, 7-1/. Die Zahl der unmittelbaren Opfer in beiden Städten wird auf weit über 100 000 geschätzt. Bei der Mehrzahl von ihnen war die Strahlenbelastung nicht die entscheidende tödliche Einwirkung, sondern nur komplizierender Faktor eines Kombinationsschadens. Eingehende Darstellungen der Krankheitsverläufe bei den Atombombenopfern finden sich bei /F8, 7-2 und -3/. Bei Testexplosionen im Pazifik kam es auch zu unvorhergesehenen beträchtlichen Strahlenbelastungen und Kontaminationen bei eingeborenen Inselbewohnern und japanischen Fischern /F8, 7-3/.

Die Expositionsbedingungen der Atombombenopfer sind wesentlich anders als bei einem Kernkraftwerksunfall. Zunächst ist bei Kernkraftwerksunfällen ausschließlich mit einer Strahlenexposition der Bevölkerung zu rechnen, nicht jedoch mit Verbrennungen und Verletzungen. In Hiroshima und Nagasaki gelangte der Hauptteil der gesamten Strahlenbelastung als Blitz in wenigen Sekunden zur Einwirkung, jedoch nur ein geringer Teil durch die Bodenstrahlung des "fallout" in den folgenden Stunden und Tagen. Darüber hinaus bestand in Hiroshima ein beträchtlicher Anteil der gesamten Strahlenbelastung aus Neutronen, die bei Strahlenunfällen nicht vorkommen. Die Folgen wurden noch verschlimmert durch den schlechten allgemeinen Gesundheitszustand der Bevölkerung zum Zeitpunkt des Atombombenabwurfs und durch den Mangel an wirksamer ärztlicher Betreuung. All diese Faktoren hatten einen großen Einfluß auf den Schweregrad und den

Verlauf der Strahlenkrankheiten. Eine Zuordnung bestimmter Strahlendosen zu den verschiedenen Krankheitsverläufen unter den frühen Opfern von Hiroshima und Nagasaki ist nicht möglich. Anhand der Beobachtungen konnte nur eine grobe Abschätzung der mittleren tödlichen Strahlendosis (LD-50) durchgeführt werden /F8, 7-4/. Weitergehende quantitative Aussagen erlauben die Berichte aus Hiroshima und Nagasaki jedoch nicht.

- Unfälle in Forschungslaboratorien und bei der Anwendung von Strahlen in der Technik

Bei der Entwicklung kerntechnischer Verfahren und in der Grundlagenforschung, aber auch in der Anwendung von Strahlenquellen in der Technik ist es seit 1945 zu einer Reihe von Unfällen gekommen, bei denen über 100 Personen Strahlendosen über 25 rad erhalten haben, von denen 13 gestorben sind /F8, 7-5/. Der klinische Verlauf der Strahlenkrankheiten dieser Unfallopfer ist in der Regel sehr gut dokumentiert. Darauf basieren im wesentlichen unsere Kenntnisse der Pathogenese, des klinischen Ablaufs, der möglichen Diagnose- und Therapieverfahren und der Prognose einer Ganzkörperbestrahlung mit hohen Dosen. Die Zahl der hier Betroffenen ist aber zu klein, um quantitative Aussagen über die Abhängigkeit der Prognose von der Strahlendosis zu machen (Abschnitt 7.3.3).

- Patienten, die zur Behandlung ihrer Krankheit eine Ganzkörperbestrahlung erhalten haben

Eine große Zahl von Patienten, die an generalisiert metastasierten, sehr strahlenempfindlichen bösartigen Geschwülsten erkrankt waren, wurden in den vergangenen Jahrzehnten mit einer Bestrahlung des ganzen Körpers behandelt. Naturgemäß betraf diese Bestrahlung nur eine sehr ungünstige Auswahl von Menschen, in der Regel solche, bei denen andere risikolose Behandlungsverfahren keine Aussicht auf Besserung versprochen. Auch heute wird bei bestimmten bösartigen Erkrankungen des Lymphsy-

stems diese Behandlung mit Erfolg durchgeführt /F8, 7-6/. Die verwendeten Strahlendosen schwankten über einen großen Bereich (von 50 bis 300 rad), desgleichen die zeitliche Verteilung der Dosis. Bei der Analyse der Bestrahlungsfolgen ist es oft nicht möglich, die Strahlenfolgen von den spezifischen Symptomen der behandelten Krankheit sicher abzugrenzen. Dennoch erlauben diese Patienten besser als alle anderen Personengruppen eine quantitative Untersuchung der Abhängigkeit der Prognose von der Strahlendosis (Abschnitt 7.3.3).

In diesem Zusammenhang ist eine neuere Entwicklung der Ganzkörperstrahlentherapie zu erwähnen. Seit 1970 werden zunehmend Kinder und Erwachsene, die an akuter Leukämie in aussichtslosen Stadien leiden, nach intensiver Chemotherapie einer Ganzkörperbestrahlung von 700 - 1200 rad, verteilt über 1 bis 8 Stunden, ausgesetzt und am folgenden Tag einer Knochenmarktransplantation unterzogen /F8, 7-7 und -8/. Insgesamt sind weltweit inzwischen über 200 Personen auf diese Weise behandelt worden. Die Therapieerfolge sind derzeit nur schwer abschätzbar, sie liegen sicher weit unter 50 %. Todesursache bei den bisher Verstorbenen war praktisch nie die akute Strahlenkrankheit, meist jedoch die wiederkehrende Leukämie (Rezidiv).

Durch die Betrachtung der Krankheitsverläufe dieser gleichmäßig am ganzen Körper bestrahlten Menschen kann man den Ablauf der typischen Strahlenkrankheit bei den unterschiedlichen Expositionsbedingungen (in erster Linie also bei verschiedenen Dosen) beschreiben (Abschnitt 7.3.3.1 bis 7.3.3.3).

#### 7.3.2.4 Personen, deren Lunge einer Strahlenbelastung ausgesetzt war

##### ● Vorsorgliche Lungenbestrahlungen bei der Krebstherapie

Eine Reihe von bösartigen Tumoren führt sehr häufig oder regelmäßig zu Metastasen in der Lunge. Eine Strahlenbehandlung einmal manifester Lungenmetastasen, die über die ganze Lunge ver-

teilt sind, erfordert hohe Strahlendosen, die zu schweren, tödlich verlaufenden Lungenerkrankungen führen. Dagegen bestehen Aussichten, durch eine vorsorgliche (prophylaktische) Bestrahlung der Lunge im Anschluß an die Behandlung des Primärtumors bei verschiedenen Tumoren (z.B. Hodentumoren und Knochensarkomen) mit Strahlendosen, die nur selten zu solchen Veränderungen in der Lunge führen, die Entwicklung von Lungenmetastasen zu verhindern /F8, 7-9 und -10/. Aus diesem Grunde sind die akuten und chronischen Strahlenfolgen bei Bestrahlung der ganzen Lunge von außen mit unterschiedlichen Dosen und bei unterschiedlicher Fraktionierung dem Strahlentherapeuten gut bekannt.

- Ablagerung radioaktiver Stäube in den Bronchien

Die akuten und chronischen Strahlenfolgen in der Lunge durch die Ablagerung radioaktiver Stäube in den Bronchien sind beim Menschen bislang nicht untersucht worden. Sie müssen daher anhand vergleichender Tierexperimente mit externer und interner Strahlenexposition aus den erwähnten klinischen Befunden extrapoliert werden.

#### 7.3.2.5 Personen, deren Darm einer Strahlenbelastung ausgesetzt war

- Bestrahlung des Bauches

Bei der Behandlung verschiedener bösartiger Tumoren ist nicht selten eine Bestrahlung des gesamten Bauches mit Strahlendosen über 1000 rad erforderlich. Neben der Schädigung der Nieren sind dabei die akuten und chronischen Veränderungen im Darm besonders kritisch /F8, 7-11/. In der strahlentherapeutischen Literatur ist deshalb die Dosisabhängigkeit dieser unter Umständen gefährlichen Strahlenfolge bei den verschiedenen Expositionsbedingungen für Bestrahlung von außen ausreichend dokumentiert /F8, 7-12/.

● Kontamination des Darminhalts

Die akuten und chronischen Strahlenfolgen des Darms (wegen der dort langsameren Passage des Darminhalts, besonders des Dickdarms) durch Kontamination des Darminhalts sind beim Menschen bisher nicht beobachtet worden. Sie müssen daher anhand vergleichender Tierexperimente mit externer und interner Strahlenexposition aus den erwähnten klinischen Befunden extrapoliert werden.

7.3.2.6 Personen, deren Schilddrüse einer Strahlenbelastung ausgesetzt war

Radioaktive Jodisotope, vor allem Jod-131, werden seit über 30 Jahren bei der Untersuchung und Behandlung verschiedener Erkrankungen der Schilddrüse in großem Umfang weltweit eingesetzt. Die dabei auftretenden Strahlendosen liegen im gleichen Bereich wie die bei Kernkraftwerksunfällen möglicherweise erreichbaren Strahlenbelastungen der Schilddrüse. Die akuten und chronischen Strahlenfolgen der Schilddrüse sind daher bekannt.

7.3.3 Verlauf der Erkrankungen nach Bestrahlung

7.3.3.1 Allgemeines

Im folgenden werden die Krankheiten und Krankheitsfolgen, wie sie sich aus der Analyse der im Abschnitt 7.3.2 aufgeführten Personengruppen ergeben, eingehend dargestellt.



### 7.3.3.2 Verlauf der Strahlenkrankheit bei Bestrahlung mit einer Dosis von ca. 100 rad (kurzfristig oder über 24 Stunden akkumuliert)

Bei einigen betroffenen Personen, die Strahlendosen um 100 rad absorbiert haben, tritt innerhalb weniger Stunden ein Gefühl des Unwohlseins auf, das treffend als "Strahlenkater" bezeichnet wird und am folgenden Tag in der Regel abgeklungen ist. In den nächsten Tagen und Wochen ist bei der Mehrzahl der Betroffenen kein weiteres Symptom der akuten Strahlenkrankheit zu bemerken. Es muß aber damit gerechnet werden, daß sich chronische bakterielle Infektionen, an denen einige Patienten - unabhängig von der Strahlenexposition - leiden, verschlimmern können und unter Umständen eine intensivere Behandlung erforderlich machen. Bei Strahlendosen, die noch unter 100 rad liegen, ist nur in Einzelfällen mit subjektiven Beschwerden am Tag der Strahlenexposition zu rechnen, weitere akute Krankheitserscheinungen sind in der Folge nicht zu erwarten.

Bei den klinischen Untersuchungen von Personen, die mit ca. 100 rad bestrahlt wurden, sind keine auffallenden Befunde zu erheben. Eine einfache Analyse des Blutbildes zeigt jedoch in der Regel schon am Tage nach der Strahlenexposition eine Abnahme der Zahl der Lymphozyten im Blut auf Werte um oder über 1500 pro  $\text{mm}^3$ . Die Untersuchung der Lymphozytenzahl im Blut ist neben der ärztlichen Befragung über den Zustand des Betroffenen der beste Indikator der Höhe der Strahlenexposition und erlaubt eine Aussage über die Genesungsaussichten des einzelnen. Dosisabschätzungen sind in solchen Situationen naturgemäß unsicher und deshalb in der Regel von geringem Wert für sofortige Entscheidungen. Eine Bestimmung der vom ganzen Körper absorbierten Dosis ist durch eine Chromosomenanalyse möglich, ihr Ergebnis, das wegen der aufwendigen Untersuchungsmethode erst nach einer längeren Zeitspanne vorliegt, hat auf die zu ergreifenden ärztlichen Maßnahmen in der Regel keinen Einfluß /F8, 7-13/. Ansonsten gesunde Personen, die eine Strahlendosis von ca. 100 rad erhalten haben bzw. bei denen die Zahl der Lymphozyten in den ersten zwei Tagen nicht unter 1500 pro  $\text{mm}^3$

abgesunken ist und die am Tag des Unfalls keine schweren "Kater"-Symptome gezeigt haben, können ohne Bedenken aus der ärztlichen Überwachung entlassen werden. Es besteht keine Gefahr, daß bei ihnen in der Folgezeit kritische akute Krankheitssymptome auftreten. Personen, die zum Zeitpunkt des Unfalls an chronischen Infektionen oder an Störungen der Blutgerinnung leiden, stehen allerdings 3 bis 5 Wochen nach dem Unfall unter einer erhöhten Gefahr der Verschlimmerung dieser Leiden und bedürfen dann gegebenenfalls allgemeinärztlicher Behandlung.

Die einzigen Folgen, die bei Strahlendosen um 100 rad - abgesehen von den genetischen und kanzerogenen Spätfolgen - zu beachten sind, betreffen die Gonaden. Bei Männern kann es zu einer vorübergehenden Verminderung der Zahl der Spermien und damit zur Verminderung der Zeugungsfähigkeit kommen. Die Normalwerte sind in der Regel nach 6 Monaten wieder erreicht. Auch bei Frauen können unter Umständen vorübergehende Zyklusstörungen auftreten.

Wenn eine Frau in den ersten Monaten der Schwangerschaft mit einer Strahlendosis um 100 rad bestrahlt wird, muß mit einem erhöhten Mißbildungsrisiko für das Kind gerechnet werden. Die Entscheidung über eine Schwangerschaftsunterbrechung muß für jeden Einzelfall gesondert unter Berücksichtigung aller in Frage kommenden Aspekte getroffen werden.

#### 7.3.3.3 Verlauf der Strahlenkrankheit nach Bestrahlung mit einer Dosis von 200 bis 500 rad (kurzfristig oder über 24 Stunden akkumuliert)

Die Mehrzahl der Betroffenen fühlt sich in den ersten 24 Stunden nach dem Unfall unwohl, bei einigen geht die Übelkeit und der "Kater" bis zum Erbrechen. In den folgenden Tagen bestehen in der Regel keine Krankheitssymptome mehr. Erst zwei bis drei Wochen später entsteht eine Krankheit, die als "Strahlenkrankheit" bekannt ist. Sie beruht vornehmlich auf einer ausgeprägten Störung der Blutbildung und unterscheidet sich nicht von

den Krankheiten, die durch Blutbildungsstörungen anderer Beweggründe (vor allem als Folge einer zytostatischen Therapie von Leukämien und Krebs) verursacht werden. Die wichtigsten klinischen Zeichen sind Fieber, Infektionen, die häufig in der Mundschleimhaut als Geschwüre beginnen, außerdem verbreitet feine oberflächliche Blutungsherde, die aber auch die Magen- und Darmschleimhaut befallen und dort zu größeren Blutverlusten führen können. Ohne ärztliche Versorgung und angemessene Behandlung kann diese Krankheit schwer verlaufen und bei einem Teil der Patienten zum Tode führen. Personen, die schon vor dem Unfall an chronischen Infektionen oder Blutgerinnungsstörungen gelitten haben oder bei denen eine Operation in den Wochen der schwersten Phase der Strahlenkrankheit notwendig wird (z.B. wegen akuter Appendizitis) oder bei denen größere Verletzungen oder Verbrennungen vorliegen, sind durch die akute Strahlenkrankheit besonders gefährdet. Bei diesen ist die Prognose deutlich schlechter.

Bei der ärztlichen Untersuchung fällt in den ersten 8 Tagen nach dem Unfallgeschehen keine besondere Symptomatik auf. Eine einfache Blutuntersuchung in den ersten Tagen zeigt aber bereits deutlich die Strahlenschädigung der Blutbildung. Die Zahl der Lymphozyten ist auf Werte um  $1000 \text{ pro mm}^3$  abgesunken. Retikulozyten verschwinden nach einigen Tagen fast vollständig. Die Zahl der Granulozyten nimmt erst in der zweiten Wochenhälfte steil ab, erholt sich in der zweiten Woche, um dann erst auf kritische Werte unter  $2000 \text{ pro mm}^3$  abzusinken, die die Hauptursache für die große Infektionsneigung sind. Die Krise liegt etwa am Ende der 4. Woche, danach erst erholt sich die Zahl der weißen Blutkörperchen im Verlauf der folgenden Wochen. Die Zahl der Blutplättchen nimmt langsamer ab, erreicht nach 3 bis 4 Wochen kritische Werte (unter  $100\,000 \text{ pro mm}^3$ ) und erholt sich gleichzeitig mit den weißen Blutkörperchen. Wenn auch am Krankheitsgeschehen der ganze Körper beteiligt ist, kann die Krankheit doch weitgehend als Folge der beschriebenen Veränderung in der zellulären Zusammensetzung des Blutes angesehen werden. Aus diesem Grunde treten auch in den ersten zwei Wochen keine gravierenden Krankheitszeichen auf. Während dieser Zeit

ist keine spezifische Behandlung dieser Personen erforderlich /F8, 7-13/. Gegebenenfalls kommt jedoch eine vorsorgliche Behandlung von Risikofaktoren in Betracht.

Nach Überstehen der akuten Phase der Strahlenkrankheit (etwa nach 6 Wochen) erholt sich das Blutbild und mit ihm der ganze Organismus langsam im Verlauf der folgenden Wochen. In der Regel sind Personen, die mit einer Strahlendosis von 200 bis 500 rad bestrahlt worden waren, 3 Monate nach der Strahlenexposition wieder gesund. Bis auf das bleibende, erhöhte Krebsrisiko (Abschnitt 7.4) und die Störungen der Gonadenfunktion (siehe unten) sind keine dauerhaften Schäden mehr nachzuweisen, sofern keine zusätzliche Bestrahlung von Lunge, Schilddrüse oder Darm mit hohen Dosen stattgefunden hat (Abschnitt 7.3.3.5 bis 7.3.3.7). In Einzelfällen kann insbesondere die Erholung der mit dem lymphatischen System verbundenen Abwehrkräfte gegen Infektionen längere Zeit benötigen. Eine weitere ärztliche Versorgung oder Überwachung ist jedoch nur bei den Personen notwendig, die an zusätzlichen komplizierten Erkrankungen leiden.

Bei den meisten Personen, die mit einer Ganzkörperdosis von 200 bis 500 rad belastet worden sind, bestehen auch nach der Erholung des Blutbildes und sonstiger Symptome der Strahlenkrankheit noch Störungen der Gonadenfunktion, d.h. Zyklusstörungen und Verminderung der Spermienzahl. Bei der Mehrzahl der Betroffenen wird sich jedoch im Verlauf der folgenden Monate eine Normalisierung einstellen. Bei Männern ist mit hormonellen Folgen der Gonadenschädigung nicht zu rechnen, bei einer kleineren Zahl von Frauen - vor allem fortgeschrittenen Alters - ist ein verfrühtes Einsetzen der Wechseljahre (Menopause) zu erwarten. Bei betroffenen Kindern sind keine gravierenden Störungen der sexuellen und sonstigen körperlichen und geistigen Entwicklung zu befürchten.

Bei schwangeren Frauen, die mit einer Ganzkörperdosis von 200 bis 500 rad bestrahlt worden sind, wird man in der Regel frühzeitig eine Schwangerschaftsunterbrechung in Betracht ziehen müssen, da diese unter Umständen für die Mutter lebensrettend

sein kann. Bei Embryonen und Feten aller Entwicklungsstadien besteht ein beträchtliches Mißbildungsrisiko, das allein die Schwangerschaftsunterbrechung rechtfertigen würde. Darüber hinaus kommt bei Strahlendosen dieser Höhe zusätzlich eine mütterliche Indikation hinzu, da mit dem Absterben der Frucht gerechnet werden muß: Das zeitliche Zusammentreffen des Fruchtbodens (der häufig, vor allem bei fortgeschrittener Schwangerschaft, mit Blutgerinnungsstörungen einhergeht) mit der akuten Phase der Strahlenkrankheit zwischen dritter und sechster Woche kann zur akuten Lebensgefahr für die Mutter führen. Die Erfahrungen mit den Unfallopfern in Algerien von 1978 zeigen jedoch, daß bei angemessener Therapie auch sehr hohe Strahlendosen von Schwangeren überlebt werden können. Eine der mit Ganzkörperdosen von über 1000 rad bestrahlten Frauen befand sich in der Frühschwangerschaft (4. Woche), der Embryo starb ab und wurde 5 Wochen später komplikationslos abgestoßen; ein Jahr später wurde die Frau wieder schwanger /F8, 7-5/. Dagegen bestehen gegenüber einem operativen Eingriff in der ersten Woche nach der Strahlenexposition keine schwerwiegenden Bedenken.

#### 7.3.3.4 Verlauf der Strahlenkrankheit bei Personen, die mit einer Ganzkörperdosis über 500 rad bestrahlt worden sind

Bei praktisch allen betroffenen Personen kommt es innerhalb von wenigen Stunden zu einem ausgeprägten "Strahlenkater". Die Mehrzahl der betroffenen Personen erbricht und bekommt Durchfall. Anders als bei den mit ca. 300 rad bestrahlten Personen tritt nach 24 bis 48 Stunden nur eine geringe Besserung des Zustandes ein. Personen, die mit Strahlendosen über 500 rad bestrahlt wurden, zeigen auch dem medizinischen Laien deutlich an, daß sie schwer, ja lebensbedrohlich krank sind. Für diese Patienten ist eine schnelle Einweisung in ein geeignetes Krankenhaus überlebensnotwendig. Hauptursache des schweren Krankheitszustandes ist der akute Flüssigkeits- und Salzverlust wegen Durchfall in den ersten Tagen und das sich nach dem 4. Tag

rapide verschlechternde Blutbild. Neben dem klinischen Allgemeinzustand, der so bedrohlich ist, daß in der Regel sofort ärztliche Maßnahmen eingeleitet werden müssen, ist es vor allem das Blutbild in den ersten Tagen nach der Strahlenexposition, das eine Aussage über die Höhe der Strahlenexposition und über die Prognose erlaubt. Die Lymphozyten verschwinden fast völlig aus dem peripheren Blut innerhalb von 1 bis 2 Tagen, nach 4 bis 5 Tagen nimmt die Zahl der Granulozyten und nach 7 bis 10 Tagen die der Thrombozyten rapide auf lebensbedrohlich niedrige Werte ab.

Auch beim Einsatz intensiver ärztlicher Behandlung mit modernen klinischen Verfahren werden nicht alle betroffenen Personen zu retten sein. Wie schon im Abschnitt 7.3.3.3 aufgeführt, besteht eine besonders schlechte Prognose für solche Personen, die bereits krank waren. Die kritische Phase wird etwa in der Zeit der 3. Woche nach der Strahlenexposition erreicht.

Personen, die dank intensiver Therapie die akute Phase der schweren Strahlenkrankheit überleben, haben eine gute Chance auf praktisch vollständige Wiederherstellung ihrer Gesundheit, auch wenn sich die Genesung über mehrere Monate hinziehen und eine gewisse Abwehrschwäche gegenüber Infektionen unter Umständen noch längere Zeit bestehen kann. Darüber hinaus muß natürlich mit einer deutlichen Erhöhung des Krebsrisikos (Abschnitt 7.4) gerechnet werden. Bei der Mehrzahl der Frauen wird es zu schweren Zyklusstörungen und nach einigen Monaten zum vorzeitigen Eintritt der Wechseljahre kommen. Bei den meisten jungen Mädchen wird die Regel verzögert einsetzen, bei einigen gar nicht. Die meisten Männer werden ihre Zeugungsfähigkeit auf Dauer verlieren, mit hormonellen Ausfallerscheinungen braucht dagegen (im Gegensatz zu bestrahlten Frauen) nicht gerechnet zu werden. Schwangere, die solchen Strahlendosen ausgesetzt waren, sind aufs höchste gefährdet; das Kind dürfte in den seltensten Fällen zu retten sein.

### 7.3.3.5 Verlauf der Erkrankung von Personen, deren Lungen mit einer Dosis über 2000 rad über einige Wochen verteilt bestrahlt wurden

Nach Bestrahlung der Lungen mit einer Dosis von über 600 rad (innerhalb 1 Stunde gegeben) entwickelt sich langsam, praktisch nie vor Ablauf von 6 Wochen nach Bestrahlungsbeginn, eine typische Strahlenreaktion /F8, 7-14/. Bei einer Fraktionierung oder Protrahierung der Bestrahlung über mehrere Wochen hin, wie sie durch die inhalierte Aktivität bei einem Unfall auftreten würde, steigt die tolerierte Strahlendosis steil an. Strahlentherapeutische Erfahrungen zeigen, daß die Verteilung einer Dosis von 2000 rad auf 2 Wochen keine bedrohlichen Gesundheitsschäden zur Folge hat /F8, 7-9 und -10/. Es kann also praktisch nicht zum gleichzeitigen Auftreten der akuten Phase der Strahlenkrankheit (als Folge der Ganzkörperdosis, die nach 4 Wochen ihre Krise erreicht hat) und der eventuell nach mehr als 6 Wochen auftretenden "Pneumonitis" kommen, wie die typische akute Phase der Bestrahlungsreaktion der Lunge genannt wird, so daß sich beide Strahlenfolgen nicht gegenseitig verstärken und erschweren können.

Die Strahlenpneumonitis ist einer interstitiellen Pneumonie (einer besonderen Form einer Lungenentzündung) in ihrer klinischen Erscheinung vergleichbar. Deren wesentliche Symptome sind Atemnot, Fieber und trockener Husten. In schweren Fällen kann diese Strahlenpneumonitis tödlich sein, in der Regel klingt sie jedoch nach einigen Wochen ab und geht in das chronische Stadium einer Lungenfibrose über, die Ähnlichkeiten mit einer Staublung hat. Das Ausmaß der damit verbundenen Beschwerden ist sehr unterschiedlich, sie betreffen neben der Lunge mit den Folgen der Atemnot vor allem auch das Herz. Je niedriger die Strahlendosis, desto schwächer sind die Folgen an der Lunge ausgeprägt. Bei akuter, innerhalb von wenigen Minuten gegebener Bestrahlung steigt das Risiko einer lebensbedrohenden Strahlenpneumonitis von praktisch 0 bei Dosen unter 600 rad auf 35 % bei etwa 800 rad und auf über 80 % bei über 1000 rad /F8, 7-14/. Bei fraktionierten Strahlendosen unter 2000 rad in 2 Wochen treten Beschwerden von seiten der Lunge nicht auf /F8, 7-10/.

Da sich die Strahlenbelastung der Lungen durch eingeatmete radioaktive Staubteilchen über einen Zeitraum von vielen Monaten erstreckt, sind die Dosiswerte der Strahlentherapeuten nicht ohne weiteres auf den speziellen Fall der protrahierten internen Strahlenbelastung übertragbar. Erfahrungen über die akute und subakute Wirkung inhalierter Radionuklide auf die menschliche Lunge liegen nicht vor, aber entsprechende Tierexperimente lassen erkennen, daß bei einer über Wochen akkumulierten internen Strahlenbelastung der Lunge mit einer Gesamtdosis unter 3000 rad nur in wenigen Fällen mit dem Auftreten einer Strahlenpneumonitis zu rechnen ist, die in der Regel ohne gravierende Folgen abheilt /F8, 7-15/. Erst bei höheren Dosen ist mit schwereren Verläufen und vereinzelt Todesfällen zu rechnen. Solche Strahlendosen sind jedoch nur unter Expositionsbedingungen vorstellbar, die zu so erheblichen Ganzkörperbelastungen führen, daß deren klinischer Ablauf dem der in Abschnitt 7.3.3.4 beschriebenen Personen entspricht. Bei einigen dieser Personen muß also in der Rekonvaleszenzphase mit dem Auftreten einer Strahlenpneumonitis gerechnet werden, die in Einzelfällen ein Problem werden kann, unter Umständen auch tödlich verläuft, meist aber mit mehr oder weniger ausgeprägten Folgeerscheinungen einer Lungenfibrose abklingt.

Da also die Strahlenpneumonitis keinen wesentlichen Einfluß auf das akute Gesamtschadensrisiko hat, wird sie im folgenden nicht weiter behandelt.

#### 7.3.3.6 Verlauf der Erkrankung bei Personen, deren Darm mit einer über einige Tage verteilten Dosis von über 1000 rad bestrahlt wurde

Bei keinem der Kinder, die mit Ganzkörperdosen um 1000 rad bestrahlt worden waren (Abschnitt 7.3.2.3), traten, abgesehen von den den Darm betreffenden Symptomen des Strahlenkaters und gelegentlichem leichtem Durchfall, die von den Strahlentherapeuten gefürchteten akuten und chronischen Strahlenfolgen an Dünn- und Dickdarm auf /F8, 7-12/. Diese wurden nur nach noch höheren



Strahlendosen beobachtet. Nach einer über mehrere Tage verteilten Strahlendosis auf den Darm, z.B. durch radioaktiv kontaminierten Darminhalt, von etwa 1500 rad kann es innerhalb von wenigen Tagen zu schwerem Durchfall kommen, der den in Abschnitt 7.3.3.4 beschriebenen Darmerkrankungen gleicht und eine intensive ärztliche Behandlung erfordert. Nach Abklingen der akuten Krankheiterscheinungen kann es nach noch höheren Dosen im Verlauf der nächsten Jahre zu chronischen Darmbeschwerden kommen, die von wiederkehrendem Durchfall oder Verstopfung über Resorptionsstörungen (Malabsorptions-Syndrom) und chronische Geschwüre bis zum Darmverschluss (Ileus) und Durchbruch (Perforation) mit Bauchfellentzündung (Peritonitis) reicht /F8, 7-11/. Bei einem Kernkraftwerksunfall sind isolierte Strahlenbelastungen des Darms mit so hohen Dosen, daß sie zu den erwähnten Folgen führen könnten, nicht vorstellbar. Bei der weiteren Betrachtung der Unfallfolgen können aus diesem Grund die Folgen am Darm vernachlässigt werden, da sie unter keinen Umständen die kritische Strahlenfolge sind.

#### 7.3.3.7 Verlauf der Erkrankungen bei Personen, deren Schilddrüse durch aufgenommenes Radiojod zusätzlich bestrahlt wurde

Bei Kernkraftwerksunfällen mit Aktivitätsfreisetzung können beträchtliche Aktivitäten an Radiojod freigesetzt werden, die mit der Luft fortgetragen und von den betroffenen Menschen eingeatmet werden. Mit den Nahrungsmitteln aufgenommene Jodaktivitäten können dagegen in diesem Zusammenhang unberücksichtigt bleiben. Das eingeatmete Radiojod wird innerhalb weniger Stunden zum großen Teil in der Schilddrüse gespeichert. Die dabei aufgenommenen Aktivitäten können in der gleichen Größenordnung liegen wie bei Personen, die wegen einer Schilddrüsenerkrankung (vor allem wegen einer Schilddrüsenüberfunktion) mit Radiojod behandelt werden. Der Verlauf der möglichen Funktionsstörungen der Schilddrüse ist somit der gleiche wie nach Behandlung von Patienten mit Schilddrüsenüberfunktion.

Als erstes Zeichen der Aufnahme sehr hoher Radiojodaktivitäten in der Schilddrüse kann es nach wenigen Tagen bei einigen Patienten zu akuter Schilddrüsenentzündung mit Halsschmerzen kommen, die in der Regel mit einfachen Behandlungsmethoden und "Hausmitteln" gut zu lindern ist. Weitere akute Beschwerden seitens der Schilddrüse sind bei der überwiegenden Zahl der Betroffenen nicht zu befürchten. Bei solchen Menschen, die an einer schweren Form der Basedowschen Erkrankung leiden, kann es zu einer Verschlimmerung kommen, die unter Umständen lebensbedrohliche Ausmaße annehmen kann (Basedowkrise). Sie ist jedoch auf Patienten mit einer schweren Vorerkrankung beschränkt und auch dann so selten, daß es unwahrscheinlich ist, daß in der Folge eines Strahlenunfalls ein solcher Fall auftritt. Er wäre darüber hinaus in jedem Fall mit den Folgen einer sehr hohen Ganzkörperdosis (Abschnitt 7.3.3.4) kombiniert.

Während also akute Schilddrüsenenerkrankungen nach Aufnahme von Radiojod kaum auftreten dürften, muß nach den Erfahrungen mit der Radiojodbehandlung von Schilddrüsenenerkrankungen nach einiger Zeit mit chronischer Schilddrüsenunterfunktion gerechnet werden /F8, 7-16/.

Ungefähr 1 % der Bevölkerung leidet an Schilddrüsenunterfunktion und muß deshalb behandelt werden. Nach einer Strahlenbelastung der Schilddrüse durch Radiojod mit Strahlendosen über 100 rad wird sich bei einigen Betroffenen im Verlauf der nächsten Jahre ebenfalls eine Schilddrüsenunterfunktion bemerkbar machen. Die Beschwerden, unter denen ein solcher Betroffener leidet, sind zunächst nicht sehr drastisch und entwickeln sich nur langsam über längere Zeit hin: Gewichtszunahme bei abnehmendem Appetit, trockene und kalte Haut, trockenes Haar und Haarverlust, allgemeines Nachlassen der körperlichen und geistigen Spannkraft. Bei Frauen können auch Menstruationsstörungen auftreten. Erst spät wird der typische äußere Eindruck des Patienten mit Myxödem deutlich. Diese Symptome können bei Personen jeglichen Lebensalters auftreten, wenn die Radiojodaufnahme zu einer allmählichen Zerstörung der Schilddrüse geführt hat.

Ein angeborener Kretinismus wegen der Zerstörung einer kindlichen Schilddrüse während der Schwangerschaft im Mutterleib durch von der Mutter aufgenommenes Radiojod ist nicht zu befürchten, da eine solche Exposition mit so hohen Ganzkörperdosen verbunden wäre, daß entweder die Frucht spontan abstürbe oder eine Unterbrechung der Schwangerschaft angeraten werden müßte. Wenn aber das Kind ausgetragen wird, sind durch sorgfältige ärztliche Überwachung schwere Schäden seitens der Schilddrüse von dem Kind abzuwenden.

Das Problem der Schilddrüsenunterfunktion kann durch seine rechtzeitige Erkennung bewältigt werden. Eine erkannte Schilddrüsenunterfunktion kann mit der täglichen Einnahme einer Schilddrüsenhormontablette sicher und vollständig behandelt werden. Ein derart behandelter Mensch zeigt gegenüber einem Menschen mit funktionierender Schilddrüse keine nachweisbaren Krankheitssymptome. Die Behandlung ist billig und wirksam.

Bei einer Strahlendosis in der Schilddrüse um 1000 rad muß bei jedem 10. bis 20. Betroffenen im Verlauf der nächsten 5 Jahre mit dem Ausfall der Schilddrüsenfunktion gerechnet werden, bei Strahlendosen um 10 000 rad bei jedem 4. bis 5. und bei 50 000 bei allen Betroffenen /F8, 7-16/. Es dürfte daher im Falle eines größeren Strahlenunfalls notwendig sein, zu angemessener Zeit nach der Strahlenexposition die betroffene Bevölkerung auf ihre Schilddrüsenfunktion zu untersuchen. Eine Diagnose ist mit gebräuchlichen Laboratoriumtests möglich.

Die Zahl der an Schilddrüsenunterfunktion erkrankten Menschen nach einem Kernkraftwerksunfall dürfte höher liegen als die Zahl der an der akuten Strahlenkrankheit (Abschnitt 7.3.3.2 bis 7.3.3.3) erkrankten Personen. Die Auswirkungen auf das Wohlbefinden der Betroffenen sind jedoch gering und beschränken sich auf die notwendigen diagnostischen Maßnahmen und gegebenenfalls die regelmäßige, lebenslange Behandlung mit Tabletten, die keine Nebenwirkungen haben. Aus diesem Grund wurde auf eine Berechnung der Fälle von Schilddrüsenunterfunktion verzichtet.

#### 7.3.4 Probleme der quantitativen Beschreibung der akuten und chronischen Folgen eines Strahlenunfalls

Wie in Abschnitt 7.3.3 eingehend dargestellt, kann die Strahlenbelastung der betroffenen Personen zu sehr verschiedenen Krankheiten führen. Die Art und der Schweregrad der Erkrankung hängen von vielen Faktoren ab: einerseits von den Expositionsbedingungen, wie Strahlendosis, Dosisverteilung, Dosisleistung, andererseits vom allgemeinen Gesundheitszustand des Betroffenen zum Zeitpunkt des Unfalls und in den Wochen danach, von seinem Alter, dem Vorliegen anderer Krankheiten oder einer Schwangerschaft. Die Beschwerden reichen von einem harmlosen "Kater" bis zur akut lebensbedrohlichen Strahlenkrankheit. Auch wenn aufgrund ärztlicher Erfahrungen für alle erwähnten Strahlenfolgen Angaben über Häufigkeit und Schwere bei den verschiedenen Strahlendosen gemacht werden können, ist eine vollständige quantitative Beschreibung der akuten und chronischen Folgen eines Strahlenunfalls schwierig, wenn nicht unmöglich. Es ist nicht möglich, X Fälle von Schilddrüsenunterfunktion mit Y Fällen von vorzeitig einsetzenden Wechseljahren und Z Todesfällen an akuter Strahlenkrankheit auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen und zu addieren. Entsprechend dem allgemein gebräuchlichen Vorgehen erscheint es sinnvoll, zahlenmäßig nur den schwersten Schaden, also die möglicherweise zu befürchtende Zahl von Todesfällen anzugeben, deren Abhängigkeit von den verschiedensten Faktoren sowie deren bedingte und absolute Wahrscheinlichkeit zu berechnen und darzustellen. So wie jedermann bewußt ist, daß z.B. der Straßenverkehr neben den jährlich ca. 15 000 Todesopfern eine vielfach höhere Zahl nicht tödlich verletzter, aber z.T. doch lebenslang behinderter Unfallopfer verursacht, ist festzuhalten, daß die Angabe der Zahl der akuten Todesopfer eines Kernkraftwerksunfalls nicht die Gesamtheit aller Unfallfolgen beschreibt. Neben den akuten Todesfällen sind nicht-tödliche Strahlenfolgen zu erwarten, deren Zahl die der Todesfälle mehrfach übersteigt. Der Vergleich mit den Unfallopfern des Straßenverkehrs macht aber deutlich, daß eine Bewertung der nicht tödlichen Folgen erforderlich ist. Während bei praktisch

allen vergleichbaren Unfällen in Verkehr, Technik und Industrie die nicht tödlichen Unfallfolgen in einem beträchtlichen Ausmaß zu dauernder Minderung der Gesundheit, zu Invalidität und zu chronischem Siechtum führen, beschränken sich die nicht tödlichen Krankheiten nach Strahlenexposition auf eine verhältnismäßig kurze Zeitspanne nach der Bestrahlung: Die Betroffenen erholen sich entweder vollständig (z.B. von der akuten Strahlenkrankheit) oder die Erkrankung ist mit einfachen Mitteln folgenlos zu behandeln (z.B. Schilddrüsenunterfunktion). Abgesehen von den Strahlen-Krebsfällen führt eine Strahlenbelastung nicht zu einer länger dauernden Gesundheitsschädigung.

Besondere Schwierigkeiten treten auf bei der quantitativen Bewertung der Folgen einer Bestrahlung in der Schwangerschaft. Man sollte dieses Problem nicht statistisch betrachten. Das ärztliche Handeln ist im Einzelfall darauf ausgerichtet, die Folgen der Katastrophe für Mutter und Kind so gering wie möglich zu halten. Diese individuelle Entscheidung läßt sich nicht sinnvoll quantifizieren.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß ausschließlich eine quantitative Darstellung der erwarteten Todesfälle ausreichen sollte. Dabei wird vorausgesetzt, daß dem Leser klar ist, daß darüber hinaus in zahlenmäßig weitaus größerem Umfang verschiedene Gesundheitsschäden auftreten, von denen jedoch die überwiegende Mehrzahl von relativ geringer Bedeutung für das spätere Wohlergehen der betroffenen Personen ist.

#### 7.3.5 Die Abhängigkeit der tödlich verlaufenden Strahlenkrankheit von der Strahlendosis

Bei Bestrahlung des Ganzkörpers mit Strahlendosen von mehreren 100 rad kommt es zu einer temporären Störung der Blutbildung. Daraus resultiert eine Krankheit, die trotz adäquater ärztlicher Behandlung bei höheren Dosen so schwer verlaufen kann, daß sie innerhalb von 2 Monaten zum Tode führt. Aus Tierexperimen-

ten ist bekannt, daß die Mortalität mit zunehmender Strahlendosis mit der Funktion einer S-förmigen Kurve zunimmt.

Die in der amerikanischen Reaktorsicherheitsstudie (WASH-1400) verwendete Dosis/Wirkungs-Beziehung beruht nicht auf der direkten Erfahrung an bestrahlten Menschen, sondern ist das Ergebnis komplizierter Überlegungen und Extrapolationen. Sie geht dabei von zwei Dosis/Wirkungs-Beziehungen aus: Eine optimistische Kurve (Kurve C in WASH-1400, Bild F8, 7-3) bezeichnet die geschätzte Strahlenmortalität von Patienten, die vor einer Knochenmarktransplantation mit etwa 1000 rad bestrahlt worden waren. Die Hälfte der bestrahlten und behandelten Personen überlebt eine Dosis von über 1000 rad ( $LD_{50} \geq 1000$  rad). Eine pessimistische Kurve (Kurve A in WASH-1400, Bild F8, 7-3) ist aus verschiedenen Veröffentlichungen über die Strahlenmortalität des Menschen bekannt /F8, 7-2/. Die mittlere letale Dosis liegt bei 340 rad.

Es kann in Übereinstimmung mit WASH-1400 angenommen werden, daß es sich bei den der Kurve A zugrunde liegenden Befunden um eine ungünstige Selektion von Menschen gehandelt hat, d.h. um Personen, die nicht adäquat behandelt worden sind, z.B. die Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki, oder die aufgrund einer Vorerkrankung besonders strahlenempfindlich waren (Therapiepatienten). Aus diesem Grund wurde ein bei Hundeeperimenten gefundener Wert über die Erhöhung der mittleren letalen Dosis durch eine konservative Behandlung der bestrahlten Tiere angewendet, um die Dosis/Wirkungs-Kurve um einen konstanten Betrag von 170 rad zu höheren Dosen hin zu verschieben. Mit dieser so gewonnenen Kurve (Kurve B in WASH-1400, Bild F8, 7-3) wurde die akute Mortalität in der amerikanischen Reaktorsicherheitsstudie berechnet.

Die Kenntnisse über die akute Mortalität bei Ganzkörperbestrahlung von Menschen beruhen auf zwei Personengruppen (Abschnitt 7.3.2.3):

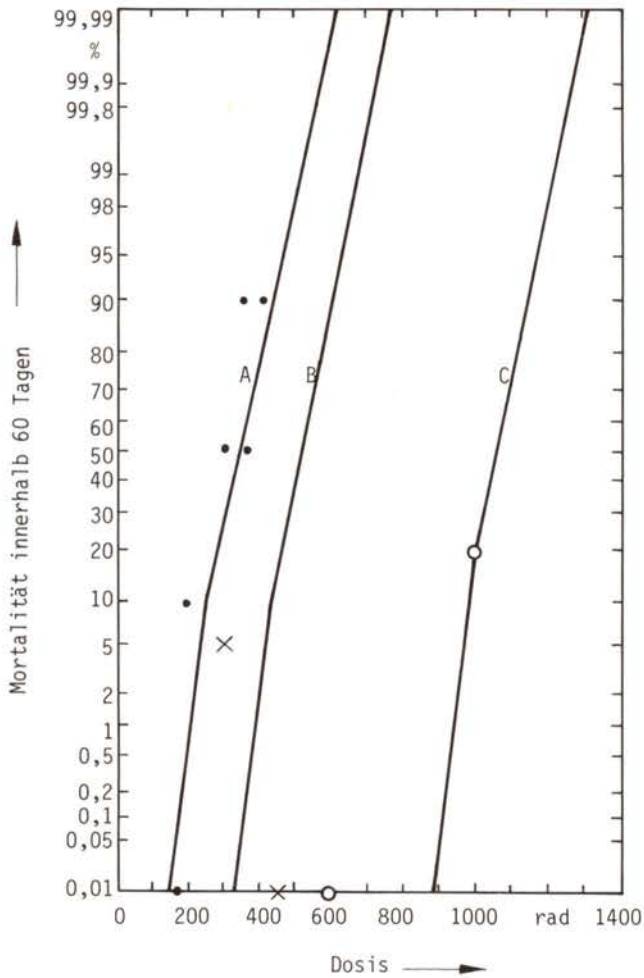


Bild F8, 7-3:

Geschätzte Dosis/Wirkungs-Beziehungen und Datenpunkte nach WASH-1400 für 50-%-Mortalität innerhalb 60 Tagen: pessimistische Kurve (A), den Rechnungen zugrunde gelegte Kurve (B) und optimistische Kurve (C)

- Menschen, die bei verschiedenen Unfällen in Forschungslaboratorien und bei der Anwendung von Strahlen in der Technik Strahlendosen von mehreren 100 rad erhalten haben, und
- Patienten, die zur Behandlung ihrer Krankheit eine Ganzkörperbestrahlung erhalten haben.

Bis heute liegen keine Daten aus Hiroshima und Nagasaki vor, aus denen eine Dosis/Wirkungs-Kurve für die akute Mortalität aufgestellt werden könnte.

Die klinischen Daten über die Wirkung einer Ganzkörperbestrahlung auf kranke Menschen sind von Langham /F8, 7-17/ zusammengestellt und diskutiert worden, die Opfer der verschiedenen Strahlenunfälle sind von Bond /F8, 7-4/ und auf einem Kongreß in Oak Ridge 1979 /F8, 7-5/ analysiert worden. Die Überlegungen zur Form und Lage der Dosis/Wirkungs-Kurve können sich nur auf diese Arbeiten stützen. Von Bond wurden 46 Strahlenunfälle beschrieben, bei denen 4 Menschen den Tod fanden. Dabei waren die Strahlendosen sehr unterschiedlich, z.T. auch ungleichmäßig im Körper verteilt. In allen Fällen wurde die Strahlendosis nachträglich aus den Expositionsbedingungen abgeschätzt. Eine Dosis/Wirkungs-Kurve wurde aus den vorliegenden Daten nicht abgeleitet, sondern nur der klinische Verlauf des akuten Strahlensyndroms beschrieben und in drei Klassen aufgeteilt entsprechend der ohne spezifische ärztliche Behandlung vorhandenen Überlebenschance:

- Überleben unwahrscheinlich (etwa über 500 rad),
- Überleben möglich (200 bis 500 rad) und
- Überleben wahrscheinlich.

Dieser Einteilung liegt die Beschreibung des Ablaufs der akuten Strahlenkrankheit (Abschnitt 7.3.3.2 bis 7.3.3.4) zugrunde. Eine Dosis/Wirkungs-Beziehung, wie sie in einer Risikostudie für Kernkraftwerke notwendig ist, läßt sich aus den Daten der Unfallopfer nicht ableiten. Somit bleibt als einzige quantitativ verwertbare Information die Analyse der Strahlenfolgen bei den Menschen, die wegen schwerer Erkrankungen Ganzkörperbestrahlungen erhalten haben.



Der Bericht von Langham /F8, 7-17/ stützt sich auf 575 in der Literatur dokumentierte Fälle von Ganzkörperbestrahlungen, bei denen die Angaben ausreichend waren, um die Strahlendosis in Körpermitte berechnen zu können. Weil es sich meist um schwerkranke Menschen gehandelt hat, traten natürlich Probleme bei der Übertragung der Ergebnisse auf gesunde Menschen auf. Es wurde daher versucht, die Letalität innerhalb des Beobachtungszeitraums aufgrund der die Bestrahlung veranlassenden Krankheit zu berücksichtigen. Die mittlere letale Dosis von 218 Patienten, die nur einmal bestrahlt worden sind, liegt danach bei 286 rad (Röntgenstrahlen) mit einem Fehler des Mittelwertes von 25 rad. Die angegebenen 10-%- und 90-%-Letalitätsdosen müssen mit großer Skepsis betrachtet werden (LD-10 = 75 rad, LD-90 = 500 rad).

Der flache Verlauf der aus vorstehenden Daten resultierenden Dosis/Wirkungs-Beziehung wird darauf zurückgeführt, daß eine sehr inhomogene, vor allem aus schwerkranken Menschen bestehende Gruppe behandelt wurde, die nicht repräsentativ für gesunde Menschen war. Aus diesem Grunde wird die Dosis/Wirkungs-Kurve für gesunde Menschen steiler angenommen. Es wird davon ausgegangen, daß die LD-50 von 286 rad auch für gesunde Menschen gilt. Für Hunde und Affen liegen Dosis/Wirkungs-Kurven vor, die wesentlich steiler verlaufen als die Dosis/Wirkungs-Kurve, die bei bestrahlten Patienten berechnet wurde. Diese Steilheit der Dosis/Wirkungs-Kurve wurde dem LD-50-Wert aufgeprägt und somit eine Dosis/Wirkungs-Kurve für normale Menschen bestimmt, die eine LD-10 von 220, eine LD-50 von 286 und eine LD-90 von 352 rad hat.

Die Autoren der amerikanischen Reaktorsicherheitsstudie gehen davon aus, daß durch die derzeitigen therapeutischen Möglichkeiten für die Bevölkerung die mittlere Letaldosis mit Sicherheit wesentlich höher liegt als bei 286 rad. Die Fortschritte der Behandlung von Leukämien und anderen bösartigen Erkrankungen mit hochwirksamen Cytostatika haben medizinische Onkologen häufig mit dem Problem einer vergleichbaren akuten und lebens-

bedrohlichen Störung der Blutbildung konfrontiert. Deshalb kann man davon ausgehen, daß für eine große Zahl von Ärzten die Behandlung einer akuten Agranulozytose und Thrombopenie, die als Folge einer unfallbedingten Ganzkörperbestrahlung auftreten kann, kein grundsätzlich neues ärztliches Problem ist /F8, 7-13/. Aus diesem Grund ist damit zu rechnen, daß die überwiegende Mehrheit eine angemessene ärztliche Behandlung erhalten dürfte, selbst wenn eine sehr große Zahl von Menschen betroffen wird. Deshalb dürften die meisten Menschen, die Strahlendosen zwischen 200 und 400 rad erhalten haben, ohne bleibende Schäden gerettet werden.

In der vorliegenden deutschen Risikostudie wird eine flachere Dosis/Wirkungs-Kurve zur Berechnung der akuten Unfallfolgen herangezogen, da nach unserer Einschätzung die von der amerikanischen Reaktorsicherheitsstudie verwendete Dosis/Wirkungs-Kurve nicht berücksichtigt, daß in der betroffenen Bevölkerung Gruppen erhöhter Strahlenempfindlichkeit als Folge von Vorschädigungen, Erkrankungen und anderen Faktoren vorhanden sind. Dazu gehören in erster Linie:

- Infektionen, insbesondere chronische Infektionen der Atemwege, wie chronische Bronchitis und Tuberkulose, aber auch Pyelonephritis,
- Erkrankungen, die mit Blutungsneigung einhergehen, wie manche Erkrankungen des Magen-Darmtraktes, z.B. Zwölffingerdarmgeschwür, Colitis ulcerosa,
- Verletzungen, Verbrennungen, Operationen und die Behandlung mit manchen Medikamenten sowie
- Schwangerschaft.

Deren Vorkommen variiert stark und hängt z.B. vom Alter der Betroffenen und von der Jahreszeit ab. Der Einfluß auf die Strahlenempfindlichkeit nimmt unter anderem mit der Schwere der jeweiligen Erkrankung zu.

Es ist kaum möglich, verlässliche Daten über die Häufigkeit der Krankheiten, die als wesentliche Komplikation bei einer akuten Ganzkörperbestrahlung angesehen werden müssen, zu erhalten. Das

beruht nicht zuletzt auf der Schwierigkeit, den Schweregrad der jeweiligen Erkrankungen und den Einfluß auf die Strahlenempfindlichkeit zu klassifizieren. Eine vorsichtige Abschätzung der Häufigkeit dieser Erkrankungen könnte folgende Daten berücksichtigen:

- Die Häufigkeit von aktiver Tuberkulose wird aufgrund eines Gesetzes offiziell registriert. Alle Formen zusammengenommen, leiden 0,4 % der Bevölkerung der Bundesrepublik an aktiver Tuberkulose /F8, 7-18/.
- Der mittlere Krankenstand der Mitglieder der gesetzlichen Krankenversicherung liegt bei 5 % /F8, 7-18/. Dieser Wert ist nur bedingt zu verwerten, da einerseits nicht alle Krankheiten, die zur Arbeitsunfähigkeit führen, in diesem Zusammenhang kritisch sind, andererseits nicht alle kritischen Krankheiten Arbeitsunfähigkeit bedingen.
- Aus der Statistik der verlorenen Arbeitstage läßt sich errechnen, daß jedes Mitglied der gesetzlichen Krankenversicherung 2 % des Jahres wegen Infektionen der Atmungsorgane arbeitsunfähig ist - sicher mit großen jahreszeitlichen Schwankungen.

Über die chronische Bronchitis gibt es eine ausführliche epidemiologische Studie aus Großbritannien /F8, 7-19/. Wenn eine standardisierte Diagnostik zugrunde gelegt wird, die nur ausgeprägte Fälle erfaßt, ergibt sich, daß bei Männern die Häufigkeit der chronischen Bronchitis von 3 % in der Altersgruppe von 40 Jahren auf 16 % in der Altersgruppe um 60 Jahre zunimmt. Alle erwachsenen Männer zusammengenommen, liegt die Häufigkeit der chronischen Bronchitis bei 8 %, bei Frauen liegt sie im Mittel bei 3 %. Erfahrungsgemäß sind in Großbritannien chronische Bronchitiden häufiger, die Werte können also nicht ohne weiteres auf die Bundesrepublik Deutschland übertragen werden.

Da die chronische Bronchitis aller ärztlichen Erfahrung nach die häufigste und wichtigste der hier interessierenden Erkrankungen ist, wird hier unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Schwankungen und der unterschiedlichen Schweregrade die Annahme einer krankheitsbedingt strahlenempfindlicheren Teil-

population von 10 % der Gesamtbevölkerung für pessimistisch gehalten.

Bei der Festlegung einer Dosis/Wirkungs-Kurve für die Gesamtbevölkerung wird somit davon ausgegangen, daß bis zu 10 % der Bevölkerung aufgrund verschiedener Erkrankungen zu einem bestimmten Zeitpunkt strahlenempfindlicher sein könnten als gesunde Personen. Für diese Personengruppe wird eine (erhöhte) Strahlenempfindlichkeit mit einer mittleren letalen Dosis von 340 rad angenommen, die der mittleren letalen Strahlendosis der ganzkörperbestrahlten kranken Menschen entspricht. Die so geschätzte Verminderung der LD-50 durch Krankheiten um 1/3 stimmt im übrigen gut mit Experimenten über Kombinationsschäden an Mäusen überein /F8, 7-20/.

Die Berücksichtigung sensibilisierender Erkrankungen einerseits und die modernen medizinischen Intensivbehandlungen mit hohen Dosen bestrahlter Personen andererseits lassen sich durch eine kumulative Normalverteilung der Sterblichkeit mit einer LD-50 von 510 rad und einer LD-1 von 250 rad berücksichtigen (Bild F8, 7-4). Diese Kurve wird bei einer Dosischwelle von 100 rad abgeschnitten.

#### 7.4 Somatische Strahlenspätsschäden

##### 7.4.1 Einleitung und Problemstellung

Als somatische Strahlenspätsschäden beim Menschen bezeichnet man strahleninduzierte Schädigungen der Gesundheit, die bei den bestrahlten Personen erst Jahre bis Jahrzehnte nach der Bestrahlung bzw. - im Falle einer langzeitigen Bestrahlung - nach Beginn der Bestrahlung auftreten. Der Zeitraum zwischen dem Zeitpunkt der Bestrahlung bzw. des Bestrahlungsbegins und der Manifestation des Schadens wird als Latenzperiode bezeichnet; sie ist nicht konstant, sondern stochastisch verteilt.

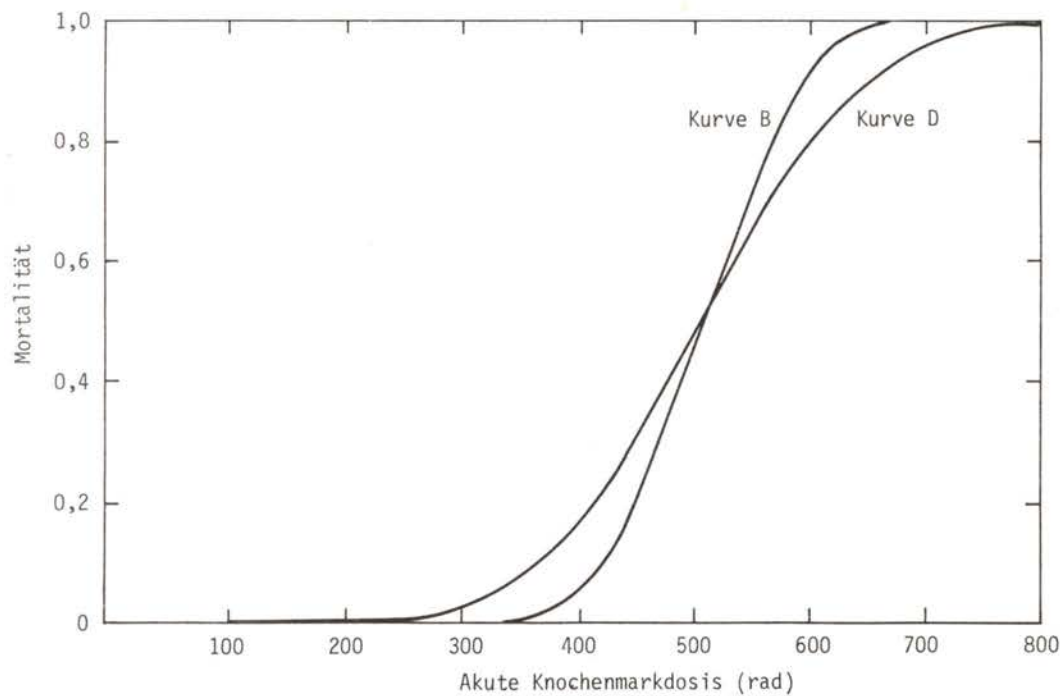


Bild F8, 7-4:

Sterblichkeit an den akuten Strahlenfolgen in Abhängigkeit von der akuten Knochenmarksdosis (Kurve B: WASH-1400, 1975; Kurve D: Deutsche Risikostudie, 1979)

Die zweifellos wichtigste und schwerwiegendste Art von Strahlenspätbeschäden sind die karzinogenen Effekte, die durch Strahlung induziert oder promoviert werden können. Das Wort "Krebs" schließt dabei alle Formen maligner Neoplasmen ein, d.h. sowohl Leukämie als Systemerkrankung als auch lokale Tumoren in den empfindlichen Einzelorganen bzw. Geweben des menschlichen Körpers. Da die Krebsbildung ein zufallsmäßiger Prozeß ist, werden diese Arten von Spätbeschäden auch als stochastische Spätbeschäden bezeichnet. Unter Berücksichtigung der Schwere dieser Art von Schäden liefern andere, durch Strahleneinwirkung mögliche somatische Spätbeschäden nur einen geringen Beitrag zum Gesamtschaden der Bevölkerung durch die Einwirkung ionisierender Strahlen /F8, 7-21/.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich daher auf die Analyse des Strahlenkrebsrisikos des Menschen. Dabei werden ausschließlich die Erfahrungen beim Menschen herangezogen, da die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an Tieren bislang nicht eindeutig auf den Menschen extrapoliert werden können.

Die Erkennung eines kausalen Zusammenhangs zwischen Strahlung und Krebsbildung bei einer Einzelperson ist unmöglich, weil eine durch Strahlung verursachte Krebsgeschwulst klinisch nicht von Krebsgeschwülsten unterschieden werden kann, die durch andere natürliche oder zivilisatorische Einflüsse hervorgerufen werden. Eine quantitative Aussage über das Strahlenkrebsrisiko in einer bestrahlten Personengruppe ist daher nur dann möglich, wenn durch den alleinigen Einfluß der Strahlung eine statistisch signifikante Erhöhung der normalen bzw. spontanen Krebsrate eintritt, wie dies schematisch als Funktion der Zeit nach der Bestrahlung in Bild F8, 7-5 dargestellt ist.

Das Strahlenkrebsrisiko  $R$  wird dann gegeben durch das Zeitintegral über die Differenz zwischen der beobachteten und der ohne Bestrahlung zu erwartenden spontanen Inzidenzrate

$$R = \int_0^{T_{\max}} (\dot{R}_{\text{beob}}(t) - \dot{R}_{\text{erw}}(t)) dt = \int_0^{T_{\max}} \dot{R}(t) dt \quad (7.1)$$

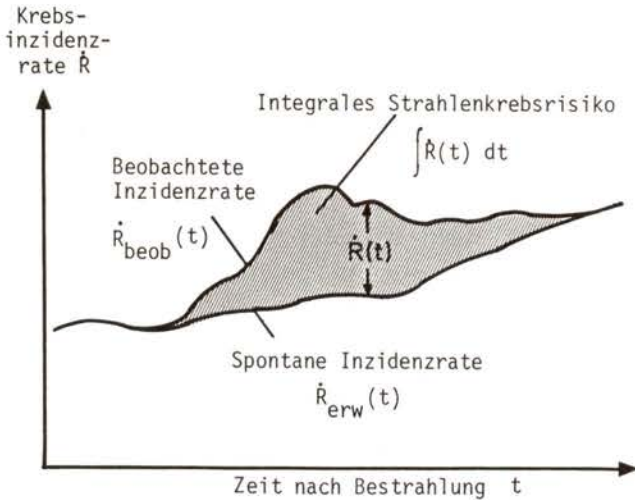


Bild F8, 7-5:

Zur Definition des Strahlenkrebsrisikos (schematisch)

wobei vom Zeitpunkt der Bestrahlung ( $t = 0$ ) bis zum Endpunkt ( $T_{max}$ ) einer beobachteten Erhöhung des normalen Krebsrisikos zu integrieren ist. Häufig wird nicht das integrale Risiko, sondern die mittlere Risikorate  $\bar{\dot{R}}$  angegeben. Während einer Beobachtungsperiode vom Zeitpunkt  $T_a$  bis zum Zeitpunkt  $T_e$  nach Bestrahlung ist die mittlere Strahlenrisikorate

$$\bar{\dot{R}}(T_a, T_e) = \frac{1}{T_e - T_a} \int_{T_a}^{T_e} \dot{R}(t) dt = \frac{1}{T_e - T_a} \int_{T_a}^{T_e} (\dot{R}_{beob}(t) - \dot{R}_{erw}(t)) dt \quad (7.2)$$

Sofern  $T_e \cong T_{max}$  ist, ist das Produkt  $\bar{\dot{R}}(T_a, T_e) \cdot (T_e - T_a)$  annähernd gleich dem zu erwartenden integralen Strahlenrisiko.

Das Strahlenkrebsrisiko gibt somit den Erwartungswert der durch Strahlung bedingten, zusätzlichen Zahl der Krebsfälle (Inzidenz oder Mortalität) an. Man geht im allgemeinen von der Annahme aus, daß dieses Risiko unabhängig von dem spontanen Risiko ist (Kon-

zept des absoluten Risikos); es wird meistens als Zahl der zu erwartenden, zusätzlichen Krebsfälle, bezogen auf  $10^6$  bestrahlte Personen, angegeben.

Da das spontane Krebsrisiko nicht nur vom Alter und Geschlecht, sondern auch von anderen Umweltfaktoren abhängt, variiert es örtlich und zeitlich und kann daher von Personengruppe zu Personengruppe sehr verschieden sein. Um eine Aussage über das spontane Strahlenkrebsrisiko einer bestrahlten Personengruppe zu erhalten, ist daher die Analyse der alters- und geschlechtsnormierten Krebshäufigkeit in einer Vergleichspopulation notwendig, deren Lebensgewohnheiten sowie soziale und berufliche Bedingungen möglichst gut mit denjenigen der bestrahlten Gruppe übereinstimmen. Bei dem Vergleich der Strahlenexposition beider Gruppen sind auch die Unterschiede der natürlichen Strahlenexposition und der Strahlenexposition durch andere zivilisatorische Quellen (z.B. medizinische Exposition) zu berücksichtigen, um eine Korrelation zwischen Dosis und Strahlenrisiko im Bereich niedriger Dosen feststellen zu können.

Eine vollständige quantitative Analyse des Krebsrisikos durch ionisierende Strahlen setzt insbesondere die Lösung folgender Teilfragen voraus:

- Abhängigkeit des (integralen) Strahlenrisikos von der Strahlendosis (+ Problem der Dosis/Risiko-Beziehung),
- Abhängigkeit des Risikos von der zeitlichen Dosisverteilung und der Dosisleistung (+ Zeitfaktorproblem),
- Abhängigkeit des Risikos von der Strahlenqualität bzw. der mikroskopischen und makroskopischen Dosisverteilung in einem Gewebe (+ Probleme der relativen biologischen Wirksamkeit (RBW) bzw. des Qualitätsfaktors (QF)),
- Abhängigkeit des Strahlenrisikos von Alter und Geschlecht und
- zeitliche Verteilung der strahlenbedingten, zusätzlichen Krebsinzidenz (+ Latenzzeitproblem).

Aufgrund der genannten Schwierigkeiten der Erkennbarkeit eines Strahlenkrebsrisikos ist eine quantitative Beantwortung dieser



Fragen nur teilweise und angenähert möglich. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß unsere Kenntnisse über das Krebsrisiko durch Strahlung beim Menschen dennoch sehr viel umfassender sind als das durch andere kanzerogene Noxen.

Die wichtigste Quelle für diese Erkenntnisse sind die Beobachtungen über die Krebshäufigkeit bei Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki, die kurzzeitig bei der Explosion einer Ganzkörperbestrahlung mit Neutronen und  $\gamma$ -Strahlen von hoher Dosisleistung ausgesetzt waren. Diese sehr sorgfältige, epidemiologische Studie (life-span-study, LS-Studie) umfaßt einen Personenkreis von etwa 60 000 (Hiroshima) bzw. 20 000 (Nagasaki) Personen und einen Zeitraum von über 30 Jahren nach der Bestrahlung.

Weiterhin liegen auch die Ergebnisse zahlreicher Studien über das Strahlenkrebsrisiko bei Patientengruppen nach medizinischer Strahlenanwendung, insbesondere nach diagnostischer und therapeutischer Anwendung von Röntgenstrahlen, vor.

Bei beruflich strahlenexponierten Personen wurde ein signifikant erhöhtes Strahlenkrebsrisiko ausschließlich bei Personengruppen festgestellt, deren Strahlenexpositionen über den derzeit gültigen Dosisgrenzwerten lagen. Zu nennen sind die Untersuchungen über die Knochensarkomhäufigkeit bei Leuchtzifferblattmalern (Inkorporation von Radium-226) und die Beobachtungen über das erhöhte Lungenkrebsrisiko bei Bergarbeitern in Gruben mit erhöhtem Radon-222-Gehalt der Grubenluft. Aus früherer Zeit liegen ferner Untersuchungen über das Leukämierisiko bei Radiologen vor, deren Ergebnisse jedoch infolge unzureichender dosimetrischer Angaben kaum verwertbar sind. Die neueren Untersuchungen von Mancuso et al. /F8, 7-22 und -23/ bei den Hanford-Arbeitern haben zu widersprüchlichen Ergebnissen geführt. Aufgrund der wissenschaftlichen Diskussion dieser Studien /u.a. F8, 7-24 bis -31/ ergeben sich berechtigte Zweifel an der Methodik dieser Analyse, an der Verwendbarkeit der Ergebnisse zur Beurteilung des Strahlenkrebsrisikos und damit an der Gültigkeit der von Mancuso et al. angegebenen niedrigen Verdoppelungsdosen für Strahlenspätchäden.

Es sei ferner darauf hingewiesen, daß in den umfangreichen Untersuchungen über die Krebshäufigkeit bei Bevölkerungsgruppen in Gebieten erhöhter natürlicher Strahlenexposition keine signifikante Erhöhung des Krebsrisikos festgestellt werden konnte /F8, 7-32/.

In den letzten Jahren ist in verschiedenen Publikationen der Kenntnisstand über das Risiko maligner Strahlenspätchäden beim Menschen zusammenfassend dargestellt worden; u.a. im BEIR-Report /F8, 7-33/ und in den Berichten der National Academy of Sciences /F8, 7-34/ und des National Council on Radiation Protection und Measurements /F8, 7-35/ in USA. Die zweifellos umfassendste Zusammenstellung ist der Bericht des United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) von 1977 / F8, 7-32/, der auch eine Grundlage für die neuen Empfehlungen der International Commission on Radiological Protection (ICRP) von 1977 /F8, 7-36/ bildete. Ein neuer Bericht des BEIR-Komitees wird in Kürze veröffentlicht<sup>1</sup>).

Eine Abschätzung des Strahlenrisikos durch Unfälle bei kerntechnischen Anlagen kann sich an den Schlußfolgerungen dieser Studien orientieren. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Strahlenexposition der Bevölkerung infolge der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken fast ausschließlich durch die  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung der emittierten Radionuklide verursacht wird, das heißt durch locker ionisierende Strahlenarten oder Strahlenarten mit niedrigem "Linearen-Energie-Transfer (LET)" längs der Bahnen ionisierender Teilchen im Gewebe. Die folgenden Ausführungen beschränken sich daher auf eine Analyse der Beziehung zwischen Dosis und Krebsrisiko für Strahlen niedriger LET.

---

<sup>1</sup>) Nach Redaktionsschluß erschienen:  
*The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*, Hrsg.: National Academy of Sciences, Washington, D.C. (1980)

#### 7.4.2 Form der Dosis / Risiko - Beziehung

Die Erfahrungen über das Strahlenkrebsrisiko beim Menschen basieren, von wenigen Ausnahmen abgesehen, auf Beobachtungen im Bereich hoher Dosen (> 100 rad bei locker ionisierenden Strahlen). Für eine Abschätzung des Strahlenkrebsrisikos bei niederen Dosen, insbesondere im Bereich unterhalb 10 rad, ist daher eine Extrapolation von dem beobachteten Risikowert notwendig. Hierfür kommen fünf verschiedene Typen von Dosis/Risiko-Beziehungen  $R(D)$  in Betracht, die in Bild F8, 7-6 schematisch dargestellt sind.

Die vorliegenden Beobachtungen über strahleninduzierte Wirkungen in lebenden Zellen - insbesondere auch Mutationen, die als möglicher Ausgangspunkt für die Krebsentstehung angesehen werden - deuten darauf hin, daß es keine echte Schwellendosis für die Krebsinduktion gibt.

Strahlenbiologische Untersuchungen an Zellen sowie Tierexperimente zeigen, daß der Verlauf der Dosis/Wirkungs-Beziehung nicht nur von der Energiedosis in dem betrachteten Organ bzw. Gewebe, sondern auch von der Strahlenart und zeitlichen Verteilung der Dosis abhängt. Für Strahlen hoher LET, d.h. für Teilchen mit hoher Ionisationsdichte längs der Teilchenbahn, ergibt sich meist unabhängig von der Dosisleistung eine lineare Dosis/Wirkungs-Beziehung. Für Strahlung niedriger LET, d.h. für locker ionisierende Strahlen, können die Schädigungskurven bei kleinen Dosen durch eine linear-quadratische Beziehung  $R = aD + bD^2$  approximiert werden, wobei oft der Faktor  $b$  mit sinkender Dosisleistung abnimmt. Dies bedeutet, daß bei Bestrahlung mit geringer Dosisleistung auch für Strahlung niedriger LET eine angenähert lineare Dosis/Wirkungs-Beziehung resultiert, wobei jedoch das R/D-Verhältnis erheblich niedriger ist als bei Strahlung hoher LET.

Die Erfahrungen über die Dosisabhängigkeit des Strahlenkrebsrisikos beim Menschen, insbesondere im Bereich niedriger Do-

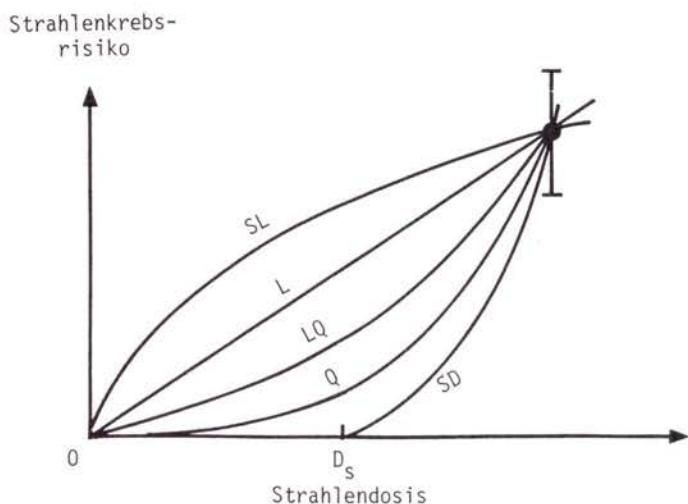


Bild F8, 7-6:

Typen von möglichen Dosis/Risiko-Beziehungen (schematisch)

- SL = "sublinearer" Typ:  $R \sim D^n$  mit  $n < 1$
- L = "reilinearer" Typ:  $R \sim D$ ; in der amerikanischen Reaktorsicherheitsstudie, WASH-1400 /F8, 7-37/, wurde dieser Typ als "Upper Bound Estimate" bezeichnet.
- LQ = "linear-quadratischer" Typ:  $R \sim D + \beta D^2$ ; in WASH-1400 wurde eine Beziehung ähnlichen Typs als "Central Estimate" bezeichnet und bei der Bewertung der Unfallfolgen zugrunde gelegt. Dabei wurde mit Ausnahme von Brustkrebs angenommen, daß der Faktor  $\beta$  mit sinkender Dosisleistung abnimmt.
- Q = "supralinearer" Typ:  $R \sim D^n$  ( $n > 1$ ), z.B. für  $n = 2$  quadratischer Typ
- SD = "Schwellendosis"-Typ:  $R \sim (D - D_s)^n$  für  $D > D_s$  (Schwellendosis) und  $R = 0$  für  $D \leq D_s$ ; eine solche Funktion wurde in WASH-1400 als "Lower Bound Estimate" angesetzt.

sen, sind begrenzt. Einerseits liegen nur wenige Erhebungen vor, bei denen das Strahlenkrebsrisiko als Funktion der Dosis untersucht wurde. Hierzu gehören die Erhebungen bei den Atombomben-Überlebenden, bei den Uran-Bergarbeitern (Lungenkrebs) und bei den Leuchtzifferblattmalern (Knochensarkom). Bei den beiden letztgenannten Gruppen sowie bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima handelt es sich um eine Bestrahlung mit Strahlen hoher LET (Hiroshima: Neutronen, Uran-Bergarbeiter und Leuchtzifferblattmaler:  $\alpha$ -Teilchen). Ein direkter Vergleich der Form der Dosis/Risiko-Beziehung zwischen Strahlung hoher und niedriger LET ist daher nur durch Vergleich der Daten von Hiroshima und Nagasaki möglich, da in Nagasaki die Wirkung des  $\gamma$ -Dosisanteils überwog.

Dieser Vergleich der Dosis/Wirkungs-Beziehungen, auf den in Abschnitt 7.4.4 eingegangen wird, bestätigt im Prinzip die zytologischen und tierexperimentellen Beobachtungen. Jedoch ist zu berücksichtigen, daß der relative Fehlerbereich der Risikowerte mit sinkender Dosis zunimmt, so daß eine quantitative Aussage über den Verlauf der Dosis/Risiko-Beziehung bei niedrigen Dosen nicht möglich ist. Die Ergebnisse schließen jedoch nicht aus, daß auch bei Strahlung niedriger LET die Dosis/Risiko-Beziehung einen linearen Term aufweist, der unabhängig von der Dosisleistung ist.

Dies bedeutet, daß das Risiko/Dosis-Verhältnis  $R/D$ , das aus Untersuchungen bei relativ niedrigen Dosen im Bereich bis zu 50 rad abgeleitet werden kann, wahrscheinlich auch für kleinere Dosen gilt und nicht zu einer erheblichen Überschätzung des Strahlenrisikos bei kleinen Dosen führt.  $R/D$ -Werte für Strahlung niedriger LET, die sich aus Untersuchungen bei höheren Dosen und bei hoher Dosisleistung, wie z.B. im Falle der Bestrahlung der Atombomben-Überlebenden, ergeben, dürften hingegen bei Übertragung auf Bestrahlung mit relativ niedriger Dosis und Dosisleistung zu einer deutlichen Überschätzung des Strahlenrisikos führen /F8, 7-35/. Diese Gesichtspunkte sind bei der Bewertung des Risikokoeffizienten  $R/D$  für die einzelnen Krebsarten, auf die in Abschnitt 7.5 und 7.6 eingegangen wird, zu berücksichtigen.

Die ICRP /F8, 7-36/ geht in ihren neuen Empfehlungen von einer rein linearen Extrapolation aus. Die von ihr für Zwecke des Strahlenschutzes empfohlenen Referenzwerte der Risikokoeffizienten für einzelne Organe bzw. Gewebe des menschlichen Körpers sind Mittelwerte über Alter und Geschlecht. Sie basieren auf den Schlußfolgerungen über das mögliche Strahlenkrebsrisiko beim Menschen, die im Bericht von UNSCEAR /F8, 7-32/ gezogen werden. Sowohl in dem Bericht von UNSCEAR als auch in den Empfehlungen der ICRP und in dem neuen Bericht des BEIR-Komitees wird darauf hingewiesen, daß eine solche rein lineare Extrapolation von beobachteten Werten des Strahlenkrebsrisikos bei hohen Dosen und hoher Dosisleistung im Falle von locker ionisierenden Strahlen (Strahlung niedriger LET) eher zu einer Überschätzung als zu einer Unterschätzung des realen Strahlenrisikos im Bereich niedriger Dosen führt (Hauptband, Bild 7-6).

Aber auch eine lineare Extrapolation von beobachteten Werten des Strahlenkrebsrisikos bei sehr hohen Dosen kann zu falschen Schlußfolgerungen führen, da die Dosis/Risiko-Beziehung für strahleninduzierten Krebs ein Maximum haben kann, bei dessen Überschreitung andere Strahleneffekte (Gewebeabtötung) wirksam werden.

#### 7.4.3 Latenzzeit-Verteilung für Strahlenkrebs

In Bild F8, 7-7 ist die bei den Atombombenüberlebenden beobachtete, zusätzliche Mortalitätsrate durch Leukämie sowie durch alle anderen Krebsarten als Funktion der Zeit aufgetragen (nach Daten von Moriyama et al. /F8, 7-38/, siehe auch UNSCEAR /F8, 7-32/). Im Falle der Leukämie lag das Maximum der Inzidenzrate im Zeitraum von 5 bis 15 Jahren nach Bestrahlung; nach 25 bis 30 Jahren hat die Inzidenzrate wieder angenähert den erwarteten Spontanwert erreicht. Die mittlere Latenzperiode, gemittelt über alle Dosis- und Altersgruppen, betrug 14 Jahre /F8, 7-38/, gerechnet ab dem Zeitpunkt der Explosion. Sowohl bei der akuten

als auch bei der chronisch-myeloischen Leukämie wurde eine signifikante Altersabhängigkeit der mittleren Latenzzeit festgestellt. Sie nahm im Falle der akuten Leukämie von 15,2 Jahren ( $\pm 1,6$  a) bei der Altersgruppe über 45 Jahre auf 9,4 Jahre ( $\pm 1,0$  a) bei der Altersgruppe unter 15 Jahren ab (Werte in Klammern = Standardabweichung). Dieser Befund deckt sich mit den Erfahrungen über die Leukämiehäufigkeit nach medizinischer Strahlenexposition "in utero" und im Kindesalter, aus denen eine mittlere Latenzzeit von etwa 5 Jahren folgt. Die minimale Latenzzeit für Leukämie dürfte im Bereich von 1 bis 2 Jahren bei Kindern und 2 bis 5 Jahren bei Erwachsenen liegen.

Die Latenzzeit für andere Krebsarten ist wesentlich größer. Aus Bild F8, 7-7 geht hervor, daß bei den Atombomben-Überlebenden erst etwa 15 Jahre nach der Bestrahlung eine signifikante Erhöhung der Krebsrate festgestellt wurde und das Maximum der Inzidenzrate erst nach etwa 25 bis 30 Jahren erreicht worden sein dürfte. Da das mittlere Alter der Überlebenden zum Zeitpunkt der Explosion bei knapp 30 Jahren lag, ist aufgrund der normalen Lebenserwartung mit einer deutlichen Abnahme der zusätzlichen Krebsrate in den Folgejahren zu rechnen.

Diese Folgerung wird unterstützt durch Erfahrungen über die Latenzzeit verschiedener Krebsarten bei Patienten nach Strahlenbehandlung (Tabelle F8, 7-1) sowie durch die Beobachtungen über die Lungenkrebsinzidenz bei Uran-Bergarbeitern infolge Inhalation von Radon-222-Zerfallsprodukten und über die Knochensarkominzidenz infolge Inkorporation von Radium-226. Im Falle von Hautkrebs ist ein deutlich höherer Mittelwert wahrscheinlich. Im Bericht von UNSCEAR /F8, 7-32/ wird daher für alle Krebsarten, außer Leukämie, ein Mittelwert der Latenzzeit von 25 Jahren angenommen.

Es ist wahrscheinlich, daß die mittlere Latenzperiode auch von der Dosis und ihrer zeitlichen Verteilung abhängt. Die Befunde über die Knochensarkominzidenz bei Personen nach Inkorporation von Radium-226 /F8, 7-39/ und über die Inzidenz von Schilddrüsenkrebs nach externer Bestrahlung /F8, 7-40/ deuten darauf hin,

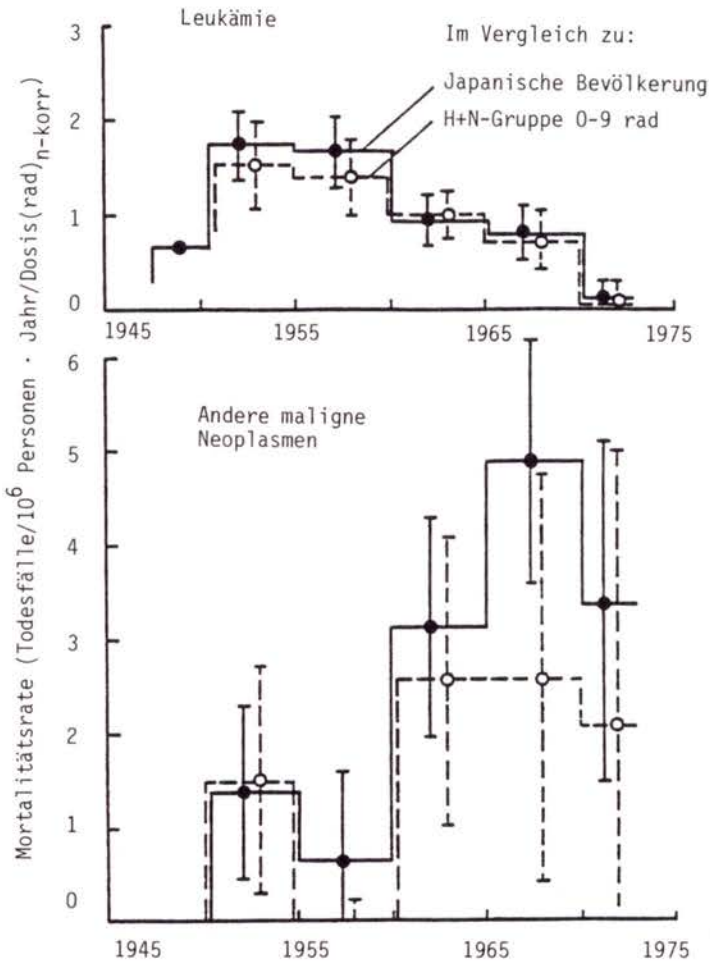


Bild F8, 7-7:

Beobachtete zeitliche Änderung der zusätzlichen Mortalitätsrate durch Krebs und Leukämie bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki mit Dosen größer 10 rad, die sich aus einem Vergleich mit der Krebshäufigkeit in der japanischen Bevölkerung (ausgezogene Kurve) bzw. in den gering bestrahlten Atombomben-Überlebenden (Dosis 0-9 rad) ergibt



Krebsart, Gewebe	Zahl der Krebsfälle	Mittlere Latenzperiode (Jahre)
Schilddrüse	20	20,3
Blase	10	20,7
Brust ( ♀ )	10	22,6
Kopf, Hals	113	24,1
Kehlkopf, Rachen	167	26,4
Haut	{ 38	24,5
	40	41,5

Tab. F8, 7-1:

Beobachtete Werte der mittleren Latenzperiode  
nach therapeutischer Bestrahlung nach /F8, 7-32/

daß mit sinkender Dosis die mittlere Latenzzeit zunimmt. Eine ähnliche Abhängigkeit wurde bei tierexperimentellen Untersuchungen für verschiedene Krebsarten nach externer und interner Bestrahlung /F8, 7-41 und -42/ sowie auch nach Verabreichung kanzerogener Chemikalien /F8, 7-43 und -44/ gefunden.

Es ist nicht auszuschließen, daß die Reduktion der Latenzzeit der Krebsbildung durch Strahlung oder Chemikalien ein generelles Phänomen in allen Tumorsystemen ist, das auf eine Beschleunigung der spontanen Tumorbildung durch die Einwirkung dieser Agentien hinweist. Dies könnte zur Folge haben, daß das Strahlenkrebsrisiko bei niedrigen Dosen kleiner ist als bei Annahme einer proportionalen Dosis/Risiko-Beziehung. Die bislang vorliegenden Erfahrungen beim Menschen ermöglichen jedoch infolge der großen statistischen Fehlerbreite keine eindeutige Aussage über die Existenz eines solchen Latenzzeit-Effektes bei der Strahlenkarzinogenese beim Menschen. Er wird daher bei Risikobetrachtungen im Strahlenschutz bislang nicht berücksichtigt.

#### 7.4.4 Strahlenkrebsrisiko für einzelne Organe und Gewebe

Im folgenden werden die wesentlichen wissenschaftlich fundierten Beobachtungen über eine erhöhte Krebshäufigkeit in einzelnen Geweben bzw. Organen des menschlichen Körpers nach Bestrahlung zusammenfassend beschrieben und die resultierenden Werte für das Verhältnis des zusätzlichen Krebsrisikos zur Organdosis angegeben. Im einzelnen werden behandelt: das Leukämierisiko nach Bestrahlung des roten Knochenmarks sowie das Krebsrisiko nach Bestrahlung des Knochens bzw. der Knochenoberfläche (Knochenkrebs), der weiblichen Brust, der Lunge, der Gesamtheit der Verdauungsorgane und der Schilddrüse.

Die Strahlenexposition der Bevölkerung infolge der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken wird fast ausschließlich durch die  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung dieser Radionuklide verursacht; dies gilt sowohl für Emissionen bei bestimmungsgemäßem Betrieb als auch bei Stör- und Unfällen.

Bei der folgenden Darstellung stehen daher die Beobachtungen über das Strahlenkrebsrisiko durch Strahlung niedriger LET im Vordergrund. Die Auswertung dieser Ergebnisse hat zum Ziel, ein mögliches Strahlenkrebsrisiko der Bevölkerung durch locker ionisierende Strahlen, d.h. Strahlen niedriger LET, unter Berücksichtigung der derzeitigen Altersverteilung der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland abzuschätzen.

##### 7.4.4.1 Rotes Knochenmark (Leukämie)

###### ● Atombomben-Überlebende

Die Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki sind die wichtigste Informationsquelle zur Abschätzung des Leukämierisikos durch Strahlung und seiner Abhängigkeit von der Dosis, der Zeit nach Bestrahlung und von dem Alter der bestrahlten Personen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen

werden in dem Bericht von UNSCEAR /F8, 7-32/ ausführlich beschrieben und diskutiert, so daß auf diesen Bericht und die dort zusammengestellte Literatur verwiesen werden kann. Neuere Ergebnisse der LS-Studie bei den Atombomben-Überlebenden, die den Zeitraum von 1950 bis 1974 erfassen, wurden kürzlich veröffentlicht /F8, 7-45 bis -47/. Sie bestätigen die Schlußfolgerungen im Bericht von UNSCEAR; insbesondere geht daraus hervor, daß 30 Jahre nach der Exposition die Leukämierate wieder den erwarteten Normalwert erreicht hat.

Das Leukämierisiko durch Strahlung niedriger LET kann aus den Beobachtungen in Nagasaki abgeschätzt werden, da in Nagasaki der Neutronenanteil der Kerma<sup>1)</sup> bzw. Dosis vernachlässigbar ist. Die aus der LS-Studie resultierende zusätzliche Leukämiehäufigkeit bei den Überlebenden von Nagasaki ist - summiert über alle Altersgruppen - in Bild F8, 7-8 in Abhängigkeit von der mittleren  $\gamma$ -Dosis im roten Knochenmark (KM) aufgetragen. Bei der Umrechnung von Kerma in Knochenmarkdosis wurde ein Konversionsfaktor  $D^{KM}(\gamma)/K(\gamma) = 0,66$  zugrunde gelegt (Anhang). Die ausgezogene Treppenkurve basiert auf den Daten von Moriyama und Kato /F8, 7-38/, die den Zeitraum von 1950 bis 1972 erfassen /F8, 7-32/; als Vergleichsgruppe wurde dabei die (0-9 rad)-Gruppe herangezogen, in der keine Erhöhung der Leukämierate beobachtet wurde. Die gestrichelte Treppenkurve aus Bild F8, 7-8 resultiert aus den Daten von Beebe et al. /F8, 7-46/, die den erweiterten Zeitraum von 1950 bis 1974 erfassen; in dieser Untersuchung wurde die zusätzliche Häufigkeit mit Hilfe einer Regressionsmethode berechnet. Die Unterschiede zwischen beiden Kurven beruhen daher im wesentlichen auf den verschiedenen Methoden zur Ermittlung der zu erwartenden Leukämiehäufigkeit.

---

<sup>1)</sup> *KERMA: kinetic energy released in material, Quotient aus den kinetischen Anfangsenergien aller geladenen Teilchen, die in einem Volumenelement durch indirekt ionisierende Teilchen freigesetzt werden, und der Masse der Materie in diesem Volumenelement.*

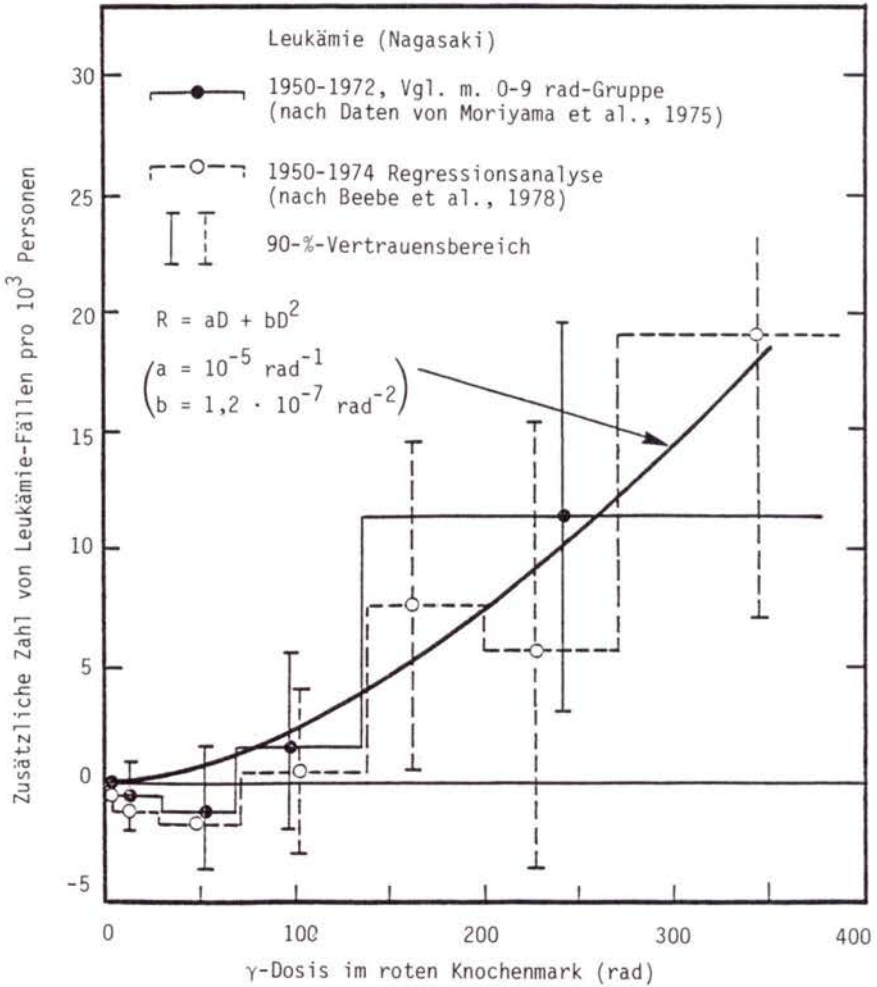


Bild F8, 7-8:

Zusätzliche Leukämie-Inzidenz bei den Atombomben-Überlebenden von Nagasaki (alle Altersgruppen) in Abhängigkeit von der mittleren Dosis im roten Knochenmark; die Beobachtungswerte können durch die angegebene linear-quadratische Dosis/Risiko-Ausgleichskurve beschrieben werden (ausgezogene Kurve)

Aus Bild F8, 7-8 geht hervor, daß infolge der geringen Zahl der Leukämiefälle in keiner Dosisgruppe unterhalb etwa 100 rad eine signifikante Erhöhung der Leukämiehäufigkeit feststellbar ist. Für das Risiko/Dosis-Verhältnis in diesem Dosisbereich kann nur ein oberer Grenzwert von  $30 \cdot 10^{-6}$  pro rad Knochenmarkdosis abgeschätzt werden.

Eine genauere Aussage ist möglich, wenn man das kumulierte Leukämierisiko in Nagasaki in Abhängigkeit von der unteren Integrationsgrenze betrachtet. Summiert über alle Kerma-Gruppen oberhalb 200, 100, 50 und 10 rad, ergeben sich die Werte in Tabelle F8, 7-2 für das zusätzliche Leukämierisiko pro Einheit der Kerma bzw. der Knochenmarkdosis (in Klammern 90-%-Vertrauensbereich).

LS-Studie	K (rad)	$D^{KM}$ (rad)	R/K ( $10^{-6}/\text{rad}$ )	$R/D^{KM}$ ( $10^{-6}/\text{rad}$ )
1950-1972 Vergleich mit 0-9 rad- Gruppe /F8, 7-38/	>200	>135	35 (20-52)	51 (29-76)
	>100	> 68	28 (16-44)	41 (24-65)
	> 50	> 34	22 (12-36)	32 (18-53)
	> 10	> 7	18 ( 6-33)	26 ( 9-48)
1950-1974 Regressions- analyse /F8, 7-46/	>200	>135	32	47
	>100	> 68	23	34
	> 50	> 34	16	24
	> 10	> 7	8	12

Tab. F8, 7-2:

Beobachtetes kumuliertes Risiko/Kerma- und Risiko/Dosis-Verhältnis für Leukämie in Nagasaki

Diese Werte lassen deutlich die Tendenz erkennen, daß das R/D-Verhältnis mit sinkender Dosis abnimmt. Mays et al. /F8, 7-48/ haben darauf hingewiesen, daß die Dosis/Risiko-Beziehung für Leukämie in Nagasaki gut durch eine rein quadratische Beziehung approximiert werden kann. Aufgrund tierexperimenteller Untersuchungen und anderer strahlenbiologischer Erfahrungen ist jedoch eine linear-quadratische Dosis/Risiko-Beziehung wahrscheinlicher, wobei aufgrund der obigen Werte die Steigung des linearen Anteils im Bereich unterhalb  $30 \cdot 10^{-6}$ /rad Knochenmarkdosis liegt.

Für das Gesamtkollektiv der Überlebenden von Nagasaki, die eine Knochenmarkdosis größer 10 rad erhalten haben, ergibt sich aus Tabelle F8, 7-2 ein mittleres Risiko/Dosis-Verhältnis von etwa  $20 \cdot 10^{-6}$ /rad, gemittelt über den gesamten Dosisbereich und alle Altersgruppen. Der Risikoeffizient des linearen Terms einer linear-quadratischen Beziehung für das Leukämierisiko durch Strahlung niedriger LET dürfte daher unterhalb dieses Wertes liegen. In Bild F8, 7-8 ist als Beispiel einer Dosis/Risiko-Beziehung  $R = aD + bD^2$  mit  $a = 10 \cdot 10^{-6}$ /rad und  $b = 0,12 \cdot 10^{-6}$ /rad<sup>2</sup> eingetragen, die die Beobachtungswerte gut approximiert.

Über die Abhängigkeit des strahleninduzierten Leukämierisikos vom Alter bei Bestrahlung sind aus den Nagasaki-Daten keine Aussagen möglich. Bei Zusammenfassung der Leukämiedaten von Hiroshima und Nagasaki ist jedoch eine signifikante Altersabhängigkeit des Risikoeffizienten erkennbar /F8, 7-46/, die in Bild F8, 7-9, normiert auf den Mittelwert für alle Altersgruppen, dargestellt ist. Danach ist zu erwarten, daß der Risikoeffizient für Kinder (Alter 0 - 9 Jahre) etwa um den Faktor 1,5 höher ist als der Mittelwert und für Personen im Alter von 10 - 20 Jahren etwa um die Hälfte kleiner ist als der Mittelwert. Mit zunehmendem Alter steigt der Risikoeffizient an und erreicht bei Personen über 50 Jahre etwa den gleichen Wert wie bei Kindern. Es liegt keine Information vor, daß diese Altersabhängigkeit verschieden ist für Strahlung niedriger und hoher LET.

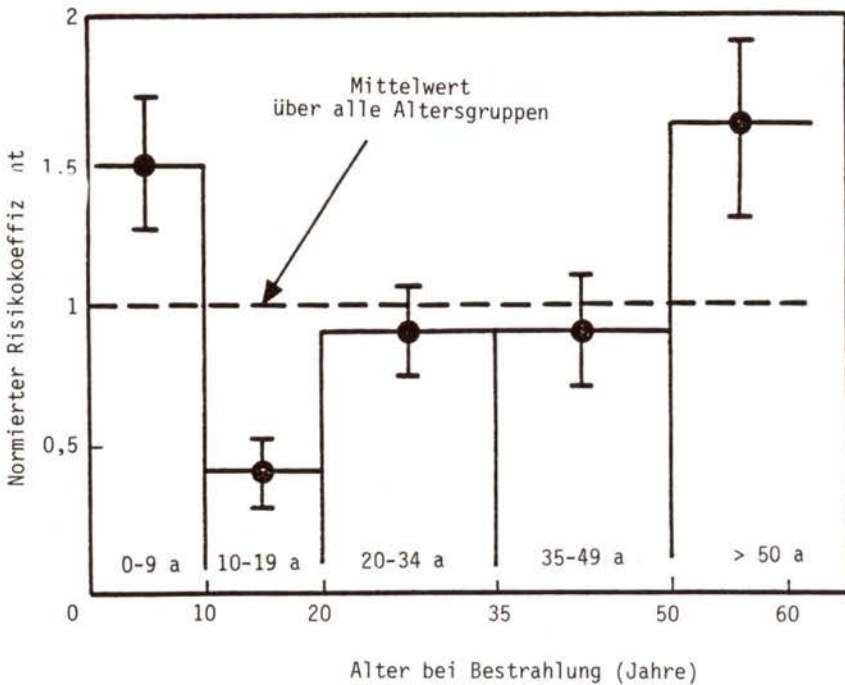


Bild F8, 7-9:

Relative Änderung des absoluten Risikoeffizienten für Leukämie bei den Atombomben-Überlebenden mit dem Alter bei Bestrahlung (nach Daten von Beebe, Kato und Land, 1978)

● Leukämie nach Strahlenbehandlung

In England wurden von Court Brown und Doll zwei umfassende Studien zur Analyse des Leukämierisikos bei Morbus-Bechterew<sup>1)</sup>-Patienten durchgeführt, die mit Röntgenstrahlen behandelt worden waren /F8, 7-49 und -50/.

In der ersten Studie, die 14 554 erwachsene Patienten - davon 85 % Männer - erfaßte, wurden 60 Leukämiefälle beobachtet, während nur 6 Fälle zu erwarten gewesen wären. Die mittlere Kno-

<sup>1)</sup> chronisch-fortschreitende Wirbelsäulenversteifung

chenmarkdosis dieser Patienten variierte im Bereich von 200 bis 800 rad und betrug im Mittel etwa 350 rad. Die Beobachtungsperiode war maximal 27 Jahre, im Mittel 11,5 Jahre. Aus der zusätzlichen Leukämieinzidenz während dieser Beobachtungsperiode ergibt sich somit ein Risikokoeffizient  $R/D^{KM} = 11 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  unter der Annahme einer linearen Dosis/Risiko-Beziehung.

In der zweiten, späteren Untersuchung wurden  $31 - 6,5 = 24,5$  zusätzliche Leukämiefälle unter 14 109 Bechterew-Patienten festgestellt, die eine mittlere Knochenmarkdosis von etwa 230 rad erhalten hatten. Die mittlere Beobachtungsperiode betrug dabei 9,5 Jahre. Durch Integration der zusätzlichen Leukämierate über den gesamten Zeitraum bis 20 Jahre nach der Bestrahlung ergibt sich ein Risikokoeffizient  $R/D^{KM} = 11 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  mit einem 90%-Vertrauensbereich von  $(8-16) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$ . Da nach 20 Jahren keine erhöhte Leukämierate mehr erkennbar war, ist auch keine wesentliche Erhöhung dieses Wertes zu erwarten. Der integrale Leukämie-Risikokoeffizient bei den Bechterew-Patienten dürfte daher nicht größer als etwa  $15 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  (90%-Vertrauensbereich:  $(10-20) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$ ) betragen.

Es ist bemerkenswert, daß sich aus beiden Studien ein Medianwert der Latenzzeit vom Zeitpunkt der Bestrahlung bis zum Tod durch Leukämie von nur etwa  $7 \pm 1$  Jahr ergibt, der somit deutlich niedriger ist als die mittlere Latenzzeit bei den erwachsenen Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki. Ferner sei darauf hingewiesen, daß die mittlere RKM-Dosis bei den Bechterew-Patienten größer ist als bei den Überlebenden von Nagasaki, die in der LS-Studie erfaßt wurden.

Eine erhöhte Leukämiehäufigkeit wurde auch bei einer Gruppe von 2 067 weiblichen Patienten nach einer aus therapeutischen Gründen verabreichten Röntgenbestrahlung des Beckenraums festgestellt /F8, 7-51/, wobei die mittlere Knochenmarkdosis dieser Patientengruppe etwa 130 rad betrug. In dem Zeitraum von 5 bis 19 Jahren nach der Bestrahlung wurden in dieser Gruppe 7 Leukämiefälle beobachtet, im Vergleich zu 2,3 erwarteten Fällen. Für diesen Zeitraum ergibt sich ein Risikokoeffizient von



$17 \cdot 10^{-6}$ /rad. Unter Berücksichtigung der beobachteten mittleren Latenzzeit von 11 bis 12 Jahren ist ein integraler Risikowert von etwa  $20 \cdot 10^{-6}$ /rad (90-%-Vertrauensbereich  $(5-40) \cdot 10^{-6}$ /rad) zu erwarten.

Verschiedene andere Beobachtungen an kleineren Patientengruppen deuten ebenfalls auf ein erhöhtes Leukämierisiko nach Röntgenbestrahlung des Beckenraums hin /F8, 7-52 und -53/. Sie ermöglichen jedoch wegen der Ungenauigkeit der Dosisermittlung keine quantitative Aussage über den Risikoeffizienten.

Ferner ist eine Untersuchung an einer Gruppe von 2 872 Kindern zu erwähnen, bei denen eine erhöhte Leukämieinzidenz von 4,7 zusätzlichen Fällen nach Röntgenbestrahlung der Kopfhaut zur Behandlung von Tinea capitis<sup>1)</sup> aufgetreten ist. Nach einer groben Abschätzung lag die mittlere Knochenmarksdosis bei diesen Kindern bei etwa 30 rad, so daß sich ein Risikowert von etwa  $50 \cdot 10^{-6}$ /rad ergibt /F8, 7-54 und -55/. Da sich jedoch der 90-%-Vertrauensbereich von etwa  $(5-130) \cdot 10^{-6}$ /rad erstreckt, ist dieser Wert von geringer statistischer Signifikanz.

#### ● Leukämie nach diagnostischer Strahlenexposition

Die Untersuchungen von Stewart et al. /F8, 7-56/ sowie von Mac Mahon et al. /F8, 7-57/ deuten auf eine erhöhte Leukämieinzidenz in den ersten 10 Lebensjahren bei Kindern hin, die "in utero" bei röntgendiagnostischen Unterleibsuntersuchungen ihrer Mütter relativ niedrigen Dosen im Bereich von 0,2 - 20 rad ausgesetzt waren. Aus der Analyse dieser Daten durch Mole /F8, 7-58/ ergibt sich eine zusätzliche Leukämiehäufigkeit von etwa  $1,2 \cdot 10^{-4}$  pro lebendgeborenem Kind bzw. von etwa  $1,4 \cdot 10^{-4}$  bei Zwillingen. Da die mittlere Dosis im Fetus auf 1-2 rad geschätzt wird, ergibt sich bei Bestrahlung "in utero" ein Risikofaktor für Leukämie von  $(50-150) \cdot 10^{-6}$ /rad, wobei der Medianwert der Latenzzeit nur wenige Jahre beträgt. Dieser Befund deu-

---

<sup>1)</sup> Pilzerkrankung der Kopfhaut

tet darauf hin, daß das strahleninduzierte Leukämierisiko bei Bestrahlung "in utero" etwa 3- bis 5mal höher ist als bei Erwachsenen. Es sei jedoch erwähnt, daß die Erhebungen bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki keine erhöhte Leukämieinzidenz bei "in utero"-Bestrahlung erkennen lassen.

Über eine erhöhte Leukämieinzidenz bei Kindern und Erwachsenen nach röntgendiagnostischen Untersuchungen liegen bislang keine Beobachtungen vor. Eine erhöhte Leukämieinzidenz infolge Einwirkungen von  $\alpha$ -Strahlen konnte hingegen bei Patienten festgestellt werden, denen in früheren Jahren ein Th-haltiges Kontrastmittel (Thorotrast) appliziert worden war /F8, 7-59 bis -62/. Aus der berechneten  $\alpha$ -Dosis im Knochenmark durch das im Knochen abgelagerte Thorium ergibt sich bei diesen Patientengruppen ein Leukämie-Risikofaktor von etwa  $(40-60) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  für  $\alpha$ -Strahlung; ein Vergleich dieses Wertes mit dem Risikofaktor für Strahlung niedriger LET deutet auf eine relative biologische Wirksamkeit der  $\alpha$ -Strahlung von etwa 2 - 5, bei einer mittleren  $\alpha$ -Dosis im Knochenmark von 100 - 500 rad hin.

#### ● Beobachtungen bei anderen Personengruppen

Erhebungen bei amerikanischen Radiologen, die in früheren Jahren einer beträchtlichen beruflichen Strahlenexposition ausgesetzt gewesen waren, weisen auf eine erhöhte Leukämiehäufigkeit bei dieser Personengruppe hin /F8, 7-63 und -64/. Eine quantitative Abschätzung des Risikofaktors ist jedoch nicht möglich, da die Dosisangaben sehr unsicher sind und die Auswahl einer geeigneten Vergleichsgruppe schwierig ist. Im übrigen liegen keine wissenschaftlich gesicherten Beobachtungen über ein erhöhtes Leukämierisiko infolge beruflicher Strahlenexposition vor.

Auch bei Personengruppen, die eine erhöhte Strahlenexposition durch den "fallout" von Kernwaffenversuchen erhalten haben, konnte keine signifikante Erhöhung der Leukämierate festge-

stellt werden. Dies gilt insbesondere auch für die Bewohner der Marshall-Inseln, die 1954 dem lokalen "fallout" einer Testexplosion ausgesetzt gewesen waren. In dieser Gruppe, deren kollektive Strahlendosis etwa 12 000 Personen  $\times$  rad betrug, wurde nur ein Fall von Leukämie festgestellt, so daß allein aus statistischen Gründen keine Aussage über das strahleninduzierte Leukämierisiko möglich ist /F8, 7-65 und -66/.

Ferner sei darauf hingewiesen, daß auch bei allen Erhebungen über das Leukämierisiko von Bevölkerungsgruppen in Gebieten erhöhter natürlicher Radioaktivität keine erhöhte Leukämiezidenz durch den Einfluß der Strahlung festgestellt wurde.

#### ● Zusammenfassung

Aus den beschriebenen Ergebnissen der epidemiologischen Erhebungen bei den Atombomben-Überlebenden von Nagasaki und bei medizinisch strahlenbehandelten Personengruppen lassen sich unter Abwägung ihrer statistischen Signifikanz die in Tabelle F8, 7-3 angegebenen Werte für das Verhältnis des Leukämierisikos durch Strahlung niedriger LET zur mittleren Energiedosis  $D_{\text{RKM}}$  im roten Knochenmark abschätzen.

Unter Berücksichtigung des relativen Anteils der einzelnen Altersgruppen an der Gesamtbevölkerung kann danach für die Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland ein mittlerer Risikoeffizient von  $(10-40) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$ , d.h. eine Zahl von 10 bis 40 zusätzlichen Leukämiefällen für 1 Million Einwohner pro Einheit der mittleren Energiedosis im Knochenmark erwartet werden.

Es sei darauf hingewiesen, daß diese Risikowerte auf Beobachtungen an Personengruppen basieren, die kurzzeitig einer Bestrahlung mit hoher Dosisleistung und - abgesehen von dem Wert für "in utero"-Bestrahlung - auch relativ hohen Dosen ( $> 50$  bis  $100$  rad) ausgesetzt gewesen waren. Ihre Übertragung auf Bestrahlungen mit niedrigen Dosen oder auf langzeitige Bestrahlungen mit geringer Dosisleistung ist daher nur mit Vorbehalt möglich;

Altersgruppe	Relativer Bevölkerungsanteil <sup>1)</sup>	R/D <sup>KM</sup> [10 <sup>-6</sup> /rad]
"in utero"	0,01	50 - 150
0 - 9 Jahre	0,14	10 - 40
10 - 19 Jahre	0,15	5 - 20
20 - 34 Jahre	0,20	10 - 30
35 - 49 Jahre	0,20	10 - 40
> 50 Jahre	0,31	10 - 50
Gewichteter Mittelwert Gesamtbevölkerung	1	10 - 40

<sup>1)</sup> Bundesrepublik Deutschland 1975

Tab. F8, 7-3:

Geschätzte Mittelwerte für das Leukämierisiko durch Strahlung niedriger LET

bei Annahme einer linear-quadratischen Dosis/Risiko-Beziehung für Strahlung niedriger LET mit einem von der Dosisleistung abhängigen quadratischen Term ist zu erwarten, daß unter diesen Bestrahlungsbedingungen der Risikoeffizient für Leukämie eher an der Untergrenze des in Tabelle F8, 7-3 angegebenen Risikobereiches liegt. - Die ICRP /F8, 7-36/ empfiehlt für Zwecke des Strahlenschutzes einen Richtwert von  $20 \cdot 10^{-6}$ /rem, gemittelt über Alter und Geschlecht.

#### 7.4.4.2 Weibliche Brust

Die vorliegenden Daten über die Häufigkeit von Brustkrebs bei Frauen nach Einwirkung ionisierender Strahlung zeigen, daß die weibliche Brust wahrscheinlich eines der strahlenempfindlichsten Organe des menschlichen Körpers ist. So dürfte der Risikoeffizient für Brustkrebsinzidenz bei der am meisten gefährdeten weiblichen Altersgruppe von ca. 10 bis 35 Jahren den Wert für Leukämie um ein Mehrfaches übertreffen. Diese Beobachtung wurde im wesentlichen bei drei Kollektiven gewonnen, nämlich

bei den Atombomben-Überlebenden in Hiroshima und Nagasaki sowie bei Patientinnen, die aus diagnostischen oder therapeutischen Gründen strahlenexponiert worden waren. Für eine ausführliche Darstellung der bisher vorliegenden Beobachtungen sei auf den Bericht von UNSCEAR /F8, 7-32/ sowie auf einen neueren Übersichtsartikel von Mole /F8, 7-67/ und darin zitierte Arbeiten verwiesen.

● Atombomben-Überlebende

Die neuesten Daten der LS-Studie für die Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki zeigen, daß in dem Zeitraum von 1950 bis 1974 in beiden Städten insgesamt 102 Todesfälle (Hiroshima: 78, Nagasaki: 24) und 350 Erkrankungen durch Brustkrebs auftraten /F8, 7-68/. Bild F8, 7-10 zeigt das aus dieser Erhebung resultierende zusätzliche Mortalitätsrisiko durch Brustkrebs in den verschiedenen Dosisgruppen.

Bei der Analyse der Altersabhängigkeit der Strahlenempfindlichkeit ist festzustellen, daß offensichtlich der Risikofaktor für weibliche Personen, die zum Zeitpunkt der Bestrahlung zwischen 10 und 20 Jahren alt waren, mehrfach höher ist (Mittelwert für Inzidenz  $34 (18-59)^1 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$ ) als der für ältere Frauen (Mittelwert  $6 (\text{neg}-23) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$ ). Während der letztgenannte Wert schon nicht statistisch signifikant ist, traten bei 2 757 weiblichen Personen in der Altersgruppe unter 10 Jahren zum Zeitpunkt der Bestrahlung bisher noch gar keine Todesfälle auf.

Bei der Bewertung dieser Aussage über die altersspezifische Strahlenempfindlichkeit für Brustkrebs sollte jedoch die Bedeutung der Wahl der Vergleichspopulation und der Zusammenfassung von Altersgruppen nicht übersehen werden. Wenn man die Personengruppe, die nur mit 0 - 9 rad Strahlendosis belastet wurde, zum Vergleich mit den Personen heranzieht, die mit mehr als 10 rad bestrahlt wurden, so traten bis 1972 in der Alters-

---

<sup>1)</sup> Die Zahlen in Klammern geben das 90%-Vertrauensintervall an.

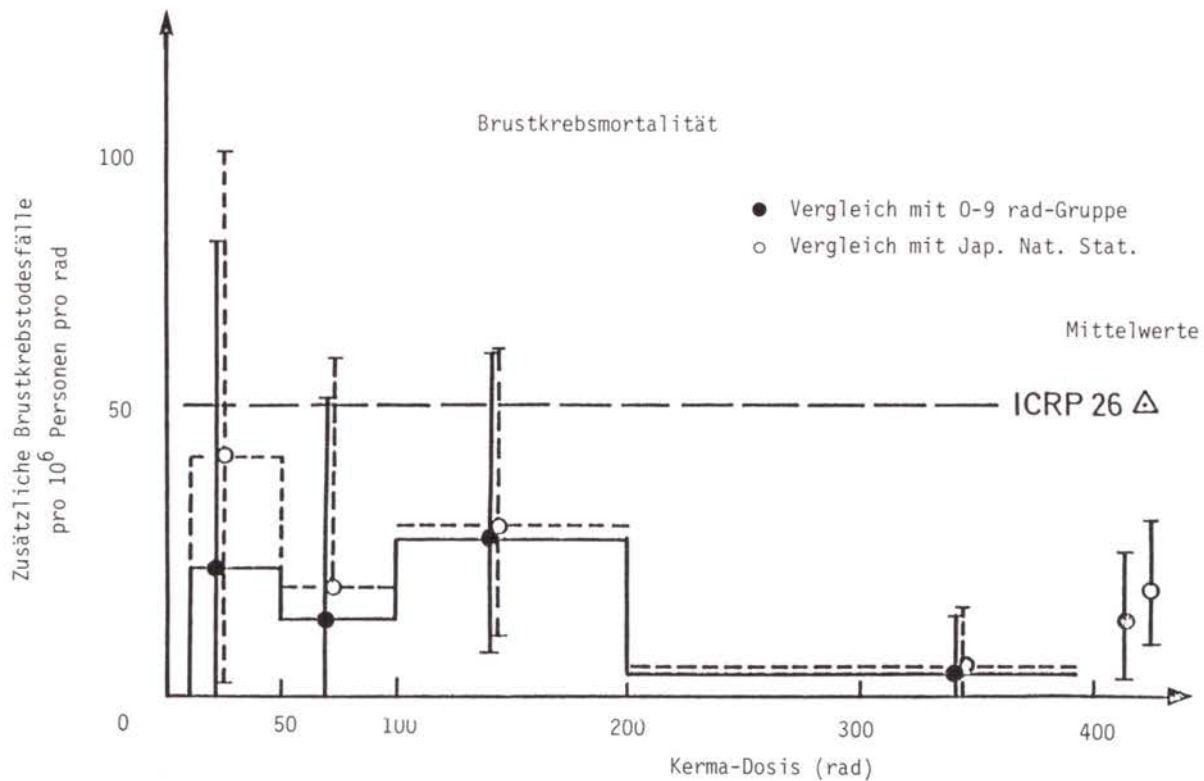


Bild F8, 7-10:

Zusätzliches Brustkrebs-Mortalitätsrisiko bei den Atombomben-Überlebenden in Abhängigkeit von der Strahlenexposition (Kerma)

gruppe 10 bis 19 Jahre zwar 10 Fälle statt der erwarteten 0,4 Todesfälle und in der Altersgruppe über 20 Jahre 27 statt der erwarteten 23,7 Fälle auf /F8, 7-32/. Mole weist aber darauf hin, daß dieser signifikante Unterschied verschwindet, wenn man die Altersgruppen zwischen 10 und 34 Jahren mit denen über 34 Jahre vergleicht und die japanische Nationalstatistik zur Berechnung der erwarteten Fälle benutzt /F8, 7-67/. Es werden jedoch berechnete Zweifel geäußert, ob die Lebensbedingungen der Bevölkerung beider Städte nach dem Atombombenabwurf mit denen der japanischen Restbevölkerung verglichen werden können /F8, 7-32/. Deshalb dürfte die Kerma-Gruppe mit 0 - 9 rad als Kontrollpopulation besser geeignet sein. In Bild F8, 7-11 sind zur Verdeutlichung dieser Unterschiede die Inzidenzraten für verschiedene Altersgruppen und verschiedene Kontrollpopulationen aufgetragen.

Aufgrund der geringen Anzahl aller Brustkrebsfälle - seien sie auf andere Ursachen oder auf Strahleneinwirkung zurückzuführen - läßt sich trotz des hohen Risikofaktors nur schwer eine quantitative Dosis/Wirkungs-Beziehung aus den Daten der Atombomben-Überlebenden ableiten. Hinzu kommt, daß in Zukunft noch weitere Fälle auftreten dürften. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die relative Zahl dieser zusätzlichen Fälle zudem noch vom Lebensalter der Frau bei der Bestrahlung abhängen dürfte. So ist noch unklar, ob die bislang noch befundfreie Personengruppe, die bei der Bestrahlung jünger als 10 Jahre alt war, künftig vielleicht einen höheren Risikofaktor aufweisen wird, wenn sie das Alter erreicht, zu dem möglicherweise hormonelle oder andere Einflüsse vorher latente Schädigungen offenkundig werden lassen. Es kann aber auch nur eine sehr geringe oder gar keine Risikoerhöhung eintreten, weil sich zum Zeitpunkt der Bestrahlung nur wenige Brustdrüsenzellen entwickelt hatten, die hätten geschädigt werden können /F8, 7-32/.

Eine vorsichtige Abschätzung der Anzahl der noch zu erwartenden Brustkrebsfälle läßt sich aus den Schätzwerten für die mittlere Latenzzeit für das Auftreten von Brustkrebs ableiten. Altersunabhängig sind 50 % aller zwischen 1950 und 1969 ent-

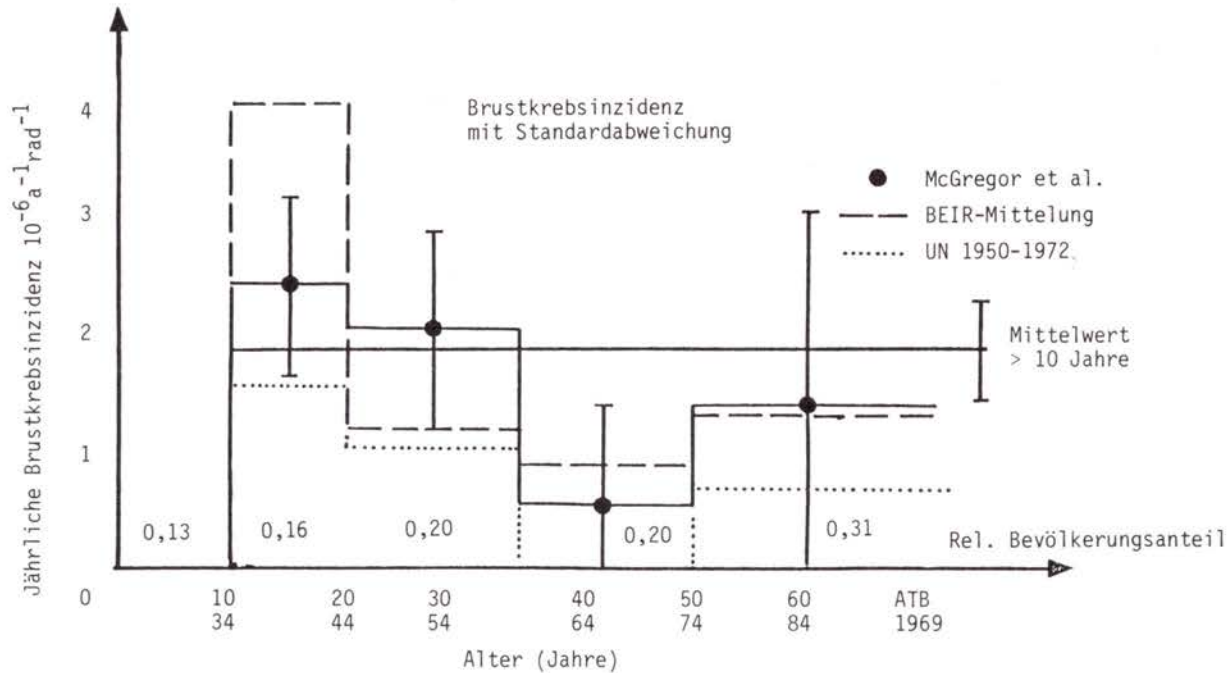


Bild F8, 7-11:

Zusätzliche mittlere Inzidenzrate von Brustkrebs und Standard-Abweichungen bei den Atombomben-Überlebenden in Abhängigkeit vom Alter bei Bestrahlung



deckten Brustkrebsfälle 18 Jahre nach der Bestrahlung aufgetreten. Auch andere Analysen kommen zu ähnlichen Werten von 22 bzw. 25 Jahren /F8, 7-69 und -70/.

Für ein bereits erfolgtes Überschreiten der maximalen jährlichen Inzidenzrate an strahleninduzierten Brustkrebsfällen spricht auch die Tatsache, daß im Zeitraum 1971 bis 1974 nur noch ein diesbezüglich neuer Todesfall aufgetreten ist, und zwar in der Gruppe mit mehr als 100 rad, gegenüber 5 bzw. 3 Fällen in den vorausgehenden Vierjahresintervallen. Es ist deshalb zu erwarten, daß sich insgesamt die Zahl der Brustkrebsfälle höchstens um die Hälfte erhöhen wird, verglichen mit dem augenblicklichen Stand, der in Bild F8, 7-10 dargestellt ist.

Aus einer detaillierten Analyse dieser Daten leiten McGregor et al. /F8, 7-71/ eine mittlere Inzidenzrate pro Einheit der Energiedosis von  $2,6 \cdot 10^{-6}$ /rad · a für Hiroshima bzw.  $2,4 \cdot 10^{-6}$ /rad · a für Nagasaki ab, wobei der Mittelwert für Frauen unter 25 bei  $2,8 \cdot 10^{-6}$ /rad · a, der für Frauen über 35 Jahre bei  $1,25 \cdot 10^{-6}$ /rad · a liegt. Dabei wurde für die Umrechnung von Kerma in Energiedosis in der Brust  $D_Y/K_Y = 0,79$ ,  $D_p/K_n = 0,55$  und  $D_Y/K_n = 0,05$  angenommen (Anhang). Offensichtlich weicht für Brustkrebsinzidenz der Qualitätsfaktor für Neutronen nicht signifikant von eins ab. Aus diesen Werten wiederum hat Mole /F8, 7-67/, gestützt auf eine Analyse von Upton et al. /F8, 7-72/, einen zeitlich integrierten und über alle Altersgruppen gemittelten Risikofaktor für Inzidenz für die Frauen unter den Atombomben-Überlebenden von  $60 \cdot 10^{-6}$ /rad abgeschätzt. Die Mortalität lag bei diesem Kollektiv etwa um den Faktor 4 niedriger als die Inzidenz.

#### ● Brustkrebs nach diagnostischer Strahlenexposition

1965 hat Mackenzie /F8, 7-73/ erstmalig über gehäuftes Auftreten von Brustkrebs nach mehrfachen Röntgendurchleuchtungen im Rahmen der etwa von 1920 bis 1950 häufig eingesetzten Pneumothorax-Therapie von Lungentuberkulose berichtet. Myrden und

Hiltz /F8, 7-74/ setzten die Studie über diese Patienten an einem Krankenhaus in Neuschottland fort und fanden unter den 323 derart behandelten Männern keinen Fall von Brustkrebs, jedoch 22 Fälle bei 300 bestrahlten Patientinnen, die größtenteils zwischen 15 und 39 Jahre alt waren. Das entsprach etwa dem 6,5fachen jährlichen Inzidenzwert einer Vergleichspopulation. Später wurden noch 10 weitere Brustkrebsfälle bei insgesamt 326 Frauen gefunden /F8, 7-75/. Diese Fälle, von denen 14 letal verliefen, verteilen sich wie folgt auf die Altersgruppen /F8, 7-32/:

Alter [Jahre]	Anfängliche Zahl von Patientinnen	Brustkrebsfälle	Relative Häufigkeit [%]
0 - 19	59	6	10 (4-20)
20 - 29	181	23	13 (9-18)
30	86	3	4 (1-9)

In Klammern sind bei den relativen Häufigkeiten die Grenzen des 90-%-Vertrauensintervalls angegeben. Im Bericht von UNSCEAR wird hieraus eine Inzidenzrate von  $(30-140) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  mit einem 90-%-Vertrauensbereich von  $(20-200) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  abgeschätzt. Bis zu etwa 50 % höhere Werte können nicht ausgeschlossen werden, da die obigen Zahlen über den Tod von 104 Frauen und das Fehlen von 18 weiteren in der Kartei nicht korrigiert sind /F8, 7-32/.

Das Mortalitätsverhältnis betrug hier und auch bei einer entsprechenden Studie im Staate Massachusetts etwa 45 % gegenüber 25 % bei den Atombomben-Überlebenden. Mögliche Ursachen dafür werden von Boice et al. /F8, 7-76/ diskutiert. Bei der Massachusetts-Untersuchung von Boice und Monson /F8, 7-77/ wurden unter 1 074 bestrahlten Frauen statt der 23,3 erwarteten Brustkrebsfälle 41 gefunden, was einer Risikoerhöhung - nach einer mittleren Beobachtungsdauer von etwa 27 Jahren - von etwa  $0,7 \cdot 10^{-3}/\text{a}$  durch im Mittel 102 Durchleuchtungen entspricht. Bei einer mittleren Dosis von 1,5 rad pro Durchleuchtung lei-

ten die Autoren Risikofaktoren zwischen  $2,9$  und  $8,2 \cdot 10^{-6}/\text{rad} \cdot \text{a}$  bzw. um  $113 (50-190) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  ab, je nach verwendeter Kontrollpopulation und Auswertemethode. Auch hier zeigte sich die bereits erwähnte Altersabhängigkeit bei den Risikoeffizienten; so hatten die Frauen zwischen 13 und 20 Jahren ein Risiko von  $162 (74-285) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  gegenüber  $78 (\text{neg}-189) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  für diejenigen über 20 Jahre.

#### ● Brustkrebs nach therapeutischer Strahlenbehandlung

Von Mettler et al. /F8, 7-78/ wurden nach Strahlentherapie von 606 Patientinnen mit akuter "post partum"-Mastitis<sup>1)</sup> 13 Fälle von Brustkrebs entdeckt, anstatt 6 erwarteter Fälle. Die mittlere Dosis pro Brust lag bei 346 R und die Beobachtungsdauer zwischen 10 und 25 Jahren. Wenn allein die Strahlung für die zusätzliche Brustkrebsinzidenz verantwortlich sein sollte, ergäbe sich aus diesen Daten ein Risikofaktor von  $55 (15-115) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  bzw. - nach Korrektur für die Latenzzeit - von  $6 \cdot 10^{-6}/\text{rad} \cdot \text{a}$  (BEIR-Report, 1972, S. 144), d.h. von  $150 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  Fällen in 25 Jahren.

Zu ähnlichen Werten kommt auch eine neuere Arbeit von Shore et al. /F8, 7-79/ über denselben Personenkreis, der im wesentlichen von 1940 bis 1955 durch Radiologen in Rochester behandelt wurde. Abweichend von der sonst zu beobachtenden starken Altersabhängigkeit des Risikofaktors, finden diese Autoren keinen signifikanten Unterschied zwischen der Altersgruppe von 15 bis 30 Jahren ( $7,9 \cdot 10^{-6}/\text{rad} \cdot \text{a}$ ) und der Gruppe von 30 bis 40 Jahren ( $9,2 \cdot 10^{-6}/\text{rad} \cdot \text{a}$ ). Sieben der inzwischen aufgetretenen 37 Brustkrebsfälle verliefen tödlich, was einer Rate von ca. 20 % entspricht, gegenüber 45 % bei diagnostischer Bestrahlung oder 25 % bei den Atombomben-Überlebenden.

---

<sup>1)</sup> Entzündung der Brustdrüse nach der Geburt

Eine weitere Untersuchung von Baral et al. /F8, 7-70/ über Brustkrebsinzidenz nach therapeutischer Strahlenanwendung in Schweden zeigt jedoch wieder eine deutliche Altersabhängigkeit der Brustkrebsinzidenz (Bild F8, 7-12). Hierbei wurden insgesamt 1 115 Frauen zwischen 1927 und 1957 wegen gutartiger Erkrankungen der Brust, hauptsächlich wegen Fibroadenomatosis<sup>1)</sup>, aber auch wegen akuter (120 Fälle) bzw. chronischer (49 Fälle) Mastitis bestrahlt. Die mittlere Dosis pro Brust war mit 845 rad ziemlich hoch. Während der mittleren Beobachtungsdauer von 31,5 Jahren traten 115 Brustkrebsfälle in der bestrahlten Brust auf, woraus sich ein zusätzliches Strahlenrisiko von  $87 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  pro Brust oder  $175 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  pro Patientin ableiten läßt. Bis auf 9 Fälle lag die mittlere Latenzzeit - je nach Dosis - zwischen 19 und 26 Jahren, wobei bei abnehmender Dosis systematisch etwas längere Zeiten auftraten. Dieser Effekt kann jedoch auch auf die Altersstruktur der Patientenpopulation zurückzuführen sein /F8, 7-70/.

#### ● Schlußfolgerungen zum Brustkrebsrisiko durch Strahlung

Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen bei den drei oben erwähnten Personenkollektiven sind in Tabelle F8, 7-4 in Anlehnung an Boice et al. /F8, 7-76/ zusammengefaßt. Daraus läßt sich entnehmen, daß alle Erfahrungen auf einen mittleren Risikofaktor von  $(50-200) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  für die untersuchten Personen hinsichtlich der Strahleninduktion von Brustkrebs bei Frauen hinweisen. Der aus den Erhebungen bei den Atombomben-Überlebenden resultierende Wert liegt an der Untergrenze dieses Bereichs. Gründe für die eventuell geringere Brustkrebsempfindlichkeit bei den Frauen in Japan werden im Bericht von UNSCEAR /F8, 7-32/ und von Upton et al. /F8, 7-72/ diskutiert.

---

<sup>1)</sup> drüsige Strukturen enthaltende Bindegewebsgeschwülste

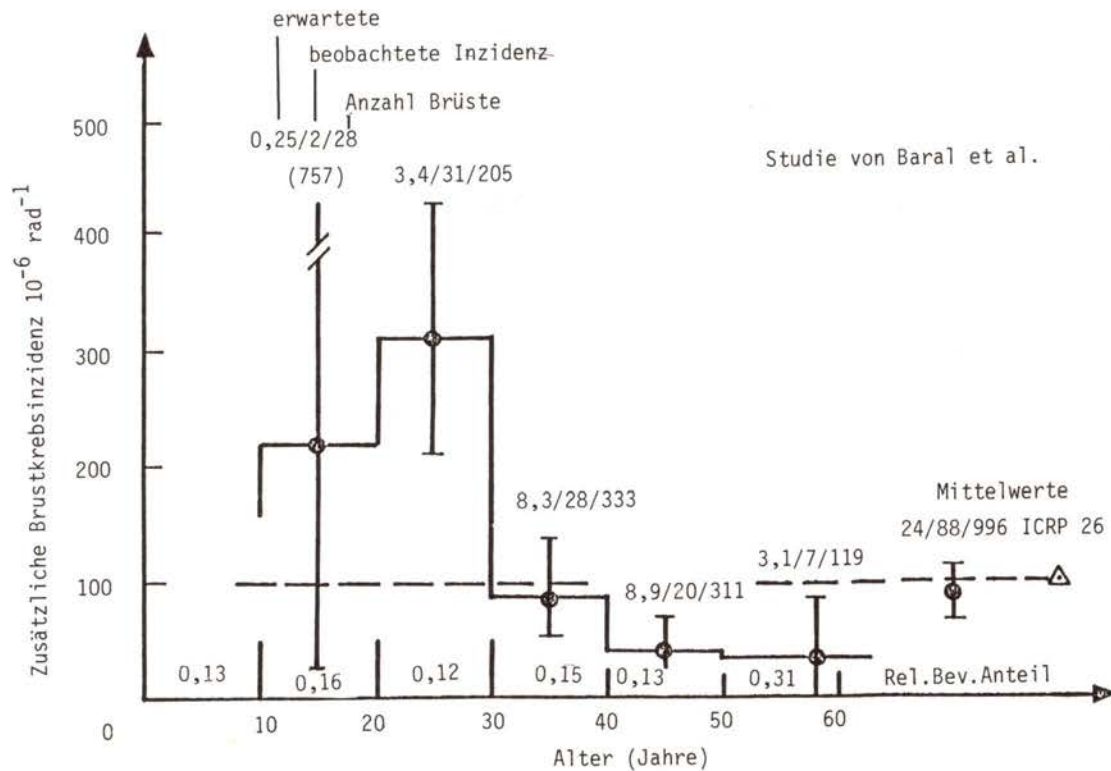


Bild F8, 7-12:

Zusätzliche Brustkrebsinzidenz pro Dosiseinheit (mit 90-%-Vertrauensbereich) bei Frauen nach röntgentherapeutischer Bestrahlung (Studie von Baral et al., 1977 in Schweden)

Kollektiv	Personen	Personen × Jahre	Strahlenart Dauer der Be- strahlung bzw. Behandlung	Alter bei Bestrahlung (Mittelwert)	Brustdosis in rad (Mittelwert)	Beobachtungs- dauer in Jahren (Mittelwert)	Brustkrebs- inzidenzrate [10 <sup>-6</sup> /rad·a] (90%-Vertrauensbereich)	Inzidenz [10 <sup>-6</sup> /rad]	Mortalität, Altersab- hängigkeit
<u>Atombomben- Überlebende</u> Ref. /F8,7-28, -71/ (10 + Jahre, >10 rad)	11 968	235 345	γ + n, < 10 s	> 10 Jahre (34)	10 - 450 (61)	5 - 24	2,5 (1,3 - 3,6)	60	25 %, 2- bis 4-fache Empfindlichkeit ≤35 J. im Vergleich zu >35 J.
<u>Fluoroskopie</u> Neuschottland /F8, 7-32, -33, -72, -79/	243	3 708	Diagnostische Röntgenstrah- len 70-85 kVp, Wochen - Jahre	0 - 60 + (26)	50 - 7000 (1 215)	10 - 30	8,4	30 - 140 (20 - 200) /F8,7-32/ 150 /F8,7-72/	45 %, 20/234 zu- sätzliche Fälle ≤29 J. 0/66 zu- sätzliche Fälle ≥30 J.
Massachusetts /F8, 7-76/	1 047	18 511	Diagnostische Röntgenstrah- len 70-85 kVp, Tage - Jahre	5 - 55 (25)	1 - 1027 (150)	10 - 44 (27)	6,2 (2,8 - 10,7)	110 /F8, 7-32/ (50-190) /F8,7-72/	18/804 zu- sätzliche Fälle ≤29 J. 0/243 zu- sätzliche Fälle ≥30 J.
<u>Radiotherapie</u> Akute "post partum"-Mastit- is, New York /F8, 7-28, -32, -75/	606	9 301	Therapeutische Röntgenstrah- len 175-250 kVp, Minuten - Wochen	15 - 44 (27)	40 - 1200 (247)	10 - 34 (25)	8,3 (3,1 - 16,0)	200 /F8,7-28/	20 %, 20/560 zu- sätzliche Fälle unter 40 Jahren
Gutartige Brustkrankhei- ten, Stockholm /F8, 7-28, -70, -76/	1 105		Therapeutische Röntgenstrah- len	10 - 50 +	(845)	6 - 42 (31,5)	5,6	175 /F8,7-32/	4fache Emp- findlich- keit ≤30 J. im Vergleich zu >30 J.

Tab. F8, 7-4:

Zusammenstellung der Daten über eine erhöhte Inzidenz von Brustkrebs bei Frauen nach Bestrahlung

Die Beobachtungen lassen ferner den Schluß zu, daß Mädchen bzw. Frauen im Alter von 10 bis 40 Jahren zum Zeitpunkt der Bestrahlung deutlich empfindlicher sind als Mädchen unter 10 Jahren bzw. Frauen über 40 Jahre. In der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland entfällt auf diese empfindliche Altersgruppe, für die ein Risikofaktor (Inzidenz) von  $(100-300) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  angesetzt werden kann, ein Anteil von etwa 40 % der weiblichen Bevölkerung.

Wichtet man aufgrund der beschriebenen Ergebnisse die altersspezifischen Risikofaktoren mit dem relativen Anteil der einzelnen Altersgruppen in der bundesdeutschen Bevölkerung, so erhält man einen Mittelwert des Risikofaktors für die gesamte weibliche Bevölkerung von etwa  $(50-150) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  (Tabelle F8, 7-5).

Altersgruppen	Relativer Bevölkerungsanteil <sup>1)</sup>	R/D <sup>BR</sup> [ $10^{-6}/\text{rad}$ ]	
Kinder (0 - 9 a)	0,13	0 - 10	
Jugendliche (10 - 19 a)	0,16	100 - 300	
Erwachsene (20 - 29 a)	0,12	200 - 350	
	(30 - 39 a)	0,15	50 - 150
	(40 - 49 a)	0,13	25 - 75
	( ≥ 50 a)	0,31	20 - 50
Gewichteter Mittelwert Gesamtbevölkerung	1	50 - 150	

<sup>1)</sup> Bundesrepublik Deutschland 1975

Tab. F8, 7-5:

Geschätzte Mittelwerte für das Brustkrebsrisiko (Inzidenz) von Frauen durch Strahlung niedriger LET

Die ICRP geht in ihren Empfehlungen von einem Referenzwert für das Inzidenzrisiko von Brustkrebs bei Frauen von  $100 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  - gemittelt über alle Altersgruppen - aus. Berücksichtigt man ferner, daß Brustkrebs stets nur in weniger als der Hälfte der

Fälle tödlich verläuft, so ergibt sich ein Mittelwert über das Alter und beide Geschlechter von  $25 \cdot 10^{-6}$ /rad für Brustkrebsmortalität, wie ihn auch die ICRP als Richtwert für den Strahlenschutz empfiehlt.

#### 7.4.4.3 Lunge

##### ● Atombomben-Überlebende

Bild F8, 7-13 zeigt die Differenz zwischen dem beobachteten und dem erwarteten spontanen Lungenkrebsrisiko bei den Atombomben-Überlebenden (LS-Studie) von Hiroshima (oberes Bild) und Nagasaki (unteres Bild) als Funktion der Kerma im Gewebe; zum Vergleich sind die Werte für den Zeitraum 1950 bis 1972 /F8, 7-32 und -38/ und 1950 bis 1974 (nach Beebe et al. /F8, 7-46/) gegenübergestellt.

Unter Berücksichtigung der eingetragenen 90%-Vertrauensbereiche folgt, daß bei den Überlebenden in beiden Städten in keiner Dosisgruppe eine statistisch signifikante Erhöhung der Lungenkrebshäufigkeit festzustellen war. Im Fall von Hiroshima liegen die beobachteten Mittelwerte in den Dosisgruppen über 10 rad über dem erwarteten Spontanwert; diese Erhöhung ist jedoch in keiner Dosisgruppe statistisch signifikant, wie die eingetragenen 90%-Vertrauensbereiche zeigen. In Nagasaki liegt nur der Mittelwert der Dosisgruppe von 100 - 200 rad über der erwarteten spontanen Häufigkeit. Eine quantitative Aussage über das strahleninduzierte Lungenkrebsrisiko durch Strahlung niedriger LET ist daher aus den Beobachtungen von Nagasaki nicht ableitbar.

Für Hiroshima ist eine grobe Abschätzung des Risikoeffizienten möglich, wenn man die Gesamtzahl der Lungenkrebsfälle, summiert über alle Dosisgruppen, betrachtet. Unter den 16 730 Personen mit einer Kerma von mehr als 10 rad, die von der LS-Studie in Hiroshima erfaßt wurden, starben im Zeitraum von 1950 bis 1974 insgesamt 97 Personen an Lungenkrebs, während aufgrund der



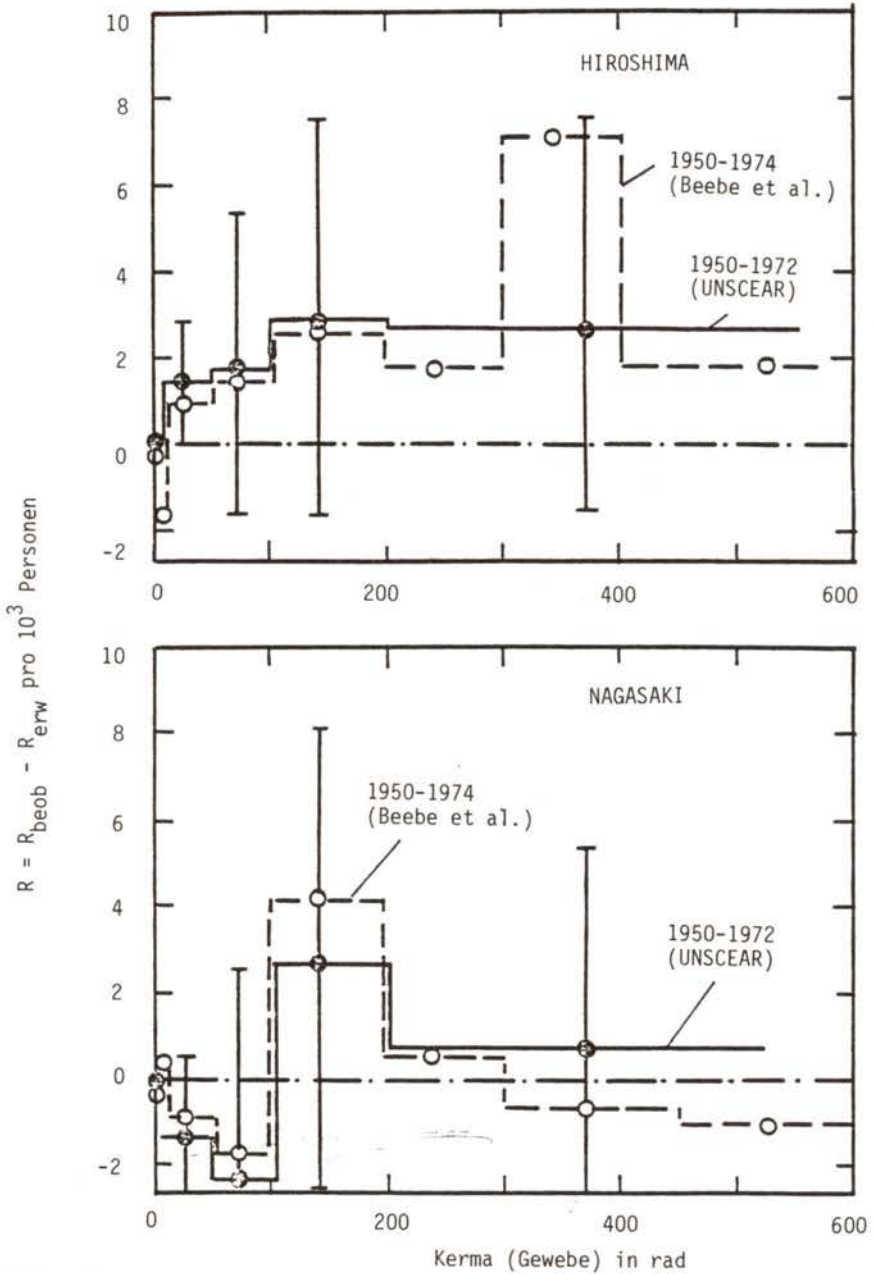


Bild F8, 7-13:

Zusätzliche Lungenkrebshäufigkeit bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima (oben) und Nagasaki (unten) in Abhängigkeit von der Strahlenexposition (Kerma)

normalen Lungenkrebshäufigkeit nur 74 Fälle erwartet wurden /F8, 7-46/.

Da die mittlere Kerma dieser Personengruppe etwa 70 rad betrug, wovon etwa 25 % auf Neutronen und 75 % auf  $\gamma$ -Strahlen entfallen, folgt aus der Zahl der 23 zusätzlichen Fälle ein Risikokoeffizient von etwa  $20 \cdot 10^{-6}$ /rad Kerma (90-%-Vertrauensbereich  $(8-40) \cdot 10^{-6}$ /rad). Geht man von einem Lungendosis/Kerma-Verhältnis von 0,3 für Neutronen und von 0,78 für  $\gamma$ -Strahlen (Anhang) aus, so ergibt sich für den Zeitraum von 1974 ein Risikokoeffizient von etwa  $30 \cdot 10^{-6}$ /rad Lungendosis bzw. bei Berücksichtigung eines Qualitätsfaktors von 10 für den n-Anteil ein Wert von etwa  $10 \cdot 10^{-6}$ /rem (90-%-Vertrauensbereich  $(4-20) \cdot 10^{-6}$ /rem). Dieser Risikowert steht nicht im Widerspruch zu dem beobachteten Lungenkrebsrisiko in Nagasaki (Bild F8, 7-13), wenn man den statistischen Fehler dieser Daten in Betracht zieht.

Eine wichtige Information zur Abschätzung der integralen Risikokoeffizienten liefert die beobachtete Altersabhängigkeit des zusätzlichen Lungenkrebsrisikos, die in Bild F8, 7-14 (ausgezogene Kurve), summiert über alle Dosisgruppen, aufgetragen ist. Daraus geht hervor, daß die zusätzlichen Lungenkrebsfälle fast ausschließlich auf die beiden oberen Altersgruppen (Alter  $> 35$  a) entfallen. Während in der ältesten Gruppe ( $> 50$  a) nach nunmehr 30 Jahren keine wesentliche Zunahme mehr zu erwarten ist, deuten die Beobachtungen des zeitlichen Verlaufs der Risikorate auf eine weitere Zunahme in den Altersgruppen von 20 bis 34 Jahre und 35 bis 49 Jahre hin. Die unter Berücksichtigung einer mittleren Latenzzeit von 20 bis 30 Jahre zu erwartenden integralen Risikokoeffizienten in diesen beiden Gruppen sind in Bild F8, 7-14 gestrichelt eingetragen. Es sei darauf hingewiesen, daß frühere Fehler bei der Identifizierung von Lungenkrebs im Rahmen der LS-Studie in den neuen Daten von Beebe et al. /F8, 7-46/, die dieser Risikoabschätzung zugrunde gelegt wurden, revidiert worden sind.

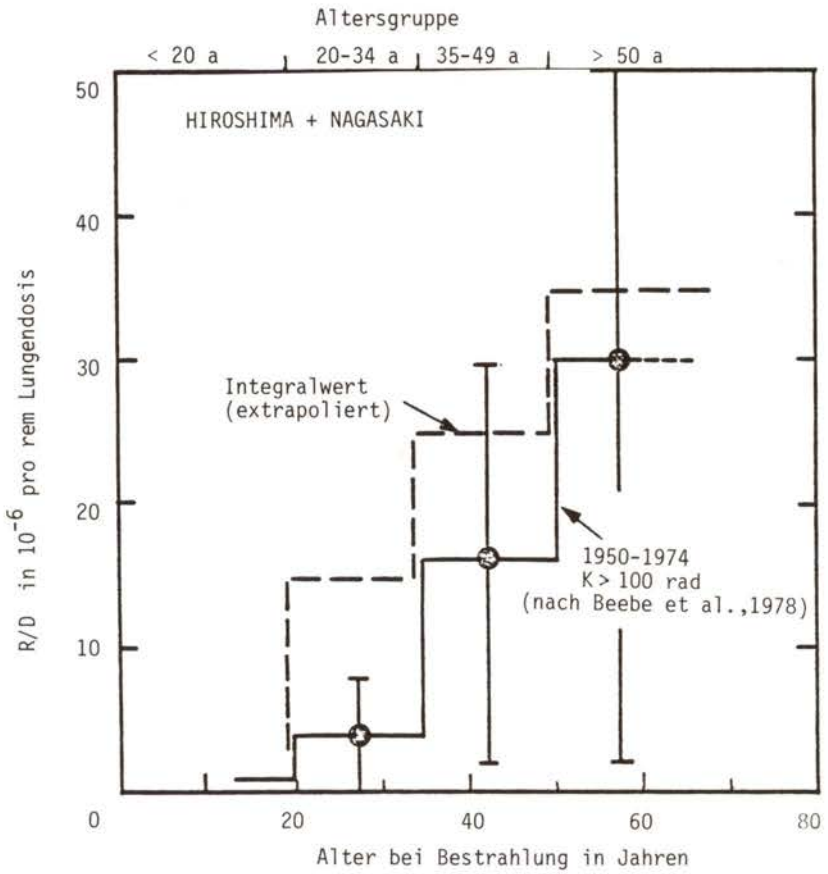


Bild F8, 7-14:

Zusätzliches Lungenkrebsrisiko in verschiedenen Altersgruppen der Atombomben-Überlebenden

● Röntgenstrahlenbehandelte Bechterew-Patienten

Die bereits erwähnten Studien an Bechterew-Patienten ergaben nicht nur eine Erhöhung des Leukämierisikos (Abschnitt 7.4.4.1), sondern auch des Lungenkrebsrisikos bei diesen Patienten /F8, 7-48 und -49/. Bei 6 838 Patienten, deren mittlere Dosis im spinalen Knochenmark etwa 880 rad betrug - entsprechend einer mittleren RKM-Dosis von 320 rad -, wurde im Zeitraum von 6 bis 17 Jahren nach der Strahlenbehandlung eine zusätzliche Lungenkrebshäufigkeit von 0,46 % festgestellt.

Dolphin et al. /F8, 7-80/ schätzen die mittlere Lungendosis dieser Patienten auf 80 rad. Mit diesem Wert ergibt sich für den genannten Zeitraum ein Risikokoeffizient für Lungenkrebs von etwa  $60 \cdot 10^{-6}$ /rad. Geht man von den Dosisberechnungen von Kramer et al. /F8, 7-81/ aus, so wäre zu erwarten, daß bei einer Bestrahlung von vorn mit großen Feldflächen das Verhältnis der mittleren RKM-Dosis zur Lungendosis annähernd gleich 1 ist; danach würde sich ein Risikokoeffizient von etwa  $15 \cdot 10^{-6}$ /rad für die Lunge ergeben.

Diese Betrachtungen zeigen, daß infolge der Unsicherheiten bei der Ermittlung der Lungendosis eine genauere Abschätzung des Risikokoeffizienten für die Lunge aus dieser Studie nicht möglich ist /F8, 7-32/.

● Radon-222-exponierte Bergarbeiter

Epidemiologische Erhebungen in mehreren Ländern haben gezeigt, daß bei Bergarbeitern in Gruben mit einem relativ hohen Radon-222-Gehalt der Grubenluft die Bronchialkrebshäufigkeit deutlich erhöht ist. Die zusätzliche Inzidenz ist annähernd proportional der kumulierten Radon-222-Exposition der Arbeiter und wird auf die Strahlenbelastung der Lunge, insbesondere der Bronchien, durch die  $\alpha$ -Strahlung der inhalierten kurzlebigen Zerfallsprodukte des Radon-222 zurückgeführt. Bild F8, 7-15 zeigt als Beispiel die beobachtete zusätzliche Lungenkrebshäufigkeit

bei Uranbergarbeitern in der CSSR in Abhängigkeit von ihrer Exposition durch Radon-Zerfallsprodukte /F8, 7-82/.

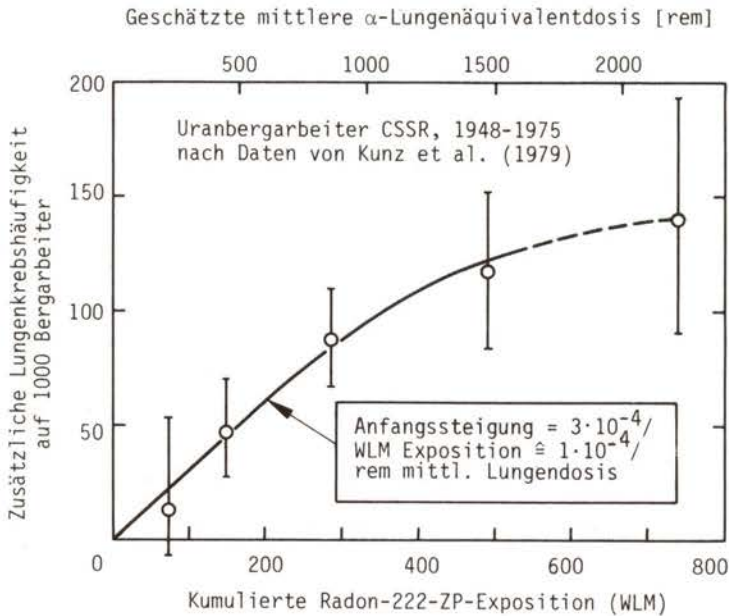


Bild F8, 7-15:

Beobachtete zusätzliche \*Lungenkrebshäufigkeit bei Uranbergarbeitern in der CSSR in Abhängigkeit von ihrer Exposition durch kurzlebige Radon-222-Zerfallsprodukte; angegeben sind die Mittelwerte und 95-%-Vertrauensbereiche

Die Ergebnisse dieser Studien sind ausführlich in anderen Publikationen zusammenfassend beschrieben worden /F8, 7-32 und -83/, so daß auf diese Arbeiten verwiesen werden kann. Daraus geht hervor, daß das Verhältnis des zusätzlichen Lungenkrebsrisikos zur kumulierten Radon-222-Exposition (Einheit: 1 Working-Level-Month, abgekürzt WLM) im Bereich von  $(100-500) \cdot 10^{-6}$  /WLM liegt. Bei Annahme eines Qualitätsfaktors von 20 für die  $\alpha$ -Strahlung der Radon-222-Zerfallsprodukte in der Lunge /F8, 7-36/ entspricht 1 WLM einer mittleren Äquivalentdosis von etwa

10 - 20 rem in der Basalzellschicht des Bronchialbaums und von etwa 3 rem in der gesamten Lunge /F8, 7-84 und -85/. Mit diesen Konversionsfaktoren ergibt sich ein Risikoeffizient im Bereich von  $(5-50) \cdot 10^{-6}$ /rem Bronchialdosis (Basalzellen) bzw. von  $(30-150) \cdot 10^{-6}$ /rem Lungendosis. Die Ergebnisse deuten ferner auf eine Altersabhängigkeit dieses Koeffizienten hin, die angenähert derjenigen für Lungenkrebs bei den Atombomben-Überlebenden entspricht /F8, 7-32 und -86/.

Es ist wahrscheinlich, daß das erhöhte Lungenkrebsrisiko dieser Bergarbeiter nicht nur durch die Strahlung allein verursacht wird, sondern auch andere bergbauspezifische Faktoren einen Einfluß haben. Die Übertragbarkeit des aus diesen Erhebungen an Bergarbeitern, insbesondere Uranbergarbeitern, abgeleiteten Risikofaktors auf die Bevölkerung ist daher fragwürdig. Vergleichende Analysen der natürlichen Radon-222-Exposition der Bevölkerung und der spontanen Lungenkrebshäufigkeit bei Nichtrauchern deuten darauf hin, daß unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Atemrate der mittlere Lungenkrebsrisikoeffizient für die Bevölkerung durch Inhalation von Radon-222-Zerfallsprodukten kleiner ist als  $100 \cdot 10^{-6}$ /WLM, d.h. an der Untergrenze des oben angegebenen Bereichs für Radon-222-exponierte Bergarbeiter oder darunter liegt /F8, 7-87/.

Ferner muß darauf hingewiesen werden, daß die Abschätzung der Radon-Exposition der Bergarbeiter bei diesen Erhebungen mit einer erheblichen Unsicherheit behaftet ist.

#### ● Schlußfolgerungen zum Lungenkrebsrisiko durch Strahlung

Eine quantitative Aussage über die mögliche Erhöhung des Lungenkrebsrisikos durch Strahlung ist nur aufgrund der Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und bei Radon-222-exponierten Bergarbeitern möglich. Da in beiden Fällen die Exposition vorwiegend durch Strahlung hoher LET verursacht wurde, sind bei der Übertragung auf Strahlung niedriger

LET die Unterschiede der relativen biologischen Wirksamkeit bzw. des Qualitätsfaktors zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf die Besonderheiten der Strahlenexposition der Bergarbeiter erscheint es vernünftiger, bei der Beurteilung des Lungenkrebsrisikos der Bevölkerung durch Strahleneinwirkung von außen oder durch Inhalation von  $\beta$ -emittierenden Radionukliden den Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden ein größeres Gewicht beizumessen. In Anlehnung an Bild F8, 7-14 können folgende Erwartungswerte für das Verhältnis der strahlungsbedingten Erhöhung des Lungenkrebsrisikos in der Bevölkerung zur Äquivalentdosis in der Lunge angesetzt werden:

Altersgruppe	Relativer Bevölkerungsanteil <sup>1)</sup>	R/D <sup>LG</sup> [10 <sup>-6</sup> /rem]
Kinder (0 - 9 a)	0,14	≤ 10
Jugendliche (10 - 19 a)	0,15	≤ 10
Erwachsene (20 - 34 a)	0,20	10 - 20
(35 - 49 a)	0,20	10 - 30
(≥ 50 a)	0,31	10 - 50
Gewichteter Mittelwert Gesamtbevölkerung	1	10 - 30

<sup>1)</sup> Bundesrepublik Deutschland 1975

Tab. F8, 7-6:

Geschätzte Mittelwerte für das Lungenkrebsrisiko durch Strahlung niedriger LET

Unter Berücksichtigung der Anteile der einzelnen Altersgruppen an der Gesamtbevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1975 ergibt sich ein Risikoeffizient für die Gesamtbevölkerung im Bereich von  $(10-30) \cdot 10^{-6}/\text{rem}$ , so daß als Mittelwert  $20 \cdot 10^{-6}/\text{rem}$  angenommen werden kann. Dies entspricht dem Richtwert, der von der ICRP für Zwecke des Strahlenschutzes empfohlen wird /F8, 7-36/.

Es sei darauf hingewiesen, daß diese Risikokoeffizienten aus Bestrahlungen mit relativ hohen Dosen und im Fall der Atombomben-Überlebenden auch mit hoher Dosisleistung abgeleitet wurden. Ihre Übertragung auf kleine Dosen von Strahlung niedriger LET unter Anwendung einer proportionalen Dosis/Risiko-Beziehung kann zu einer Überschätzung des realen Risikos führen und ist daher nur mit Vorbehalt möglich.

#### 7.4.4.4 Gesamtheit der Verdauungsorgane

##### ● Atombomben-Überlebende

Aufgrund der Daten der LS-Studie /F8, 7-46/, die den Zeitraum bis Ende 1974 erfassen, ist eine signifikante Erhöhung nur für die Krebsinzidenz im Magen und der Speiseröhre bei den Überlebenden von Hiroshima feststellbar. Demgegenüber ist im Fall von Nagasaki die Zahl der Krebsfälle in Verdauungsorganen zu gering, um eine signifikante Erhöhung durch den Einfluß der Strahlung erkennen zu können.

Eine Risikoabschätzung ist nur bei Summierung über alle Dosisgruppen möglich. In Tabelle F8, 7-7 sind die aus der LS-Studie /F8, 7-46/ resultierenden Werte des zusätzlichen Risikos pro Einheit der Kerma für Speiseröhre, Magen und Dickdarm sowie insgesamt für alle Verdauungsorgane (einschließlich Leber, Gallenblase und Pankreas) zusammengestellt. Die festzustellende signifikante Erhöhung von Magenkrebs basiert auf einer neuen Analyse der Daten durch Nakamura /F8, 7-88/. Zusätzlich sind die Werte für die Krebshäufigkeit der Leber und der Bauchspeicheldrüse eingetragen, die sich aus dem japanischen Tumorregi-ster für den Zeitraum von 1950 bis 1970 ergeben.

Aus Tabelle F8, 7-7 geht hervor, daß das gesamte zusätzliche Risiko, summiert über die Verdauungsorgane, für Hiroshima im Bereich von etwa  $(10-40) \cdot 10^{-6}$ /rad Kerma liegt. Berücksichtigt man den n-Anteil der Kerma in Hiroshima (ca. 25 %) und setzt man für die Verdauungsorgane die Dosis/Kerma-Konversionsfakto-



ren  $D_n/K_n \approx 0,3$ ;  $D_\gamma/K_\gamma \approx 0,72$  an (Anhang), so ergibt sich ein Risikokoeffizient im Bereich von  $(20-60) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  Energiedosis bzw. bei Ansatz eines Qualitätsfaktors 10 für Neutronen von etwa  $(10-30) \cdot 10^{-6}/\text{rem}$  Äquivalentdosis.

Organ	R/K [ $10^{-6}/\text{rad Kerma}$ ]			
	HIROSHIMA		NAGASAKI	
	K > 10 rad $\bar{K} = 73$ rad	K > 100 rad $\bar{K} = 243$ rad	K > 10 rad $\bar{K} = 108$ rad	K > 100 rad $\bar{K} = 241$ rad
Speiseröhre	5,0	7,5 (1 - 15)	1,3	- 2
Magen	12 (neg.-25)	20 (3 - 36)	- 2	- 2
Dickdarm	-2,5	- 3	-2,5	- 3
Bauchspeicheldrüse <sup>1)</sup>	0 (neg. - 5)		4 (0 - 8)	
Leber <sup>1)</sup>	4 (2 - 7)		4 (2 - 7)	
Gesamtheit der Verdauungsorgane	13 (0 - 25)	33 (2 - 50)	4 (neg.-15)	4 (neg.-20)

<sup>1)</sup> nach Daten des Tumorregisters 1950 - 1970

Tab. F8, 7-7:

Integrale Krebshäufigkeit pro Kerma-Einheit im Magen-Darm-Trakt und anderen Verdauungsorganen bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki, 1950 - 1974 (LS-Studie /F8, 7-46/; in Klammern 90-%-Vertrauensbereich)

Im Hinblick auf die Abschätzung des möglichen integralen Strahlenkrebsrisikos in den Verdauungsorganen ist die beobachtete Altersabhängigkeit des Risikokoeffizienten zu berücksichtigen, die in Bild F8, 7-16 aufgetragen ist. Dabei wurden die Daten der LS-Studie für Hiroshima und Nagasaki von 1950 bis 1974 zu-

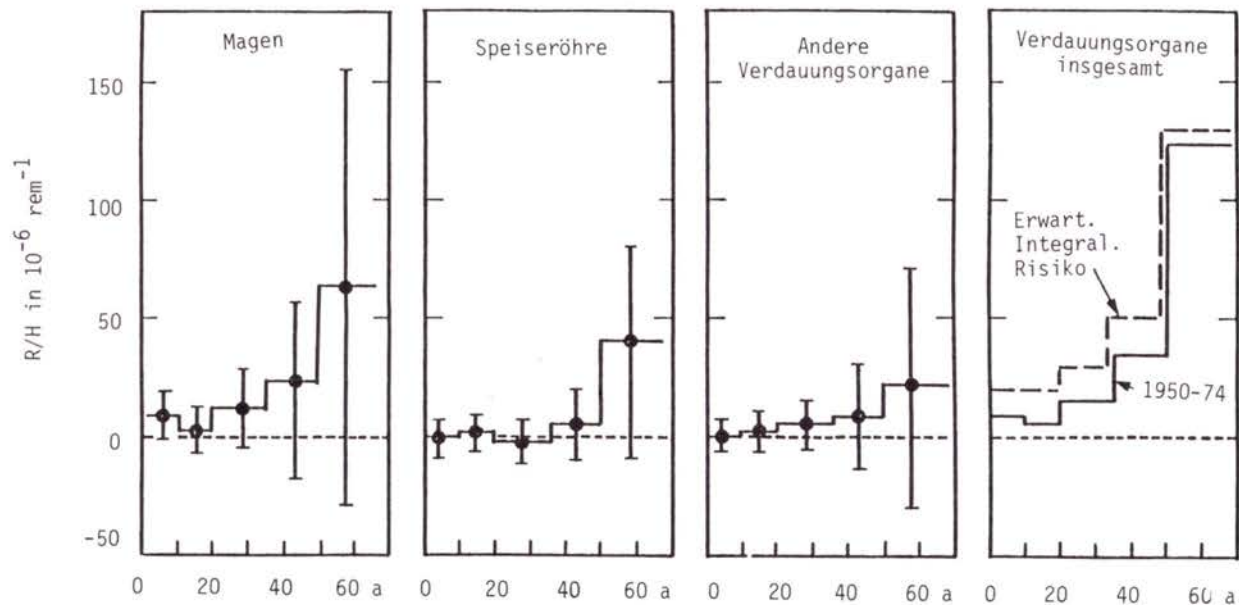


Bild F8, 7-16:

Zusätzliches Krebsrisiko in Verdauungsorganen pro Einheit der Äquivalentdosis bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki in Abhängigkeit vom Alter bei Bestrahlung (Mittelwerte und 90-%-Vertrauensbereich nach Daten der LS-Studie, 1950-1974); berechnet mit  $Q = 10$  für Neutronen

grunde gelegt /F8, 7-46/ und ein Qualitätsfaktor 10 für Neutronen angesetzt. Aus Bild F8, 7-16 geht hervor, daß die beobachtete Erhöhung des Krebsrisikos zwar in keiner Altersgruppe statistisch signifikant ist, jedoch die Mittelwerte auf eine Erhöhung vor allem in den beiden oberen Altersgruppen (Alter > 35 a) hinweisen. Es deutet sich somit eine ähnliche Altersabhängigkeit wie beim Lungenkrebs an (Bild F8, 7-14). In den Folgejahren nach 1974 ist eine Erhöhung, vor allem in den unteren Altersgruppen, nicht auszuschließen. Im rechten Teilbild von Bild F8, 7-16 ist der Risikokoeffizient, summiert über die Verdauungsorgane, aufgetragen, der sich für den Zeitraum bis 1974 ergibt. Geht man von einer mittleren Latenzzeit für die Krebsinzidenz in den Verdauungsorganen von 20 bis 30 Jahren aus, so könnte in den unteren Altersgruppen (< 35 a) ein integraler Risikokoeffizient erreicht werden, der etwa doppelt so groß ist wie der Wert für den Zeitraum von 1950 bis 1974. Für die höchste Altersgruppe (> 50 a bei Bestrahlung) ist hingegen der relative Zuwachs vernachlässigbar. Die Altersabhängigkeit des mittleren integralen Risikokoeffizienten, summiert über alle Verdauungsorgane, dürfte somit annähernd der gestrichelten Kurve in Bild F8, 7-16 (rechtes Teilbild) entsprechen.

#### ● Strahlentherapie-Patienten

Zusätzlich zu den Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden liegen Untersuchungen an Röntgentherapie-Patienten vor, die auf eine Erhöhung der Krebshäufigkeit in Verdauungsorganen nach Unterleib- und Beckenbestrahlung hinweisen.

Bei einer Erhebung von 2 067 Frauen, die aus therapeutischen Gründen einer Unterleibbestrahlung mit Röntgenstrahlen ausgesetzt gewesen waren, wurden von Smith und Doll /F8, 7-51/ in einem Zeitraum von 19 Jahren nach der Bestrahlung 24 Fälle von Darmkrebs beobachtet, gegenüber 15 erwarteten Fällen. Aufgrund einer groben Abschätzung der mittleren Dosis im Dünndarm und Dickdarm ergeben sich folgende Näherungswerte für das Risiko/Dosis-Verhältnis /F8, 7-32/: Dünndarm  $10 (2-25) \cdot 10^{-6}$ /rad; Dick-

darm  $20 (2-60) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$ ; Rectum  $3 (0-10) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$ ; die Werte in Klammern geben den 90-%-Vertrauensbereich an. Ein ähnlicher Wert für den Dickdarm kann aus der Studie von Brinkley und Haybittle /F8, 7-52/ abgeleitet werden, die für 277 Frauen (Röntgenbestrahlung des Unterleibs) erhoben wurde. Ferner sind die Studien von Doll /F8, 7-49/ bei Bechterew-Patienten zu erwähnen, die auf eine Erhöhung der Krebsinzidenz für den Magen, den Dickdarm und die Speiseröhre hinweisen; infolge Unkenntnis der Organdosen ist jedoch bislang keine Aussage über das Risiko/Dosis-Verhältnis möglich.

In bezug auf die Induktion von Leberkrebs durch Strahlung liegen keine Informationen von röntgenbestrahlten Patienten vor. Jedoch wurde nach Inkorporation von Thorium bei Patienten, die mit dem Kontrastmittel Thorotrast behandelt worden waren, eine erhöhte Inzidenz von Leberkrebs festgestellt /F8, 7-59, -60 und -62/. Aus diesen Daten ergibt sich ein integrales Risiko/Dosis-Verhältnis für die Induktion von Leberkrebs von etwa  $100 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$   $\alpha$ -Dosis /F8, 7-32/ bzw. von  $5 \cdot 10^{-6}/\text{rem}$ , wenn man einen Qualitätsfaktor 20 für  $\alpha$ -Strahlung ansetzt. Dieser Wert stimmt angenähert mit dem Risikoeffizienten für Leberkrebs überein, der sich aus dem Tumor-Register für die Atombomben-Überlebenden ergibt (Tabelle F8, 7-7).

#### ● Schlußfolgerungen

Für Strahlung hoher LET ist eine Aussage über das mögliche Strahlenkrebsrisiko für die Verdauungsorgane aufgrund der Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden möglich. Danach wäre unter Berücksichtigung der beobachteten Altersabhängigkeit (Bild F8, 7-16) und der Altersverteilung der Bevölkerung ein Risiko/Dosis-Verhältnis - summiert über alle Verdauungsorgane (GV = Speiseröhre, Magen, Darm, Pankreas, Leber) - von etwa  $30-50 \cdot 10^{-6}/\text{rem}$  zu erwarten, wenn man einen Qualitätsfaktor 10 für Neutronen ansetzt.

Bezüglich des Krebsrisikos für die Verdauungsorgane durch Strahlung niedriger LET ist die statistische Signifikanz der verfügbaren Daten gering. Aus den Beobachtungen in Nagasaki ( $\gamma$ -Strahlung) ergibt sich für den Zeitraum von 1950 bis 1974 eine mittlere zusätzliche Inzidenzrate, summiert über alle Verdauungsorgane (GV), von etwa  $(0,4-0,5) \cdot 10^{-6}$ /Jahr und rad Kerma, woraus sich ein integrales Risiko/Dosis-Verhältnis von etwa  $30 \cdot 10^{-6}$ /rad bzw. rem ableiten läßt. Diese Erhöhung ist jedoch nur in dem Dosisbereich oberhalb 100 - 200 rad erkennbar und statistisch nicht signifikant. Die Erfahrungen bei Patienten nach therapeutischer Behandlung mit Röntgenstrahlen und Dosen im Bereich von 100 rad und höher deuten auf ein Risiko/Dosis-Verhältnis von etwa  $(30-50) \cdot 10^{-6}$ /rad bzw. rem hin.

Aus diesen Befunden ergibt sich für Strahlung niedriger LET angenähert folgende Altersabhängigkeit des Strahlenkrebsrisikos für die Gesamtheit der Verdauungsorgane (Tabelle F8, 7-8):

Altersgruppe [Jahre]	Relativer Bevölkerungsanteil <sup>1)</sup>	$R/D^{GV}$ [ $10^{-6}$ /rad]
0 - 9	0,14	$\leq 20$
10 - 19	0,15	$\leq 20$
20 - 34	0,20	20 - 30
35 - 49	0,20	20 - 50
$\geq 50$	0,31	30 - 100
Gewichteter Mittelwert Gesamtbevölkerung	1	20 - 50

<sup>1)</sup> Bundesrepublik Deutschland 1975

Tab. F8, 7-8:

Geschätzte Mittelwerte des Krebsrisikos für die Gesamtheit der Verdauungsorgane durch Strahlung niedriger LET

Für die Gesamtbevölkerung ergibt sich ein Mittelwert im Bereich von  $(20-50) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$ ; davon dürfte etwa ein Anteil von zwei Dritteln auf den Magen (mit Speiseröhre) und den Darm entfallen.

Da die Beobachtungen ausschließlich auf Bestrahlungen mit relativ hohen Dosen und hoher Dosisleistung basieren, ist eine Übertragung dieses Risikokoeffizienten auf niedrige Dosen bzw. langzeitige Bestrahlung mit niedriger Dosisleistung nur mit Vorbehalt möglich.

#### 7.4.4.5 Schilddrüse

Die Empfindlichkeit der Schilddrüse, zumindest bei externer Bestrahlung mit hoher Dosisleistung, scheint höher zu sein als die des roten Knochenmarks, was in Anbetracht der geringen Masse (im Mittel ca. 20 g) dieses Organs und der wenigen Epithelzellen, die die sensiblen Zellen der Schilddrüse zu sein scheinen, eigentlich erstaunlich ist. Andererseits ist die Sterblichkeit an Strahlenspät Schäden der Schilddrüse jedoch wegen der günstigen pathologischen Eigenschaften der meisten Neubildungen einerseits und der guten Erfolgsaussichten therapeutischer Maßnahmen andererseits dennoch deutlich geringer als bei Leukämie und den anderen Krebsarten.

Die relativ vielen Daten über Schilddrüsenkrebs stammen im wesentlichen aus vier Beobachtungsgruppen, nämlich von Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki, von Bewohnern der Marshall-Inseln und St. George, Utah, die dem Nahfallout von Kernwaffenversuchen ausgesetzt gewesen waren, sowie von Patienten, deren Schilddrüse im Rahmen medizinischer Maßnahmen extern mit Röntgenstrahlen oder intern mit Jod-131 bestrahlt wurde. Als bemerkenswert sei bereits hier die mehrfach erhöhte Empfindlichkeit von Frauen gegenüber Männern, die beobachtete höhere Wirksamkeit von Röntgenstrahlen gegenüber J-131 und die Tatsache erwähnt, daß in einer Studie bereits bei 6 - 7 rem Schilddrüsendosis (durch Röntgen-Streustrahlung) eine Erhöhung

der natürlichen Inzidenz epidemiologisch festgestellt wurde. Dies alles hat zusammen mit dem erwähnten großen Unterschied zwischen der Induktion von Veränderungen in der Schilddrüse und der hierdurch verursachten Morbidität und Mortalität zu manchmal etwas verwirrenden, nur scheinbar widersprüchlichen Aussagen über diese Art von Strahlenkrebsrisiko geführt.

● Schilddrüsenkrebs bei Atombomben-Überlebenden

Parker et al. /F8, 7-89/ haben bei den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki in der "Adult Health Study" insgesamt 74 Schilddrüsenkrebsfälle ermittelt, wobei nur eine Geschwulst zum Tode des Betroffenen führte. Von den 74 Krebsbildungen wurden 40 bei Lebzeiten festgestellt, während die restlichen Veränderungen erst durch Autopsie entdeckt wurden. Nach Meinung verschiedener Autoren hätten viele der diagnostizierten Neubildungen aufgrund ihrer geringen Größe und ihres langsamen Wachstums zu keiner Beeinträchtigung der Gesundheit geführt. Alle Krebsgeschwülste wurden als papillär<sup>1)</sup>, folliculär<sup>2)</sup> oder "sclerosing papillar"<sup>3)</sup> eingestuft, d.h., es wurden weder anaplastische<sup>4)</sup> noch medullare<sup>5)</sup> Tumore gefunden, die zu den bösartigen Klassen zählen, schnell wachsen und praktisch inoperabel sind.

Von dem in Bild F8, 7-17 aufgetragenen Daten /F8, 7-32/ läßt sich eine deutlich (zumindest um den Faktor 2) erhöhte Empfindlichkeit von Kindern unter zehn Jahren gegenüber Jugendlichen und Erwachsenen entnehmen. Gleichfalls fällt eine zumindest doppelt so große Strahlenempfindlichkeit der weiblichen gegenüber der männlichen Schilddrüse auf.

Es ist aufgrund der wenigen Fälle sehr schwer, eine quantitative Dosis/Wirkungs-Beziehung aus den hier vorhandenen Daten abzuleiten. Nimmt man einen mittleren Kerma-Wert von 200 rad

---

1) warzenartig

2) bläschenartig

3) verhärtet warzenartig

4) entdifferenzierend

5) Markschwamm

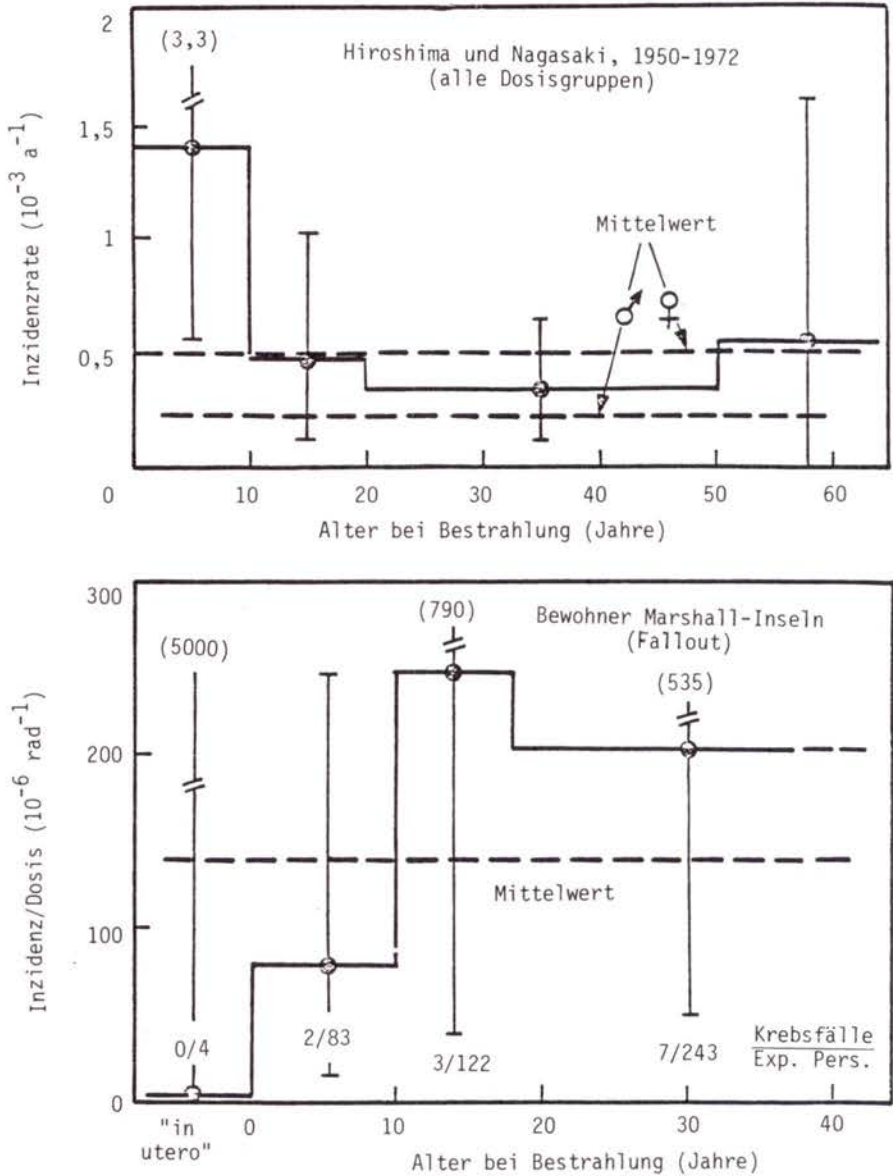


Bild F8, 7-17:

Altersabhängigkeit der Inzidenz von Schilddrüsenkrebs bei den Atombomben-Überlebenden (oberes Bild) und bei den Bewohnern der Marshall-Inseln (unteres Bild)



an und berücksichtigt die Beobachtungsperiode von 13 bis 26 Jahren, so ergeben sich Risikofaktoren für Frauen bzw. Männer von  $47 (27-73) \cdot 10^{-6}$  bzw. von  $20 (6-44) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  /F8, 7-32/. Dabei wurden Dosis/Kerma-Konversionsfaktoren von  $D_Y/K_Y = 0,76$ ,  $D_P/K_N = 0,33$  und  $D_Y/K_N = 0,15$  verwendet. Diese Risikofaktoren gelten für die Morbidität und für die besonderen Gegebenheiten der Strahlenexposition in den beiden Städten durch ein komplexes Mischfeld aus externer  $\gamma$ - und n-Strahlung und interner Exposition nach Ingestion kontaminierter Lebensmittel. Für die Mortalität lassen sich keine sinnvollen Risikofaktoren ableiten, da - wie bereits erwähnt - nur ein einziger Todesfall in Hiroshima und Nagasaki durch Schilddrüsenkrebs eingetreten war. Es sei bereits hier bemerkt, daß diese Zahlen deutlich niedriger liegen als die von anderen entsprechenden Beobachtungen.

● Schilddrüsenkrebs bei Bewohnern der Marshall-Inseln durch "fallout" nach Kernwaffenversuchen

Im Jahre 1954 wurden 243 Bewohner der Marshall-Inseln durch "fallout" infolge eines Kernwaffenversuches externer und interner Strahlung ausgesetzt, wobei die mittlere Schilddrüsendosis etwa 200 rad betrug /F8, 7-65/. Das führt u.a. zu 1 Leukämiefall und 7 Schilddrüsenkrebsfällen, die ausschließlich bei Frauen oder Mädchen auftraten. Unter den 113 Jungen bzw. Männern wurde kein diesbezüglicher Krebsfall beobachtet. Daraus läßt sich für diese gemischte Bevölkerung und die Zeit bis 1976 eine Inzidenzrate von  $145 (70-270) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  berechnen /F8, 7-32/. Die normale Inzidenzrate ist hier nicht bekannt und wurde deshalb nicht berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den Daten bei den Atombomben-Überlebenden läßt sich bei der altersspezifischen Analyse des Inzidenzrisikos bei den Inselbewohnern keine Erhöhung im Kindesalter, sondern eher eine Verminderung ableiten /F8, 7-32/. In Bild F8, 7-17 sind diese altersabhängigen Inzidenzraten aufgetragen. Conard /F8, 7-65/ fand zudem keinen signifikanten Unterschied zwischen den Risikofaktoren für diese gemischte Strahlenexposition und de-

nen für Röntgenstrahlung. Das dürfte darauf zurückzuführen sein, daß möglicherweise die Hälfte der internen Schilddrüsenedosis von kurzlebigen Jodisotopen, wie J-132, -133, -135, herrühren könnte, deren Dosisrate eher mit der von Röntgenstrahlen vergleichbar ist, als die viel geringere von J-131. Bisher trat bei dieser Population noch kein durch Schilddrüsenkrebs verursachter Todesfall auf. Bei einer mittleren Latenzzeit von etwa 20 Jahren ist jedoch noch mit neu hinzukommenden Fällen zu rechnen.

Benigne<sup>1)</sup> Schilddrüsenknoten traten wesentlich häufiger als maligne<sup>2)</sup> Tumoren auf. So sind bei den 19 Kindern unter 10 Jahren auf der Insel Rongelap der Marshall-Inselgruppe aufgrund von Schilddrüsenedosen von 700 - 1400 rad innerhalb der folgenden 20 Jahre zwar 14 Fälle von benigner Knotenbildung, aber nur 1 Fall von malignem Schilddrüsenkrebs entdeckt worden /F8, 7-65 und -90/.

#### ● Schilddrüsenkrebs nach therapeutischer externer Bestrahlung

Wohl die umfangreichste Information über die Induktion von Schilddrüsenkrebs durch Strahleneinwirkung liegt für Kinder und Jugendliche vor, die wegen gutartiger Krankheiten am Kopf oder Hals mit Röntgenstrahlen behandelt wurden.

Nach Bestrahlung der Schilddrüse mit der relativ hohen mittleren Dosis von 783 rad (Werte von 50 - 1500 rad) haben Coleman et al. /F8, 7-91/ während einer mittleren Beobachtungsdauer von 28 Jahren bei 24 % von 1 500 Kindern Abnormitäten und bei 9 Kindern Krebs der Schilddrüse festgestellt. Daraus leiten die Autoren einen Strahlenrisikofaktor von  $104 \cdot 10^{-6}$ /rad für Krebsinzidenz ab.

Zu einem höheren Risikowert kommen Modan et al. /F8, 7-92 und -93/ bei der Analyse der Krebsinzidenz bei 10 902 jüdischen

---

1) gutartig

2) bösartig

Kindern, die wegen einer Kopfhauterkrankung mit einer durch Röntgen-Streustrahlung bedingten Schilddrüsenedosis von im Mittel 6,5 rad bestrahlt wurden. Es könnten jedoch auch z.B. durch eine kleine Kopfbewegung weitaus höhere Dosen aufgetreten sein. Mit einer mittleren Latenzzeit von 12,3 Jahren traten während der Beobachtungsperiode (13 bis 24 Jahre nach Bestrahlung) 12 anstatt der erwarteten 2 Fälle von Schilddrüsenkrebs auf, woraus sich ein Risikofaktor von etwa  $140 \cdot 10^{-6}$  rad abschätzen läßt.

Jüdische Kinder scheinen aus noch nicht geklärten Gründen eine um den Faktor 2 bis 3 höhere Strahlenempfindlichkeit der Schilddrüse zu haben als nicht-jüdische. Dies geht auch aus einer Studie von Hempelmann et al. /F8, 7-40/ hervor, deren wesentliche Ergebnisse in Tabelle F8, 7-9 zusammengefaßt sind /F8, 7-32/ und die zumindest für Einwohner Nordamerikas gelten.

Bestrahlte Gruppe	Abstammung der Kinder	Zahl der Personen	Zahl der Schilddrüsenkrebsfälle	Mittlere Dosis [rad]	Krebsinzidenz [ $10^{-6}$ /rad]
Empfindliche Gruppe	nicht-jüd.	136	4	388	76 (26-174)
	jüdisch	125	9	410	176 (92-306)
Andere Gruppen	nicht-jüd.	2 506	9	87	41 (22-72)
	jüdisch	105	2	153	124 (22-392)
Alle Gruppen	nicht-jüd.	2 642	13	102	48 (28-76)
	jüdisch	230	11	293	163 (92-270)

Tab. F8, 7-9:

Risikofaktoren für Inzidenz von Schilddrüsenkrebs bei verschiedenen Gruppen von Kindern (UNSCEAR 1977)

Als mittlere Risiken finden diese Autoren Werte von  $160 \cdot 10^{-6}$ /rad für jüdische bzw.  $50 \cdot 10^{-6}$ /rad für nicht-jüdische Kinder.

Refetoff et al. /F8, 7-94/ berichteten über 100 Patienten, die aus verschiedensten Gründen mit im Mittel 750 rad Schilddrüsen-

dosis bestrahlt worden waren und, ohne diesbezügliche Beschwerden zu haben, später auf eventuelle Veränderungen der Schilddrüse untersucht wurden. Dabei wurden nach im Mittel  $24 \pm 5$  Jahren nach Bestrahlung im Kindesalter 7 Karzinome gefunden, die entweder vom Typ papillär, folliculär oder eine Mischung daraus waren und sonst wahrscheinlich klinisch unentdeckt geblieben sind. Von Refetoff et al. wird aus diesen Daten ein Risikofaktor von ca.  $95 (45-175) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  abgeleitet.

● Schilddrüsenkrebs nach interner Bestrahlung durch J-131

In den letzten Jahrzehnten haben mehrere Millionen Patienten zur Untersuchung oder zur Behandlung der Schilddrüse Jod-131 (physikalische Halbwertszeit 8 d) erhalten.

Bei der Behandlung von Hyperthyreose mit Jod-131 liegt die Schilddrüsendosis im Bereich von mehreren tausend rad. Bei allen bislang durchgeführten epidemiologischen Erhebungen an diesen Therapiepatienten konnte bislang keine statistisch signifikante Erhöhung der Schilddrüsenkrebsinzidenz durch die Applikation von Jod-131 festgestellt werden, obwohl diese Erfahrungen derzeit mehr als eine Million Personen  $\times$  Jahre erfassen /F8, 7-95 bis -98/. Diese Folgerung wird auch in dem Bericht von UNSCEAR /F8, 7-32/ festgestellt.

In WASH-1400 /F8, 7-37/ wird für den Bereich mittlerer Dosen um 1000 rad sowohl für Kinder als auch für Erwachsene ein Risikofaktor für die Induktion von Schilddrüsenkrebs durch Jod-131 von etwa  $3 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  abgeschätzt, d.h. weniger als 1/10 des Wertes für Röntgenstrahlen. In jedem Fall deuten die Befunde im Bereich hoher Dosen darauf hin, daß die Induktionswahrscheinlichkeit von Schilddrüsenkrebs durch Jod-131 sehr viel kleiner ist als im Falle der externen Bestrahlung der Schilddrüse mit Röntgenstrahlen.

Bei der diagnostischen Anwendung von Jod-131 liegt die Schilddrüsendosis erheblich niedriger. Obwohl Erfahrungen über Mil-

lionen von Personen  $\times$  Jahren vorliegen, konnte bislang noch keine darauf zurückföhrbare Erh6hung der Schilddröusenkrebshäufigkeit beobachtet werden. Die umfassendste Studie dieser Art wurde von Holm in Schweden durchgeföhrt; die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden kürzlich ver6ffentlicht /F8, 7-98/.

Bei einer mittleren Beobachtungsperiode von 17 Jahren wurden unter 10 133 Patienten nach Diagnostik mit Jod-131 9 F6lle von Schilddröusenkrebs festgestellt, statt der ohne Bestrahlung zu erwartenden Zahl von 8,3 F6llen. Die Schilddröusendosis lag dabei im Bereich von 100 - 200 rad (Mittelwert 160 rad) bei Jugendlichen und bei weniger als 100 rad (Mittelwert 60 rad) bei Erwachsenen. Würde man den im UNSCEAR-Bericht /F8, 7-32/ angegebenen Risikofaktor von  $(50-150) \cdot 10^{-6}$ /rad zugrunde legen, so w6re mit 47 bis 124 zus6tzlichen F6llen von strahleninduzierten malignen Schilddröusentumoren zu rechnen gewesen. Zu dem gleichen negativen Befund gelangt diese schwedische Studie auch bei den Untersuchungen an 3 000 Patienten, die therapeutisch mit Jod-131 behandelt worden sind; es wurden 4 F6lle festgestellt im Vergleich zu den ohne Bestrahlung zu erwartenden 3,2 F6llen. Als mögliche Erkl6rung f6r die geringe kanzerogene Wirksamkeit von Jod-131 in der Schilddröuse im Vergleich zu R6ntgenstrahlen wird von Holm /F8, 7-98/ die sehr viel niedrigere Dosisleistung im Falle der Bestrahlung der Schilddröuse mit Jod-131 angegeben.

Diese Befunde bei der medizinischen Anwendung von Jod-131 decken sich mit den Ergebnissen von Beobachtungen an Kindern in Utah/USA. Sie waren 1953 einer erh6hten Strahlenexposition der Schilddröuse durch Jod-131 von Kernwaffenversuchen ausgesetzt, wobei das Jod-131 vorwiegend über die Milch in den K6rper aufgenommen wurde. Die daraus resultierenden Schilddröusendosen lagen im Bereich von 30 - 240 rad /F8, 7-99/. Bei 1 378 untersuchten Kindern - vorwiegend in der Stadt St. George - traten in den 15 Folgejahren 18 benigne Tumoren und kein einziger Fall von malignem Schilddröusentumor auf /F8, 7-100/. Aufgrund einer unbestrahlten Vergleichspopulation gleicher Altersstruktur w6ren  $13 \pm 5$  F6lle von benignen Schilddröusenknotten zu erwarten

gewesen. Die Zahl der möglicherweise durch die Strahlung induzierten benignen Schilddrüsenknoten dürfte danach zwischen 0 und 10 Fällen und die der Schilddrüsenkrebsfälle in der unteren Hälfte dieses Bereichs liegen.

● Schlußfolgerungen zum strahleninduzierten Schilddrüsenkrebs

Aus den vorliegenden Beobachtungen läßt sich entnehmen, daß

- eine Erhöhung der Inzidenz von Schilddrüsenkrebs bei Kindern nach externer Bestrahlung mit geringen Dosen beobachtet wurde,
- die Schilddrüse von Frauen wahrscheinlich etwa doppelt so empfindlich wie die von Männern hinsichtlich dieser Erkrankung ist,
- die Schilddrüse von Kindern und Jugendlichen wahrscheinlich etwas empfindlicher als die von Erwachsenen ist,
- der Risikofaktor für die Inzidenz von Schilddrüsenknoten infolge externer Bestrahlung zwar hoch ist, durch die meisten dieser Knoten jedoch nach Meinung der Autoren keine merkbare Beeinträchtigung der Gesundheit hervorgerufen wird,
- der Risikofaktor für die Mortalität aufgrund Induktion von bösartigen, schnell wachsenden Tumoren verglichen damit sehr niedrig ist,
- bei rein interner Bestrahlung mit Jod-131 bisher praktisch keine Erhöhung der Inzidenz von malignem Schilddrüsenkrebs festgestellt wurde und
- daher der Risikofaktor für Schilddrüsenkrebs infolge Inkorporation von Jod-131 sehr viel niedriger anzusetzen ist als der für externe Bestrahlung mit Röntgenstrahlen.

Die mittlere Latenzzeit liegt bei pessimistischer Abschätzung der Risikofaktoren bei etwa 20 Jahren /F8, 7-101/, kann jedoch vielleicht auch altersabhängig sein mit der Tendenz zu kürzeren Zeiten bei Bestrahlungen in der Kindheit. Dafür liegen Hinweise vor, denn Raventos und Winship /F8, 7-102/ fanden einen Anstieg der mittleren Latenzzeit von 10 auf 17 Jahre nach Bestrahlung in der Kindheit bzw. im Jugendalter. Auch Greene /F8,

7-103/ fand bei der Analyse von 59 Schilddrüsenkrebsfällen mittlere Latenzzeiten von 10, 12 bzw. 19 Jahren für Bestrahlungen in den Altersklassen unter 1 Jahr, zwischen 1 und 17 Jahren bzw. über 17 Jahre.

Nach etwa 25jähriger Beobachtungszeit läßt sich aus den vorliegenden Daten für gemischte Bevölkerungen ein Risikofaktor von etwa  $100 \cdot (50-150) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  für die Induktion von bösartigen Neubildungen und von etwa  $200 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  für gutartige Knoten in der Schilddrüse ableiten. Diese Werte gelten für externe Röntgenbestrahlung. Bei interner Bestrahlung mit niedriger Dosisrate infolge Inkorporation von Jod-131 liegen diese Werte mit großer Wahrscheinlichkeit nicht höher, sondern eher um mindestens einen Faktor 10 niedriger.

Nur wenige Schilddrüsenkrebsbildungen führen zum Tode des Betroffenen. So wird von 1 : 20 /F8, 7-101/, 1 : 40 /F8, 7-89/, 2 : 58 /F8, 7-104/, 0 : 24 /F8, 7-40/, also insgesamt von 4 Todesfällen bei 142 Krebserkrankungen berichtet, was einer Mortalitätswahrscheinlichkeit von 3 % während einer mittleren Beobachtungsdauer von 24 Jahren entspricht. Berücksichtigt man dieses Mortalitäts/Inzidenz-Verhältnis und vernachlässigt man die deutlich niedrigeren Inzidenzfaktoren bei den japanischen Atombomben-Überlebenden, so läßt sich aus den bisher vorliegenden Beobachtungen ein Mortalitätsfaktor für Schilddrüsenkrebs von  $(5-10) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  bei externer Bestrahlung mit hoher Dosisleistung ableiten. Dabei ist angenommen, daß sich die bisher nach maximal 25 Jahren Beobachtungsdauer vorliegenden Inzidenzwerte höchstens verdoppeln können und die Mortalitätsrate trotz medizinischem Fortschritt auch zukünftig bei 3 % liegen wird. Bei interner Bestrahlung durch Jod-131 dürfte das Mortalitätsrisiko noch geringer sein.

#### 7.4.4.6 Knochen bzw. Knochenoberfläche (Knochenkrebs)

Als kritische Zellen für die Entstehung von Knochensarkomen sind Zellen an den inneren und äußeren Oberflächen des Knochens

anzusehen. Entscheidend für die mögliche Induktion von Knochen-sarkomen durch Strahlung ist daher nicht die mittlere Knochen-dosis, sondern die Dosis an der Knochenoberfläche in einer Schichtdicke von etwa  $10 \mu\text{m}$  /F8, 7-32 und -36/.

Es liegen nur wenige quantitative Hinweise über ein erhöhtes Knochenkrebsrisiko bei externer Bestrahlung vor. So wurde bei den Atombomben-Überlebenden bislang keine erhöhte Inzidenz von Knochenkrebs beobachtet /F8, 7-46/. Bei der bereits erwähnten Gruppe der röntgenbestrahlten Bechterew-Patienten wurde zwar eine geringe Erhöhung festgestellt, die auf ein Risiko/Dosis-Verhältnis von etwa  $1 \cdot 10^{-6}$ /rad schließen läßt, das jedoch wegen der Schwierigkeiten der Dosisabschätzung mit einem großen Unsicherheitsfaktor behaftet ist. Eine genauere Aussage ist aus zwei Studien an Kindern möglich, die zur therapeutischen Behandlung von Kopfflechten mit relativ hohen Dosen von Röntgenstrahlen im Bereich von Kopf, Hals und Nacken bestrahlt worden waren /F8, 7-92 und -105/. Unter den insgesamt etwa 13 000 bestrahlten Kindern traten im Verlauf von 18 bzw. 20 Jahren 6 Fälle von Knochentumoren auf, während nur etwa 1 Fall normalerweise erwartet werden konnte. Die mittlere Knochendosis in dem bestrahlten Kopfbereich lag bei 400 rad und die mittlere Dosis für die gesamte Knochenoberfläche wird auf etwa 100 rad geschätzt. Somit ergibt sich ein Risiko/Dosis-Verhältnis von etwa  $4 (\text{neg.} - 10) \cdot 10^{-6}$ /rad mittlerer Knochenoberflächendosis im Dosisbereich von 50 - 1000 rad Röntgenstrahlung.

Alle anderen quantitativen Hinweise über das Knochenkrebsrisiko beruhen auf Beobachtungen an Personen, die infolge Inkorporation von Radium-226 und -224 einer hohen  $\alpha$ -Bestrahlung des Knochens ausgesetzt waren.

Bild F8, 7-18 zeigt in doppelt-logarithmischem Maßstab die beobachtete Knochensarkom-Inzidenz bei Leuchtzifferblattmalern und Therapie-Patienten nach Radium-226-Ingestion als Funktion der mittleren  $\alpha$ -Dosis im Knochen /F8, 7-39, -106 und -107/. Die beste lineare Approximation dieser Daten ergibt einen Risikoeffizienten  $R/D^K \approx 50 \cdot 10^{-6}$ /rad, bezogen auf die Einheit



der mittleren Knochenendosis /F8, 7-108/. Da im Falle von Radium-226 das Verhältnis  $D^{KO}/D^K$  der mittleren Knochenoberflächendosis ( $D^{KO}$ ) zur mittleren Knochenendosis ( $D$ ) etwa 0,5 (0,3 - 0,7) ist /F8, 7-109 und -110/, ergibt sich pro Einheit der mittleren Knochenoberflächendosis ein Koeffizient von etwa  $100 \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  ( $\alpha$ ) für eine mittlere Beobachtungsperiode von etwa 35 Jahren. Bei Ansatz eines Qualitätsfaktors von 20 für  $\alpha$ -Strahlung ist somit ein Wert von etwa  $5 \cdot 10^{-6}/\text{rem}$ , bezogen auf die mittlere Knochenoberflächendosis, zu erwarten. Es sei darauf hingewiesen, daß kein Krebsfall im Dosisbereich  $D^K < 500$  rad ( $\alpha$ ) beobachtet wurde (Bild F8, 7-18). Rowland et al. /F8, 7-111/ haben gezeigt, daß die Beobachtungswerte besser durch eine quadratische Dosis/Risiko-Beziehung approximiert werden können, wie sie in Bild F8, 7-18 aufgetragen sind.

Eine weitere Information über das Knochenkrebsrisiko durch  $\alpha$ -Strahlung liefern die Untersuchungen bei Patienten, die mit Peteosthor, einem Radium-224-haltigen Präparat, behandelt wurden. Unter den untersuchten 900 Patienten traten 60 Osteosarkomfälle auf. Aufgrund der applizierten Radium-224-Aktivität ergibt sich ein Risiko/Dosis-Verhältnis von  $(40-200) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  ( $\alpha$ ), bezogen auf die mittlere Knochenendosis /F8, 7-108/. Da im Fall des kurzlebigen Radium-224 die Aktivität - im Gegensatz zu Radium-226 - im wesentlichen an der Knochenoberfläche vorliegt, ist das  $D^{KO}/D^K$ -Verhältnis etwa 8 - 10 /F8, 7-32 und -109/. Bezogen auf die mittlere  $\alpha$ -Dosis in der Knochenoberfläche, ergibt sich daher ein Risikokoeffizient von etwa  $(5-20) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$ . Da die mittlere Beobachtungsperiode etwa 23 Jahre betrug, dürfte der integrale Risikokoeffizient etwa 1,5- bis 2mal so hoch sein. Unter Berücksichtigung eines Qualitätsfaktors 20 für  $\alpha$ -Strahlung resultiert somit ein integraler Risikokoeffizient, bezogen auf die mittlere Dosis in dem kritischen Bereich der Knochenoberflächen, von etwa  $(1-2) \cdot 10^{-6}/\text{rem}$ . Die Beobachtungen deuten darauf hin, daß für Erwachsene ein Wert an der Untergrenze, für Jugendliche (Alter  $< 20$  a) ein Wert an der Obergrenze dieses Bereichs zutreffender ist.

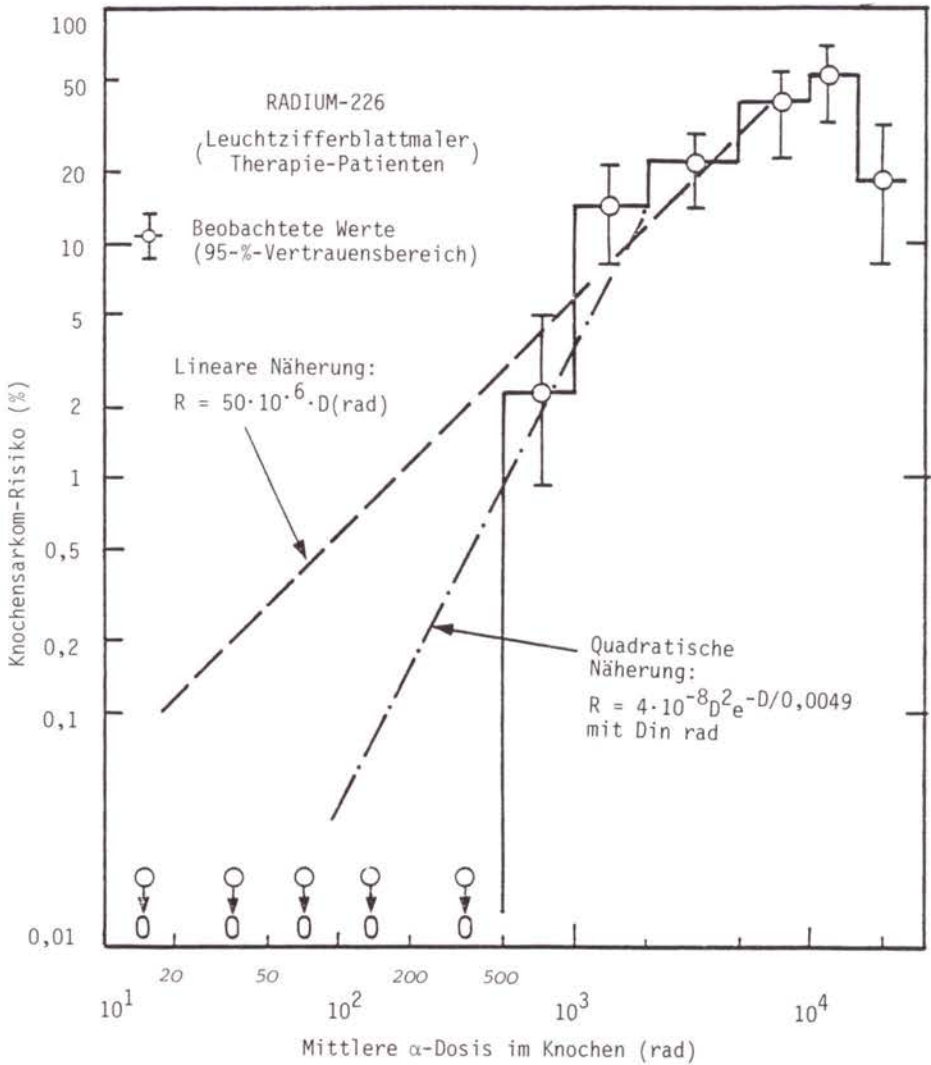


Bild F8, 7-18:

Beobachtete Häufigkeit von Knochsarkomen bei Personen nach Inkorporation von Radium-226 in Abhängigkeit von der mittleren  $\alpha$ -Dosis im Knochen

● Schlußfolgerungen zum Knochenkrebsrisiko

Zusammenfassend wird festgestellt, daß unter Berücksichtigung der dosimetrischen und statistischen Fehler die Risikokoeffizienten für Knochensarkom-Inzidenz bei externer Röntgenbestrahlung und bei interner  $\alpha$ -Bestrahlung durch Radium-224 und Radium-226 weitgehend übereinstimmen, sofern sie auf die mittlere Dosis in den kritischen Zellen der Knochenoberflächen bezogen werden. Bei Ansatz des Qualitätsfaktors 20 für  $\alpha$ -Strahlung ergibt sich ein Risikokoeffizient von  $(1-5) \cdot 10^{-6}$ /rem Knochenoberflächendosis. Der von der ICRP empfohlene Richtwert von  $5 \cdot 10^{-6}$ /rem für Knochenkrebs /F8, 7-36/ liegt an der Obergrenze des beobachteten Bereichs. Es muß betont werden, daß dieser Risikokoeffizient aus Erfahrungen bei Personengruppen resultiert, die Dosen von einigen 100 bis einigen 1000 rad erhalten haben. Es bestehen vielfach Hinweise, daß die Anwendung einer rein proportionalen Dosis/Risiko-Beziehung für Knochenkrebs zu einer erheblichen Überschätzung des Risikos bei kleineren Dosen führt.

7.4.5 Gesamtes Krebsrisiko nach Ganzkörperbestrahlung (Atombomben-Überlebende)

Eine Abschätzung des gesamten individuellen Krebsrisikos infolge einer Ganzkörperbestrahlung mit hoher Dosisrate ermöglichen die Erhebungen bei den Atombomben-Überlebenden, da diese einer Bestrahlung des ganzen Körpers durch  $\gamma$ -Strahlung und Neutronen ausgesetzt waren. In Tabelle F8, 7-10 ist das beobachtete Risiko/Kerma-Verhältnis für Leukämie und die Summe aller anderen Krebsarten zusammengestellt, summiert über alle Altersgruppen und Kerma-Gruppen  $> 10$  rad in Hiroshima und Nagasaki; die Werte in Klammern geben den 90%-Vertrauensbereich an.

Die Ergebnisse beider Analysen stimmen gut überein. Für das Verhältnis der Häufigkeit aller anderen Krebsarten zur Leukämie ergibt sich ein Mittelwert von etwa 1,3; betrachtet man die

LS-Studie	R/K [10 <sup>-6</sup> /rad]		Risikoverhältnis: <u>Summe anderer Krebsarten</u> Leukämie
	Leukämie	Summe aller anderen Krebsarten	
1950 - 1972 <sup>1)</sup> Vergleich mit 0-9 rad-Gruppe	36 (27-46)	50 (14-87)	1,4
1950 - 1974 <sup>2)</sup> Regressions- analyse	46 (42-50)	53 (35-71)	1,2

<sup>1)</sup> nach Moriyama und Kato /F8, 7-38/

<sup>2)</sup> nach Beebe et al. /F8, 7-46/, siehe auch UNSCEAR /F8, 7-32/

Tab. F8, 7-10:

Beobachtetes Risiko/Kerma-Verhältnis für Leukämie und die Summe aller anderer Krebsarten, summiert über alle Altersgruppen (Hiroshima und Nagasaki)

Überlebenden in beiden Städten getrennt, so ergibt sich für dieses Verhältnis in Hiroshima ein Wert von 1,4 und in Nagasaki ein Wert von nur etwa 0,6 /F8, 7-46/.

In den Folgejahren ist eine Zunahme dieses Verhältnisses zu erwarten, da - im Gegensatz zur Leukämie - die Inzidenzrate bei den anderen Krebsarten noch erhöht ist (Bild F8, 7-7). Der zu erwartende Endwert kann aus der beobachteten Altersabhängigkeit des Risikoeffizienten abgeschätzt werden, die - ausgehend von den Daten von Beebe et al. /F8, 7-46/ - in Bild F8, 7-19 (oberes Teilbild) dargestellt ist. Im unteren Teilbild ist das resultierende Risikoverhältnis für die Summe der anderen Krebsarten im Verhältnis zu demjenigen für Leukämie aufgetragen, das sich aus den Beobachtungen bis 1974 (ausgezogene Kurve) ergibt. Geht man von einer altersunabhängigen mittleren Latenzzeit von 20 bis 30 Jahren für diese Krebsarten aus (Tabelle F8, 7-1), so ist zu erwarten, daß der Endwert dieses Verhältnisses in den unteren beiden Altersgruppen etwa doppelt so hoch sein wird wie der Wert dieses Verhältnisses Ende 1974;

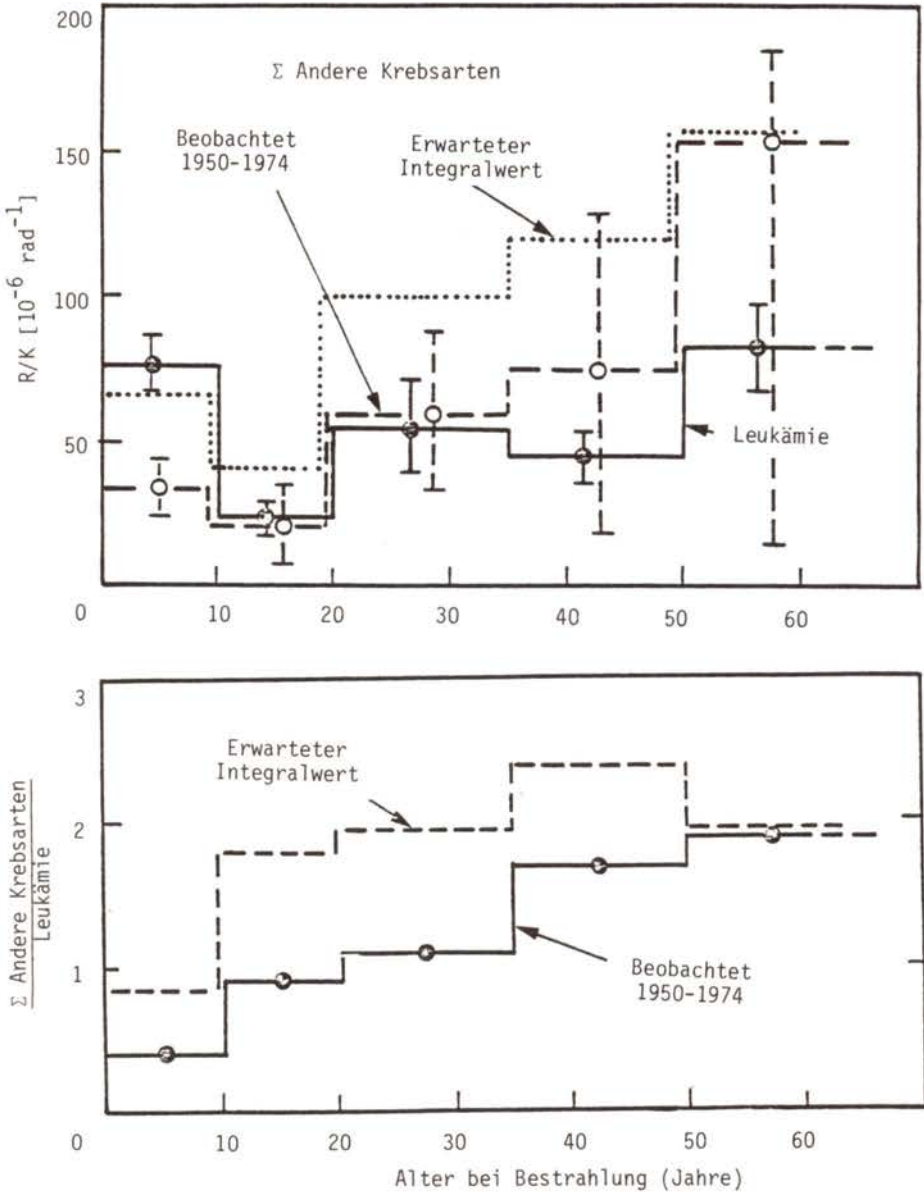


Bild F8, 7-19:

Altersabhängigkeit des Risikoeffizienten für Leukämie und die Summe aller anderen Krebsarten bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki

demgegenüber ist in der ältesten Gruppe ( $\geq 50$  a) wegen der natürlichen Absterberate mit keinem erheblichen Zuwachs mehr zu rechnen.

Die gestrichelte Kurve im unteren Teilbild von Bild F8, 7-19 gibt den unter diesen Annahmen zu erwartenden Endwert an. Daraus folgt für das Risikoverhältnis aller anderen Krebsarten zu Leukämie ein Wert von etwa 1 bei Kindern (0-9 Jahre) und etwa 2 bei Jugendlichen und Erwachsenen. Diese Faktoren gelten angenähert auch für die Risikokoeffizienten pro Einheit der Organdosis, da für das Gesamtkollektiv (Hiroshima und Nagasaki) die Konversionsfaktoren von Kerma zu Dosis für Leukämie und die Summe aller anderen Krebsarten nicht sehr verschieden sind (Anhang), wenn man den relativ geringen Risikobeitrag durch Brust- und Schilddrüsenkrebs bei den Atombomben-Überlebenden berücksichtigt.

Geht man von den Risikokoeffizienten für Leukämie aus, die in Tabelle F8, 7-3 angegeben sind, so ergeben sich unter Berücksichtigung der aus Bild F8, 7-18 ersichtlichen Faktoren die Risikokoeffizienten nach Tabelle F8, 7-11 für die Gesamtheit aller anderen Krebsarten.

Unter Berücksichtigung der Altersverteilung der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland wäre somit bei gleichförmiger Ganzkörperbestrahlung mit Strahlen niedriger LET und hoher Dosisrate ein integrales Mortalitätsrisiko - summiert über alle Krebsarten einschließlich Leukämie - von etwa  $(30-120) \cdot 10^{-6}$  / rad, d.h. von etwa 30 bis 120 Fälle für 1 Million Einwohner pro rad zu erwarten.

Geht man bei der Analyse des Strahlenkrebsrisikos der Atombomben-Überlebenden von einem Vergleich mit der Krebshäufigkeit aufgrund der japanischen Nationalstatistik aus, so ergibt sich bis 1974 ein Risikoverhältnis von etwa 2 für die Summe aller anderer Krebsarten im Verhältnis zur Leukämie, summiert über Hiroshima und Nagasaki. Unter Berücksichtigung der in den Folgejahren noch zu erwartenden Zunahme der Krebshäufigkeit in

Altersgruppe	Relativer Bevölkerungsanteil <sup>1)</sup>	R/D [10 <sup>-6</sup> /rad]		
		Leukämie	Summe anderer Krebsarten	Summe Spätschäden
"in utero" <sup>2)</sup>	0,01	50 - 150	50 - 150	100 - 300
0 - 9 a	0,14	10 - 40	10 - 40	20 - 80
10 - 19 a	0,15	5 - 20	10 - 40	15 - 60
20 - 34 a	0,20	10 - 30	20 - 60	30 - 90
35 - 49 a	0,20	10 - 40	25 - 100	35 - 140
≥ 50 a	0,31	10 - 50	20 - 100	30 - 150
Gewichteter Mittelwert Gesamtbevölkerung		10 - 40	20 - 80	30 - 120

<sup>1)</sup> Bundesrepublik Deutschland 1975

<sup>2)</sup> Risikowerte für "in utero"-Bestrahlung wurden aus den Untersuchungen von Stewart et al. /F8, 7-56 und -112/ abgeleitet (siehe auch Mole /F8, 7-58/)

Tab. F8, 7-11:

Erwartete Integralwerte des gesamten Krebsrisikos durch Strahlung niedriger LET, geschätzt aufgrund der Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden

den jüngeren Altersgruppen würde sich dann ein etwas höherer Erwartungsbereich des Risikofaktors von etwa  $(50-150) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  für Ganzkörperbestrahlung bei der in Betracht gezogenen Altersverteilung der bundesdeutschen Bevölkerung ergeben.

Insgesamt ergibt sich somit auf der Basis der verschiedenen Vergleichsmethoden aufgrund der Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden (Hiroshima und Nagasaki) ein Erwartungsbereich von etwa  $(30-150) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$ , d.h. von 30 bis 150 zusätzlichen Fällen auf 1 Million Einwohner pro Dosiseneinheit, für das letale Krebsrisiko (Mortalität) durch eine gleichförmige Ganzkörperbestrahlung, bezogen auf die derzeitige Altersverteilung unserer Bevölkerung. Dieser Bereich deckt sich mit dem Wert von  $(105 \pm 75) \cdot 10^{-6}/\text{rad}$  (95-%-Vertrauensbereich), der von Goss /F8, 7-113/ aus den japanischen Daten für eine Bevölkerung mit einer standardisierten Altersverteilung abgeleitet wurde.

Bei der Bewertung dieses Ergebnisses ist zu berücksichtigen, daß das beobachtete Krebs/Leukämie-Verhältnis in Nagasaki deutlich kleiner ist als in Hiroshima. Für Strahlung niedriger LET dürfte daher aufgrund dieser Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden eher die untere Hälfte des oben angegebenen Risikobereichs zutreffen.

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung des gesamten Krebsrisikos infolge einer Ganzkörperbestrahlung besteht aus der Summation der Risikofaktoren der einzelnen Organe bzw. Gewebe des menschlichen Körpers, die sich aus den Beobachtungen an verschiedenen exponierten Personengruppen ergeben und die in Abschnitt 7.4.4 abgeschätzt wurden. Diese Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt zusammengefaßt (Tabelle F8, 7-12).

#### 7.4.6 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die aus den in Abschnitt 7.4.4 beschriebenen Beobachtungen an strahlenexponierten Personengruppen resultierenden Erwartungswerte für das letale Strahlenkrebsrisiko in relevanten Organen bzw. Geweben des Körpers durch Strahlung niedriger LET (Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlen, Elektronen- und  $\beta$ -Strahlen) sind in Tabelle F8, 7-12 zusammengestellt. Diese Risikofaktoren sind auf die mittlere Organdosis bezogen und sind Mittelwerte über Alter und Geschlecht unter Berücksichtigung der derzeitigen Altersverteilung der bundesdeutschen Bevölkerung. Zum Vergleich sind in der rechten Spalte von Tabelle F8, 7-12 die Nominalwerte der Risikofaktoren für einzelne Organe bzw. Gewebe eingetragen, die von der ICRP /F8, 7-36/ für Zwecke des Strahlenschutzes empfohlen werden.

Aus den Beobachtungen der verschiedenen Personengruppen, die einer Teilkörperbestrahlung oder einer inhomogenen Bestrahlung des gesamten Körpers ausgesetzt waren, ergibt sich durch Summation der Risikofaktoren für die einzelnen Organe bzw. Gewebe ein rechnerischer Gesamtrisikofaktor für das Mortalitätsrisiko



Organ bzw. Gewebe	Mortalitätsrisiko/Organdosis [10 <sup>-6</sup> /rad]	
	Abschnitt 7.4.4	ICRP (1977)
Rotes Knochenmark (Leukämie)	10 - 40	20
Knochenoberfläche (Knochenkrebs)	≤ 5	5
Weibliche Brust	15 - 40 <sup>1)</sup>	25
Lunge	10 - 30	20
Gesamtheit der Verdauungsorgane (einschl. Leber, Galle, Pankreas)	20 - 50	} 50
Gesamtheit anderer Gewebe	10 - 30 <sup>2)</sup>	
Schilddrüse	5 - 10 (J-131: < 5)	
Gesamtrisiko bei gleichförmiger Bestrahlung		} 125
- berechnete Summe der Organrisiken	70 - 200	
- beobachtetes Gesamtrisiko Atombomben-Überlebende	30 - 150	

<sup>1)</sup> Mittleres Inzidenzrisiko für Frauen: (50-150) · 10<sup>-6</sup>/rad (Tabelle F8, 7-5); Verhältnis Mortalität/Inzidenz ≈ 0,5

<sup>2)</sup> UNSCEAR /F8, 7-32/

Tab. F8, 7-12:

Erwartungswerte des Risiko/Dosis-Verhältnisses für die Mortalität durch Krebs in den einzelnen Organen bzw. Geweben des menschlichen Körpers durch Strahlung niedriger LET, gemittelt über beide Geschlechter und alle Altersgruppen

durch Krebs, einschließlich Leukämie, im Fall einer gleichförmigen Bestrahlung des gesamten Körpers von (70-200) · 10<sup>-6</sup>/rad. Dieser Bereich stimmt angenähert mit dem von (30-150) · 10<sup>-6</sup>/rad überein, der sich aus den Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden ergibt. Der Unterschied dürfte in erster Linie auf die geringere Inzidenz von Brustkrebs bei den Atombomben-Überlebenden zurückzuführen sein.

Zusammenfassend ist somit bei gleichförmiger Ganzkörperbestrahlung durch Strahlung niedriger LET ein Risiko/Dosis-Verhältnis für das Mortalitätsrisiko durch Krebs im Bereich von (50-200) ·

$10^{-6}$ /rad mit einem Häufigkeitsmittelwert um  $100 \cdot 10^{-6}$ /rad zu erwarten. Die ICRP /F8, 7-36/ empfiehlt, für Zwecke des Strahlenschutzes einen Referenzwert von  $125 \cdot 10^{-6}$ /rad anzuwenden.

Dabei wurde für alle Krebsarten - mit Ausnahme von Krebs der Brust- und Schilddrüse - angenommen, daß die Inzidenz eines Tumors den Tod zur Folge hat: Inzidenzrisiko = Mortalitätsrisiko. Berücksichtigt man bei der Bewertung des Gesamtschadens für die Bevölkerung das zusätzliche Morbiditätsrisiko durch Brustkrebs, so ergibt sich ein gesamter Risikofaktor für die Krebsmorbidität bei gleichförmiger Ganzkörperbestrahlung von  $(60-240) \cdot 10^{-6}$ /rad; gegenüber dem Risikofaktor für Mortalität bedeutet dies eine Erhöhung um etwa 20 %. Wegen der geringen Gesundheitsbeeinträchtigung durch die meisten Arten von Schilddrüsentumoren ist das Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko durch Bestrahlung der Schilddrüse, insbesondere durch Jod-131, gering einzuschätzen.

Die in Tabelle F8, 7-12 zusammengestellten Erwartungswerte des Risiko/Dosis-Verhältnisses für Strahlenkrebs sind primär nur für den Dosis- und Dosisleistungsbereich gültig, bei dem das erhöhte Krebsrisiko festgestellt wurde. Mit Ausnahme der beschriebenen Untersuchungen über eine erhöhte Leukämieinzidenz im Kindesalter nach "in utero"-Bestrahlung sowie über die Inzidenz von Schilddrüsenkrebs bei Kindern nach Röntgenbehandlung basieren die Risikowerte für Strahlen niedriger LET auf Beobachtungen im Dosisbereich oberhalb 50-100 rad. Ferner ist bei der Bewertung der Zuverlässigkeit und des Gültigkeitsbereichs dieser Risikowerte zu berücksichtigen, daß die Beobachtungen über das Krebsrisiko durch Strahlung niedriger LET ausschließlich bei Bestrahlungen mit hoher Dosisleistung gewonnen wurden. Dies gilt sowohl für die Atombomben-Überlebenden in Nagasaki als auch für die Beobachtungen bei Patientengruppen nach diagnostischer oder therapeutischer Röntgenbestrahlung.

Im Hinblick auf die Abschätzung des möglichen Spätschadenrisikos der Bevölkerung durch ionisierende Strahlen können daher die in Tabelle F8, 7-12 angegebenen Risikokoeffizienten mit

ausreichender Zuverlässigkeit auf diejenigen Bevölkerungsgruppen angewandt werden, die durch Strahlung niedriger LET kurzzeitig einer Strahlenbelastung im Bereich um 50-100 rad, bei einzelnen Organen (z.B. Lunge, Knochenoberfläche, Schilddrüse) bis zu höheren Dosen, ausgesetzt sind.

Bei der Extrapolation zu niedrigeren Dosen und niedriger Dosisleistung ist aufgrund der statistischen Fehlerbreite der Beobachtungsergebnisse eine rein proportionale Dosis/Risiko-Beziehung auch für locker ionisierende Strahlen nicht auszuschließen. Die vorliegenden strahlenbiologischen Befunde, insbesondere tierexperimentelle Untersuchungen zur Krebszerzeugung durch ionisierende Strahlen, zeigen jedoch, daß bei Bestrahlung mit hoher Dosisleistung durch Strahlen niedriger LET eine konkav gekrümmte Dosis/Risiko-Beziehung vom linear-quadratischen Typ (Abschnitt 7.4.2) zu erwarten ist. Darauf deuten auch die Beobachtungen bei den Atombomben-Überlebenden in Nagasaki hin, wie dies in Bild F8, 7-8 am Beispiel der Leukämie gezeigt wird.

Eine Extrapolation auf der Basis einer rein linearen Dosis/Risiko-Beziehung kann daher im Fall von Strahlung niedriger LET zu einer Überschätzung des realen Strahlenkrebsrisikos der Bevölkerung bei niedrigen Dosen und bei Bestrahlung mit niedriger Dosisleistung führen, wenn man von Risikofaktoren (Risiko/Dosis-Verhältnis) ausgeht, die aus Beobachtungen bei hohen Dosen ( $> 100$  rad) und hoher Dosisleistung abgeleitet wurden. Der National Council of Radiation Protection (NCRP) in USA kommt in einer kürzlich veröffentlichten Studie zu dem Schluß, daß dieser Überschätzungsfaktor (Dose Rate Effectiveness Factor) im Bereich von 2 - 10 liegen könnte /F8, 7-35/. Es ist daher wahrscheinlich, daß bei niedrigen Dosen die Risikofaktoren an der Untergrenze des in Tabelle F8, 7-12 angegebenen Erwartungsbereichs liegen.

Es ist nicht auszuschließen, daß bei sehr kleinen Dosen und niedriger Dosisrate, d.h. im Bereich der normalen natürlichen Strahlenexposition, das Risiko/Dosis-Verhältnis unterhalb dieses Erwartungsbereichs liegt, wenn man die Möglichkeit in Be-

tracht zieht, daß die mittlere Latenzzeit der Krebsmanifestation mit sinkender Dosis und Dosisrate zunehmen kann. In Abschnitt 7.4.3 wurde darauf hingewiesen, daß eine Reihe von quantitativen tierexperimentellen Untersuchungen zur Krebserzeugung durch Strahlen und kanzerogene Chemikalien eine solche Abhängigkeit erkennen läßt; die beschriebenen Beobachtungen an strahlenexponierten Personengruppen lassen jedoch wegen der großen statistischen Fehlerbreite eine quantitative Aussage über diesen "Latenzzeit-Effekt" nicht zu.

In der vorliegenden Studie (Phase A) wird bei der Abschätzung des möglichen zusätzlichen Strahlenkrebsrisikos der Bevölkerung infolge von Kernkraftwerksunfällen von einer rein proportionalen Dosis/Risiko-Beziehung - ohne Schwellendosis - ausgegangen. Dabei wurden für die Risikofaktoren der relevanten Organe bzw. Gewebe des menschlichen Körpers die von der ICRP in ihren neuesten Grundsatzempfehlungen /F8, 7-36/ vorgeschlagenen Richtwerte zugrunde gelegt. Wie aus Tabelle F8, 7-12 hervorgeht, stimmen diese Werte mit den Risikofaktoren überein, die in Abschnitt 7.4.4 für die Altersverteilung der bundesdeutschen Bevölkerung abgeschätzt wurden. Weiterhin wurden die altersabhängigen differentiellen Risikoeffizienten unter Berücksichtigung der Altersstruktur der in der Bundesrepublik Deutschland lebenden Bevölkerung berechnet. Die dazu erforderlichen Zahlenwerte für die Lebenszeit  $t_L$  und die Manifestationszeit  $t_M$  wurden aus WASH-1400 übernommen; das Verhältnis der dort verwendeten differentiellen Risikofaktoren in den verschiedenen Altersstufen blieb erhalten. Die Werte wurden so festgelegt, daß ihre über die Altersstruktur der Bevölkerung integrierten Werte mit den Risikofaktoren nach ICRP übereinstimmen. Allgemein bleibt festzuhalten, daß für Strahlen niedriger LET die Anwendung einer rein proportionalen Dosis/Risiko-Beziehung mit diesen Risikofaktoren im Bereich niedriger Dosen und Dosisleistungen als eine vorsichtige Annahme zu bewerten ist.

7.4.A

ANHANG

Beziehung zwischen Kerma und Organdosen bei n- und  $\gamma$ -Bestrahlung

Bei den Erhebungen über die Krebshäufigkeit bei den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki wird die Strahlenexposition bei n- und  $\gamma$ -Strahlung durch die Kerma in einem von Luft umgebenen kleinen Gewebeelement am Aufenthaltsort der Person zum Zeitpunkt der Explosion angegeben. Die Relation zwischen dieser Kerma-Größe K und der mittleren Energiedosis D in den einzelnen Organen hängt von der Strahlenqualität, der Bestrahlungsgeometrie, der Körpergeometrie und der Lage des jeweiligen Organs im Körper ab.

Im Bericht der UNSCEAR /F8, 7-32/ werden zur Berechnung des Risiko/Dosis-Verhältnisses folgende Konversionsfaktoren verwendet:

Organ	$D_{\gamma} / K_{\gamma}$	$D_p / K_n$	$D_{\gamma} / K_n$
Rotes Knochenmark	0,55	0,26	0,07
Brust (♀)	0,80	0,55	0,045
Schilddrüse	0,76	0,33	0,10

Dabei ist  $D_p$  die Organdosis durch die von Neutronen im Gewebe erzeugten Rückstoßteilchen, insbesondere Protonen,  $D_{\gamma}/K_n$  ist der Konversionsfaktor für die Neutronenkerma bezüglich der  $\gamma$ -Dosis aufgrund von Einfangstrahlung.

Messungen der Tiefendosisverteilung in Phantomen, die der n- und  $\gamma$ -Strahlung von Kernwaffenversuchen in Nevada ausgesetzt waren, deuten auf höhere Werte von  $D_{\gamma}/K_{\gamma}$  und  $K_p/K_n$  in inneren Organen hin. Für Photonen liegen inzwischen genauere Berechnun-

gen der Organdosen als Funktion der Photonenenergie für verschiedene Bestrahlungsgeometrien vor /F8, 7-81/. Danach ist bei allseitiger Bestrahlung des menschlichen Körpers durch ein rotierendes Parallelfeld oder durch die "fallout"-Bodenstrahlung das Verhältnis  $D_Y/K_Y$  im Energiebereich von 0,07 - 5 MeV annähernd konstant (Energieabhängigkeit  $\pm 10 \%$ ). Die resultierenden Mittelwerte, die bei der Abschätzung der Risikoeffizienten für Strahlenspät Schäden in dieser Studie verwendet wurden, sind in Tabelle F8, 7-13 zusammengestellt.

Organ	$\gamma$ -Bestrahlung	n-Bestrahlung	
	$D_Y / K_Y$	$D_p / K_n$	$D_Y / K_n$
Gonaden			
- Testes	0,74		
- Ovarien	0,70	0,3	0,1
Rotes Knochenmark	0,66	0,26 <sup>1)</sup>	0,1
Lunge	0,78	0,3	0,1
Magen	0,74	0,3	0,1
Dünndarm	0,71	0,3	0,1
Dickdarm	0,70	0,3	0,1
Schilddrüse	0,78	0,33 <sup>1)</sup>	0,1
Uterus (Fetus)	0,67	0,3	0,1
Brust (♀)	0,79	0,55 <sup>1)</sup>	0,05
Ganzkörper (Effektive Dosis/ Kerma)	0,74	0,3	0,1

<sup>1)</sup> nach /F8, 7-32/

Tab. F8, 7-13:

Dosis/Kerma-Konversionsfaktoren (rad/rad) bei allseitiger n- und  $\gamma$ -Bestrahlung des menschlichen Körpers (Referenzmensch)

Es sei darauf hingewiesen, daß sich diese Werte auf den normalen erwachsenen Menschen (Referenzmensch) beziehen. Für Kinder liegt das D/K-Verhältnis höher, so daß die Risikoeffizienten für diese Altersgruppe eher überschätzt als unterschätzt werden. Für n- und  $\gamma$ -Bestrahlung des Fetus können die Werte für den Uterus angesetzt werden. In der unteren Reihe der Tabelle F8, 7-13 ist das Verhältnis der effektiven Dosis (Gesamtkörper) zur Kerma angegeben. Die Konversionsfaktoren für Neutronen sind als grobe Näherungswerte zu betrachten.

#### 7.5 Genetische Strahlenschäden

Genetische Strahlenschäden sind bisher bei bestrahlten Bevölkerungsgruppen nicht nachgewiesen worden. Das Ausmaß von genetischen Strahlenschäden kann aber aufgrund der Ergebnisse von Tierversuchen mit ähnlicher Zuverlässigkeit abgeschätzt werden wie das somatischer Strahlenschäden. Ein Teil der strahleninduzierten Mutationen führt schon bei den Kindern und Enkeln der betroffenen Bevölkerung zu manifesten erblichen Schäden (im wesentlichen die dominanten Mutationen). Die rezessiven Mutationen prägen sich dagegen meist erst nach vielen Generationen, also nach ihrer Durchmischung im genetischen "pool" der Gesamtbevölkerung aus. Im Zusammenwirken mit "spontanen" Mutationen und solchen, die durch die natürliche und zivilisatorische Strahlenbelastung der vorausgegangenen Generationen, aber auch durch chemische Umweltschadstoffe entstanden sind, bestimmen sie die Zahl der erblich geschädigten Kinder.

Der Grad der erblichen Gesundheitsschädigung kann von geringen, oft nur mit Spezialmethoden erkennbaren Stoffwechsel- und Formabweichungen bis zu schweren, mit lebenslangem Siechtum verbundenen Krankheiten reichen. Diese Vielfalt möglicher genetischer Folgen entzieht sich einer einfachen Klassifikation der Auswirkungen auf das Schicksal der Betroffenen.

Aus diesem Grund wurde auf die zahlenmäßige Bestimmung der erblich geschädigten Kinder in den verschiedenen Folgegenerationen

verzichtet, um eventuellen Fehlinterpretationen vorzubeugen. Es wurde dagegen die für das Ausmaß aller Erbschäden bestimmte kollektive, genetisch signifikante Strahlendosis errechnet und dargestellt. Diese Kollektivdosis bezieht sich auf eine Bevölkerung von 670 000 000 Menschen und kann in sinnvoller Weise mit den kollektiven genetisch signifikanten Strahlendosen aus anderen Strahlenquellen in Beziehung gesetzt werden. Dieses Vorgehen allein ermöglicht den Vergleich der genetischen Auswirkungen der untersuchten Reaktorunfälle mit anderen genetisch relevanten Strahlenexpositionen der Bevölkerung auf einer gemeinsamen Basis.

Mit den in der wissenschaftlichen Literatur angegebenen genetischen Risikokoeffizienten kann man aus den kollektiven genetisch signifikanten Strahlendosen größenordnungsmäßig die Zahl der als Folge der Strahlenbelastung mit klinisch bedeutsamen Erbschäden geborenen Kinder in den folgenden 2 Generationen abschätzen. Von der ICRP wurde angegeben, daß bei Bestrahlung der Gesamtbevölkerung das Risiko für die ersten 2 Generationen zusammengenommen etwa bei  $10^{-4}$  pro man-rem liegen dürfte /F8, 7-36/. Zur Abschätzung des genetischen Risikos für das Auftreten klinisch bedeutsamer Erbschäden bei den Kindern einzelner bestrahlter Personen wird von der ICRP ein Risikokoeffizient von  $4 \cdot 10^{-5}$  pro rem Gonadendosis empfohlen.

## 7.6 Berechnung der Unfallfolgen

### 7.6.1 Übersicht

Zunächst werden die individuellen Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten  $S$  berechnet, mit der Personen an den jeweiligen Orten aufgrund der nach dem Dosismodell (Kapitel 5) zu erwartenden Dosen zu Tode kommen. Unter Zugrundelegung der jeweiligen Bevölkerungsverteilungen werden dann die Kollektivschäden  $KS$  ermittelt, d.h. die Summe der insgesamt zu erwartenden Schadensfälle.



Der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von somatischen Frühschäden ( $S_{FS}$ ) werden die Kurzzeitdosis des Knochenmarks (Abschnitt 5.1.3, Gleichung 5.1) und die Dosis/Wirkungs-Beziehungen zugrunde gelegt, wie sie in Abschnitt 7.3 dargestellt sind.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten von somatischen Spätschäden ( $S_{SS}$ ) werden aufgrund der Langzeitdosen in folgenden Organen (O) ermittelt (Abschnitt 5.1):

- Knochenmark (KM),
- Knochenoberfläche (KO),
- Lunge (LG),
- Schilddrüse (SD),
- Brust (BR).

Für die übrigen Organe (Restkörper) wird als repräsentative Dosis die Langzeitdosis im Ganzkörper (GK) zugrunde gelegt.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird hier unter der Annahme von linearen Dosis/Risiko-Beziehungen ohne Schwellendosis berechnet, wie sie in Abschnitt 7.4 dargestellt sind.

Mit Hilfe der ortsabhängigen Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten und der jeweiligen Bevölkerungsverteilungen erhält man schließlich die zu erwartenden Kollektiv-Frühschäden  $KS_{FS}$  und die Kollektiv-Spätschäden  $KS_{SS}$ , d.h. die Anzahl der jeweils zu erwartenden Schadensfälle. Dabei wird bis zu einer Entfernung von 80 km<sup>1</sup>) die standortspezifische Bevölkerung zugrunde gelegt. Von 80 bis 540 km<sup>1</sup>) wird eine gleichförmige Bevölkerungsdichte von 250 Einwohnern/km<sup>2</sup> angenommen (repräsentativ für Mitteleuropa). Liegen innerhalb dieses Bereiches größere Gewässer, wird die Bevölkerungsdichte entsprechend reduziert. Dem Bereich von 540 bis 2500 km, in dem die Restaktivität niedergeschlagen wird (Abschnitt 4.12), wird eine mittlere Bevölkerungsdichte von 25 Einwohnern/km<sup>2</sup> zugeordnet (repräsentativ für einen Kreis-

---

<sup>1</sup>) Die Festlegung dieser Entfernungen orientiert sich an den Entfernungen 50 miles (80 km) und 350 miles (540 km) der amerikanischen Reaktorsicherheitsstudie (WASH-1400).

ring von 2500 km Außendurchmesser um Mitteleuropa, der ganz Europa einschließlich der Wasserflächen umfaßt).

Auf die genetische Belastung und ihre quantitative Behandlung wurde in Abschnitt 7.5 eingegangen. Im Rahmen der Unfallmodelle wird sie in Form der genetisch signifikanten Kollektivdosis ausgewiesen. Die Ermittlung dieser Größe ist in Abschnitt 5.2 dargestellt.

Zur numerischen Berechnung aller Unfallfolgen wurde das Rechenprogramm UFOMOD (Unfall-Folgen-Modell) erstellt. Die Beschreibung kann /F8, 7-114/ entnommen werden.

## 7.6.2 Berechnung der Schäden

### 7.6.2.1 Berechnung der Frühschäden

Zur Berechnung der Schadenseintrittswahrscheinlichkeit wird die Kurzzeitknochenmarkdosis  $D^{KM}$  (Gleichung 5.1) in die Dosis/Wirkungs-Beziehung für Frühschäden eingesetzt. Dies ist eine Funktion  $F(D)$  mit sigmoidem Verlauf, die erst oberhalb einer Schwelle  $D_{Sch}$  von null verschieden ist und bei sehr hohen Dosen gegen eins geht. Der genaue Verlauf dieser Beziehung ist in Abschnitt 7.3 begründet.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten für Strahlenfrühschäden werden ortsabhängig

$$S_{FS}(r, \phi) = F(D^{KM}(r, \phi)) \quad (7.1)$$

ermittelt. Der Berechnung des Kollektivschadens wird die ortsabhängige Bevölkerungsdichte  $p(r, \phi)$  [Einwohner/km<sup>2</sup>] unterlegt. Die Kollektivschäden berechnen sich bei Vorliegen der Windrichtung  $\phi_0$  mittels Integration über den Azimutwinkel  $\phi$  und die Entfernung  $r^1$ ).

<sup>1)</sup> Im Laufe der Rechnungen wird die Windrichtung  $\phi$  schrittweise variiert ( $\Delta\phi_0 = 10^\circ$ ) und die Kollektivschäden für jeden der vorgegebenen Wetterabläufe ermittelt.

$$KS_{FS}(\phi_0) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S_{FS}(r, \phi - \phi_0) \cdot p(r, \phi) d\phi dr \quad (7.2)$$

Die Erfassung der Wohnbevölkerung wird weiter unten beschrieben.

### 7.6.2.2 Berechnung der Spätschäden

In Analogie zur Berechnung der zu erwartenden Dosen (Gleichung 5.18) berechnet sich bei Berücksichtigung individueller Daten (Zeitpunkt der Geburt  $t_G$ , Zeitpunkt des Unfalls  $t_U$ , Lebenserwartung  $l$ ) die bis ans Lebensende eines Individuums zu erwartende organabhängige Schadenseintrittswahrscheinlichkeit  $S_{SS}^0$  wie folgt (aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in der folgenden Gleichung das Symbol für die Organabhängigkeit "O" unterdrückt)<sup>1)</sup>:

$$S_{SS}(t_U - t_G, l) = \int_{t_U - t_G}^l C(\tau_I - (t_U - t_G)) \cdot f(\tau_I - (t_U - t_G)) \cdot \dot{I}(\tau_I) \cdot \int_0^{l - \tau_I} \dot{g}(\tau_I, \tau_B) \cdot \underbrace{\int_0^{l - (\tau_I + \tau_B)} \dot{s}(\tau_I + \tau_B, \tau_S) d\tau_S d\tau_B d\tau_I}_{\text{Schadenseintrittswahrscheinlichkeit bis ans Lebensende durch eine Dosis von 1 rem im Alter von } \tau_I + \tau_B}$$

Schadenseintrittswahrscheinlichkeit bis ans Lebensende durch eine Dosis von 1 rem im Alter von  $\tau_I + \tau_B$

Schadenseintrittswahrscheinlichkeit bis ans Lebensende durch Inkorporation von 1 Ci im Alter von  $\tau_I$

Schadenseintrittswahrscheinlichkeit bis ans Lebensende durch Inkorporation bis ans Lebensende (7.3)

<sup>1)</sup> Zur Berechnung der Dosen und Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten siehe /F8, 7-115/.

mit:

$C, f, \dot{i}, \dot{g}, t_U, t_G, \tau_I, \tau_B, l$  siehe Gleichung (5.18)

$\dot{s}$  = differentieller Risikoeffizient

$\tau_S$  = Zeitspanne zwischen Bestrahlung und Schadenseintritt

Die Anordnung der Zeiten ist der schematischen Darstellung in Bild F8, 7-20 zu entnehmen.

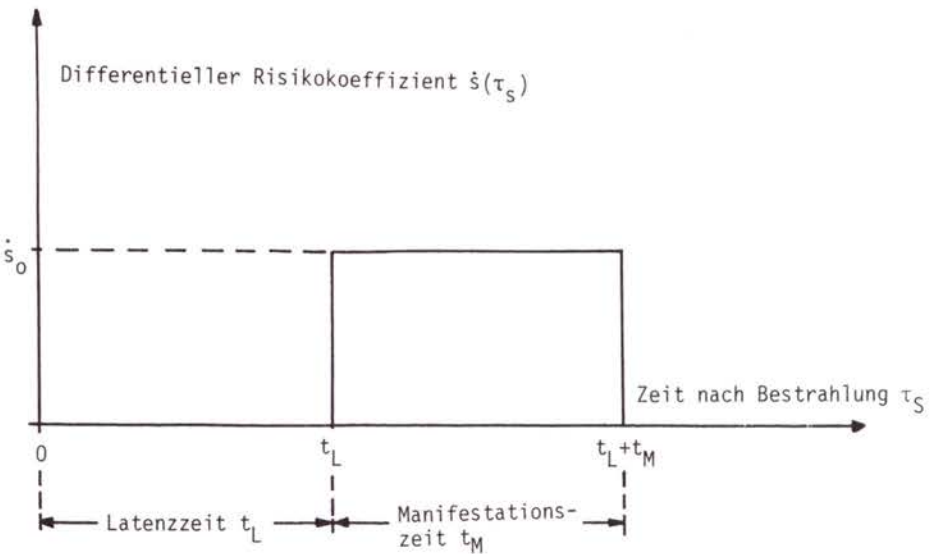


Bild F8, 7-20:


Approximation des differentiellen Risikoeffizienten für Schäden durch eine Stufenfunktion


Nach der Berechnung der Schadenseintrittswahrscheinlichkeit durch die verschiedenen Radionuklide und über die einzelnen Expositionspfade (analog zu den Gleichungen 5.8 bis 6.12) wird durch Aufsummierung analog zur Gleichung (5.2) die Gesamteintrittswahrscheinlichkeit gebildet.

Im nächsten Schritt werden die Spätschaden-Eintrittswahrscheinlichkeiten für das repräsentative Individuum des jeweiligen

Kollektivs berechnet. Dieser Ermittlung sind bevölkerungsstatistische Daten zugrunde zu legen. In Analogie zu Gleichung (5.24) berechnet sich die Spätschaden-Eintrittswahrscheinlichkeit für das Individuum, das das Kollektiv aller zum Zeitpunkt des Unfalls  $t_U$  lebenden Personen (=1.G.<sup>1</sup>) repräsentiert, wie folgt:

$$\overline{s_{SS}}(1.G.) = \int_0^{\infty} \frac{1}{L} \int_{t_U - t_G}^{\infty} p(l) \cdot s_{SS}(t_U - t_G, l) \, dl \, d(t_U - t_G) \quad (7.4)$$


  
 Mittlere Schadenseintrittswahrscheinlichkeit einer Person mit dem Alter  $t_U - t_G$  zur Zeit des Unfalls


  
 Schadenseintrittswahrscheinlichkeit einer zur Zeit des Unfalls  $t_U$  lebenden Person (1.G.)

mit:

$p(l)$  = Lebenserwartungs-Dichtefunktion, siehe Gleichung (5.19)

$\frac{1}{L}$  = Geburtenrate, normiert auf eine lebende Person, siehe Gleichung (5.21)

Entsprechend ergibt sich, analog zu Gleichung (5.26), die totale Spätschaden-Eintrittswahrscheinlichkeit, normiert auf ein Individuum, das das Kollektiv aller betroffenen Personen, d.h. sowohl der zum Zeitpunkt des Unfalls  $t_U$  lebenden Personen als auch aller Nachgeborenen (= a.G.<sup>2</sup>) repräsentiert, zu

$$\begin{aligned} \overline{s_{SS}}(a.G.) &= \int_0^{\infty} \frac{1}{L} \int_{t_U - t_G}^{\infty} p(l) \cdot s_{SS}(t_U - t_G, l) \, dl \, d(t_U - t_G) \\ &+ \int_0^{\infty} \frac{1}{L} \int_0^{\infty} p(l) \cdot s_{SS}(t_G - t_U, l) \, dl \, d(t_G - t_U) \end{aligned} \quad (7.5)$$

<sup>1</sup>) 1.G. steht für "erste Generation"

<sup>2</sup>) a.G. steht für "alle Generationen"

Da wegen der linearen Dosis/Risiko-Beziehung die Möglichkeit der numerischen Überschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit besteht ( $S_{SS} > 1!$ ), müssen die jeweils berechneten Zahlenwerte in folgender Weise begrenzt werden:

$$S_{SS}(t_U - t_G, 1) = \min\{S_{SS}^{\text{berechnet}}(t_U - t_G, 1), 1\} \quad (7.6)$$

Aus den so begrenzten organabhängigen Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten  $S_{SS}^O$  berechnet sich die totale Eintrittswahrscheinlichkeit  $S_{SS}^T$  für einen Spätschaden - auch hier gilt es, die Möglichkeit der numerischen Überschätzung ( $S_{SS}^T > 1!$ ) auszuschließen - zu:

$$S_{SS}^T(t_U - t_G, 1) = 1 - \prod_O (1 - S_{SS}^O(t_U - t_G, 1)) \quad (7.7)$$

Schließlich ist die Eintrittswahrscheinlichkeit für Fröhschäden  $S_{FS}$  (das Auftreten von Fröhschäden liegt zeitlich vor demjenigen der Spätschäden) zu berücksichtigen. Dies führt zur effektiven totalen Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Spätschaden:

$$S_{SS_{\text{eff}}}^T(t_U - t_G, 1) = 1 - (1 - S_{SS}^T(t_U - t_G, 1)) \cdot (1 - S_{FS}) - S_{FS} \quad (7.8)$$

Die Begrenzungen, wie sie mit Hilfe der Gleichungen (7.6) und (7.7) formuliert sind, müßten bereits nach der Gleichung (7.3), d.h. für das einzelne Individuum, vollzogen werden. Erst dann wären die Gleichungen (7.4) und (7.5) in entsprechender Weise anzuwenden. Aus Gründen der Rechenvereinfachung wurden die Einzel-Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten jedoch erst beim Individuum, das das Kollektiv aller zum Zeitpunkt des Unfalls lebenden, und beim Individuum, das alle nachfolgend geborenen Personen repräsentiert, nach Gleichung (7.5) begrenzt. Diese Vereinfachung führt zu einer Überschätzung der somatischen Spätschäden. Ebenso wurde die Möglichkeit einer Mehrfachschädigung beim repräsentativen Individuum ausgeschlossen (Gleichung 7.7). Dies führt ebenfalls zu pessimistischen Abschätzungen.

Der Berechnung der Kollektivschäden wird die ortsabhängige Bevölkerungsdichte  $p(r, \phi)$  [Einw./km<sup>2</sup>] unterlegt. Die Integration wird analog zu Gleichung (7.2) vorgenommen:

$$KS_{SS}(\phi_0; 1.G.) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \overline{S_{SS}^T}_{eff}(r, \phi - \phi_0; 1.G.) \cdot p(r, \phi) d\phi r dr \quad (7.9)$$

bzw.

$$KS_{SS}(\phi_0; a.G.) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \overline{S_{SS}^T}_{eff}(r, \phi - \phi_0; a.G.) \cdot p(r, \phi) d\phi r dr \quad (7.10)$$

### 7.6.3 Vorgehensweise und Daten

#### 7.6.3.1 Dosis/Wirkungs-Beziehung für Fröhschäden

Bei der Berechnung der Fröhschäden wird von zwei verschiedenen Dosis/Wirkungs-Beziehungen ausgegangen:

- Kurve B aus WASH-1400

$D_{Sch}$  : 320 rad (Schwellenwert)

$LD_{01}^1$ ): 350 rad

$LD_{50}^1$ ): 510 rad

- Dosis/Wirkungs-Beziehung nach Abschnitt 7.3

$D_{Sch}$  : 100 rad (Schwellenwert)

$LD_{01}^1$ ): 250 rad

$LD_{50}^1$ ) 510 rad

Beide sind in Bild F8, 7-4 dargestellt.

---

<sup>1</sup>) Bei Bestrahlung eines Kollektivs mit der Dosis  $LD_{01}$  bzw.  $LD_{50}$  sterben im Mittel 1 % bzw. 50 % der Personen innerhalb von 60 Tagen.

### 7.6.3.2 Dosis/Risiko-Beziehung für Spätschäden

Die Eintrittswahrscheinlichkeit für Spätschäden ist über den Risikokoeffizienten in linearer Weise mit der Dosis verknüpft (Abschnitt 7.4). In die Berechnung von Spätschäden gehen jedoch die differentiellen Risikokoeffizienten  $\dot{s}(t)$  ein (Gleichung 7.3), die die zu erwartenden Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Zeit nach Applikation einer Dosis von 1 rem angeben. Sie werden wie in WASH-1400 durch die in Bild F8, 7-20 dargestellte Stufenfunktion approximiert. Nach Ablauf einer gewissen Latenzzeit  $t_L$  besteht während der darauffolgenden Manifestationszeit  $t_M$  eine konstante Wahrscheinlichkeit  $\dot{s}_0$  für das Eintreten des Schadens. Dabei ist die natürliche Lebenserwartung eines Individuums noch nicht berücksichtigt. Diese notwendige Korrektur wird dann innerhalb des Rechenganges durch Einbeziehung der individuellen Daten in der in Bild F8, 7-21 dargestellten Weise vorgenommen.

Die altersabhängigen differentiellen Risikokoeffizienten  $\dot{s}(A, t)$  wurden unter Berücksichtigung der Altersstruktur der in der Bundesrepublik Deutschland lebenden Bevölkerung berechnet /F8, 7-115/. Dabei wurden die in WASH-1400 vorgegebenen Zahlenwerte für die Latenzzeit  $t_L$  und die Manifestationszeit  $t_M$  übernommen; ebenso blieb das Verhältnis der dort verwendeten differentiellen Risikofaktoren  $\dot{s}_0(A_1) : \dot{s}_0(A_2) : \dots$  in den verschiedenen Altersstufen  $A_1, A_2, \dots$  erhalten. Die Werte  $\dot{s}_0(A)$  wurden schließlich so festgelegt, daß ihre über die Altersstruktur der Bevölkerung integrierten Werte mit den von der ICRP /F8, 7-36/ empfohlenen Risikokoeffizienten  $s_{ICRP}$  (Tabelle F8, 7-14) übereinstimmen. Die so ermittelten organ- und altersabhängigen differentiellen Risikofaktoren sind in Tabelle F8, 7-15 wiedergegeben.

Bei der Berechnung der Spätschäden nach Gleichung (7.3) bzw. (7.4) und (7.5) wurden zur Reduzierung der durch die rechenintensiven Mehrfachintegrationen bedingten hohen Rechenzeiten vorberechnete effektive Schadensfaktoren eingeführt, durch die das Problem auf einfachere mathematische Operationen reduziert



werden konnte. Die Berechnungsgrundlagen und die Zahlenwerte der berechneten effektiven Schadensfaktoren sind in /F8, 7-115/ dargestellt.

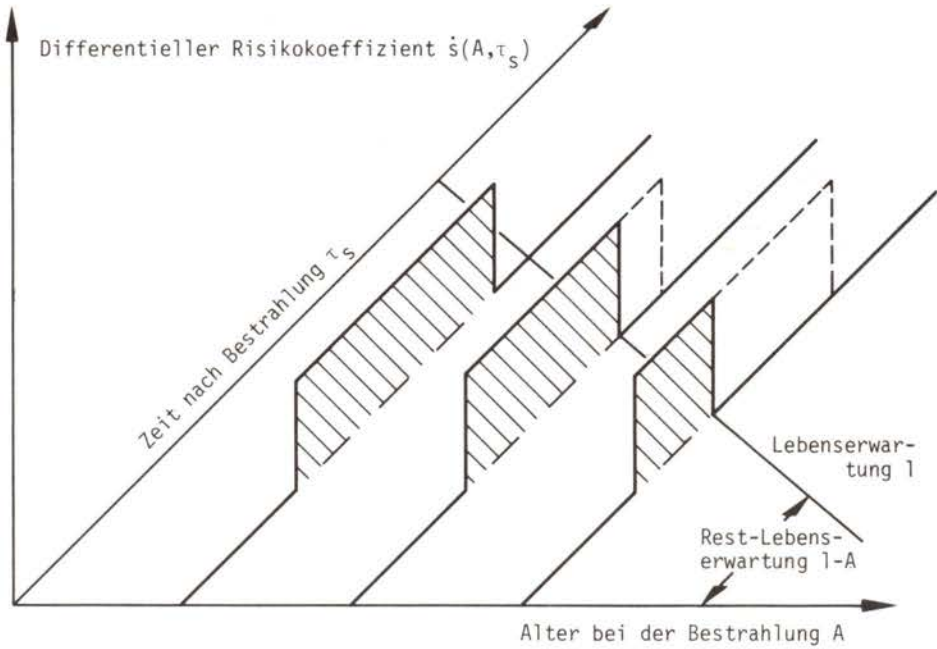


Bild F8, 7-21:

Approximation des differentiellen Risikoeffizienten für Spätschäden unter Berücksichtigung von Alter und Rest-Lebenserwartung

Schadensart	Zugrunde gelegte Organdosis	Risikofaktor $s_{ICRP}$ [Fälle/ $10^6$ man-rem]
Leukämie	Knochenmarkdosis	20
Knochenkrebs	Knochenhautdosis	5
Lungenkrebs	Lungendosis	20
Schilddrüsenkrebs	Schilddrüsendosis	5
Brustkrebs	Brustdosis <sup>1)</sup>	25 <sup>2)</sup>
Andere Krebsarten	Ganzkörperdosis <sup>3)</sup>	50 <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Es wurden die Dosisfaktoren für den Ganzkörper verwendet.

<sup>2)</sup> bezogen auf die Gesamtbevölkerung

<sup>3)</sup> Der Wert  $s = 50 \cdot 10^{-6} \text{ rem}^{-1}$  wird als obere Grenze angesehen. Der Beitrag eines einzelnen Organs ist kleiner als ein Fünftel dieses Wertes.

Tab. F8, 7-14:

Mortalitäts-Risikofaktoren für Spätschäden nach ICRP 26

Schadensart	Alter bei der Bestrahlung [a]	Latenzzeit [a]	Manifestationszeit [a]	Risikofaktor $\dot{s}_0$ [ $\frac{\text{Fälle}}{a \cdot 10^6 \text{ man-rem}}$ ]
Leukämie	"in utero"	0	10	12,06
	0 - 10	2	25	1,61
	> 10	2	25	0,80
Knochenkrebs	"in utero"	0	10	0,53
	0 - 20	10	30	0,35
	> 20	10	30	0,18
Lungenkrebs	"in utero"	0	10	3,71
	0 - 10	15	30	0,21
	> 10	15	30	1,34
Schilddrüsenkrebs	"in utero"	0	10	0,69
	0 - 10	10	30	0,25
	> 10	10	30	0,25
Brustkrebs	"in utero"	0	10	4,60
	0 - 10	15	30	0,22
	> 10	15	30	1,68
Andere Krebsarten	"in utero"	0	10	9,34
	0 - 10	15	30	0,34
	> 10	15	30	3,40

Tab. F8, 7-15:

Berechnete Mortalitäts-Risikofaktoren für Spätschäden nach /F8, 7-115/

### 7.6.3.3 Erfassung der Wohnbevölkerung

Zur Berechnung der Kollektivdosen (Gleichung 5.28 und 5.29) und Kollektivschäden (Gleichung 7.2, 7.9 und 7.10) wird die Wohnbevölkerung um die einzelnen Standorte (Tabelle F8, 4-4) in Kreisringsektoren  $F^P$  erfaßt (Bild F8, 7-22) und innerhalb dieser als homogen verteilt angenommen.

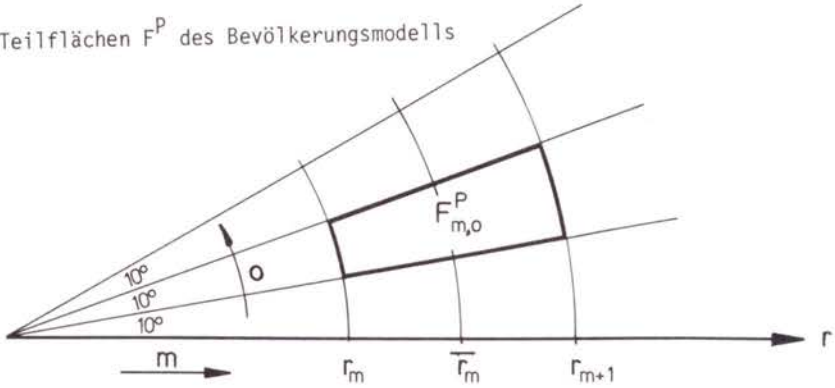
Die Radien dieser Kreisringe sind die gleichen wie die der meteorologischen Kreisringsektoren (Tabelle F8, 4-6), während die Strahlen einen festen Winkel von  $10^\circ$  zueinander einnehmen (beginnend bei  $355^\circ$ ). Während bis zu einer Entfernung von 80 km die tatsächliche Bevölkerung - auch die des benachbarten Auslands - den Kreisringsektoren zugeordnet wurde (diese sind in Tabelle F8, 7-16(1) - (19) zusammengestellt<sup>1)</sup>), wird in der Entfernung von 80 bis 540 km eine durchschnittliche Bevölkerung von 250 Einwohnern/km<sup>2</sup> (repräsentativ für Mitteleuropa) zugrunde gelegt. Liegen innerhalb dieses Bereichs größere Gewässer, wird die Bevölkerungsdichte entsprechend reduziert. Dem Bereich von 540 bis 2500 km, innerhalb dessen die über die 540-km-Grenze hinausgetragene Aktivität niedergeschlagen wird, wird eine Bevölkerungsdichte von 25 Einwohnern/km<sup>2</sup> zugrunde gelegt (= mittlere Bevölkerungsdichte innerhalb dieses Kreisringes um Mitteleuropa, bezogen auf die Gesamtfläche).

Bei der Überlagerung der Kreisringsektoren des meteorologischen Modells  $F^M$  mit den Kreisringsektoren der Bevölkerungsverteilungen  $F^P$  überdecken sich diese in azimuthaler Richtung nicht genau. Durch die Überlagerung werden schmälere Kreisringsektoren in größerer Anzahl gebildet, die dann als neue, selbständige

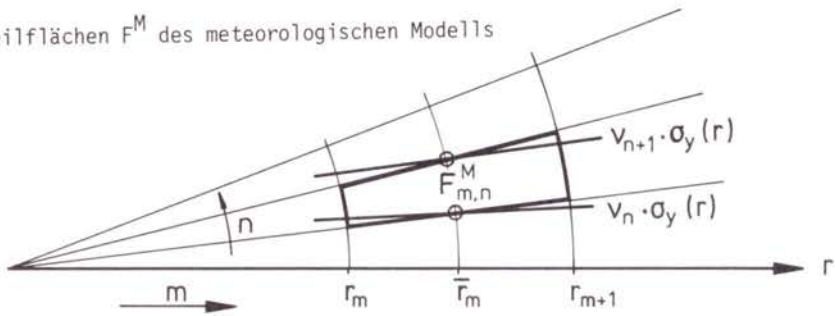
---

<sup>1)</sup> Die Bevölkerungsdaten wurden vom Ingenieurbüro Bonnenberg & Drescher zur Verfügung gestellt. Grundlage der Erhebung war die Wohnbevölkerung nach der Volkszählung von 1970. Das dabei angewandte Raster für die Erfassung der Wohnbevölkerung, die einzelnen Flächenelementen zugeordnet wird, hatte in einer Entfernung bis 10 km um die Standorte eine Weite von 200 m x 200 m, von 10 km bis 24 km eine Weite von 500 m x 500 m und darüber hinaus eine Weite von 1000 m x 1000 m /F8, 7-116/. Im Lichte der Genauigkeit dieser Ausgangsdaten sind die Zahlenwerte der Tabelle F8, 7-16(1) bis 7-16(19) zu sehen, die aus den Erfassungsdaten für das hier angewandte Raster umgerechnet wurden.

Teilflächen  $F^P$  des Bevölkerungsmodells



Teilflächen  $F^M$  des meteorologischen Modells



Teilflächen  $F^{MP}$ , gebildet durch Überlagerung der Teilflächen  $F^P$  und  $F^M$  beider Modelle

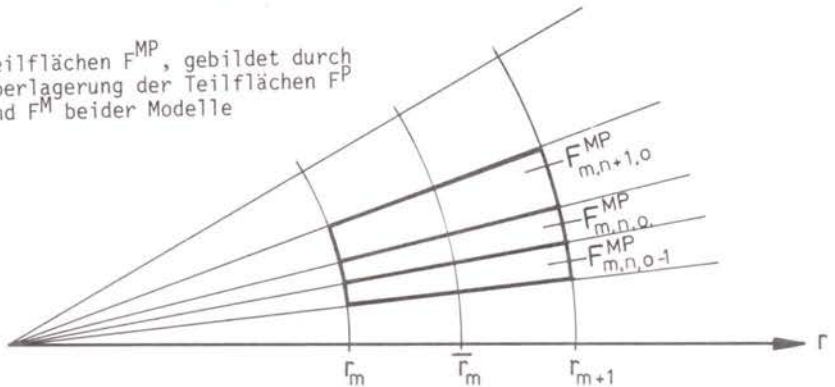


Bild F8, 7-22:

Konstruktion der Teilflächen  $F^P$ ,  $F^M$  und  $F^{MP}$  für eine Freisetzungsphase

Teilflächen  $F^{MP}$  behandelt werden. Dieser Sachverhalt ist für eine Phase schematisch in Bild F8, 7-22 dargestellt. Bei längeren Freisetzungen vervielfältigt sich die Zahl der neuen Teilflächen entsprechend.

STANDORT NR. 101	BIBLIS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
DER STANDORT LIEGT IN DER MET. ZONE NR. 1. OBERRRH.														
WANDSCHNEILHEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE 1 0.4290														
ZAHLE DER REAKTORBLECKE 3														
ANZAHL DER KREISLAENGE	18													
ANZAHL DER ZENTROEN	36													
ANZAHL DER KREISLAENGSSEKTOREN	648													
KREISLAENGE NR.														
INWERTER RADIUS	191	0	803	1200	1000	3400	3400	4400	8000	17000	18000	20000	30000	54000
ANZAHL DER KREISLAENGE	191	700	1000	1200	1000	3400	3400	4400	8000	17000	18000	20000	30000	54000
ANZAHL DER ZENTROEN	191	800	1200	1000	1000	3400	3400	4400	8000	17000	18000	20000	30000	54000
ANZAHL DER KREISLAENGSSEKTOREN	648	5.59E+04	6.98E+04	9.77E+04	2.79E+05	6.28E+05	1.41E+06	3.04E+06	4.98E+06	9.77E+06	2.79E+07	6.28E+07	1.41E+08	3.04E+08
SEKTOR MINDRICHTUNGS-														
NR. WANDSCHNEIL.														
1 0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3115	66293	87983	29721
2 0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1215	29242	414032	154338
3 0-0278	0	0	0	133	0	670	0	0	0	0	1215	29242	414032	154338
4 0-0278	0	0	0	133	0	825	0	0	0	0	14637	45817	289933	133992
5 0-0278	0	0	0	0	0	0	0	295	1546	23776	87915	163867	163867	163867
6 0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4784	163867	163867	163867
7 0-0278	0	0	0	0	0	0	0	312	179	1657	7859	34829	42771	122396
8 0-0278	0	0	0	0	0	0	540	48	324	5489	9399	12757	22251	36588
9 0-0278	0	0	0	0	0	0	2698	0	1384	6132	3707	8785	20824	44165
10 0-0278	0	0	0	0	0	0	182	0	182	182	182	182	182	182
11 0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	594	16178	4458	10276	12138	29657
12 0-0278	0	0	0	0	0	145	217	0	3887	1998	1747	13487	7366	32680
13 0-0278	0	0	0	0	0	841	1230	0	1900	7654	13463	14346	22571	30593
14 0-0278	0	0	0	0	0	651	1592	0	1111	0	7534	41564	50180	50180
15 0-0278	0	0	0	0	0	651	1592	206	1111	0	7534	41564	50180	50180
16 0-0278	0	0	0	0	0	651	1592	3835	3932	882	20504	47028	163315	56219
17 0-0278	0	0	0	0	0	651	1592	1426	5276	19266	7817	84728	82233	85777
18 0-0278	0	0	0	0	0	651	1592	1426	5276	19266	7817	84728	82233	85777
19 0-0278	0	0	0	0	0	214	0	2731	164	471	54964	100049	71695	267023
20 0-0278	0	0	0	0	0	92	0	3723	4159	48063	25108	36903	67634	67634
21 0-0278	0	0	0	0	0	137	202	1375	22238	4252	14587	26623	91715	35496
22 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
23 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
24 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
25 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
26 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
27 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
28 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
29 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
30 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
31 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
32 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
33 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
34 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
35 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725
36 0-0278	0	0	0	0	0	46	231	0	6850	2995	2740	11232	7938	23725

Tab. F8, 7-16(1):  
Bevölkerungsdaten Biblis

STANDORT NR. 102 PHILLIPS  
 DER STANDORT LIEGT IN DER NET. ZONE NR. 1 OBEARH.  
 WAHRSCHEINLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE 1 0,2860

ZAHL DER REAKTORALDECKE: 2

ANZAHL DER KREISRINGE 18  
 ANZAHL DER SEKTOREN 36  
 ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN 648

KREISRING NR.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
INNERER RADIUS (M)	0,0	830,0	1230,0	1600,0	2400,0	3600,0	5400,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0
RADIUS FUER DOSSIBERECHNUNG (M)	700,0	1030,0	1400,0	2030,0	3070,0	4500,0	6700,0	10030,0	14000,0	20000,0	30050,0	45070,0	67030,0
AUSSERER RADIUS (M)	800,0	1200,0	1630,0	2400,0	3600,0	5400,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36070,0	54000,0	80000,0
FLAECHE DES KREISRINGSEKTORS (M2)	5,59E+04	6,98E+04	9,77E+04	2,79E+05	6,28E+05	1,41E+06	3,04E+06	6,98E+06	9,77E+06	2,79E+07	6,28E+07	1,41E+08	3,04E+08

SEKTOR NR.	WINDRICHTUNGS- WAHRSCHEINL.	WOHNBEVÖLKERUNG												
1	0,0278	0	0	0	0	0	11609	4028	4638	31483	229122	53915	87438	
2	0,0278	0	0	0	0	0	1047	0	0	38293	126845	41768	235589	
3	0,0278	0	0	0	0	0	0	198	1626	33186	72855	60558	82819	
4	0,0278	0	0	0	0	524	582	1121	62	7048	21589	50396	42186	
5	0,0278	0	0	0	0	408	466	3643	8957	501	44572	63608	15751	
6	0,0278	0	0	0	0	0	0	4318	5670	0	34868	30395	9574	
7	0,0278	0	0	0	0	876	243	135	5547	0	24908	21715	23982	
8	0,0278	0	0	0	0	1265	536	0	0	7804	22172	13870	18993	
9	0,0278	0	0	0	0	1168	876	0	3496	5987	13124	13998	38744	
10	0,0278	0	0	0	0	779	772	1561	836	0	10895	17683	24593	
11	0,0278	0	0	0	0	0	198	3148	3813	5284	7471	7152	34578	
12	0,0278	0	0	0	0	0	339	1693	429	3799	3795	8554	10158	
13	0,0278	0	0	0	0	0	0	542	4810	0	8156	13433	19562	
14	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	2517	1647	4715	9224	36455	
15	0,0278	0	0	0	188	0	0	0	891	3252	24940	24653	45089	
16	0,0278	0	0	0	625	938	187	0	2749	3832	11998	5103	75382	
17	0,0278	0	0	0	688	1625	1062	1709	4118	3981	14046	24324	82129	
18	0,0278	0	0	0	125	125	0	427	1645	273	10731	29594	31123	
19	0,0278	0	0	0	0	0	0	77	198	1165	713	11929	26840	
20	0,0278	0	0	0	0	0	0	1768	3212	20258	134721	54794	38646	
21	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	686	532	37858	78811	98447	
22	0,0278	0	0	0	436	54	0	103	495	6105	15734	15373	40465	
23	0,0278	0	0	0	1308	0	1110	2608	6828	6611	8138	10199	65444	
24	0,0278	0	0	0	872	59	5547	0	1400	6823	7154	15113	29713	
25	0,0278	0	0	0	0	0	2433	926	5485	4039	12402	13475	22538	
26	0,0278	0	0	0	0	0	44	225	135	8229	24153	10479	12280	
27	0,0278	0	0	0	0	0	0	2323	798	2867	10835	24726	16245	
28	0,0278	0	0	0	0	0	1432	2740	888	5466	8395	3181	107774	
29	0,0278	0	0	0	0	0	0	59	1576	1251	12687	3373	7808	
30	0,0278	0	0	0	126	356	0	1087	3315	1757	21308	57206	78285	
31	0,0278	0	0	0	291	906	304	1521	0	5038	15792	24899	40241	
32	0,0278	0	0	0	97	1100	0	978	319	17546	7482	8955	29742	
33	0,0278	0	0	0	0	1683	66	749	3333	10230	22976	28293	35222	
34	0,0278	0	0	0	0	1185	1557	1996	0	6395	14748	28592	79629	
35	0,0278	0	0	0	0	0	129	3242	3879	13229	12082	23813	31834	
36	0,0278	0	0	0	0	0	0	13417	7185	490	36281	96186	83466	

Tab. F8, 7-16(2):

Bevölkerungsdaten Philippsburg

STANDORT NR. 103 NEUPORT  
 DER STANCOPT LIEGT IN DER NETZ-ZONE NR. 1 OBERRM.  
 WAHRSCHENLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0,1430

ZAHLE DER REAKTORBLOCKE: 1

ANZAHL DER KREISSEKTOREN 18  
 ANZAHL DER SEKTOREN 36  
 ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN 648

KREISSEINGANG NR.

INNEERER RADIUS 0,0  
 AUßERER RADIUS 800,0  
 FLÄCHE DES KREISRINGSEKTORS (M<sup>2</sup>) 5,59E+04  
 SEKTOR WÄRSCHENLICHKEIT-  
 WKZ. #WÄRSCHENLICH.

WÖHNERBEVÖLKERUNG

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	0	0	0	363	0	183	1346	7721	1227	12940	10556
2	0	0	0	0	48	30	0	183	1483	3185	2659	12384	12338
3	0	0	0	0	0	0	0	2400	1628	11754	40666	13004	58472
4	0	0	0	0	0	0	488	2795	5289	15801	34687	108853	25459
5	0	0	0	0	0	0	3158	72	2260	1541	24703	50917	56518
6	0	0	0	0	0	0	0	600	5811	13163	8752	20128	54951
7	0	0	0	0	0	2398	0	2612	8048	2612	8048	2612	8048
8	0	0	0	0	0	378	0	378	1483	2057	11843	2491	16168
9	0	0	0	0	0	336	0	1482	2826	2057	26571	16854	128473
10	0	0	0	0	0	2307	0	3953	5652	6544	7046	55220	422031
11	0	0	0	0	0	207	0	1278	3733	16262	86857	292704	208886
12	0	0	0	0	240	0	704	17144	32557	4472	36876	34689	72540
13	0	0	0	0	0	0	446	4857	15583	15583	15377	21110	49527
14	0	0	0	0	0	0	141	8579	13867	13867	13867	13867	13867
15	0	0	0	0	0	0	0	6654	11497	889	4440	7009	3273
16	0	0	0	0	0	0	101	4347	14805	5108	1377	2110	49527
17	0	0	0	0	0	0	0	3377	10729	2593	2297	32386	18361
18	0	0	0	0	0	0	0	4437	1223	5512	14917	17951	17951
19	0	0	0	0	0	0	0	479	559	110	5918	18050	12112
20	0	0	0	0	0	0	0	479	559	110	5918	18050	12112
21	0	0	0	0	0	617	0	4795	3026	3225	6059	3781	15584
22	0	0	0	0	0	2427	0	1825	1720	4770	7486	22233	112315
23	0	0	0	0	0	538	0	1825	1720	4770	7486	22233	112315
24	0	0	0	0	0	1115	0	1912	1492	4544	10660	19453	69011
25	0	0	0	0	0	30	0	4402	1419	2262	8100	6757	50330
26	0	0	0	0	0	30	0	2450	1760	1112	1112	1112	1112
27	0	0	0	0	0	393	0	343	343	5167	12395	16502	140017
28	0	0	0	0	0	44	0	3215	789	3487	50495	13461	26800
29	0	0	0	0	0	132	0	3342	2548	6725	11978	39854	41122
30	0	0	0	0	0	1028	0	1603	186	4753	21972	61174	61174

Tab. F8, 7-16(3):  
 Bevölkerungsdaten Neuport



STANDORT NR. 104, WYHL		ZAML DER REAKTORELEKTRIF 1												
DER STANDORT LIEGT IN DER MET. ZONE NR. 1 OBERNM.		WÄRSCHENLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALS DER ZONE : 0,1430												
ANZAHL DER KREISRINGE		18												
ANZAHL DER KREISSEKTOREN		36												
ANZAHL DER KREISSEKTOREN		60												
KREISRING NR.														
INNERER RADIUS														
RADIUS FUER DOSISBERECHNUNG														
ÄUSSERER RADIUS														
FLÄCHE DES KREISSEKTORS														
SEKTOR WINDRICHTUNGSGES.														
NR.		WÄRSCHENL.												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0-0278	0	0	0	0	133	67	0	0	0	2291	16008	31795	31688
2	0-0278	0	0	0	83	133	0	426	1399	3347	7225	36280	57104	
3	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	1416	2428	7733	40972	41468	
4	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	1773	1671	31526	45394	129201	
5	0-0278	0	0	0	0	0	0	681	2596	1671	31526	45394	129201	
6	0-0278	0	0	0	132	0	0	1634	245	1743	7332	9078	14116	
7	0-0278	0	0	0	922	0	0	522	1479	624	3157	10319	31843	
8	0-0278	0	0	0	49	0	0	0	2248	1463	447	4855	14002	
9	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	3440	819	2758	5259	78417	
10	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	1416	2428	7733	40972	41468	
11	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	1416	2428	7733	40972	41468	
12	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	1416	2428	7733	40972	41468	
13	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	1416	2428	7733	40972	41468	
14	0-0278	0	0	0	0	482	540	77	398	1208	1304	5042	17326	
15	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	4098	1120	4589	8233	75246	
16	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	4098	1120	4589	8233	75246	
17	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	4098	1120	4589	8233	75246	
18	0-0278	0	0	0	0	944	1340	453	581	3378	11207	8635	62326	
19	0-0278	0	0	0	1380	0	1830	321	683	4266	17403	2913	49169	
20	0-0278	0	0	0	36	0	179	976	179	4825	2017	13195	47813	
21	0-0278	0	0	0	0	0	0	1151	1366	0	7766	1444	53106	
22	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	936	1216	5695	10164	22132	
23	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	301	3871	8034	4575	23988	
24	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	301	3871	8034	4575	23988	
25	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	301	3871	8034	4575	23988	
26	0-0278	0	0	0	0	339	182	860	55	3081	10194	11242	24152	
27	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	3081	10194	11242	24152		
28	0-0278	0	0	0	0	0	0	0	3081	10194	11242	24152		
29	0-0278	0	0	0	0	150	150	190	483	5044	6659	11413	24031	
30	0-0278	0	0	0	85	300	93	300	0	2300	4742	11252	21821	
31	0-0278	0	0	0	385	120	884	7452	7452	11066	4702	8926	18887	
32	0-0278	0	0	0	20	243	514	0	2302	2215	9951	23825	24450	
33	0-0278	0	0	0	257	69	769	994	2819	6195	11551	24450	24450	
34	0-0278	0	0	0	181	181	181	181	181	2059	12647	23958	23454	
35	0-0278	0	0	0	310	85	634	316	7842	3550	13387	18334	18334	
36	0-0278	0	0	0	85	35	35	35	35	35	35	35	35	

Tab. F8, 7-16(4):

Bevölkerungsdaten Wylh

STANDORT NR. 201 GÜNDREM-  
 DES STANDORT LIEGT IN DER MET. ZONE NR. 2 SÜDDT.  
 WAHRSCHEINLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0,5030

ZAHL DER REAKTORBLECKE: 2

ANZAHL DER KREISRINGE 18  
 ANZAHL DER SEKTOREN 36  
 ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN 648

KREISRING NR.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
INNERER RADIUS (M)	0,0	850,0	1200,0	1600,0	2400,0	3600,0	5400,0	8700,0	12000,0	16000,0	24300,0	36000,0	54000,0
RADIUS FUER DOSISBERECHNUNG (M)	700,0	1000,0	1400,0	2000,0	3000,0	4500,0	6700,0	10700,0	14000,0	20000,0	30000,0	45000,0	67000,0
AUSSERER RADIUS (M)	800,0	1200,0	1620,0	2430,0	3600,0	5400,0	8700,0	12700,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0	87000,0
FLAECHE DES KREISRINGSEKTORS (M <sup>2</sup> )	5,59E+34	6,98E+04	9,77E+34	2,79E+05	8,28E+05	1,41E+06	3,00E+06	6,98E+06	9,77E+06	2,79E+07	8,28E+07	1,41E+08	3,04E+08

SEKTOR NR.	WINDRICHTUNGS- WAHRSCHEINL.	WOHNBEVÖLKERUNG												
1	0,0278	0	0	0	0	0	69	191	2450	1374	1509	2013	12581	18914
2	0,0278	0	0	0	0	0	17	5046	0	0	99	3895	24426	21751
3	0,0278	0	0	0	0	0	0	3619	571	262	659	3892	11026	26528
4	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	2413	649	1205	3100	13873	39887
5	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	11027	1838	2764	4782	8006	17343
6	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	321	1001	2988	12462	10891	25717
7	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	233	812	212	7249	13368	37397
8	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	286	5233	7918	6256	45572	
9	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	399	327	2174	9131	9492	27218
10	0,0278	0	0	0	0	0	218	96	1471	865	1362	5983	13082	22536
11	0,0278	0	0	0	0	0	728	678	440	617	1663	11751	19958	22736
12	0,0278	0	0	0	0	0	184	319	91	1096	2003	29940	230086	42477
13	0,0278	0	0	0	0	0	0	213	253	1246	8563	67705	58104	
14	0,0278	0	0	0	0	24	85	132	235	242	2605	3632	21661	29004
15	0,0278	0	0	0	0	0	373	26	296	0	4600	4463	20411	35086
16	0,0278	0	26	79	0	0	166	650	784	339	894	5010	8070	22441
17	0,0278	0	26	132	0	0	260	835	912	1987	686	4415	11043	57394
18	0,0278	0	79	105	185	0	39	526	4765	2526	3176	8360	17464	29449
19	0,0278	0	26	158	27	0	35	52	2680	1	1810	11271	7899	27212
20	0,0278	0	0	93	105	70	280	210	966	1201	3096	6337	12059	61118
21	0,0278	0	0	0	0	205	530	89	472	775	6036	2672	11630	19062
22	0,0278	0	0	0	0	125	1050	711	411	1511	1928	7417	23197	22512
23	0,0278	0	0	0	0	25	1050	0	1064	1478	1463	19629	19720	51430
24	0,0278	0	0	0	0	0	25	0	8524	4976	2337	18690	22746	22696
25	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	1942	5174	6851	66247	23108	40481
26	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3182	67734	29357	12451
27	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	278	0	8613	8846	9900	19593
28	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	93	430	2021	4151	9336	57367
29	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	0	3638	819	4453	38127	160442
30	0,0278	0	0	0	28	56	0	1008	76	2697	8177	45618	17091	
31	0,0278	0	0	0	28	153	0	610	4213	2159	10027	2628	25740	93244
32	0,0278	0	0	0	0	167	65	0	559	2293	13638	27099	34462	33701
33	0,0278	0	0	0	0	42	1842	484	392	1023	7587	29571	38654	28999
34	0,0278	0	0	0	0	0	1971	251	42	953	3833	4508	56047	22923
35	0,0278	0	0	0	0	0	830	123	1421	1011	1064	2317	16770	41533
36	0,0278	0	0	0	0	0	76	145	572	61	2766	5258	15884	32345

Tab. F8, 7-16(5):  
 Bevölkerungsdaten Gundremmingen

I  
 N  
 D  
 O  
 I

STANDORT NR. 202 GRAFENRH  
 DER STANDORT LIEGT IN DER MET. ZONE NR. 2 SUEDDT.  
 WAHRSCHEINLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0,2500

ZAHL DER REAKTORBLECKE: 1

ANZAHL DER KREISRINGE 18  
 ANZAHL DER SEKTOREN 36  
 ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN 648

KREISRING NR.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
INNERER RADIUS (M)		0,0	800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3600,0	5400,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0
RADIUS FUER DISSISBERECHNUNG (M)		700,0	1000,0	1400,0	2000,0	3000,0	4500,0	6700,0	10000,0	14000,0	20000,0	30000,0	45000,0	67000,0
KEUSSERER RADIUS (M)		800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3600,0	5400,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0	80000,0
FLAECHE DES KREISRINGSEKTORS (M2)		5,59E+04	6,98E+04	9,77E+04	2,79E+05	6,28E+05	1,41E+06	3,04E+06	6,98E+06	9,77E+06	2,79E+07	6,28E+07	1,41E+08	3,04E+08
SEKTOR WINDRICHTUNGS- NR.	WAHRSCHEINL.	WOHNBEVOELKERUNG												
1	0,0278	0	0	0	43	1255	217	3590	2795	1925	2168	9547	25191	17505
2	0,0278	0	0	0	0	328	314	5822	7229	466	1599	3667	14601	41260
3	0,0278	0	0	0	712	1282	1626	10160	11044	173	939	4154	9863	56370
4	0,0278	0	0	0	285	285	0	4421	9131	0	1595	3311	10847	50642
5	0,0278	0	0	0	0	0	0	1030	4696	938	792	2609	6886	37177
6	0,0278	0	0	0	0	0	0	738	3807	1036	1284	4946	9288	22721
7	0,0278	0	0	0	0	0	0	1383	2290	1108	978	4335	8456	104949
8	0,0278	0	0	0	0	0	0	232	0	1245	3048	7185	10679	62423
9	0,0278	0	0	0	891	179	2086	0	862	715	4317	9831	11678	23054
10	0,0278	0	0	0	357	356	0	1368	182	2721	10799	23221	23283	
11	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	123	141	427	2071	80734	33355
12	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	1050	784	1328	3077	8470	98173
13	0,0278	0	0	0	0	0	0	1196	19	2468	1007	2963	9548	130479
14	0,0278	0	0	0	60	0	0	475	3655	2239	2041	9394	97382	
15	0,0278	0	0	0	301	483	95	381	215	1183	2495	2232	10581	37217
16	0,0278	0	0	0	121	241	0	442	879	689	2223	4082	10940	16925
17	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	513	3280	1679	3670	3809	34468
18	0,0278	0	0	0	0	0	0	372	477	907	1477	3754	8244	15957
19	0,0278	0	0	0	0	0	0	160	1188	1114	1763	5828	26402	7553
20	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	444	697	1892	12126	9960	19886
21	0,0278	0	0	0	60	0	0	68	1702	541	433	1038	9459	8433
22	0,0278	0	0	120	59	0	0	547	268	0	1151	6350	56034	4778
23	0,0278	0	0	0	0	520	0	0	427	1168	8043	89166	12137	26867
24	0,0278	0	0	0	0	58	0	0	655	528	4929	14047	9837	29738
25	0,0278	0	0	0	0	0	0	1133	76	1561	533	1068	6582	21376
26	0,0278	0	0	0	0	0	0	302	0	476	386	1475	17959	45533
27	0,0278	0	0	0	0	0	0	155	1717	53	2276	2953	9297	50400
28	0,0278	0	0	0	0	0	0	879	1763	241	763	789	6351	18312
29	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	0	1594	564	1879	7101	11465
30	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	386	729	813	881	3036	46866
31	0,0278	0	0	0	0	0	22	375	574	1224	10866	4453	29241	
32	0,0278	0	0	0	0	0	308	88	501	869	1624	3630	6236	25397
33	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	650	240	2589	4090	12048	31216
34	0,0278	0	0	0	0	87	0	41	1357	355	2909	7374	5594	92776
35	0,0278	0	0	0	260	476	0	2049	1436	647	3833	18580	9392	16375
36	0,0278	0	0	0	389	1082	217	143	3018	1220	3136	6625	6188	22147

Tab. F8, 7-16(6):

Bevölkerungsdaten Grafenrheinfeld

STANDORT NR. 203 ISAR-OHU  
 DER STANDORT LIEGT IN DER NET. ZONE NR. 2 SÜDOST.  
 WAHRSCHEINLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE I: 0,2520

ZAHL DER REAKTORBLÖCKE: 1

ANZAHL DER KREISRINGE 18  
 ANZAHL DER SEKTOREN 36  
 ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN 648

KREISRING NR.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
INNERER RADIUS (M)	0,0	800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3600,0	5400,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0
RADIUS FUER DOSISBERECHNUNG (M)	700,0	1000,0	1400,0	2000,0	3000,0	4500,0	6700,0	10000,0	14000,0	20000,0	30000,0	45000,0	67000,0
AUSSERER RADIUS (M)	800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3600,0	5400,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0	80000,0
FLAECHE DES KREISRINGSEKTRS (M2)	5,59E+04	6,98E+04	9,77E+04	2,79E+05	6,28E+05	1,41E+06	3,04E+06	6,98E+06	9,77E+06	2,79E+07	6,28E+07	1,41E+08	3,04E+08
SEKTOR NR.	WOHNBEBÜDLERUNG												
1	0	0	0	0	14	93	107	1084	220	1858	3363	6057	17793
2	0	0	0	0	0	0	200	173	105	1237	5077	6726	19183
3	0	0	0	0	0	0	259	485	320	4052	7090	31080	31080
4	0	0	0	0	0	0	40	0	97	469	1321	21384	33574
5	0	0	0	0	17	0	596	258	112	1935	4227	16676	24150
6	0	0	0	0	274	154	0	192	1722	947	2717	12523	26593
7	0	0	0	0	222	308	42	418	42	973	7594	20834	38134
8	0	0	0	0	0	0	216	513	6756	2318	9766	9176	24287
9	0	0	0	0	0	229	731	1605	3939	1832	3536	8992	35224
10	0	0	0	0	0	534	221	594	819	1543	3926	9211	23920
11	0	0	55	272	0	0	0	234	0	2584	4293	5741	35257
12	0	0	109	218	0	0	315	53	0	2585	3217	15424	21382
13	0	0	0	109	0	11	133	225	1333	869	2419	16510	49299
14	0	0	0	0	0	29	132	70	928	848	6298	7864	21932
15	0	0	0	0	0	38	148	923	719	812	1863	24671	34175
16	0	0	0	0	0	132	138	174	869	2050	6153	28761	25781
17	0	0	0	0	0	371	22	129	936	7331	3388	17823	42918
18	0	0	0	0	0	0	0	58	658	1839	2600	21062	16377
19	0	0	0	0	0	0	0	89	425	970	5178	9812	28413
20	0	0	0	101	236	0	81	246	3168	933	3491	15514	22772
21	0	0	0	17	0	11	1351	145	107	1419	7023	10025	34089
22	0	0	0	0	0	98	382	337	553	1776	3105	11759	86912
23	0	19	14	0	0	105	439	3207	895	5612	26647	947788	947788
24	0	7	13	13	0	33	225	10283	18870	2442	5889	13774	338558
25	0	13	14	33	0	0	0	4862	17064	2208	12121	27693	41371
26	0	7	6	46	0	746	449	4550	1034	1875	4188	7865	17272
27	0	13	13	53	13	0	539	172	2030	172	2333	9183	43262
28	0	26	7	20	26	0	1335	451	333	1118	2917	17947	21460
29	0	13	13	53	13	0	588	200	482	730	3848	8215	107866
30	0	7	6	46	0	0	141	362	3151	3684	11025	23708	23708
31	0	13	13	33	0	51	258	548	328	2145	4503	15861	17673
32	0	7	13	13	0	0	103	396	0	1357	1614	9109	14880
33	0	7	19	14	0	134	0	3131	1848	773	5722	17290	23867
34	0	7	0	0	0	13	388	0	0	1402	6829	38072	16887
35	0	0	0	0	0	7	33	298	630	2570	3659	12625	43234
36	0	0	0	0	43	100	120	104	100	2950	5677	21489	23338

Tab. F8, 7-16 (7):  
 Bevölkerungsdaten Isar-Ohu

STANDORT NR. 301. BECKDORF. DER STANDORT LIEGT IN DER NETZ-ZONE NR. 3. WAHRSCHENLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0,1250	ZAML DER REAKTORBLÖCKE: 1												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ANZAHL DER KREISLÄNGE	18												
ANZAHL DER KREISSEKTOREN	648												
KREISLENGE NR.													
INNERER RADIUS (M)	0,0	800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3400,0	5400,0	8700,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0
RADIUS FUER DOSISBERECHNUNG (M)	700,0	1200,0	1400,0	2000,0	3000,0	4500,0	8100,0	12000,0	17000,0	25000,0	36000,0	54000,0	81000,0
ÄUSSERER RADIUS (M)	800,0	1200,0	1600,0	2000,0	3000,0	4500,0	8100,0	12000,0	17000,0	25000,0	36000,0	54000,0	81000,0
FLÄCHE DES KREISSEKTORS (M <sup>2</sup> )	5,359E+04	6,598E+04	9,777E+04	2,176E+05	6,128E+05	1,417E+06	3,645E+06	6,180E+06	9,777E+06	2,795E+07	6,288E+07	1,41E+08	3,94E+08
SEKTOR MINDERLEUCHTUNGS- NR. WAHRSCHENL.	43	1	2	0	14	40	131	942	447	2048	2184	6473	11133
2	0,0278	0	0	5	0	42	428	3060	298	1732	5484	5152	52134
3	0,0278	1	0	3	4	68	143	912	543	2383	3981	19348	80766
4	0,0278	2	0	2	3	262	45	718	1138	2184	5103	11061	279683
5	0,0278	0	1	1	4	131	243	1449	1286	4846	2087	28443	62783
6	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
7	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
8	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
9	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
10	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
11	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
12	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
13	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
14	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
15	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
16	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
17	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
18	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
19	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
20	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
21	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
22	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
23	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
24	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
25	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
26	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
27	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
28	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
29	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
30	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
31	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
32	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
33	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
34	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142
35	0,0278	0	1	1	5	19	188	4046	2951	1375	7552	69863	18142

Tab. F8, 7-16(8):

Bevölkerungsdaten Brokdorf

STANDORT NR. 302		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
DEH STANDORT LIEGT IN DER MET.-ZONE NR. 3		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
WAHRSCHENLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0,1250		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
ANZAHL DER KREISRINGE		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
ANZAHL DER SEKTOREN		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
KREISRING NR.		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
INNERER RADIIUS		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
RADIUS FUER DOSELBERECHNUNG		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
AUSSERER RADIIUS		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
FLAECHE DES KREISRINGSEKTORES		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
SEKTOR MINDERUNGSGES- NR.		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
WAHRSCHENL.		BRUNSR.		NORDST.		ZONEN NR. 3		NORDST.		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3		ZONEN NR. 3	
1	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. F8, 7-16(9):  
Bevölkerungsdaten Brunsbüttel

STADT NR. 303 ESENSH. DER STANDORT LIEGT IN DER MET.-ZONE NR. 3 NORDOST. WAHRSCHEINLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0-1250												
ZAHLE DER REAKTORBLÖCKE: 1												
ANZAHL DER KREISRINGE												
ANZAHL DER SEKTOREN												
ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN 646												
KREISRING NR.												
INNERER RADIUS												
RADIUS FÜR DOSEBERECHNUNG (M)												
ÄUSSERER RADIUS												
FLÄCHE DES KREISRINGSEKTORS (M <sup>2</sup> )												
SEKTOR MINDERUNGS- NR. WAHRSCHEINL.												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0-0-0278	0	0	47	0	1846	5513	3907	1293	145	1797	627	0
0-0-0278	0	0	0	0	0	2370	2480	3879	781	6325	3422	0
0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0-0-0278	0	0	0	50	12	87	16948	16419	23271	2617	29587	3028
0-0-0278	0	0	0	151	10	160	210	2765	20030	2660	11528	16808
0-0-0278	0	0	0	141	140	4	210	814	3466	8003	17540	17540
0-0-0278	0	0	0	141	140	4	586	2153	2012	2617	7736	30494
0-0-0278	0	0	0	10	120	43	2488	1938	1431	2651	1239	48438
0-0-0278	0	0	0	13	66	15	1274	447	4203	3125	5934	20974
0-0-0278	0	0	0	0	30	0	54	744	2854	3065	5932	19221
0-0-0278	0	0	0	0	80	0	51	297	1401	4787	8552	10342
0-0-0278	0	0	0	0	70	0	47	1145	649	8381	21945	16732
0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	801	18212	130622	69222
0-0-0278	0	0	0	187	261	0	261	935	2603	3051	5206	31202
0-0-0278	0	0	0	2370	0	0	1698	1132	2293	44857	92866	31202
0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	29885	49748	23865	0
0-0-0278	0	0	0	0	0	0	0	0	5418	8544	22112	0
0-0-0278	0	0	0	138	551	55	7330	2506	6428	5618	8544	0
0-0-0278	0	0	0	909	318	551	1852	2857	1324	12341	28891	31951
0-0-0278	0	0	0	192	280	69	182	170	1249	66311	45515	23016
0-0-0278	0	0	0	135	237	30	127	505	475	1209	11493	18709
0-0-0278	0	0	0	22	19	64	387	331	2321	4013	17446	45915
0-0-0278	0	0	0	19	17	64	387	331	2321	4013	17446	45915
0-0-0278	0	0	0	5	10	19	144	611	514	19633	5153	9268
0-0-0278	0	0	0	11	18	60	400	249	12425	16381	11787	28890
0-0-0278	0	0	0	2	15	31	432	8	314	6594	17715	32131
0-0-0278	0	0	0	27	21	127	667	0	0	99293	32816	18213
0-0-0278	0	0	0	236	22	34	331	60	60	52706	1789	4932
0-0-0278	0	0	0	119	69	42	266	951	1369	209	287	0
0-0-0278	0	0	0	0	119	69	42	266	951	1369	287	0
0-0-0278	0	0	0	159	325	349	166	1465	0	0	0	0
0-0-0278	0	0	0	131	112	176	387	647	0	0	0	0
0-0-0278	0	31	177	0	1192	1243	966	423	17	0	0	0

Tab. F8, 7-16(10):  
Bevölkerungsdaten Esenshamm

STANDORT NR. 304 HAMM  
 DER STANDORT LIEGT IN DER MET. ZONE NR. 3 NORDST.  
 WAHRSCHENLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE 1 0,1250

ZAHL DER REAKTORBLECKE: 1  
 ANZAHL DER KREISRINGE 18  
 ANZAHL DER SEKTOREN 36  
 ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN 648

KREISRING NR.	WOHNBEVÖLKERUNG												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
INNERER RADIUS	0,0	800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3000,0	5400,0	8000,0	12000,0	14000,0	24000,0	34000,0	54000,0
RADIUS FUER DOSSIERRECHNUNG (M)	700,0	1000,0	2000,0	2000,0	3000,0	4000,0	6100,0	10000,0	14000,0	20000,0	30000,0	40000,0	67000,0
AUSSERER RADIUS	800,0	1200,0	1600,0	2000,0	3600,0	5000,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	50000,0	80000,0
FLAECHE DES KREISRINGSEKTORS (M2)	5,35E+04	6,41E+04	9,72E+04	6,28E+05	6,28E+05	1,41E+06	3,04E+06	6,98E+06	9,72E+06	2,79E+07	6,28E+07	1,41E+08	3,04E+08
SEKTOR MINGRICHTUNGS- NR. #MIRSCHENL.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	145	233	493	667	2104	15052	176292
2	0	0	0	0	0	70	165	825	5652	10100	4034	23539	96274
3	0	0	0	0	0	67	166	825	5652	10100	4034	23539	96274
4	0	0	0	0	0	46	285	5479	4710	3838	5378	29671	43410
5	0	0	0	0	0	46	285	5479	4710	3838	5378	29671	43410
6	0	0	0	0	2	13	182	336	500	3762	28646	118445	148015
7	0	0	0	0	4	14	180	382	1217	816	15129	38212	137101
8	0	0	0	0	4	14	32	122	549	4668	8026	21804	49026
9	0	0	0	0	4	13	49	540	1255	3862	41651	36236	19165
10	0	0	0	0	2	620	234	163	1775	6792	10733	12845	19827
11	0	0	0	0	2	620	234	163	1775	6792	10733	12845	19827
12	0	0	0	0	4	493	842	148	1023	3587	5335	13937	24892
13	0	0	0	0	4	493	842	148	1023	3587	5335	13937	24892
14	0	0	0	0	5	10	24	28	1589	3304	9594	30876	20277
15	0	0	0	138	19	13	25	2223	13216	7599	7181	20743	25913
16	0	0	0	103	15	12	24	2535	1451	425	1125	1426	1826
17	0	0	0	100	5	12	24	392	1235	4207	12152	1426	1826
18	0	0	0	100	5	12	24	611	1429	4318	26099	10121	47483
19	0	0	0	50	5	47	128	1918	2941	4834	41756	15480	60953
20	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
21	0	0	0	0	0	30	3215	794	9846	10968	64430	67820	117271
22	0	0	0	0	0	24	15	560	2402	6291	32330	97248	906599
23	0	0	0	0	0	254	242	380	396	8455	13365	176914	212826
24	0	0	0	0	0	254	242	380	396	8455	13365	176914	212826
25	0	0	0	0	0	19	325	3823	1209	26284	95269	438525	426578
26	0	0	0	0	73	0	1085	8337	7106	15201	87919	320664	1253854
27	0	0	0	16	895	316	3865	16817	22929	27984	37791	70707	145884
28	0	0	0	16	895	316	3865	16817	22929	27984	37791	70707	145884
29	0	0	0	218	436	159	3125	11746	12405	6226	8185	18353	49960
30	0	0	0	209	472	0	0	8910	0	2608	3018	34688	33342
31	0	0	0	109	327	0	0	35	618	6158	6158	17360	31937
32	0	0	0	109	327	0	0	35	618	6158	6158	17360	31937
33	0	0	0	36	0	0	1885	326	12194	837	245	36548	176944
34	0	0	0	0	0	0	2957	13988	1399	9511	6197	47336	116420
35	0	0	0	0	0	0	166	148	3059	4517	1368	1511	20588
36	0	0	0	0	54	54	166	148	3059	4517	1368	1511	20588

Tab. F8, 7-16(11):  
 Bevölkerungsdaten Hamm



STANDORT NR. 302 DESS STANDORT LIEG. WAHRSCHENLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0,1250	ZAHN DER REAKTORBLECKE: 1												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ANZAHL DER KREISLÄNDE 18	0,0	800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3400,0	5400,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0
ANZAHL DER KREISSEINGANGSSEKTOREN 648	790,0	1294,0	1400,0	2092,0	3000,0	4500,0	6700,0	10000,0	14000,0	20000,0	30000,0	45000,0	60000,0
KREISLINGS NR.	0,0	800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3400,0	5400,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0
INNERER RADIUS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RADIUS FUER DOSISBERECHNUNG (M)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AUSSERER RADIUS (M)	800,0	1200,0	1600,0	2092,0	3000,0	4500,0	6700,0	10000,0	14000,0	20000,0	30000,0	45000,0	60000,0
FLAECHE DES KREISSEINGANGSSEKTORS (M <sup>2</sup> )	5,39E+04	6,48E+04	9,77E+04	2,77E+05	6,28E+05	1,41E+06	3,04E+06	6,98E+06	1,77E+07	4,78E+07	1,41E+08	3,04E+08	6,98E+08
SEKTOR MINERICHTUNGSGEWISSEN	7	0	0	0	0	0	228	400	0	3448	4538	19348	11546
NR. WAHRSCHENL.	0	0	0	0	0	0	0	2552	700	1184	3104	43607	63931
1	0	0	0	0	0	0	0	3719	2468	1201	5281	8554	12840
2	0	0	0	0	0	0	0	440	101	28	101	354	1240
3	0	0	0	0	0	0	0	111	1133	816	10123	4561	31942
4	0	53	107	212	0	0	0	24	1133	1508	5770	4308	31782
5	0	53	107	212	0	0	0	855	11	1373	5770	4308	31782
6	0	0	0	0	0	0	0	542	305	557	2097	8015	24134
7	0	0	0	0	0	0	0	150	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	114	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	172	177	3028	2427	5141	21766
10	0	0	0	0	0	0	0	190	177	3028	2427	5141	21766
11	0	0	0	0	0	0	0	582	107	845	1294	4489	17090
12	0	0	0	0	0	0	0	344	2226	668	1475	5736	8895
13	0	0	0	0	0	0	0	178	196	492	159	2364	2839
14	0	0	0	0	0	0	0	658	196	492	159	2364	2839
15	0	0	0	0	0	0	0	150	150	150	150	150	150
16	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
17	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
18	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
19	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
20	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
21	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
22	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
23	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
24	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
25	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
26	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
27	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
28	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
29	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
30	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
31	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
32	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
33	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
34	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
35	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624
36	0	0	0	0	0	0	0	176	325	1670	1734	5843	9624

Tab. F8, 7-16(12):  
Bevölkerungsdaten Krümmel

STANDORT NR. 30A. STADT DER STANDORT LIEGT ZWISCHEN NET.-ZONE NR. 3. WOBODIT- WAHRSCHEINLICHKEIT EES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0,1250 ZAHLE DER REAKTORBLECKE 1.

ANZAHL DER KREISLÄNGE 16  
ANZAHL DER SPITZEN 16  
ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN 048

KREISLÄNGE NR.

INNERER RADIUS. (M)  
RADIUS FUER DOELBERECHNUNG (M)  
RADIUS FUER DOELBERECHNUNG (M)  
FLAECHE DES KREISRINGSEKTORS (M<sup>2</sup>)

SEKTOR WINDRICHTUNGS-

1. WINDRICHTUNG

WOHNBEOELKERUNG

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
33	0	0	0	0	0	0	0	193	384	629	26007	13585	45146
1	0	0	0	0	0	0	0	496	586	2510	3494	13261	37451
2	0	0	0	0	0	0	0	365	3111	15458	3643	14870	29689
3	1	1	1	1	1	1	1	1000	2731	10000	14000	30000	67000
4	0	0	0	0	0	0	0	4216	2731	4170	4417	6206	23403
5	0	0	0	0	0	0	0	342	7900	1520	5645	11679	24006
6	0	0	0	0	0	0	0	108	7900	1520	5645	11679	24006
7	0	0	0	0	0	0	0	174	2379	25603	14437	18445	31802
8	0	0	0	0	0	0	0	112	3500	2379	25603	14437	18445
9	0	0	0	0	0	0	0	202	1163	27501	97941	91181	18002
10	0	0	0	0	0	0	0	249	1555	518	5200	27951	24420
11	0	0	0	0	0	0	0	679	3790	5330	43361	25601	25010
12	0	0	0	0	0	0	0	3790	2987	6677	81243	59114	92328
13	0	0	0	0	0	0	0	1	184	6677	81243	59114	92328
14	0	0	0	0	0	0	0	1498	2100	2143	63424	18728	17889
15	0	0	0	0	0	0	0	52	1498	2143	63424	18728	17889
16	0	0	0	0	0	0	0	1206	1398	10094	6450	25676	10354
17	0	0	0	0	0	0	0	1398	1115	10094	6450	25676	10354
18	0	0	0	0	0	0	0	330	2649	3186	2529	10383	31521
19	0	0	0	0	0	0	0	1008	2035	1181	1748	3729	15044
20	0	0	0	0	0	0	0	437	37	3051	3482	14407	35540
21	0	0	0	0	0	0	0	323	0	3051	3482	14407	35540
22	0	0	0	0	0	0	0	425	932	1424	2489	12188	36497
23	0	0	0	0	0	0	0	2685	846	1659	2141	6975	133795
24	0	0	0	0	0	0	0	432	1205	1424	2489	12188	36497
25	0	0	0	0	0	0	0	158	91	1508	1548	9427	127488
26	0	0	0	0	0	0	0	363	158	0	10411	6479	28618
27	0	0	0	0	0	0	0	1305	186	1164	3327	5228	27110
28	0	0	0	0	0	0	0	816	751	1164	3327	5228	27110
29	0	0	0	0	0	0	0	25	1700	2398	2742	7098	15285
30	0	0	0	0	0	0	0	469	174	1670	5157	6138	11059
31	0	0	0	0	0	0	0	173	174	1670	5157	6138	11059
32	0	0	0	0	0	0	0	400	878	1507	7284	11845	54176
33	0	0	0	0	0	0	0	1129	1077	1953	2194	3392	16172
34	0	0	0	0	0	0	0	336	1099	3263	3640	27568	10438
35	0	0	0	0	0	0	0	487	1416	3263	3640	27568	10438
36	0	0	0	0	0	0	0	97	301	13642	1572	8379	20333
	1	16	0	0	0	0	52	71	822	3153	18725	8082	14955
	145	0	0	0	0	0	145	0	0	0	0	0	0

Tab. F8, 7-16(13):  
Bevölkerungsdaten Stade

STANDORT NR. 307 VAHNUM  
 DER STANDORT LIEGT IN DER NETZ-ZONE NR. 3 WANDORT  
 WANDERSCHLEICHWEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0-2500  
 ZAHLE DER REAKTIERBALGEGEGER 2  
 ANZAHL DER KREISRINGE 18  
 ANZAHL DER SEKTOREN 36  
 ANZAHL DER NETZRINGSEKTOREN 078

KREISRING NR.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SEKTOR MINDRICHTEUNGS-													
NR.	5	22	111	314	701	314	506	1415	2616	4139	4289	26321	3263
1	0-0278	1	244	74	332	74	0	147	1110	3626	9348	24906	102983
2	0-0278	1	190	31	12	31	10	689	182	2702	15113	203140	57000-0
3	0-0278	1	170	31	12	31	10	689	182	2702	15113	203140	57000-0
4	0-0278	2	10	500	11	500	290	1032	2836	31048	27448	24792	57664
5	0-0278	3	5	16	42	116	242	1143	1116	7436	1908	14793	47439
6	0-0278	2	8	19	116	217	232	1026	1256	10003	12453	10003	44227
7	0-0278	2	8	19	116	217	232	1026	1256	10003	12453	10003	44227
8	0-0278	1	9	18	118	249	314	1112	735	735	6573	14814	46057
9	0-0278	3	4	22	89	142	1077	259	817	8569	16455	38649	106459
10	0-0278	5	1	142	89	142	1077	259	817	8569	16455	38649	106459
11	0-0278	4	8	18	114	283	359	1256	10003	12453	10003	44227	136459
12	0-0278	4	8	18	114	283	359	1256	10003	12453	10003	44227	136459
13	0-0278	1	3	55	19	55	551	5912	7512	4152	32730	569817	583635
14	0-0278	0	1	69	17	69	3	110	338	26234	153485	230161	326507
15	0-0278	2	15	482	272	370	202	2160	2752	7913	112341	277332	490574
16	0-0278	2	18	482	272	370	202	2160	2752	7913	112341	277332	490574
17	0-0278	1	1	138	138	0	1600	1900	11265	98303	169249	587520	106459
18	0-0278	2	3	18	137	52	1149	3128	24156	14422	28957	28957	28957
19	0-0278	3	9	18	137	52	1149	3128	24156	14422	28957	28957	28957
20	0-0278	0	2	274	1670	711	1642	1179	6428	9626	104125	18946	18946
21	0-0278	1	1	1604	31	1604	1447	681	1193	5071	9714	52000	89571
22	0-0278	2	8	108	20	108	118	654	3067	14198	12203	20040	132729
23	0-0278	3	1	800	33	800	118	654	3067	14198	12203	20040	132729
24	0-0278	2	8	108	20	108	118	654	3067	14198	12203	20040	132729
25	0-0278	2	3	33	244	33	36	222	128	9895	10914	25669	117744
26	0-0278	2	0	451	104	451	39	214	2361	4471	5809	50205	121942
27	0-0278	2	0	451	104	451	39	214	2361	4471	5809	50205	121942
28	0-0278	1	0	79	884	79	884	149	569	11831	11816	14325	45509
29	0-0278	5	1	14	492	714	494	432	7633	16004	33134	12451	12451
30	0-0278	2	0	11	143	175	1102	1255	2730	9919	17182	13958	13958
31	0-0278	1	2	9	27	221	1228	1355	4966	18351	50513	41905	41905
32	0-0278	0	0	4	17	535	32	943	9651	12461	163587	12181	12181
33	0-0278	2	4	18	10	0	1279	3874	317	13213	19290	3874	3874
34	0-0278	2	1	40	258	344	1017	1254	4540	34460	25090	119662	119662
35	0-0278	2	21	295	554	295	799	1395	2155	5858	11042	5140	26192
36	0-0278	0	2	295	554	295	799	1395	2155	5858	11042	5140	26192

Tab. F8, 7-16(14):  
 Bevölkerungsdaten Vahnum

STANDORT NR. 401	BECKEN	ZML DER REAKTORBLECKE: I												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
DER STANDORT LIEGT IN DER MET. ZONE NR. 4	FALLAGE													
WAHRSCHEINLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALS DER ZONE I	0-1570													
ANZAHL DER KREISREINGE	18													
ANZAHL DER SEKTOREN	36													
ANZAHL DER KREISREINGSTORBEN	048													
KREISREING NR.														
INNERER RADIUS	(M)	0,0	800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3400,0	4600,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0
RADIUS FUER DOSISBERECHNUNG	(M)	700,0	1000,0	1400,0	2000,0	3000,0	4500,0	6700,0	10000,0	14000,0	20000,0	30000,0	45000,0	67000,0
AEUSSERER RADIUS	(M)	800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3600,0	5400,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0	80000,0
FLAECH DES KREISREINGSEKTORS	(M <sup>2</sup> )	5,59E+06	6,98E+04	9,77E+04	2,79E+05	6,28E+05	1,41E+06	3,04E+06	6,98E+06	9,77E+06	2,79E+07	6,28E+07	1,41E+08	3,04E+08
SEKTOR MINGRICHTSUN-														
NR.	MAHRSCHEINL.													
2	0,0278	0	0	0	0	0	1043	355	945	1334	3611	10492	18950	43784
3	0,0278	0	0	0	0	0	0	200	1402	801	11805	30481	20790	21694
4	0,0278	0	0	0	0	0	0	268	1278	3052	9758	14511,6	15160	21022
5	0,0278	0	0	0	0	0	0	68	552	963	8563	68096	33166	41962
6	0,0278	0	0	0	120	138	299	138	650	1043	2082	17024	11976	15974
7	0,0278	0	0	0	443	790	1380	740	3453	658	2882	7624	17926	19976
8	0,0278	0	0	0	27	25	27	58	657	739	6663	10684	18874	39366
9	0,0278	0	0	0	0	0	0	356	50	247	440	398	29798	34651
10	0,0278	0	0	0	0	0	0	56	66	140	6195	398	29798	34651
11	0,0278	0	0	0	0	0	0	615	268	442	3168	3233	12118	26230
12	0,0278	0	0	0	0	0	0	240	0	212	1640	1005	15900	13082
13	0,0278	0	0	0	0	0	0	256	20	707	874	674	7249	60312
14	0,0278	0	0	0	0	0	0	57	713	2583	1195	687	16466	15511
15	0,0278	0	69	208	174	0	343	766	542	383	2233	4388	15854	21946
16	0,0278	0	135	34	0	0	247	238	1925	1127	1110	2958	17844	60312
17	0,0278	0	35	0	0	0	264	430	2394	99	39665	3788	17520	19138
18	0,0278	0	0	0	0	0	0	88	30	1084	445	2115	10442	19071
19	0,0278	0	0	0	0	0	0	30	0	442	639	8045	2091	9932
20	0,0278	0	0	0	0	0	0	794	208	0	687	16466	15511	18653
21	0,0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0,0278	0	0	0	0	0	0	993	99	746	5814	12623	14236	52387
23	0,0278	0	0	0	0	0	0	993	132	103	1808	1358	11938	23559
24	0,0278	0	0	0	0	0	0	993	132	103	1808	1358	11938	23559
25	0,0278	0	65	98	66	800	226	164	299	233	1224	4205	16046	51247
26	0,0278	0	65	196	33	60	478	0	810	0	528	3683	11098	47234
27	0,0278	0	32	163	36	680	180	190	1037	50	1037	9370	11935	28337
28	0,0278	0	32	33	36	680	180	190	1037	50	1037	9370	11935	28337
29	0,0278	0	0	0	0	0	0	101	797	0	1800	2573	748	1785
30	0,0278	0	0	0	0	0	0	82	7965	1662	1883	8122	35991	47234
31	0,0278	0	0	0	0	0	0	170	252	0	187	1260	3096	4753
32	0,0278	0	0	0	0	0	0	266	1493	1263	1314	2067	14626	26579
33	0,0278	0	0	0	0	0	0	502	1893	1263	2791	2126	15619	18218
34	0,0278	0	0	0	0	0	0	2664	1849	471	4659	5955	12032	23640
35	0,0278	0	0	0	0	0	0	2664	1849	471	4659	5955	12032	23640
36	0,0278	0	0	0	26	121	43	2664	1849	471	4659	5955	12032	23640

Tab. F8, 7-16(15):  
Bevölkerungsdaten Borken

STANDORT NR. 402 GECHNE  
 DER STANDORT LIEGT IN DER MEG. ZONE NR. 4 TALLASE  
 WÄRSCHNEINLEICHHEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0.16170

ZAML DER REAKTIERLECKE: 1.

ANZAHL DER KREISRINGE  
 18  
 36  
 ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN  
 648

KREISRING NR.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13  
 0.0 800.0 1200.0 1600.0 2400.0 3600.0 5400.0 8000.0 12000.0 16000.0 24000.0 36000.0 54000.0  
 700.0 1000.0 1400.0 2000.0 3000.0 4500.0 6700.0 10000.0 15000.0 20000.0 30000.0 45000.0 67000.0  
 800.0 1200.0 1600.0 2400.0 3600.0 5400.0 8000.0 12000.0 18000.0 24000.0 36000.0 54000.0 81000.0  
 5.59E+04 8.19E+04 9.71E+04 2.79E+05 6.28E+05 1.41E+06 3.49E+06 6.49E+06 9.77E+06 2.79E+07 6.28E+07 1.41E+08 3.49E+08

WÄRSCHNEINLEICHHEIT

SEKTOR WÄRSCHNEINLEICHHEIT

1	0	0	0	0	0	403	2650	0	708	4876	12486	50098	151116
2	0	0	0	0	0	437	0	1153	1338	8399	21449	66904	18905
3	0	0	0	0	0	117	131	492	132	834	18057	29534	73398
4	0	0	0	0	0	21	66	1151	2586	1588	12172	94895	59187
5	0	0	0	0	0	71	0	120	360	2882	9422	35444	31801
6	0	0	0	0	0	0	120	360	1099	2882	9422	35444	31801
7	0	0	0	0	0	0	0	1455	2109	3277	16370	115933	145138
8	0	0	0	0	0	0	0	44	71	567	4459	13713	15089
9	0	0	0	0	0	0	0	179	197	1376	3499	23169	51482
10	0	0	0	0	0	0	0	227	408	2336	3499	23169	51482
11	0	0	0	0	0	0	0	227	408	2336	3499	23169	51482
12	0	0	0	0	0	0	0	129	1740	1740	4688	3116	20380
13	0	0	0	0	0	0	0	2886	283	3486	5803	29443	44513
14	0	0	0	0	0	0	0	1476	1286	1155	2998	1764	15386
15	0	0	0	0	0	0	0	168	565	6984	3478	19001	36552
16	0	0	0	0	0	0	0	99	1419	12601	9436	11678	92504
17	0	0	0	0	0	0	0	93	1244	1562	1004	13082	23940
18	0	0	0	0	0	0	0	595	494	706	1691	2809	14846
19	0	0	0	0	0	0	0	40	321	659	3149	8287	18978
20	0	0	0	0	0	0	0	40	321	659	3149	8287	18978
21	0	0	0	0	0	0	0	710	1987	5256	3198	11628	116604
22	0	0	0	0	0	0	0	279	391	6678	5681	5053	13042
23	0	0	0	0	0	0	0	13	106	113	242	2650	6074
24	0	0	0	0	0	0	0	177	186	1648	928	18191	65074
25	0	0	0	0	0	0	0	177	186	1648	928	18191	65074
26	0	0	0	0	0	0	0	303	2159	203	7700	7650	67470
27	0	0	0	0	0	0	0	160	1072	81	1478	801	40791
28	0	0	0	0	0	0	0	160	1072	81	1478	801	40791
29	0	0	0	0	0	0	0	319	372	146	1478	801	40791
30	0	0	0	0	0	0	0	132	331	566	278	1504	6619
31	0	0	0	0	0	0	0	1808	2049	6819	25013	21783	14874
32	0	0	0	0	0	0	0	75	76	4942	15415	9469	40807
33	0	0	0	0	0	0	0	1310	2076	1133	2359	18816	43089
34	0	0	0	0	0	0	0	1310	2076	1133	2359	18816	43089
35	0	0	0	0	0	0	0	1310	2076	1133	2359	18816	43089
36	0	0	0	0	0	0	0	1310	2076	1133	2359	18816	43089

Tab. F8, 7-16(16):

Bevölkerungsdaten Grohnde



STANDORT NR. 404 NECKARW.  
 DER STANDORT LIEGT IN DER MET. ZONE NR. 4 TALLAGE  
 WAHRSCHEINLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0,3330

ZAHL DER REAKTORBLÖCKE: 2

ANZAHL DER KREISRINGE 18  
 ANZAHL DER SEKTOREN 36  
 ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN 648

KREISRING NR.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
INNERER RADIUS (M)	(M)	0,0	870,0	1200,0	1600,0	2400,0	3600,0	4500,0	6700,0	10000,0	14000,0	20000,0	24000,0	36000,0	54000,0
RADIUS FUER DOSISBERECHNUNG (M)	(M)	700,0	1000,0	1400,0	2000,0	3000,0	4500,0	6700,0	10000,0	14000,0	20000,0	30000,0	45000,0	67000,0	
AUSSERER RADIUS (M)	(M)	800,0	1200,0	1600,0	2400,0	3600,0	5400,0	8000,0	12000,0	16000,0	24000,0	36000,0	54000,0	80000,0	
FLAECHE DES KREISRINGSEKTORS (M <sup>2</sup> )	(M <sup>2</sup> )	5,59E+04	6,98E+04	9,77E+04	2,79E+05	6,28E+05	1,41E+06	3,04E+06	6,98E+06	9,77E+06	2,79E+07	6,28E+07	1,41E+08	3,04E+08	
SEKTOR NR.	WÄHRSCHEINLICHKEIT- WÄHRSCHEINLICHKEIT	WOHNBEVÖLKERUNG													
1	0,0278	0	0	0	0	0	0	511	16502	12678	12694	11121	14440	35974	
2	0,0278	0	0	0	0	0	1555	636	26285	23439	26687	8463	12400	29037	
3	0,0278	0	0	0	0	0	1555	1729	15341	13840	1954	9758	14462	24999	
4	0,0278	77	0	0	0	0	0	343	939	6564	5843	5232	7340	34876	
5	0,0278	77	230	0	0	143	229	0	463	3037	2052	4477	13205	33920	
6	0,0278	0	77	0	0	28	86	0	2496	309	7692	16634	19186	20556	
7	0,0278	153	231	0	0	0	0	0	592	401	5062	9580	11520	16036	
8	0,0278	77	153	154	0	0	1470	768	1654	0	2716	3685	8794	19429	
9	0,0278	0	230	77	0	0	447	1143	789	0	2674	4322	35222	34649	
10	0,0278	0	77	0	0	0	0	0	4029	949	1697	2730	14077	29787	
11	0,0278	0	0	0	0	0	0	322	3497	0	1951	15170	12923	51060	
12	0,0278	0	0	0	0	0	698	1889	1435	10732	8546	10755	86973	57005	
13	0,0278	0	0	0	0	0	0	2965	0	22786	15592	44719	57005	87933	
14	0,0278	0	0	0	0	0	0	2537	1508	8203	11696	64957	87933	35187	
15	0,0278	0	0	0	0	410	68	0	5306	6070	14733	36312	87223	35187	
16	0,0278	0	0	0	0	205	1543	633	2049	11717	17416	51894	92112	25711	
17	0,0278	0	0	0	0	0	0	711	859	2321	6932	26865	132615	106250	
18	0,0278	0	0	0	0	0	449	869	6442	25399	60408	202872	86418	96879	
19	0,0278	0	0	0	0	0	0	1852	18316	46968	210211	74372	111797	118355	
20	0,0278	0	0	0	0	211	0	0	11909	11969	21386	77186	59818	118355	
21	0,0278	0	0	0	369	756	2798	403	12147	7758	15488	53032	91384	46844	
22	0,0278	0	0	0	474	670	4730	2015	1409	2484	4659	17496	28287	57315	
23	0,0278	0	0	0	685	264	0	1940	4029	5306	4239	9478	35861	28023	
24	0,0278	0	0	0	53	52	0	1941	0	3275	14181	11356	22789	14284	
25	0,0278	0	0	0	0	0	817	1218	1458	2441	9068	28368	103566	55195	
26	0,0278	0	0	0	655	436	0	430	514	1054	2560	22430	56631	129824	
27	0,0278	0	0	0	728	436	479	2500	0	0	1698	14675	85996	202495	
28	0,0278	0	0	0	218	1092	119	2404	2924	604	3875	19294	47302	135716	
29	0,0278	0	0	0	437	218	0	795	3885	3594	12295	59055	89519	491397	
30	0,0278	0	0	0	146	0	0	1698	2067	1541	3160	9271	42636	68636	
31	0,0278	0	0	0	0	0	0	527	3614	1026	6020	8506	47580	142270	
32	0,0278	0	0	0	0	0	814	426	723	5746	6489	82792	491397	491397	
33	0,0278	0	0	0	122	2808	0	1005	5072	0	3455	15783	94836	295670	
34	0,0278	0	0	0	305	2076	0	1198	3524	2598	9664	22367	94832	36025	
35	0,0278	0	0	0	488	1465	1559	2377	2549	5676	5887	25761	36025	34869	
36	0,0278	0	0	0	395	672	319	1927	0	9356	28000	9217	34869	34869	

Tab. F8, 7-16(18):

Bevölkerungsdaten Neckarwestheim

STANDORT NR. 405 DER STANDORT LIEGT IN DER ZONE NR. 4 WAHRSCHENLICHKEIT DES STANDORTS INNERHALB DER ZONE : 0.1670	ZAHL DER REAKTORBLECKES : 1												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ANZAHL DER KREISRINGE 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANZAHL DER KREISRINGSEKTOREN 648	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KREISRING NR.	0	0	29	177	113	115	299	1476	4737	6030	3722	40883	76106
INNERER RADIUS (M)	0.0	800.0	1200.0	1600.0	2400.0	3400.0	5400.0	8000.0	12000.0	18000.0	25000.0	36000.0	54000.0
RADIUS FÜR DOSENBRECHUNG (M)	700.0	1070.0	1400.0	2000.0	3000.0	4500.0	6700.0	10000.0	15000.0	20000.0	30000.0	45000.0	67000.0
AUSSERER RADIUS (M)	800.0	1200.0	1600.0	2400.0	3600.0	5400.0	8000.0	12000.0	18000.0	24000.0	36000.0	54000.0	80000.0
FLÄCHE DES KREISRINGSEKTORS (M <sup>2</sup> )	5.59E+04	6.98E+04	9.77E+04	2.79E+05	6.22E+05	1.41E+06	3.04E+06	6.98E+06	9.77E+06	2.79E+07	6.22E+07	1.41E+08	3.04E+08
SEKTOR WICHTIGKEITS- WAHRSCHENLICH.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 0.0278	18	0	0	312	110	40	659	82	0	20638	4280	18284	73059
3 0.0278	0	0	0	0	0	0	79	44	1371	459	11353	25073	145464
4 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	0	1071	368	9185	20515	124524
5 0.0278	0	36	0	0	0	0	0	113	120	916	8654	11472	32024
6 0.0278	0	71	36	0	0	0	590	1280	1280	3	3865	39513	61766
7 0.0278	0	178	355	36	614	0	0	577	577	571	3487	17074	53456
8 0.0278	0	71	178	355	36	614	0	560	577	571	3487	17074	53456
9 0.0278	0	178	355	36	614	0	0	560	577	571	3487	17074	53456
10 0.0278	36	178	355	36	1080	190	2905	1239	2666	6667	16403	48114	148114
11 0.0278	0	71	178	355	36	614	0	560	577	571	3487	17074	53456
12 0.0278	0	71	178	355	36	614	0	560	577	571	3487	17074	53456
13 0.0278	0	0	0	0	0	318	29	718	2140	973	5482	12408	36649
14 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	704	4679	11950	27652
15 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	152	0	3032	23020	11598	47872
16 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	396	47	764	3905	28153	54859
17 0.0278	0	0	0	0	0	420	0	146	17	302	1513	54859	54859
18 0.0278	0	0	0	0	0	233	91	1863	1339	4599	78709	110897	28661
19 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	670	3653	5190	15436	51103	43395
20 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	133	85	167	384	1548	26258
21 0.0278	0	0	0	0	230	110	40	133	85	167	384	1548	26258
22 0.0278	0	0	0	0	39	177	425	299	922	1735	6957	6806	24952
23 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	938	210	5103	11162	23082	29083
24 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	170	85	3046	7041	18816	44521
25 0.0278	0	0	0	0	0	540	0	1045	117	1921	1887	8296	31187
26 0.0278	0	0	0	0	0	80	355	1045	117	1921	1887	8296	31187
27 0.0278	0	0	0	0	0	315	1857	1062	63	1691	3700	7447	33966
28 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	392	479	1779	4019	83594	31399
29 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	174	659	1466	13927	25656	115238
30 0.0278	0	0	0	0	0	0	38	1465	1985	6019	1707	6038	23121
31 0.0278	0	0	0	0	0	0	38	1465	1985	6019	1707	6038	23121
32 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	1746	300	1962	11519	29889	159003
33 0.0278	0	0	0	0	0	0	0	638	495	2513	8201	21349	102868
34 0.0278	0	0	0	88	178	435	0	829	1423	829	3208	80574	80574
35 0.0278	0	0	0	282	1213	1423	0	829	1423	829	3208	80574	80574
36 0.0278	0	0	0	409	615	474	218	1241	9728	3759	3208	3752	80574

Tab. F8, 7-16(19):  
Bevölkerungsdaten Würzgassen



## 8. ERGEBNISSE

### 8.1 Überblick

Die Unfallfolgenrechnungen mit dem Rechenprogramm UFOMOD /F8, 8-1/ haben eine Vielzahl von Einzelergebnissen erbracht. Die wichtigsten Ergebnisse werden im folgenden dargestellt. Sie lassen sich im wesentlichen in zwei Gruppen gliedern:

- Deterministische Ergebnisse (Abschnitte 8.2 bis 8.6)

Dies sind die Ergebnisse der durchgeführten Unfallfolgenrechnungen, die noch nicht mit der Häufigkeit gewichtet sind. Aus der Fülle des Zahlenmaterials werden zunächst einige ausgewählte Rechenfälle dargestellt, um daraus die wichtigsten Einflußgrößen und Beiträge der verschiedenen Expositionspfade für die Dosisberechnung zu diskutieren.

- Probabilistische Ergebnisse (Abschnitte 8.7 bis 8.10)

Dies sind die unter dem Gesichtspunkt ihrer Wahrscheinlichkeit ausgewerteten Ergebnisse der Unfallfolgenrechnungen. Dabei tritt zum Ausmaß der Unfallfolgen die Eintrittshäufigkeit als die zweite wichtige Information der durchgeführten Rechnungen. Die Eintrittshäufigkeit wird zum einen als Funktion des Schadensausmaßes dargestellt und dient zum anderen als Wichtungsfaktor bei der Bildung von Erwartungswerten.

Die deterministischen Ergebnisse werden zunächst in Kurzform angeführt und danach ausführlicher kommentiert. Eine Übersicht über diese Ergebnisse zeigt Tabelle F8, 8-1. Die Freisetzungskategorie FK2, d.h. Kernschmelzen mit großer Leckage des Sicherheitsbehälters, wurde als Beispiel für Freisetzungskategorien, in denen Frühschäden auftreten können, gewählt. Bei dieser Kategorie wird eine dreistündige Freisetzung unterstellt. An thermischer Energie werden insgesamt  $45 \cdot 10^6$  kJ freigesetzt (Tabelle F8, 3-2).

Bild Nr.	Freisetzungskategorie	Wetterablauf	Entfernung	Organ* (potentiell)	Expositionspfad*	Bestrahlungsdauer	Bemerkungen
F8, 8-3	FK2	neutral <sup>1)</sup> Regen <sup>1)</sup> labil <sup>1)</sup> stabil <sup>1)</sup>	variabel	KM	EF +EB +IH	- 4 h <sup>2)</sup> Kurzzeit <sup>3)</sup>	1) s. Tab. F8, 8-2 2) orientiert sich an den Fahrzeiten im Gebiet B (0,35 - 7,25 h)
F8, 8-3(1) F8, 8-3(2) F8, 8-3(3) F8, 8-3(4)	FK2	neutral Regen labil stabil	variabel	KM	EF, EB, IH und Summe dieser Pfade	4 h <sup>2)</sup> für EB, Kurzzeit <sup>3)</sup> für IH	3) s. Gleichung (8.1)
F8, 8-5(1)	FK2	neutral	10 km	KM LG GK	EF		Aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der jeweils wichtigsten Radio-nuklide
F8, 8-5(2)	FK2	Regen	100 km	KM LG GK	EF		
F8, 8-6(1) F8, 8-6(2) F8, 8-6(3) F8, 8-6(4) F8, 8-6(5)	FK2	neutral	10 km	KM KN LG SD GK	EB	variabel (4 h - 50 a)	
F8, 8-7(1) F8, 8-7(2) F8, 8-7(3) F8, 8-7(4) F8, 8-7(5)	FK2	neutral	10 km	KM KN LG SD GK	IH	Beiträge aus verschiedenen Zeiträumen nach der Inhalation	

\*) Abkürzungen siehe Abschnitt 5.1.2

Tab. F8, 8-1:

Übersicht der deterministischen Ergebnisse

Einführend werden in Abschnitt 8.2 vier Wetterabläufe erläutert, die für das Wettergeschehen typisch sind. Die zugehörigen meteorologischen Parameter sind in Tabelle F8, 8-2 zusammengestellt.

In den Abschnitten 8.3 bis 8.6 werden räumliche und zeitliche Dosisverläufe angegeben. Da es dabei auf die Relation der Beiträge der einzelnen Wetterabläufe, Expositionspfade bzw. Radionuklide ankommt, ist die Dosis jeweils in willkürlichen Einheiten dargestellt. In Abschnitt 8.3 wird der nach Gleichung (8.1) berechnete entfernungsabhängige Verlauf der repräsentativen Kurzzeit-Knochenmarkdosis

$$D^{KM} = D_{EF}^{KM} + D_{EB}^{KM}(4h) + \{D_{IH}^{KM}(7d) + \frac{1}{2} D_{IH}^{KM}(8d + 30d)\} \quad (8.1)$$

unter Zugrundelegung der Freisetzungskategorie FK2 und der vier typischen Wetterabläufe (neutral, Regen, labil, stabil) dargestellt. Die Dauer der externen Bestrahlung vom Boden wurde hier auf 3 Stunden beschränkt, da sie sich an den Fahrzeiten für die schnelle Umsiedlung im Gebiet B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub> (zwischen 20 min und 7,25 h) orientieren soll.

Es sind dargestellt:

- die entfernungsabhängigen Verläufe der Dosen für die vier ausgewählten Wetterabläufe (Bild F8, 8-3(1)),
- die Aufgliederung der Dosen in die berücksichtigten Expositionspfade, ebenfalls entfernungsabhängig (Bild F8, 8-3(2) bis 8-3(5)).

In den Abschnitten 8.4 bis 8.6 werden Dosisverläufe erläutert, die unter Zugrundelegung der Freisetzungskategorie FK2 und des Wetterablaufs "neutral" im Abstand von 10 km unter der Fahnenachse berechnet wurden. In Abschnitt 8.4 wird die nuklidabhängige potentielle Dosis durch externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne in den Organen Knochenmark, Lunge sowie im Ganzkörper

$$D_{EF}^{KM}, D_{EF}^{LG}, D_{EF}^{GK}$$

gezeigt.

Die Beiträge der jeweils wichtigsten Radionuklide zu diesen drei Organdosen sind aus Bild F8, 8-5(1) zu entnehmen.

In Abschnitt 8.5 wird der zeitabhängige Verlauf der potentiellen Dosen durch externe Bestrahlung vom Boden in den Organen Knochenmark, Knochenoberfläche, Lunge und Schilddrüse sowie im Ganzkörper

$$D_{EB}^{KM}(t), D_{EB}^{KN}(t), D_{EB}^{LG}(t), D_{EB}^{SD}(t) \text{ und } D_{EB}^{GK}(t)$$

dargestellt, und zwar aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der jeweils wichtigsten Radionuklide (Bild F8, 8-6(1) bis 8-6(5)).

In Abschnitt 8.6 wird der zeitabhängige Verlauf der potentiellen Dosis durch interne Bestrahlung durch die mit der Atemluft inhalierte Aktivität in den Organen Knochenmark, Knochenoberfläche, Lunge, Schilddrüse sowie im Ganzkörper

$$D_{IH}^{KM}, D_{IH}^{KN}, D_{IH}^{LG}, D_{IH}^{SD} \text{ und } D_{IH}^{GK}$$

gezeigt. Die Beiträge aus verschiedenen Zeiträumen nach der Inhalation sind aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der jeweils wichtigsten Radionuklide (Bild F8, 8-7(1) bis 8-7(5)).

## 8.2 Charakterisierung "typischer" Wetterabläufe

Im Abschnitt 4.9 wurde gezeigt, wie das kontinuierliche Wettergeschehen mittels 115 ausgewählter Wetterabläufe bestimmt wird. Um den Einfluß des Wettergeschehens auf die Dosis zu zeigen, werden aus diesen 115 Wetterabläufen vier "typische" Wetterabläufe herausgegriffen. Die Charakterisierung wird im folgenden ausgeführt:

- Im Wetterablauf "neutral" herrschte während des ganzen Ausbreitungsvorganges die neutrale Ausbreitungskategorie D; es regnete nicht. Derartige neutrale Wettersituationen ohne Regen haben in der Bundesrepublik Deutschland eine Häufigkeit zwischen 35 und 45 %. Die in Tabelle F8, 8-2 angegebenen me-

Wetterablauf (Beginn der Freisetzung)	Entfernung [km]	Ankunft [Uhrzeit]	Ausbreitungs- kategorie	Aufstiegshöhe der Fahne [m]	Windgeschwindigkeit, gemittelt über die Aufstiegshöhe [m/s]	Niederschlag [mm/h]
neutral (1.00 Uhr)	0,7	1.02	D	53	5,3	-
	1,0	1.03	D	59	5,7	-
	4,5	1.13	D	59	6,1	-
	10,0	1.27	D	59	6,2	-
	45,0	3.05	D	59	6,0	-
	100,0	5.48	D	59	5,8	-
Regen (1.00 Uhr)	0,7	1.04	D	96	3,2	0,8
	1,0	1.05	D	107	3,3	0,8
	4,5	1.23	D	107	3,3	0,8
	10,0	1.49	D	107	3,3	0,8
	45,0	3.51	D	107	4,3	0,9
	100,0	7.30	D	107	4,3	0,2
labil (15.00 Uhr)	0,7	15.11	B	269	1,1	-
	1,0	15.14	B	303	1,4	-
	4,5	15.56	B	303	1,4	-
	10,0	17.06	B	303	1,4	-
	45,0	1.24	B	303	1,2	-
	100,0	3.37	C	303	2,2	-
stabil (23.00 Uhr)	0,7	23.04	F	86	2,8	-
	1,0	23.06	F	86	2,8	-
	4,5	23.27	F	86	2,8	-
	10,0	23.57	F	86	3,0	-
	45,0	3.10	E	86	3,0	-
	100,0	16.22	D	86	1,6	-
zunehmender Regen (6.00 Uhr)	0,7	6.06	D	178	1,9	0,1
	1,0	6.09	D	198	2,0	0,1
	4,5	6.38	D	198	2,0	0,1
	10,0	7.35	C	198	1,6	1,2
	45,0	10.19	D	198	2,9	-
	100,0	15.55	D	198	2,8	0,3

Tab. F8, 8-2:

Charakteristik der typischen Wetterabläufe

eteorologischen Parameter gelten für die in der ersten Stunde nach Freisetzungsbeginn emittierte Aktivität. Die Windgeschwindigkeiten sind über die Ausbreitungsschicht gemittelt. Bei der Berechnung dieser Ausbreitungsschicht wird die effektive Emissionshöhe berücksichtigt (Abschnitt 4.6).

- Beim Wetterablauf "Regen" regnet es während des gesamten Ausbreitungsvorganges (typisch für etwa 5 - 15 % der Zeit<sup>1)</sup> in der Bundesrepublik Deutschland).
- Der Wetterablauf vom Typ "labil" ist beschränkt auf Tageszeiten mit Sonneneinstrahlung und geringer Windgeschwindigkeit. Die atmosphärische Turbulenz wird überwiegend durch Konvektion verursacht. Die labilen Ausbreitungskategorien A und B haben zusammen eine Häufigkeit von 6 bis 10 %. Die mittlere Andauer einer solchen Lage beträgt daher nur wenige Stunden, die Ausbreitungskategorie geht von B zu C und D über, bedingt durch die Abschwächung der konvektiven Turbulenz in den Abendstunden.
- Der Wetterablauf "stabil" repräsentiert stabile Ausbreitungssituationen der Kategorie E und F. Derartige Situationen treten bevorzugt nachts bei stabiler thermischer Schichtung der Atmosphäre auf. Die Kategorien E und F haben zusammen eine Häufigkeit von etwa 25 bis 35 %. Die ununterbrochene Andauer einer stabilen Schichtung beträgt selten mehr als 20 Stunden.

Für Karlsruhe wurde in /F8, 8-2/ u.a. die Andauer von Ausbreitungskategorien untersucht. Bild F8, 8-1 zeigt, daß nur in einem Viertel aller Fälle, in denen labile bzw. stabile Kategorien auftreten, diese länger als 3 bzw. 6 Stunden andauern.

Zur Veranschaulichung der Transportzeit der Aktivitätsfahne wird in Bild F8, 8-2 die Summenhäufigkeit der für die Wegstrecke von 450 km benötigten Zeit in allen 115 Wetterabläufen für die meteorologische Region Oberrheinische Tiefebene dargestellt. Die Wetterabläufe wurden nach dem im Abschnitt 4.9 beschriebenen Verfahren ausgewählt. Dem Bild F8, 8-2 ist zu entnehmen, daß

---

<sup>1)</sup> Da der Niederschlag von der Orographie stark beeinflußt wird (Luv- und Lee-Effekte), können diese Häufigkeiten für gewisse Standorte über- bzw. unterschritten werden (Abschnitt 5.9).

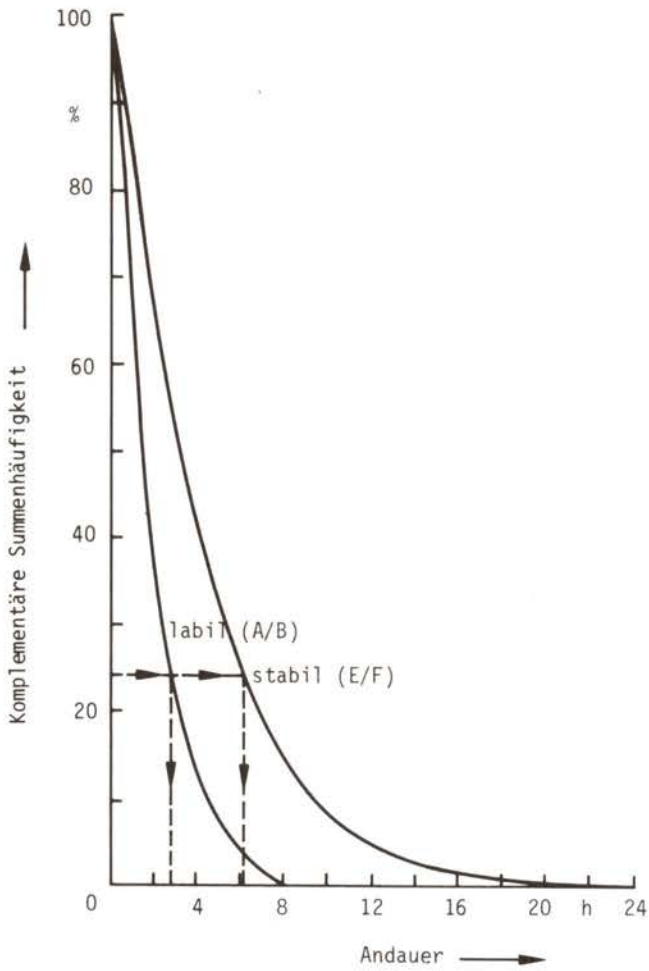


Bild F8, 8-1:

Andauer labiler bzw. stabiler Ausbreitungskategorien

in nur 10 % aller Fälle die Transportzeit unter einem Tag bleibt;  
in etwa 15 % aller Fälle ist die Aktivitätsfahne länger als zwei  
Tage unterwegs.

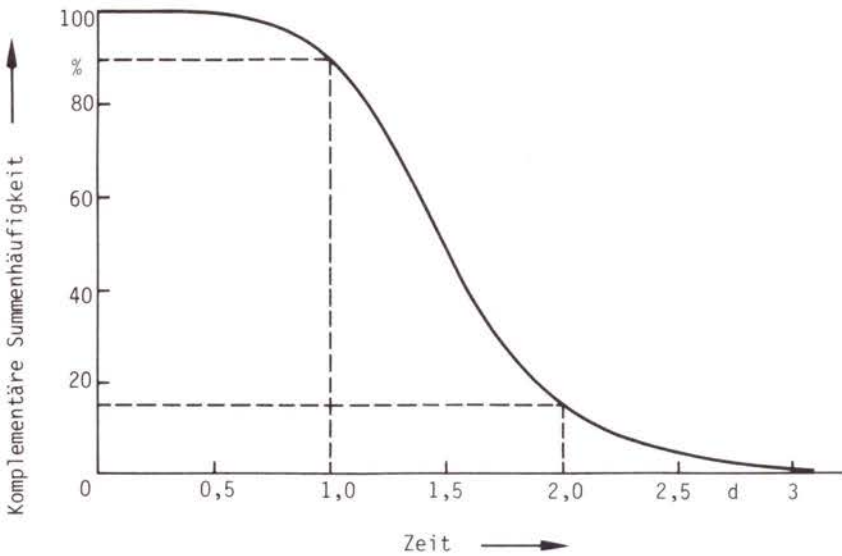


Bild F8, 8-2:

Transportzeit der Aktivitätsfahne für 450 km Wegstrecke (Daten aus 115 Wetterabläufen, meteorologische Region Oberrheinische Tiefebene, Freisetzungskategorie FK2)

### 8.3 Entfernungsabhängiger Verlauf der potentiellen Kurzzeit-Knochenmarkdosis

Für die 4 typischen Wetterabläufe wurde der entfernungsabhängige Dosisverlauf errechnet. Die errechnete Knochenmarkdosis (Bild F8, 8-3(1)) gilt für eine Person, die sich ungeschützt unter der Achse der Aktivitätsfahne aufhält. Zu dieser Dosis tragen drei Expositionspfade bei: externe Strahlung aus der



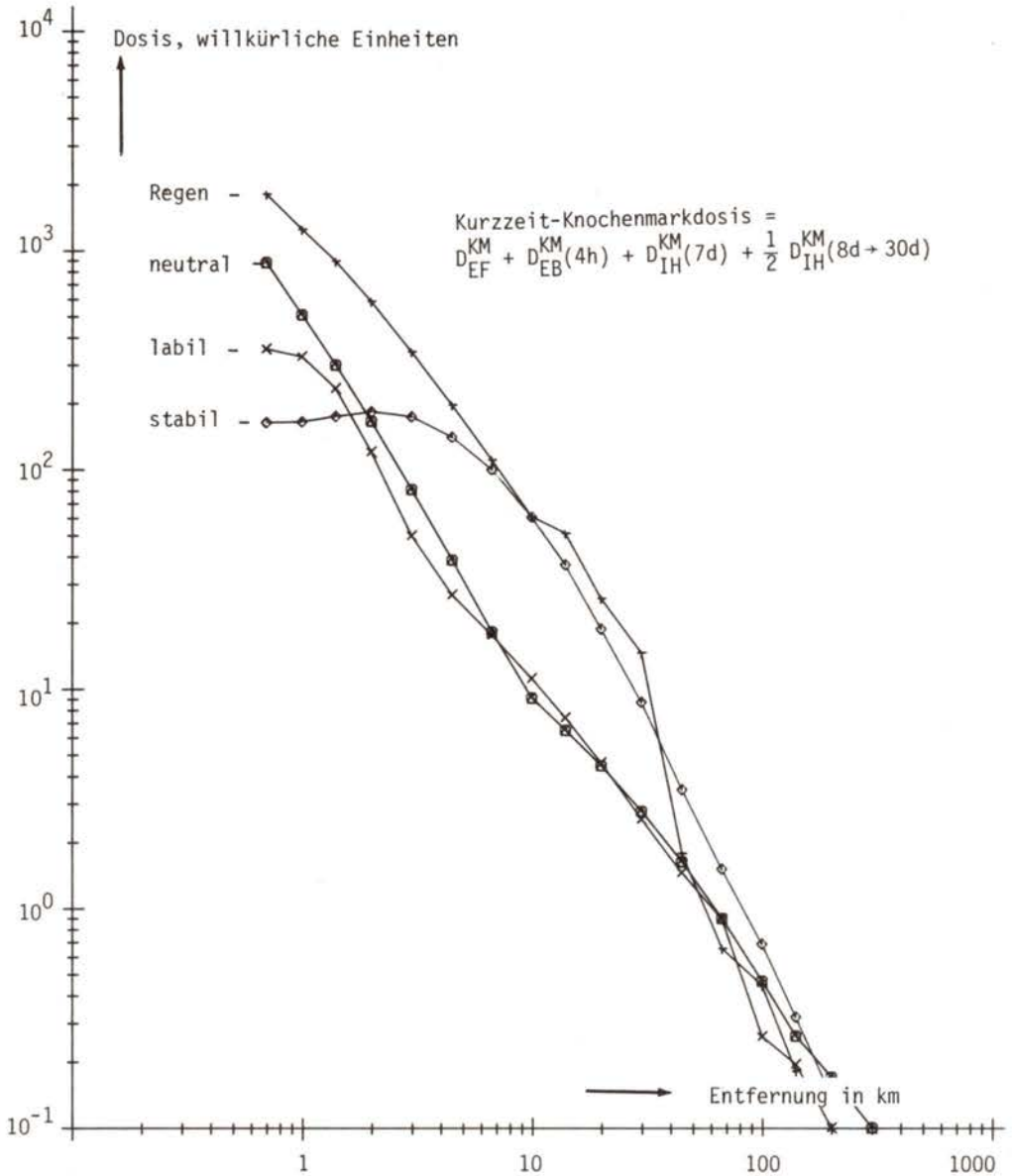


Bild F8, 8-3(1):

Kurzzeit-Knochenmarkdosis für vier Wetterabläufe (Freisetzungskategorie FK2)

Aktivitätsfahne, externe Strahlung vom Boden und Inhalation. Es wird angenommen, daß nach dem Durchzug der Aktivitätsfahne die Strahlung vom Boden vier Stunden lang auf den Menschen einwirkt und daß die Bodenunebenheiten diese Strahlung um den Faktor 0,5 verringern. Die Integrationszeit von vier Stunden orientiert sich an den Fahrzeiten für die schnelle Umsiedlung im Gebiet B (zwischen 20 min und 7,25 h).

Die für Fröhschäden (Abschnitt 8.8.2) relevante Inhalationsdosis wird ermittelt aus der ganzen Dosis, die über die ersten sieben Tage nach Inhalation integriert wurde, und der Hälfte der Dosis, die vom 8. bis 30. Tag nach Inhalation integriert wurde. Die höchste Dosis tritt in Quellnähe im Fall "Regen" auf. Jenseits von 30 km nimmt die Dosis wegen der Verarmung der Abluftfahne infolge der Auswaschung rasch ab. Die niedrigste Dosis in Quellnähe tritt bei stabiler Ausbreitungskategorie auf.

In Bild F8, 8-3(2) bis 8-3(5) wird für die vier ausgewählten Wetterabläufe die Dosis in die Anteile der drei Expositionspfade Inhalation, Strahlung vom Boden und Strahlung aus der Aktivitätsfahne aufgeschlüsselt. Der Anteil der Strahlung aus der Aktivitätsfahne ist bei allen Wetterabläufen groß. Es muß aber bedacht werden, daß keine Schutzwirkung durch Gebäude oder Fahrzeuge angenommen wurde. Fällt Niederschlag, so sind die übrigen Expositionspfade gegenüber der Strahlung vom Boden weitgehend zweitrangig, wie der Dosisverlauf in 30 km Entfernung in Bild F8, 8-3(3) zeigt. Beim Wetterablauf "stabil", Bild F8, 8-3(5), erreicht die Dosis durch Inhalation bzw. externe Bestrahlung vom Boden infolge des Aufsteigens der Aktivitätsfahne bei stabiler Ausbreitungskategorie das Maximum erst in etwa 3 km Entfernung. In Quellnähe ist daher nur die externe Strahlung aus der Fahne von Bedeutung.

Wie Bild F8, 8-3(1) zeigt, treten die höchsten Dosen bei Wetterabläufen mit Niederschlag auf. Dabei ist es möglich, daß nach einem anfänglichen Abfall die Dosis mit wachsender Entfernung wieder ansteigt. Dies wird verursacht durch verstärkten Niederschlag. Mit steigender Niederschlagsintensität erhöht sich die

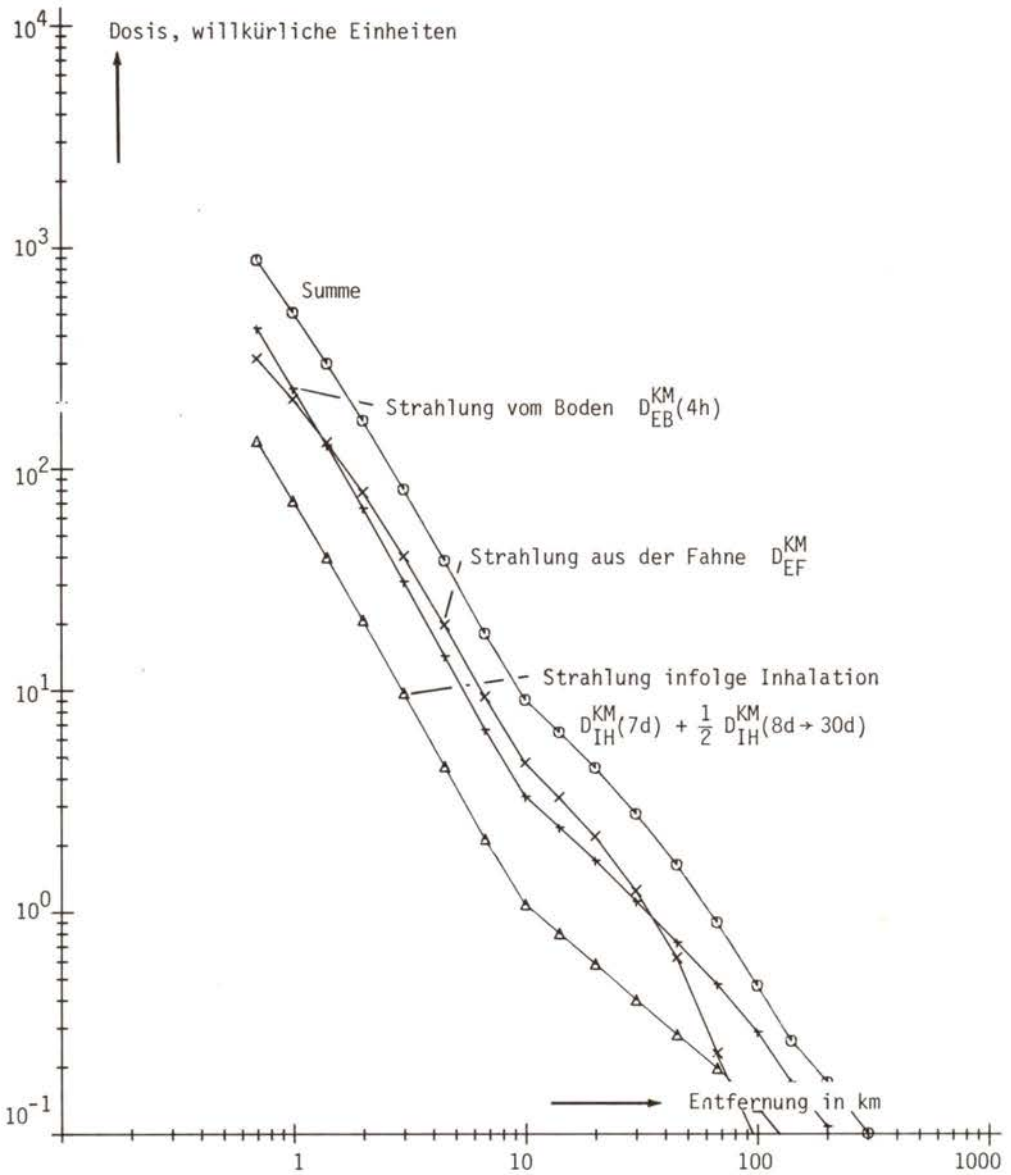


Bild F8, 8-3(2):

Kurzzeit-Knochenmarkdosis für Wetterablauf "neutral", aufgeschlüsselt nach Expositionspfaden (Freisetzungskategorie FK2)

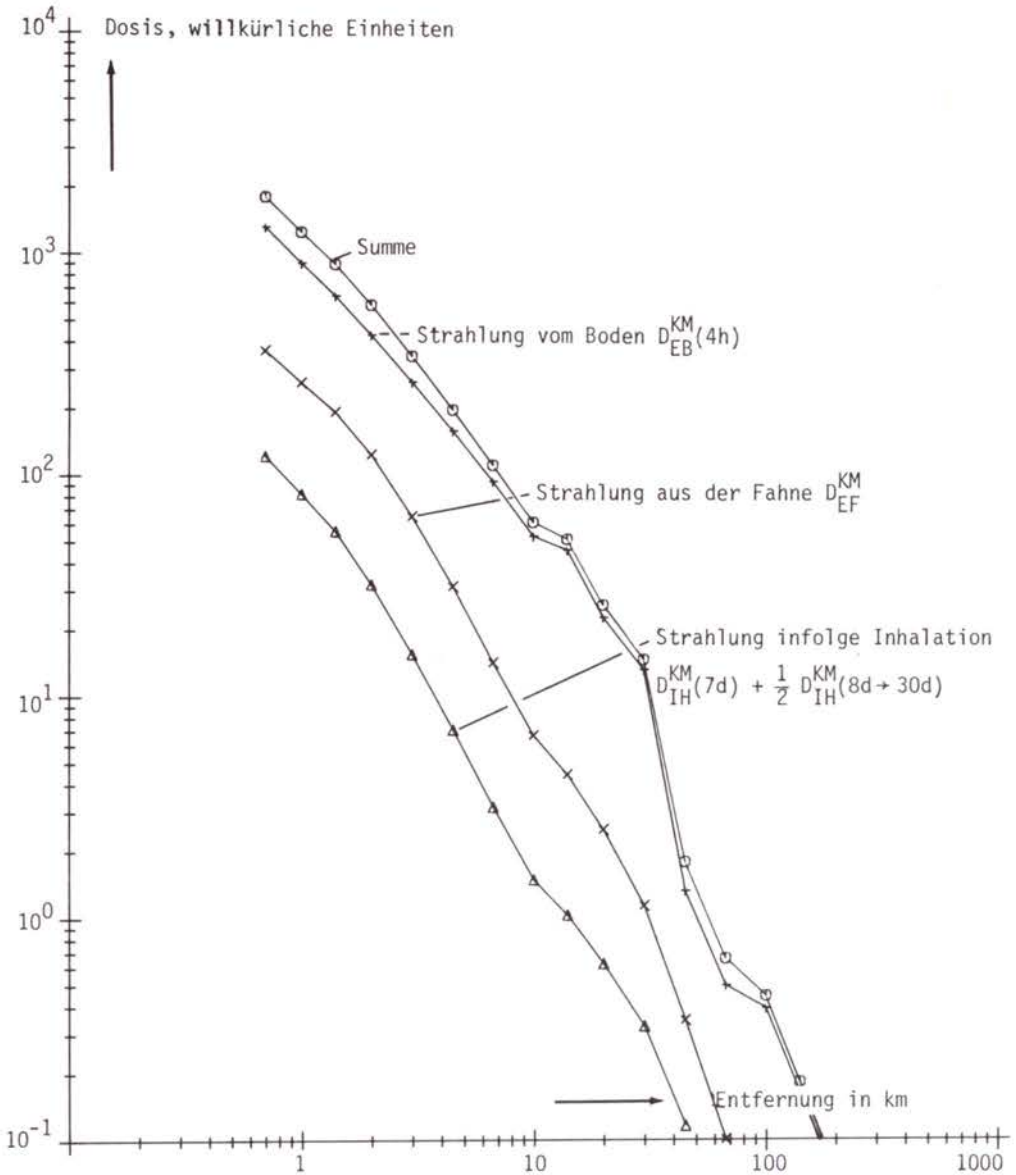


Bild F8, 8-3(3):

Kurzzeit-Knochenmarkdosis für Wetterablauf "Regen", aufgeschlüsselt nach Expositionspfaden (Freisetzungskategorie FK2)

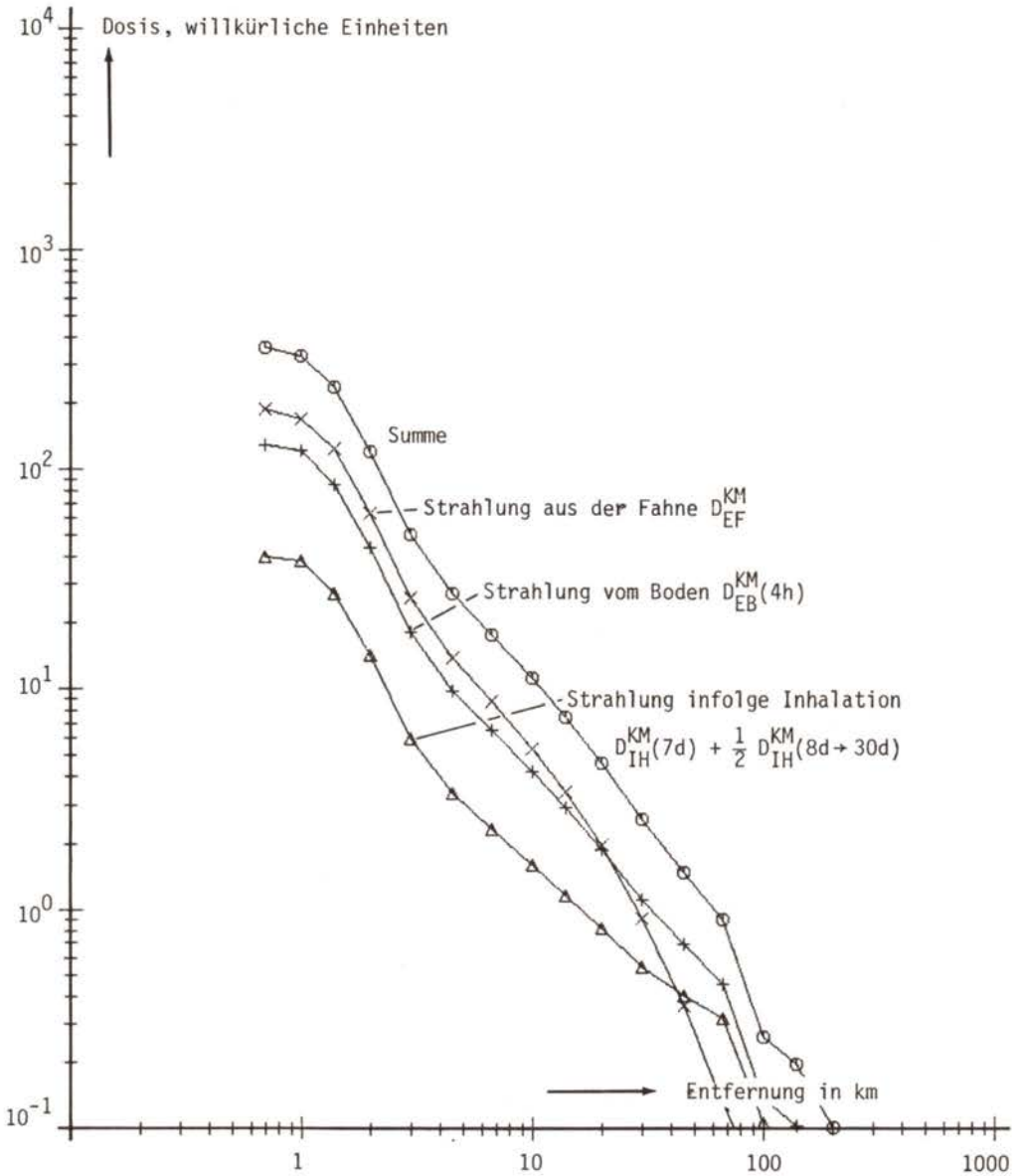


Bild F8, 8-3(4):

Potentielle Kurzzeit-Knochenmarkdosis für Wetterablauf "labil",  
aufgeschlüsselt nach Expositionspfaden (Freisetzungskategorie FK2)

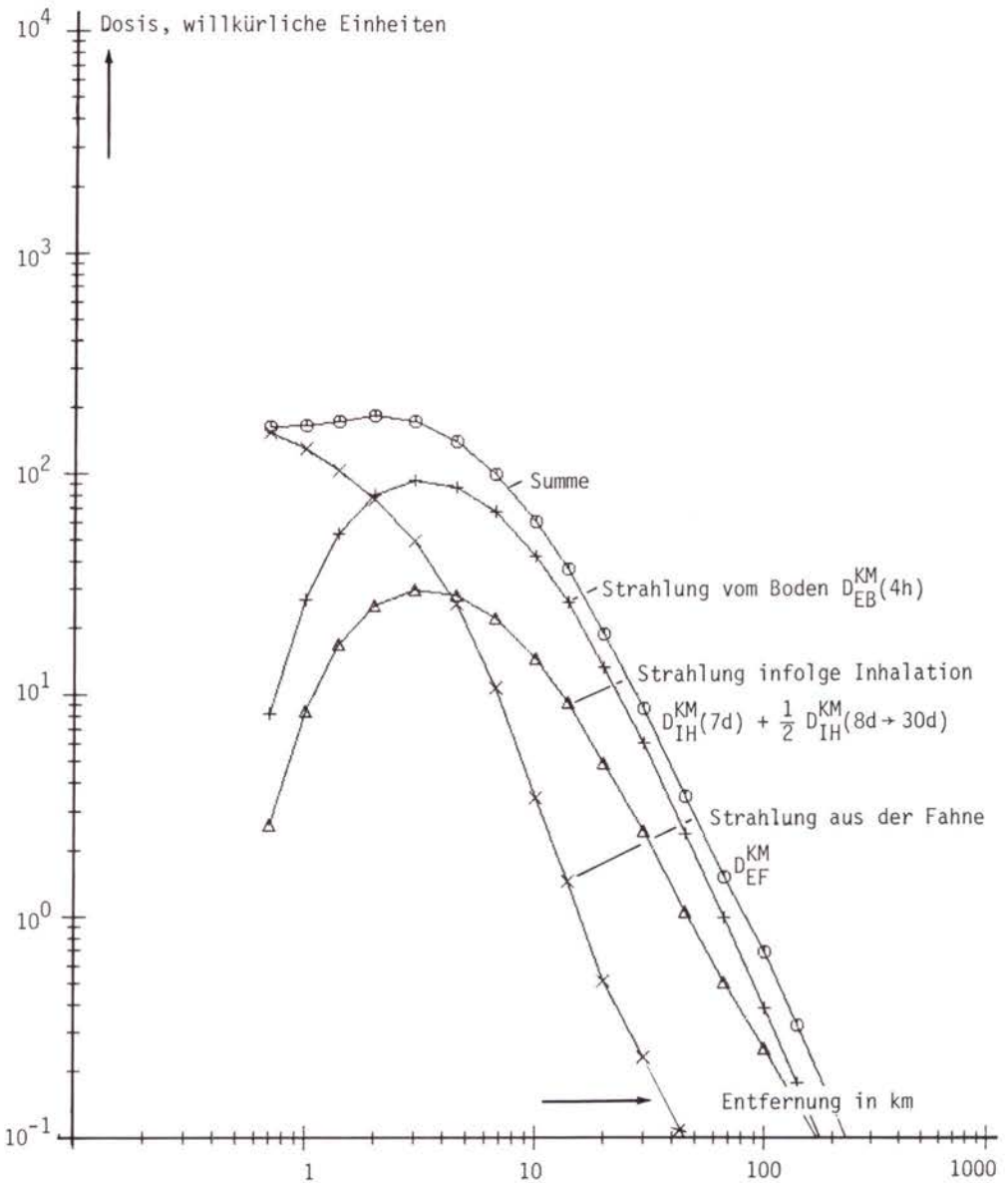


Bild F8, 8-3(5):

Potentielle Kurzzeit-Knochenmarksdosis für Wetterablauf "stabil", aufgeschlüsselt nach Expositionspfaden (Freisetzungskategorie FK2)

Bodenkontamination und damit die Dosis durch Strahlung vom Boden.

Für einen derartigen Wetterablauf ("zunehmender Regen", Tabelle F8, 8-2) wurde die Kurzzeit-Knochenmarkdosis dreidimensional und perspektivisch gezeichnet. Die Achsen sind im Gegensatz zu den vorherigen Abbildungen linear unterteilt. Bild F8, 8-4 zeigt das eng begrenzte Gebiet hoher Dosen in Quellnähe, den anschließenden Abfall und den Wiederanstieg der Dosis in etwa 10 km Entfernung.

#### 8.4 Potentielle Dosis durch externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne - nuklidspezifische Aufschlüsselung

Die externe Strahlung aus der Aktivitätsfahne ist nur während der Durchzugszeit wirksam. Im Gegensatz zu den übrigen Expositionspfaden steigt die Dosis danach nicht mehr an. Daher wird diese Dosis nur nach Organen und Nukliden aufgeschlüsselt dargestellt. Sieht man von Änderungen infolge des radioaktiven Zerfalls während des Ausbreitungsvorganges ab, so ist das relative Verhältnis der Nuklide zueinander bei allen trockenen Wetterabläufen etwa gleich (Wetterabläufe mit Regen werden weiter unten erläutert). Es genügt daher, die potentielle Dosis durch externe Bestrahlung in nur einer Entfernung und für nur zwei Wetterabläufe ("neutral" und "Regen") darzustellen.

Bild F8, 8-5(1) zeigt die Dosis der Organe Knochenmark und Lunge sowie des Ganzkörpers für den Wetterablauf "neutral" (Tabelle F8, 8-2). Der Aufpunkt für die Ortsdosis befindet sich in 10 km Entfernung unter der Achse der Aktivitätsfahne; die Dosis in Knochen und Schilddrüse ist etwa gleich groß wie diejenige des Ganzkörpers. Die Edelgase Xenon und Krypton erscheinen bei diesem Expositionspfad unter den wichtigsten Nukliden. Ihre Bedeutung wächst relativ zu Jod und Aerosolen an, sofern bei Niederschlag die Aerosole ausgewaschen werden. Dies wird anhand der Dosis an einem Aufpunkt in 100 km Entfernung für Wetterablauf "Regen" gezeigt (Bild F8, 8-5(2)). Nur knapp 19 % des an-

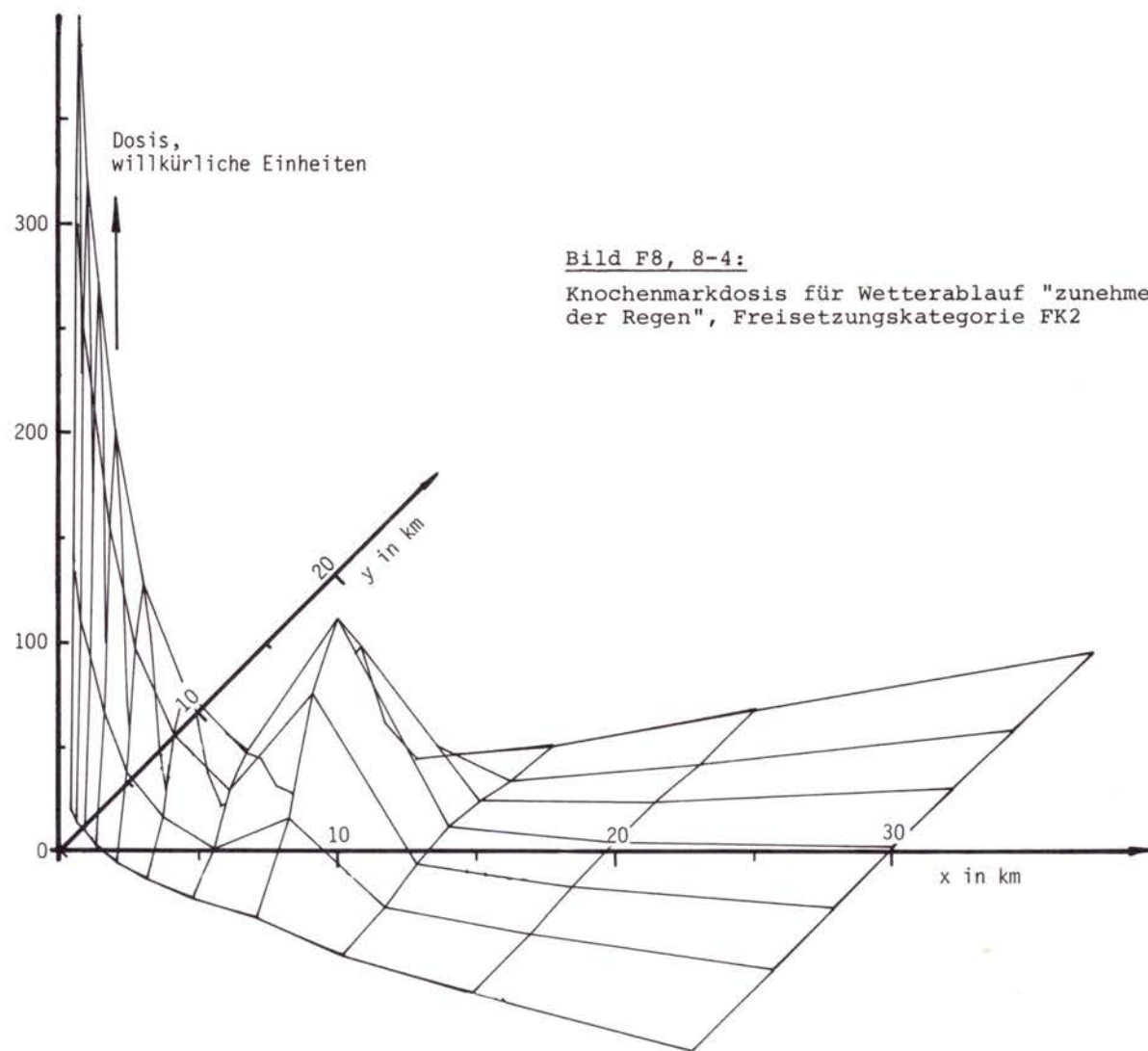


Bild F8, 8-4:

Knochenmarksdosis für Wetterablauf "zunehmender Regen", Freisetzungskategorie FK2



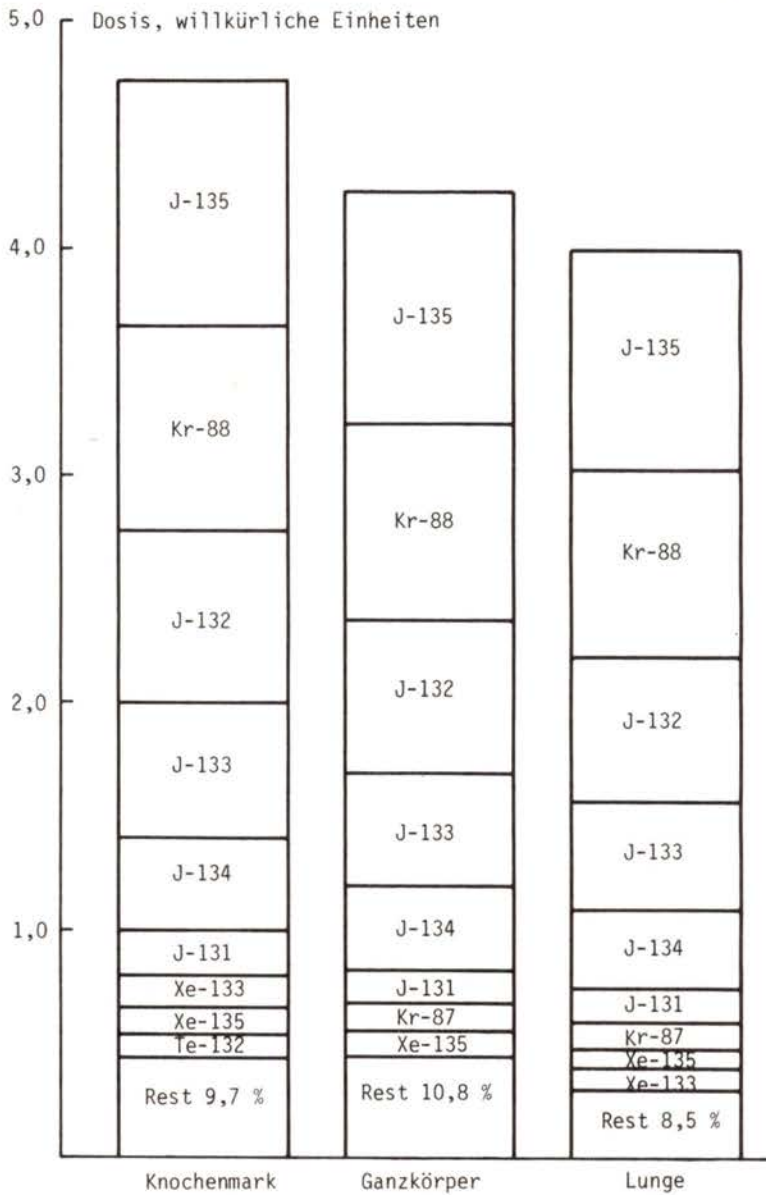


Bild F8, 8-5(1):

Externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung unter der Fahnenachse)

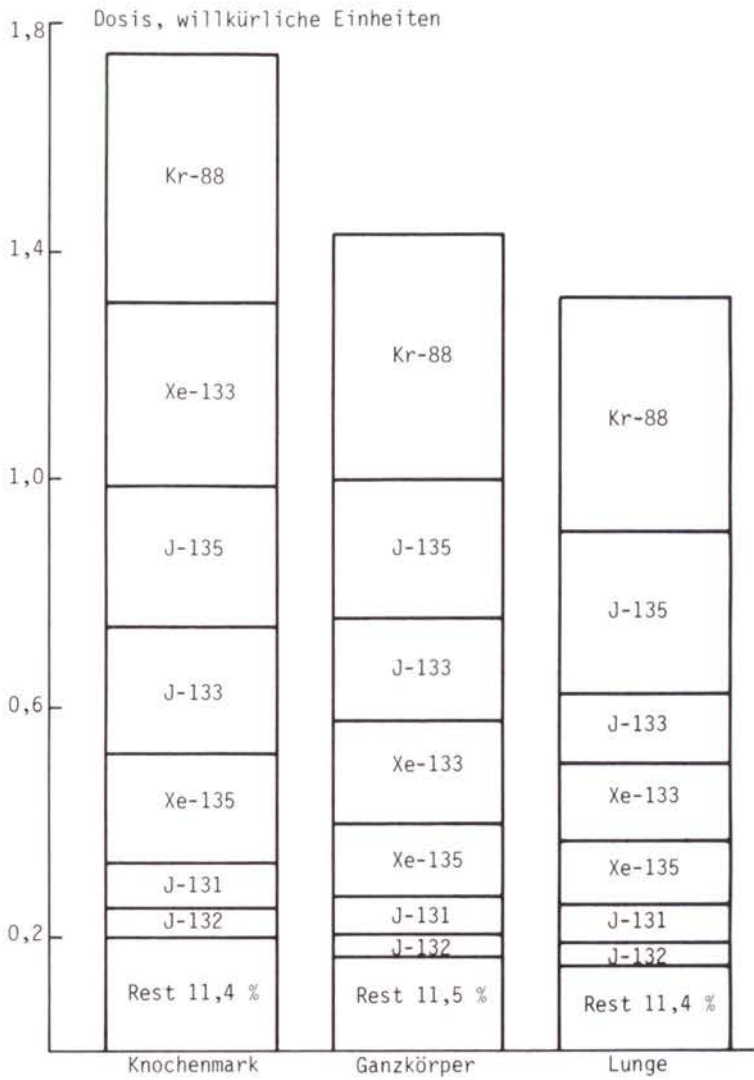


Bild F8, 8-5(2):

Externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "Regen", 100 km Entfernung unter der Fahnenachse)

fänglichen Jod- und Aerosol-Inventars sind in dieser Entfernung noch in der Abluftfahne vorhanden.

#### 8.5 Zeitabhängiger Verlauf der potentiellen Dosis durch externe Bestrahlung vom Boden

Mit Ausnahme der Edelgase Krypton und Xenon unterliegen alle betrachteten Nuklide der trockenen Ablagerung und dem Auswaschen durch Niederschlag. Der Expositionspfad "externe Bestrahlung durch am Boden abgelagerte Aktivität" überwiegt im allgemeinen, sobald die Bestrahlungszeit größer als einige Stunden ist. Viele Nuklide zerfallen innerhalb des ersten Jahres. Nur einige langlebige Nuklide bestimmen bei langer Bestrahlungszeit die Gesamtdosis.

Die zeitliche Entwicklung der Beiträge der einzelnen Nuklide wird im folgenden, getrennt nach Organen, dargestellt. Alle Dosen wurden für den Wetterablauf "neutral" berechnet. Der Aufpunkt für die Ortsdosis befindet sich in 10 km Entfernung unter der Aktivitätsfahnenachse. Da die Parameter der trockenen und nassen Ablagerung jeweils für alle Nuklide gleich groß sind, genügt es, die zeitliche Entwicklung der Dosis in nur einer Entfernung und für nur einen Wetterablauf darzustellen. Das Verhältnis der Nuklide zueinander ist bei den übrigen Wetterabläufen etwa gleich, abgesehen von Änderungen infolge des radioaktiven Zerfalls während des Ausbreitungsvorganges.

Für akute Schäden ist das Knochenmark das relevante Organ. Bild F8, 8-6(1) zeigt die anfänglich überwiegende Bedeutung der Jodisotope und des Te-132. Nach 4 Stunden Bestrahlungszeit werden etwa 70 % der Gesamtdosis von den Jodisotopen verursacht. J-135 trägt allein fast 30 %, Te-132 19 % zur Gesamtdosis bei. Nach einem Monat steigt der ursprünglich kleine Anteil des Cäsiums rasch an. Nach 50 Jahren werden fast 91 % der Gesamtdosis von Cs-134 (40 %) und Cs-137 (50 %) bestritten. Der Jodanteil ist auf 3,7 % zurückgegangen. Cäsium, Jod, Te-132 (2,6 %) und Ru-103 (0,8 %) ergeben nach 50 Jahren 98 % der Gesamtdosis.

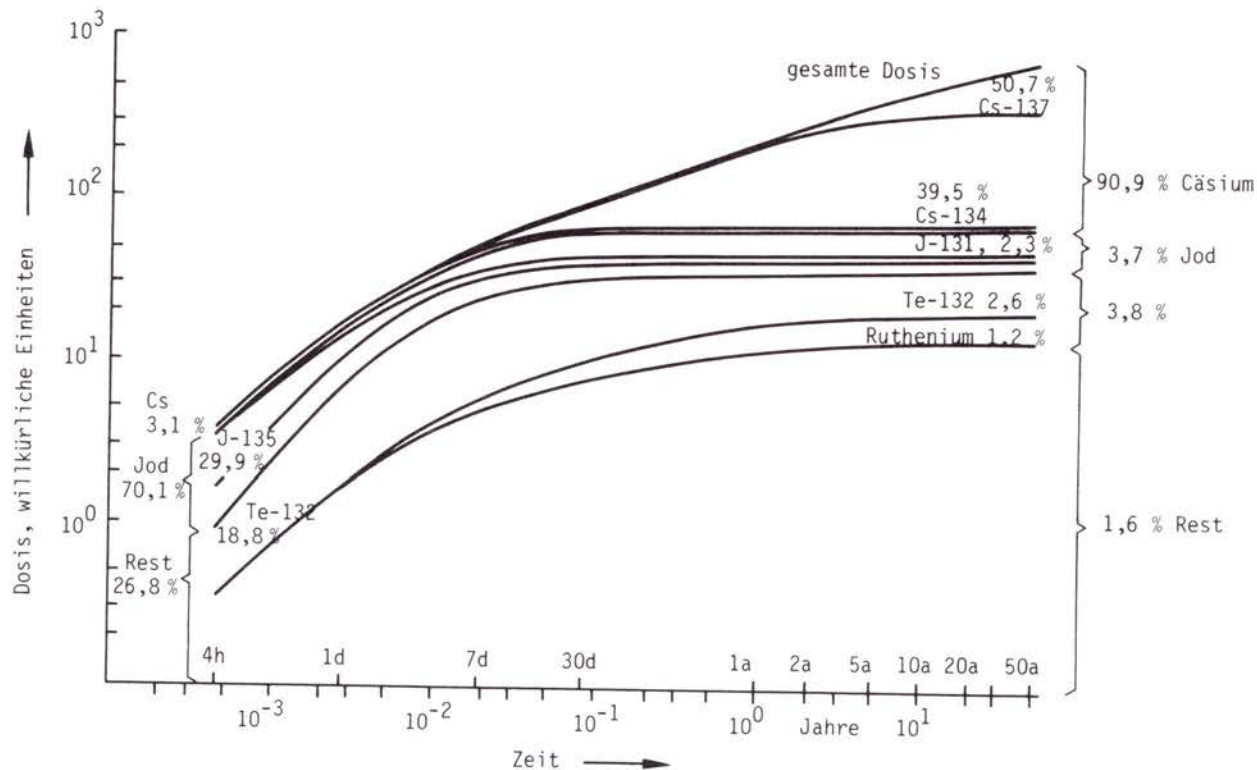


Bild F8, 8-6(1):

Zeitliche Entwicklung der Knochenmarksdosis durch externe Bodenstrahlung (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

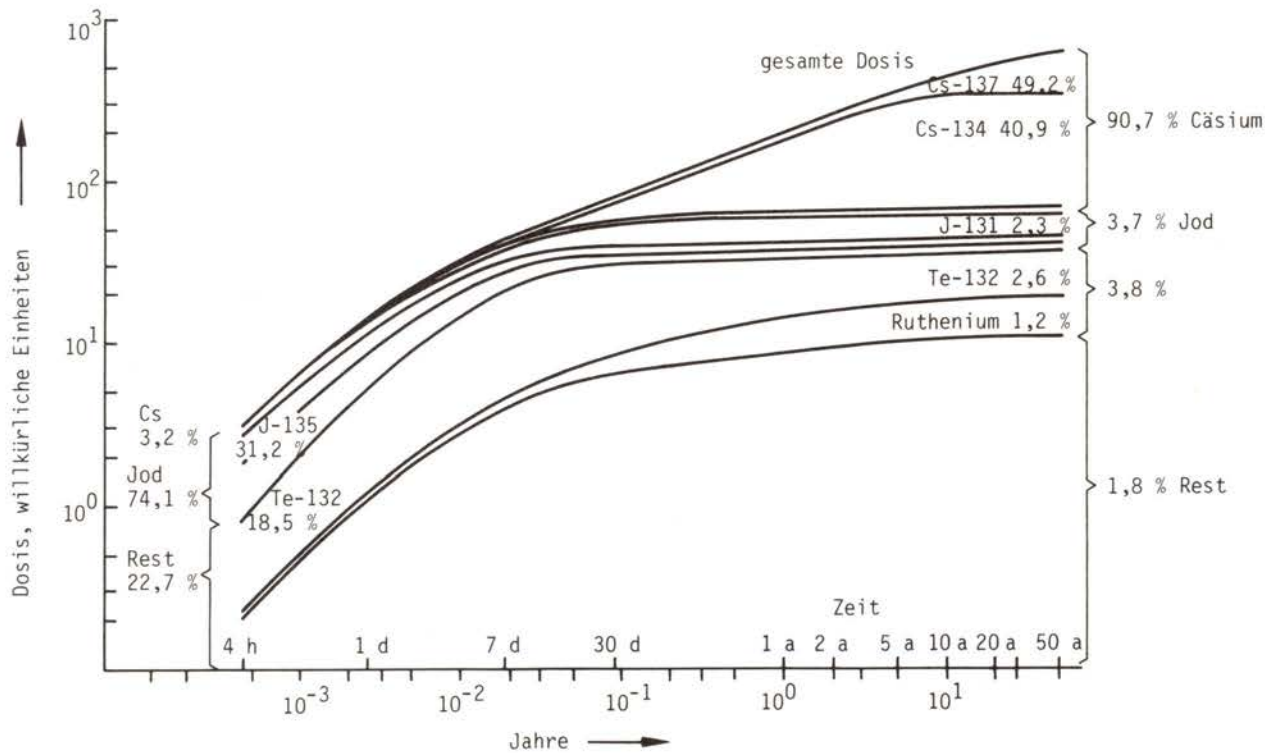


Bild F8, 8-6(2):

Zeitliche Entwicklung der Knochenoberflächendosis durch externe Bodenstrahlung (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

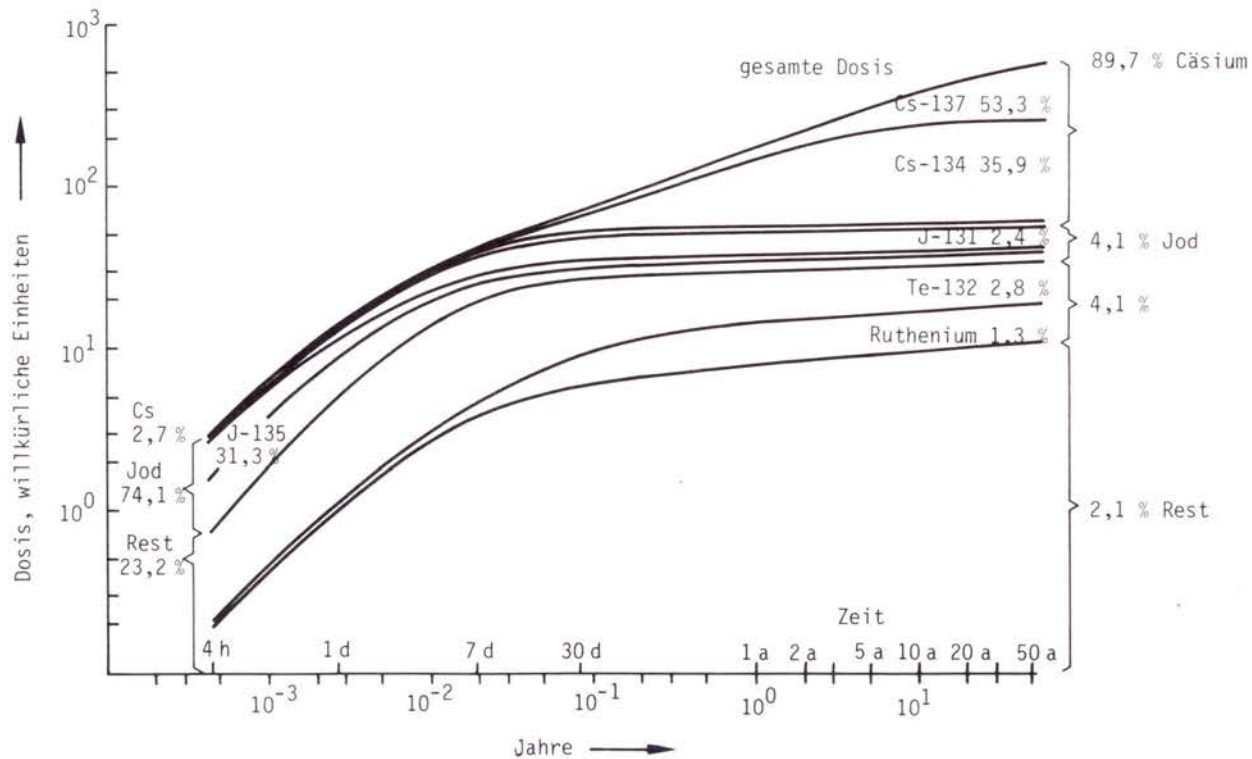


Bild F8, 8-6(3):

Zeitliche Entwicklung der Lungendosis durch externe Bodenstrahlung (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

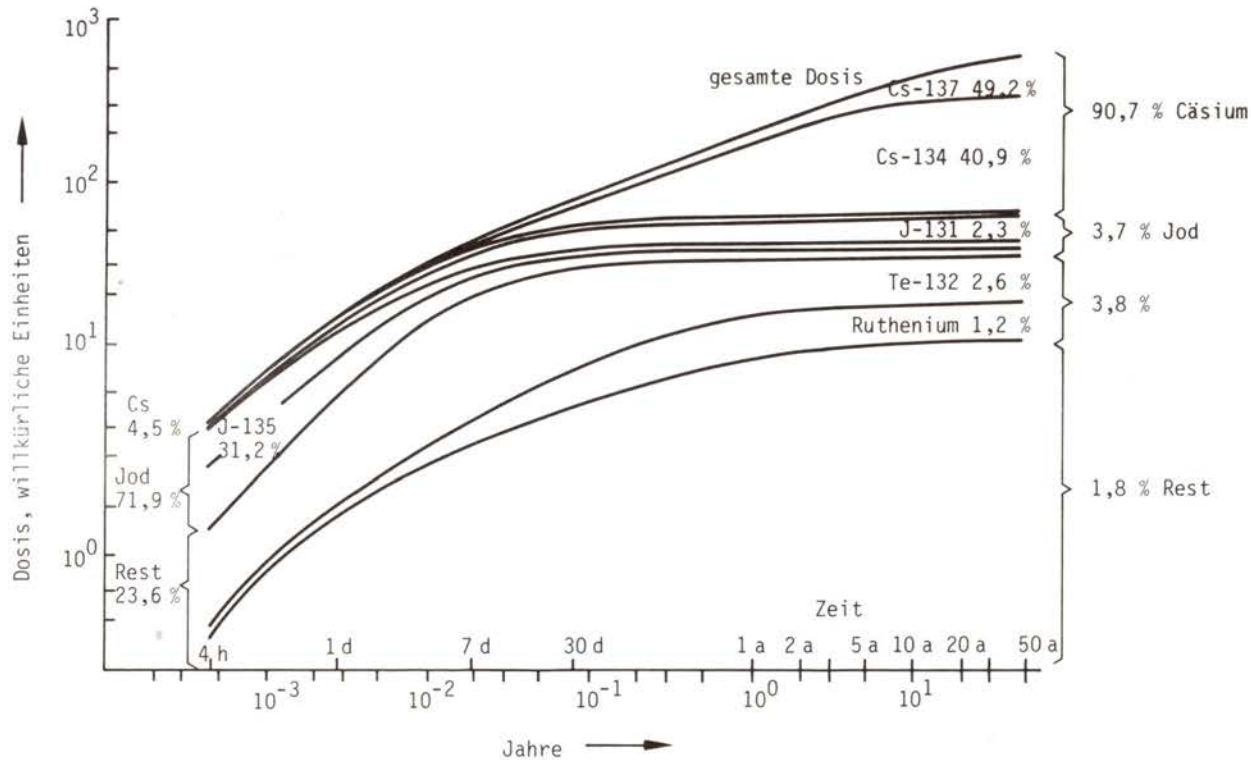


Bild F8, 8-6(4):

Zeitliche Entwicklung der Schilddrüsendosis durch externe Bodenstrahlung (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

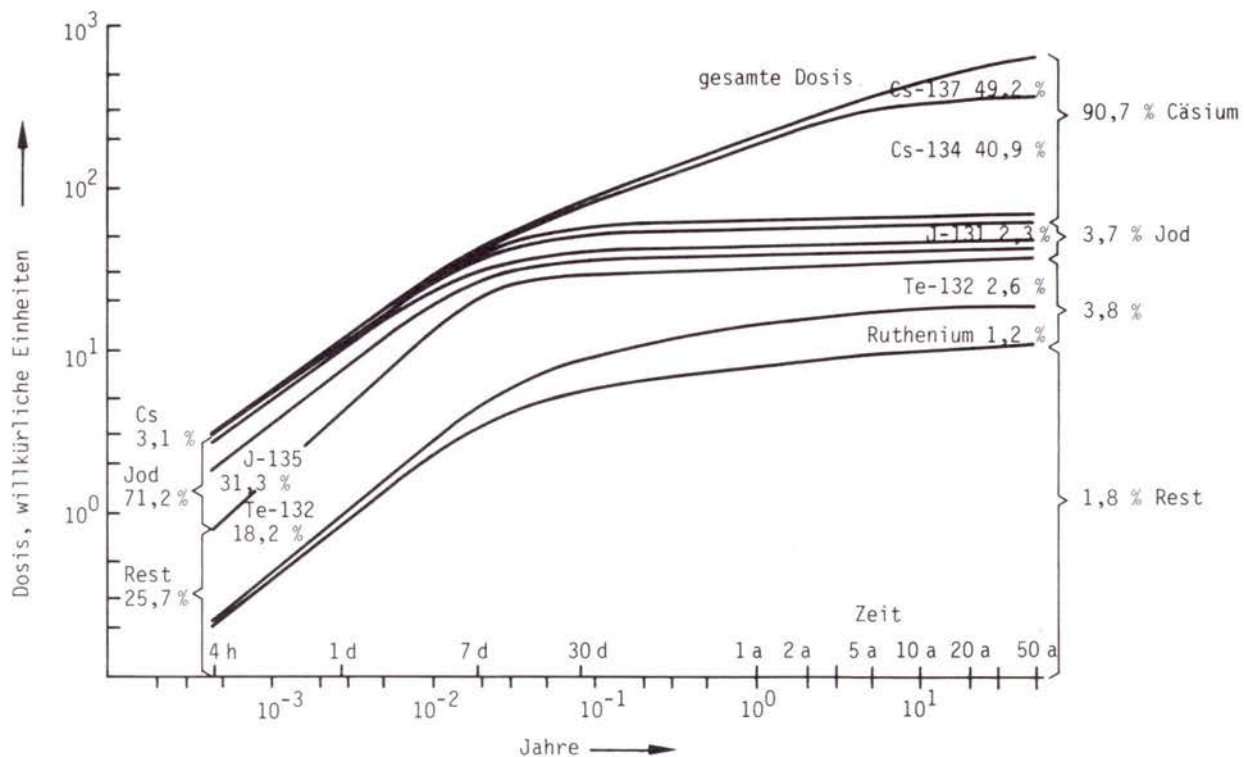


Bild F8, 8-6(5):

Zeitliche Entwicklung der Ganzkörperdosis durch externe Bodenstrahlung  
(Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)



In Bild F8, 8-6(2) bis 8-6(5) wird die zeitliche Entwicklung der Dosis der übrigen Organe Knochenoberfläche, Lunge und Schilddrüse sowie des Ganzkörpers gezeigt.

#### 8.6 Zeitabhängiger Verlauf der potentiellen Inhalationsdosis

Der Inhalation kontaminierter Luft sind Personen während des Durchzugs der Aktivitätsfahne ausgesetzt. Die Durchzugszeit der Fahne und damit die Inhalationszeit sind etwa gleich der Dauer der Freisetzung. Die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität verursacht im Körper eine interne Bestrahlung, deren Dauer von der Halbwertszeit sowie der Verweilzeit des jeweiligen Nuklids im Körper abhängig ist.

In Bild F8, 8-7(1) bis 8-7(5) ist die Inhalationsdosis nach den wichtigsten Nukliden für die Organe Knochenmark, Knochenoberfläche, Lunge und Schilddrüse sowie den Ganzkörper aufgeschlüsselt. Zugrunde gelegt ist der Wetterablauf "neutral" entsprechend Tabelle F8, 8-2. Der Aufpunkt für die Ortsdosis befindet sich in 10 km Entfernung unter der Fahnenachse. Es wurde der Zuwachs für jeweils 10 Jahre gezeichnet. In Bild F8, 8-7(1) ist am linken Bildrand die für Frühschäden relevante Kurzzeit-Knochenmarkdosis  $D^{KM}$  abzulesen (Abschnitt 8.3).

#### 8.7 Probabilistische Ergebnisse

Die probabilistischen oder häufigkeitsbewerteten Ergebnisse werden gewonnen durch Verknüpfung der Einzelergebnisse für die Unfallfolgen mit den Eintrittshäufigkeiten der zugrunde liegenden Kombinationen von Freisetzungskategorie, Wetterablauf, Windrichtung und Standort. Die Art der Verknüpfung bestimmt die Darstellungsform der in den folgenden Abschnitten diskutierten Ergebnisse. Dabei wird folgende Gliederung vorgenommen:

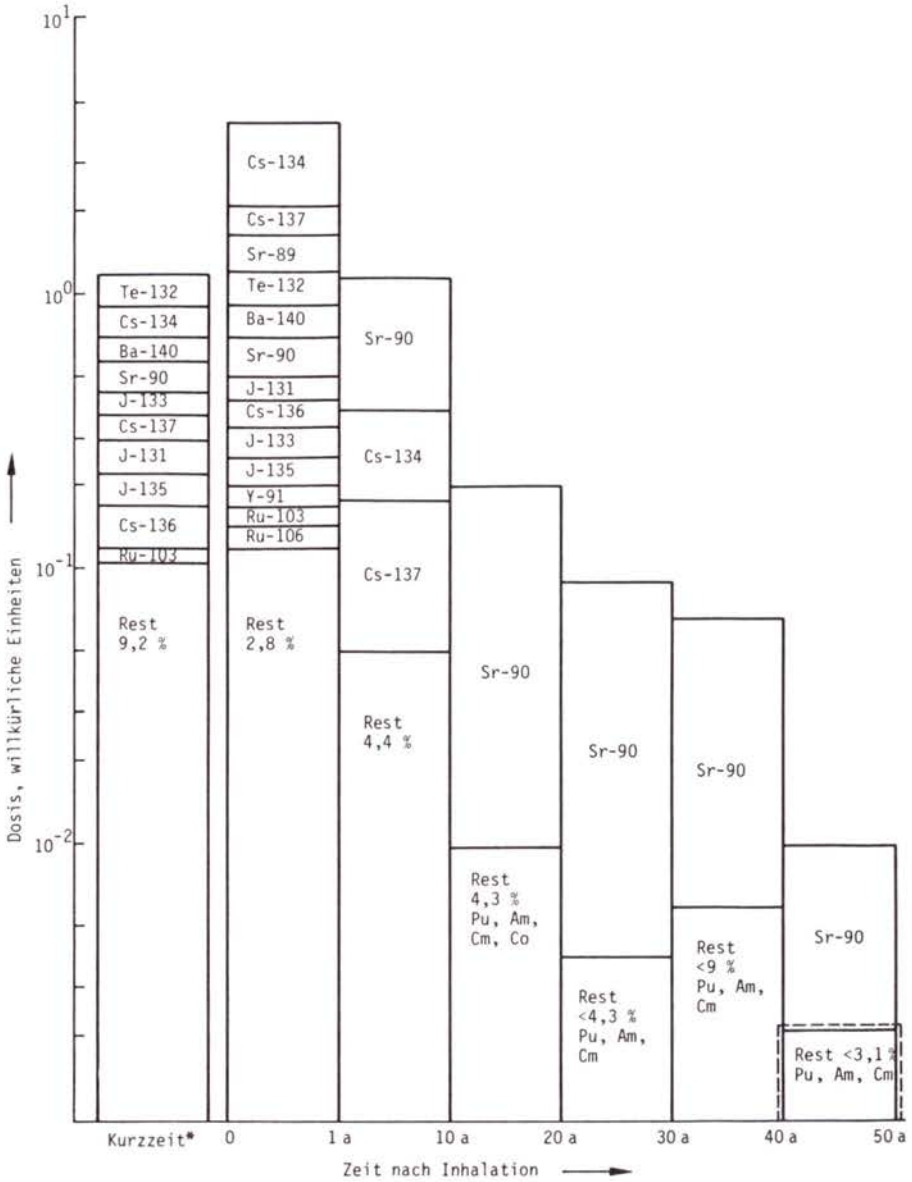


Bild F8, 8-7(1):

Knochenmarkdosis  $D_{IH}^{KM}$  durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neuträl", 10 km Entfernung)

$$* \text{ Kurzzeitdosis} = D_{IH}^{KM}(7d) + \frac{1}{2} D_{IH}^{KM}(8d \rightarrow 30d)$$

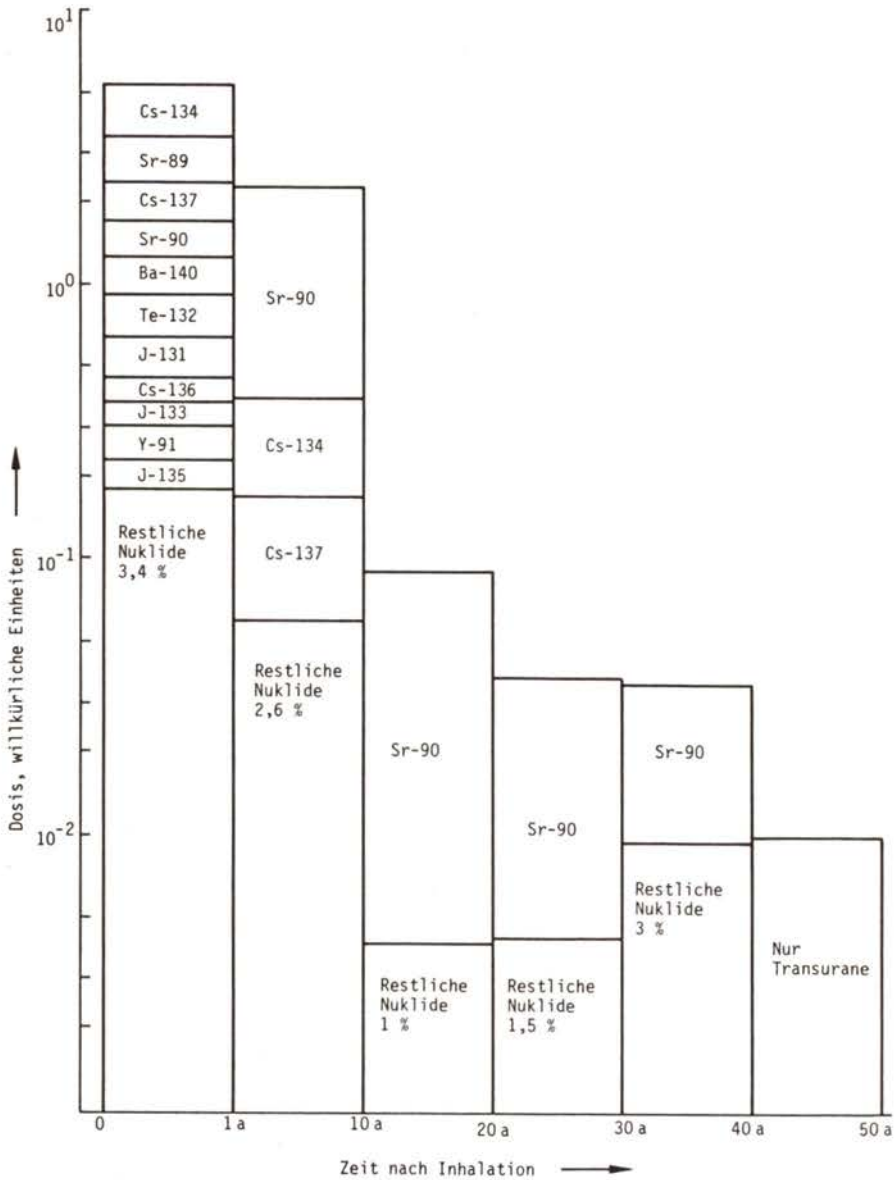


Bild F8, 8-7(2):

Knochenoberflächendosis  $D_{IH}^{KN}$  durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung unter der Fahnenachse)

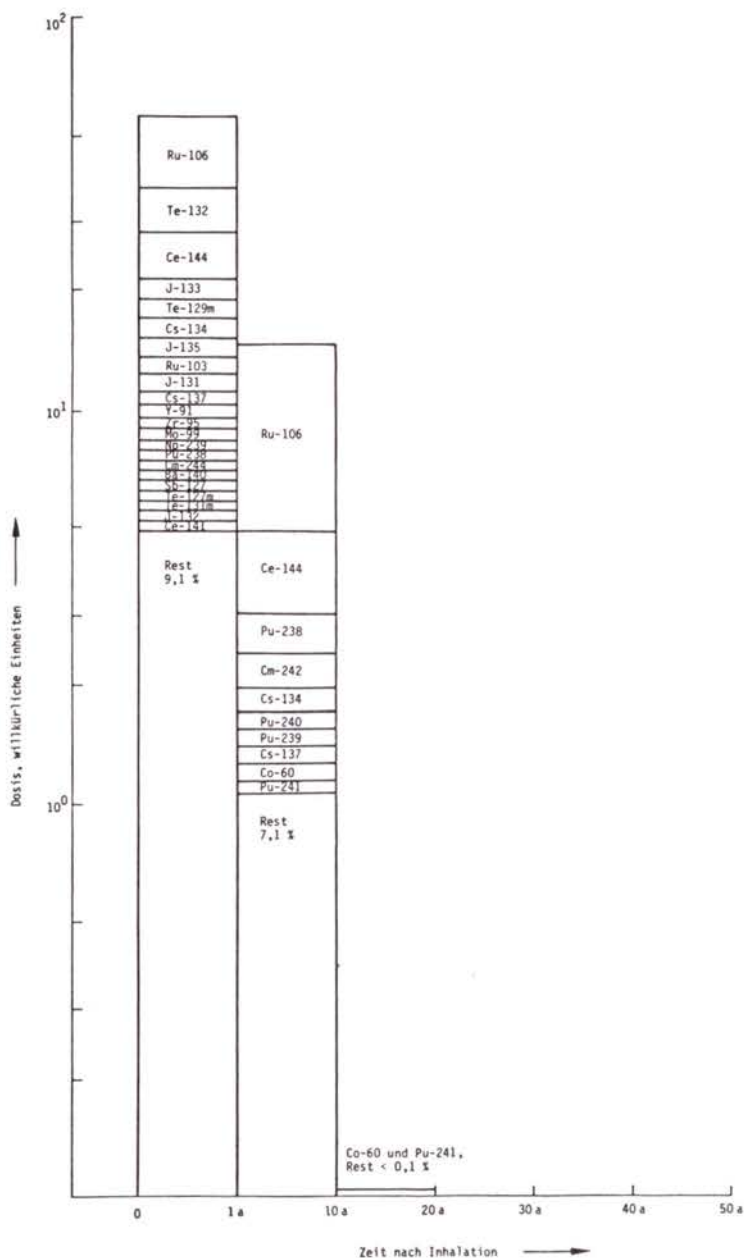


Bild F8, 8-7(3):

Lungendosis  $D_{TH}^{LG}$  durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung unter der Fahnenachse)

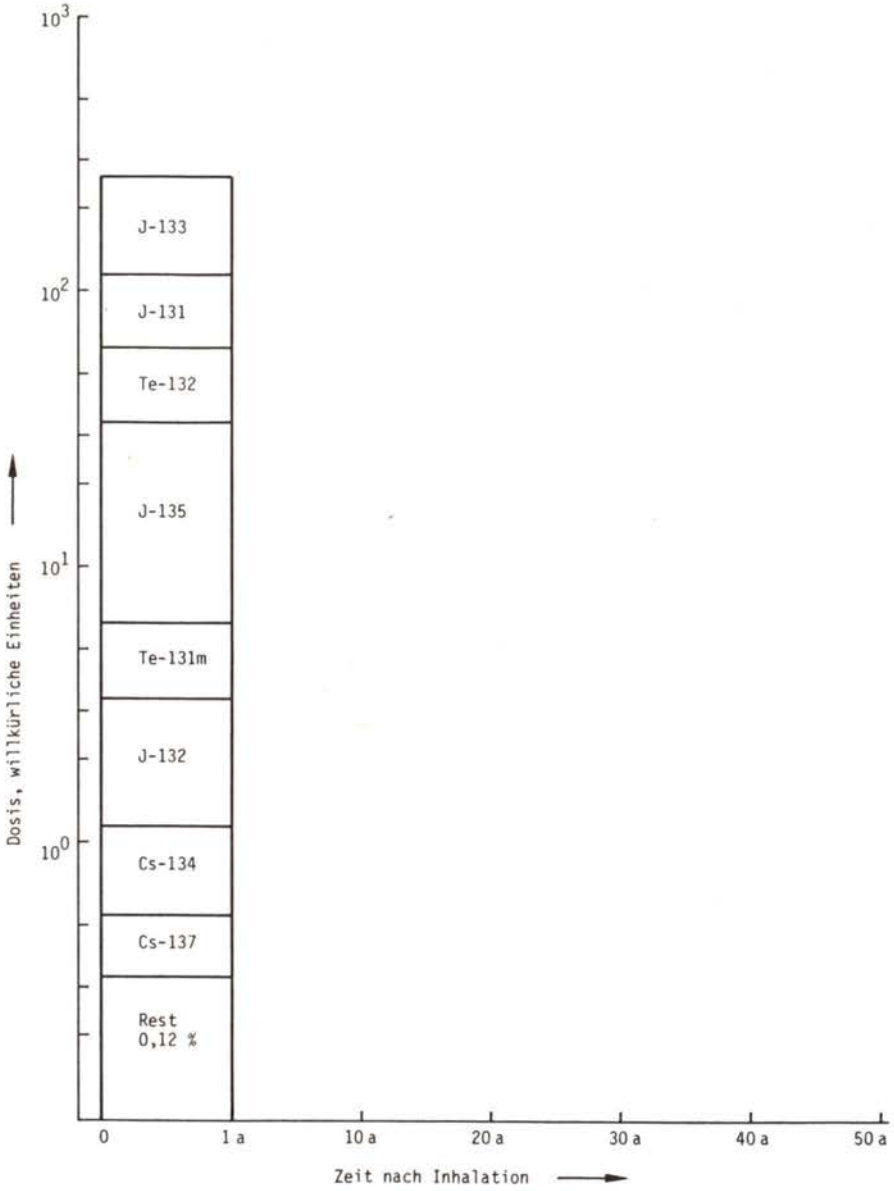


Bild F8, 8-7(4):

Schilddrüsendosis  $D_{IH}^{SD}$  durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung unter der Fahnenachse)

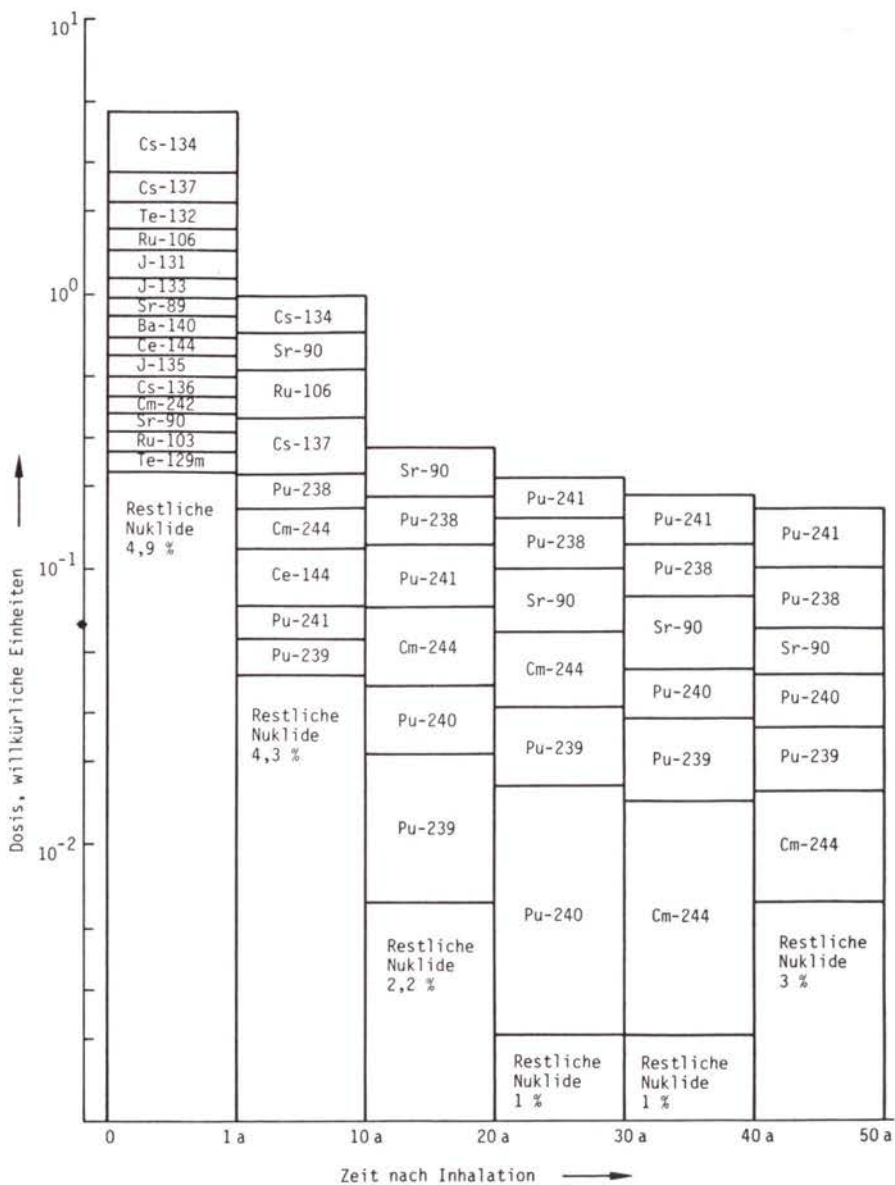


Bild F8, 8-7(5):

Ganzkörperdosis  $D_{IH}^{GK}$  durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", 10 km Entfernung unter der Fahnenachse)

● Klassenhäufigkeitsdichten und komplementäre Häufigkeitsverteilungen

Die Klassenhäufigkeitsdichten und die komplementären Häufigkeitsverteilungen der Kollektivschäden KS (Früh- bzw. Spätschäden), der genetisch signifikanten Kollektivdosen KD und der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen F und Personen P werden im Abschnitt 8.8 dargestellt.

Die Eintrittshäufigkeit  $f_{jkl\mu}$  der Einzelereignisse, d.h. der Kombinationen aus Wetterablauf j, Windrichtung k und Freisetzungskategorie l berechnet sich dabei an jedem Standort  $\mu$  zu

$$f_{jkl\mu} = f_{A_l} \cdot P_{W_j} \cdot P_{D_k} \quad (8.2)$$

mit

$$\begin{aligned} j &= 1 \dots 115 \\ k &= 1 \dots 36 \\ l &= 1 \dots 8 \\ \mu &= 1 \dots 19 \end{aligned}$$

wobei

$$\begin{aligned} f_{A_l} &\hat{=} \text{Häufigkeit der Freisetzungskategorie } l, 1/a \\ P_{W_j} &= \frac{1}{115} \hat{=} \text{Wahrscheinlichkeit des Wetterablaufs } j \\ P_{D_k} &= \frac{1}{36} \hat{=} \text{Wahrscheinlichkeit der Windrichtung } k \end{aligned}$$

Aus der Gesamtzahl der Rechenergebnisse wurden die Werte  $\Psi(KS_i, \delta KS_i)$  der Klassenhäufigkeitsdichten der Kollektivschäden für 25 Anlagen berechnet, indem die Eintrittshäufigkeiten aller Einzelereignisse mit einem Schadensumfang  $KS_{jkl\mu}$  im Intervall  $\delta KS_i$  um  $KS_i$  aufsummiert wurden:

$$\Psi(KS_i, \delta KS_i) = \sum_{\mu} n_{\mu} \sum_l \sum_k \sum_j f_{jkl\mu} \quad (8.3)$$

mit der Nebenbedingung

$$KS_i - \frac{\delta KS_i}{2} \leq KS_{jkl\mu} < KS_i + \frac{\delta KS_i}{2}$$

Dabei bezeichnet  $n_\mu$  die Anzahl der Reaktorblöcke (Anlagen) am Standort  $\mu$ . An Standorten mit  $n_\mu > 1$  Anlagen wurden die Rechnungen also nur für einen Reaktorblock durchgeführt und die Eintrittshäufigkeiten dann mit dem Faktor  $n_\mu$  multipliziert.

Die Breite der Schadensintervalle  $\delta KS_i$  wurde derart gewählt, daß jede Dekade im logarithmischen Maßstab in 10 gleiche Abschnitte aufgeteilt ist. Die Klassenhäufigkeitsdichten für die Kollektivdosen wurden entsprechend Gleichung (8.3) berechnet.

Aus den Einzelereignissen lassen sich die komplementären Häufigkeitsverteilungen  $\phi(KS)$  nach folgender Vorschrift berechnen:

$$\phi(KS) = \sum_{\mu} n_{\mu} \sum_l \sum_k \sum_j f_{jkl\mu} \quad (8.4)$$

mit der Nebenbedingung

$$KS_{jkl\mu} \geq KS$$

Die komplementäre Häufigkeitsverteilung  $\phi(KS)$  gibt für jeden Kollektivschaden  $KS$  die Häufigkeit an, mit der dieser Schaden erreicht oder überschritten wird. Gleichung (8.4) gilt entsprechend für die Kollektivdosis  $KD$  und die von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen  $F$  und Personen  $P$ .

Außer den Verteilungsfunktionen werden charakteristische Werte der errechneten Schadensumfänge in Tabellenform angegeben. Im einzelnen wurden für die Unfallfolgen  $KS$ ,  $KD$ ,  $F$  und  $P$  folgende Größen berechnet (aufgelistet am Beispiel  $KS$ ):

$KS_{\min} \hat{=}$  kleinster Kollektivschaden

$KS_{\max} \hat{=}$  größter Kollektivschaden

$\overline{KS} = \frac{1}{z} \sum_{\mu} n_{\mu} \sum_l \sum_k \sum_j KS_{jkl\mu} \hat{=}$  mittlerer Kollektivschaden



wobei

$z = 629\ 280 \hat{=} \text{Zahl der Einzelereignisse}$

$\Delta KS = \sqrt{\text{VAR}(KS)} \hat{=} \text{Ma\ss der Abweichung vom mittleren Kollektivschaden}$

wobei

$\text{VAR}(KS) = \overline{KS^2} - \overline{KS}^2 \hat{=} \text{mittlere quadratische Abweichung vom mittleren Kollektivschaden}$

Die Abweichungen entstehen aufgrund der unterschiedlichen Unfallfolgen für die einzelnen Kombinationen von Freisetzungskategorie, Wettersituation, Windrichtung und Standort.

#### ● Erwartungswerte

Neben den Häufigkeitsverteilungen werden als rechnerische Verknüpfungen die Erwartungswerte der einzelnen Unfallfolgen KS, KD, F und P bestimmt. Diese Erwartungswerte errechnen sich (am Beispiel der Kollektivschäden KS) für 25 Anlagen nach

$$\langle KS^{25} \rangle = \sum_{\mu} n_{\mu} \sum_l \sum_k \sum_j KS_{jkl\mu} \cdot f_{jkl\mu} \quad (8.5)$$

Der Erwartungswert  $\langle KS^{25} \rangle$  wird auch als Kollektivrisiko<sup>1)</sup> bezeichnet. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 8.9 für die Unfallfolgen KS, KD, F und P dargestellt.

Außer den Kollektivrisiken wurden die abstandsabhängigen mittleren Individualrisiken<sup>2)</sup> berechnet. Das abstandsabhängige mittlere Individualrisiko ist ein auf eine Anlage normierter Erwartungswert, gebildet aus den mit den Eintrittshäufigkeiten ge-

<sup>1)</sup> Das Kollektivrisiko gibt den beim Betrieb von 25 Reaktorblöcken pro Jahr im Mittel auftretenden Kollektivschaden an, der Erwartungswert für die Kollektivdosis  $\langle KS^{25} \rangle$  ist die im Mittel auftretende Kollektivdosis.

<sup>2)</sup> Das mittlere Individualrisiko (Erwartungswert für den Individualschaden) gibt den pro Reaktorbetriebsjahr im Mittel auftretenden Individualschaden an. Es versteht sich als Mittelwert über alle im gleichen Abstand von einem Kernkraftwerk befindliche Personen einer Bevölkerungsgruppe.

wichteten abstandsabhängigen Individualschäden. Dabei sind wiederum alle Freisetzungskategorien sowie Wetterabläufe und Bevölkerungsverteilungen zu berücksichtigen.

Wegen der unterschiedlichen Fahrzeiten bei der schnellen Umsiedlung in städtischen, durchschnittlich besiedelten und ländlichen Gebieten (Tabelle F8, 6-8) hängt die Größe des Individualrisikos in den Gebieten  $B_1$  und  $B_2$  vom Gebietstyp ab (Abschnitt 6.3.4). Die hier berechneten Individualrisiken stellen einen Mittelwert über die drei genannten Gebietstypen dar. Diese Einschränkung gilt nur für jene Entfernungen, in denen die Gebiete  $B_1$  und  $B_2$  auftreten können. In allen übrigen Entfernungsbereichen (Gebiete A, C,  $D_1$  und  $D_2$ ) besteht keine Abhängigkeit der angenommenen Schutz- und Gegenmaßnahmen von der Bevölkerungsdichte.

Die mittleren Individualrisiken für Spätschäden und Frühschäden berechnen sich als Summe aller Produkte aus Schadenseintrittshäufigkeit  $f_{jkl\mu}$  und über den zugehörigen Kreisring gemittelten abstandsabhängigen Schadenswahrscheinlichkeit  $S_{jkl}(r)$  (Abschnitt 7.5) für jeden Gebietstyp G zu

$$\langle S(r) \rangle^G = \sum_j \sum_k \sum_l f_{jkl\mu} \cdot S_{jkl}^G(r) \quad (8.6)$$

Das mittlere Individualrisiko ergibt sich zu

$$\langle S(r) \rangle = \frac{1}{3} \sum_{G=1}^3 \langle S(r) \rangle^G \quad (8.7)$$

also als Mittelwert über die drei Gebietstypen.

#### ● Beiträge der verschiedenen Krebsarten und Kollektivschäden

In Abschnitt 8.10 werden die Kollektivschäden (Spätschäden) nach den Beiträgen der verschiedenen Krebsarten (KA) und Expositionspfade (EP) für die einzelnen Freisetzungskategorien aufgeschlüsselt. Bei der Berechnung der Beiträge durch Aufsum-

mierung der Einzelfälle werden dabei die Kollektivschäden mit der zugehörigen Eintrittshäufigkeit gewichtet. Es gilt:

$$Q_{KA,EP} = \frac{\sum_{\mu} \sum_l \sum_k \sum_j K_{SS}^{KA,EP} \cdot f_{jkl\mu}}{\sum_{KA} \sum_{EP} \sum_{\mu} \sum_l \sum_k \sum_j K_{SS}^{KA,EP} \cdot f_{jkl\mu}} \quad (8.8)$$

wobei

$Q_{KA,EP} \hat{=}$  Anteil der Krebsart KA und des Expositionspfadepades EP an den Kollektivschäden (Spätschäden)

$K_{SS}^{KA,EP} \hat{=}$  Beitrag der Krebsart KA und des Expositionspfadepades EP zum Kollektivschaden des Einzelerignisses  $K_{SS}^{jkl\mu}$

Insbesondere gilt für jede Freisetzungskategorie l nach Gleichung (8.2):

$$Q_{KA,EP}^l = \frac{\sum_{\mu} \sum_k \sum_j K_{SS}^{KA,EP} \cdot P_{W_j} P_{D_R}}{\sum_{KA} \sum_{EP} \sum_{\mu} \sum_k \sum_j K_{SS}^{KA,EP} \cdot P_{W_j} P_{D_R}} \quad (8.9)$$

Analog werden die genetisch signifikanten Kollektivdosen nach Expositionspfaden aufgeschlüsselt und die Frühschäden (aufgrund der Knochenmarkdosis) nach den Beiträgen der Expositionspfade und Freisetzungskategorien.

## 8.8 Klassenhäufigkeitsdichten und komplementäre Häufigkeitsverteilungen

### 8.8.1 Übersicht

Die Eintrittshäufigkeiten und zugehörigen Kollektivschäden (bzw. Kollektivdosen) werden, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, in Form der Klassenhäufigkeitsdichten dargestellt. In den

Abschnitten 8.8.2 bis 8.8.4 werden die Klassenhäufigkeitsdichten für folgende Schäden und Belastungen angegeben:

- Frühschäden (Todesfälle durch akute Strahlenkrankheit),
- Spätschäden (Todesfälle durch Leukämie und Krebs),
- genetische Belastung (genetisch signifikante Kollektivdosis).

Die komplementären Häufigkeitsverteilungen werden hierfür und außerdem in Abschnitt 8.8.5 noch für die von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen dargestellt, wobei unterschieden wird zwischen

- Gebiet A,
- Gebiet B<sub>1</sub>/B<sub>2</sub> und
- Gebiet C.

Alle Klassenhäufigkeitsdichten beziehen sich auf den Betrieb von 25 Reaktorblöcken.

#### 8.8.2 F r ü h s c h ä d e n

Frühschäden treten erst oberhalb einer Schwellendosis auf. Diese Schwellendosis liegt nach der in WASH-1400 verwendeten Dosis/Wirkungs-Beziehung bei 320 rad, bei der in der vorliegenden Studie verwendeten Dosis/Wirkungs-Beziehung nach Abschnitt 7.3 und Bild F8, 7-4 bei 100 rad.

Summiert über alle Freisetzungskategorien, sind in Bild F8, 8-8(1) die Klassenhäufigkeitsdichten der Frühschäden nach beiden Dosis/Wirkungs-Beziehungen<sup>1)</sup> dargestellt. Die Bilder F8, 8-8(2) bis F8, 8-8(5) zeigen die Verteilungen für die einzelnen Freisetzungskategorien, berechnet nach der dt. DWB. Aus den genannten Kurven läßt sich die Eintrittshäufigkeit von Schadensumfängen der verschiedenen Klassen ablesen.

---

<sup>1)</sup> Im folgenden werden auch die Abkürzungen angewandt (Bild F8, 7-3):  
dt. DWB = deutsche Dosis/Wirkungs-Beziehung (Kurve D)  
am. DWB = amerikanische Dosis/Wirkungs-Beziehung (Kurve B)

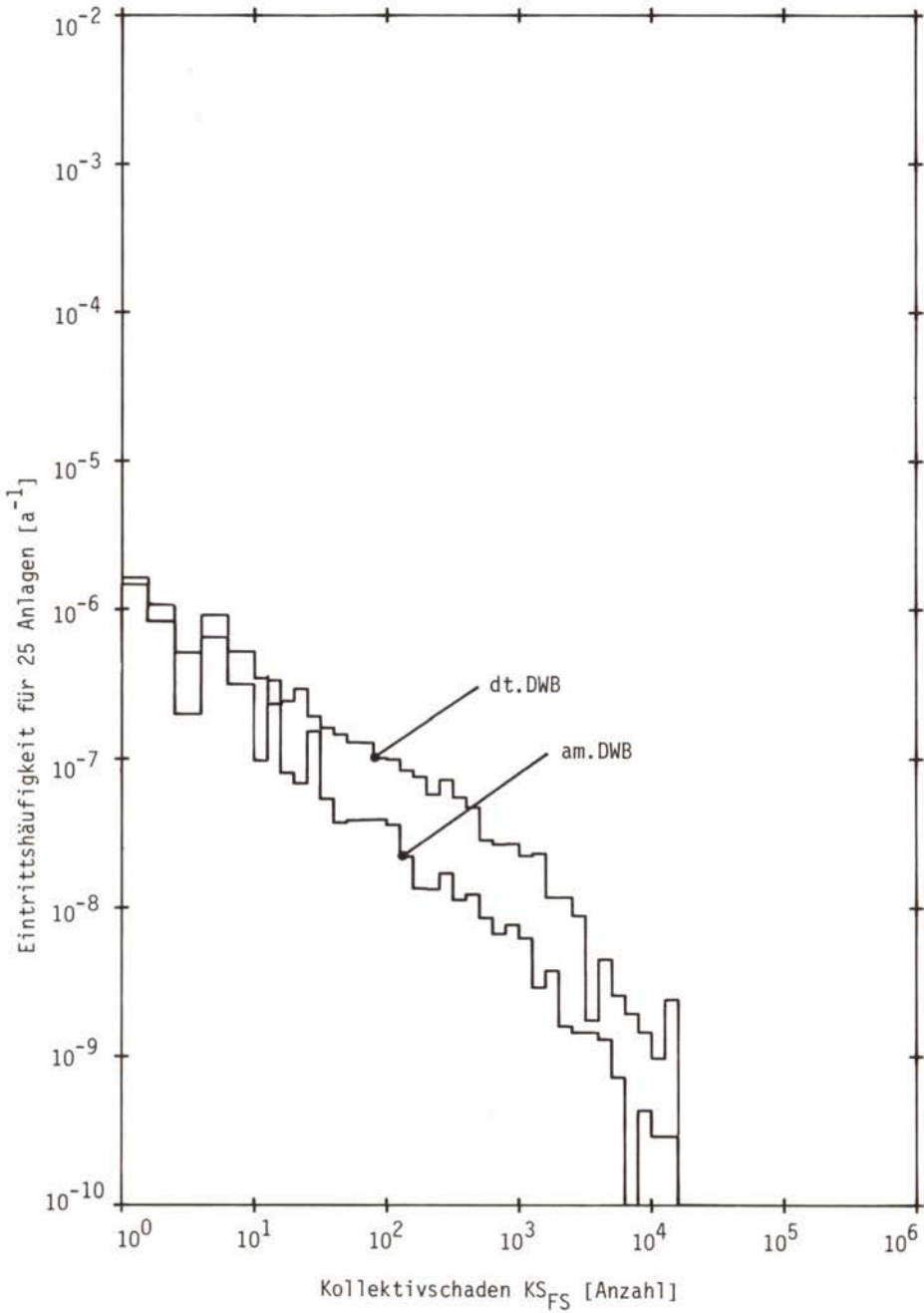


Bild F8, 8-8(1):

Klassenhäufigkeitsdichte der Fröhschäden (alle FK)

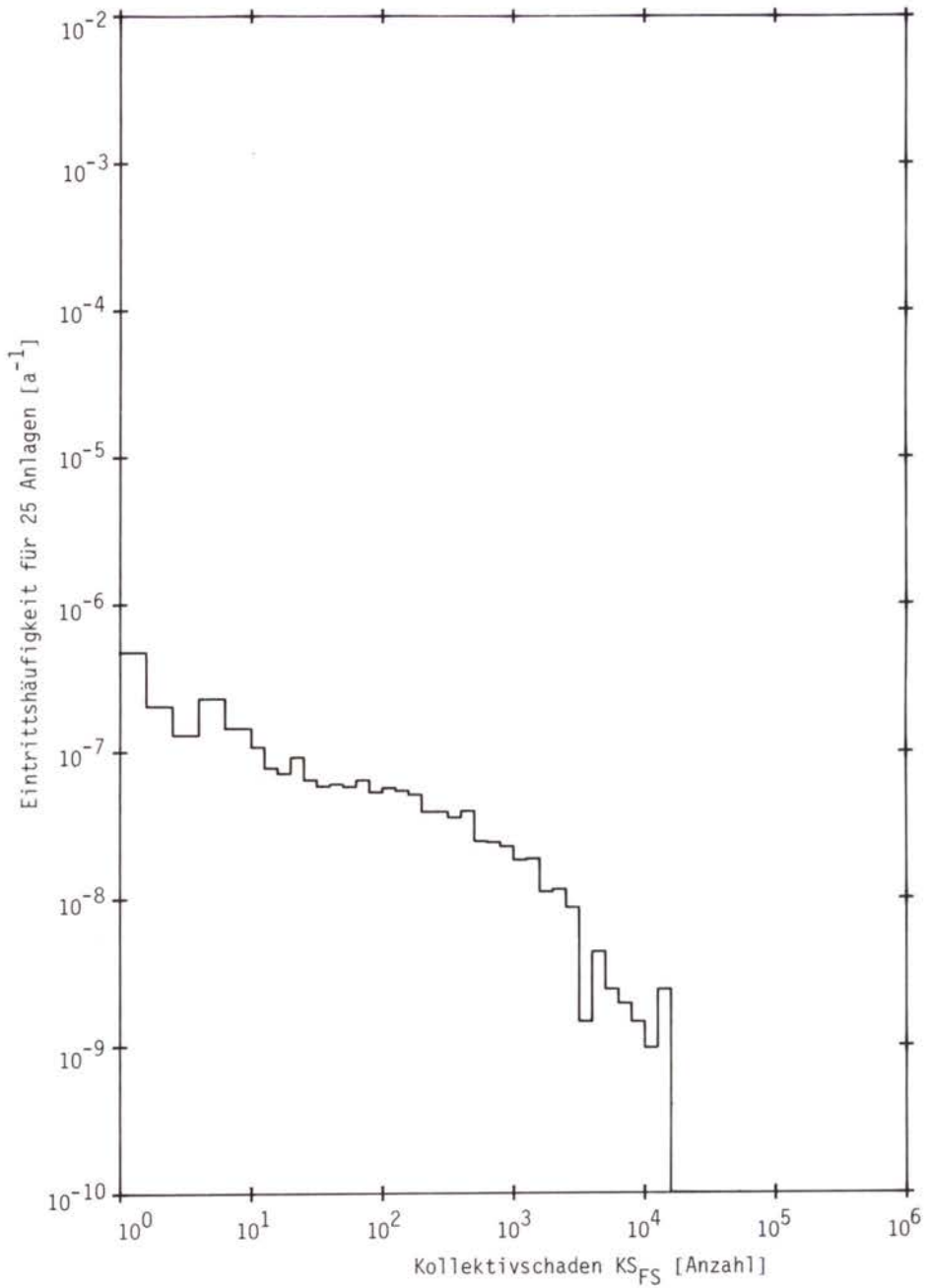


Bild F8, 8-8(2):

Klassenhäufigkeitsdichte der Frühschäden (nur FK1)

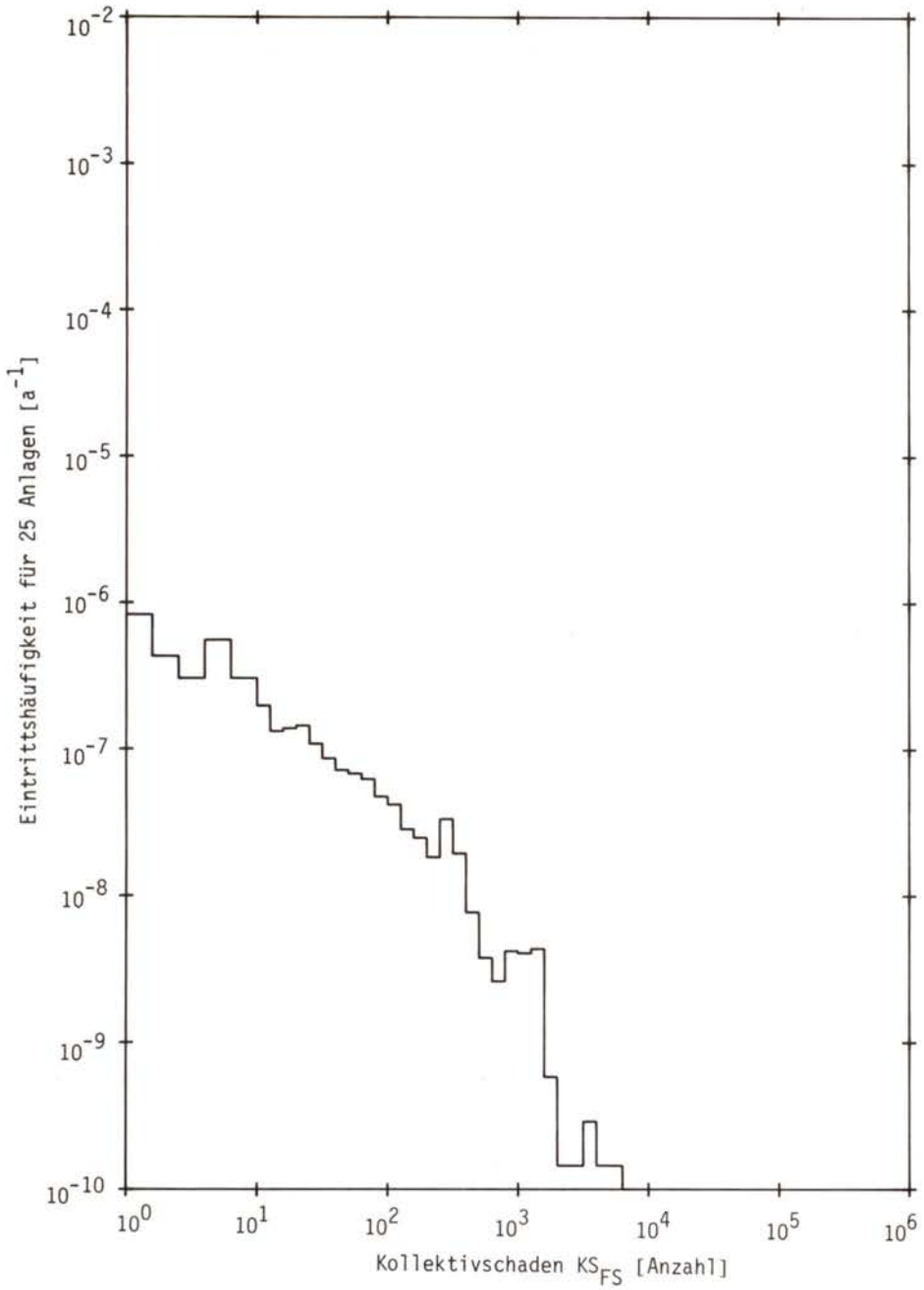


Bild F8, 8-8(3):

Klassenhäufigkeitsdichte der Frühschäden (nur FK2)

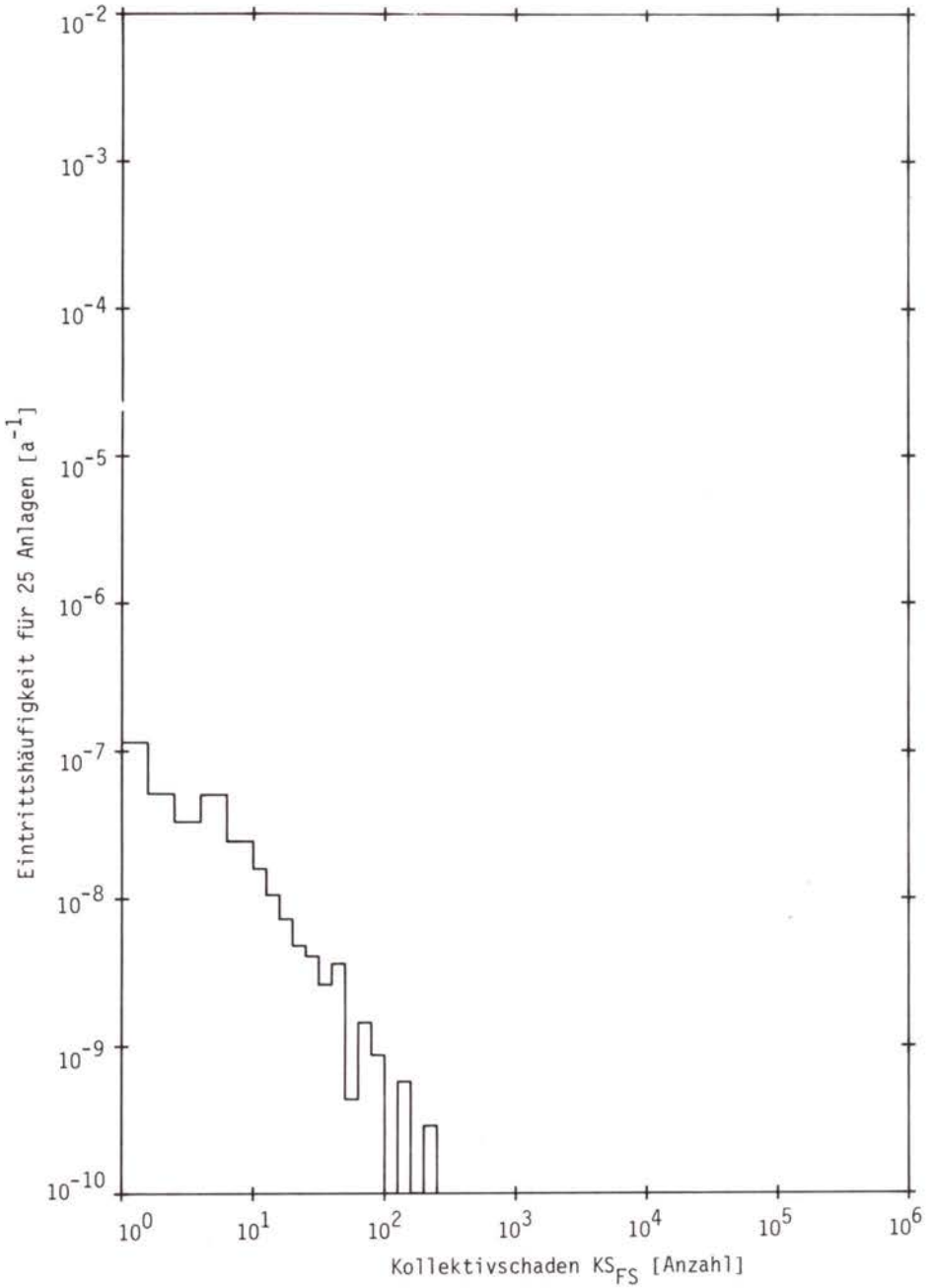


Bild F8, 8-8(4):

Klassenhäufigkeitsdichte der Frühschäden (nur FK3)



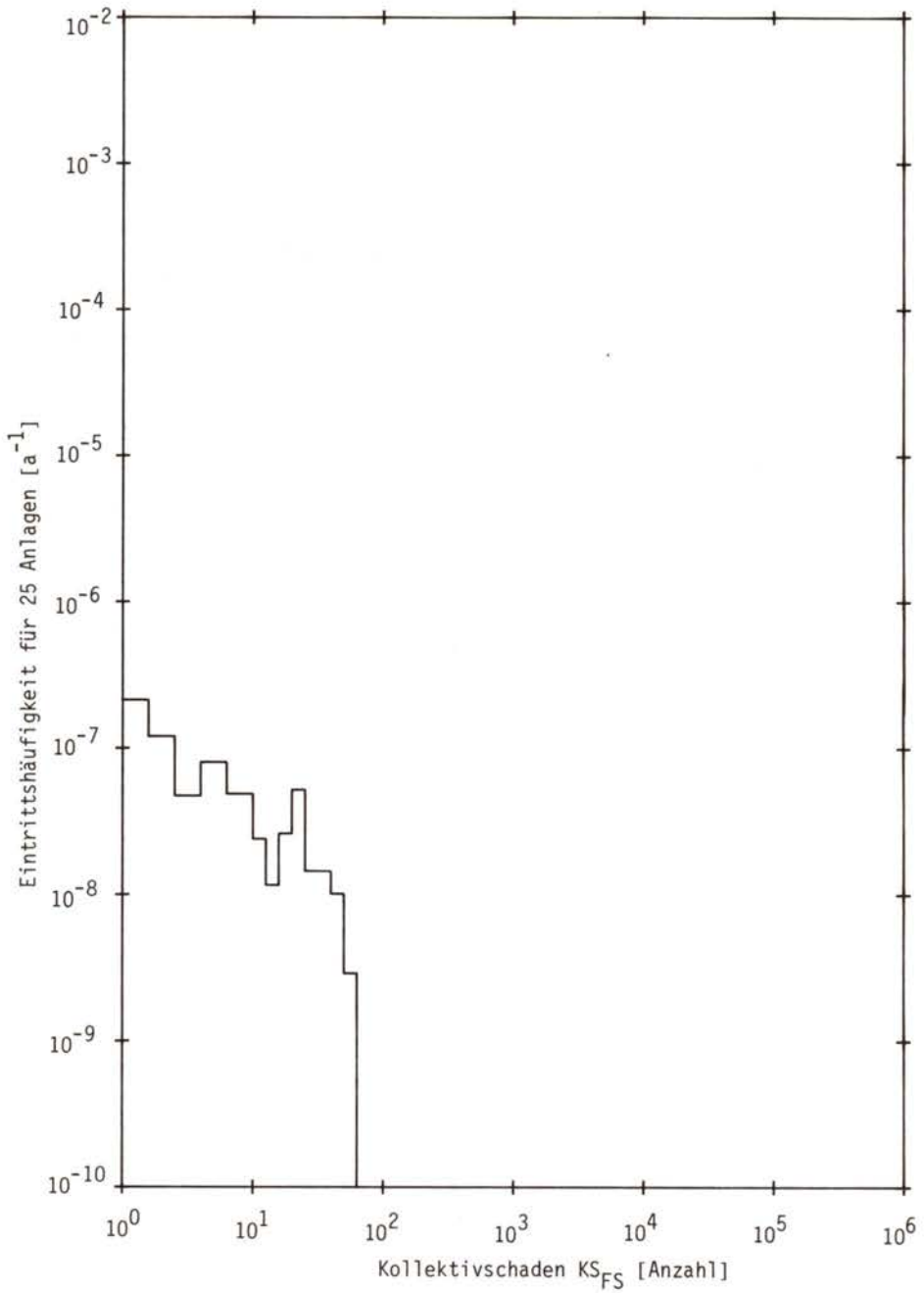


Bild F8, 8-8(5):

Klassenhäufigkeitsdichte der Frühschäden (nur FK4)

Die komplementären Häufigkeitsverteilungen der Kollektivschäden sind in Bild F8, 8-9(1) für die beiden Dosis/Wirkungs-Beziehungen mit und ohne Freisetzungskategorie FK1<sup>1)</sup> sowie in Bild F8, 8-9(2) nach der dt.DWB und für jede Freisetzungskategorie dargestellt. Die charakteristischen Daten der errechneten Frühschäden sind nach den in Abschnitt 8.7 erläuterten Rechenverfahren in der Tabelle F8, 8-3 wiedergegeben.

Aus den Tabellen F8, 8-3 und -4 und den Bildern F8, 8-8(1) bis (5) und 8-9(1) bis (2) geht hervor, daß nur bei den Freisetzungskategorien 1 bis 4 Frühschäden auftreten, wobei die Wahrscheinlichkeit, daß bei einer der genannten Freisetzungen überhaupt Kollektivschäden größer als 1 Person auftreten, schon gering ist. So ist bei der Freisetzungskategorie FK1, mit dem größten Kollektivschaden, nur in 4,7 % der Fälle mit einem  $KS \geq 1$  zu rechnen. Bezogen auf ein Anlagen-Betriebsjahr beträgt die Eintrittshäufigkeit für einen Schaden (Summe der Schadenseintrittshäufigkeiten für  $KS \geq 1$  zu den Freisetzungskategorien FK1 - FK4)  $2,8 \cdot 10^{-7}/a.$  Der Vergleich mit der Eintrittshäufigkeit für einen Kernschmelzunfall (Summe der Eintrittshäufigkeiten zu den Freisetzungskategorien FK1 - FK6) von  $1 \cdot 10^{-4}$  pro Reaktorjahr zeigt, daß in weit weniger als 1 % der Kernschmelzunfälle Frühschäden (akute Todesfälle) auftreten.

Weiterhin läßt sich aus Tabelle F8, 8-3 entnehmen, daß die Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten nach der dt.DWB für  $KS \geq 1$  um Faktoren zwischen 1,5 und 2,6 größer sind als diejenigen nach der am.DWB. Außerdem liegen die Kollektivschäden nach der dt.DWB ebenfalls über den nach der am.DWB ermittelten Werten. So unterscheiden sich z.B. die mittleren Kollektivschäden der FK1 und FK2 um die Faktoren 1,4 bzw. 2,8. Diese Unterschiede

---

<sup>1)</sup> Die Freisetzungskategorie FK1 repräsentiert Kernschmelzunfälle, die unter der Annahme einer Dampfexplosion frühzeitig zu einer erheblichen Freisetzung von Spaltprodukten führen. Solche Unfallabläufe sind jedoch äußerst unwahrscheinlich. Da derartige Unfallabläufe auf dem gegenwärtigen Stand der Untersuchungen noch nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden können, werden die Ergebnisse der Unfallfolgenrechnungen mit und ohne Berücksichtigung der Freisetzungskategorie FK1 ausgewiesen.

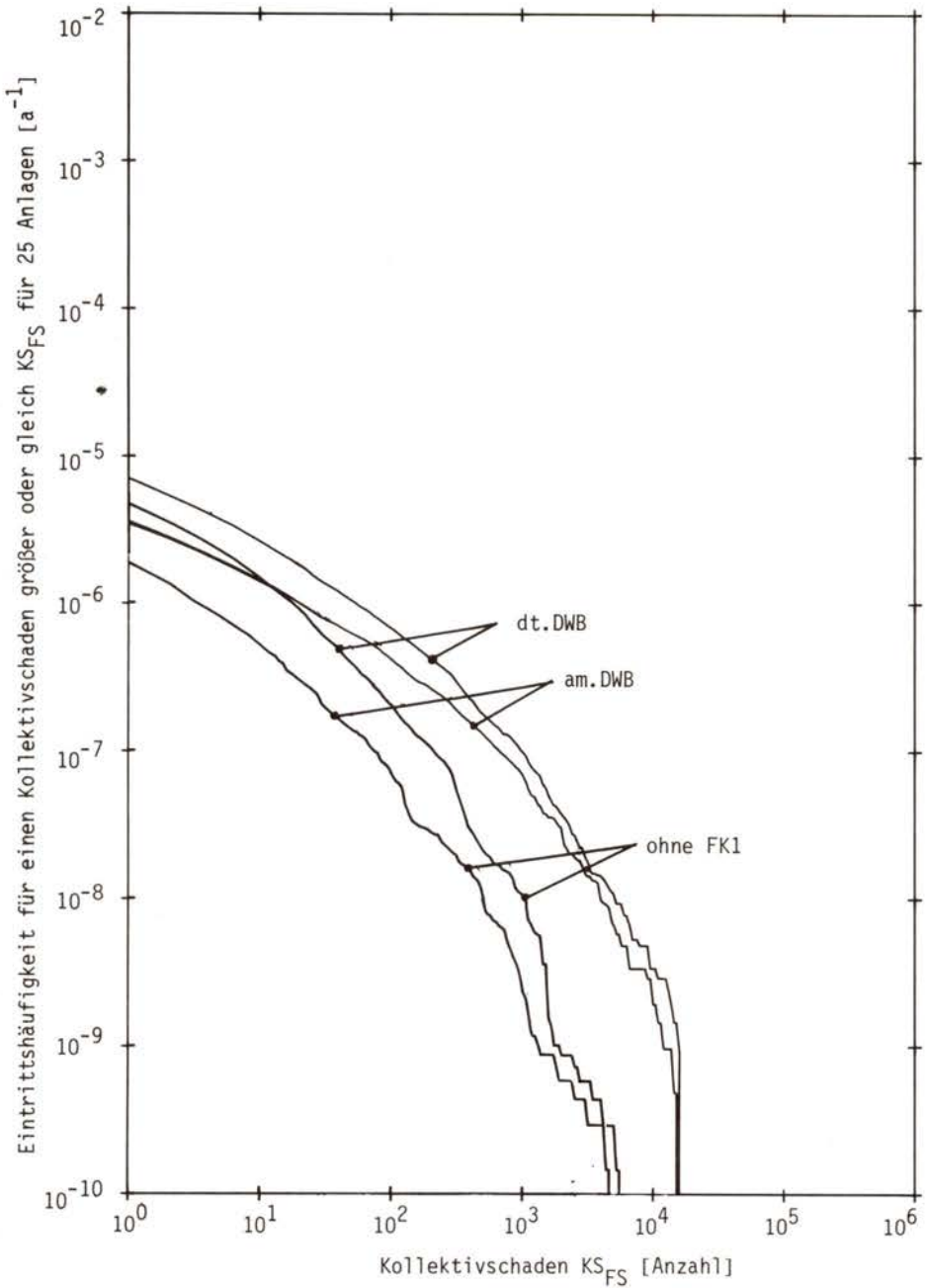


Bild F8, 8-9(1):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der Frühschäden

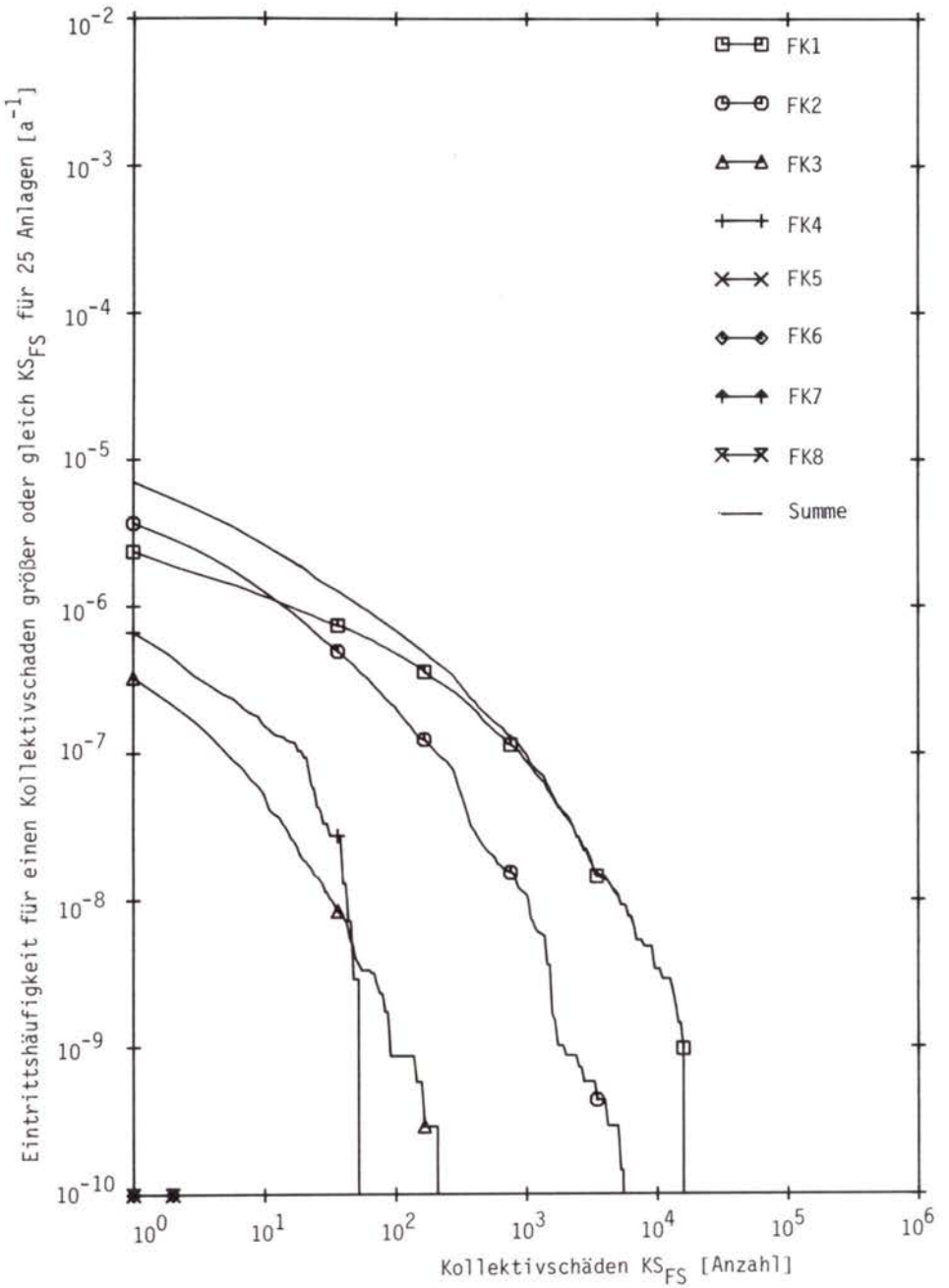


Bild F8, 8-9(2):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der Frühschäden, aufgeschlüsselt nach FK (dt.DWB)

DWB	Freisetzungskategorie	$KS \geq 1$	Kleinsten Kollektivschaden $KS_{\min}$ (a) <sup>1)</sup>	Größter Kollektivschaden <sup>2)</sup> $KS_{\max}$	Mittlerer Kollektivschaden $\overline{KS}$ (b/c) <sup>3)</sup>	Maß der Abweichung $\Delta KS$
dt.	FK1	4,7 %	0 (95,3 %)	16 600	7,9 (97 %/3 %)	180
	FK2	24,5 %	0 (75,5 %)	5 700	7,6 (90 %/10 %)	60
	FK3	1,1 %	0 (98,9 %)	200	0,14 (94 %/6 %)	2
	FK4	0,9 %	0 (99,1 %)	50	0,06 (97 %/3 %)	1
	FK5-FK8		0 (100 %)	0	0	0
am.	FK1	3,1 %	0 (96,9 %)	15 400	5,8 (98 %/2 %)	140
	FK2	9,3 %	0 (90,7 %)	4 600	2,7 (93 %/7 %)	40
	FK3	0,7 %	0 (99,3 %)	150	0,04 (98 %/2 %)	1
	FK4	0,5 %	0 (99,5 %)	30	0,02 (99 %/1 %)	0,5
	FK5-FK8		0 (100 %)	0	0	0

<sup>1)</sup> a-Prozent der Unfallabläufe führen zu einem Kollektivschaden  $KS < 1$ .

<sup>2)</sup> Der größte Kollektivschaden  $KS_{\max}$  resultiert aus einem der  $115 \times 36 \times 19 = 78\ 660$  betrachteten Unfallabläufe der entsprechenden Freisetzungskategorie.

<sup>3)</sup> Bei b-Prozent aller Fälle ist der Kollektivschaden kleiner, bei c-Prozent größer als  $\overline{KS}$ .

Tab. F8, 8-3:

Charakteristische Größen der Frühschäden (25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	Eintrittshäufigkeit pro Betriebsjahr [a <sup>-1</sup> ]	Wahrscheinlichkeit von Schäden bei stattgefundener Freisetzung	Eintrittshäufigkeit eines Schadens pro Betriebsjahr [a <sup>-1</sup> ]	Eintrittshäufigkeit eines Schadens bei 25 Anlagen <sup>1)</sup> [a <sup>-1</sup> ]	Mittlerer Schaden bei stattgefundener Freisetzung [Todesfälle]
FK1	$2 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	7,9
FK2	$6 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	7,6
FK3	$6 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$	0,14
FK4	$3 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$6,8 \cdot 10^{-7}$	0,06
FK5	$2 \cdot 10^{-5}$				
FK6	$7 \cdot 10^{-5}$				
Summe	$1 \cdot 10^{-4}$		$2,8 \cdot 10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	

<sup>1)</sup> Beispiel für FK1 bei 25 Anlagen:  $2 \cdot 10^{-6} \cdot 4,7 \cdot 10^{-2} \cdot 25 \text{ a}^{-1} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$

Tab. F8, 8-4:

Eintrittshäufigkeit einer Freisetzung, bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Schaden, Schadens-  
eintrittshäufigkeit und mittlerer Schaden für akute Todesfälle bei verschiedenen Freisetzungskategorien

resultieren aus den voneinander abweichenden Verläufen der beiden Dosis/Wirkungs-Beziehungen (Bild F8, 7-4):

- Die dt.DWB hat eine niedrigere Schwellendosis (100 rad) als die am.DWB (320 rad) und nimmt unterhalb  $LD_{50}$  höhere Werte und oberhalb  $LD_{50}$  niedrigere Werte an.
- Dosiswerte oberhalb von  $LD_{50}$  treten seltener auf und kompensieren den ersten Effekt nur in geringem Umfang.

Aus den Verteilungsfunktionen und den charakteristischen Größen geht hervor, daß die Frühschäden  $KS_{FS}$  eine große Variationsbreite der möglichen Zahlenwerte über mehrere Zehnerpotenzen aufweisen. Am deutlichsten zeigt sich dies an den Klassenhäufigkeitsdichten, deren Breite den im Vergleich zum mittleren Kollektivschaden  $KS$  hohen Wert der Abweichung  $\Delta K$  erklärt, sowie am hohen Verhältnis von maximalem und mittlerem Kollektivschaden  $KS_{max}/\overline{KS}$ .

Die Tatsache, daß bei den einzelnen Freisetzungen Frühschäden nur mit geringer Wahrscheinlichkeit, und wenn, dann mit hoher Variationsbreite der möglichen Zahlenwerte auftreten, ist folgendermaßen zu erklären:

- Die verschiedenen Wetterabläufe verursachen sehr unterschiedliche räumliche Verteilungen der Radionuklidkonzentration, woraus unterschiedliche Dosen resultieren. Dabei wird selbst bei großen Freisetzungen die Schwellendosis für Frühschäden in den meisten Fällen nicht überschritten.
- Die Bevölkerungsverteilung weist im Nahbereich der verschiedenen Standorte unterschiedliche Dichten auf. Außerdem ist im Nahbereich die Aktivitätsfahne noch relativ schmal im Vergleich zur Ausdehnung bewohnter Gebiete (Dörfer und Städte). Die berechneten Ergebnisse hängen deshalb stark von der Bevölkerungsverteilung und der Windrichtung ab.

Zur Interpretation von Bild F8, 8-9(1) und 8-9(2) werden einige Zahlenwerte exemplarisch wiedergegeben. Bei Zugrundelegung der dt.DWB lassen sich folgende Werte für die Eintrittshäufigkeit von Kollektivschäden größer oder gleich  $KS$  beim Betrieb von 25 Anlagen ablesen (Tabelle F8, 8-5):

Eintrittshäufigkeit pro Jahr	Kollektivschaden $\geq$ KS	
	bei Berücksichtigung der FK1 ("Dampfexplosion") KS	ohne Berücksichtigung der FK1 ("Dampfexplosion") KS
1/ 100 000	< 1	< 1
1/ 1 000 000	60	19
1/ 10 000 000	1 000	210
1/ 100 000 000	5 400	1 100
1/1 000 000 000	16 000	2 000

Tab. F8, 8-5:

Nach Häufigkeiten ausgewählte Punkte der komplementären Häufigkeitsverteilung für Frühschäden (dt.DWB) bei 25 Anlagen

In den Bildern F8, 8-8(1) bis (5) und 8-9(1) bis (2) sind alle ermittelten Ergebnisse bis zum maximalen Kollektivschaden eingezeichnet, der in den Rechnungen über eine Gesamtheit von 629 280 simulierten Unfallabläufen nachgewiesen werden konnte. Dabei tritt der Maximalschaden bei einem Unfallablauf auf, der durch die ungünstigsten Bedingungen für Freisetzung, Wetterbedingungen und Bevölkerungsverteilung gekennzeichnet ist<sup>1)</sup>.

Bei Berücksichtigung der Freisetzungskategorie FK1 (Dampfexplosion) beträgt der Maximalschaden ca. 16 600 Todesfälle (dt.DWB). Der Maximalschaden wird hier von der Freisetzungskategorie FK1 selbst bestimmt, seine rechnerische Eintrittshäufigkeit beträgt  $4,8 \cdot 10^{-10}$ /a. Ohne Berücksichtigung der Freisetzungskategorie FK1 wird der maximale Kollektivschaden von der Freisetzungskategorie FK2 bestimmt, der Maximalschaden beträgt dabei ca. 5 700

<sup>1)</sup> Um zu prüfen, ob jene Wetterabläufe, die die größten Kollektivschäden verursachen, durch die verwendeten 115 hinreichend repräsentiert sind, wurde die Anzahl der betrachteten Wetterabläufe erhöht. Dabei ergab sich kein höheres Maximum. Daraus kann geschlossen werden, daß die ausgewählten 115 Wetterabläufe hinreichend repräsentative Ergebnisse liefern.



Todesfälle (dt.DWB) bei einer rechnerischen Eintrittshäufigkeit von  $1,4 \cdot 10^{-10}/a$ .

Große Fröhschäden treten auf, wenn sich große Freisetzungen an Standorten mit relativ hoher Besiedlungsdichte ereignen, der Wind in den Sektor der höchsten Bevölkerungsdichte weht und im Nahbereich Regen fällt, so daß es dort zu hohen Konzentrationswerten am Boden kommt.

### 8.8.3 Somatische Spätschäden

Somatische Spätschäden (Todesfälle durch Leukämie und Krebs) können bei der zugrunde gelegten, durchgehend linearen dosisleistungsunabhängigen Dosis/Risiko-Beziehung ohne Schwellenwert (Abschnitt 7.4) bei allen Dosiswerten verursacht werden. Sie werden darum überall dort ermittelt, wo es durch den Aktivitätstransport zu einer Strahlenexposition der Bevölkerung kommt; ihr Auftreten ist weitreichender und nicht, wie bei den Fröhschäden, auf den Nahbereich um einen Standort beschränkt (Abschnitt 8.9).

Analog zu den Bildern F8, 8-8(1) bis 8-8(5) sind in den Bildern F8, 8-10(1) bis (8) die Klassenhäufigkeitsdichten der somatischen Spätschäden für die einzelnen und die Summe der Freisetzungskategorien dargestellt. Der charakteristische Verlauf der Einzelkurven für jede Freisetzungskategorie weicht wesentlich von den bei den Fröhschäden ermittelten Zusammenhängen ab. Zwischen einem minimalen und maximalen Schadensumfang steigt die Eintrittshäufigkeit über einen weiten Bereich an.

Dieser Kurvenverlauf erklärt sich aus der Tatsache, daß relativ geringe Aktivitätskonzentrationen in der Luft und am Boden wesentlich häufiger sind als hohe Konzentrationen. Da aber bei geringen Konzentrationen der Umfang der Gegenmaßnahmen am kleinsten ist, resultiert daraus der größte Schadensumfang. Durch Addition der Klassenhäufigkeitsdichten der einzelnen Freisetzungen resultiert die in Bild F8, 8-10(1) gezeigte Summenkurve, deren Feinstruktur durch Überlagerung der Einzelkurven entsteht.

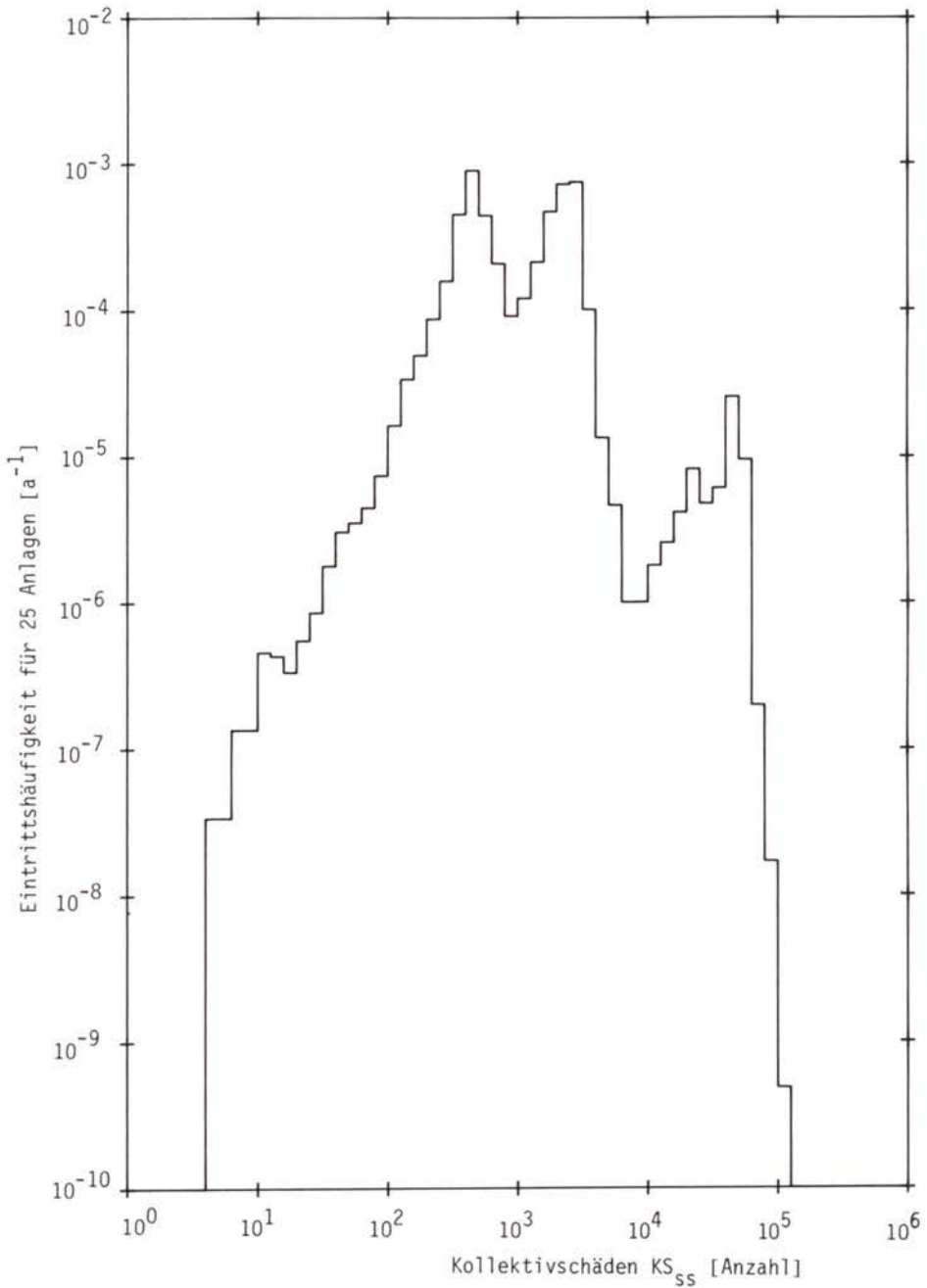


Bild F8, 8-10(1):

Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (alle FK)

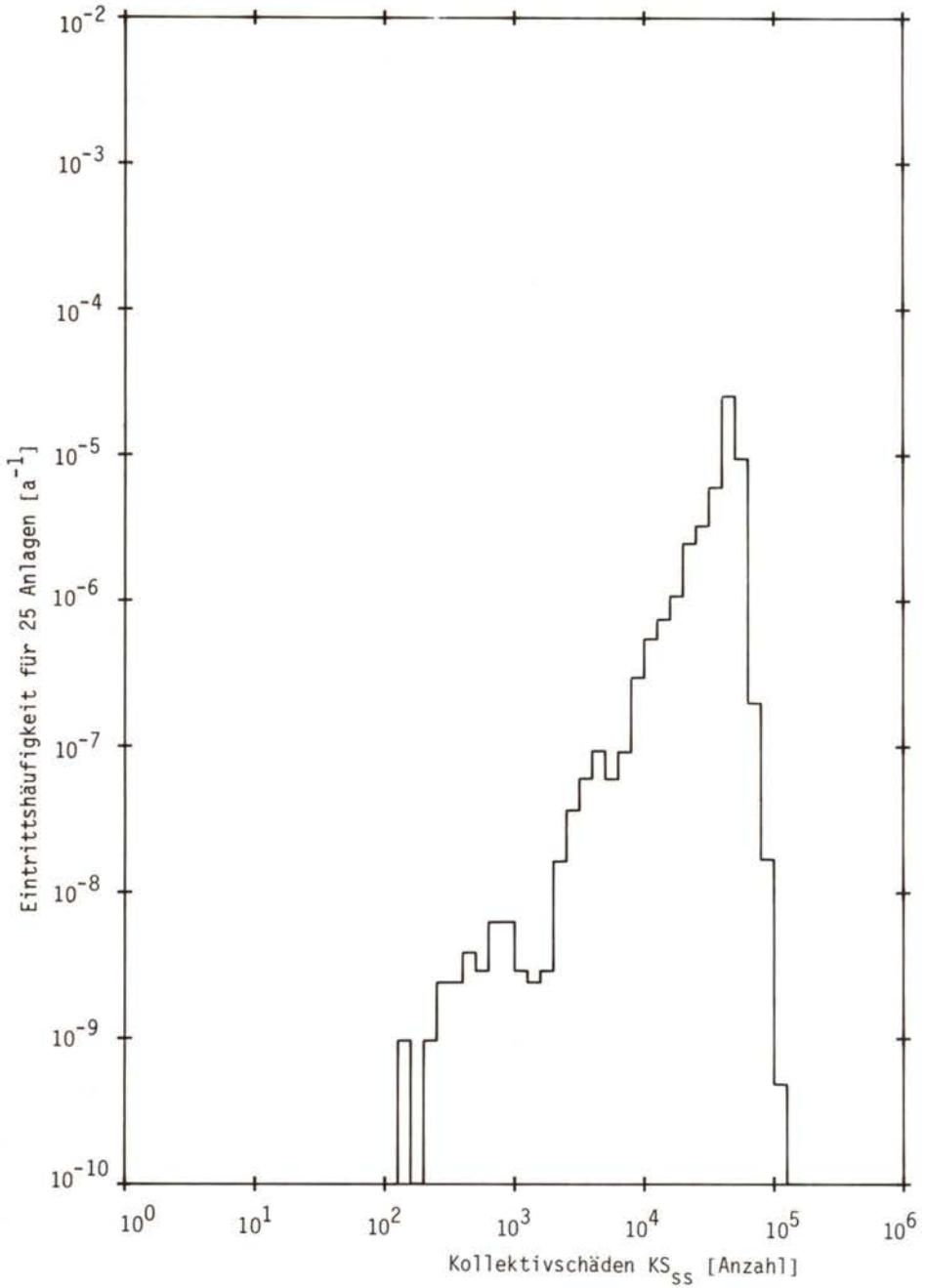


Bild F8, 8-10(2):

Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK1)

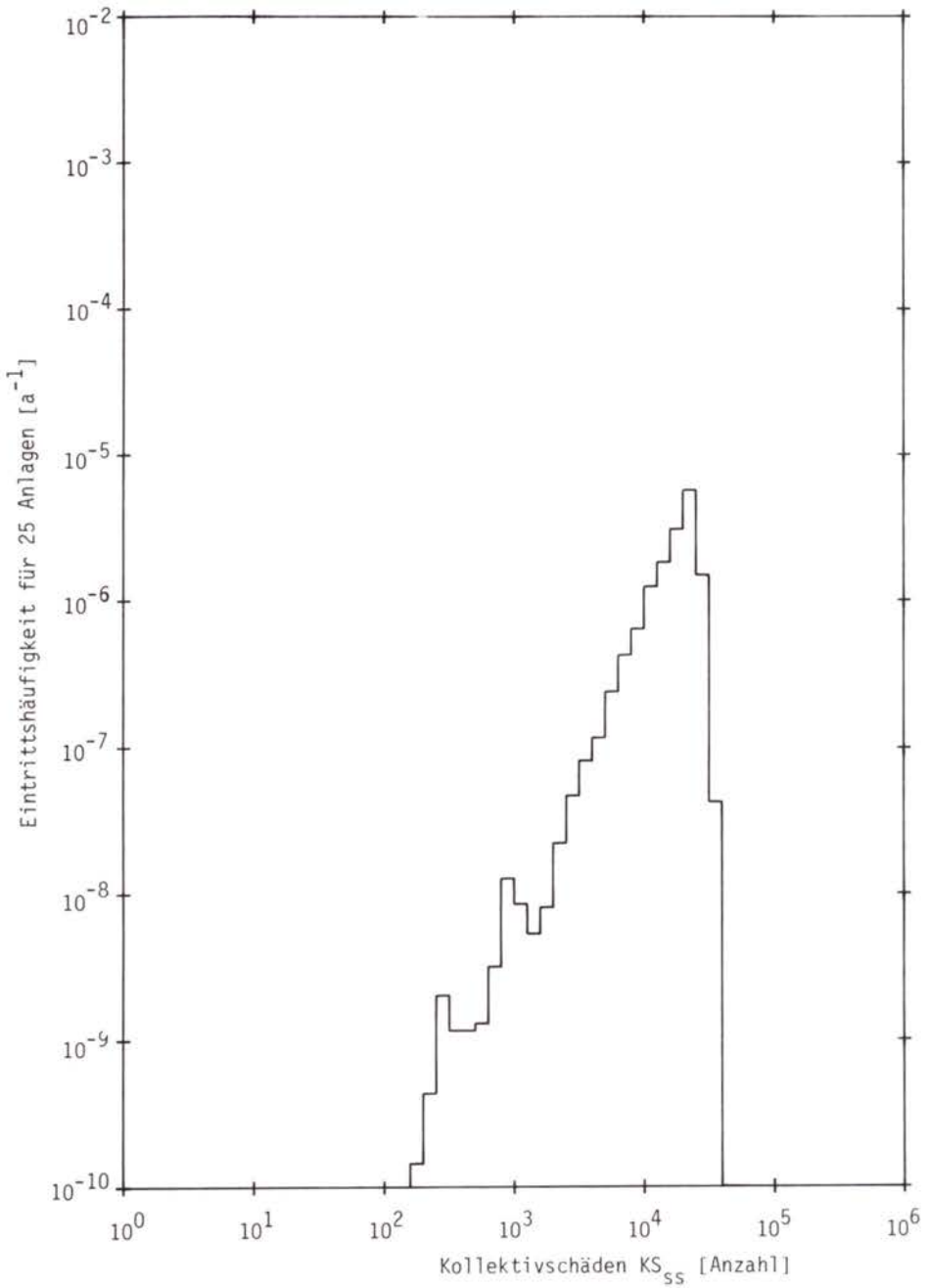


Bild F8, 8-10(3):

Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK2)

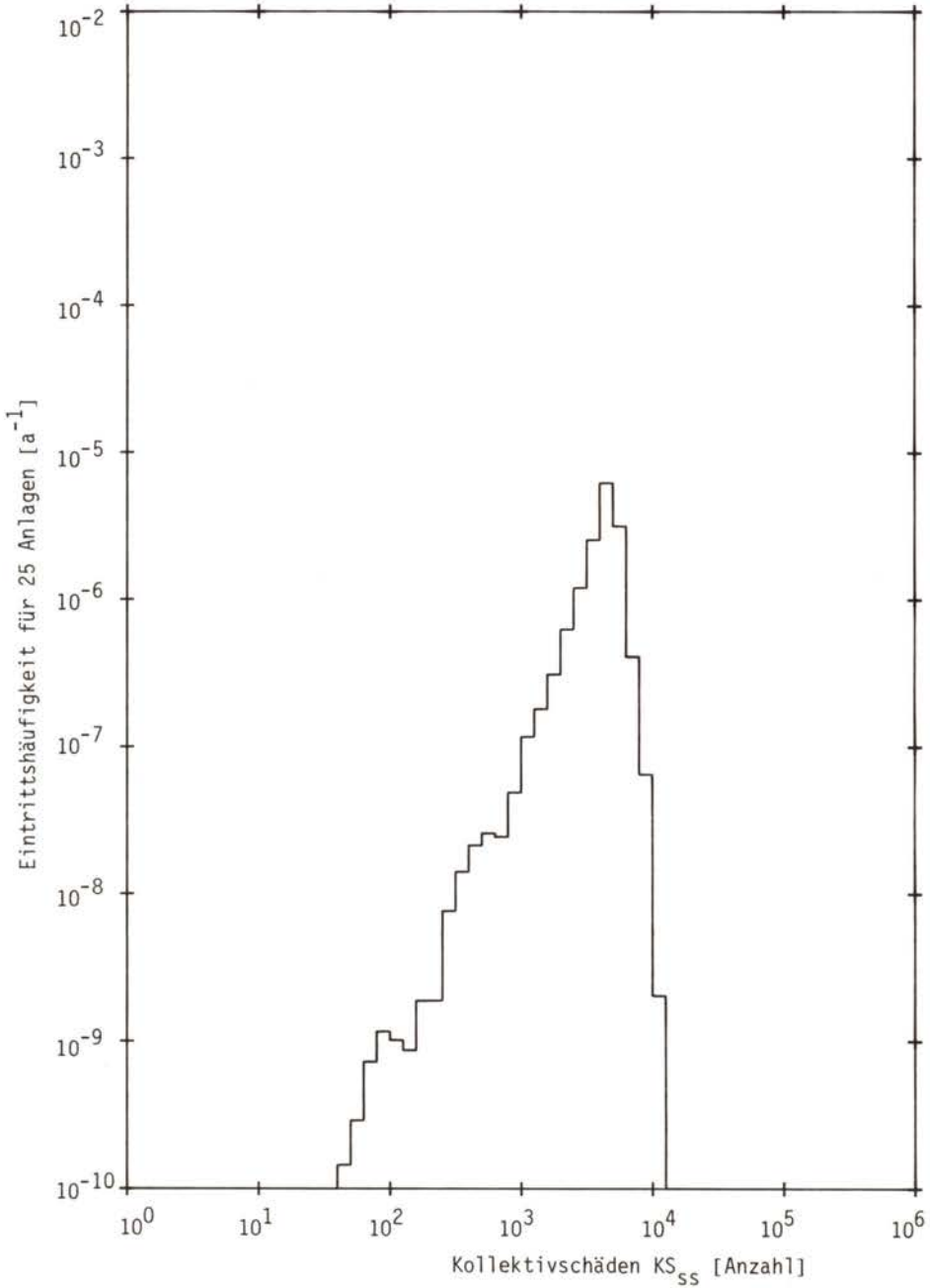


Bild F8, 8-10(4):

Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK3)

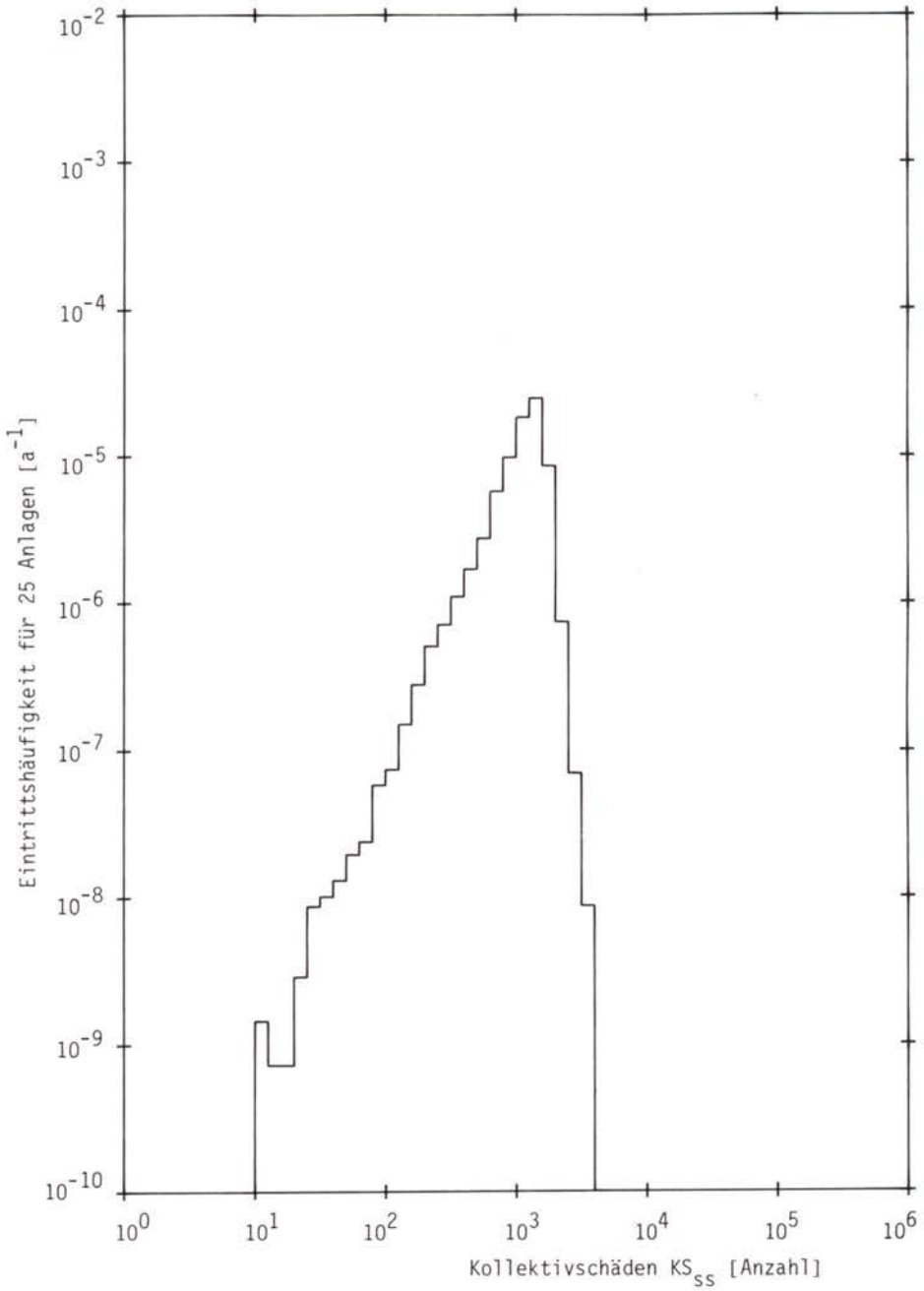


Bild F8, 8-10(5):

Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK4)

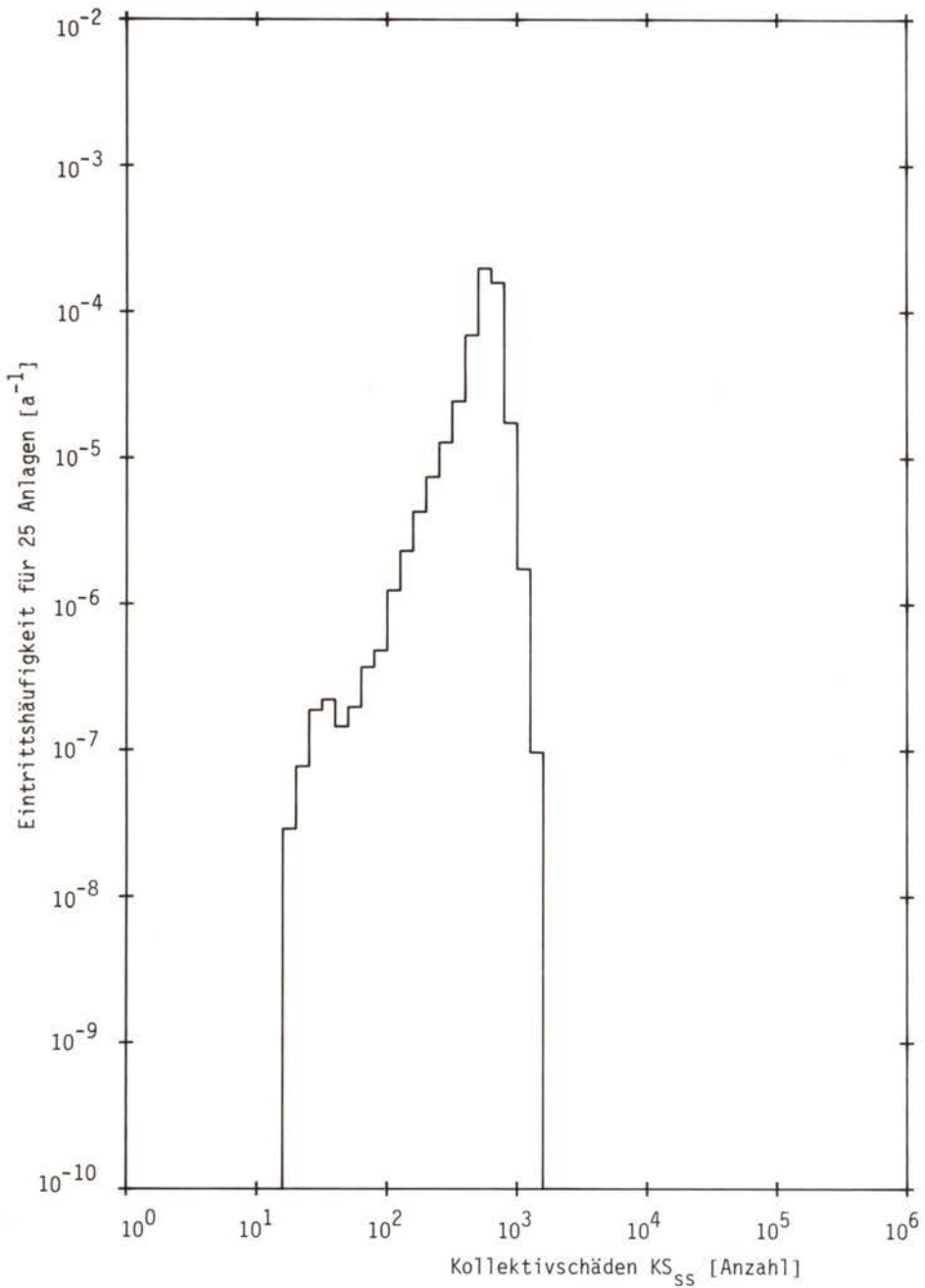


Bild F8, 8-10(6):

Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK5)

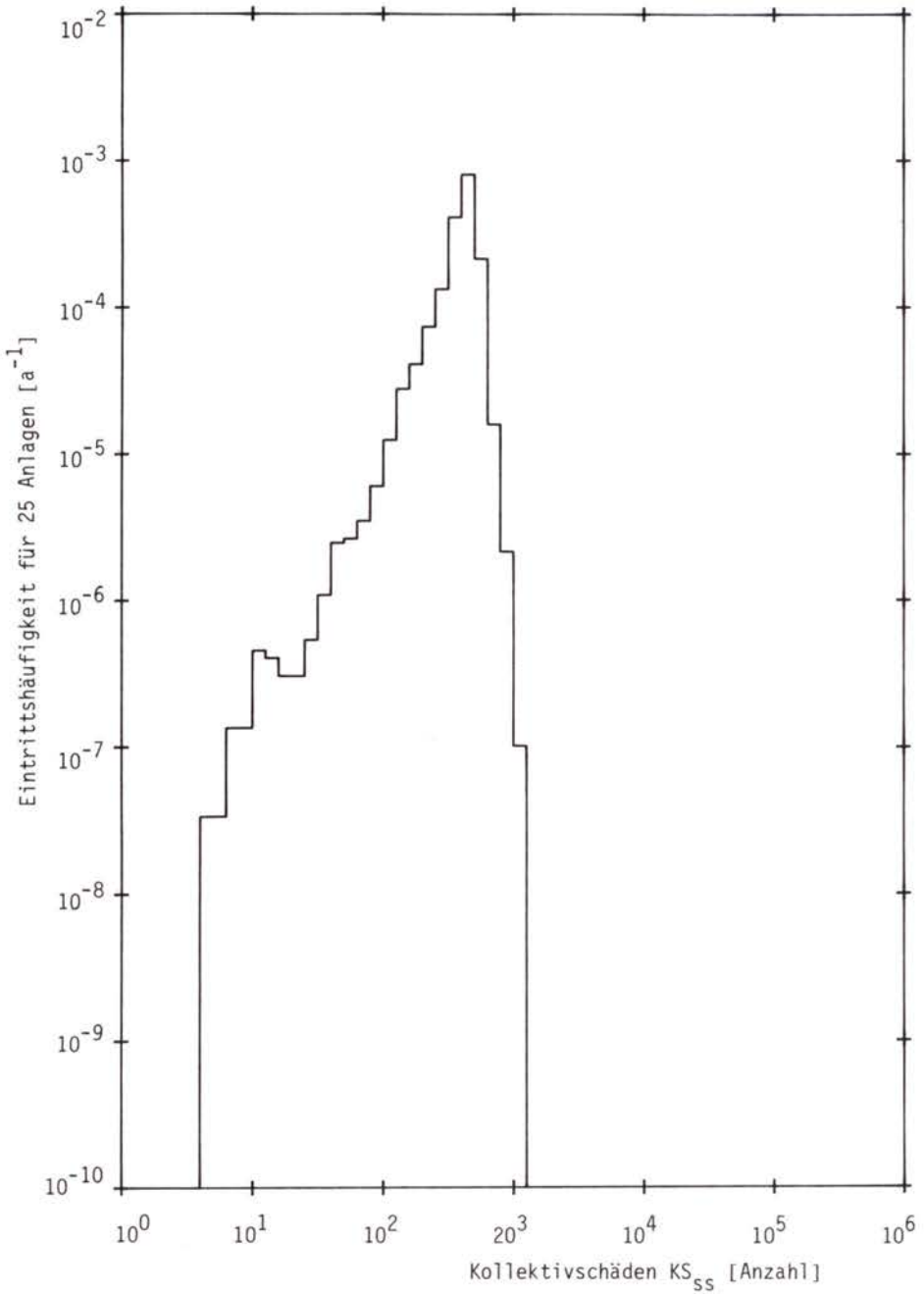


Bild F8, 8-10(7):

Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK6)



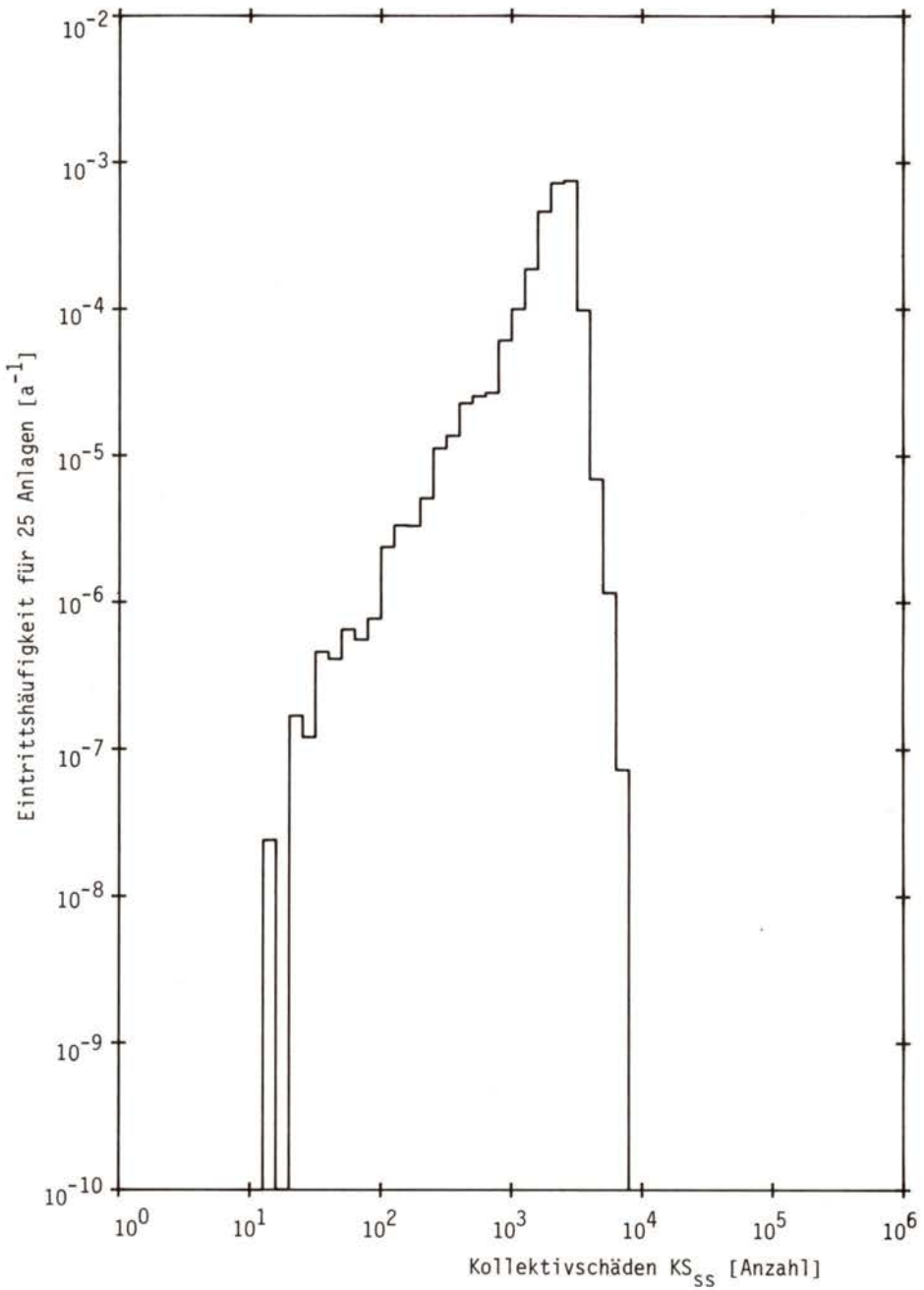


Bild F8, 8-10(8):

Klassenhäufigkeitsdichte der somatischen Spätschäden (nur FK7)

Die komplementären Häufigkeitsverteilungen der Kollektivschäden sind, nach Freisetzungskategorien aufgeschlüsselt, in Bild F8, 8-11(1) bis (2) dargestellt. Die charakteristischen Daten der errechneten Spätschäden enthält Tabelle F8, 8-6. Wie aus den Darstellungen hervorgeht, treten bei allen Freisetzungskategorien mit Ausnahme von FK8 somatische Spätschäden auf. Bei FK8 ist der höchste, rechnerisch ermittelte Kollektivschaden wesentlich kleiner als eins.

Auffällig ist, im Gegensatz zu den Frühschäden, das relativ kleine Verhältnis maximaler Kollektivschaden zu mittlerem Kollektivschaden  $\frac{KS_{\max}}{\overline{KS}}$  und die im Vergleich zum mittleren Kollektivschaden  $\overline{KS}$  sehr viel kleinere Abweichung  $\Delta KS$ . Beide Effekte resultieren aus der geringeren Variationsbreite der möglichen Kollektivschäden, wie sie in den relativ eng begrenzten Klassenhäufigkeitsdichten zum Ausdruck kommt. Dies wird u.a. dadurch verursacht, daß der Umfang der somatischen Spätschäden aus folgenden Gründen im allgemeinen auf einen engen Wertebereich eingeschränkt ist:

- Die zugrunde gelegte Dosis/Risiko-Beziehung für somatische Spätschäden ist linear und ohne Schwellenwert. Dadurch kommt es weniger auf die durch die unterschiedlichen Wetterabläufe hervorgerufenen unterschiedlichen Konzentrationen, sondern mehr auf die insgesamt abgelagerte Aktivität an. Diese ist, von gewissen Schwankungen in der Transportzeit abgesehen, im wesentlichen proportional zur freigesetzten Menge.
- Ein großer Anteil der somatischen Spätschäden wird durch die weiträumig transportierte Aktivität geringer Konzentration verursacht. Im Fernbereich ist die Aktivitätsfahne schon relativ breit und überstreicht weite Gebiete. Schwankungen in der Bevölkerungsdichte verlieren dadurch an Bedeutung.

In Bild F8, 8-11(2) sind die Summenkurven der komplementären Häufigkeitsverteilungen für somatische Spätschäden dargestellt, und zwar mit und ohne Berücksichtigung der Freisetzungskategorie FK1. Zur Interpretation dieses Bildes sollen einige Zahlenwerte exemplarisch wiedergegeben werden. Es lassen sich folgende Werte für die Eintrittshäufigkeit von Kollektivschäden größer oder gleich  $KS$  ablesen (Tabelle F8, 8-7):

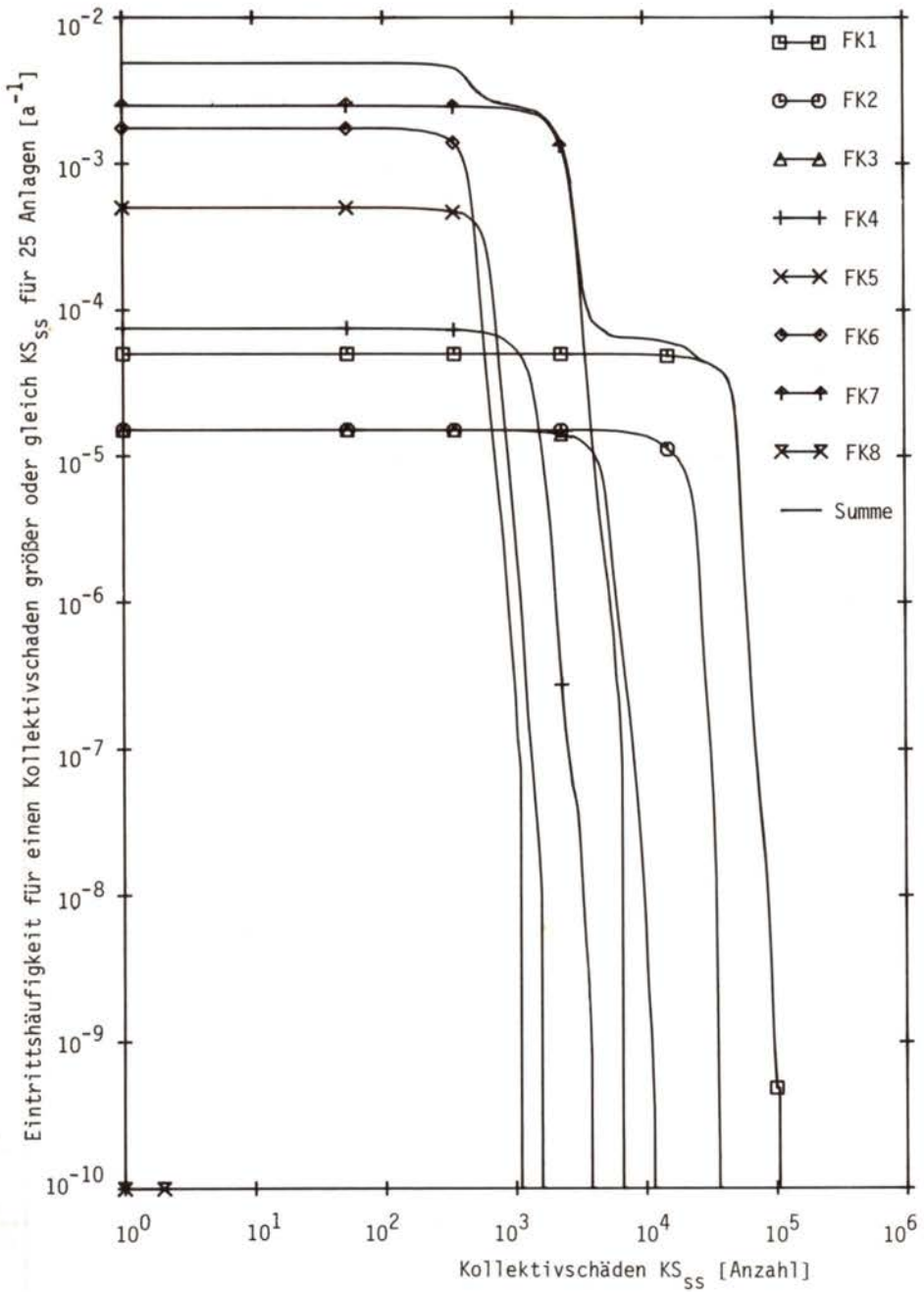


Bild F8, 8-11(1):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der somatischen Spätschäden, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien

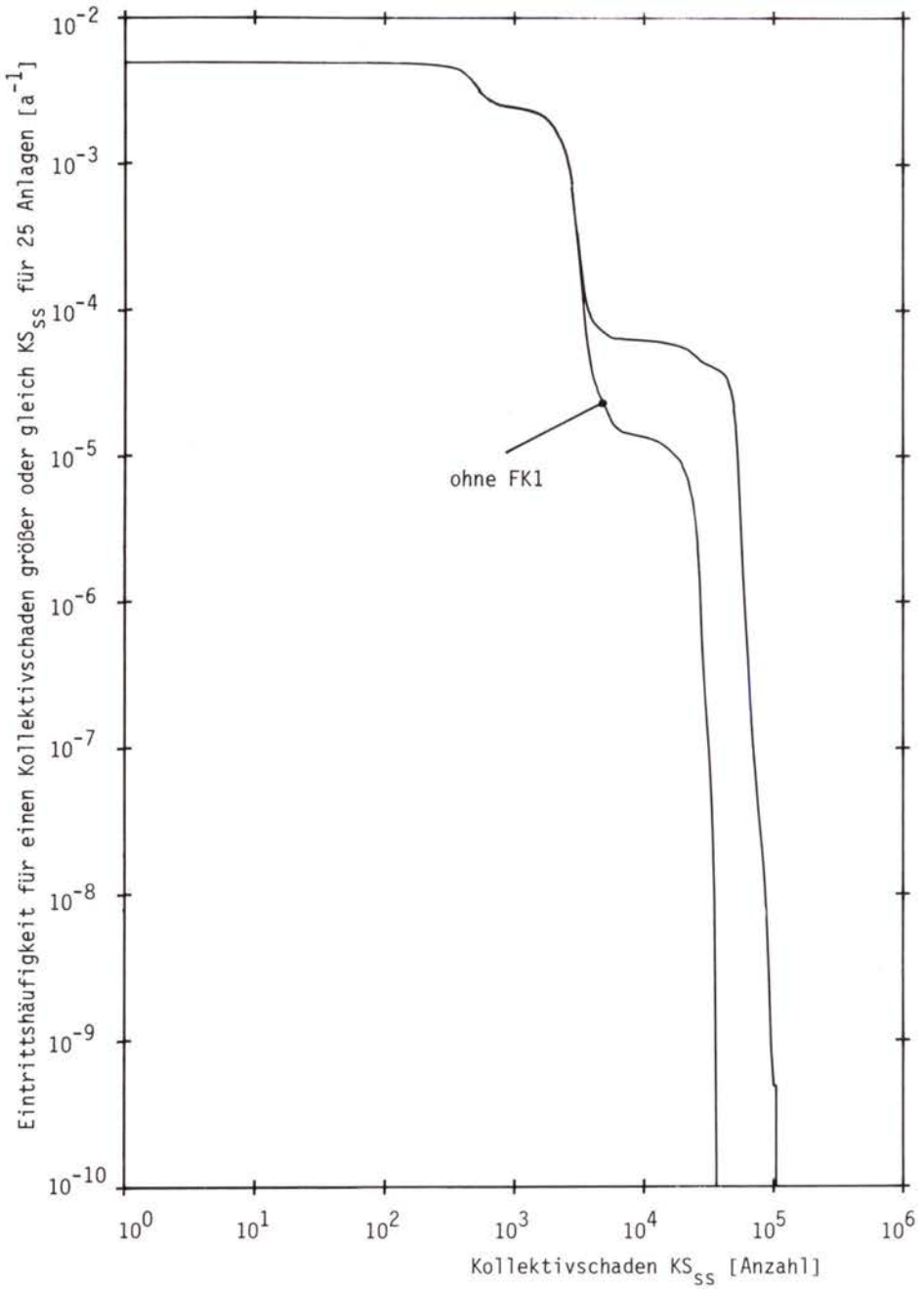


Bild F8, 8-11(2):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der somatischen Spätschäden

Freisetzungskategorie	Kleinsten Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\min}$	Größter Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\max}$	Mittlerer Kollektivschaden $\overline{KS} (b/c)^2)$	Maß der Abweichung $\Delta KS$
FK1	160	107 800	43 100 (36 %/64 %)	11 800
FK2	180	36 600	19 100 (44 %/56 %)	6 400
FK3	50	11 500	4 400 (42 %/58 %)	1 300
FK4	11	4 000	1 200 (45 %/55 %)	400
FK5	18	1 600	600 (43 %/57 %)	200
FK6	8	1 100	400 (42 %/58 %)	100
FK7	15	6 900	2 200 (45 %/55 %)	700
FK8	0	< 1	-	-

<sup>1)</sup> Der größte Kollektivschaden  $KS_{\max}$  resultiert aus einem der  $115 \times 36 \times 19 = 78\ 660$  betrachteten Unfallabläufe der betroffenen Freisetzungskategorie.

<sup>2)</sup> Bei b % der Fälle ist der Kollektivschaden kleiner, bei c % größer als  $\overline{KS}$ .

Tab. F8, 8-6:

Charakteristische Größen der Spätschäden (25 Anlagen)

Eintrittshäufigkeit pro Jahr	Kollektivschaden $\geq$ KS	
	bei Berücksichtigung der FK1 ("Dampfexplosion") KS	ohne Berücksichtigung der FK1 ("Dampfexplosion") KS
1/ 200	1	1
1/ 1 000	2 600	1 600
1/ 10 000	3 900	3 400
1/ 100 000	52 400	17 700
1/ 1 000 000	59 500	26 600
1/ 10 000 000	70 200	31 500
1/ 100 000 000	87 200	35 400
1/1 000 000 000	94 300	35 700

Tab. F8, 8-7:

Nach Häufigkeiten ausgewählte Punkte der komplementären Häufigkeitsverteilung für somatische Spätschäden bei 25 Anlagen

In den Bildern F8, 8-10(1) bis (8) und 8-11(1) bis (2) sind alle Rechenergebnisse bis zum maximalen Kollektivschaden eingezeichnet. Bei Berücksichtigung der Freisetzungskategorie FK1 ("Dampfexplosion") beläuft sich dieser auf ca. 107 800 Todesfälle und ohne Berücksichtigung der Freisetzungskategorie FK1 auf ca. 36 600 Todesfälle. Zwar stimmen die rechnerischen Eintrittshäufigkeiten der maximalen Kollektivschäden ( $4,8 \cdot 10^{-10} \text{a}^{-1}$  bzw.  $1,4 \cdot 10^{-10} \text{a}^{-1}$ ) mit denen der maximalen Frühschäden überein, jedoch ist zu bemerken, daß für die somatischen Spätschäden hohe Schadensausmaße bereits auch mit wesentlich höheren Eintrittshäufigkeiten ausgewiesen werden (Tabelle F8, 8-6).

In der vorliegenden Studie werden immer dann große Spätschäden ermittelt, wenn sich bei großen Freisetzungen aufgrund entsprechender Wetterbedingungen in relativ großen Gebieten Konzentrationswerte einstellen, die so niedrig sind, daß Schutz- und Gegenmaßnahmen bei den zugrunde gelegten Kriterien nicht ausgelöst werden.

Aus Tabelle F8, 8-8 wird deutlich, daß nur bei den Freisetzungskategorien FK1 bis FK3 die Spätschäden infolge Ganzkörperbestrahlung in größerem Ausmaß Personen betreffen, die Strahlendosen über 5 rem erhalten haben. Bei allen anderen Freisetzungskategorien, insbesondere bei FK7, die den größten Beitrag zum berechneten Risiko in der Schadensart somatische Spätschäden liefert (Tabelle F8, 8-12), resultieren etwa 90 % der errechneten Todesfälle aus einer unfallbedingten Strahlenbelastung, die kleiner ist als die im Laufe des Lebens durch die natürliche Strahlenexposition bewirkte Strahlendosis.

Freisetzungskategorie	Anteil der Todesfälle durch Ganzkörperdosen, %	
	über 5 rem	unter 5 rem
FK1	84	16
FK2	75	25
FK3	31	69
FK4	7	93
FK5	3	97
FK6	1	99
FK7	10	90

Tab. F8, 8-8:

Anteil der Todesfälle durch Krebs und Leukämie, die durch unfallbedingte Ganzkörper-Strahlendosen über bzw. unter 5 rem hervorgerufen werden

Akute Todesfälle und somatische Spätschäden gleicher Häufigkeit dürfen nicht addiert werden, da jene Kollektivschäden, die bei den Verteilungen zur gleichen Häufigkeit beitragen, im allgemeinen zu verschiedenen Unfallabläufen gehören. Dies gilt im besonderen für große Kollektivschäden. In jenen Fällen, in denen die Anzahl der Frühschäden große Werte annimmt, ist die Anzahl der Spätschäden verhältnismäßig klein und umgekehrt.

- Vergleich mit Todesfällen durch Leukämie und Krebs aufgrund natürlicher und zivilisatorischer Ursachen

Leukämie und Krebs treten auch ohne Strahleneinwirkung auf, so daß ein Vergleich mit der normalen Häufigkeit von Todesfällen durch Leukämie und Krebs aufgrund natürlicher und zivilisatorischer Ursachen möglich ist. Wie eingangs festgestellt, wird der Schadensumfang bei den in der Studie untersuchten Kernkraftwerksunfällen vorwiegend durch die kleinen Dosen bestimmt, die eine größere Bevölkerungsgruppe erhält. Insofern kann auch ein Vergleich mit den Todesfällen durch Leukämie und Krebs gezogen werden, die aufgrund der natürlichen Strahlenexposition unter Anwendung der gleichen Dosis/Risiko-Beziehung ermittelt werden.

In Bild F8, 8-11(3) ist neben der Häufigkeitsverteilung für Spätschäden (siehe auch Bild F8, 8-11(2)) zu Vergleichszwecken die Häufigkeitsverteilung der natürlichen und zivilisatorischen Todesfälle durch Leukämie und Krebs eingezeichnet.

Aufgrund des weitreichenden Aktivitätstransports tritt im Durchschnitt etwa die Hälfte der in der Studie berechneten Spätschäden außerhalb der Grenzen der Bundesrepublik Deutschland auf. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, diesen Vergleichen die Bevölkerung Europas zugrunde zu legen.

Der Anteil von Leukämie und Krebs an allen natürlichen und zivilisatorisch bedingten Todesursachen beträgt etwa 20 % /F8, 8-1/. Für die den Unfallüberlegungen zugrunde liegende derzeitige Bevölkerung Europas (670 Millionen Einwohner) ergibt sich bei einer mittleren Lebenserwartung von 71 Jahren /F8, 8-2/ folglich die Zahl von  $1,89 \cdot 10^6$  Todesfällen aufgrund von Leukämie oder Krebs mit einer Eintrittshäufigkeit von 1/a.

Die Zahl der Todesfälle mit Leukämie und Krebs als Ursache, bedingt durch die natürliche Strahlenexposition von 0,1 rem/a, errechnet sich bei 670 Millionen Einwohnern zu 8 400 pro Jahr, wobei der Risikoeffizient von  $1,25 \cdot 10^{-4}$ /rem bei Ganzkörper-



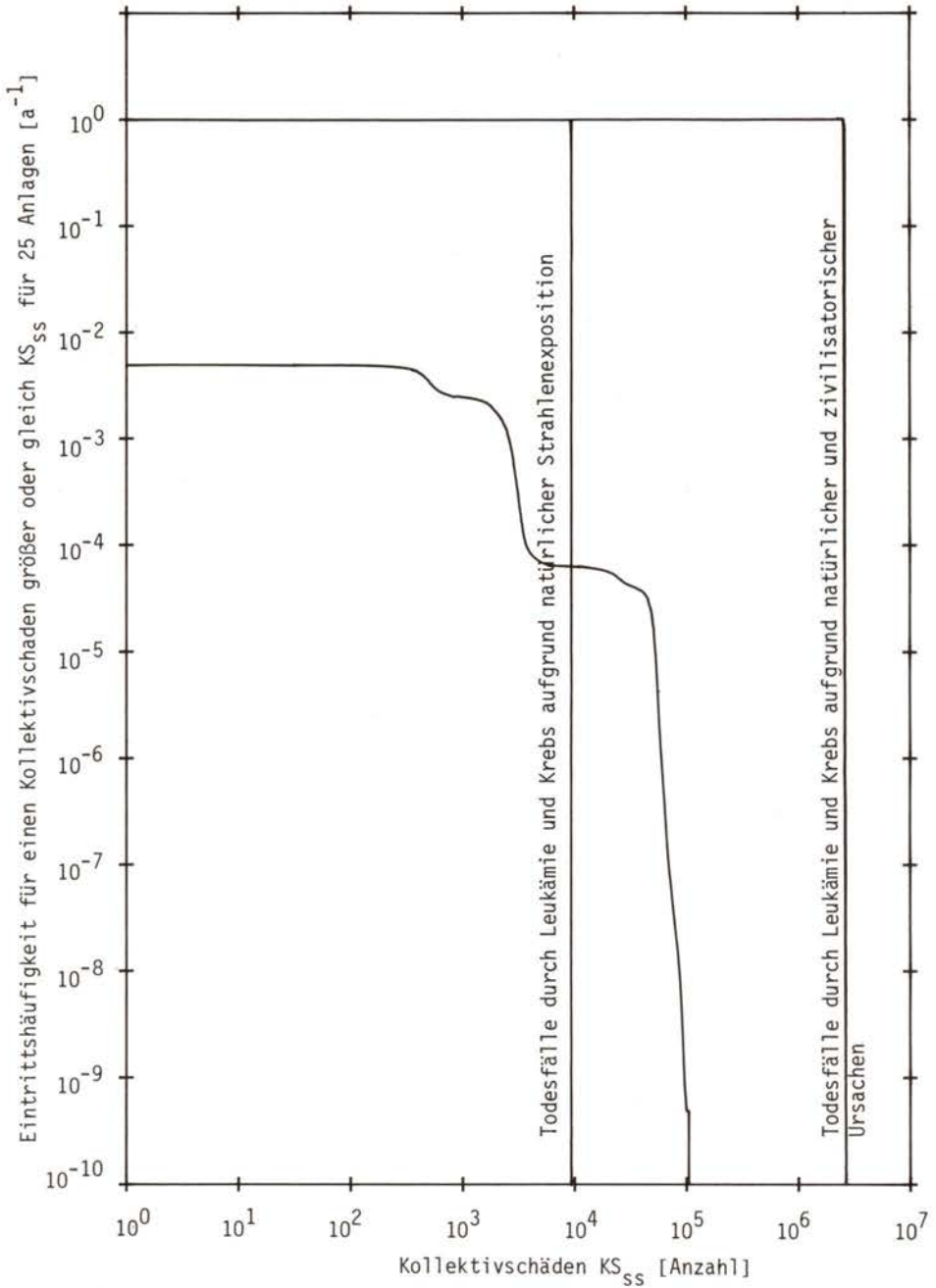


Bild F8, 8-11(3):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der somatischen Spätschäden sowie der Krebsfälle aufgrund natürlicher und zivilisatorischer Ursachen

belastung (Abschnitt 7.6) verwendet wurde. Dieser Zahlenwert ist zu Vergleichszwecken ebenfalls in Bild F8, 8-11(3) eingezeichnet<sup>1)</sup>.

In Abschnitt 8.9.2 wird ein Vergleich des Risikos für Tod durch Leukämie oder Krebs aufgrund natürlicher und zivilisatorischer Ursachen mit dem Risiko für Tod durch Kernkraftwerksunfälle bei 25 Anlagen gezogen.

Einschränkend sei bemerkt, daß diesem Vergleich 25 Kernkraftwerksblöcke mit Standorten in der Bundesrepublik Deutschland zugrunde gelegt wurden. Vervollständigt werden kann das Bild erst dann, wenn entsprechende Untersuchungen auch für die in den übrigen Ländern Europas betriebenen Kernkraftwerke vorliegen.

#### 8.8.4 Genetische Belastung

Die Klassenhäufigkeitsdichten der genetisch signifikanten Kollektivdosis sind in Bild F8, 8-12(1) bis (8) für die einzelnen Freisetzungskategorien und die Summe der Freisetzungskategorien dargestellt. Sie zeigen ein den somatischen Spätschäden analoges Bild. Die komplementären Häufigkeitsverteilungen, aufgeschlüsselt nach den Freisetzungskategorien, zeigt Bild F8, 8-13(1); in Bild F8, 8-13(2) ist die Summenkurve mit und ohne den Beitrag der Freisetzungskategorie FK1 angegeben. Die charakteristischen Größen der errechneten genetisch signifikanten Kollektivdosen sind in Tabelle F8, 8-9 aufgelistet.

Die Interpretation der komplementären Häufigkeitsverteilungen folgt derjenigen der entsprechenden Abbildungen für die Spätschäden. Es sind alle Rechenergebnisse bis zur errechneten maximalen genetisch signifikanten Kollektivdosis eingezeichnet.

---

<sup>1)</sup> Betrachtet man nur die Verhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland, so sind die oben angegebenen Zahlen für Todesfälle durch Leukämie oder Krebs aufgrund natürlicher oder zivilisatorischer Ursachen bzw. aufgrund der natürlichen Strahlenexposition durch 11 zu teilen.

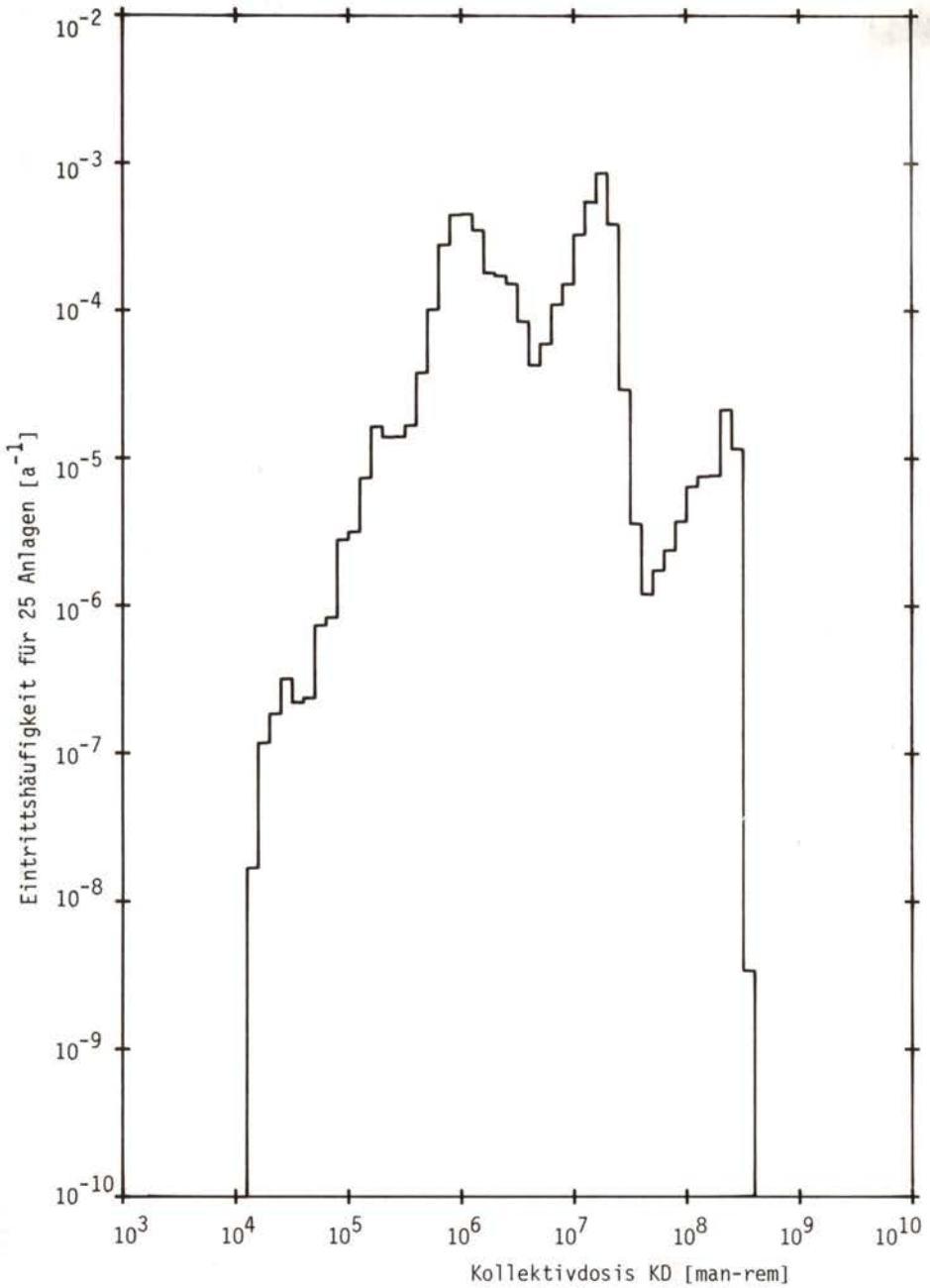


Bild F8, 8-12(1):

Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (alle FK)

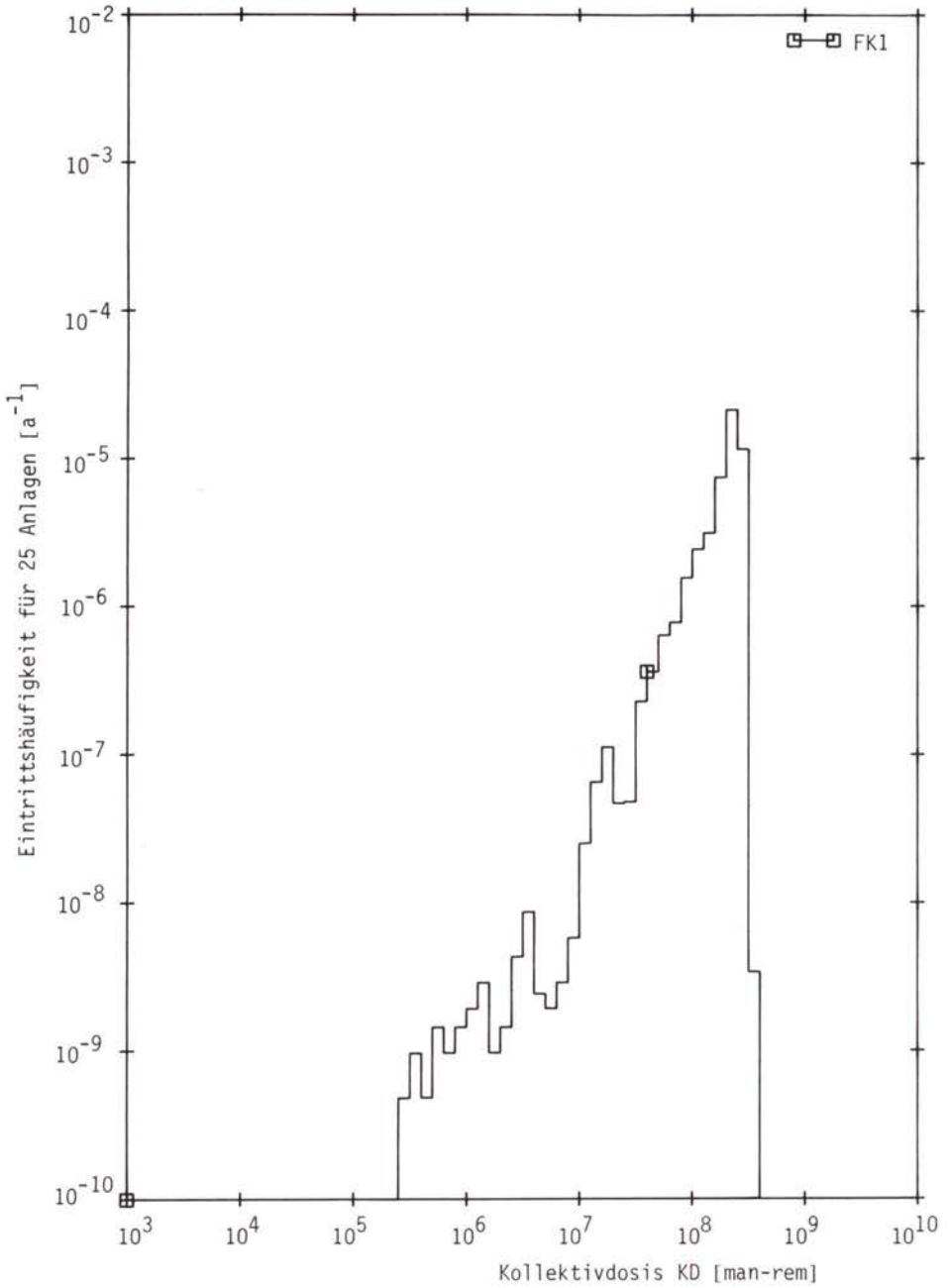


Bild F8, 8-12(2):

Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK1)

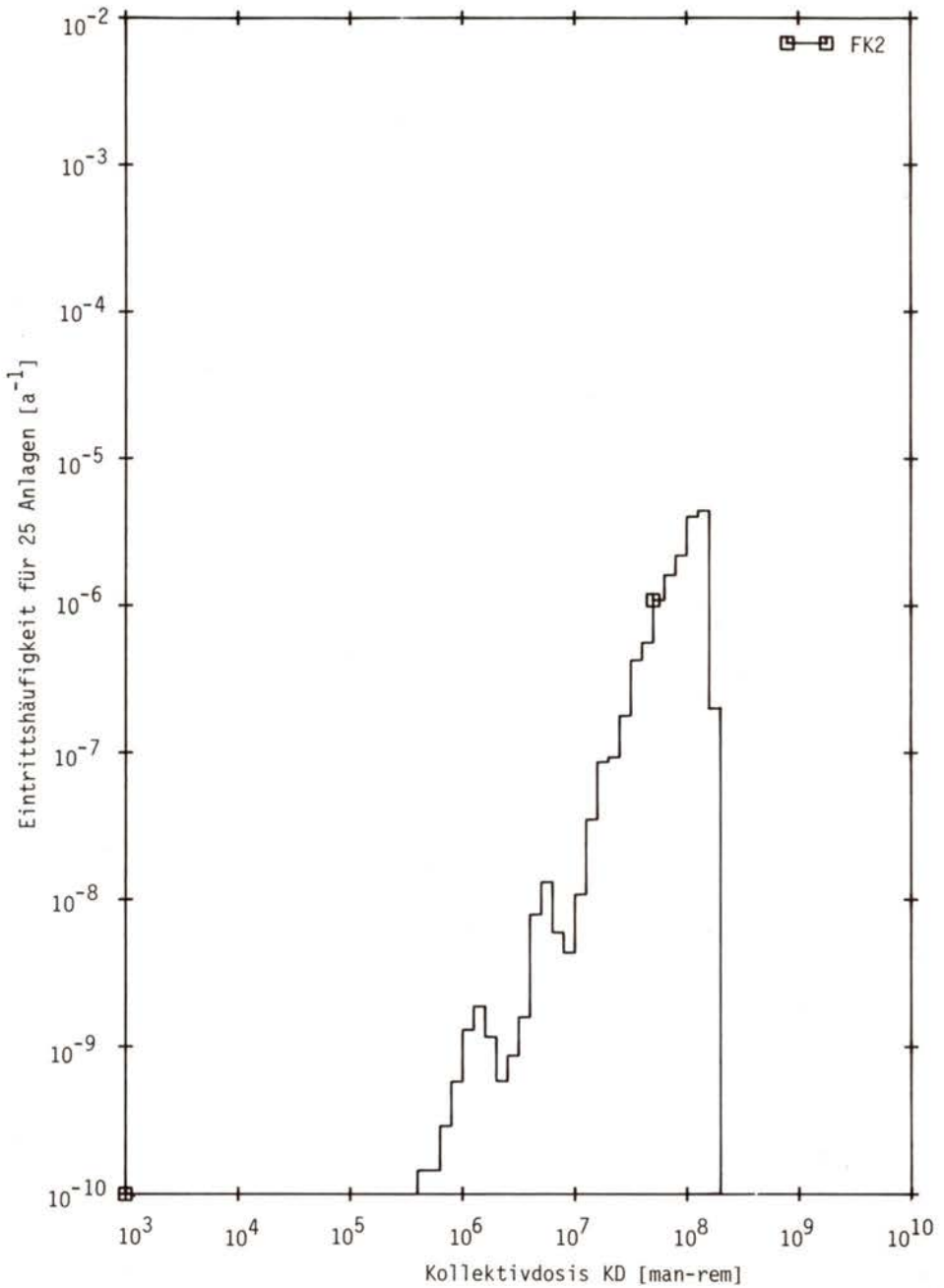


Bild F8, 8-12(3):

Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK2)

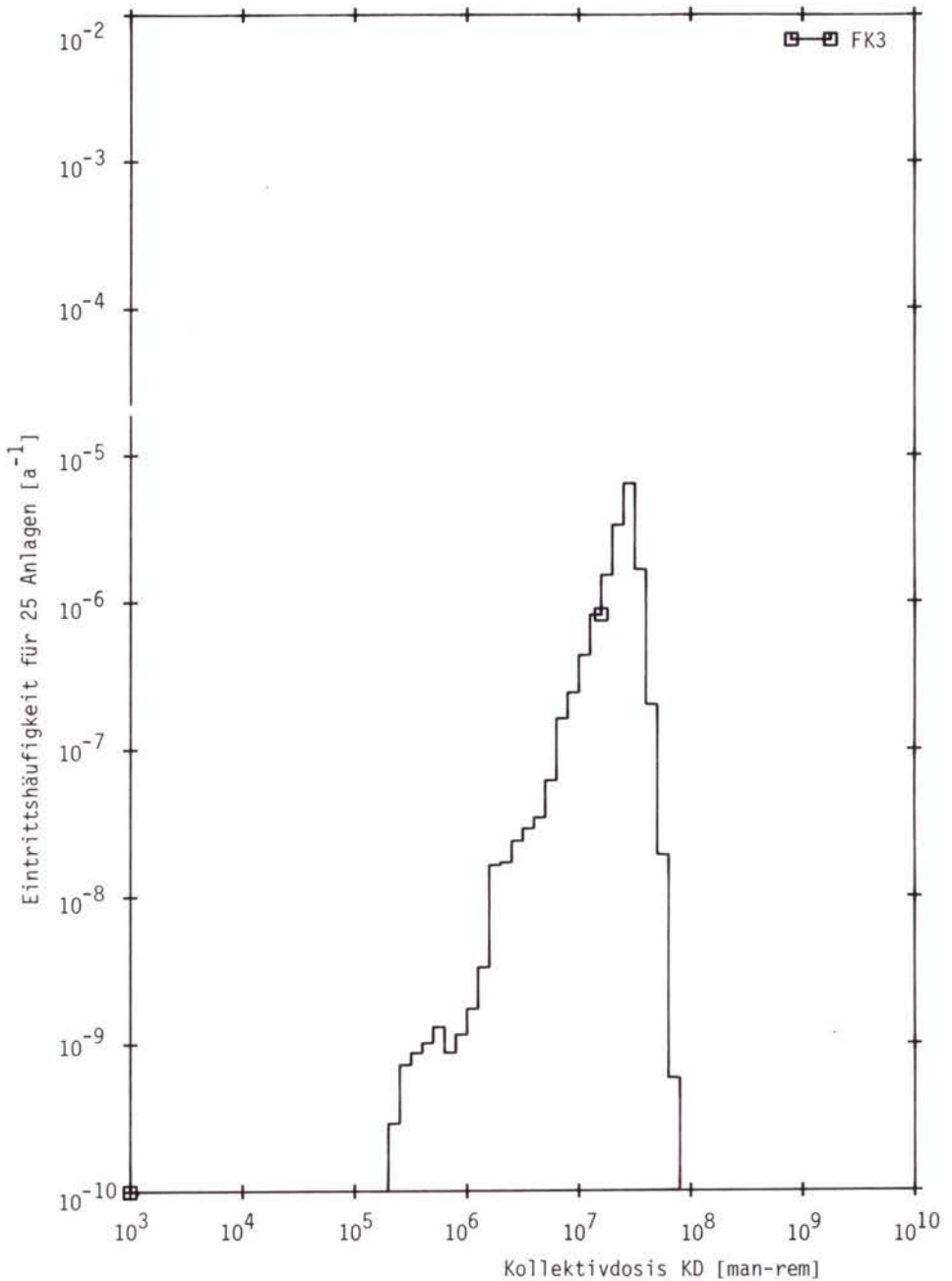


Bild F8, 8-12(4):

Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK3)

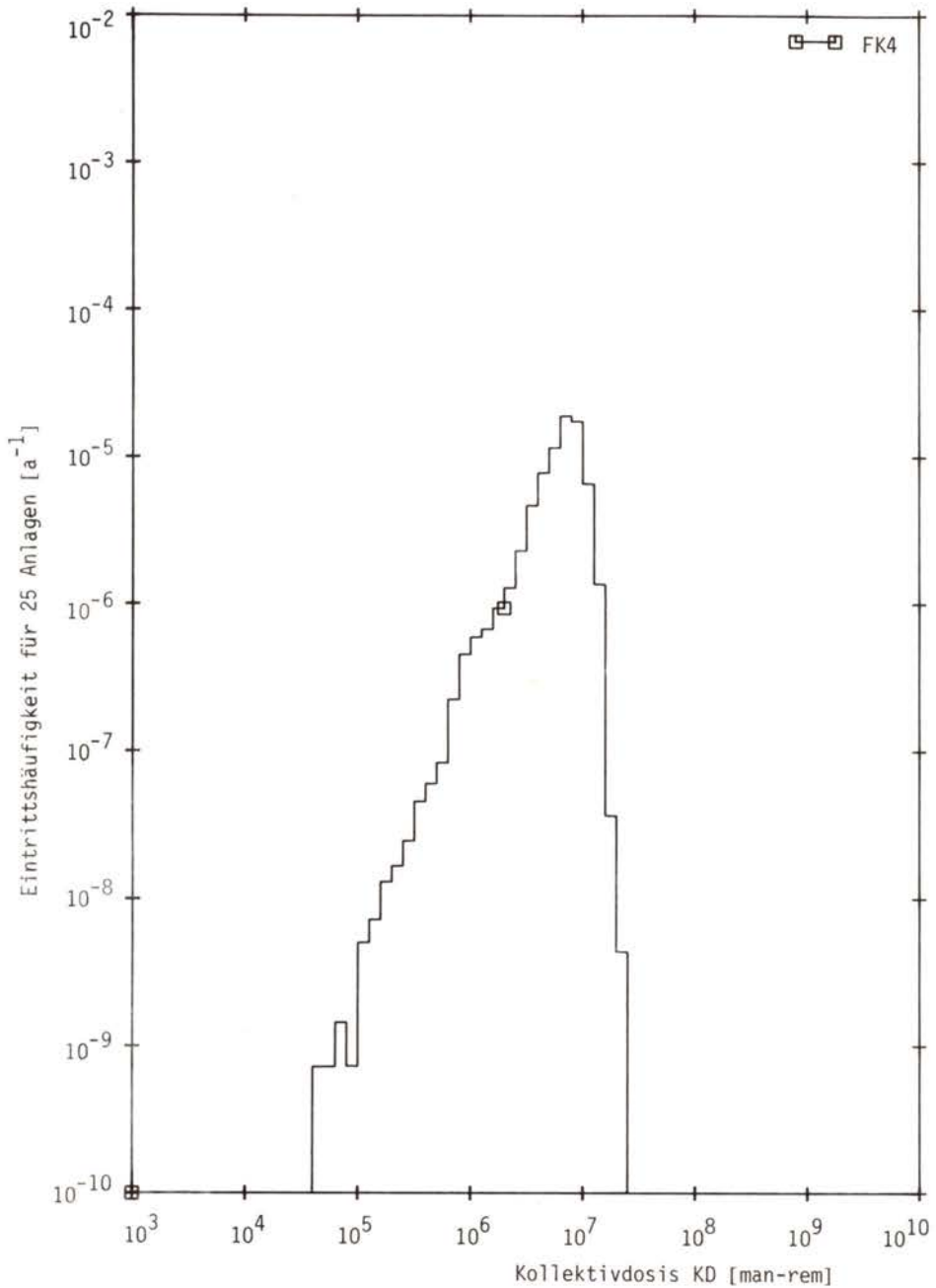


Bild F8, 8-12(5):

Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK4)

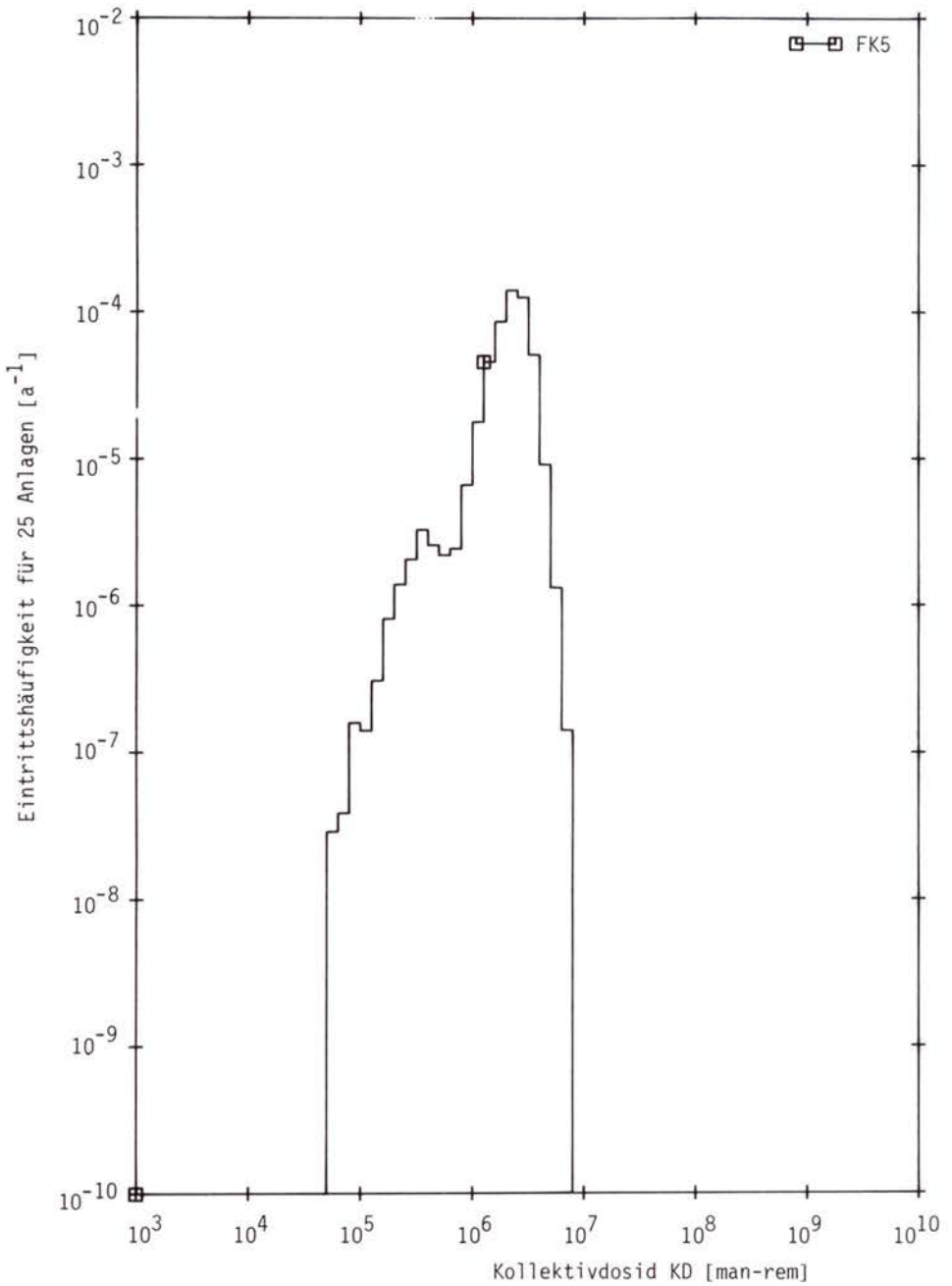


Bild F8, 8-12(6):

Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK5)



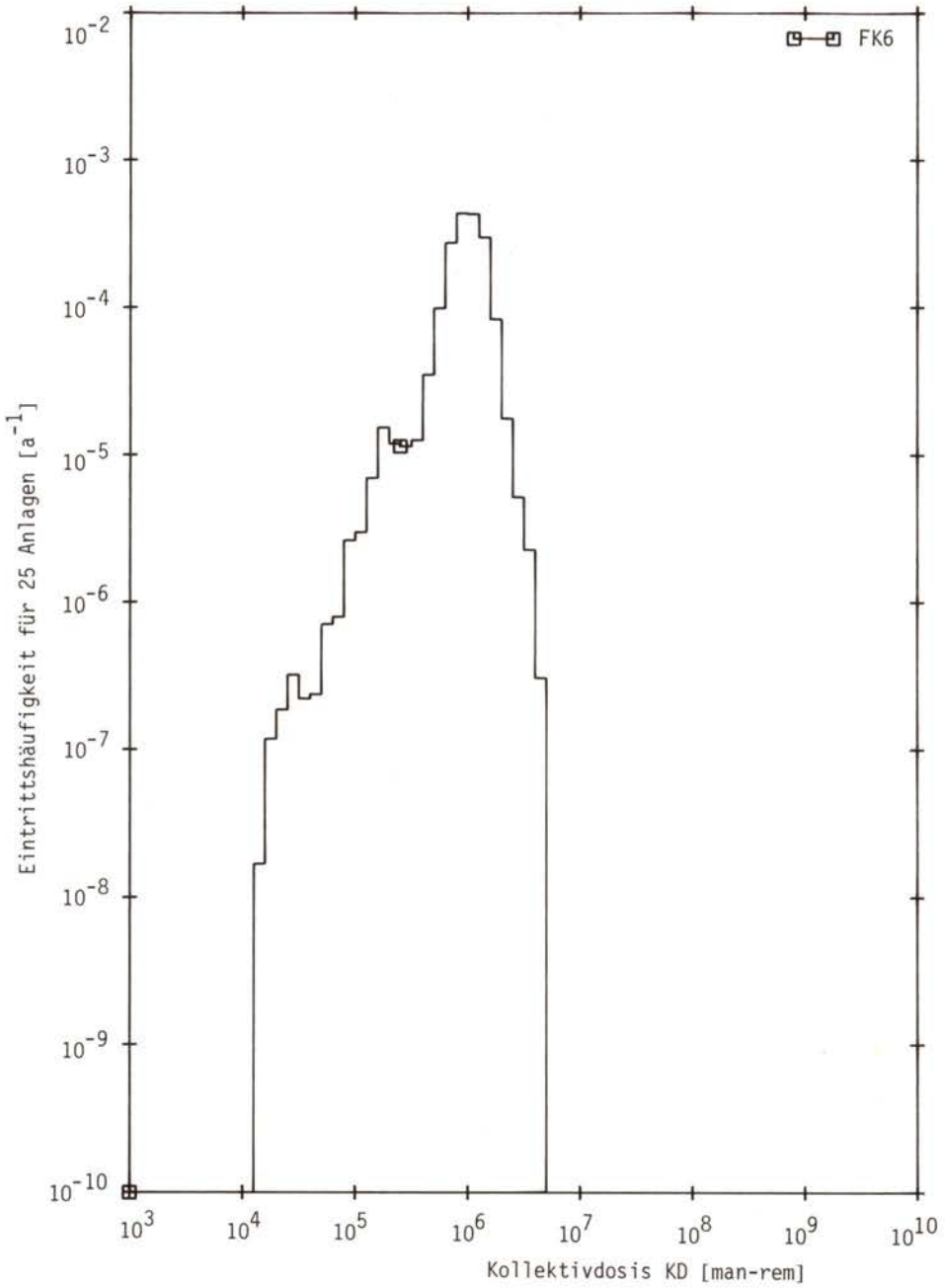


Bild F8, 8-12(7):

Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK6)

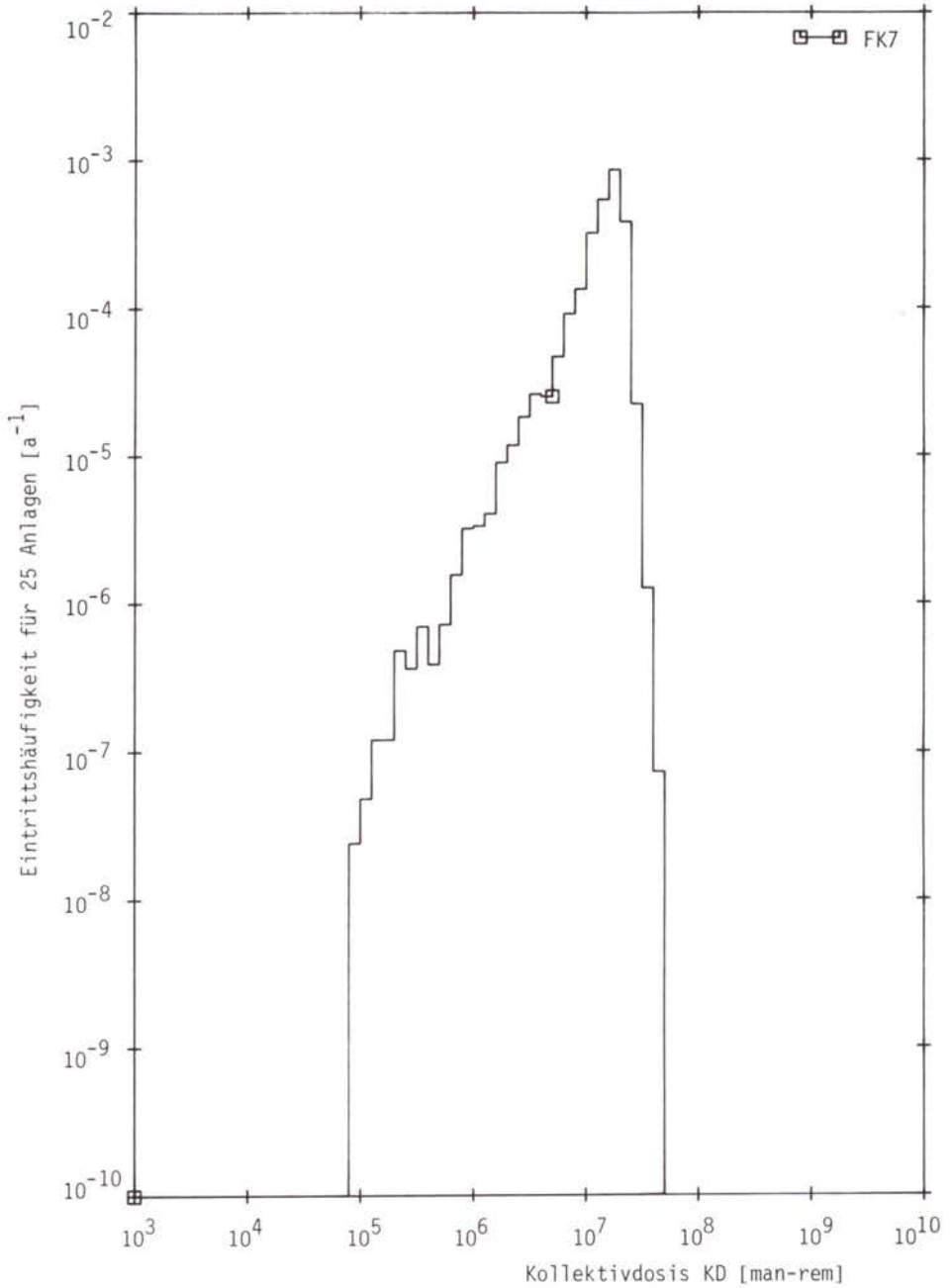


Bild F8, 8-12(8):

Klassenhäufigkeitsdichte der genetisch signifikanten Kollektivdosis (nur FK7)

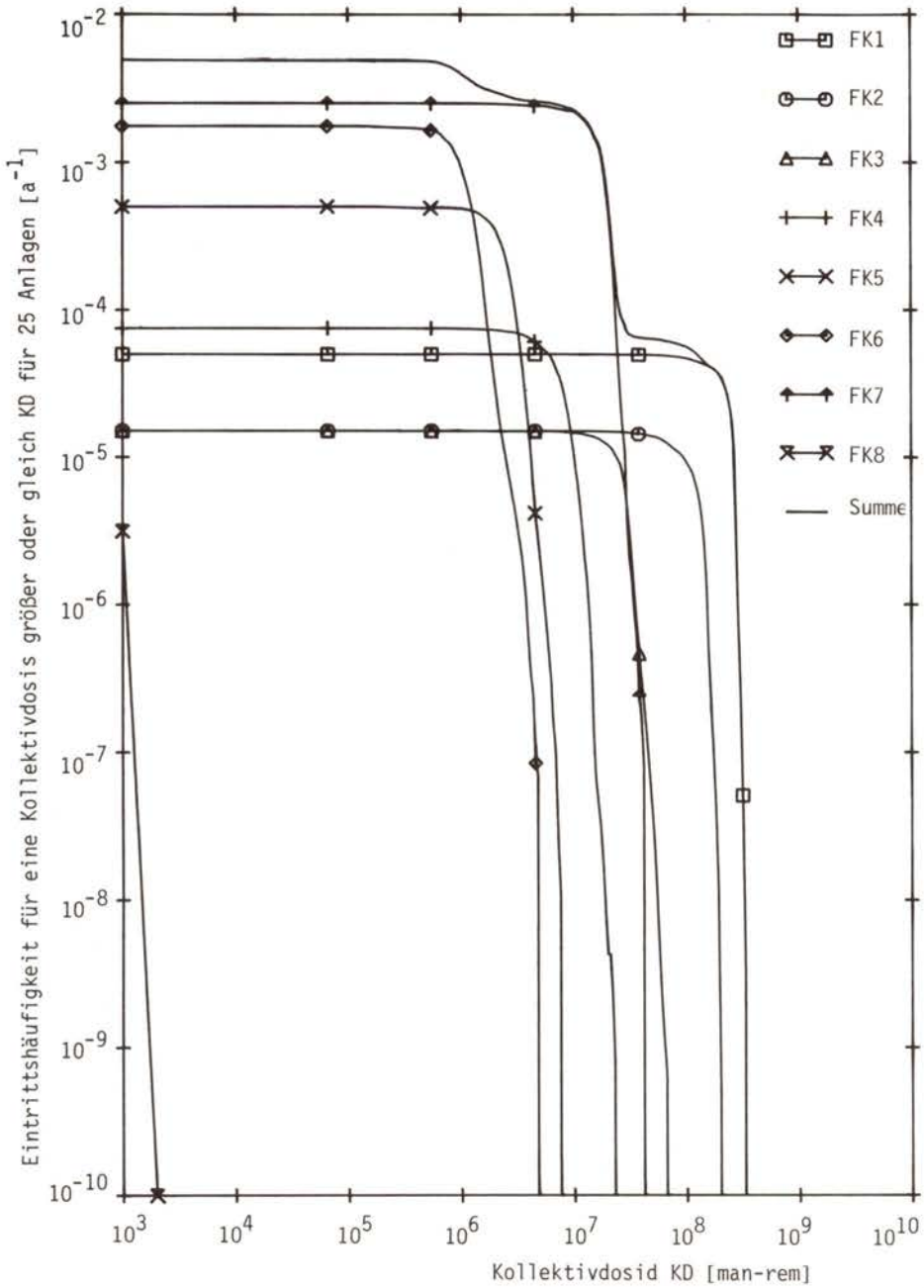


Bild F8, 8-13(1):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der genetisch signifikanten Kollektivdosis, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien

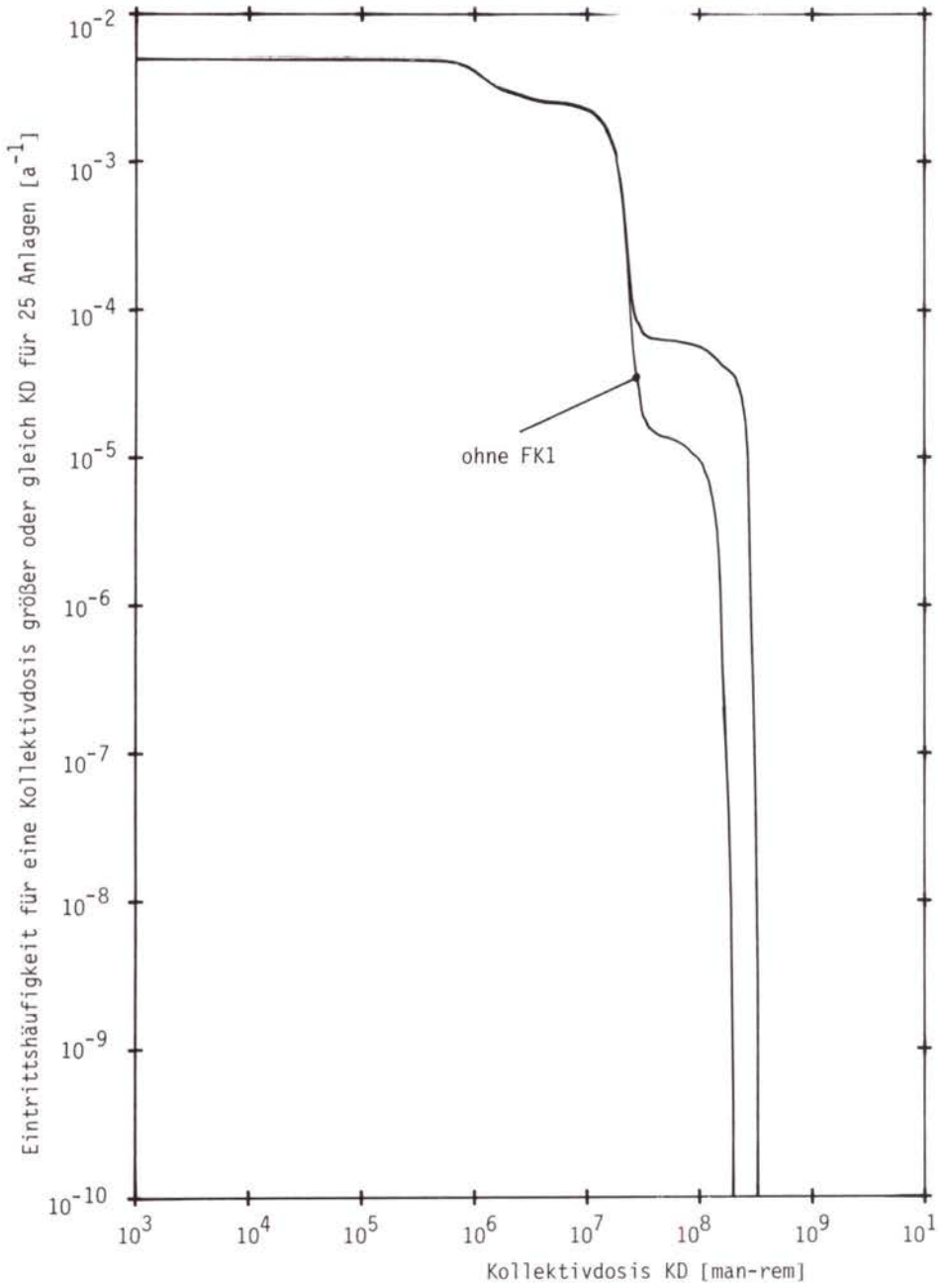


Bild F8, 8-13(2):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der genetisch signifikanten Kollektivdosis

Freisetzungskategorie	Kleinste Kollektivdosis $KD_{\min}$	Größte Kollektivdosis $KD_{\max}$	Mittlere Kollektivdosis $\overline{KD}$ (b/c) <sup>1)</sup>	Maß der Abweichung $\Delta KD$
	[man-rem]	[man-rem]	[man-rem]	[man-rem]
FK1	$0,29 \cdot 10^6$	$344 \cdot 10^6$	$213 \cdot 10^6$ (38 %/62 %)	$61 \cdot 10^6$
FK2	$0,45 \cdot 10^6$	$201 \cdot 10^6$	$106 \cdot 10^6$ (44 %/56 %)	$37 \cdot 10^6$
FK3	$0,22 \cdot 10^6$	$67 \cdot 10^6$	$25 \cdot 10^6$ (42 %/58 %)	$7,6 \cdot 10^6$
FK4	$0,47 \cdot 10^5$	$23 \cdot 10^6$	$6,9 \cdot 10^6$ (49 %/51 %)	$2,8 \cdot 10^6$
FK5	$0,53 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^6$ (50 %/50 %)	$0,8 \cdot 10^6$
FK6	$0,16 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$ (54 %/46 %)	$0,4 \cdot 10^6$
FK7	$0,88 \cdot 10^5$	$43 \cdot 10^6$	$15,5 \cdot 10^6$ (46 %/54 %)	$5,4 \cdot 10^6$
FK8	2,6	$1,2 \cdot 10^3$	110 (64 %/36 %)	71

<sup>1)</sup> Bei b % der Fälle ist die Kollektivdosis kleiner, bei c % größer als  $\overline{KD}$ .

Tab. F8, 8-9:

Charakteristische Größen der genetisch signifikanten Dosen (25 Anlagen, alle Generationen)

Diese beträgt bei Berücksichtigung der Freisetzungskategorie FK1 ca.  $3,4 \cdot 10^8$  man-rem und ohne Berücksichtigung der Freisetzungskategorie FK1 ca.  $2 \cdot 10^8$  man-rem. Die Eintrittshäufigkeiten dieser maximalen genetisch signifikanten Kollektivdosen ergeben sich in Analogie zu den Überlegungen bei den Frühschäden zu  $4,8 \cdot 10^{-10}/a$  bzw.  $1,4 \cdot 10^{-10}/a$ .

Wie bei den somatischen Spätschäden werden immer dann große genetisch signifikante Kollektivdosen errechnet, wenn sich bei großen Freisetzungen aufgrund entsprechender Wetterbedingungen in relativ großen Gebieten Konzentrationswerte einstellen, die so niedrig sind, daß Schutz- und Gegenmaßnahmen bei den zugrunde gelegten Kriterien nicht ausgelöst werden. Die Ähnlichkeit der Häufigkeitsverteilungen der somatischen Spätschäden und der genetisch signifikanten Dosen ist in folgender Tabelle quantitativ verdeutlicht.

Freisetzungskategorie	$\frac{KS_{SSmax}}{KS_{SS}}$	$\frac{KD_{max}}{KD}$	$\frac{\Delta KS_{SS}}{KS_{SS}}$	$\frac{\Delta KD}{KD}$
1	2,5	1,6	0,27	0,29
2	1,9	1,9	0,34	0,35
3	2,6	2,7	0,30	0,30
4	3,3	3,3	0,33	0,41
5	2,7	3,4	0,33	0,35
6	2,8	4,9	0,40	0,40
7	3,1	2,8	0,32	0,35

Tab. F8, 8-10:

Vergleich charakteristischer Daten von somatischen Spätschäden und genetisch signifikanten Kollektivdosen

Sowohl das Verhältnis der Maxima zu den Mittelwerten als auch das der Abweichungen zu den Mittelwerten ist für die einzelnen Freisetzungskategorien in guter Übereinstimmung.

● Vergleich mit der natürlichen genetisch signifikanten Kollektivdosis

Mit der gleichen, in Abschnitt 8.8.3 gegebenen Begründung - die Kollektivdosis wird im wesentlichen durch kleine Dosen bestimmt, die eine größere Bevölkerung erhält - kann auch hier ein Vergleich mit den aufgrund der natürlichen Strahlenexposition genetisch signifikanten Kollektivdosen gezogen werden.

Die natürliche genetisch signifikante Kollektivdosis der derzeit in Europa lebenden Bevölkerung (670 Millionen Einwohner) beträgt aufgrund der mittleren natürlichen Strahlenexposition von 0,1 rem/a etwa  $6,7 \cdot 10^7$  man-rem pro Jahr. Die in Tabelle F8, 8-9 angegebenen Rechenergebnisse für die genetisch signifikante Kollektivdosis und ihre Eintrittshäufigkeit sind also zu vergleichen mit diesem Zahlenwert.

Ein Vergleich der Erwartungswerte für die natürliche genetisch signifikante Kollektivdosis mit dem Erwartungswert für die genetisch signifikante Kollektivdosis durch Kernschmelzunfälle bei 25 Anlagen wird in Abschnitt 8.9.2 gezogen.

Die gleiche Einschränkung wie in Abschnitt 8.8.3, die bezüglich der in europäischen Nachbarländern befindlichen Kernkraftwerke gemacht wurde, ist auch hier gültig.

8.8.5 Von den Gegenmaßnahmen "Evakuierung",  
"Schnelle Umsiedlung" und "Umsiedlung"  
betroffenen Flächen und Personen

In diesem Abschnitt werden u.a. die Gegenmaßnahmen

- Evakuierung (Gebiet A)
- Schnelle Umsiedlung (Gebiete B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub>)
- Umsiedlung (Gebiet C)

beschrieben. Die Rechenergebnisse für die von diesen Maßnahmen

betroffenen Flächen und Personen wurden in der üblichen Weise in Form der komplementären Häufigkeitsverteilungen und charakteristischen Größen dargestellt.

● Evakuierung (Gebiet A)

In der Studie wird davon ausgegangen, daß bei allen hier betrachteten Freisetzungen die Evakuierung durchgeführt wird, und zwar in einem in seinen Abmessungen festgelegten Gebiet der Fläche  $F = 33,3 \text{ km}^2$ . Die zu evakuierende Bevölkerung beträgt in zwei Dritteln der Einzelereignisse weniger als 6 300 Personen. Weitere Details können der Tabelle F8, 8-11 und Bild F8, 8-14 entnommen werden.

● Schnelle Umsiedlung (Gebiete  $B_1$  und  $B_2$ )

Die von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" betroffenen Gebiete werden durch den Radius  $r = 24 \text{ km}$  in zwei Bereiche,  $B_1$  und  $B_2$ , aufgeteilt. Die komplementären Häufigkeitsverteilungen der betroffenen Flächen  $B_1$  sowie  $B_1+B_2$  sind in Bild F8, 8-15(1) bzw. F8, 8-15(2) dargestellt, die Kurven für die im Gebiet  $B_1+B_2$  betroffenen Personen zeigt Bild F8, 8-15(3). Die charakteristischen Größen der betroffenen Flächen und Personen sind in den Tabellen F8, 8-12 und F8, 8-13 angegeben.

Abbildungen und Tabellen zeigen, daß nur bei den Freisetzungskategorien FK1, FK2 und FK3 außerhalb des Gebiets A Strahlendosen auftreten können, die nach den Kriterien des Schutz- und Gegenmaßnahmenmodells zur Auslösung einer "Schnellen Umsiedlung" führen.

Unter Berücksichtigung der Summen-Eintrittshäufigkeit der Freisetzungskategorien mit vorangegangenen Kernschmelzen FK1 bis FK6 bedeutet dies, daß es nur bei 1 % der Freisetzungen dieser Kategorien zur Ausbildung des Gebietes  $B_1+B_2$  kommt.



Freisetzungskategorie	Flächen F [km <sup>2</sup> ]			Maß der Abweichung $\Delta F$	Personen P [Anzahl]			Maß der Abweichung $\Delta P$
	kleinste Fläche $F_{\min}$	größte Fläche $F_{\max}$	mittlere Fläche $\bar{F}$		kleinste Personenzahl $P_{\min} (a)^1$	größte Personenzahl $P_{\max}$	mittlere Personenzahl $\bar{P} (b/c)^2$	
FK1 . . . . . FK8	33,3			0	$0(4,4 \cdot 10^{-2})$	40 100	6 300 (66,5/33,5)	6 300

<sup>1)</sup> a % der Ereignisse führen zur kleinsten Personenzahl  $P_{\min}$ .

<sup>2)</sup> Bei b % der Fälle ist die Personenzahl kleiner als  $\bar{P}$ , bei c % größer als  $\bar{P}$ .

Tab. F8, 8-11:

Charakteristische Größen der von der Gegenmaßnahme "Evakuierung" (Gebiet A) betroffenen Fläche F und Personenzahlen P

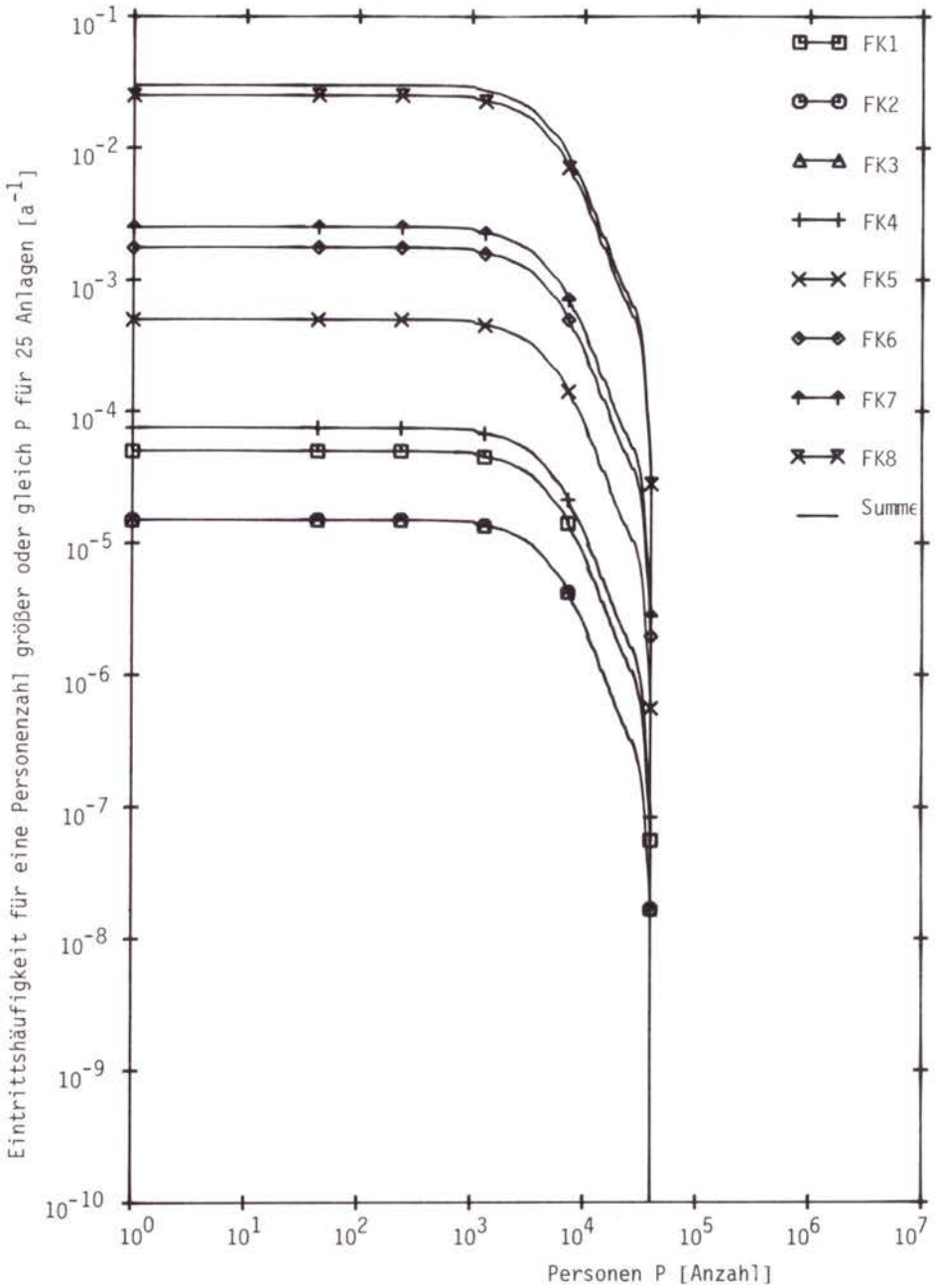


Bild F8, 8-14:

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Evakuierung" betroffenen Personenzahl

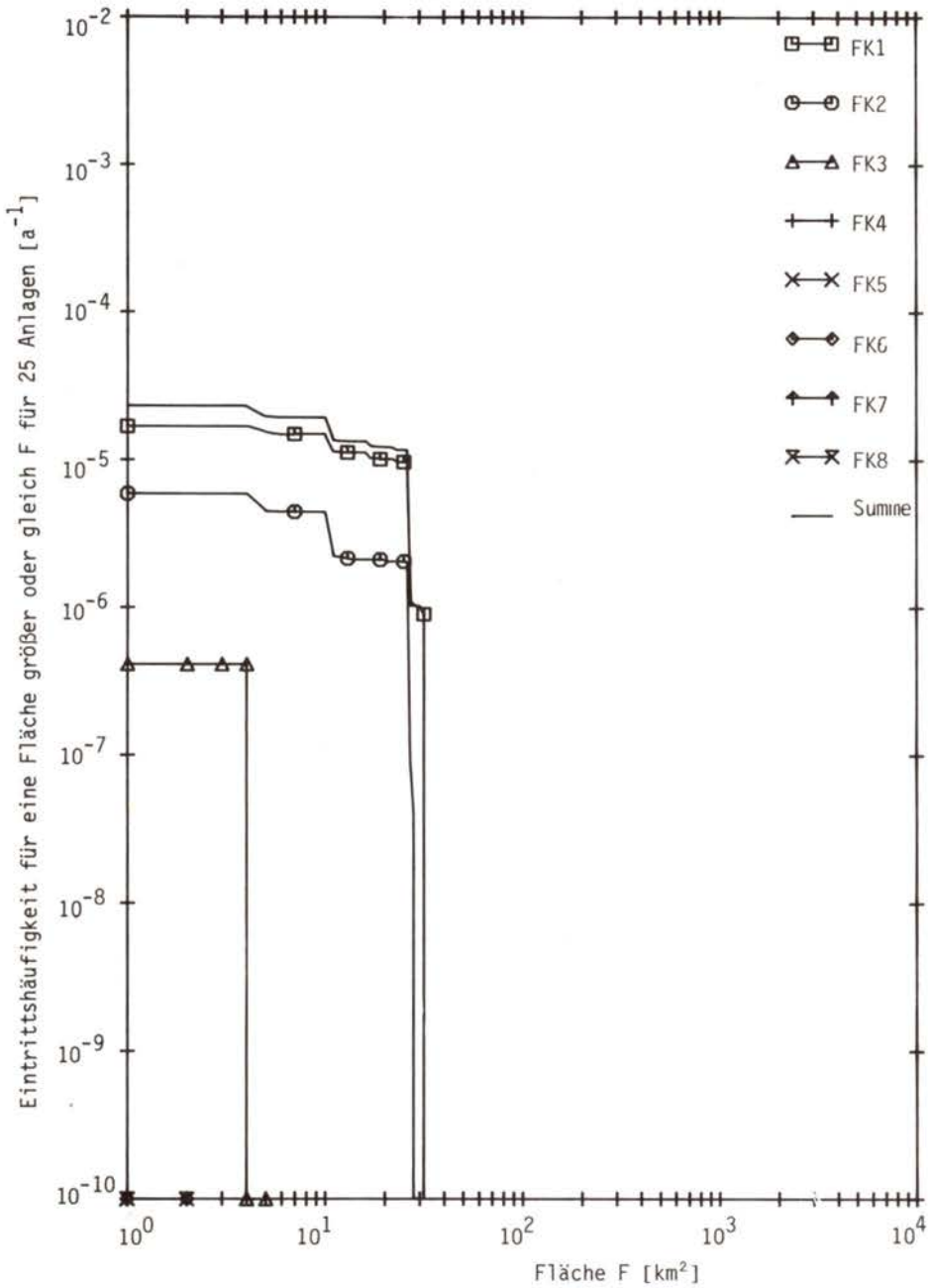


Bild F8, 8-15 (1):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" betroffenen Flächen bis 24 km (Gebiet B1)

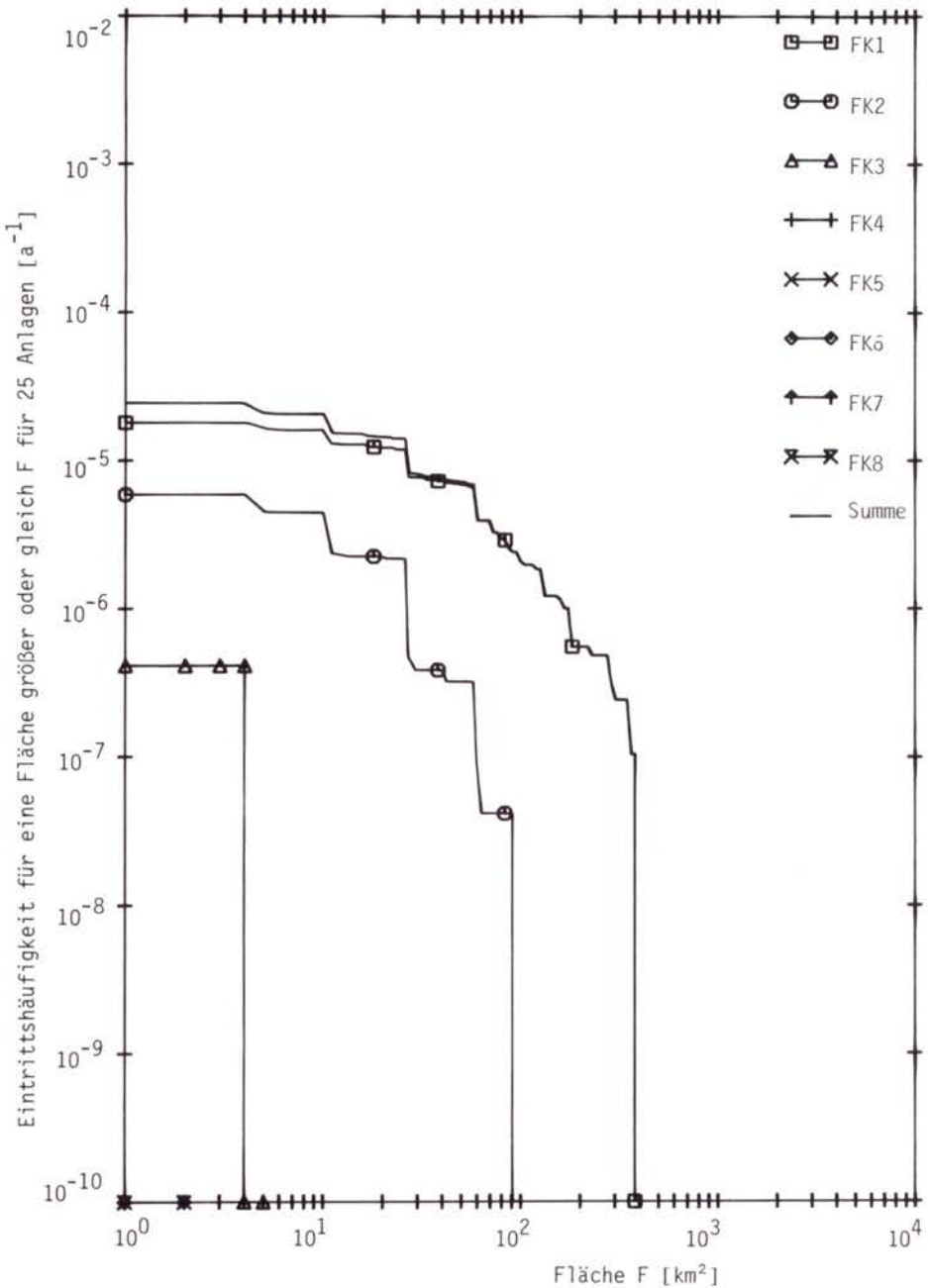


Bild F8, 8-15(2):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" betroffenen Flächen (Gebiet B1 + B2)

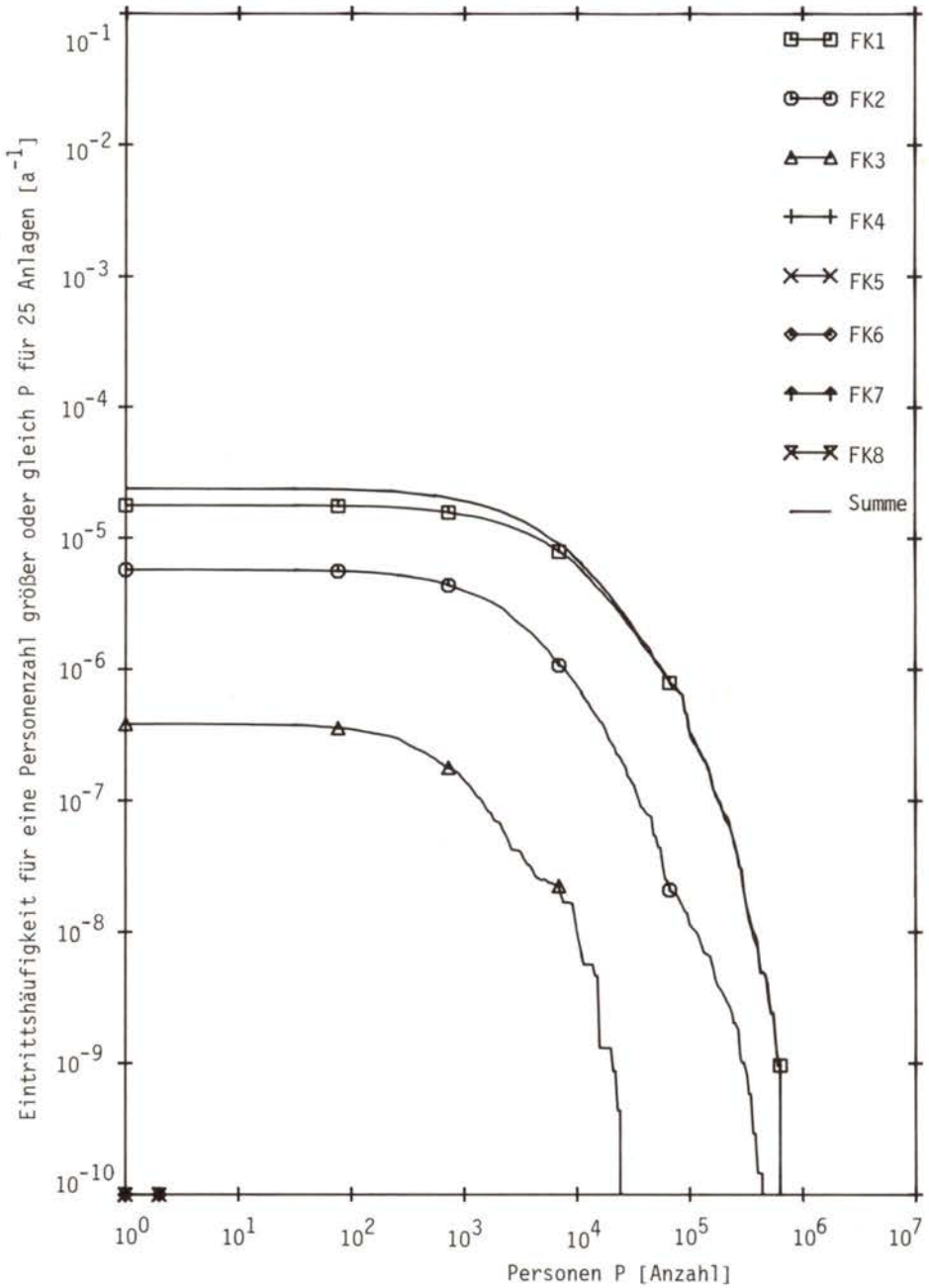


Bild F8, 8-15(3):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" betroffenen Personenzahl

Freisetzungskategorie	Eintrittshäufigkeit pro Jahr der Ausbildung des Gebiets B <sub>1</sub> (für 25 Anlagen)	Wahrscheinlichkeit der Ausbildung eines Gebiets B <sub>1</sub> bei stattgefundener Freisetzung	Betroffene Fläche F [km <sup>2</sup> ]			Maß der Abweichung ΔF
			kleinste Fläche F <sub>min</sub> (a) <sup>1)</sup>	größte Fläche F <sub>max</sub>	mittlere Fläche $\bar{F}$ (b/c) <sup>2)</sup>	
FK1	$1,7 \cdot 10^{-5}$	33,0 %	0 (67,0)	33	6,5 (70,8/29,2)	10,7
FK2	$5,7 \cdot 10^{-6}$	38,0 %	0 (62,0)	28	5,7 (70,8/29,2)	9,3
FK3	$4,2 \cdot 10^{-7}$	2,8 %	0 (97,2)	4	0,1 (97,2/2,8)	0,7
FK4	0	0				
FK5	0	0				
FK6	0	0				
FK7	0	0				
FK8	0	0				

<sup>1)</sup> a % der Ereignisse führen zur kleinsten Fläche F<sub>min</sub>.

<sup>2)</sup> Bei b % der Fälle ist die Fläche kleiner als  $\bar{F}$ , bei c % größer als  $\bar{F}$ .

Tab. F8, 8-12:

Charakteristische Größen der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" bis 24 km (Gebiet B<sub>1</sub>) betroffenen Fläche F

Freisetzungskategorie	Eintrittshäufigkeit pro Jahr der Ausbildung der Gebiete $B_1+B_2$ (für 25 Anlagen)	Wahrscheinlichkeit der Ausbildung eines Gebiets $B_1+B_2$ bei stattgefundener Freisetzung	Betroffene Fläche $F$ [km <sup>2</sup> ]			Maß der Abweichung $\Delta F$	Betroffene Personen $P$			Maß der Abweichung $\Delta P$
			kleinste Fläche $F_{\min}(a)^1$	größte Fläche $F_{\max}$	mittlere Fläche $\bar{F}(b/c)^2$		kleinste Personenzahl $P_{\min}(a)^1$	größte Personenzahl $P_{\max}$	mittlere Personenzahl $\bar{P}(b/c)^2$	
FK1	$1,8 \cdot 10^{-5}$	35,4 %	0 (64,6)	397	18,4 (76,1/23,9)	45,5	0 (65,1)	645 000	4 700 (82,2/17,8)	18 100
FK2	$5,7 \cdot 10^{-6}$	38,3 %	0 (61,7)	95	6,8 (70,7/29,3)	12,8	0 (62,8)	444 000	1 800 (80,5/19,5)	7 400
FK3	$4,2 \cdot 10^{-7}$	2,8 %	0 (97,2)	4	0,1 (97,2/2,8)	0,7	0 (97,4)	24 400	36 (97,5/2,5)	480
FK4	0	0								
FK5	0	0								
FK6	0	0								
FK7	0	0								
FK8	0	0								

1) a % der Ereignisse führen zur kleinsten Fläche  $F_{\min}$  bzw. zur kleinsten Personenzahl  $P_{\min}$ .

2) Bei b % der Fälle ist die Fläche kleiner als  $\bar{F}$  bzw. die Personenzahl kleiner als  $\bar{P}$ , bei c % größer als  $\bar{F}$  bzw.  $\bar{P}$ .

Tab. F8, 8-13:

Charakteristische Größen der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" (Gebiet  $B_1+B_2$ ) betroffenen Flächen  $F$  und Personenzahlen  $P$

Weiterhin zeigt der Vergleich der Ergebnisse für die Flächen  $B_1$  und  $B_1+B_2$ , daß es nur in ganz wenigen Fällen zur Ausbildung eines Gebietes  $B_2$  kommt. Die Wahrscheinlichkeit hierfür beträgt bei FK1 etwa 2,4 %, bei FK2 nur noch 0,3 %. Die Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" wird also nur in 2,7 % der Kernschmelz-unfälle in Entfernungen größer als 24 km mit Eintrittshäufigkeiten von etwa  $1,2 \cdot 10^{-6}/a$  bzw.  $4,5 \cdot 10^{-8}/a$  zu ergreifen sein.

● Umsiedlung (Gebiet C)

Die komplementären Häufigkeitsverteilungen der von dieser Maßnahme betroffenen Flächen und Personen sind in Bild F8, 8-16(1) und F8, 8-16(2) dargestellt, die charakteristischen Größen enthält die Tabelle F8, 8-14.

Die Rechenergebnisse zeigen, daß es bei allen Freisetzungskategorien mit Ausnahme von FK8 Wetterabläufe gibt, bei denen potentielle Strahlendosen auftreten können, die höher sind als diejenigen, die als Kriterium für Umsiedlung angenommen wurden. Der Vergleich der Summe der Eintrittshäufigkeiten pro Jahr der Ausbildung des Gebiets C bei den Freisetzungskategorien FK1 bis FK6 mit der Summen-Eintrittshäufigkeit dieser Freisetzungen ( $2,5 \cdot 10^{-3}/a$ ) ergibt, daß es nur bei etwa 19 % der Freisetzungen mit vorangegangenen Kernschmelzen zur Ausbildung eines Gebiets C kommt.

Nach Tabelle F8, 8-14 führt das in der vorliegenden Studie zugrunde gelegte Kriterium für die Gegenmaßnahme Umsiedlung im Extremfall zu einem sehr großen Personenkreis, der von dieser Maßnahme betroffen wäre. Da derart große Personenzahlen nur in Großstädten und Ballungsgebieten erreicht werden, sind die angegebenen Zahlen aus folgenden Gründen zu hoch:

- In der Studie werden Abschirmfaktoren verwendet, die für eine durchschnittliche Mischung großer, mittlerer und kleiner Häuser gelten. Im Gegensatz dazu herrschen in Großstädten und Ballungsgebieten große, mehrstöckige Häuser vor, die eine bessere Abschirmung bieten.



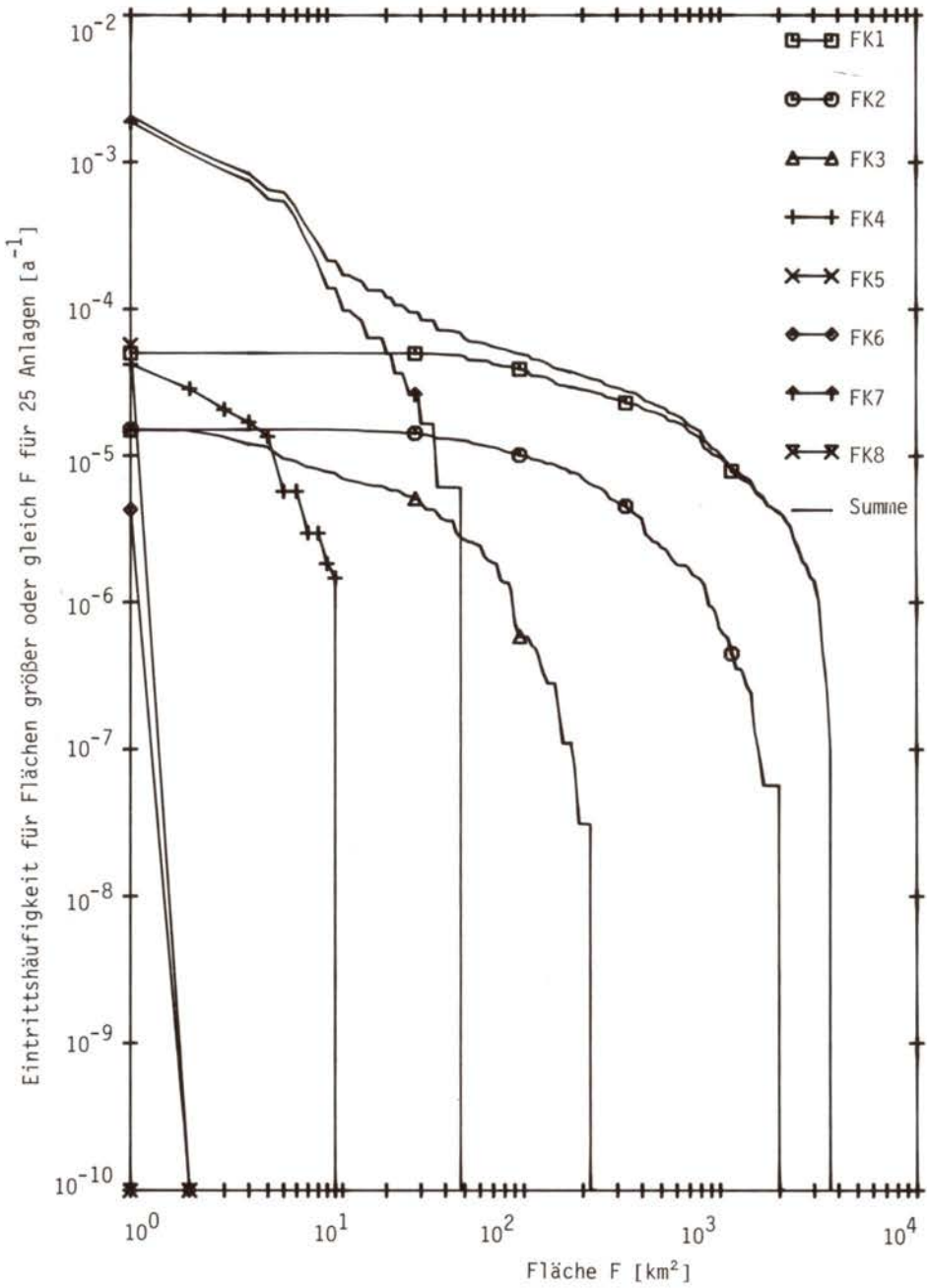


Bild F8, 8-16(1):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Umsiedlung" betroffenen Flächen

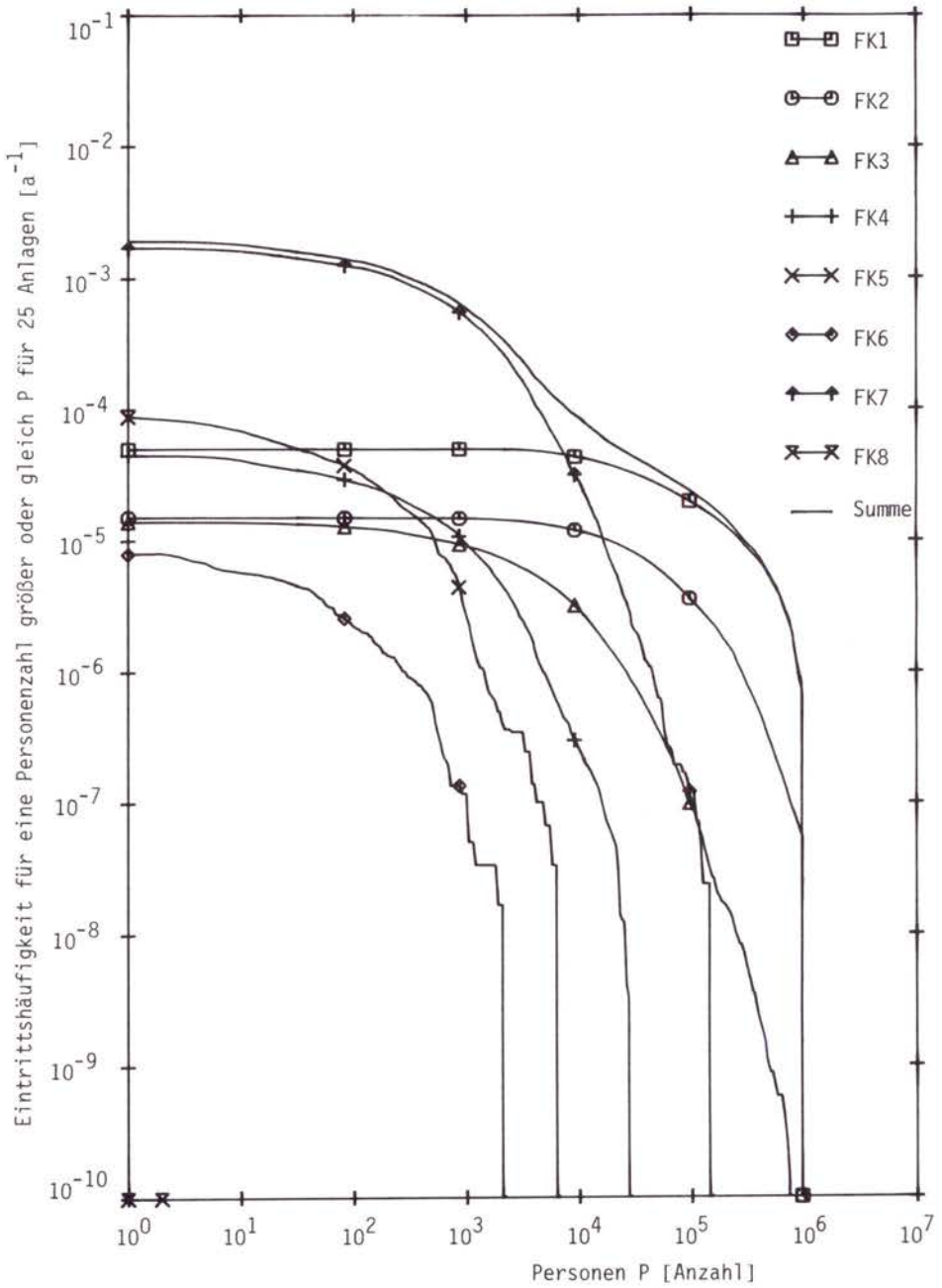


Bild F8, 8-16(2):

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der von der Gegenmaßnahme "Umsiedlung" betroffenen Personenzahlen

Freisetzungskategorie	Eintrittshäufigkeit pro Jahr der Ausbildung des Gebiets C (für 25 Anlagen)	Wahrscheinlichkeit der Ausbildung eines Gebiets C bei stattgefundener Freisetzung	Betroffene Fläche F [km <sup>2</sup> ]			Maß der Abweichung $\Delta F$	Betroffene Personen P			Maß der Abweichung $\Delta P$
			kleinste Fläche $F_{\min}(a)^1$	größte Fläche $F_{\max}$	mittlere Fläche $F(b/c)^2$		kleinste Personenzahl $P_{\min}(a)^1$	größte Personenzahl $P_{\max}$	mittlere Personenzahl $\bar{P}(b/c)^2$	
FK1	$5,0 \cdot 10^{-5}$	99,8 %	12 (0,2)	3 780	610 (66,5/33,5)	770	0 (<0,1)	3 150 000	153 000 (71,9/28,1)	240 000
FK2	$1,5 \cdot 10^{-5}$	99,4 %	12 (0,6)	2 070	290 (67,3/32,7)	320	0 (<0,1)	2 430 000	73 900 (73,5/26,5)	132 000
FK3	$1,5 \cdot 10^{-5}$	99,1 %	1 (0,9)	230	27 (66,0/34,0)	35	0 (7,3)	731 000	6 800 (75,4/24,6)	17 200
FK4	$7,5 \cdot 10^{-5}$	99,9 %	0 (0,1)	11	2,3 (65,3/34,7)	2,5	0 (39,5)	27 900	460 (79,4/20,6)	1 400
FK5	$3,0 \cdot 10^{-4}$	60,6 %	0 (39,4)	2	0,3 (68,5/31,5)	0,4	0 (81,2)	6 500	37 (89,5/10,5)	190
FK6	$3,3 \cdot 10^{-5}$	1,9 %	0 (98,1)	1	0,01 (98,1/1,9)	0,07	0 (99,5)	2 200	0,5 (99,5/0,5)	17
FK7	$2,4 \cdot 10^{-3}$	96,3 %	0 (3,7)	49	3,6 (71,2/28,8)	5,0	0 (31,8)	146 000	790 (78,3/21,7)	2 500
FK8	0	0								

<sup>1)</sup> a % der Ereignisse führen zur kleinsten Fläche  $F_{\min}$  bzw. zur kleinsten Personenzahl  $P_{\min}$ .

<sup>2)</sup> Bei b % der Fälle ist die Fläche kleiner als  $\bar{F}$  bzw. die Personenzahl kleiner als  $\bar{P}$ , bei c % größer als  $\bar{F}$  bzw.  $\bar{P}$ .

Tab. F8, 8-14:

Charakteristische Größen der von der Gegenmaßnahme "Umsiedlung" (Gebiet C) betroffenen Flächen F und Personenzahlen P

- Derart große Personenzahlen ergeben sich bei den Rechnungen bevorzugt, wenn nicht gar ausschließlich, in Verbindung mit Regenfällen. In dicht besiedelten Gebieten mit großen Dach-, Beton- und Asphaltflächen fließt mit dem Regenwasser ein großer Teil der Aktivität in die Kanalisation und befindet sich damit auf einem viel weniger effektiven Belastungspfad. Die Studie enthält kein Regenablaufmodell, berücksichtigt diesen Effekt also nicht.
- Die Studie sieht dann die Umsiedlung vor, wenn auch nach der Dekontamination die in 30 Jahren bei normaler Tätigkeit akkumulierte Ganzkörperdosis 12,5 rad übersteigt (25 rad potentielle Ganzkörperdosis). Dieser Wert entspricht dem 2,5-fachen Jahresdosisgrenzwert für beruflich exponierte Personen und ist damit relativ niedrig. Es wird im Verlauf der Phase B der vorliegenden Studie nochmals zu überlegen sein, ob für Bevölkerungsbewegungen derart großen Ausmaßes ein so niedriger Auslösewert gerechtfertigt ist.

Die beiden zuerst genannten Mängel des Modells haben in Großstädten und Ballungsräumen eine Überschätzung der Dosen zur Folge. Ihre Behebung führt ohne Änderung des Gegenmaßnahmenmodells zu einer geringeren Anzahl betroffener Personen. Darüber hinaus erscheint aber auch eine Überprüfung des zugrunde gelegten Kriteriums für die Umsiedlung angezeigt.

## 8.9 Kollektiv- und Individualrisiken sowie Erwartungswerte der Kollektivdosen und von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen

### 8.9.1 Übersicht

Neben den in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Häufigkeitsverteilungen der Unfallfolgen ist die numerische Verknüpfung von Schadensgröße und Eintrittshäufigkeit durch Berechnung der Risiken (Abschnitt 8.7) von Interesse. Das mittlere Kollektivrisiko  $\langle KS \rangle$  gibt den pro Reaktorbetriebsjahr im Mittel über viele Reaktorbetriebsjahre auftretenden Kollektiv-

schaden an. Entsprechendes gilt für die Erwartungswerte der Kollektivdosen  $\langle KD \rangle$ , Flächen  $\langle F \rangle$  und Personen  $\langle P \rangle$ .

Der Erwartungswert für die Unfallfolgen durch Kernkraftwerksunfälle bei 25 Anlagen (z.B.  $\langle KS^{25} \rangle$ ) wird durch Aufsummierung der mit den Eintrittshäufigkeiten gewichteten Unfallfolgen gebildet. Die Aufsummierung erstreckt sich über alle Unfallsituationen, d.h. über alle Freisetzungskategorien, Wettersituationen und Bevölkerungsverteilungen (Abschnitt 8.7).

### 8.9.2 Kollektivrisiken für gesundheitliche Schäden

In Tabelle F8, 8-15 sind die Kollektivrisiken für akute Todesfälle und somatische Spätschäden sowie die Erwartungswerte für die genetisch signifikante Kollektivdosis in den einzelnen Freisetzungskategorien, summiert mit und ohne FK1, angegeben. Danach beträgt das Kollektivrisiko für die Schadensart akuter Tod durch den Betrieb von 25 Reaktorblöcken des Referenztyps

$$\langle KS_{FS}^{25} \rangle = 5,1 \cdot 10^{-4}/a$$

und für Leukämie und Krebs (somatische Spätschäden)

$$\langle KS_{SS}^{25} \rangle = 9,3/a$$

Der Erwartungswert für die genetisch signifikante Kollektivdosis beträgt

$$\langle KD^{25} \rangle = 5,6 \cdot 10^4 \text{ man-rem/a}$$

Den relativen Anteil der einzelnen Freisetzungskategorien am Kollektivrisiko zeigt die Tabelle F8, 8-16.

Aus dieser Zusammenstellung wird ersichtlich, daß die Freisetzungskategorie FK1 den größten Anteil am Kollektivrisiko durch die Schadensart akuter Tod (Frühschäden) stellt. Zu den Kollektiv-

Freisetzungskategorie	Kollektivrisiko $\langle KS^{25} \rangle [a^{-1}]$			Erwartungswert der genetisch signifikanten Kollektivdosis $\langle KD^{25} \rangle [man\text{-}rem \cdot a^{-1}]$
	Frühschäden $\langle KS_{FS}^{25} \rangle$		Somatische Spätschäden $\langle KS_{SS}^{25} \rangle$	
	dt.DWB	am.DWB		
FK1	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	2,2	$1,1 \cdot 10^4$
FK2	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^3$
FK3	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^2$
FK4	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^2$
FK5	0	0	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^3$
FK6	0	0	$7,4 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^3$
FK7	0	0	5,6	$4,0 \cdot 10^4$
FK8	0	0	$4,5 \cdot 10^{-4}$	3,0
Summe	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	9,3	$5,6 \cdot 10^4$
Summe ohne FK1	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	7,1	$4,5 \cdot 10^4$

Tab. F8, 8-15:

Kollektivrisiken der gesundheitlichen Schäden und Erwartungswerte der Kollektivdosen für 25 Anlagen

tivrisiken für somatische Spätschäden und den Erwartungswerten der genetisch signifikanten Kollektivdosis tragen außer FK8 alle Freisetzungskategorien bei, der Hauptanteil jedoch kommt von der Freisetzungskategorie FK7.

Freisetzungskategorie	Risiko in Schadensart		Genetisch signifikante Dosis [%]
	akute Todesfälle [%]	somatische Spätschäden [%]	
FK1	78,7	23,5	19,1
FK2	19,7	3,1	2,9
FK3	0,5	0,7	0,7
FK4	1,1	1,0	1,0
FK5	0	3,2	2,1
FK6	0	8,0	3,3
FK7	0	60,5	70,9
FK8	0	<0,1	<0,1

Tab. F8, 8-16:

Relative Anteile der Freisetzungskategorien an den Kollektivrisiken der gesundheitlichen Schäden und Erwartungswerten der Kollektivdosen für 25 Anlagen

Störfälle, die in Freisetzungskategorie FK7 fallen, können dann auftreten, wenn bei einem Kühlmittelverluststörfall, der durch die Notkühlsysteme so weit beherrscht wird, daß kein größerer Schaden an den Brennelementen erwartet wird, ein Ausfall des Lüftungsabschlusses des Sicherheitsbehälters unterstellt wird. Wie im Fachband 6 näher ausgeführt, wurde die Häufigkeit für diese Freisetzungskategorie zu  $3 \cdot 10^{-7}$  pro Reaktorblock und Jahr ermittelt. Wie dort weiter erwähnt, wurde entsprechend der Aufgabenstellung für die Phase A der vorliegenden Studie, wie in WASH-1400, ein 10%iger Übertrag der Freisetzungshäufigkeit der benachbarten Freisetzungskategorie FK8 durchgeführt. Dies bedeutet für die Freisetzungskategorie FK7, daß, unabhängig von der detaillierten Analyse, die Freisetzungshäufigkeit um über

zwei Größenordnungen erhöht wurde. Geht man von der Häufigkeit der durch die Notkühleinrichtung beherrschten Kühlmittelverluststörfälle aus, die in der Studie mit  $1 \cdot 10^{-3}/a$  und Anlage ausgewiesen wurde, so läßt sich dieses Ergebnis so interpretieren, daß bei jedem zehnten Kühlmittelverluststörfall ein Versagen des Gebäudeabschlusses postuliert wird. Weder die Betriebserfahrungen noch die detaillierte Systemanalyse zeigen, daß eine derartig pessimistische Annahme gerechtfertigt ist.

Würde man z.B. davon ausgehen, daß der Lüftungsabschluß nur in 1 von 100 beherrschten Kühlmittelverluststörfällen ausfällt, so reduzierte sich allein dadurch das Kollektivrisiko für die Spätschäden um die Hälfte. Es wird daher notwendig sein, im Rahmen der Phase B der Studie diesen Sachverhalt realistischer zu betrachten.

Die für somatische Spätschäden ermittelten unfallbedingten Kollektivrisiken können mit den Kollektivrisiken für Leukämie und Krebs aufgrund natürlicher und zivilisatorischer Ursachen verglichen werden.

Dem Kollektivrisiko für Tod durch Leukämie und Krebs aufgrund des Betriebs von 25 Reaktorblöcken

$$\langle KS_{SS}^{25} \rangle = 9,3/a$$

stehen die Kollektivrisiken für Leukämie und Krebs aufgrund von natürlichen und zivilisatorischen Ursachen (Abschnitt 8.8.3)

$$\langle KS_{nat} \rangle = 1\,890\,000/a$$

bzw. aufgrund der natürlichen Strahlenexposition (Abschnitt 8.8.3)

$$\langle KS_{nat\ rad} \rangle = 8\,400/a$$

gegenüber.



Der Erwartungswert für die genetisch signifikante Kollektivdosis aufgrund des Betriebs von 25 Reaktorblöcken von

$$\langle \text{KD}^{25} \rangle = 5,6 \cdot 10^4 \text{ man-rem/a}$$

ist mit dem Erwartungswert für die genetisch signifikante Kollektivdosis aufgrund der natürlichen Strahlenexposition (Abschnitt 8.8.4)

$$\langle \text{KD}_{\text{nat rad}} \rangle = 6,7 \cdot 10^7 \text{ man-rem/a}$$

zu vergleichen.

Aus dieser Gegenüberstellung wird deutlich, daß die für 25 Kernkraftwerke ermittelten Kollektivrisiken kleiner sind als die Risiken, die sich unter Verwendung der gleichen Dosis/Risiko-Beziehungen aus der natürlichen Strahlenexposition errechnen lassen.

Neben den Kollektivrisiken wurden auch die mittleren entfernungsabhängigen Individualrisiken für Früh- und Spätschäden  $\langle S_{\text{FS}}(r) \rangle$  und  $\langle S_{\text{SS}}(r) \rangle$  ermittelt. Unter abstandabhängigem Individualrisiko  $\langle S(r) \rangle$  wird die Wahrscheinlichkeit dafür verstanden, daß eine an einem vorgegebenen Ort im Abstand  $r$  von der Anlage des analysierten Typs lebende Person pro Reaktorbetriebsjahr einen Schaden erleidet. Gemittelt wird über alle Windrichtungen, Personen, Anlagen des analysierten Typs und Standortregionen, wobei jede Region ein Gewicht erhält, das der zugehörigen Anzahl von Anlagen entspricht (Abschnitt 8.7). Da die Grenzen der Gebiete  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C$ ,  $D_1$  und  $D_2$  dosisabhängig sind, bringt die Berücksichtigung aller Wetterabläufe eine gewisse Mittelung über diese Gebietsgrenzen und die zugehörigen Gegenmaßnahmen mit sich. Dies gilt nicht für die starre äußere Grenze des Gebiets  $A$  bei  $r = 8 \text{ km}$  (siehe unten).

In Bild F8, 8-17(1) und (2) sind die abstandsabhängigen Individualrisiken für Früh- und Spätschäden dargestellt sowie nach Freisetzungskategorien aufgeschlüsselt. Wie bereits in Abschnitt

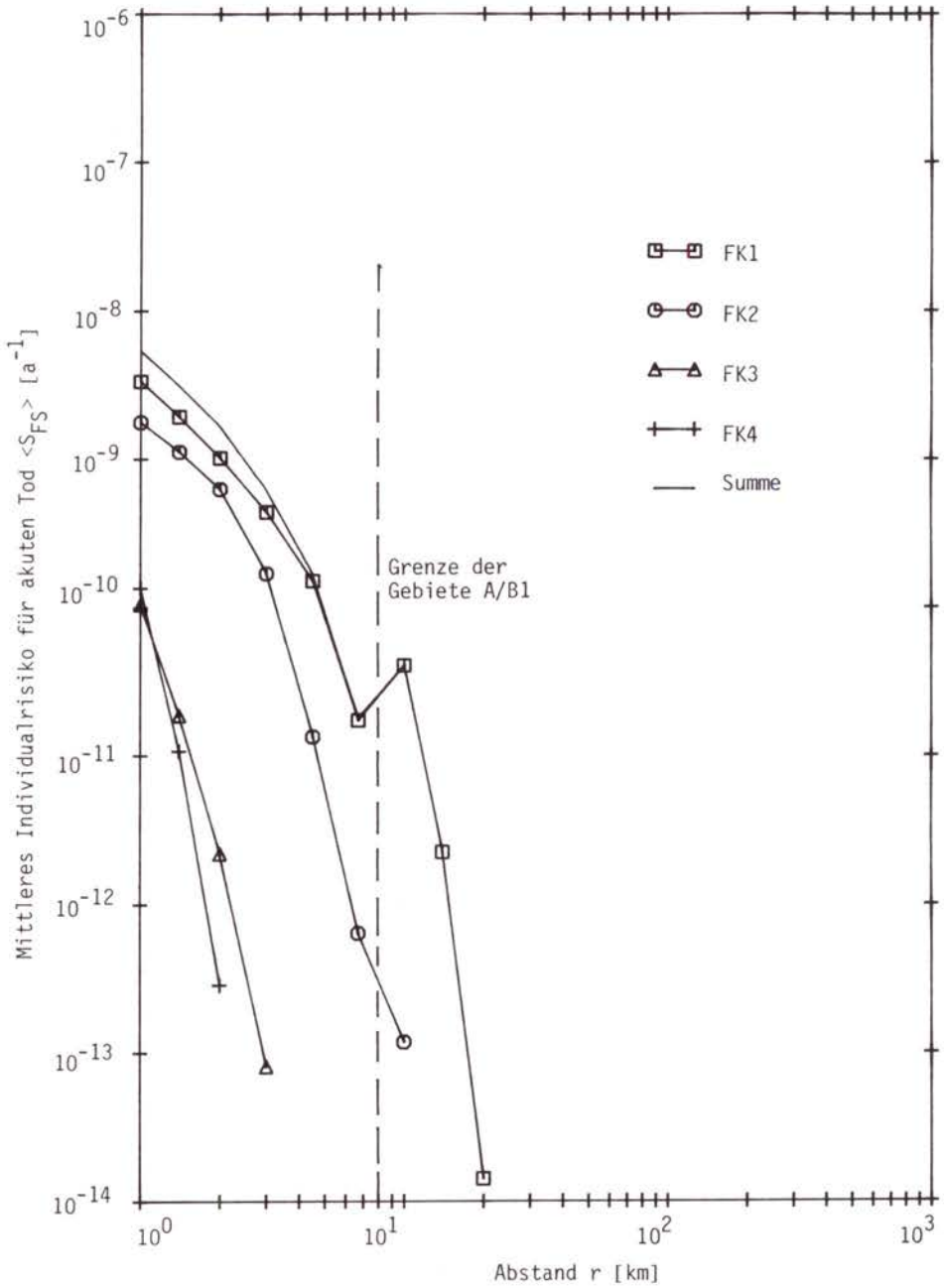


Bild F8, 8-17(1):

Abstandsabhängige mittlere Individualrisiken in der Schadensart akuter Tod (FS), normiert auf eine Anlage, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien

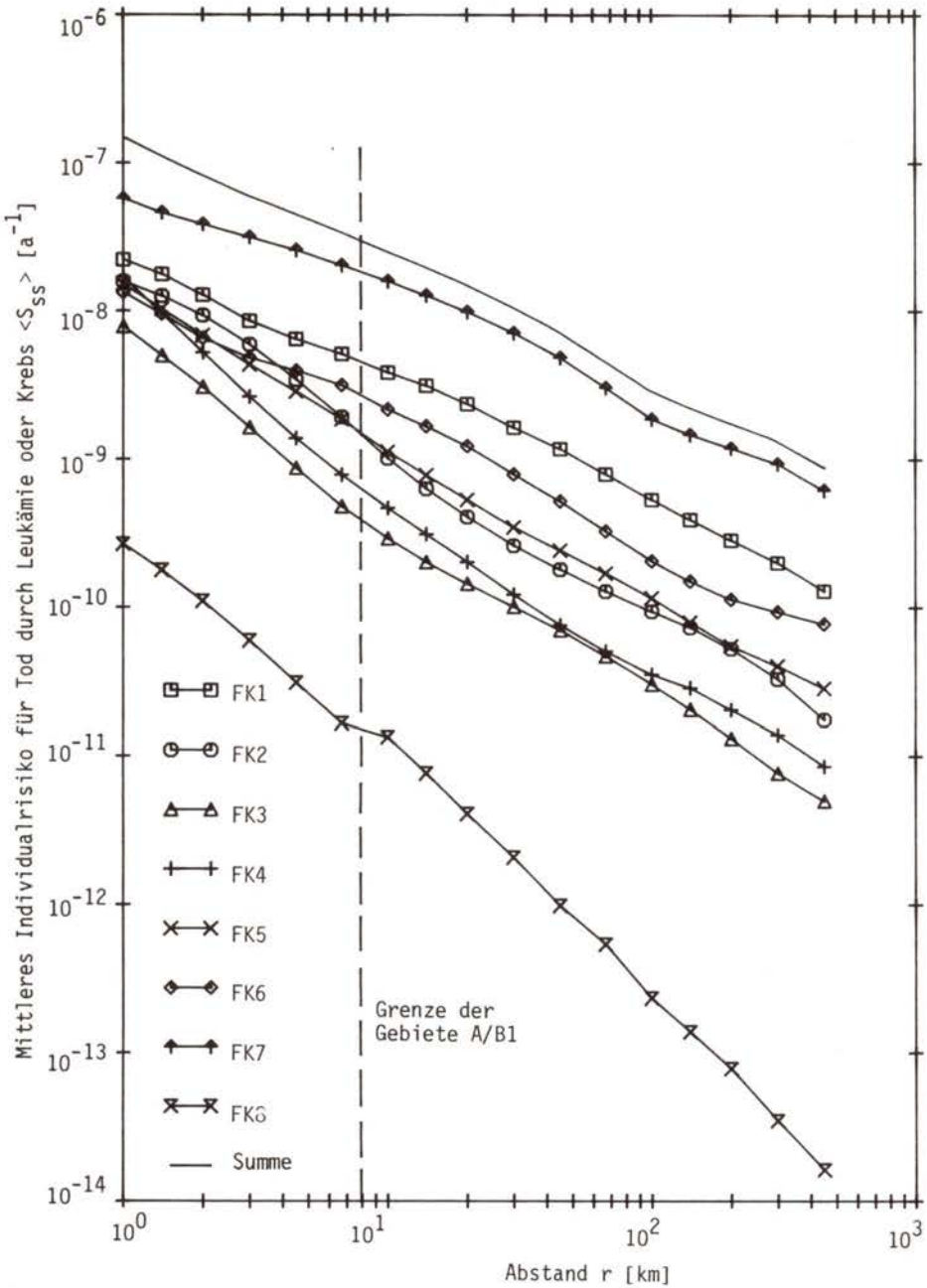


Bild F8, 8-17(2):

Abstandsabhängige mittlere Individualrisiken in der Schadensart Tod durch Leukämie oder Krebs (SS); normiert auf eine Anlage, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien

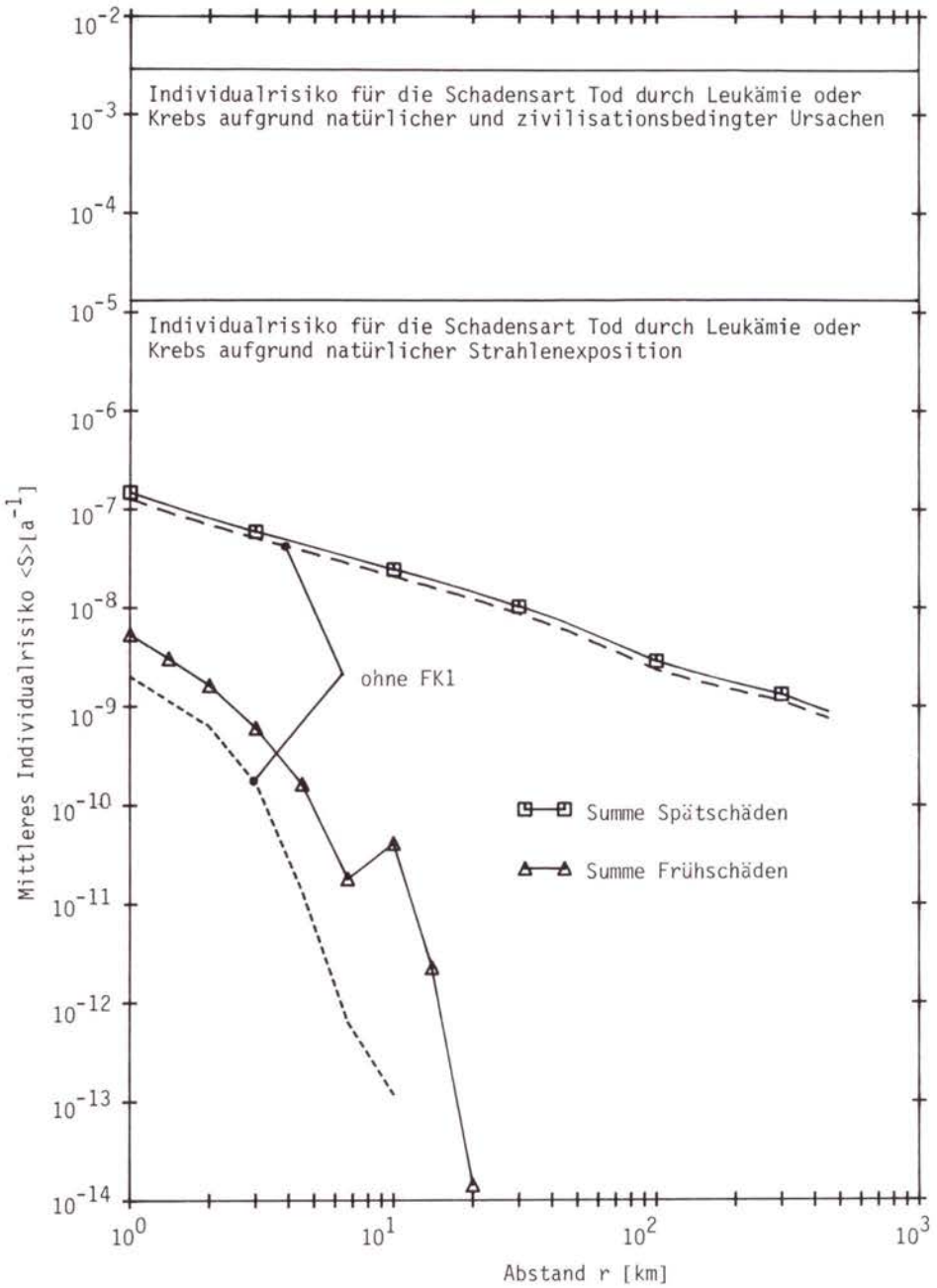


Bild F8, 8-17(3):

Abstandsabhängige mittlere Individualrisiken, normiert auf eine Anlage, und Vergleich mit mittleren Individualrisiken aufgrund natürlicher und zivilisationsbedingter Ursachen.

8.8.2 dargelegt wurde, sind die Frühschäden auf den Nahbereich um den Standort beschränkt. Das Frühschadensrisiko nimmt mit wachsender Entfernung sehr rasch kleine Werte an. Weniger steil verläuft der Erwartungswert für die Spätschäden, die Kurven sind ab etwa 10 km umgekehrt proportional zur Entfernung. Die Kurven für die einzelnen Freisetzungskategorien verlaufen ungefähr parallel und verhalten sich damit in ihrer relativen Lage zueinander wie die Zahlenwerte der Kollektivrisiken (Tabelle F8, 8-15).

In die Berechnung der Individualrisiken fließen die Aktivitätskonzentrationen und die Gegenmaßnahmen ein. Außerhalb eines engen Bereichs um die Quelle nimmt die mittlere Konzentration entsprechend den eben beschriebenen Gesetzmäßigkeiten und dem wachsenden Abstand von der Quelle ab. Da gleichzeitig im Mittel mit wachsendem Quellabstand auch der Umfang und damit die Wirksamkeit der Gegenmaßnahmen abnimmt, wird der Kurvenverlauf von 2 gegenläufigen Effekten bestimmt. Im Mittel ist die Abnahme der Konzentrationen wirkungsvoller als die Abnahme der Schutzmaßnahmen. Dies gilt jedoch nicht für die äußere Grenze des Gebiets A, die unabhängig vom Wetterablauf stets bei 8 km liegt. Deshalb ist in dieser Entfernung eine vom Modell her bedingte Zunahme des Individualrisikos möglich.

In der vorliegenden Studie wird hinsichtlich der Gegenmaßnahmen zwischen den 3 Gebietstypen "städtisch", "durchschnittlich besiedelt" und "ländlich" unterschieden. Ist die Kontamination hoch genug, so treten die Gebiete  $B_1$  oder  $B_2$  auf, in denen die Fahrzeit und damit die Expositionszeit von der Bevölkerungsdichte abhängt. Das Individualrisiko wird daher in jedem Entfernungsintervall für alle 3 Bevölkerungsdichten berechnet. Die in Bild F8, 8-17(1) und (2) gezeigten abstandsabhängigen Individualrisiken stellen einen Mittelwert über die 3 genannten Gebietstypen dar (Abschnitt 8.7).

Es wurde bereits erwähnt, daß sich die hier dargestellten abstandsabhängigen Individualrisiken auf eine Anlage beziehen. Für die Frühschäden ist diese Darstellungsweise richtig, da die

Abstände zwischen den einzelnen Standorten im allgemeinen erheblich größer als der Bereich dieses Risiko sind. Im Gegensatz dazu stellt die Kurve für das abstandsabhängige Individualrisiko für Spätschäden nur eine grobe Näherung dar, da jede der betrachteten 25 Reaktorblöcke in unterschiedlicher Weise zum Individualrisiko an jedem Ort der Bundesrepublik beiträgt.

Bei der Berechnung der abstandsabhängigen Individualrisiken wird mehrfach gemittelt. Es ist daher nicht sinnvoll, die Bilder F8, 8-17(1) bis (3) auf Einzelstandorte anzuwenden.

In Bild F8, 8-17(3) sind die Summenkurven der Individualrisiken mit und ohne Berücksichtigung der Freisetzungskategorie FK1 ("Dampfexplosion") dargestellt. Das abstandsabhängige Individualrisiko für Spätschäden kann mit dem (ortsunabhängigen) Individualrisiko für die Schadensart Leukämie und Krebs, die als Folge natürlicher und zivilisatorischer Ursachen entstehen, verglichen werden. Es beträgt bei einer mittleren Lebenserwartung von 71 Jahren (Abschnitt 8.8.3):

$$\langle S_{\text{nat}} \rangle = 0,2 \cdot \frac{1}{71a} = 2,8 \cdot 10^{-3}/a$$

Das Individualrisiko für die Schadensart Leukämie und Krebs aufgrund der natürlichen Strahlenexposition beträgt (Abschnitt 8.8.3):

$$\langle S_{\text{nat rad}} \rangle = 0,1 \frac{\text{rem}}{a} \cdot 1,25 \cdot 10^{-4}/\text{rem} = 1,25 \cdot 10^{-5}/a$$

Diese Werte sind ebenfalls in Bild F8, 8-17(3) eingezeichnet. Wie ersichtlich, liegen die unfallbedingten Individualrisiken um mehrere Zehnerpotenzen unter den Individualrisiken für Leukämie und Krebs aufgrund natürlicher und zivilisatorischer Ursachen.

8.9.3 Erwartungswerte der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen

Analog zur Darstellung der Kollektivrisiken für gesundheitliche Schäden im vorangegangenen Abschnitt sind in Tabelle F8, 8-17 und F8, 8-18 die Erwartungswerte der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen für die einzelnen Freisetzungskategorien sowie ihre Summe mit und ohne FK1 angegeben. Die Zahlenwerte beziehen sich wieder auf den Betrieb von 25 Reaktorblöcken des Referenztyps.

Freisetzungskategorie	Erwartungswert der Flächen $\langle F^{25} \rangle$ [km <sup>2</sup> a <sup>-1</sup> ]			
	Gebiet A $\langle F_A^{25} \rangle$	Gebiet B <sub>1</sub> $\langle F_{B_1}^{25} \rangle$	Gebiet B <sub>1</sub> +B <sub>2</sub> $\langle F_{B_1+B_2}^{25} \rangle$	Gebiet C $\langle F_C^{25} \rangle$
FK1	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
FK2	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
FK3	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$
FK4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0	0	$1,8 \cdot 10^{-4}$
FK5	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0	0	$1,4 \cdot 10^{-4}$
FK6	$5,8 \cdot 10^{-2}$	0	0	$1,5 \cdot 10^{-5}$
FK7	$8,3 \cdot 10^{-2}$	0	0	$9,2 \cdot 10^{-3}$
FK8	$8,3 \cdot 10^{-1}$	0	0	0
Summe	1,0	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$
Summe ohne FK1	$9,9 \cdot 10^{-1}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$

Tab. F8, 8-17:

Erwartungswerte der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen F für 25 Reaktorblöcke

Freisetzungskategorie	Erwartungswert der Personenzahl $\langle P^{25} \rangle$ [ $a^{-1}$ ]		
	Gebiet A $\langle P_A^{25} \rangle$	Gebiet $B_1+B_2$ $\langle P_{B_1+B_2}^{25} \rangle$	Gebiet C $\langle P_C^{25} \rangle$
FK1	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	8,2
FK2	$9,4 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	1,2
FK3	$9,4 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$
FK4	$4,7 \cdot 10^{-1}$	0	$3,5 \cdot 10^{-2}$
FK5	3	0	$1,7 \cdot 10^{-2}$
FK6	11	0	$9,8 \cdot 10^{-4}$
FK7	16	0	2,1
FK8	156	0	0
Summe	188	$2,9 \cdot 10^{-1}$	11,7
Summe ohne FK1	188	$3,1 \cdot 10^{-2}$	3,5

Tab. F8, 8-18:

Erwartungswerte der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Personen für 25 Reaktorblöcke

Entsprechend den verschiedenen Gegenmaßnahmen in den einzelnen Gebieten unterscheiden sich die Ergebnisse für das Gebiet A deutlich von denjenigen der Gebiete  $B_1$ ,  $B_1+B_2$  und C sowohl insgesamt als auch durch den Beitrag der einzelnen Freisetzungskategorien. Dieser Unterschied wird besonders deutlich in Tabelle F8, 8-19, in der die relativen Anteile der einzelnen Freisetzungskategorien an den von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen angegeben sind.

Das Gebiet A wird in jedem Fall, unabhängig von Dosiskriterien, evakuiert. Der Erwartungswert für die von der Gegenmaßnahme "Evakuierung" betroffenen Flächen berechnet sich darum als Produkt der Summeneintrittshäufigkeit aller Freisetzungskategorien bei 25 Reaktorblöcken ( $3 \cdot 10^{-2}/a$ ) und der Fläche des Gebiets A ( $33,3 \text{ km}^2$ ) zu  $\langle F_A \rangle \approx 1 \text{ km}^2/a$ .



Freisetzungskategorie	Erwartungswert der Flächen			Erwartungswert der Personen		
	Gebiet A [%]	Gebiet B <sub>1</sub> +B <sub>2</sub> [%]	Gebiet C [%]	Gebiet A [%]	Gebiet B <sub>1</sub> +B <sub>2</sub> [%]	Gebiet C [%]
FK1	0,2	90,0	68,0	0,2	89,5	70,1
FK2	<0,1	9,8	9,7	<0,1	10,3	10,5
FK3	<0,1	0,2	0,9	<0,1	0,2	0,9
FK4	0,3	0	0,4	0,3	0	0,3
FK5	1,7	0	0,3	1,7	0	0,2
FK6	5,8	0	<0,1	5,8	0	<0,1
FK7	8,4	0	20,6	8,4	0	17,9
FK8	83,6	0		83,6	0	0

Tab. F8, 8-19:

Relative Anteile der einzelnen Freisetzungskategorien an den Erwartungswerten der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen

Die von den Gegenmaßnahmen "Schnelle Umsiedlung" und "Umsiedlung" betroffenen Flächen und Personen der Gebiete  $B_1$ ,  $B_1+B_2$  und C ergeben sich aufgrund von Dosiskriterien und sind darum wesentlich abhängig von den freigesetzten Aktivitäten. Darum dominiert bei den diesbezüglichen Erwartungswerten wiederum der Beitrag der Freisetzungskategorie FK1. Insgesamt sind die Erwartungswerte für Flächen und Personen der Gebiete  $B_1$ ,  $B_1+B_2$  und C deutlich niedriger als beim Gebiet A. Wie schon in Abschnitt 8.8.5 dargestellt, ist die Ausbildung eines Gebiets  $B_1$  und damit die Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" nur bei den Freisetzungskategorien FK1, FK2 und FK3 zu erwarten.

#### 8.10 Beiträge der verschiedenen Krebsarten und Expositionspfade zu den Kollektivschäden

Eine Übersicht über die Beiträge der verschiedenen Krebsarten und Expositionspfade zu den Kollektivschäden geben die in den Tabellen F8, 8-20 (Frühschäden) und F8, 8-21(1) bis (9) (somatische Spätschäden) zusammengestellten Zahlenwerte. Die angewendeten Berechnungsverfahren sind in Abschnitt 8.7 beschrieben.

Bei den Frühschäden, die nur auf der Knochenmarkdosis und der daraus resultierenden Schadensart Leukämie basierend ermittelt wurden, dominiert bei allen betroffenen Freisetzungskategorien der Expositionspfad "Bodenstrahlung". Vor allem bei FK1 werden nahezu alle Frühschäden von diesem Belastungspfad verursacht. Dieser hohe Anteil der Bodenstrahlung an der Zahl der Leukämiefälle korrespondiert mit der Tatsache, daß große Frühschäden immer dann auftreten, wenn sich die Aktivitätsfahne im Nahbereich über Sektoren hoher Bevölkerungsdichte befindet und es dort gleichzeitig regnet, so daß hohe Aktivitätskonzentrationen am Boden resultieren.

Die Beiträge der Spätschäden sind aufgeteilt in 6 Krebsarten und 6 Belastungspfade. Gemittelt über alle Freisetzungskategorien (Tabelle F8, 8-21(1)), dominiert als organspezifische

Freisetzungskategorie	Wolkenstrahlung [%]	Bodenstrahlung [%]	Inhalation aus der Wolke [%]
FK1	2,3	96,2	1,5
FK2	9,1	66,4	24,5
FK3	16,8	50,2	33,0
FK4	24,4	46,6	29,0
FK5	0	0	0
FK6	0	0	0
FK7	0	0	0
FK8	0	0	0

Tab. F8, 8-20:

Anteile der Expositionspfade an den Frühschäden durch die einzelnen Freisetzungskategorien, aufgeschlüsselt aufgrund der Dosisbeiträge

Krebserkrankung der Lungenkrebs (18 %), gefolgt von Schilddrüsenkrebs und Brustkrebs (16 %). Auf andere Krebserkrankungen entfallen über 30 % der Fälle. Bei den Expositionspfaden überwiegt mit 52 % die Ingestion, gefolgt von der langfristigen Bodenstrahlung (36 %) und der Inhalation aus der Wolke (6 %).

Die Aufschlüsselung der Beiträge nach den einzelnen Freisetzungskategorien (Tabellen F8, 8-21(2) bis (9)) zeigt ein etwas differenzierteres Bild, da sich die Gewichte sowohl bei den Krebsarten als auch bei den Expositionspfaden verschieben. Von FK1 bis FK3 dominiert der Anteil der langfristigen Bodenstrahlung (über 50 %) und nimmt dann auf etwa 7 % ab (FK8). Dagegen steigt der Anteil des Ingestionspfades von etwa 9 % (FK1) auf etwa 60 % an (FK8) mit einem Maximum bei FK6 von 80 %.

Ebenso geht der Anteil von Lungenkrebs an den Schadensarten von etwa 34 % bei FK1 auf 13 % bei FK8 zurück (Minimum von 6 % bei FK6), dagegen steigt der Beitrag durch Schilddrüsenkrebs von ca. 9 % auf 18 % (Maximum von 63 % bei FK6).

Expositionspfad	Krebsart						Teilsumme
	Leukämie	Knochenkrebs	Lungenkrebs	Schilddrüsenkrebs	Brustkrebs	Andere Krebsarten	
Wolkenstrahlung	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,05	0,13
Bodenstrahlung (0 - 7 d)	0,30	0,08	0,23	0,06	0,31	0,61	1,58
Bodenstrahlung (> 7 d)	6,66	1,75	5,26	1,38	7,00	13,98	36,04
Inhalation aus der Wolke	0,08	0,03	3,04	2,66	0,15	0,29	6,25
Inhalation nach Resuspension	0,06	0,03	3,02	0,01	0,11	0,23	3,46
Ingestion	7,57	2,07	6,61	11,96	8,11	16,22	52,54
Teilsumme	14,70	3,96	18,19	16,07	15,70	31,39	100,00

Tab. F8, 8-21(1):

Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden, gemittelt über alle Freisetzungskategorien

Expositionspfad	Krebsart						Teilsumme
	Leukämie	Knochenkrebs	Lungenkrebs	Schilddrüsenkrebs	Brustkrebs	Andere Krebsarten	
Wolkenstrahlung	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,07	0,17
Bodenstrahlung (0 - 7 d)	0,76	0,20	0,59	0,16	0,78	1,57	0,05
Bodenstrahlung (> 7 d)	10,01	2,63	7,92	2,08	10,53	21,06	54,23
Inhalation aus der Wolke	0,19	0,07	12,06	5,23	0,42	0,84	18,82
Inhalation nach Resuspension	0,13	0,07	12,21	0,02	0,33	0,65	13,41
Ingestion	1,76	0,84	1,02	1,46	1,42	2,83	9,33
Teilsumme	12,87	3,82	33,82	8,96	13,51	27,02	100,00

Tab. F8, 8-21(2):

Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK1

Expositionspfad	Krebsart						Teilsumme
	Leukämie	Knochenkrebs	Lungenkrebs	Schilddrüsenkrebs	Brustkrebs	Andere Krebsarten	
Wolkenstrahlung	0,04	0,01	0,03	0,01	0,04	0,07	0,19
Bodenstrahlung (0 - 7 d)	0,64	0,17	0,50	0,13	0,66	1,33	3,43
Bodenstrahlung (> 7 d)	12,75	3,36	10,05	2,64	13,38	26,75	68,93
Inhalation aus der Wolke	0,25	0,10	3,14	7,55	0,33	0,66	12,02
Inhalation nach Resuspension	0,16	0,09	1,92	0,02	0,19	0,37	2,74
Ingestion	2,52	1,17	1,51	1,28	2,07	4,14	12,69
Teilsumme	16,36	4,90	17,14	11,63	16,67	33,32	100,00

Tab. F8, 8-21(3):

Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK2

Expositionspfad	Krebsart						Teilsumme
	Leukämie	Knochenkrebs	Lungenkrebs	Schilddrüsenkrebs	Brustkrebs	Andere Krebsarten	
Wolkenstrahlung	0,05	0,01	0,04	0,01	0,05	0,10	0,26
Bodenstrahlung (0 - 7 d)	0,42	0,11	0,32	0,09	0,43	0,87	2,25
Bodenstrahlung (> 7 d)	10,10	2,66	7,97	2,09	10,59	21,17	54,59
Inhalation aus der Wolke	0,15	0,06	2,31	4,94	0,21	0,42	8,09
Inhalation nach Resuspension	0,14	0,07	1,94	0,01	0,17	0,34	2,68
Ingestion	5,53	1,97	4,19	4,44	5,34	10,67	32,14
Teilsumme	16,40	4,88	16,77	11,58	16,79	33,57	100,00

Tab. F8, 8-21(4):

Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK3

Expositionspfad	Krebsart						Teilsumme
	Leukämie	Knochenkrebs	Lungenkrebs	Schilddrüsenkrebs	Brustkrebs	Andere Krebsarten	
Wolkenstrahlung	0,13	0,03	0,09	0,02	0,12	0,24	0,64
Bodenstrahlung (0 - 7 d)	0,30	0,08	0,23	0,06	0,31	0,61	1,59
Bodenstrahlung (> 7 d)	4,46	1,18	3,52	0,93	4,68	9,36	24,12
Inhalation aus der Wolke	0,06	0,02	0,99	4,87	0,09	0,19	6,24
Inhalation nach Resuspension	0,06	0,03	0,89	0,01	0,08	0,15	1,22
Ingestion	9,47	2,72	8,08	15,97	9,98	19,97	66,20
Teilsumme	14,48	4,07	13,80	21,86	15,26	30,53	100,00

Tab. F8, 8-21(5):

Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK4



Expositionspfad	Krebsart						Teilsumme
	Leukämie	Knochenkrebs	Lungenkrebs	Schilddrüsenkrebs	Brustkrebs	Andere Krebsarten	
Wolkenstrahlung	0,09	0,03	0,05	0,02	0,07	0,15	0,40
Bodenstrahlung (0 - 7 d)	0,31	0,08	0,24	0,07	0,32	0,64	1,66
Bodenstrahlung (> 7 d)	2,56	0,67	2,01	0,53	2,67	5,35	13,80
Inhalation aus der Wolke	0,03	0,01	0,54	5,40	0,05	0,11	6,16
Inhalation nach Resuspension	0,03	0,02	0,55	0,00	0,04	0,09	0,73
Ingestion	7,38	2,06	6,39	37,74	7,90	15,80	77,26
Teilsumme	10,41	2,87	9,78	43,76	11,06	22,13	100,00

Tab. F8, 8-21(6):

Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK5

Expositions-pfad	Krebsart						Teil-summe
	Leukämie	Knochen-krebs	Lungen-krebs	Schilddrüsen-krebs	Brust-krebs	Andere Krebsarten	
Wolkenstrahlung	0,14	0,04	0,07	0,02	0,11	0,21	0,58
Bodenstrahlung (0 - 7 d)	0,39	0,10	0,30	0,08	0,40	0,81	2,09
Bodenstrahlung (> 7 d)	1,63	0,43	1,28	0,34	1,70	3,41	8,79
Inhalation aus der Wolke	0,03	0,01	0,40	7,26	0,05	0,09	7,83
Inhalation nach Resuspension	0,02	0,01	0,39	0,00	0,03	0,05	0,50
Ingestion	4,56	1,26	3,97	55,55	4,95	9,91	80,21
Teilsomme	6,77	1,85	6,42	63,25	7,27	14,44	100,00

Tab. F8, 8-21(7):

Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK6

Expositionspfad	Krebsart						Teilsumme
	Leukämie	Knochenkrebs	Lungenkrebs	Schilddrüsenkrebs	Brustkrebs	Andere Krebsarten	
Wolkenstrahlung	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03
Bodenstrahlung (0 - 7 d)	0,08	0,02	0,07	0,02	0,09	0,17	0,45
Bodenstrahlung (> 7 d)	5,92	1,56	4,67	1,23	6,21	12,42	32,00
Inhalation aus der Wolke	0,04	0,01	0,06	0,60	0,05	0,10	0,85
Inhalation nach Resuspension	0,03	0,01	0,04	0,01	0,04	0,08	0,21
Ingestion	10,49	2,68	9,41	9,53	11,45	22,90	66,47
Teilsomme	16,57	4,28	14,24	11,39	17,84	35,68	100,00

Tab. F8, 8-21(8):

Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK7

Expositionspfad	Krebsart						Teilsumme
	Leukämie	Knochenkrebs	Lungenkrebs	Schilddrüsenkrebs	Brustkrebs	Andere Krebsarten	
Wolkenstrahlung	5,96	1,60	4,38	1,18	6,02	12,04	31,18
Bodenstrahlung (0 - 7 d)	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,06	0,15
Bodenstrahlung (> 7 d)	1,39	0,37	1,10	0,29	1,46	2,91	7,52
Inhalation aus der Wolke	0,15	0,02	0,06	0,33	0,10	0,20	0,87
Inhalation nach Resuspension	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,05
Ingestion	8,13	2,08	7,30	16,00	8,90	17,81	60,23
Teilsumme	15,67	4,08	12,87	17,81	16,52	33,05	100,00

Tab. F8, 8-21(9):

Relative Aufteilung der Spätschäden nach Krebsarten und Expositionspfaden für die Freisetzungskategorie FK8

Diese von den Freisetzungskategorien abhängigen Variationen in der relativen Aufteilung der Spätschäden resultieren aus dem Spektrum der jeweils freigesetzten Radionuklide und den wirksamen Gegenmaßnahmen, die u.a. von den freigesetzten Aktivitäten abhängen. In diesem Zusammenhang kann die FK1 als diejenige Freisetzungskategorie charakterisiert werden, welche die umfanglichsten Schutz- und Gegenmaßnahmen zur Folge hat, während FK8 die geringsten Maßnahmen erforderlich macht. Die Freisetzungskategorien FK5 und FK6 weisen im Vergleich zu den anderen Radionukliden hohe Freisetzung an Jod auf, was bei den übrigen Freisetzungskategorien nicht der Fall ist. Darum überwiegt bei FK5 und insbesondere bei FK6 die Schadensart Schilddrüsenkrebs und der Expositionspfad Ingestion.

Eine ähnliche Struktur zeigt die in Tabelle F8, 8-22 angegebene relative Aufteilung der genetisch signifikanten Dosis nach Belastungspfaden. Insgesamt überwiegen die Beiträge der Ingestion (etwa 60 %) und der Bodenstrahlung (etwa 37 %). Ähnlich wie bei den Spätschäden nimmt der Beitrag des Expositionspfades "Bodenstrahlung" von etwa 76 % bei FK1 auf rd. 7 % bei FK8 ab, dagegen erhöht sich der Anteil der "Ingestion" von etwa 15 % auf rd. 62 % (Maximum bei FK5 mit 79 %).

Freisetzungskategorie	Wolkenstrahlung	Bodenstrahlung (0 - 7 d)	Bodenstrahlung (> 7 d)	Inhalation aus der Wolke	Inhalation nach Resuspension	Ingestion	Summe
FK1	0,25	5,79	76,32	1,68	0,74	15,22	100
FK2	0,22	3,89	75,87	1,81	0,74	17,47	100
FK3	0,27	2,32	54,66	0,98	0,56	41,20	100
FK4	0,64	1,56	23,17	0,39	0,24	74,00	100
FK5	0,48	2,16	17,84	0,26	0,17	79,08	100
FK6	1,09	4,19	17,56	0,27	0,15	76,75	100
FK7	0,02	0,38	26,23	0,32	0,26	72,79	100
FK8	30,04	0,14	6,81	0,48	0,07	62,46	100
Alle Freisetzungskategorien	0,13	1,70	36,94	0,62	0,36	60,24	100

Tab. F8, 8-22:

Relative Aufteilung der genetisch signifikanten Dosis nach Expositionspfaden

## 9. AUSSAGESICHERHEIT DER ERGEBNISSE

### 9.1 Einführung

#### 9.1.1 Schätzunsicherheiten

Die quantitativen Aussagen der vorliegenden Studie sind das Ergebnis umfangreicher rechnerischer Unfallsimulationen, die an zahlreichen Stellen Schätzungen enthalten. Deshalb stellt sich die Frage nach der Aussagesicherheit.

Die wichtigsten Aussagen werden in der Form komplementärer Häufigkeitsverteilungen<sup>1)</sup> gemacht. Die Häufigkeit, die man zu einem bestimmten Schadensumfang X aus diesen Verteilungen abliest, ist die Summe der Häufigkeiten all jener simulierten Unfallabläufe, die laut Rechnung zu Schäden vom Umfang  $\geq X$  führen. Sowohl die errechnete zu erwartende Häufigkeit als auch der errechnete zu erwartende Schadensumfang eines simulierten Unfallablaufes sind aufgrund der enthaltenen Schätzungen mit Schätzunsicherheiten behaftet. Als Folge davon ist nicht nur eine Häufigkeitsverteilung, sondern eine ganze Schar von Häufigkeitsverteilungen zu betrachten. Schätzunsicherheiten ergeben sich aus

- ungenauer Kenntnis fester oder für den betrachteten Zeitraum als fest vorausgesetzter Größen wie Wahrscheinlichkeiten, zu erwartende Häufigkeiten, Mittelwerte allgemein, sogenannte Bestwerte usw.;
- genäherter funktionaler Beschreibung von Gesetzmäßigkeiten in Ereignis- und Expositionsabläufen. Zu diesen Gesetzmäßigkeiten zählen z.B. auch die Zufallsgesetze, ausgedrückt durch Verteilungsfunktionen (etwa die Exponentialverteilung für die Lebensdauer von Komponenten) oder reduziert auf Erwartungswerte.

Wählt man z.B. einen anderen Wert für eine an sich feste, aber ungenau bekannte Größe oder eine andere funktionale Beschreibung für eine ungenau bekannte Gesetzmäßigkeit, so liefert die Rech-

---

<sup>1)</sup> Im folgenden wird der Kürze wegen oft nur die Bezeichnung "Häufigkeit" benutzt. Gemeint ist damit aber stets die "zu erwartende Häufigkeit pro Jahr (bzw. pro Reaktorjahr)".

nung für einen oder mehrere Unfallabläufe eine andere Häufigkeit oder einen anderen Schadensumfang und somit auch eine andere komplementäre Häufigkeitsverteilung. Aus diesem Grunde ist es notwendig, die Aussagen der Studie um die Quantifikation des Einflusses der Schätzunsicherheiten zu ergänzen. Die bloße Angabe von Bereichen, ohne Hinweis darauf, mit welcher (wenn auch subjektiven) Sicherheit der zutreffende Wert im angegebenen Bereich liegt, genügt dabei nicht. Als geeignetes Werkzeug zur quantitativen, formalen Modellierung und Fortpflanzung der Schätzunsicherheiten sowie zur Quantifikation ihres Einflusses auf die Ergebnisse stehen die Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung zur Verfügung.

#### 9.1.2 Quantifikation und probabilistisch-mathematische Modellierung von Schätzunsicherheiten

Hierzu wird eine feste, aber ungenau bekannte Größe  $\tilde{\theta}$  als Zufallsgröße  $\theta$  aufgefaßt im Sinne des sogenannten subjektivistischen Wahrscheinlichkeitsbegriffs /F8, 9-1/, so daß die Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung anwendbar werden. Es läßt sich dann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung konstruieren, die das Maß der Unsicherheit der Schätzung der festen, aber ungenau bekannten Größe ausdrückt, also zu ihrer Quantifikation dient. Im Gegensatz zur traditionellen oder frequentistischen Interpretation der Wahrscheinlichkeit ( $\equiv$  relative Häufigkeit in einer langen Versuchsreihe) versteht man im Sinne der subjektivistischen Auffassung die Wahrscheinlichkeit als den "Grad des Fürwahrhaltens" eines Sachverhalts oder als das "Maß an Intensität", mit der der Beurteilende aufgrund geeigneter Informationsinhalte, z.B. seiner Fachkenntnisse, seines Sachverständes und seiner Erfahrung, einen Sachverhalt für zutreffend hält /F8, 9-2/.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $F(\theta)$  einer ungenau bekannten, aber festen Größe  $\tilde{\theta}$  bringt somit zum Ausdruck, mit welcher Intensität " $\tilde{\theta} \leq \theta$ " für zutreffend gehalten wird. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f(\theta)$  dieser Größe kann daher gemäß dem subjektivistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff interpretiert wer-



den durch

$$\int_a^b f(\theta) d\theta = \text{Ma\ss an Intensit\at, mit der } \tilde{\theta} \in [a,b] \text{ f\ur zutreffend gehalten wird,}$$

= (subjektive) Sicherheit der Aussage: "Der zutreffende Wert von  $\theta$  liegt in  $[a,b]$ ".

Worauf gr\undet nun konkret die "(subjektive) Sicherheit der Aussage" oder der "Grad des F\urwahrhaltens"? Dazu ein Beispiel:

Es wird angenommen, da\ss das zuf\allige Ausfallverhalten einer Komponente durch das Zufallsgesetz "Exponentialverteilung" beschrieben werden kann. Die Ungewi\ssheit dar\uber, wann die Komponente ausf\allt oder ob sie bei Anforderung im Verlauf des Unfalles in ausgefallenem Zustand angetroffen wird, ist Bestandteil des zu quantifizierenden Risikos, also Gegenstand der Risikorechnung und kommt deshalb nicht in Angaben zur Aussagesicherheit zum Ausdruck. Anders verh\alt es sich aber mit dem Parameter  $\tilde{\lambda}$  (Ausfallrate) der Exponentialverteilung zur Beschreibung des zuf\alligen Ausfallverhaltens. Gem\ab Voraussetzung ist er eine feste Gr\o\sse, die allerdings ungenau bekannt ist. In der Risikorechnung geht somit eine Sch\atzung  $\hat{\lambda}$  von  $\tilde{\lambda}$  ein. Nun liegt h\aufig nicht eine Sch\atzung  $\hat{\lambda}$  f\ur genau die interessierende Komponente unter genau den interessierenden Umgebungsbedingungen vor, sondern ein Satz von Sch\atzungen  $\hat{\lambda}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  zu \uahnlichen Komponenten unter mehr oder weniger verwandten Umgebungsbedingungen. Diese Sch\atzwerte weichen oft stark voneinander ab. Sie beschreiben eine empirische Verteilung, durch die die Unsicherheit der Sch\atzung des Parameters  $\tilde{\lambda}$  zum Ausdruck kommt. Die Verteilung dr\uckt also nicht nur die statistische Variation der Sch\atzung (aus endlich vielen Beobachtungen der gleichen Grundgesamtheit) aus, sondern auch die Variation, die durch die verschiedenen Grundgesamtheiten, aus denen die Beobachtungen stammen, bedingt ist. Um die Unsicherheit in der Sch\atzung von  $\tilde{\lambda}$  mit den Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung weiterverarbeiten zu k\onnen, wird  $\tilde{\lambda}$  als (z.B. logarithmisch normalverteilte) Zufallsgr\o\sse  $\Lambda$  und der Satz von Sch\atzwerten  $\hat{\lambda}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  als Stichprobe aus der Verteilung von  $\Lambda$  aufgefa\st. Aus der empirischen Verteilung zu den  $\hat{\lambda}_i$  wird eine Wahr-

scheinlichkeitsverteilung ermittelt, deren Dichtefunktion als Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(\lambda)$  dient. Sie gestattet, die oben erwähnte (subjektive) Sicherheit der Aussage " $\tilde{\lambda} \in [a, b]$ " bzw. den 'Grad des Fürwahrhaltens von " $\tilde{\lambda} \in [a, b]$ " in Zahlen auszudrücken. So ist z.B. durch die Fraktilen  $\lambda_5$  und  $\lambda_{95}$  wegen  $\int_{\lambda_5}^{\lambda_{95}} f(\lambda) d\lambda = 0,9$  ein Vertrauensintervall gegeben, das den zutreffenden Wert von  $\Lambda$  mit 90 % Aussagesicherheit enthält. Vertrauensintervall bzw. Aussagesicherheit sind hier als subjektiv zu bezeichnen, da sie nicht auf Stichprobenevidenz aus genau der Grundgesamtheit, zu der  $\tilde{\lambda}$  angegeben werden soll, geschätzt wurden, sondern ein entscheidendes Maß an Expertenurteil enthalten (z.B. über die Eignung der Schätzwerte  $\hat{\lambda}_i, i = 1, 2, \dots, m$  aus unterschiedlichen Grundgesamtheiten). Die Aussagesicherheit, hier 90 %, darf (wie allgemein in der Statistik) nicht mit der Wahrscheinlichkeit verwechselt werden, mit der der zutreffende Wert der ungenau bekannten, aber festen Größe  $\tilde{\lambda}$  wirklich in  $(\lambda_5, \lambda_{95})$  liegt. Diese Wahrscheinlichkeit ist natürlich stets entweder 0 oder 1.

Nicht alle Verteilungen zur Quantifikation von Schätzunsicherheiten, die bei der Ermittlung der Aussagesicherheit der Ergebnisse der Studie Verwendung fanden, sind Näherungen an empirische Verteilungen von Schätzwerten aus Beobachtungen an den eigentlichen oder an verwandten Objekten. Manchen liegt um einiges mehr Expertenurteil zugrunde.

### 9.1.3 Fortpflanzung von Schätzunsicherheiten und Darstellung des Einflusses auf das Ergebnis

Die quantifizierten und mathematisch modellierten Schätzunsicherheiten in zu erwartenden Häufigkeiten auslösender Ereignisse sowie in Ausfallraten und Ausfallwahrscheinlichkeiten usw. wurden nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung durch die wichtigsten Pfade in Fehlerbäumen und Ereignisablaufdiagrammen fortgepflanzt bis hin zur Häufigkeit des betrachteten Ereignisablaufs. An sich ist auch diese zu erwartende Häufigkeit nach Voraussetzung eine feste Größe. Die Tatsache, daß sie z.B. auf-

grund der ungenauen Kenntnis der beteiligten Ausfallraten ungenau bekannt ist, kommt nun, dank des Einsatzes der Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung, in Form einer subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilung zum Ausdruck. Ihre Dichte  $f(\theta)$  gibt zu beliebigem Intervall  $[a,b]$  an, mit welcher Intensität  $(\int_a^b f(\theta) d\theta)$  der zutreffende Wert in der zu erwartenden Häufigkeit als enthalten anzusehen ist, und zwar als zwingende Folge der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der beteiligten Ausfallraten sowie als zwingende Folge der Logik des betrachteten Ereignisablaufes und der analysierten Fehlerbäume. Die Verteilung der zu erwartenden Häufigkeit des Ereignisablaufes gestattet also die Angabe von subjektiven Vertrauensintervallen, einschließlich der damit verbundenen Aussagesicherheit, für die Lage des zutreffenden Wertes. Eventuelle Unsicherheiten in der Logik der Fehlerbäume wurden nicht quantifiziert und können daher auch nicht im Vertrauensintervall zum Ausdruck kommen.

Der eben skizzierte Teil der Fortpflanzung von Schätzunsicherheiten wird im Fachband 2 im Zusammenhang mit der Ermittlung der zu erwartenden Häufigkeiten von Ereignisabläufen, die relevante Beiträge zur Freisetzungshäufigkeit liefern, näher beschrieben. Diese Beiträge werden unter Verwendung ihrer subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen nach den Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu den (zu erwartenden) Freisetzungshäufigkeiten der einzelnen Kategorien zusammengefaßt. Als Ergebnis liegen damit auch für diese Größen subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilungen vor. Sie gestatten, zu beliebigem Intervall  $[a,b]$  die Intensität anzugeben, mit welcher der zutreffende Wert der Freisetzungshäufigkeit als in  $[a,b]$  enthalten anzusehen ist, und zwar wieder als zwingende Folge der vorausgegangenen Quantifikationen und logischen Verknüpfungen. Eventuelle Unsicherheiten in der Logik der Ereignisablaufdiagramme (z.B. Frage der Vollständigkeit) wurden nicht quantifiziert und können daher auch nicht in den Vertrauensintervallen zum Ausdruck kommen. Der eben skizzierte Teil der Fehlerfortpflanzung wird im anschließenden Abschnitt 9.2 beschrieben.

Auch für verschiedene wichtige feste, aber ungenau bekannte Größen des Unfallfolgenmodells (das die Expositionsabläufe rechnerisch simuliert) wurden subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilungen nach den Fraktilangaben der befragten Experten konstruiert (Abschnitt 9.2) und durch die Logik des Unfallfolgenmodells mit Hilfe eines Näherungsausdrucks (Abschnitt 9.3) fortgepflanzt.

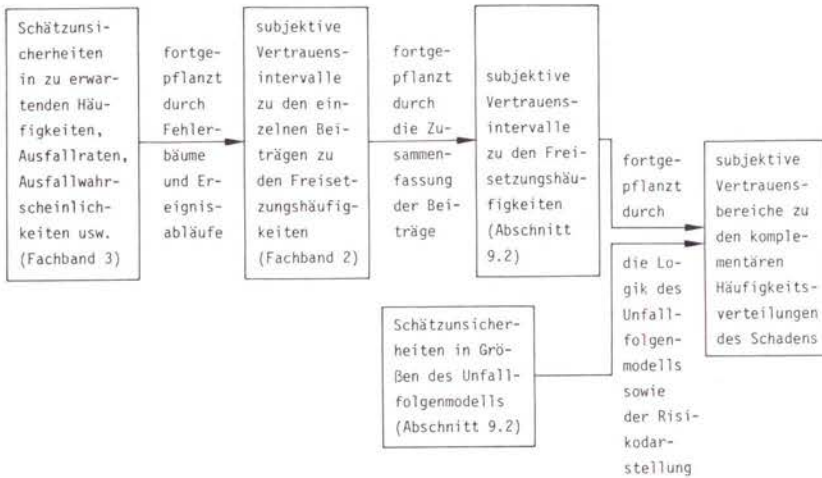


Bild F8, 9-1:

Fortpflanzung von Schätzunsicherheiten durch die Risiko-rechnung

Als Ergebnis der Quantifikation von Schätzunsicherheiten und ihrer Fortpflanzung durch Ereignis- und Expositionsabläufe mit den Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung werden Scharen von komplementären Häufigkeitsverteilungen erhalten, von denen jede als möglicherweise zutreffend anzusehen ist. Es ließe sich also ein Bereich im (Schadensumfang, Häufigkeit)-Diagramm angeben, in dem die zutreffende Häufigkeitsverteilung mit z.B. 90 % subjektiver Aussagesicherheit verläuft. Dies wäre ein globaler subjektiver 90-%-Vertrauensbereich. Man kann aber auch auf Geraden, parallel zur Häufigkeits- oder Schadensachse (also

zu festem Wert  $H^*$  oder  $X^*$ , Bild F8, 9-2) subjektive Vertrauensintervalle angeben, die als "lokal" zu bezeichnen sind. Diese Form der Darstellung des Einflusses von Schätzunsicherheiten ist völlig ausreichend für die Aussage der komplementären Häufigkeitsverteilung und wurde deshalb in der vorliegenden Studie gewählt. Aus lokalen Vertrauensintervallen können folgende Auskünfte abgelesen werden:

- 90%-Vertrauensintervall der Häufigkeit  $H$ :

Es gibt zu festem Schadensumfang  $X^*$  den Wertebereich an, in dem mit 90 % Aussagesicherheit die zutreffende Häufigkeit liegt, mit der ein Schaden vom Umfang größer oder gleich  $X^*$  verursacht wird (vertikal, gestrichelt in Bild F8, 9-2).

- 90%-Vertrauensintervall des Schadensumfangs  $X$ :

Es gibt zu fester Häufigkeit  $H^*$  den Wertebereich an, in dem mit 90 % Aussagesicherheit der zutreffende Schadensumfang liegt, der mit der Häufigkeit  $H^*$  erreicht oder überschritten wird (horizontal, gestrichelt in Bild F8, 9-2).

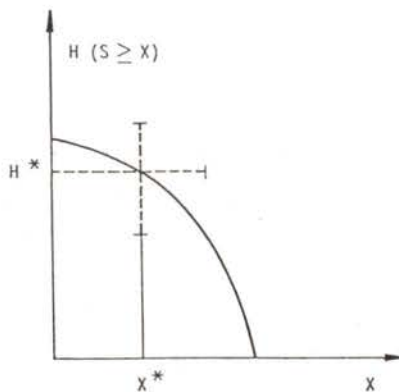


Bild F8, 9-2:

Lage lokaler Vertrauensintervalle  
zu Häufigkeit und Schadensumfang

Der Kürze wegen werden in den folgenden Abschnitten die festen, aber ungenau bekannten Größen der Risikorechnung als "unsichere Parameter" bezeichnet.

## 9.2 Auswahl der unsicheren Parameter und Quantifizierung der Unsicherheit

### 9.2.1 Die gewählten unsicheren Parameter und die Interpretation ihrer quantifizierten Schätzunsicherheit

Aus der Menge aller denkbaren unsicheren Parameter wurden für die Durchführung der Analyse folgende für besonders wichtig erachtete Parameter ausgewählt:

- zu erwartende Freisetzungshäufigkeiten (pro Reaktorjahr) zu den Freisetzungskategorien 1 bis 8;
- thermische Energiefreisetzungsraten in den Freisetzungskategorien 1, 2, 5 (3. Phase), 6 (3. Phase) und 7;
- errechnete Aufstiegshöhe der Aktivitätsfahne;
- trockene Ablagerungsgeschwindigkeiten für Jod und Aerosole;
- "washout"-Koeffizient der nassen Ablagerung bei drei verschiedenen Regenratenklassen;
- Zeitintervall zwischen dem Erkennen der bevorstehenden Freisetzung und dem "Aufsuchen von Häusern";
- prozentualer Bevölkerungsanteil im Freien vor dem "Aufsuchen von Häusern";
- prozentualer Bevölkerungsanteil, der über die obengenannte Zeitspanne hinaus im Freien bleibt;
- Dosis/Wirkungs-Beziehung für frühe Todesfälle;
- Dosis/Wirkungs-Beziehung für späte Todesfälle.

Die in der Risikorechnung verwendeten Werte dieser unsicheren Parameter sind folgendermaßen zu interpretieren:

- Zu erwartende Freisetzungshäufigkeit:

"Bester" Schätzwert der mittleren zu erwartenden Freisetzungshäufigkeit pro Reaktorjahr (gemittelt über mehrere Kernkraftwerke des analysierten Typs)

Die quantifizierten Unsicherheiten beziehen sich auf diesen Mittelwert und drücken daher möglicherweise nicht die Streubreite kernkraftwerksindividueller Freisetzungshäufigkeiten aus.

- Alle anderen, ausgenommen die Dosis/Wirkungs-Beziehungen:

Sie werden als "Bestwerte" angesehen. Mit "Bestwert" ist jener Wert gemeint, der der Aufgabenstellung, so gut wie durch einen festen Wert nach Meinung der Experten möglich, gerecht wird.

Die dazu quantifizierte Schätzunsicherheit drückt die Schätzunsicherheit des "Bestwertes" aus und möglicherweise nicht die Variationsbreite, z.B. der trockenen Ablagerungsgeschwindigkeit, überhaupt.

- Dosis/Wirkungs-Beziehungen:

Die Mortalitätsprozentsätze und Risikoeffizienten sind Erwartungswerte und die quantifizierten Unsicherheiten drücken die Schätzunsicherheiten der Erwartungswerte aus.

Man hat es also mit festen, aber ungenau bekannten Größen der Risikorechnung zu tun.

## 9.2.2 Konstruktion der Verteilungen der Parameter

### 9.2.2.1 Die Verteilungen der zu erwartenden Freisetzungshäufigkeiten

Die acht Freisetzungshäufigkeiten werden dargestellt als Funktionen logarithmisch normalverteilter Zufallsvariabler. In den

logarithmischen Normalverteilungen kommen die über Fehlerbäume und entsprechende Teile der Ereignisablaufdiagramme simulativ fortgepflanzten Unsicherheiten der beteiligten Ausfallraten und Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Anforderung usw. näherungsweise zum Ausdruck.

Tabelle F8, 9-1 zeigt die acht Funktionen  $y_1, \dots, y_8$  in Abhängigkeit von den logarithmisch normalverteilten Zufallsgrößen. Die Zuordnung dieser Zufallsgrößen zu den einzelnen Störfällen ist aus der Tabelle F8, 9-2 ersichtlich. In der Tabelle F8, 9-3 sind die Parameter der (zum Teil approximativen) logarithmischen Normalverteilungen dieser Zufallsgrößen aufgeführt. Anhand der funktionalen Beschreibungen aus Tabelle F8, 9-1 und der Verteilungen der dort angegebenen Bestimmungsgrößen wurden die Verteilungen der Freisetzungshäufigkeiten durch Monte-Carlo-Simulation ermittelt. Ist eine Bestimmungsgröße (z.B. die zu erwartende Häufigkeit des auslösenden Ereignisses) mehreren Beiträgen zur Freisetzungskategorie gemeinsam, so wurde sie in all diesen Beiträgen als die gleiche Zufallsvariable behandelt.

Funktion	Zufallsgrößen
$y_2$	$= x_{1,1} x_1 + x_{2,1} x_2 + x_{3,1} x_3 + (x_{4,1} + x'_{4,1}) x_4$
$y_3$	$= x_{1,2} x_1 + x_{2,2} x_2 + x_{3,2} x_3 + (x_{4,2} + x'_{4,2} + x''_{4,2}) x_4$
$y_4$	$= x_{1,3} x_1 + x_{2,3} x_2 + x_{3,3} x_3 + (x_{4,3} + x'_{4,3} + x''_{4,3}) x_4$
$y_5$	$= x_{1,4} x_1 + x_{2,4} x_2 + x_{3,4} x_3 + (x_{4,4} + x'_{4,4} + x''_{4,4}) x_4$
$\tilde{y}_6$	$= x_{1,5} x_1 + x_{2,5} x_2 + x_{3,5} x_3 + (x_{4,5} + x'_{4,5} + x''_{4,5}) x_4$
$y_1$	$= (y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + \tilde{y}_6) x_5$
$y_6$	$= \tilde{y}_6 - y_1$
$y_7$	$= (x_1 + x_2) x_6$
$y_8$	$= x_1 + x_2$

Tab. F8, 9-1:

Kondensierte funktionale Ausdrücke  $y_1, \dots, y_8$  der Freisetzungshäufigkeiten



Einleitendes Ereignis		Versagensart des Sicherheitsbehälters				
		$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\eta$	$\delta$
Großes Leck in einer Hauptkühlmittelleitung	$x_1$	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{1,3}$	$x_{1,4}$	$x_{1,5}$
Mittleres Leck in einer Hauptkühlmittelleitung	$x_2$	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$	$x_{2,3}$	$x_{2,4}$	$x_{2,5}$
Kleines Leck in einer Hauptkühlmittelleitung	$x_3$	$x_{3,1}$	$x_{3,2}$	$x_{3,3}$	$x_{3,4}$	$x_{3,5}$
Notstromfall	$x_4$	$x_{4,1}$	$x_{4,2}$	$x_{4,3}$	$x_{4,4}$	$x_{4,5}$
		$x'_{4,1}$	$x'_{4,2}$	$x'_{4,3}$	$x'_{4,4}$	$x'_{4,5}$
		$\varepsilon$	$x''_{4,2}$	$x''_{4,3}$	$x''_{4,4}$	$x''_{4,5}$
Wahrscheinlichkeit einer Dampfexplosion im Reaktordruckbehälter (mit Zerstörung des Sicherheitsbehälters) unter der Bedingung eines Kernschmelzunfalls: $x_5$						
Wahrscheinlichkeit einer großen Leckage des Sicherheitsbehälters (kein Überdruckversagen) unter der Bedingung des einleitenden Ereignisses: $x_6$						

- $x_i \hat{=}$  zu erwartende Häufigkeit des einleitenden Ereignisses  $i$  pro Jahr
- $x_{i,j} \hat{=}$  Wahrscheinlichkeit eines Kernschmelzunfalls mit Sicherheitsbehälter-Versagensart  $j$  unter der Bedingung des einleitenden Ereignisses  $i$ ,  $i = 1,2,3$
- $x_{4,j} + x'_{4,j} + x''_{4,j} \hat{=}$  Wahrscheinlichkeit eines Kernschmelzunfalls mit Sicherheitsbehälter-Versagensart  $j$  unter der Bedingung des einleitenden Ereignisses  $i = 4$
- $\beta_1 \hat{=}$  große Leckage des Sicherheitsbehälters
- $\beta_2 \hat{=}$  mittlere Leckage des Sicherheitsbehälters
- $\beta_3 \hat{=}$  kleine Leckage des Sicherheitsbehälters
- $\eta \hat{=}$  Ausfall der Ringraumabsaugung oder der Störfallfilter
- $\delta \hat{=}$  Überdruckversagen des Sicherheitsbehälters

Tab. F8, 9-2:

Zuordnung der Zufallsgrößen in Tabelle F8, 9-1 zu den einzelnen einleitenden Ereignissen und Sicherheitsbehälter-Versagensarten

Zufallsgröße	Median	Streu­faktor (95 %)
$x_1$	1 E-4	10
$x_2$	3 E-4	10
$x_3$	1 E-3	10
$x_4$	8 E-2	3
$x_5$	1 E-2	10
$x_6$	2 E-4	2
$x_{1,1}$	8 E-5	2
$x_{2,1}$	8 E-5	2
$x_{3,1}$	9 E-5	1,5
$x_{4,1}$	1,2 E-7	6
$x'_{4,1}$	1,8 E-7	3,5
$x_{1,2}$	1,6 E-6	13
$x_{2,2}$	3 E-6	13
$x_{3,2}$	3 E-6	12
$x_{4,2}$	7 E-7	7
$x'_{4,2}$	5,5 E-7	8
$x''_{4,2}$	2 E-7	9
$x_{1,3}$	3 E-5	3
$x_{2,3}$	5 E-5	3
$x_{3,3}$	5 E-5	2,5
$x_{4,3}$	1,3 E-6	8
$x'_{4,3}$	5 E-7	7
$x''_{4,3}$	3,3 E-7	9
$x_{1,4}$	2 E-5	3
$x_{2,4}$	3 E-5	3
$x_{3,4}$	3 E-5	2,5
$x_{4,4}$	3 E-5	9
$x'_{4,4}$	1 E-5	7
$x''_{4,4}$	1 E-5	10
$x_{1,5}$	1,3 E-3	3
$x_{2,5}$	2 E-3	3
$x_{3,5}$	1,4 E-2	4,5
$x_{4,5}$	4 E-5	4
$x'_{4,5}$	6 E-6	9
$x''_{4,5}$	2,2 E-7	17

Tab. F8, 9-3:

Verteilungsparameter der logarithmisch normalverteilten Zufallsgrößen aus Tabelle F8, 9-1

Jeder untersuchte Ereignisablauf ist nicht bis in alle denkbaren Einzelheiten festgelegt. Deshalb läßt sich dazu ein ganzes Spektrum möglicher freigesetzter Spaltproduktanteile angeben. Mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit entsprechen also die freigesetzten Spaltproduktanteile eher den repräsentativen Werten der nächst höheren oder niedrigeren Kategorie. Die zu erwartende Häufigkeit des Ereignisablaufes muß deshalb, gewichtet mit dieser Wahrscheinlichkeit, auch den zu erwartenden Häufigkeiten der Nachbarkategorien zugeschlagen werden. Dieser Zuschlag wurde wie in WASH-1400 vorgenommen, d.h., 10 % der Häufigkeit wurden jeder der beiden Nachbarkategorien zugeschlagen, 1 % jeder der beiden übernächsten Kategorien usw. Damit würde an sich der Ereignisablauf nur noch mit der Wahrscheinlichkeit  $\approx 0,78$  in jener Kategorie beitragen, der er ursprünglich zugeordnet war. Wie in WASH-1400 wurde 0,78 auf 1,0 gerundet (womit diese Zuschläge das errechnete Risiko erhöhen) und kein Zuschlag zwischen Kategorien mit und Kategorien ohne Kernschmelzen vorgenommen. Die Formeln zur Berechnung der Zuschläge sind in der Tabelle F8, 9-4 angegeben.

$$\begin{aligned} a_1 &= y_1 + 0,1 y_2 + 0,01 y_3 + 0,001 y_4 \\ a_2 &= y_2 + 0,1 (y_1 + y_3) + 0,01 y_4 + 0,001 y_5 \\ a_3 &= y_3 + 0,1 (y_2 + y_4) + 0,01 (y_1 + y_5) + 0,001 y_6 \\ a_4 &= y_4 + 0,1 (y_3 + y_5) + 0,01 (y_2 + y_6) + 0,001 y_1 \\ a_5 &= y_5 + 0,1 (y_4 + y_6) + 0,01 y_3 + 0,001 y_2 \\ a_6 &= y_6 + 0,1 y_5 + 0,01 y_4 + 0,001 y_3 \\ a_7 &= y_7 + 0,1 y_8 \\ a_8 &= y_8 + 0,1 y_7 \end{aligned}$$

Tab. F8, 9-4:

Formeln zur Berechnung der Zuschläge aus den Nachbarkategorien

Da gemäß Tabelle F8, 9-1 die Freisetzungshäufigkeiten als Summen von Produkten logarithmisch normalverteilter Zufallsgrößen dargestellt werden, sind sie selbst nicht logarithmisch normalverteilt. Durch Monte-Carlo-Simulation (1200 Spiele) wurden verschiedene Kennwerte ihrer Verteilungen (Erwartungswerte, Mediane, 5-%- und 95-%-Fraktile) ermittelt. Sie sind gerundet in Tabelle F8, 9-5 zusammengefaßt.

Um die Genauigkeit der Monte-Carlo-Simulation zu prüfen, wurden darüber hinaus auch zweiseitige 90-%-Vertrauensgrenzen für die Erwartungswerte und die Mediane der Freisetzungshäufigkeiten berechnet. Sie liegen so eng, daß man von einer guten Schätzgenauigkeit der Erwartungswerte und Mediane sprechen kann (Tabelle F8, 9-6 und -7).

Als Referenzwerte ("beste" Schätzwerte) für die Freisetzungshäufigkeiten fanden in der Risikorechnung die gerundeten Erwartungswerte (Tabelle F8, 9-5(2)) aus der Monte-Carlo-Simulation Verwendung.

#### 9.2.2.2 Die Verteilungen der übrigen unsicheren Parameter

Zur Konstruktion der Verteilungen der übrigen unsicheren Parameter dienten Expertenschätzungen. Für jeden dieser Parameter wurden jeweils drei Werte angegeben, die gemäß Expertenurteil folgende Eigenschaften haben:

- Der niedrigere Wert repräsentiert die 10-%- (bzw. 5-%-)Fraktile der Verteilung dieses Parameters, d.h., mit 10 % (bzw. 5 %) subjektiver Aussagesicherheit liegt der zutreffende Parameterwert darunter.
- Der mittlere Wert repräsentiert den Median der Verteilung dieses Parameters, d.h., mit 50 % subjektiver Aussagesicherheit liegt der zutreffende Parameterwert darunter.
- Der höhere Wert repräsentiert die 90-%- (bzw. 95-%-)Fraktile der Verteilung dieses Parameters, d.h., mit 90 % (bzw. 95 %) subjektiver Aussagesicherheit liegt der zutreffende Parameterwert darunter.

(1) Ergebnisse ohne Zuschlag (gerundet)

Kategorie	1	2	3	4	5	6	7	8
5%-Fraktile	3 E-8	6 E-8	4 E-8	1 E-7	1 E-6	5 E-6	2 E-8	9 E-5
50%-Fraktile	4 E-7	2 E-7	2 E-7	4 E-7	6 E-6	2 E-5	1 E-7	6 E-4
95%-Fraktile	7 E-6	1 E-6	1 E-6	2 E-6	5 E-5	2 E-4	8 E-7	4 E-3
Erwartungswert	2 E-6	4 E-7	3 E-7	7 E-7	1 E-5	7 E-5	2 E-7	1 E-3

(2) Ergebnisse mit Zuschlag (gerundet)

Kategorie	1	2	3	4	5	6	7	8
5%-Fraktile	4 E-8	7 E-8	8 E-8	3 E-7	2 E-6	5 E-6	9 E-6	9 E-5
50%-Fraktile	4 E-7	3 E-7	3 E-7	1 E-6	9 E-6	2 E-5	6 E-5	6 E-4
95%-Fraktile	7 E-6	2 E-6	2 E-6	9 E-6	7 E-5	2 E-4	4 E-4	4 E-3
Erwartungswert	2 E-6	6 E-7	6 E-7	3 E-6	2 E-5	7 E-5	1 E-4	1 E-3

Tab. F8, 9-5:

Kenngrößen der Verteilungen der Freisetzungshäufigkeiten

(1) Ohne Zuschläge

Kategorie	Vertrauensgrenze	
	untere	obere
1	1,7 E-6	2,6 E-6
2	3,35 E-7	3,8 E-7
3	3,16 E-7	3,61 E-7
4	6,32 E-7	7,16 E-7
5	1,16 E-5	1,37 E-5
6	5,23 E-5	6,8 E-5
7	2,08 E-7	2,44 E-7
8	9,73 E-4	1,12 E-3

(2) Mit Zuschlägen

Kategorie	Vertrauensgrenze	
	untere	obere
1	1,73 E-6	2,67 E-6
2	5,56 E-7	7,02 E-7
3	5,99 E-7	7,01 E-7
4	2,35 E-6	2,80 E-6
5	1,69 E-5	2,06 E-5
6	5,35 E-5	6,93 E-5
7	9,76 E-5	1,13 E-4
8	9,73 E-4	1,12 E-3

Formel für die Vertrauensgrenzen des Erwartungswertes nach dem zentralen Grenzwertsatz:

$$\bar{x} \pm 1,64 \frac{s}{\sqrt{1200}}$$

wobei  $\bar{x}$  das arithmetische Mittel und  $s$  die geschätzte Standardabweichung aus 1200 Simulationen sind.

Tab. F8, 9-6:

Vertrauensgrenzen (90 %) für die aus 1200 simulierten Werten geschätzten Erwartungswerte der Freisetzungshäufigkeiten

(1) Ohne Zuschläge

Kategorie	Vertrauensgrenze	
	untere	obere
1	3,6 E-7	4,2 E-7
2	2,1 E-7	2,3 E-7
3	1,8 E-7	2,1 E-7
4	4,0 E-7	4,4 E-7
5	5,7 E-6	6,8 E-6
6	2,1 E-5	2,4 E-5
7	1,1 E-7	1,2 E-7
8	5,1 E-4	6,0 E-4

(2) Mit Zuschlägen

Kategorie	Vertrauensgrenze	
	untere	obere
1	3,8 E-7	4,5 E-7
2	2,7 E-7	3 E-7
3	3,2 E-7	3,7 E-7
4	1,2 E-6	1,4 E-6
5	8 E-6	9,2 E-6
6	2,1 E-5	2,4 E-5
7	5,1 E-5	6 E-5
8	5,1 E-4	6 E-4

Die angegebenen Vertrauensgrenzen für die Mediane sind mit Hilfe sogenannter parameterfreier statistischer Verfahren ermittelt worden /F8, 9-3/.

Tab. F8, 9-7:

Vertrauensgrenzen (90 %) für die aus 1200 simulierten Werten geschätzten Mediane der zu erwartenden Freisetzungshäufigkeiten

Darüber hinaus wurde für jeden Parameter ein Referenzwert ("bester" Schätzwert) angegeben, der häufig dem Median entspricht. Die Kombination der Referenzwerte liefert den sogenannten Referenzfall, auf den sich die Ergebnisse der vorliegenden Studie (Hauptband, Abschnitt 8.1) beziehen. In Tabelle F8, 9-8 sind die einzelnen Parameter mit ihren Expertenangaben detailliert aufgeführt.

Einige der unsicheren Parameter wurden miteinander verbunden, d.h., sie wurden als vollständig miteinander korreliert betrachtet. Im einzelnen betrifft das folgende Parameter:

- trockene Ablagerungsgeschwindigkeit für Jod,
- trockene Ablagerungsgeschwindigkeit für Aerosole und
- "washout"-Koeffizient der nassen Ablagerung bei drei verschiedenen Regenratenklassen.

Wenn man z.B. der trockenen Ablagerungsgeschwindigkeit für Jod einen relativ hohen Wert (bezogen auf die 50-%-Fraktile) als sogenannten Bestwert zuordnet, so ordnet man bei der verwendeten Verbindung der Parameter zugleich der Ablagerungsgeschwindigkeit für Aerosole und den drei "washout"-Koeffizienten relativ hohe Bestwerte zu und umgekehrt.

- Prozentualer Bevölkerungsanteil im Freien vor dem "Aufsuchen von Häusern" und
- prozentualer Bevölkerungsanteil, der darüber hinaus im Freien bleibt.

Ordnet man z.B. dem prozentualen Bevölkerungsanteil im Freien vor dem "Aufsuchen von Häusern" einen relativ hohen Bestwert zu, so kann bei der verwendeten Verbindung der Parameter nicht zugleich für den Bevölkerungsanteil im Freien nach dem "Aufsuchen von Häusern" ein relativ niedriger Wert gelten. Dies wäre z.B. möglich bei nicht verbundener, insbesondere unabhängiger Behandlung dieser Parameter.



- Freigesetzte Energie in  $10^6$  kJ/h (zur Berechnung des Aufstiegs der Aktivitätsfahne):

Freisetzungskategorie	Fraktile			Referenzwert
	5 %	50 %	95 %	
1	50	460	4 200	540
2	1	5	20	15
5 (3. Phase)	30	160	840	200
6 (3. Phase)	30	160	840	200
7	1	5	20	9

Anmerkung: Schätzunsicherheit des "Bestwertes"

- Errechnete Aufstiegshöhe der Aktivitätsfahne:

Fraktile des Korrekturfaktors zum Referenzwert

10 %	50 %	90 %
0,5	1,0	1,75

Anmerkung: Die Aufstiegshöhe wird nach Beziehungen berechnet, die den Vorgang nur näherungsweise beschreiben. Der Korrekturfaktor soll hier den möglichen Fehler ausdrücken. Quantifiziert wird die Schätzunsicherheit des "Bestwertes" dieses Faktors.

- Trockene Ablagerungsgeschwindigkeit in m/s:

für Jod			für Aerosole		
Fraktile			Fraktile		
10 %	50 %	90 %	10 %	50 %	90 %
0,002	0,01	0,05	0,001	0,005	0,025

Referenzwert = 0,01

Referenzwert = 0,01

Anmerkung: Die Ablagerungsgeschwindigkeit während eines Expositionsablaufes ist vielen, nicht explizit erfaßbaren, zufälligen Einflüssen unterworfen. Die hier angegebene Unsicherheit soll die Schätzunsicherheit des "Bestwertes" ausdrücken.

Tab. F8, 9-8 (1):

Die quantifizierten Schätzunsicherheiten (ohne Freisetzungshäufigkeiten)

● Nasse Ablagerung:

"Washout"-Koeffizient  $\Lambda$  (1/s) zu verschiedenen Regenraten

Fraktile	bei Regenrate in mm/h		
	0-1	1-3	> 3
10 %	2,0 E-5	1,0 E-4	2,0 E-4
50 %	1,0 E-4	5,0 E-4	1,0 E-3
90 %	5,0 E-4	2,5 E-3	5,0 E-3

Referenzwert = 50%-Fraktile

Anmerkung: Auch der "washout"-Koeffizient wird als "Bestwert" zur entsprechenden Regenrate aufgefaßt. Die Fraktilangaben drücken die Schätzunsicherheit des "Bestwertes" aus.

● Zeitspanne vom Erkennen der bevorstehenden Freisetzung bis zum "Aufsuchen von Häusern" in Stunden:

Fraktile		
10 %	50 %	90 %
1,5	2	4

Referenzwert = 2

Anmerkung: Schätzunsicherheit des "Bestwertes"

● Prozentualer Bevölkerungsanteil im Freien vor dem "Aufsuchen von Häusern":

Fraktile		
10 %	50 %	90 %
1	3	9

Referenzwert = 3

Anmerkung: Schätzunsicherheit des "Bestwertes"

Tab. F8, 9-8 (2):

Die quantifizierten Schätzunsicherheiten (ohne Freisetzungshäufigkeiten)

- Prozentualer Bevölkerungsanteil, der über die oben genannte Zeitspanne hinaus im Freien bleibt:

Fraktile		
10 %	50 %	90 %
1	3	6

Referenzwert = 3

Anmerkung: Schätzunsicherheit des "Bestwertes"

- Dosis/Wirkungs-Beziehung für frühe Todesfälle:

Fraktile		
10 %	50 %	90 %
0	B	P

Referenzfunktion = B

0 :  $F_0(330) = 1\%$ ;  $F_0(610) = 50\%$

$F_0(x) = 0$  für alle  $x$  mit  $F_0(x) < F_B(100)$

B :  $F_B(250) = 1\%$ ;  $F_B(510) = 50\%$

$F_B(x) = 0$  für  $x < 100$  rad

P :  $F_P(200) = 1\%$ ;  $F_P(410) = 50\%$

$F_P(x) = 0$  für alle  $x$  mit  $F_P(x) < F_B(100)$

(Hauptband, Bild 8-12)

Anmerkung: Entsprechend einer kumulativen Normalverteilung, die durch ihre 1%- und 50%-Fraktile gekennzeichnet ist, werden den verschiedenen Dosiswerten in rad Prozentsätze zugeordnet. Es handelt sich dabei um Erwartungswerte, deren Schätzunsicherheiten hier durch alternative Normalverteilungen ausgedrückt werden.

- Dosis/Wirkungs-Beziehung für späte Todesfälle:

Fraktile		
10 %	50 %	90 %
0,5·Y	1,0·Y	2,0·Y

Referenzwert = Y

Y = Risikoeffizient nach ICRP-26

Anmerkung: Die Risikoeffizienten sind Erwartungswerte. Ihre Schätzunsicherheiten werden durch die Fraktilangaben ausgedrückt.

Tab. F8, 9-8 (3):

Die quantifizierten Schätzunsicherheiten (ohne Freisetzungshäufigkeiten)

● Verwendung der logarithmischen Normalverteilung

Bei vielen der unsicheren Parameter zeigen die drei von Experten angegebenen Fraktile die Eigenschaft, daß der Quotient aus jeweils zwei aufeinanderfolgenden Werten konstant ist. Es liegt daher nahe (Hauptband, Abschnitt 4.7.2), für diese Parameter die logarithmische Normalverteilung zu verwenden.

Im einzelnen wurden die Unsicherheiten der Parameter in folgender Weise durch logarithmische Normalverteilungen repräsentiert:

- Bei Parametern, deren drei Expertenschätzwerte  $e_1 < e_2 < e_3$  die Eigenschaft aufweisen  $e_2/e_1 = e_3/e_2$ , wurde eine logarithmische Normalverteilung mit Median  $b = e_2$  und Streufaktor (90 % bzw. 95 %)  $k_{90(95)} = e_3/e_2$  gewählt.
- Bei einem Parameter, dessen drei Expertenschätzwerte  $e_1 < e_2 < e_3$  die obige Eigenschaft nicht aufweisen, wurde eine logarithmische Normalverteilung mit Median  $b = \sqrt{e_1 e_3}$  und Streufaktor  $k = \sqrt{e_3/e_1}$  gewählt.
- Bei zwei oder mehr verbundenen Parametern dient einer davon ( $p$ ) als sogenannte Leitvariable. Für ihn wird in der oben angegebenen Weise eine logarithmische Normalverteilung bestimmt. Die übrigen damit verbundenen Parameter ergeben sich einzeln als abschnittsweise lineare Funktionen  $p_i$  der Leitvariablen  $p$  gemäß

$$p_i = c_i (p-b) + b_i$$

wobei

$$c_i = \begin{cases} \frac{e_{i,3} - e_{i,2}}{e_3 - b} & \text{für } p > b \\ \frac{e_{i,2} - e_{i,1}}{b - e_1} & \text{für } p \leq b \end{cases}$$

mit  $b$  als Median der logarithmisch normalverteilten Leitvariablen  $p$  und  $b_i$  als Median des damit verbundenen Parameters  $p_i$ . Ferner sind  $e_1, e_{i,1}$  und  $e_3, e_{i,3}$  die jeweiligen

angegebenen unteren bzw. oberen Fraktilen zu gleichem Prozentsatz P.

Die so mit der logarithmisch normalverteilten Leitvariablen p verbundenen Parameter sind zwar als abschnittsweise lineare Funktionen der Leitvariablen nicht logarithmisch normalverteilt, ihre Verteilungen haben aber dennoch die den Expertenangaben entsprechenden Fraktilen.

- Konstruktion der Verteilung für die Dosis/Wirkungs-Beziehungen zur Schadensart "frühe Todesfälle"

Für die drei Dosis/Wirkungs-Beziehungen O, B, P (Hauptband, Bild 8-12, und Tabelle F8, 9-8) werden jeweils die Parameter  $\mu$  und  $\sigma$  (Erwartungswert und Standardabweichung) der zugrunde liegenden Normalverteilung bestimmt.

Fraktile	$\mu$	$\sigma$	p
10 % O	610	120	0,5
50 % B	510	112	1
90 % P	410	90	2

Sodann wird eine logarithmisch normalverteilte Leitvariable p festgelegt mit Median = 1 und Streufaktor (90 %) = 2. Die Funktionalparameter  $\mu$  und  $\sigma$  können dann in Abhängigkeit von der Leitvariablen p dargestellt werden durch:

$$\mu = \begin{cases} (\mu_P - \mu_B) p + 2\mu_B - \mu_P & \text{für } p > 1 \\ 2(\mu_B - \mu_O) p + 2\mu_O - \mu_B & \text{für } p \leq 1 \end{cases} \quad (9.1)$$

$$\sigma = \begin{cases} (\sigma_P - \sigma_B) p + 2\sigma_B - \sigma_P & \text{für } p > 1 \\ 2(\sigma_B - \sigma_O) p + 2\sigma_O - \sigma_B & \text{für } p \leq 1 \end{cases} \quad (9.2)$$

Diese Darstellung hat die Eigenschaft, daß die 10-%-, 50-%- und 90-%-Fraktile von p in die jeweilige Normalverteilung übergeht, die der Kurve O, B bzw. P zugrunde liegt.

In der Tabelle F8, 9-9 sind die Verteilungen der einzelnen unsicheren Parameter und deren Darstellung in Abhängigkeit von eventuellen Leitvariablen detailliert aufgeführt.

### 9.3 Ermittlung lokaler Vertrauensbereiche

#### 9.3.1 Allgemeine Überlegungen

In diesem Abschnitt soll das Verfahren erläutert werden, mit dem die Unsicherheiten in den einzelnen Parametern in lokale Vertrauensbereiche für die komplementären Verteilungsfunktionen der beiden Schadensarten (frühe bzw. späte Todesfälle) umgesetzt worden sind.

Stünde für das aufwendige Unfallfolgenprogramm unbegrenzte Rechenzeit zur Verfügung, so wäre die folgende Methode zur Erzeugung der Vertrauensbereiche am besten geeignet (sog. reine Monte-Carlo-Simulation):

- Simulation sämtlicher unsicherer Parameter gemäß deren Verteilungen (z.B. 1000mal),
- Einsetzen der jeweils simulierten Parameterkombinationen in das Unfallfolgenprogramm,
- Ermittlung der komplementären Verteilungsfunktion des Schadens für jede dieser Parameterkombinationen,
- Ermittlung von 90%-Intervallen (z.B. in Häufigkeitsrichtung an Punkten entlang der Schadensachse).

Die Durchführung dieses Verfahrens scheitert jedoch an dem hohen Rechenaufwand für 1000 Läufe des rechenzeitintensiven Unfallfolgenprogramms. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn die Simulation für unterschiedliche Verteilungstypen der unsicheren Parameter neu durchgeführt werden soll (Abschnitt 9.4.2). Infolgedessen wurde eine Methode gewählt, die in gewisser Weise als Approximation des reinen Monte-Carlo-Verfahrens betrachtet werden kann, die aber eine wesentlich geringere Anzahl von Läufen des Unfallfolgenprogramms erfordert ("response surface"-Methode /F8, 9-4/).

Parameter	Darstellung des Parameters in Abhängigkeit von der Leitvariablen p	Logarithmische Normalverteilung von p	
		Median	Streufaktor (90 %)
Thermische Energiefreisetzungsraten			
- in der Freisetzungskategorie 1	p	458	9,2 <sup>1)</sup>
- in der Freisetzungskategorie 2 und 7	0,0221 (p-160)+5 falls p > 160 0,0308 (p-160)+5 falls p ≤ 160	160	5,3 <sup>1)</sup>
- in der Freisetzungskategorie 5 und 6 (3. Phase)	p		
Errechnete Aufstiegshöhe der Aktivitätsfahne (Korrekturfaktor)	p	0,935	1,9
Trockene Ablagerungsgeschwindigkeit für Jod	2p		
Trockene Ablagerungsgeschwindigkeit für Aerosole	p		
"washout" bei Regenrate 0-1 mm/h	0,02(p-0,005)+0,0001	0,005	5
"washout" bei Regenrate 1-3 mm/h	0,1(p-0,005)+0,0005		
"washout" bei Regenrate > 3 mm/h	0,2(p-0,005)+0,001		
Zeitintervall zwischen dem Erkennen der bevorstehenden Freisetzung und dem "Aufsuchen von Häusern"	p	2,45	1,6
Prozentualer Bevölkerungsanteil im Freien			
- vor dem Aufsuchen von Häusern	p	3	3
- nach der obengenannten Zeitspanne	$\begin{cases} 0,5(p-3)+3 & p > 3 \\ p & p \leq 3 \end{cases}$		
Dosis/Wirkungs-Beziehung			
- Risikoeffizient	p		
- Parameter $\mu$ und $\sigma$ der Dosis/Wirkungs-Beziehung für Fröh-schäden	$\mu = \begin{cases} -100p+610 & p > 1 \\ -200p+710 & p \leq 1 \end{cases}$ $\sigma = \begin{cases} -22p+134 & p > 1 \\ -16p+128 & p \leq 1 \end{cases}$	1	2

<sup>1)</sup> hier Streufaktor zu 95 %

Tab. F8, 9-9:

Verteilungen der unsicheren Parameter (ohne Freisetzungshäufigkeiten)

Das Prinzip dieses Verfahrens besteht darin, anhand von möglichst wenigen, geeignet gewählten Kombinationen der unsicheren Parameter eine sogenannte "response"-Funktion zu konstruieren, d.h. eine Funktion in den unsicheren Parametern, die die Ergebnisse des Unfallfolgenprogramms für verschiedene Parameterwerte näherungsweise liefern soll. Wird das Unfallfolgenprogramm durch eine solche "response"-Funktion ersetzt, so ist die simulative Gewinnung der Vertrauensintervalle mit relativ geringem Rechenaufwand möglich.

Die einzelnen Schritte des "response surface"-Verfahrens lauten:

- Festlegung geeigneter Parameterkombinationen und Durchführung der Läufe des Unfallfolgenprogramms mit diesen Parameterkombinationen,
- Konstruktion der "response"-Funktion anhand der Ergebnisse dieser Programmläufe,
- Simulation sämtlicher unsicherer Parameter gemäß ihren Verteilungen (z.B. 1000mal),
- Einsetzen der simulierten Parameterkombinationen in die "response"-Funktion und Ermittlung der komplementären Verteilungen des Schadens sowie
- Ermittlung von 90-%-Vertrauensintervallen (z.B. in Häufigkeitsrichtung an diskreten Punkten entlang der Schadensachse).

In den nächsten Abschnitten wird dieses Verfahren genauer beschrieben.

### 9.3.2 Festlegung der Parameterkombinationen (design)

Folgende Bezeichnungen werden eingeführt:

$t \hat{=}$  Anzahl der unabhängigen unsicheren Parameter (ohne Freisetzungshäufigkeiten)

$P_k^{(-)} \hat{=}$  10-%- (bzw. 5-%-)Fraktile der Verteilung des k-ten Parameters



$\bar{p}_k \hat{=} \text{Referenzwert des } k\text{-ten Parameters (bei Ablagerungs-}$   
 $\text{geschwindigkeit für Aerosole: 50\%-Fraktile)}$

$p_k^{(+)} \hat{=} \text{90\%- (bzw. 95\%-)Fraktile der Verteilung des } k\text{-ten}$   
 $\text{Parameters } k = 1, \dots, t$

Für folgende  $2t+1$  Parameterkombinationen wurde das Unfallfolgenprogramm ausgewertet:

$$\begin{array}{ll} (\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_t) & k = 1, \dots, t \\ (\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_{k-1}, p_k^{(-)}, \bar{p}_{k+1}, \dots, \bar{p}_t) & k = 1, \dots, t \\ (\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_{k-1}, p_k^{(+)}, \bar{p}_{k+1}, \dots, \bar{p}_t) & k = 1, \dots, t \end{array}$$

Selbst diese relativ geringe Anzahl von Parametervariationen mit dem Unfallfolgenmodell hätte noch einen sehr hohen Rechenaufwand erfordert, wäre sie für jeden der 19 Standorte der Studie durchgeführt worden. Aus diesem Grunde wurde für diese Untersuchung aus jeder der vier meteorologischen Standortregionen der Standort ausgewählt, für den im Referenzfall der maximale Schadensumfang in der Schadensart "frühe Todesfälle" errechnet wird. Auf der Basis dieser vier Standorte erfolgten dann die Läufe des Unfallfolgenmodells zu den obengenannten Parameterkombinationen. Die Ergebnisse für die vier Regionen wurden mit den Gewichten  $g_j$  (= Anteil der Region  $m_j$  an den 25 in der Studie berücksichtigten Anlagen) zu einem sogenannten Basisergebnis zusammengefügt. Es wird davon ausgegangen, daß die Beschränkung der Unsicherheitsanalyse auf diese vier Standorte einer pessimistischen Vorgehensweise entspricht, d.h., daß sich die Ergebnisse, verglichen mit denen einer Analyse, die sämtliche 19 Standorte (25 Anlagen) berücksichtigt, auf der sicheren Seite befinden. Die Bilder F8, 9-3 bis -8 zeigen die komplementären Häufigkeitsverteilungen zur Schadensart "frühe Todesfälle" für die Basisergebnisse zu den obengenannten Parameterkombinationen mit dem Unfallfolgenmodell. Die Zeichnungen dieser und aller weiteren Verteilungen enden aus rechnerischen Gründen stets beim höchsten, ganzzahligen Vielfachen der höchsten am Schadensumfang beteiligten ganzzahligen Potenz von 10.

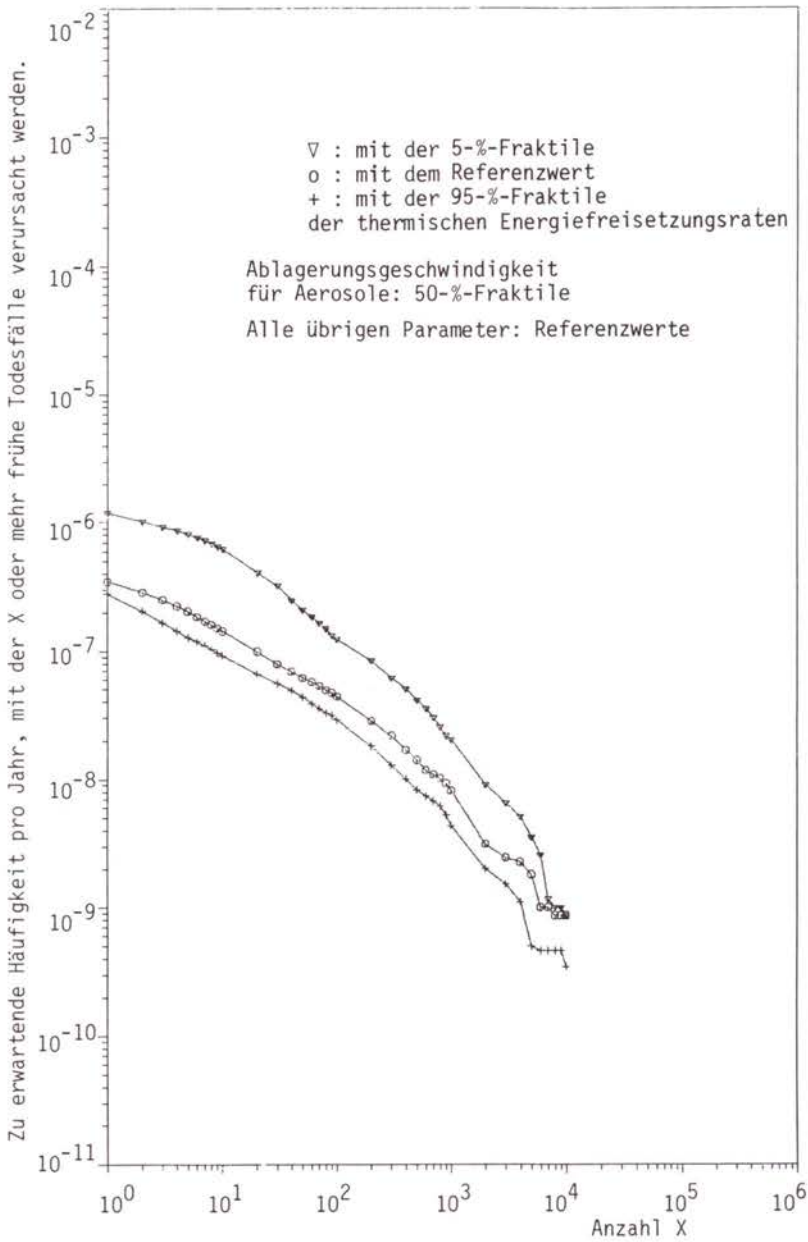


Bild F8, 9-3:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der thermischen Energiefreisetzungsraten

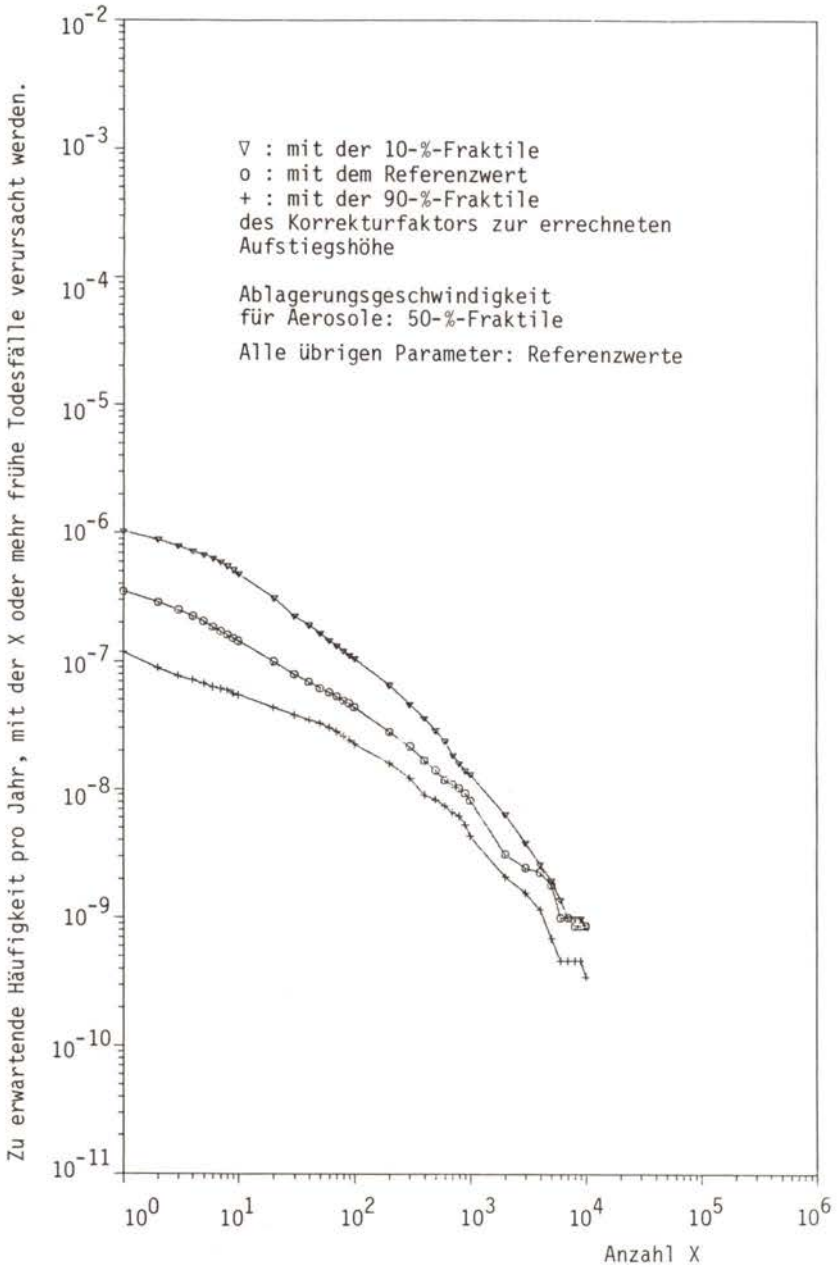


Bild F8, 9-4:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation des Korrekturfaktors zur errechneten Aufstiegshöhe der Aktivitätsfahne

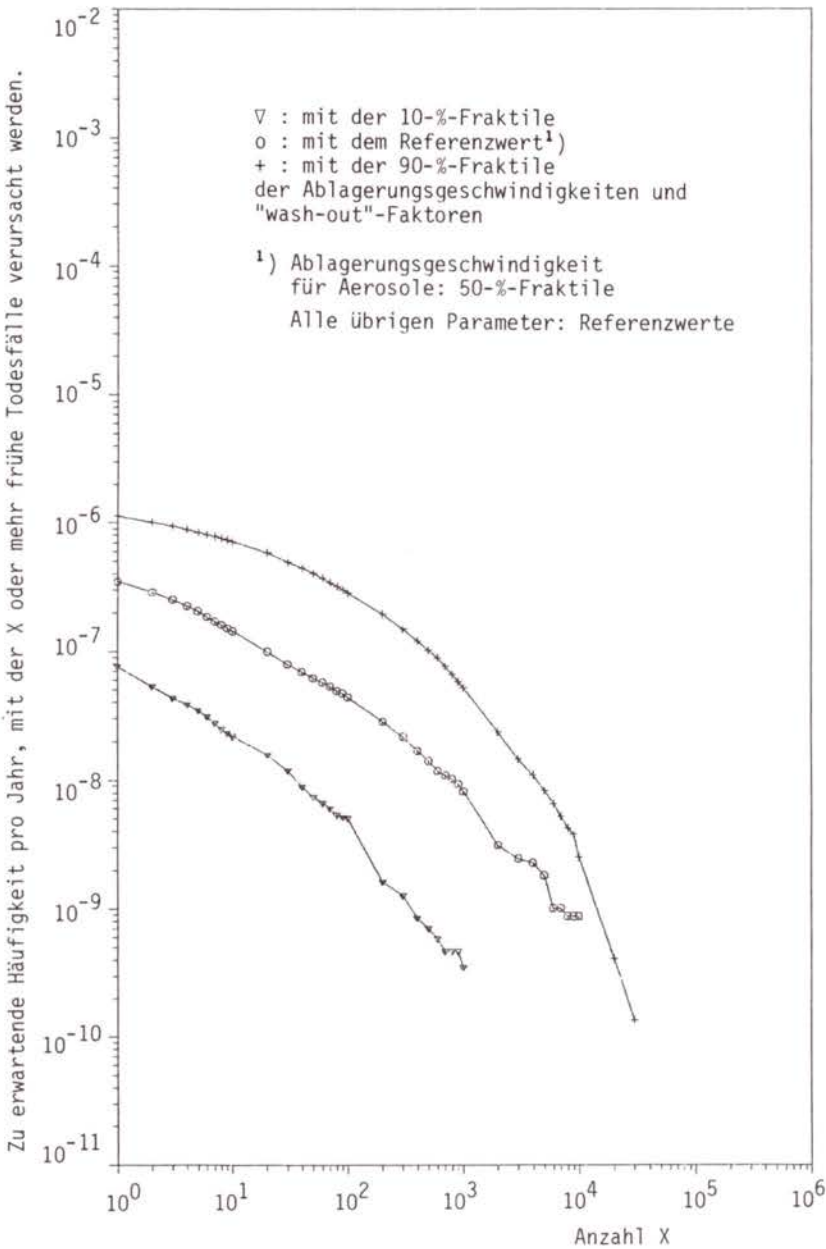


Bild F8, 9-5:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der Ablagerungsgeschwindigkeiten und "wash-out"-Faktoren

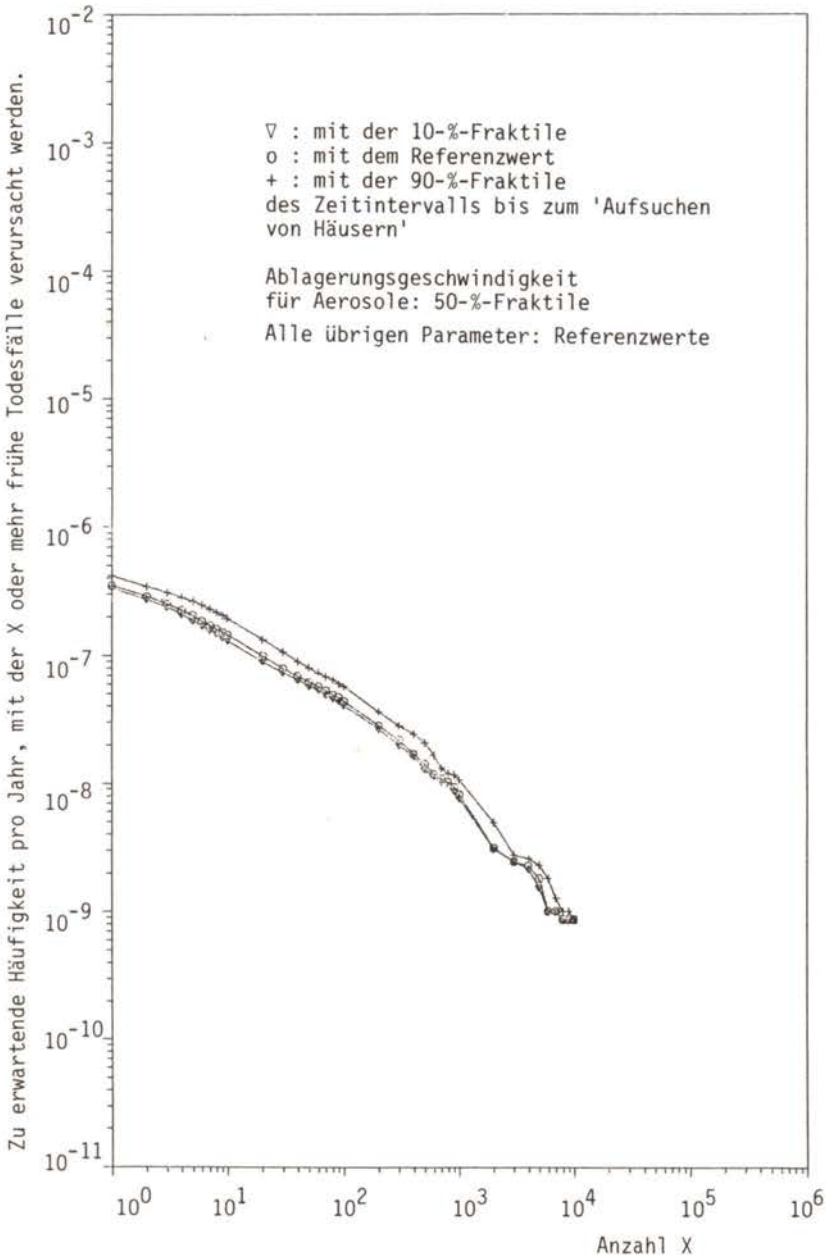


Bild F8, 9-6:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation des Zeitintervalls bis zum 'Aufsuchen von Häusern'

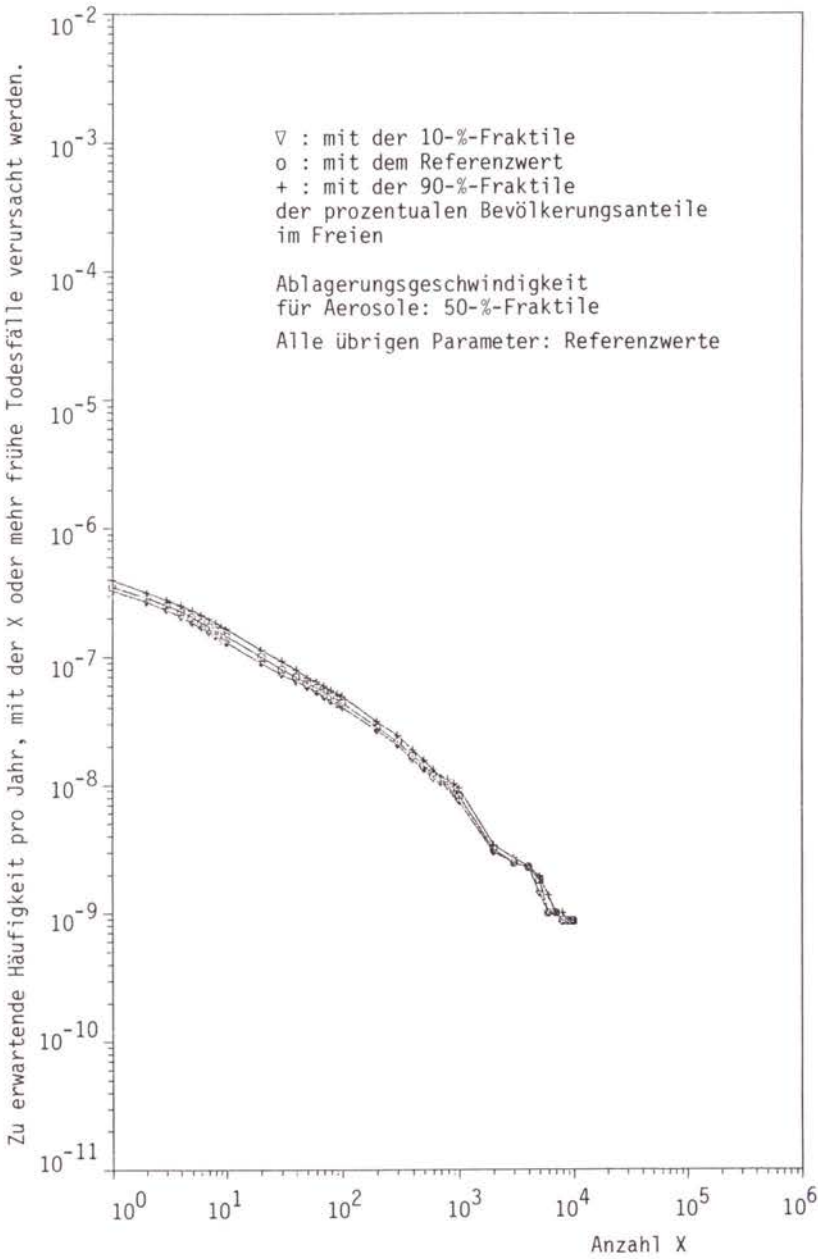


Bild F8, 9-7:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der prozentualen Bevölkerungsanteile im Freien

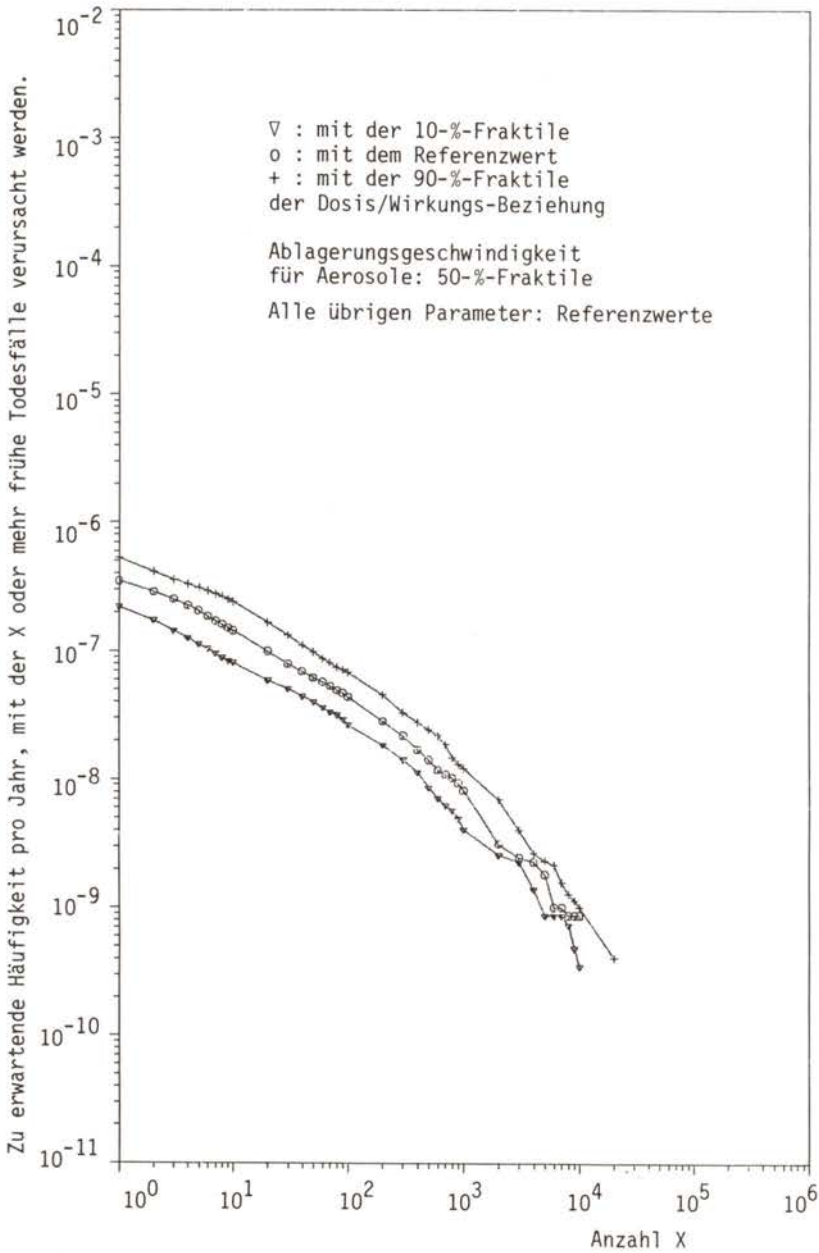


Bild F8, 9-8:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "frühe Todesfälle"  
(Basisergebnisse); Variation der Dosis/Wirkungs-Beziehung

Entsprechende Ergebnisse zur Schadensart "späte Todesfälle" sind in den Bildern F8, 9-9 bis -14 dargestellt. Für die Freisetzungshäufigkeiten wurden dabei jeweils die Erwartungswerte aus Tabelle F8, 9-5(2) verwendet.

### 9.3.3 Konstruktion der "response"-Funktion

Bezeichnungen:

$p = (p_1, \dots, p_t) \hat{=}$  Vektor der unabhängigen unsicheren Parameter (ohne Freisetzungshäufigkeiten)

$\bar{p} \hat{=}$  Vektor der Referenzwerte zu  $p$  (Ablagerungsgeschwindigkeit für Aerosole = 50%-Fraktile)

$\tilde{p} \hat{=}$  Vektor der Referenzwerte zu  $p$

$a = (a_1, \dots, a_r) \hat{=}$  Vektor der Freisetzungshäufigkeiten

$\tilde{a} \hat{=}$  Vektor der Referenzwerte zu  $a$

$\tilde{H}(1, p; u_i, m_j, x) \hat{=}$  Wert der bedingten komplementären Verteilungsfunktion an der Abszisse  $x$ , bei der Parameterkombination  $p$ , der Freisetzungskategorie  $u_i$  und zur meteorologischen Standortregion  $m_j$  (unter der Bedingung, daß genau eine Freisetzung der betreffenden Kategorie pro Jahr zu erwarten ist, also  $a_i = 1$  gilt)

$H(a, p; x) \hat{=}$  Wert der komplementären Verteilungsfunktion an der Abszisse  $x$ , bei der Freisetzungshäufigkeit  $a$  und der Parameterkombination  $p$

$\hat{=}$  zu erwartende Häufigkeit ( $\approx$  Wahrscheinlichkeit) pro Jahr von Unfällen mit Schadensumfang  $\geq x$ , sofern  $a$  und  $p$  zutreffen

$\hat{=}$  Ergebniskurve für die Parameterkombination  $(a, p)$

$g_j \hat{=}$  Wichtungsfaktor für die meteorologische Standortregion  $m_j$ ,  $j = 1, \dots, s$

$\hat{=}$   $\frac{\text{Anzahl der in der Studie berücksichtigten Anlagen in dieser Region}}{\text{Gesamtzahl der berücksichtigten Anlagen (= 25)}}$



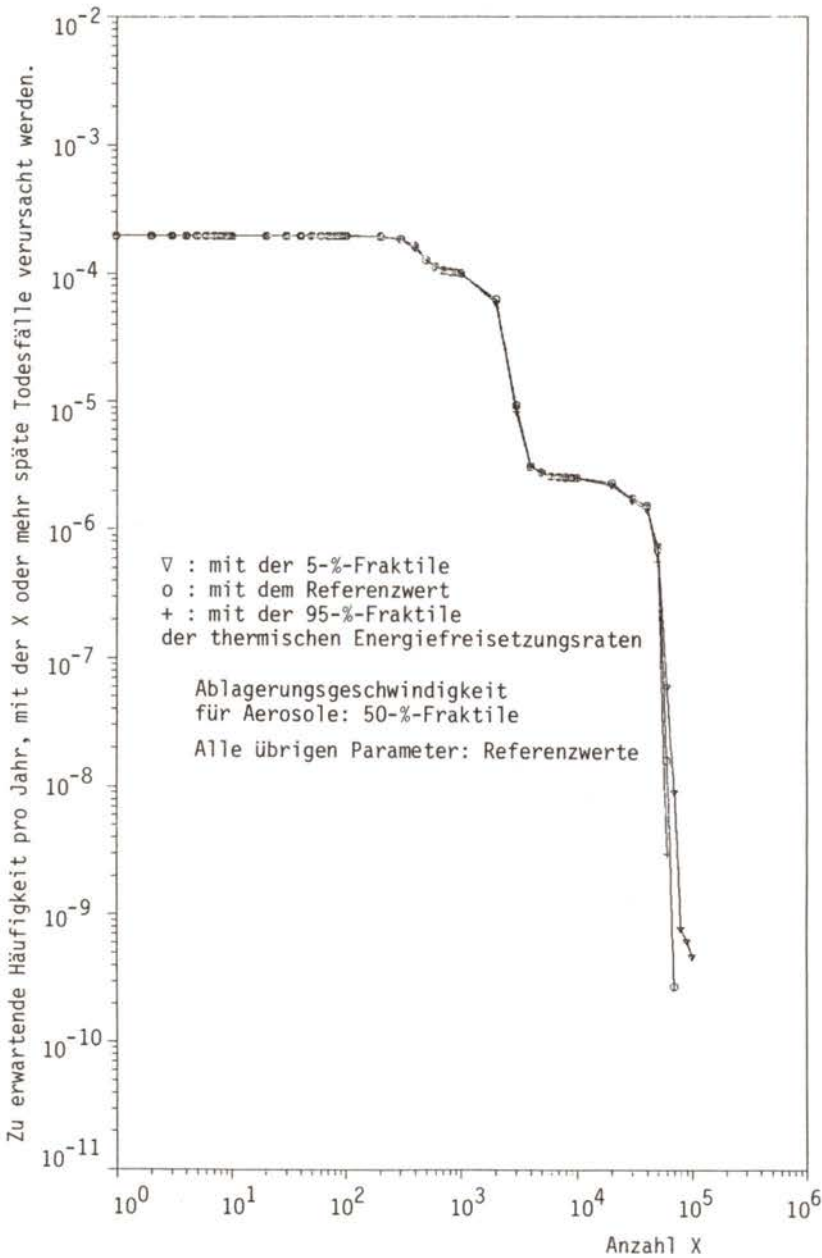


Bild F8, 9-9:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der thermischen Energiefreisetzungsraten

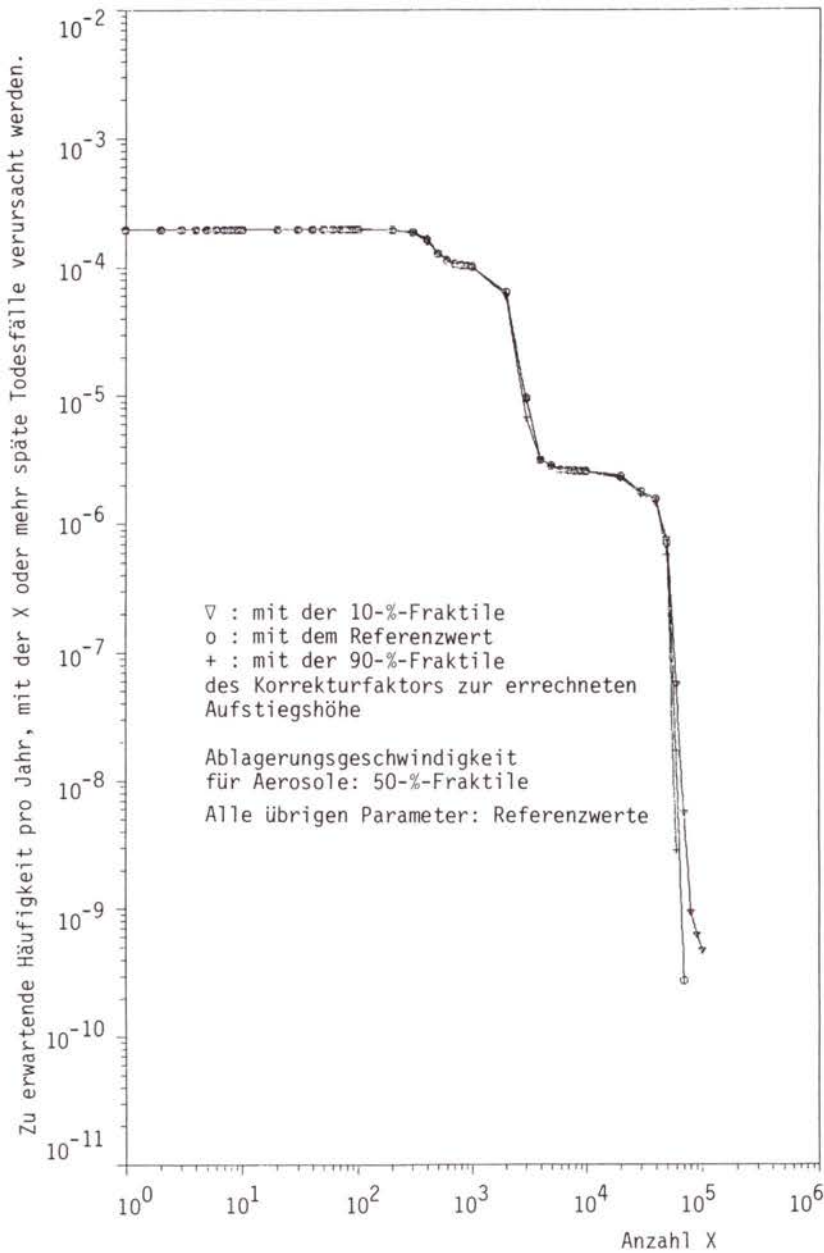


Bild F8, 9-10:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation des Korrekturfaktors zur errechneten Aufstiegshöhe der Aktivitätsfahne

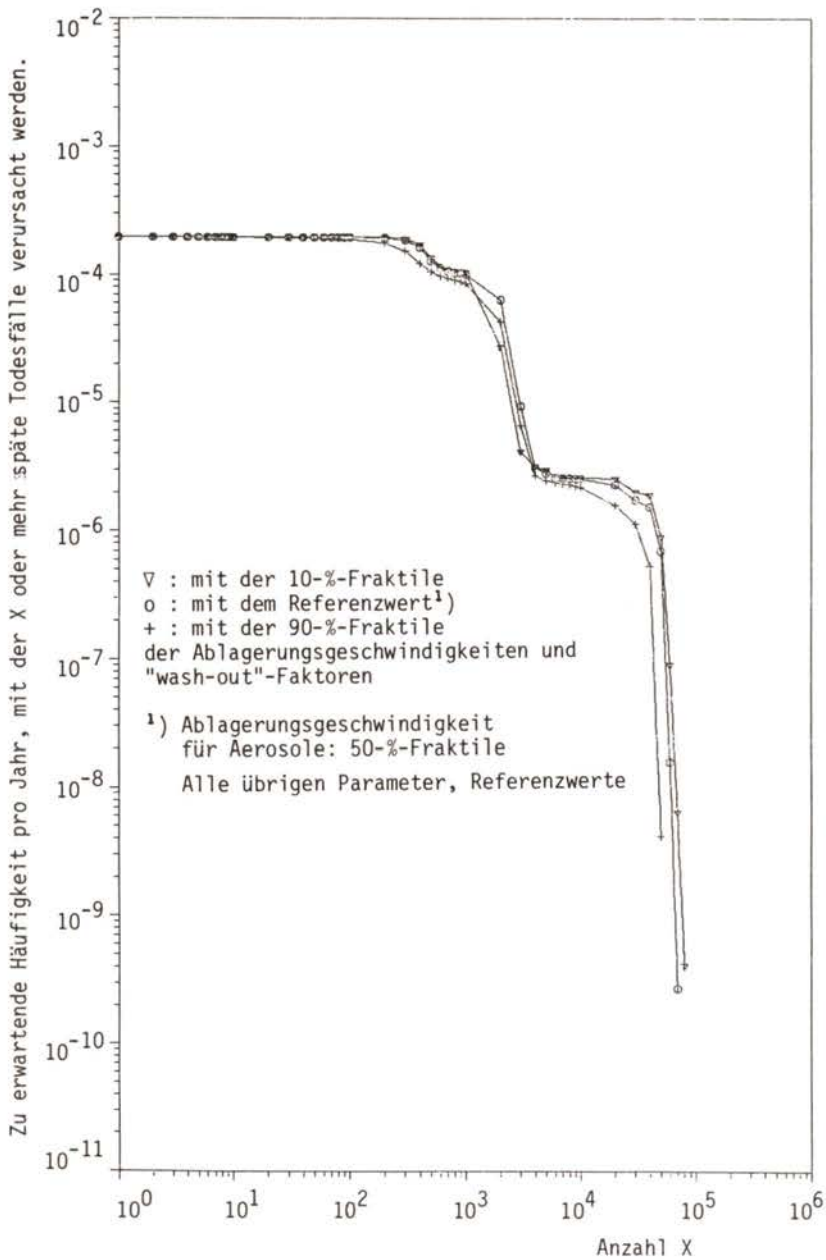


Bild F8, 9-11:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der Ablagerungsgeschwindigkeiten und "wash-out"-Faktoren

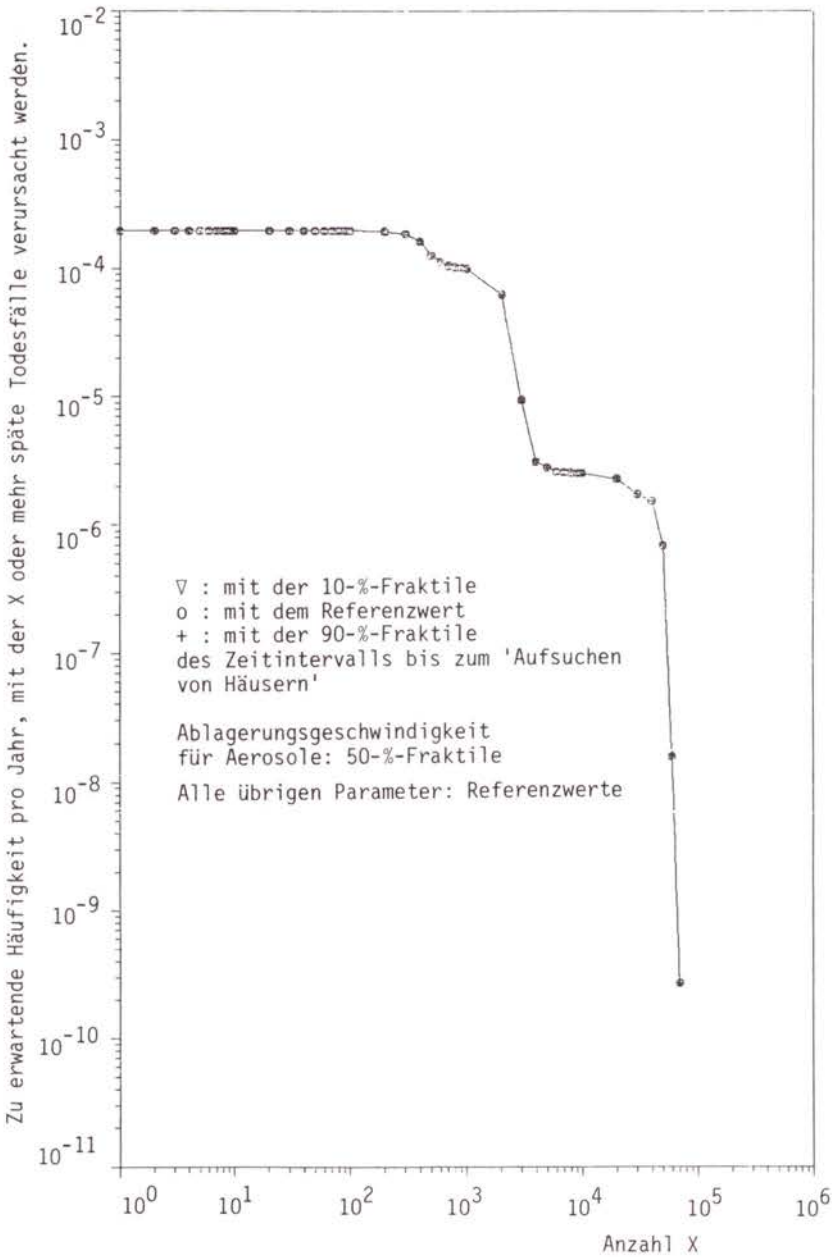


Bild F8, 9-12:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle"  
(Basisergebnisse); Variation des Zeitintervalls bis zum  
'Aufsuchen von Häusern'

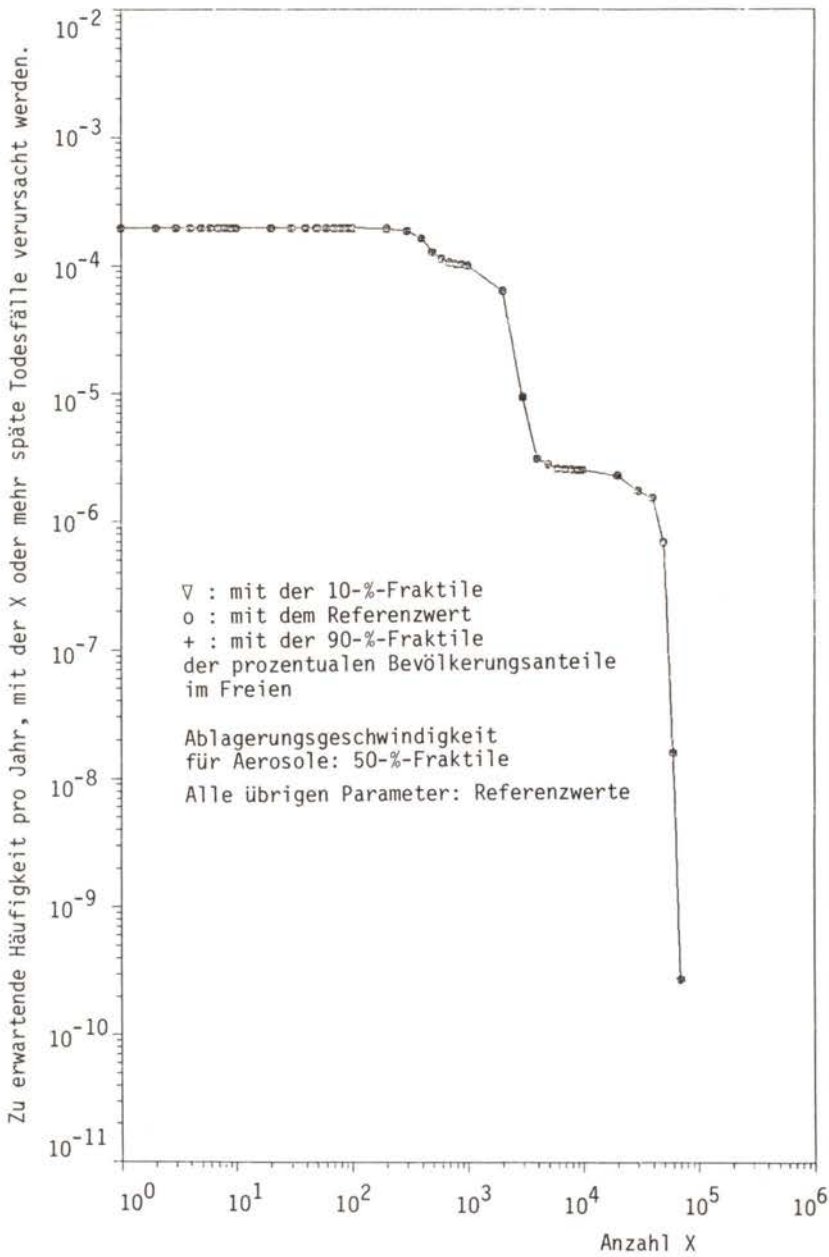


Bild F8, 9-13:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle" (Basisergebnisse); Variation der prozentualen Bevölkerungsanteile im Freien

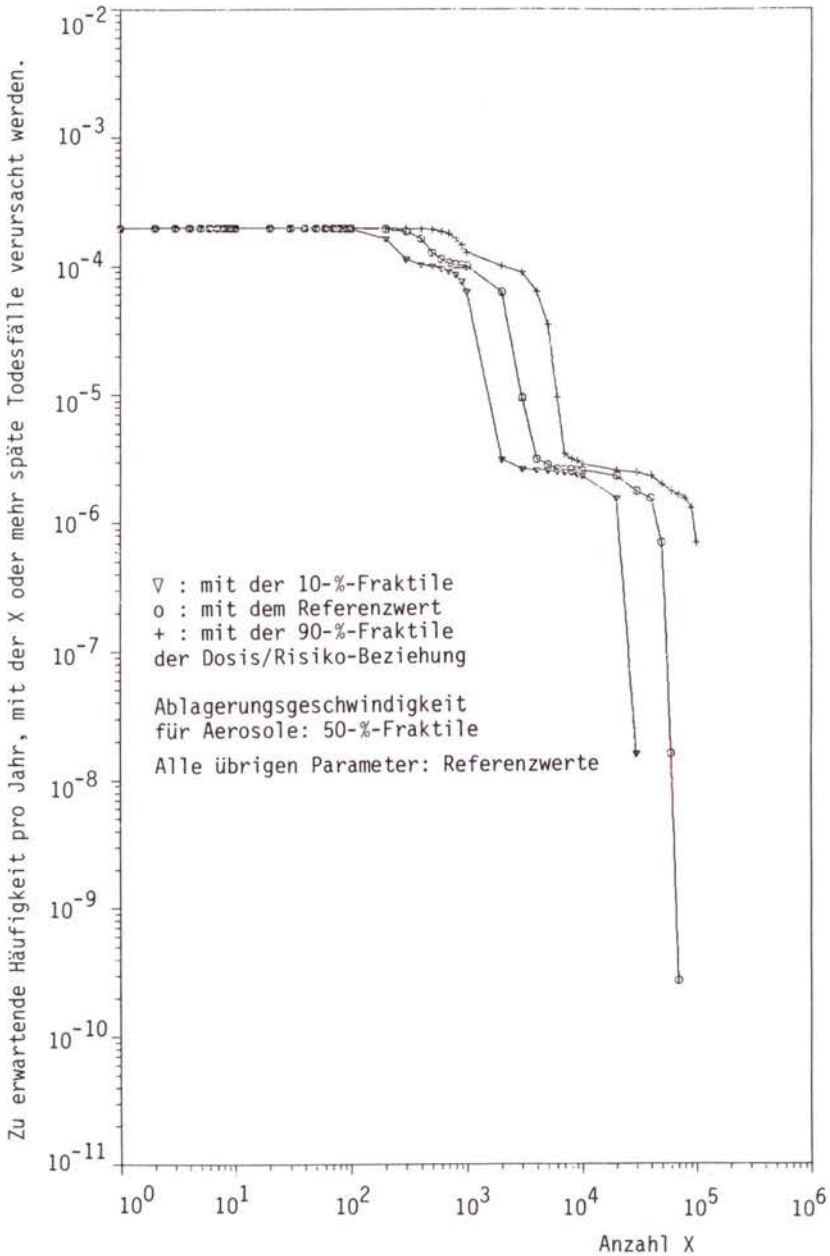


Bild F8, 9-14:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen für "späte Todesfälle"  
(Basisergebnisse); Variation der Dosis/Risiko-Beziehung

Damit gilt für das Basisergebnis die Darstellung:

$$\hat{H}(a, p; x) = \sum_{i=1}^r \left( \sum_{j=1}^s \tilde{H}(1, p; u_i, m_j, x) g_j \right) a_i \quad (9.3)$$

Entwickelt man  $\tilde{H}(1, p; u_i, m_j, x)$  als Taylorreihe bezüglich  $p$  um  $\bar{p}$  bis zum linearen Term einschließlich, so gilt:

$$\tilde{H}(1, p; u_i, m_j, x) \approx \tilde{H}(1, \bar{p}; u_i, m_j, x) + \sum_{k=1}^t (p_k - \bar{p}_k) \frac{\partial \tilde{H}}{\partial p_k} \Big|_{(1, \bar{p}; u_i, m_j, x)} \quad (9.4)$$

Entlang der Schadensachse werden Schadenswerte  $x_1$ ,  $1 = 1, 2, \dots$  gewählt, die den gesamten Schadensbereich in der gewählten Darstellungsform gut abdecken, z.B. die Menge

$$\{x = n_1 \cdot 10^{n_2}, \quad n_1 = 1, \dots, 9 \quad n_2 = 0, 1, \dots\}$$

Die partiellen Differentialquotienten werden durch rechts- bzw. linksseitige partielle Differenzenquotienten  $\Delta_k(1, \bar{p}; u_i, m_j, x_1)$  approximiert, je nach Lage des ausgespielten Parameterwertes  $p_k$ . Die Differenzenquotienten stammen aus den Variationsläufen des Unfallfolgenmodells mit den Parameterkombinationen aus Abschnitt 9.3.2. Damit wurde die folgende "response"-Funktion an der Stelle  $x_1$  in Abhängigkeit von  $a$  und  $p$  erstellt:

$$\hat{F}(a, p; x_1) = \sum_{i=1}^r \left( \sum_{j=1}^s [\tilde{H}(1, \bar{p}; u_i, m_j, x_1) + \sum_{k=1}^t \Delta_k(1, \bar{p}; u_i, m_j, x_1) \cdot (p_k - \bar{p}_k)] g_j \right) a_i \quad (9.5)$$

$1 = 1, \dots$

Diese "response"-Funktion hat die folgenden Eigenschaften: Für jeden gewählten Schadensumfang  $x_1$ , jede Freisetzungskategorie  $u_i$  und jede Standortregion  $m_j$  ist die betreffende bedingte "response"-Funktion stetig, bereichsweise linear in den unsicheren Parametern  $p_1, \dots, p_t$  und interpolierend um den Zentralpunkt  $\bar{p}$ , d.h.:

- In jedem der  $2^t$ -"Quadranten" um den Zentralpunkt  $\bar{p}$  wird eine eigene "response"-Funktion verwendet, die linear ist in

$p_1, \dots, p_t$ . Diese "response"-Funktionen schließen stetig aneinander an.

- Setzt man als Parameterkombination eine der  $2t+1$  anfangs festgelegten Parameterkombinationen in die "response"-Funktion ein, so liefert sie dasselbe Basisergebnis wie das Unfallfolgenmodell.
- Änderungen in den unsicheren Parametern  $a_1, a_2, \dots, a_r$  gehen ohne Näherung ein.

### 9.3.4 Simulation und Bestimmung der Vertrauensintervalle für die Häufigkeit

Die unsicheren Parameter  $p_1, \dots, p_t$  werden gemäß ihren in Abschnitt 9.2.2.2 konstruierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen mittels Monte-Carlo-Simulation ausgespielt. Zur Simulation der Freisetzungshäufigkeiten  $a_1, \dots, a_r$  werden zunächst die in Tabelle F8, 9-3 aufgeführten logarithmisch normalverteilten Zufallsgrößen ausgespielt (Abschnitt 9.2.2.1) und damit anhand der Funktionen  $y_1, \dots, y_r$  sowie unter Berücksichtigung der entsprechenden Zuschläge die Freisetzungshäufigkeiten  $a_1, \dots, a_r$  berechnet. Das Ergebnis eines Simulationslaufs sind jeweils die beiden Vektoren  $(p_1, \dots, p_t)$  und  $(a_1, \dots, a_r)$ .

Die "response"-Funktion liefert dazu einen Wertesatz  $\hat{F}(a, p; x_l)$   $l = 1, \dots$ . Damit liegt für jede Parameterausspielung eine komplementäre Häufigkeitsverteilung des Schadens diskret, d.h. punktweise in den Schadenspunkten  $x_l$  vor. Nach 1 000 Simulationsläufen gibt es zu jedem Schadensumfang  $x_l$  1 000 Werte der komplementären Häufigkeitsverteilung des Schadens. Die jeweils 1 000 Werte ergeben je eine empirische Verteilung, deren 5-%- und 95-%-Fraktile berechnet, aufgetragen und entlang der Schadensachse miteinander verbunden werden. Das auf diese Weise entstehende Band repräsentiert die Menge der lokalen subjektiven Vertrauensintervalle für die komplementäre Häufigkeitsverteilung des Schadens.



Bild F8, 9-15 zeigt die lokalen, subjektiven Vertrauensintervalle für frühe und Bild F8, 9-16 für späte Todesfälle (zum Basisergebnis, Abschnitt 9.3.2).

Die in diesen und einigen der folgenden Bilder auftretenden Vorzeichenwechsel der Kurveninkremente, insbesondere der unteren Grenzlinie der Vertrauensintervalle, sind in erster Linie auf Ungenauigkeiten der "response"-Funktion sowie auf die Tatsache zurückzuführen, daß es sich um lokale Vertrauensbereiche handelt, ihre Endpunkte also nicht auf ein und derselben komplementären Häufigkeitsverteilung liegen müssen.

Die Vertrauensintervalle in Bild F8, 9-15 und -16 sind anhand je eines Standortes aus jeder der vier meteorologischen Regionen ermittelt worden (Abschnitt 9.3.2). Die Vertrauensbereiche der komplementären Häufigkeitsverteilungen in der vorliegenden Studie (19 Standorte  $\hat{=}$  25 Anlagen) wurden durch Übertragung der Faktoren zwischen Wert der Referenzkurve (Basisergebnis, beruhend auf den Referenzwerten der unsicheren Parameter einschließlich Freisetzungshäufigkeiten) im Abszissenpunkt  $x_1$ ,  $l = 1, 2, \dots$  und oberem bzw. unterem Endpunkt des zugehörigen Vertrauensintervalls erhalten. Der Übertrag konnte in dieser einfachen multiplikativen Form aufgrund folgenden Zusammenhangs durchgeführt werden:

Als Basisergebnis aus allen 19 Standorten hätte man erhalten

$$\hat{P}_{25}(a, p; x_1) = \sum_{i=1}^r \left( \sum_{j=1}^s \left( \sum_{h=1}^{h_j^*} [H(1, \bar{p}; u_i, m_j, o_{j,h}, x_1) + \sum_{k=1}^t \Delta_k(1, \bar{p}; u_i, m_j, o_{j,h}, x_1) (p_k - \bar{p}_k) l g_{j,h}] \right) \right) a_i$$

mit

$$\begin{aligned} h_j^* &= \text{Anzahl der Standorte in der Region } m_j \\ o_{j,h} &= \text{Standort } h \text{ in der Region } m_j \\ g_{j,h} &= y_{j,h}/25 \\ y_{j,h} &= \text{Anzahl der Anlagen am Standort } o_{j,h} \end{aligned}$$

Aus jeder Standortregion wurde aber jener Standort ausgewählt, zu dem in der Schadensart "frühe Todesfälle" im Referenzfall der maximale Schadensumfang errechnet wird. Diese Standorte

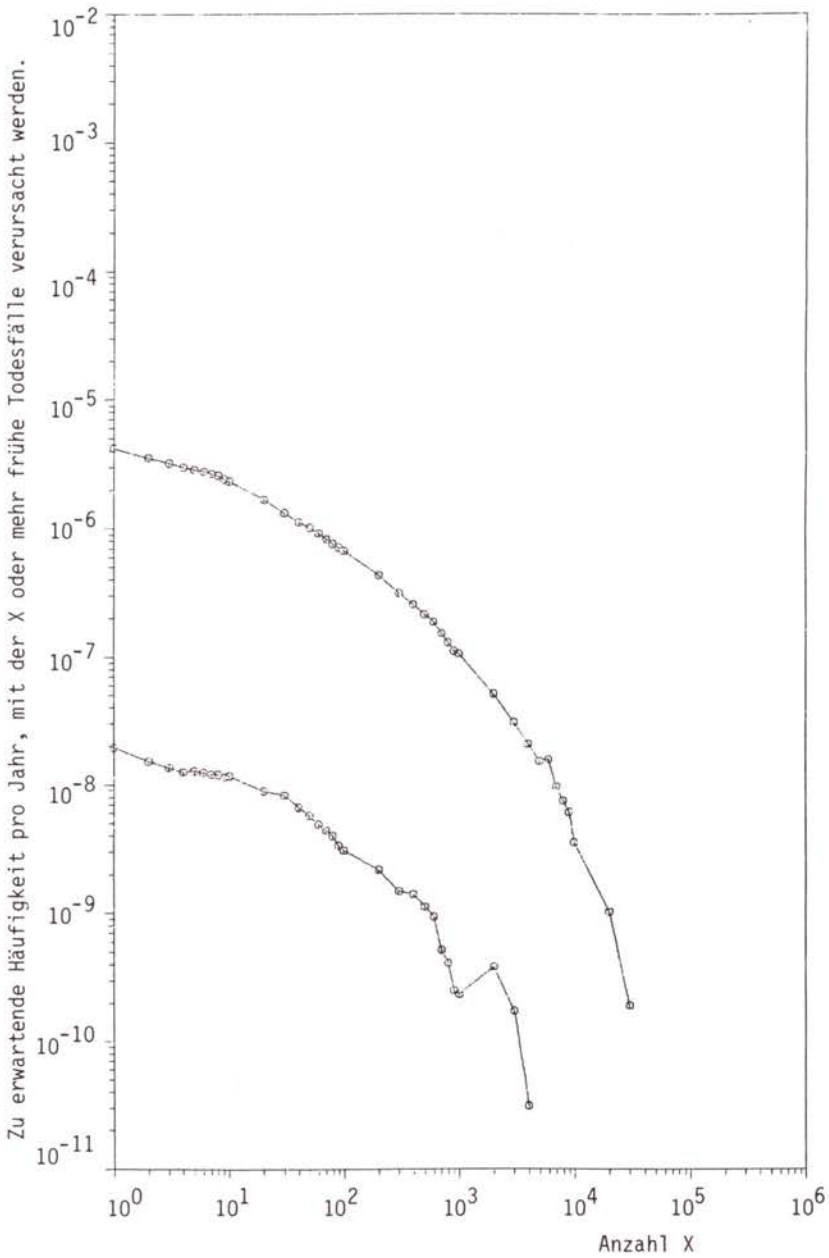
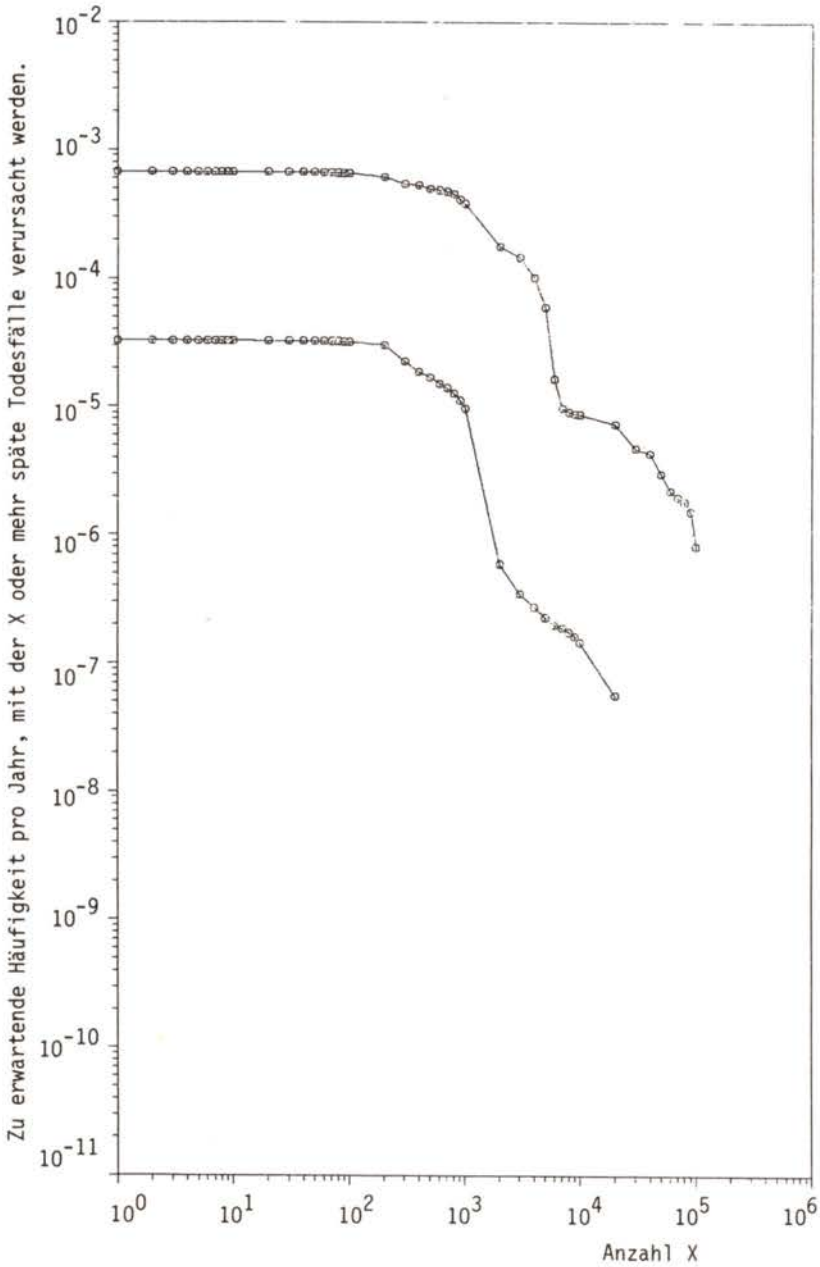


Bild F8, 9-15:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle"  
(zum Basisergebnis)



**Bild F8, 9-16:**

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis)

dienten zur näherungsweise Ermittlung folgender Quotienten aus Q-%-Fraktile und Wert zum Referenzfall des Basisergebnisses zu 25 Anlagen:

$$\frac{\hat{H}_{25}^{(Q)}(A, P; x_1)}{\hat{H}_{25}(\tilde{a}, \tilde{p}; x_1)} \approx \frac{\hat{F}_{25}^{(Q)}(A, P; x_1)}{\hat{H}_{25}(\tilde{a}, \tilde{p}; x_1)} \approx \frac{\hat{F}_S^{(Q)}(A, P; x_1)}{\hat{H}_S(\tilde{a}, \tilde{p}; x_1)}$$

mit

$$\hat{F}_S(a, p; x_1) = \sum_{i=1}^r \left( \sum_{j=1}^s [\tilde{H}(1, \tilde{p}; u_i, m_j, x_1) + \sum_{k=1}^t \Delta_k(1, \tilde{p}; u_i, m_j, x_1) (p_k - \tilde{p}_k)] g_j \right) a_i$$

und

A, P als Zufallsgrößen mit den Realisationen a bzw. p,  
 Q = 5 % bzw. 95 %  
 $g_j = y_j / 25$   
 $y_j =$  Anzahl der Anlagen in der Standortregion  $m_j$

Als Ergebnis für die 25 Anlagen der Studie erhält man:

$$H_{25}^{(Q)}(A, P; x_1) = 25 \cdot \hat{H}_{25}^{(Q)}(A, P; x_1) \approx 25 \cdot \hat{F}_{25}^{(Q)}(A, P; x_1) \approx 25 \cdot \hat{H}_{25}(\tilde{a}, \tilde{p}; x_1) \cdot \frac{\hat{F}_S^{(Q)}(A, P; x_1)}{\hat{H}_S(\tilde{a}, \tilde{p}; x_1)}$$

wobei es sich (gemäß der Interpretation der  $a_i$ ) bezüglich der Freisetzungshäufigkeiten um das Mittel der Summe über je 25 Anlagen (ausgedrückt durch das 25fache des Mittels über viele Anlagen) an den 19 betrachteten Standorten handelt.

Bei der Multiplikation einer Zufallsgröße mit einer positiven Konstanten bleiben die Faktoren zwischen Fraktile (bzw. zwischen dem Wert zum Referenzfall und einer beliebigen Fraktile) erhalten. Damit ist der vorgenommene Faktorübertrag formal gerechtfertigt.

Man kann davon ausgehen, daß dieser Faktorübertrag aus der Referenzkurve zu den vier nach obigen Kriterien (Abschnitt 9.3.2) ausgewählten Standorten auf die Referenzkurve zu den 19 Standorten (25 Anlagen) der vorliegenden Studie die Vertrauensgren-

zen nicht zur unsicheren Seite hin verschiebt, so daß die subjektive Konfidenzaussage bestehen bleibt.

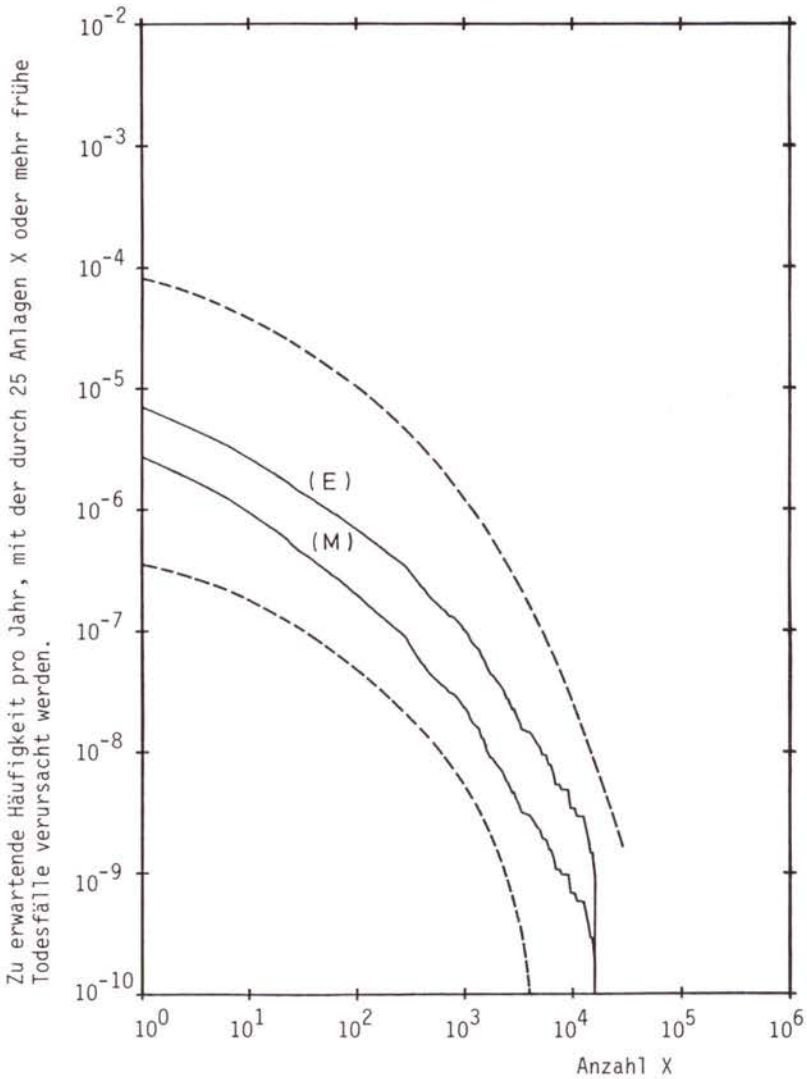
Die Bilder F8, 9-17 und -18 zeigen die Menge der übertragenen und durch glatten Kurvenzug verbundenen lokalen subjektiven Vertrauensintervalle.

### 9.3.5 Vertrauensbereiche für den Schaden

Die in Abschnitt 9.3.4 angewandte Methode liefert primär Vertrauensintervalle für die Häufigkeit. Vertrauensintervalle in Richtung des Schadens lassen sich nach Interpolation zwischen den diskreten Punkten einer jeden, über die "response"-Funktion ermittelten komplementären Häufigkeitsverteilung bestimmen. Die Kurvenzüge, die durch Verbindung der lokalen Vertrauensintervalle zu Häufigkeit bzw. Schadensumfang entstehen, zeigen eine derart gute Übereinstimmung, daß sie als "identisch" angesehen werden können. Der eingegrenzte Bereich umfaßt (zumindest näherungsweise) die Menge der lokalen Vertrauensintervalle in beiden Richtungen. Daher kann für diesen Bereich die Doppelaussage formuliert werden:

- Mit 90 % subjektiver Aussagesicherheit liegt die zu erwartende Häufigkeit pro Jahr von Unfällen mit Schadensumfang  $\geq x$  innerhalb der Bandgrenzen zum Abszissenwert  $x$  und
- mit 90 % subjektiver Aussagesicherheit liegt der Schadensumfang, der mit einer vorgegebenen zu erwartenden Häufigkeit  $h$  pro Jahr überschritten wird, innerhalb der Bandgrenzen zum Ordinatenwert  $h$ .

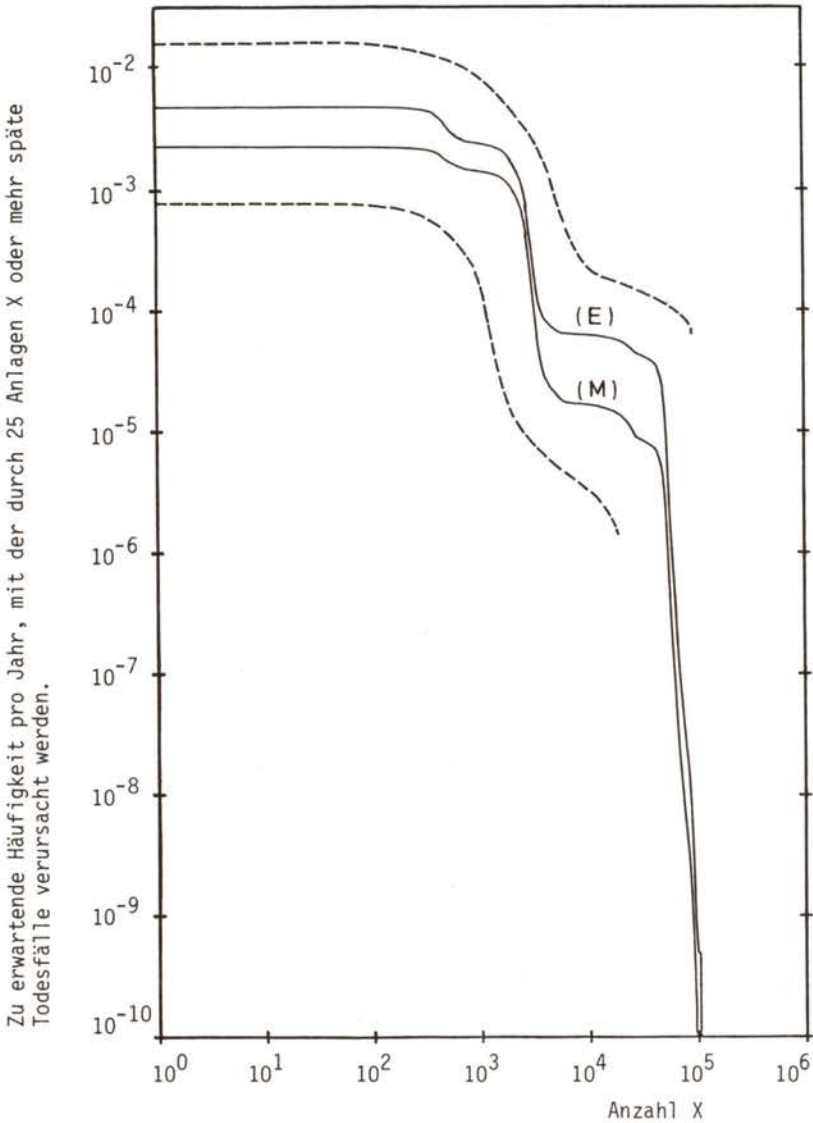
Die Aussagen gelten für 25 Anlagen des analysierten Typs und allein aufgrund der quantifizierten Schätzunsicherheiten (sofern also alle nicht quantifizierten Schätzunsicherheiten vernachlässigt werden können).



Kurve (E): Referenzkurve der Studie, ermittelt mit den Erwartungswerten der zu erwartenden Freisetzungshäufigkeiten  
Kurve (M): ermittelt mit den Medianen der zu erwartenden Freisetzungshäufigkeiten (analog zu WASH-1400)

Bild F8, 9-17:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (übertragen auf die Referenzkurve der Studie und "geglättet")



Kurve (E): Referenzkurve der Studie, ermittelt mit den Erwartungswerten der zu erwartenden Freisetzungshäufigkeiten  
Kurve (M): ermittelt mit den Medianen der zu erwartenden Freisetzungshäufigkeiten (analog zu WASH-1400)

Bild F8, 9-18:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (übertragen auf die Referenzkurve der Studie und "geglättet")

## 9.4 Ergänzende Untersuchungen

### 9.4.1 "Full three-level factorial design" (Vorstudie)

In einer Art Vorstudie wurde über den Vergleich mit Ergebnissen eines sogenannten "full three-level factorial design" /F8, 9-5/ (ohne Verwendung einer "response"-Funktion) festgestellt, daß die bereichsweise zugrunde gelegte Linearität der oben beschriebenen "response"-Funktion die Lage der Endpunkte der 90-%-Vertrauensintervalle nur geringfügig beeinflusst. Die Vorstudie fand auf der Basis von Dreipunktverteilungen (Fraktilangaben der Experten) der unsicheren Parameter  $p_2, \dots, p_t$  (noch ohne den Parameter "thermische Energiefreisetzungsrates") sowie der simulativ gewonnenen Verteilungen der zu erwartenden Freisetzungshäufigkeiten statt. Dabei lagen für die Zufallsgrößen (Abschnitt 9.2.2.1), die an den kondensierten, funktionalen Ausdrücken der Freisetzungshäufigkeiten beteiligt sind, erst vorläufige Werte vor. Ferner wurde noch nicht zwischen der trockenen Ablagerungsgeschwindigkeit von Jod und Aerosolen unterschieden.

### 9.4.2 Simulationsstudien

Die Expertenangaben zu den Unsicherheiten der Parameter sind nicht so erschöpfend, daß dadurch bereits vollständige Verteilungen in eindeutiger Weise festgelegt wären. Um die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber der Wahl des Verteilungstyps zu untersuchen, wurden verschiedene Verteilungstypen für die unsicheren Parameter (ohne Freisetzungshäufigkeiten) gewählt und die damit ermittelten Vertrauensbereiche miteinander verglichen. Im einzelnen wurden untersucht:

#### - Loguniformverteilung

Sämtliche Parameter (mit Ausnahme der Freisetzungshäufigkeiten) wurden als loguniformverteilt betrachtet mit den angegebenen 10-%- (bzw. 5-%-), 50-%- und 90-%- (bzw. 95-%-)Frak-



tilen. (Eine Zufallsgröße ist loguniformverteilt, wenn deren Logarithmus gleichverteilt ist.) Die betreffenden Vertrauensbereiche (zum Basisergebnis - Abschnitt 9.3.2) sind in Bild F8, 9-19 und -20 eingetragen (zu vergleichen mit F8, 9-15 bzw. -16).

- Gestutzte Normalverteilung

Die Parameter wurden als normalverteilt betrachtet unter Beibehaltung der angegebenen 10-%- und 90-%- (bzw. 5-%- und 95-%-)Fraktile, d.h. mit  $p_k^{(-)}$  als 10-%- (bzw. 5-%-) und  $p_k^{(+)}$  als 90-%- (bzw. 95-%-)Fraktile des k-ten Parameters. Zusätzlich wurde diese Normalverteilung bei  $0,5 p_k^{(-)}$  und bei  $2 p_k^{(+)}$  nach unten bzw. nach oben gestutzt, so daß bei der Simulation nur Werte aus dem Intervall  $[0,5 p_k^{(-)}, 2 p_k^{(+)}$ ] ausgespielt werden konnten. Die Bilder F8, 9-21 und -22 zeigen die damit ermittelten Vertrauensbereiche (Basisergebnis).

- Histogramm-Verteilung

Die Verteilung jedes einzelnen Parameters bildet ein Histogramm über den vier Intervallen  $[0,5 p_k^{(-)}, p_k^{(-)}]$ ,  $[p_k^{(-)}, p_k^{(50\%)}]$ ,  $[p_k^{(50\%)}, p_k^{(+)}$ ],  $[p_k^{(+)}, 2 p_k^{(+)}$ ] mit den Einzelwahrscheinlichkeiten 0,1; 0,4; 0,4; 0,1 (bzw. 0,05; 0,45; 0,45; 0,05). Bei diesem Verteilungstyp bleiben die drei angegebenen Fraktile erhalten. Die Bilder F8, 9-23 und -24 zeigen die damit ermittelten Vertrauensbereiche (Basisergebnis).

Ein Vergleich der Bilder F8, 9-15, -19, -21 und -23 bzw. F8, 9-16, -20, -22 und -24 zeigt, daß die Unterschiede zwischen den Vertrauensbereichen zu den einzelnen Verteilungstypen der unsicheren Parameter gering sind. Der Grund für diese relative Unempfindlichkeit der Vertrauensbereiche gegenüber Änderungen des Typs der Verteilung der unsicheren Parameter liegt zum Teil darin, daß die Einflüsse einiger dieser Parameter die Tendenz haben, sich gegenseitig auszugleichen. Während einige einflußreiche Parameter die Eigenschaft zeigen, daß die Ausspielung höherer Parameterwerte eine Erhöhung des errechneten Risikos zur Folge hat, zeigen andere einflußreiche Parameter gerade

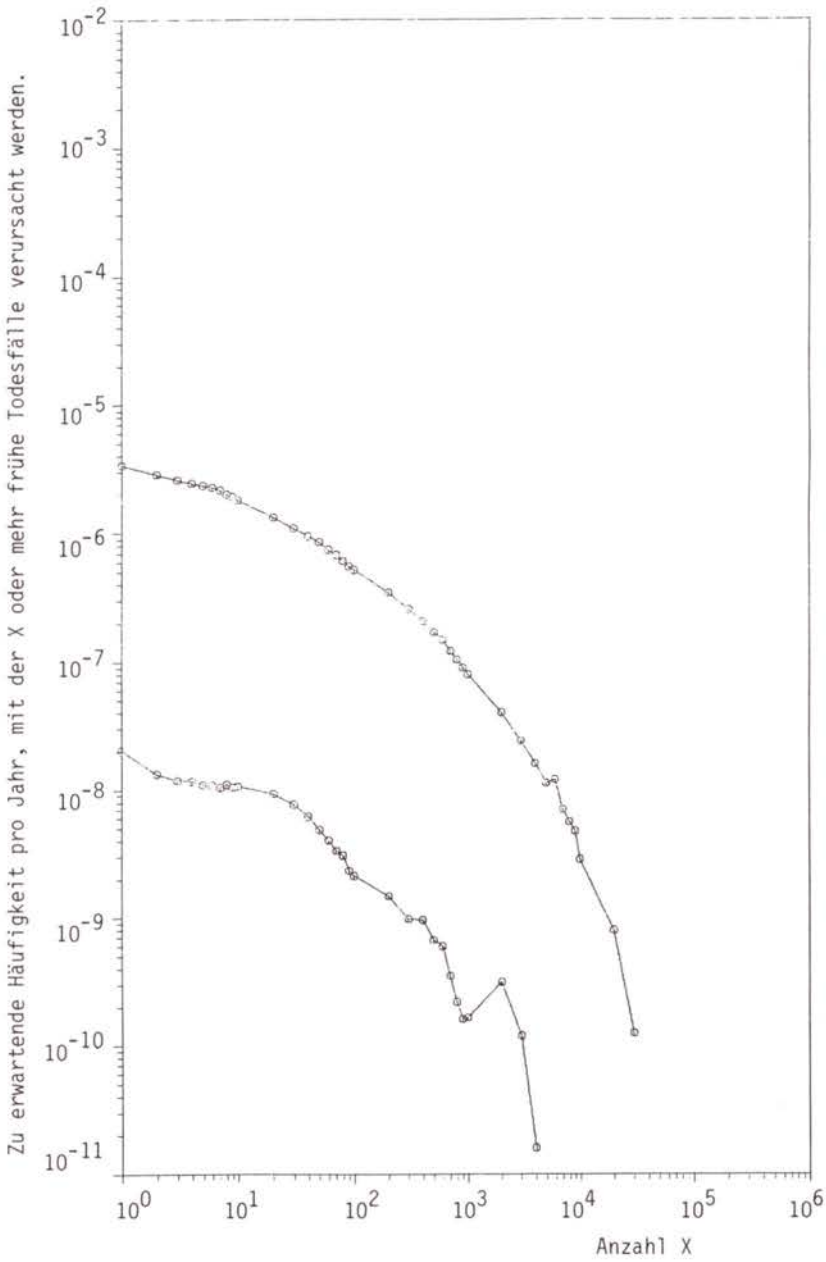


Bild F8, 9-19:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis); Loguniformverteilungen für die Parameter  $P_1, \dots, P_t$

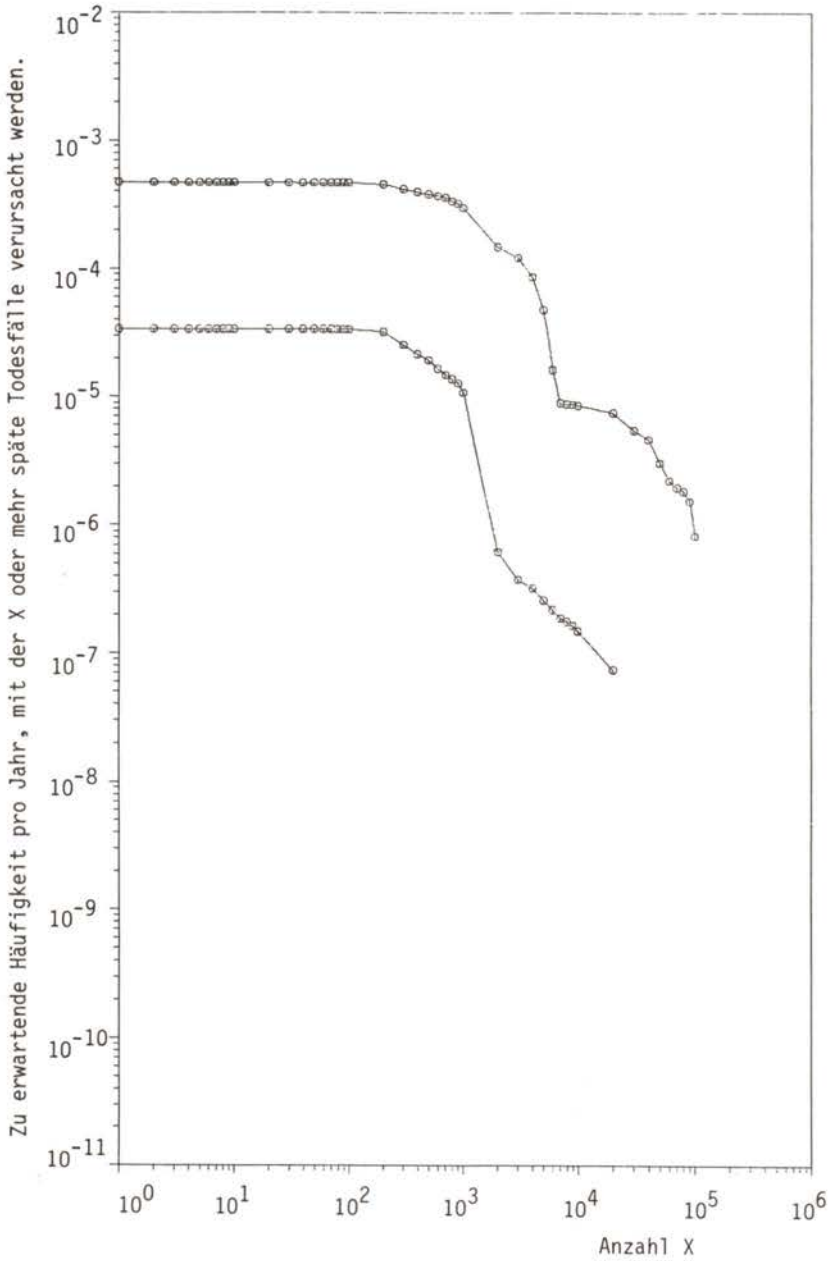


Bild F8, 9-20:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis); Loguniformverteilungen für die Parameter  $p_1, \dots, p_t$

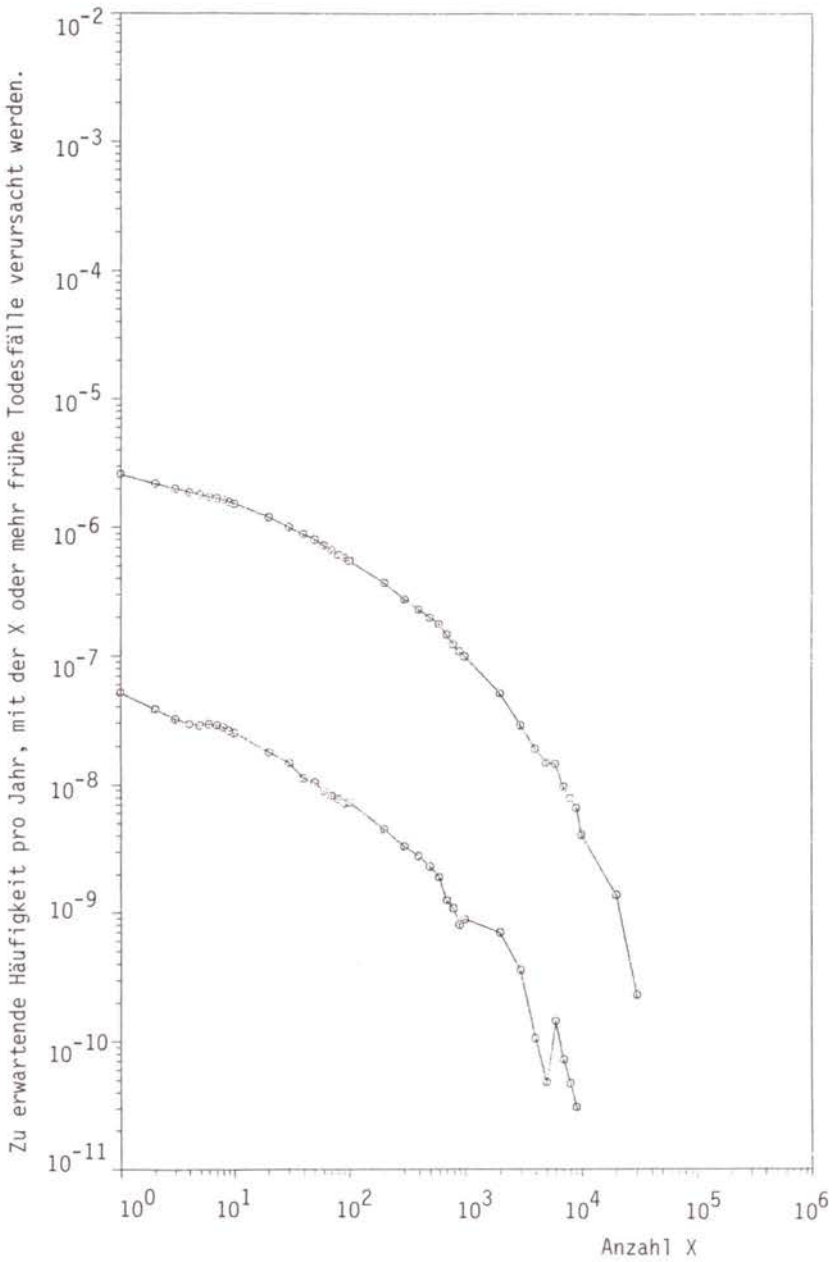


Bild F8, 9-21:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis); gestutzte Normalverteilungen für die Parameter  $P_1, \dots, P_t$

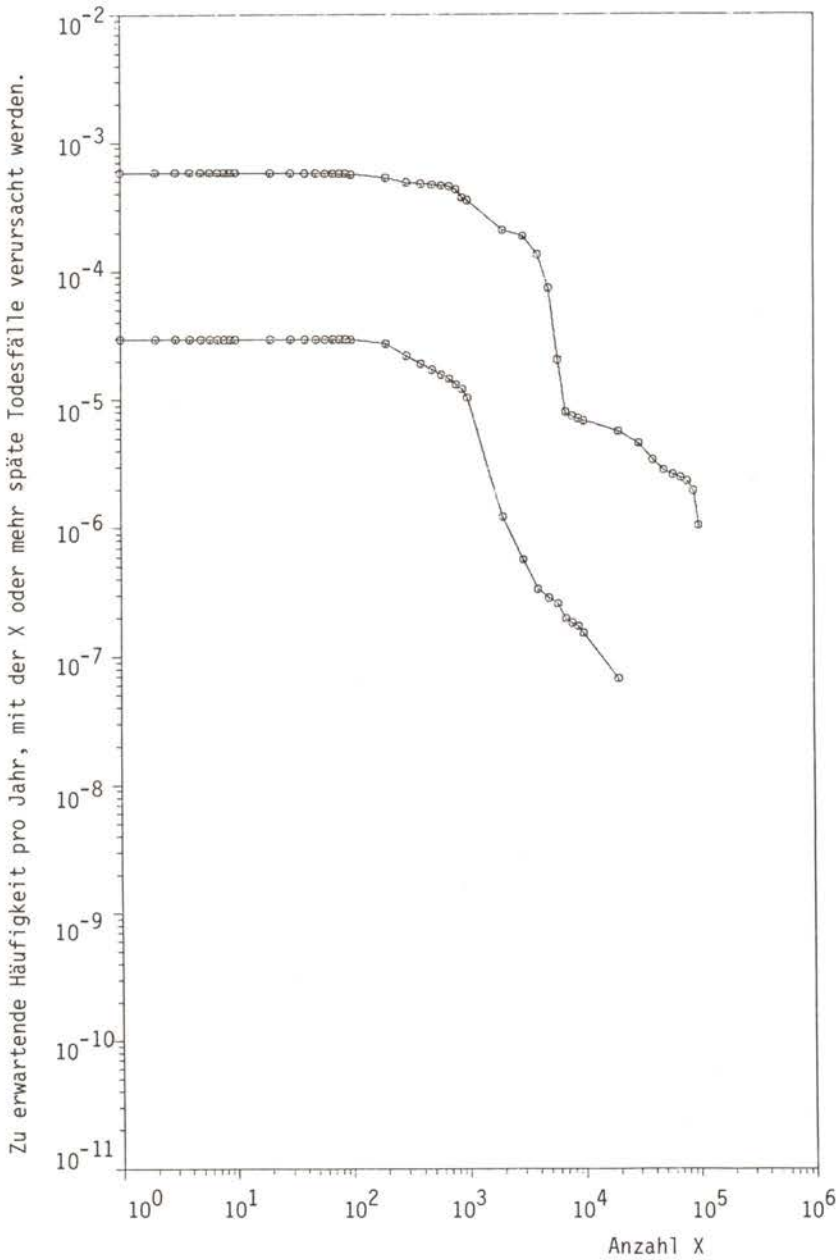


Bild F8, 9-22:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis); gestutzte Normalverteilungen für die Parameter  $p_1, \dots, p_t$

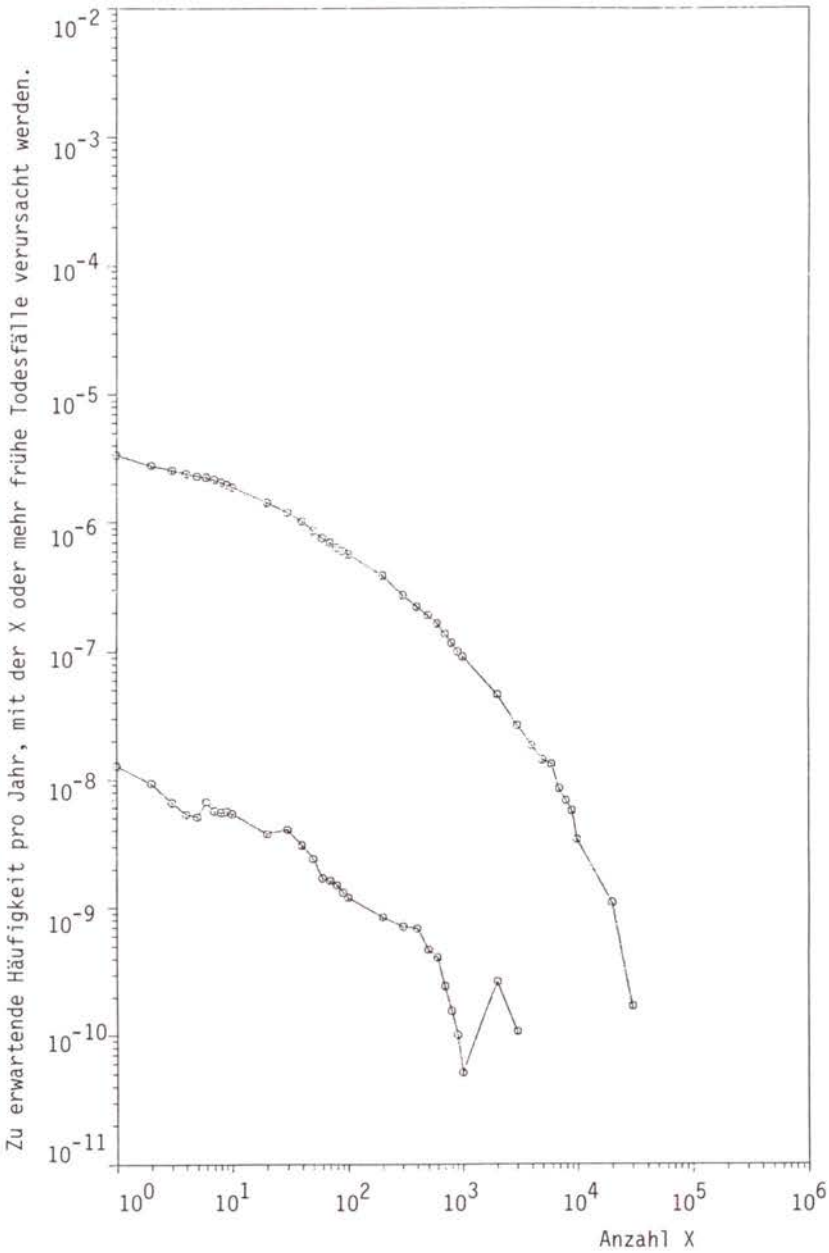


Bild F8, 9-23:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis); Histogrammverteilungen für die Parameter  $p_1, \dots, p_t$

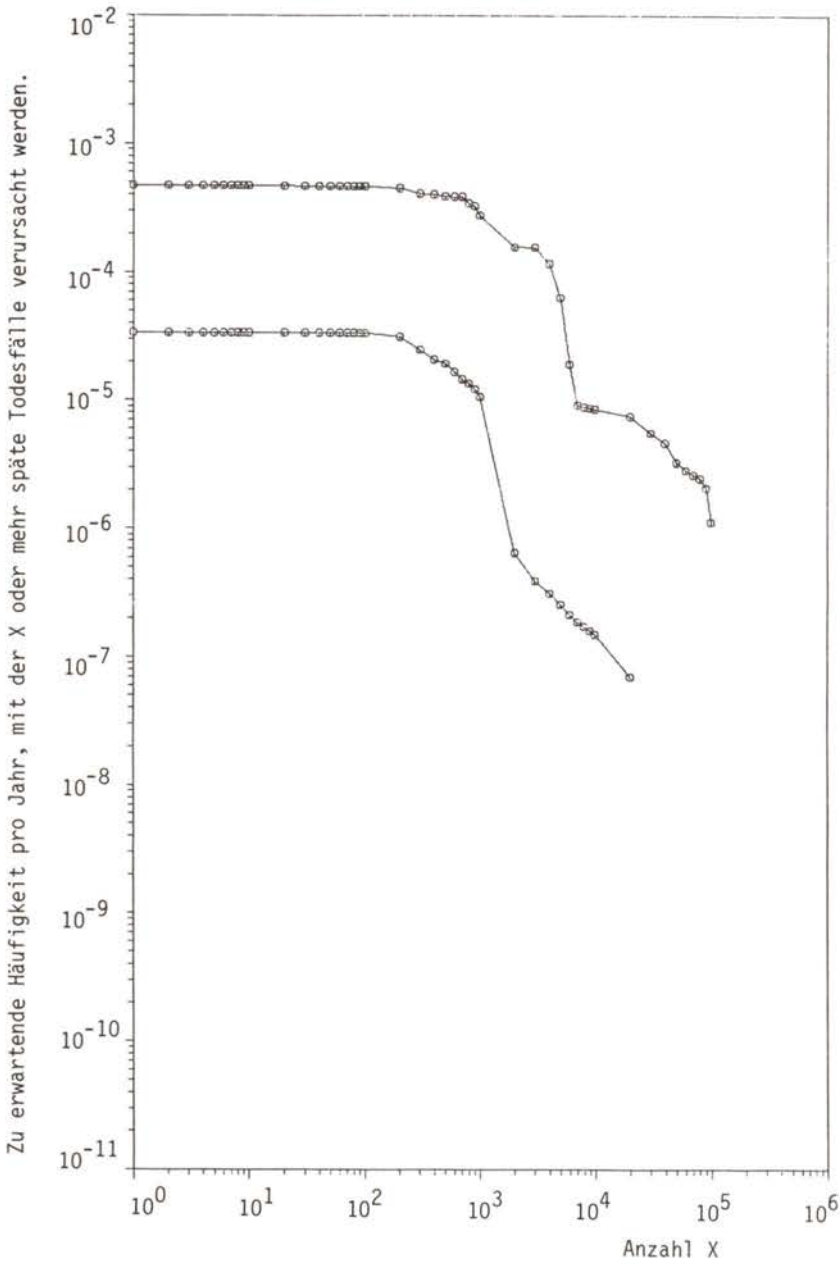


Bild F8, 9-24:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis); Histogrammverteilungen für die Parameter  $p_1, \dots, p_t$

die entgegengesetzte Wirkung. Deshalb beeinflußt z.B. die Normalverteilung, die bei gleichen 10-%- und 90-%-Fraktile einen höheren Erwartungswert aufweist als die entsprechende logarithmische Normalverteilung (für hier interessante Streufaktoren), die Lage der Vertrauensintervalle nicht allein in Richtung höherer Werte.

Um den Einfluß der quantifizierten Schätzunsicherheiten in den Ereignisabläufen (also in den Freisetzungshäufigkeiten) vom Einfluß der quantifizierten Schätzunsicherheiten in den Expositionsabläufen (also im Unfallfolgenmodell) getrennt darstellen zu können, wurden in einer weiteren Simulationsstudie einerseits die unsicheren Parameter  $p_1, \dots, p_t$ , andererseits die Freisetzungshäufigkeiten  $a_1, \dots, a_r$  bei ihren jeweiligen Referenzwerten konstant belassen.

Die Bilder F8, 9-25 und -26 zeigen den Einfluß der quantifizierten Schätzunsicherheiten in den Freisetzungshäufigkeiten allein. Für die übrigen unsicheren Parameter wurden die Referenzwerte (Tabelle F8, 9-8) verwendet.

Die Bilder F8, 9-27 und -28 zeigen den Einfluß der quantifizierten Schätzunsicherheiten in den unsicheren Parametern  $p_1, \dots, p_t$  (logarithmisch normalverteilt) allein. Für die Freisetzungshäufigkeiten wurden die Referenzwerte (Erwartungswerte) aus Tabelle F8, 9-5(2) verwendet.

Anmerkung:

*Zur Erzeugung der Vertrauensbereiche wurden die Parameter 1000mal simuliert. Da gemäß parameterfreier statistischer Verfahren /F8, 9-3, S. 34 ff./ die Schätzgenauigkeit für die 5-%- und 95-%-Fraktile bei einem Stichprobenumfang von  $n = 1000$  bereits sehr gut ist, wurde die Simulationszahl 1000 für alle Untersuchungen beibehalten. Zusätzlich durchgeführte Simulationsstudien mit mehreren Tausend Spielen ergaben in der Tat keine nennenswerten Genauigkeitsergebnisse.*



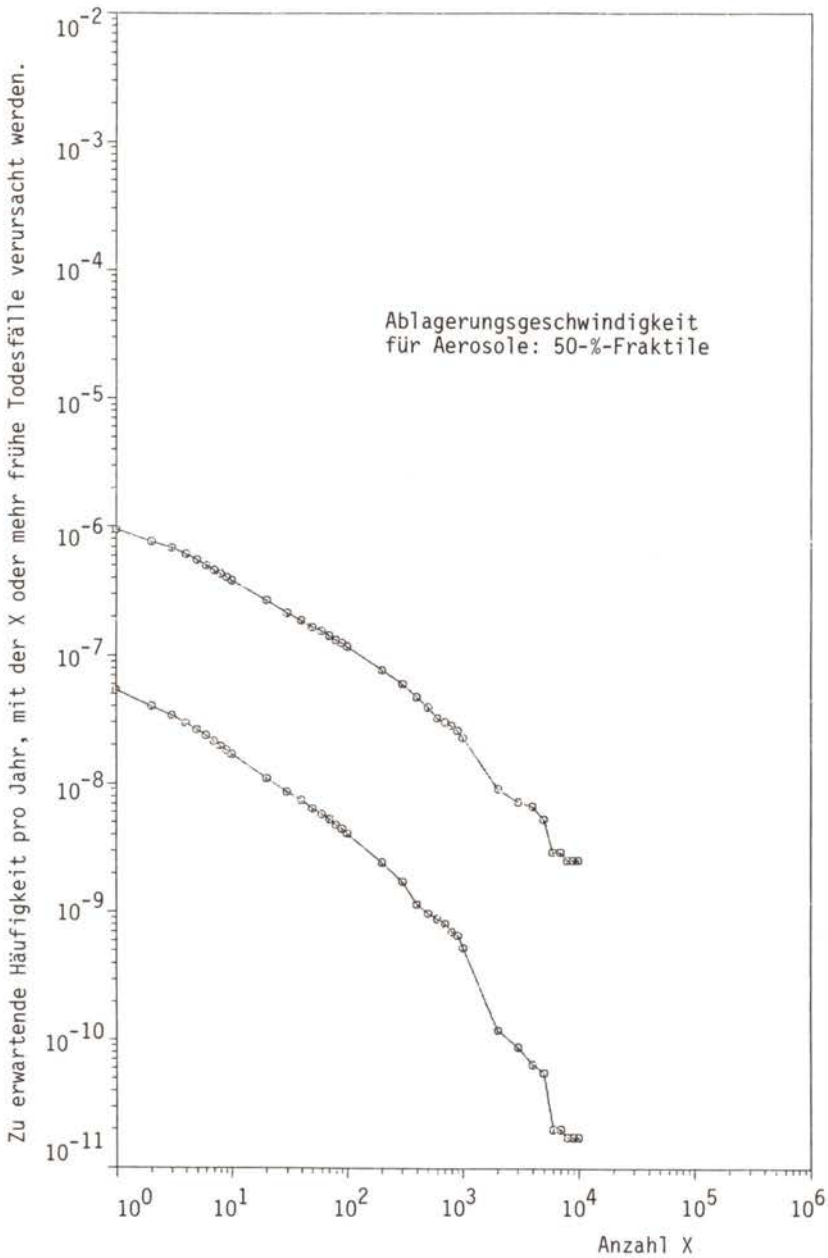


Bild F8, 9-25:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis); Einfluß der Unsicherheit der Freisetzungshäufigkeiten allein

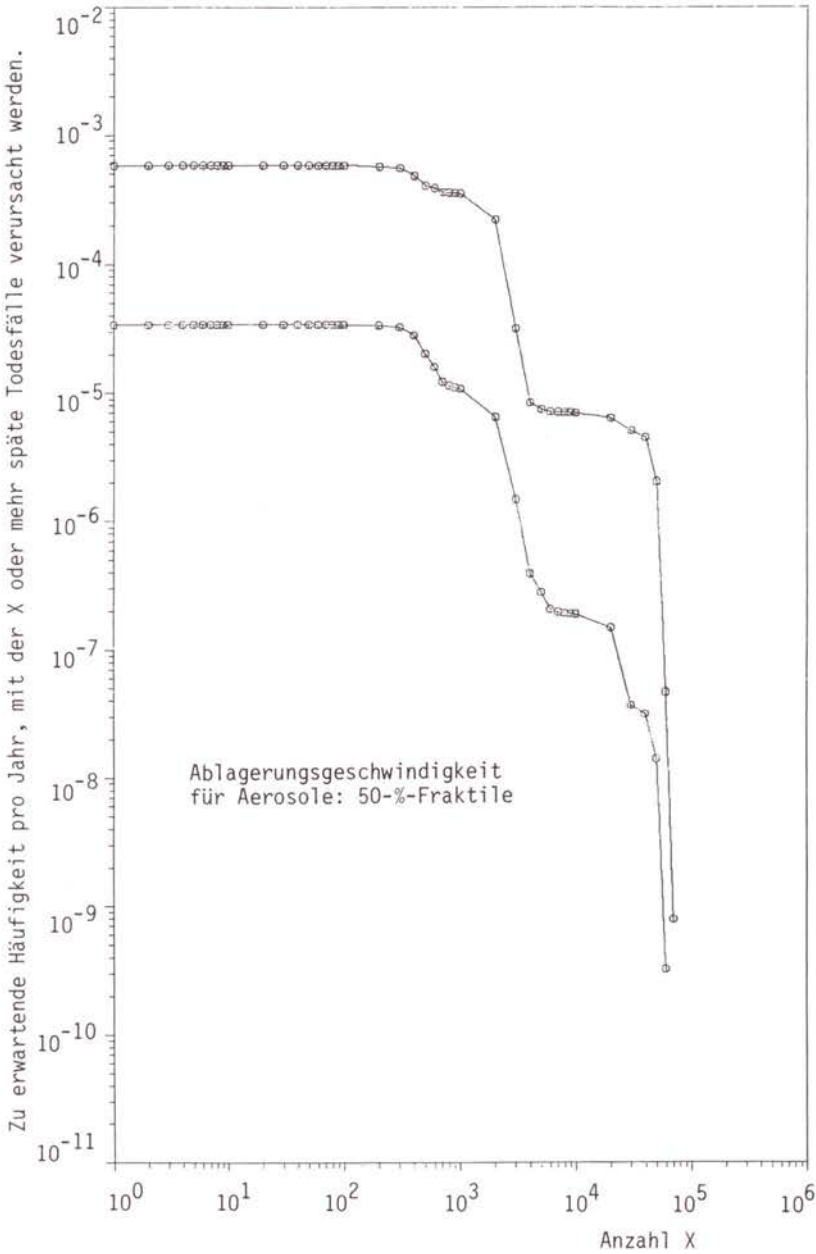


Bild F8, 9-26:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis); Einfluß der Unsicherheit der Freisetzungshäufigkeiten allein

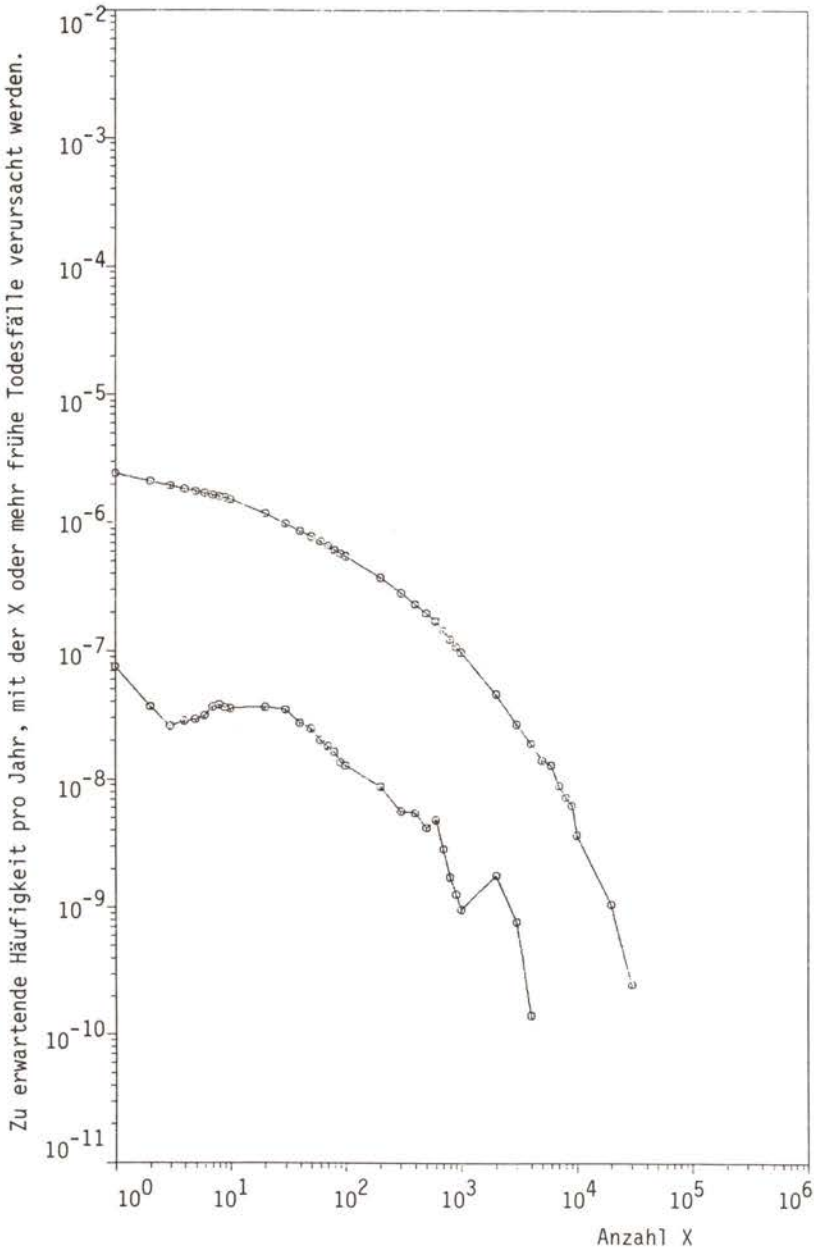


Bild F8, 9-27:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis); Einfluß der Unsicherheit der Parameter  $p_1, \dots, p_t$  allein

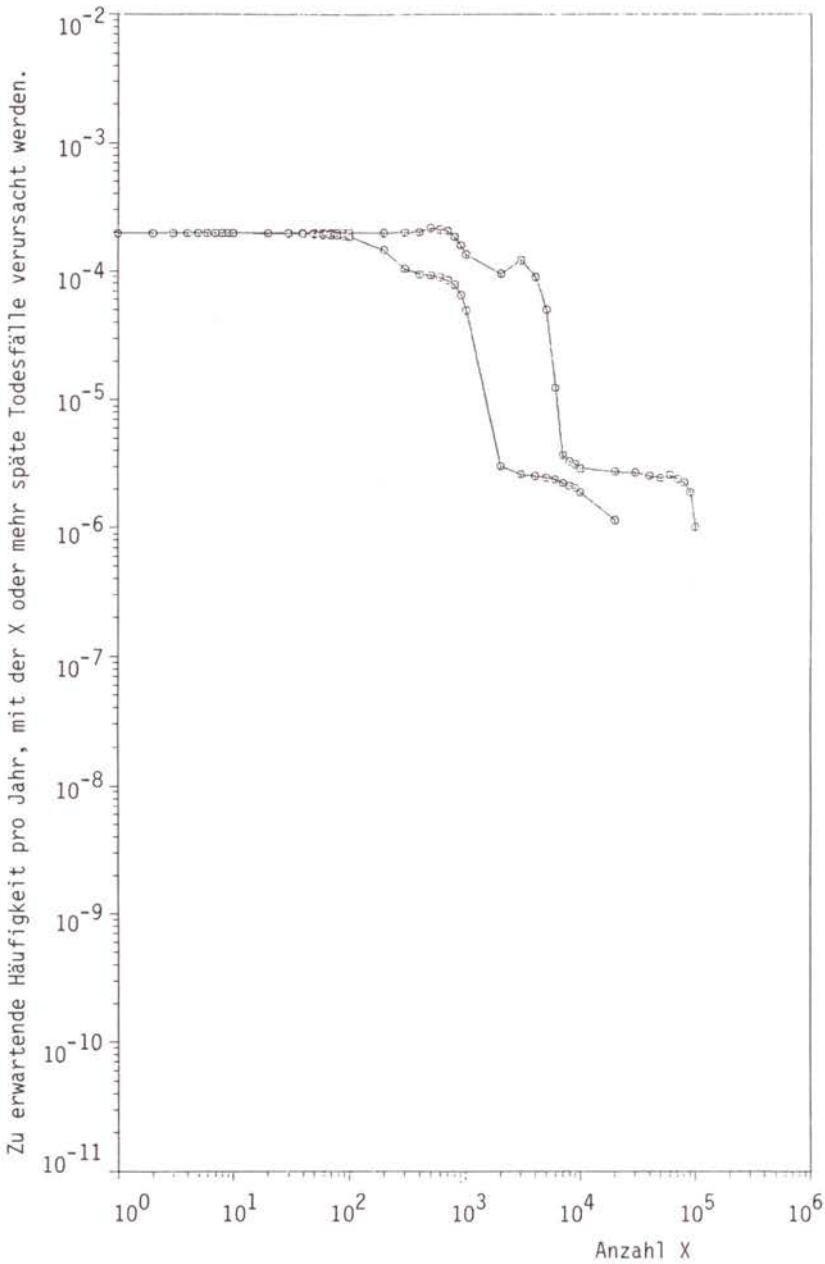


Bild F8, 9-28:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "späte Todesfälle" (zum Basisergebnis); Einfluß der Unsicherheit der Parameter  $p_1, \dots, p_t$  allein

### 9.4.3 Ein "WEIBULL-Ansatz" als alternative Methode zur Ermittlung von Vertrauensbereichen zur Schadensart "frühe Todesfälle"

Diese Untersuchung wurde motiviert durch die Ausarbeitungen in /F8, 9-6/. Darin wurde der Versuch unternommen, an die Häufigkeitsverteilung für "frühe Todesfälle" eine der bekannten Wahrscheinlichkeitsverteilungen anzupassen. Unter den verschiedenen Verteilungen, die an die Ergebnisse von WASH-1400 angepaßt wurden, lieferte die sogenannte verallgemeinerte WEIBULL-Verteilung<sup>1)</sup> die geringste Abweichung. Die Ergebnisse dieser Arbeit legten es nahe, auch in der vorliegenden Risikostudie die verallgemeinerte WEIBULL-Verteilung zur Repräsentation der Häufigkeitsverteilung der frühen Todesfälle heranzuziehen. Im folgenden werden die einzelnen Schritte des als "WEIBULL-Ansatz" bezeichneten Verfahrens kurz erläutert.

Dem Verfahren liegt die Annahme zugrunde, daß die bedingte Häufigkeitsverteilung der frühen Todesfälle für jede einzelne Freisetzungskategorie und jeden einzelnen Standort durch eine verallgemeinerte WEIBULL-Verteilung repräsentiert werden kann, d.h., für jede Parameterkombination  $p$ , Freisetzungskategorie  $u_i$  und jeden Standort  $m_j$  kann die zu erwartende Häufigkeit pro Jahr eines Schadensumfanges  $\geq x$  dargestellt werden durch einen Ausdruck der Form:

$$A \cdot \exp\left\{-\left(\frac{x-1}{\alpha}\right)^c\right\} \quad (9.6)$$

Die sogenannten WEIBULL-Parameter  $A$ ,  $\alpha$  und  $c$  hängen ab von den unsicheren Parametern  $p$ , der Freisetzungskategorie  $u_i$  und dem Standort  $m_j$ . Es kann daher angesetzt werden (Bezeichnung wie in Abschnitt 9.3.3):

<sup>1)</sup> Die verallgemeinerte WEIBULL-Verteilung ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, deren komplementäre Verteilungsfunktion  $R(x)$  die Form hat:

$$R(x) = A \cdot \exp\left\{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^c\right\} \quad x \geq x_0$$

$x_0 \geq 0$ ,  $0 < A \leq 1$ ,  $\alpha > 0$ ,  $c > 0$  sind Parameter dieser Verteilung.

$$\tilde{H}(1, p; u_i, m_j, x) = A_{ij}(p) \exp\left[-\left(\frac{x-1}{\alpha_{ij}(p)}\right)^{c_{ij}(p)}\right] \quad (9.7)$$

Aus den Daten der vorliegenden Läufe des Unfallfolgenprogramms mit den in Abschnitt 9.3.2 festgelegten  $2t+1$  Parameterkombinationen werden die Koeffizienten  $A_{ij}(p)$ ,  $\alpha_{ij}(p)$  und  $c_{ij}(p)$  der betreffenden WEIBULL-Verteilungen nach einem statistischen Momentenschätzverfahren ermittelt.

In derselben Weise wie in Abschnitt 9.3.3 (Linearisierung und Differenzenapproximation) werden "response"-Funktionen für die drei WEIBULL-Parameter, pro Freisetzungskategorie und Standort, bezüglich der unsicheren Parameter  $p$  gebildet.

$$\hat{A}_{ij}(p) = A_{ij}(\bar{p}) + \sum_{k=1}^t \Delta_{ijk}^{(A)} (p_k - \bar{p}_k) \quad (9.8)$$

$$\hat{\alpha}_{ij}(p) = \alpha_{ij}(\bar{p}) + \sum_{k=1}^t \Delta_{ijk}^{(\alpha)} (p_k - \bar{p}_k) \quad (9.9)$$

$$\hat{c}_{ij}(p) = c_{ij}(\bar{p}) + \sum_{k=1}^t \Delta_{ijk}^{(c)} (p_k - \bar{p}_k) \quad (9.10)$$

Die endgültige "response"-Funktion  $\hat{F}(a, p; x)$ , die jeder beliebigen Parameterkombination  $p$  und jedem Vektor  $a$  der Freisetzungshäufigkeiten den zugehörigen Wert der komplementären Verteilung des Schadens an der Abszisse  $x$  zuordnet, lautet damit:

$$\hat{F}(a, p; x) = \sum_{i=1}^r \left[ \sum_{j=1}^s \hat{A}_{ij}(p) \exp\left[-\left(\frac{x-1}{\hat{\alpha}_{ij}(p)}\right)^{\hat{c}_{ij}(p)}\right] g_j \right] a_i \quad (9.11)$$

Die Vertrauensbereiche werden mit dieser "response"-Funktion durch Simulation der unsicheren Parameter  $p$  und der Freisetzungshäufigkeiten in der üblichen Art und Weise ermittelt. Bild F8, 9-29 zeigt die durch Kurvenzug verbundene Menge der lokalen, subjektiven, mit dem "WEIBULL-Ansatz" ermittelten Vertrauensintervalle. Sie unterscheiden sich, insbesondere am oberen Ende, nur mäßig von den Vertrauensintervallen des lokal stückweise linearen Ansatzes aus Abschnitt 9.3.3 (Bild F8, 9-15).

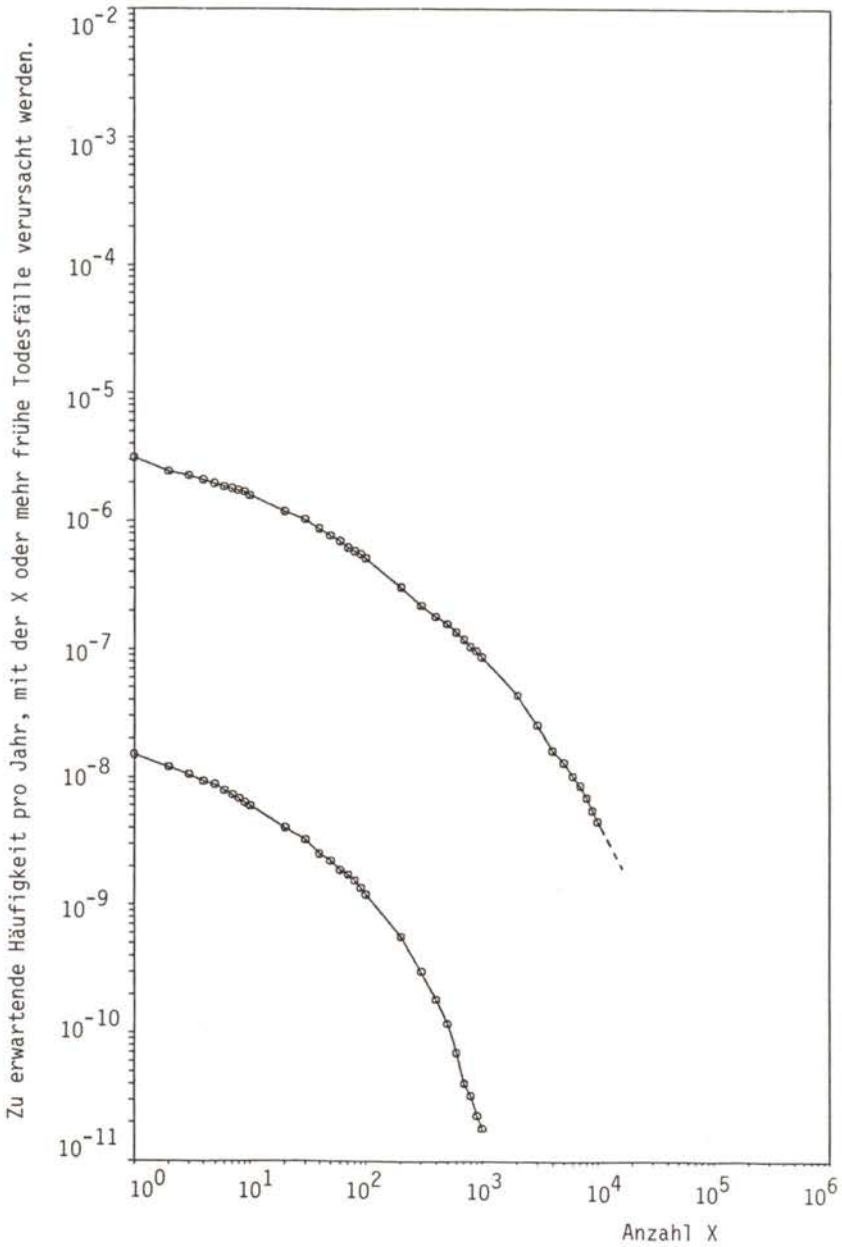


Bild F8, 9-29:

Lokaler, subjektiver Vertrauensbereich für "frühe Todesfälle" (zum Basisergebnis), ermittelt mit dem "WEIBULL-Ansatz"

Allerdings beginnen sich bei großem Schadensumfang Unsicherheiten des "WEIBULL-Ansatzes" (in der Näherung der WEIBULL-Parameter wie in der Approximation durch den WEIBULL-Funktions-  
typ) zunehmend stark auszuwirken. So ist für einige Kombinationen  $(u_i, m_j)$  bei bestimmten Parametervariationen die Darstellung der Häufigkeitsverteilung durch eine WEIBULL-Verteilung im Bereich großen Schadensumfanges sehr unbefriedigend. Dadurch wurde, neben  $0 \leq \hat{A} \leq 1$ , die Einführung folgender Beschränkungen für die WEIBULL-Parameter  $\hat{\alpha}$  und  $\hat{c}$  aus der Monte-Carlo-Simulation erforderlich:

$$\frac{1}{2} \min\{W_{i,j,n} \mid n=1, \dots, 2t+1\} \leq \hat{W}_{i,j} \leq 2 \max\{W_{i,j,n} \mid n=1, \dots, 2t+1\}$$
$$\hat{W}_{i,j} = \hat{\alpha}_{i,j}, \hat{c}_{i,j}.$$

Bei den Kombinationen  $(u_i, m_j)$ , für die die Anpassung einer WEIBULL-Verteilung nur unbefriedigend möglich war, wurden diese Beschränkungen im Verlaufe der Simulation erwartungsgemäß häufig angesprochen.



10. SCHRIFTTUM

- /F8, 2-1/ Rasmussen, N.C.:  
Reactor Safety Study. An Assessment of Accident  
Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants  
(NUREG-75/014), WASH-1400  
U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington,  
October 1975
- /F8, 3-1/ Bell, M.J.:  
ORIGEN, the ORNL Isotope Generation and Depletion  
Code  
ORNL 4628 (1973)
- /F8, 4-1/ Fortak, H.:  
Meteorologie  
Carl Habel Verlagsbuchhandlung, Berlin und Darm-  
stadt, 1971
- /F8, 4-2/ Pasquill, F.:  
The Estimation of the Dispersion of Windborne  
Material  
Met. Mag. 90 (1961), S. 33
- /F8, 4-3/ McCormick, R.A., und B. Gutsche:  
Meteorologie der Luftbeimengungen  
Freie Universität Berlin, Institut für Meteorolo-  
gie, Berlin, 1969
- /F8, 4-4/ Gifford, Jr., F.A.:  
Use of Routine Meteorological Observations for  
Estimating Atmospheric Dispersion  
Nuclear Safety 2 (1960/61) No. 4, S. 47/51
- /F8, 4-5/ Thomas, P., W. Hübschmann, L.A. König et al.:  
Experimental Determination of the Atmospheric  
Dispersion Parameters over Rough Terrain, Part 1:  
Measurements at the Karlsruhe Nuclear Research  
Center  
KfK-2285, Juli 1976

- /F8, 4-6/ Thomas, P., und K. Nester:  
Experimental Determination of the Atmospheric Dis-  
persion Parameters over Rough Terrain, Part 2:  
Evaluation of Measurements  
KfK-2286, Juni 1976
- /F8, 4-7/ Nester, K., und P. Thomas:  
Im Kernforschungszentrum Karlsruhe experimentell  
ermittelte Ausbreitungsparameter für Emissionshö-  
hen bis 195 m  
Staub - Reinhaltung Luft 39 (1979) Nr. 8, S. 291/5
- /F8, 4-8/ Nester, K., W. Hübschmann und P. Thomas:  
The Influence of Ground Roughness on Atmospheric  
Diffusion  
4th International Clean Air Congress, Tokyo,  
May 16-20, 1977
- /F8, 4-9/ Turner, D.B.:  
Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates  
U.S. Department of Health, Education and Welfare,  
Public Health Service, Publ.No. 999-AP-26, 1969
- /F8, 4-10/ Giebel, J.:  
Globale Aspekte der Luftverschmutzung  
Umschau 75 (1975) Nr. 22, S. 685/90
- /F8, 4-11/ Stewart, N.G., H.J. Gale und R.N. Crooks:  
The Atmospheric Diffusion of Gases Discharged from  
the Chimney of the Harwell Reactor BEPO  
Int. J. Air Poll. 1 (1958), S. 87/102
- /F8, 4-12/ Barad, M.L., und D.A. Haugen:  
Project Parairie Grass  
Geophysical Research Paper No. 59, Volumes I,II,III,  
Air Force Cambridge Research Center, Bedford, Mass.,  
1958/59

- /F8, 4-13/ Cramer, H.E., et al.:  
Engineering Estimates of Atmospheric Dispersal  
Capacity  
Am. Ind. Hygiene Ass. J. 20 (1959), S. 183/9
- /F8, 4-14/ Cramer, H.E.:  
A Brief Survey of the Meteorological Aspects of  
Atmospheric Diffusion  
Bull. of the Am. Met. Soc. 40 (1959), S. 165/71
- /F8, 4-15/ Cramer, H.E.:  
A Practical Method for Estimating the Dispersal  
of Atmospheric Contaminants  
Proceedings of the 1st National Conference on  
Applied Meteorology, Hartford, Conn., October 28-29,  
1957
- /F8, 4-16/ Cramer, H.E., F.A. Record und H.C. Vaughn:  
The Study of the Diffusion of Gases or Aerosols in  
the Lower Atmosphere  
Mass. Inst. Techn. AFCRC-TR-59-207 (1959)
- /F8, 4-17/ Hilst, G.R., und C.L. Simpson:  
Observations of Vertical Diffusion Rates in Stable  
Atmospheres  
J. Met. 15 (1958), S. 125/6
- /F8, 4-18/ Barad, M.L., und J.J. Fuquay:  
The Green Glow Diffusion Program  
HW-71400, Vol. II (1962)
- /F8, 4-19/ Fuquay, J.J., und C.L. Simpson:  
Use of Meteorological Measurements for Predicting  
Dispersion from Releases Near Ground Level  
HW-SA-3176 (1963)

- /F8, 4-20/ Fuquay, J.J.:  
Progress in Atmospheric Physics: A Summary of Hanford Laboratories Work on this Program Under General Electric 1959 - 1964  
HW-83602 (1964)
- /F8, 4-21/ Haugen, D.A., und J.J. Fuquay:  
The Ocean Breeze and Dry Gulch Diffusion Programs  
HW-78435, Vol. I (1963)
- /F8, 4-22/ Bowne, N.E.:  
Measurements of Atmospheric Diffusion from an Elevated Source  
6th AEC Air Cleaning Conference, Boston, Mass., July 7-9, 1959
- /F8, 4-23/ Islitzer, N.F.:  
Short Range Atmospheric Dispersion Measurements from an Elevated Source  
J. Met. 18 (1961), S. 443/50
- /F8, 4-24/ Fission Product Field Release Test I  
General Dynamics Corp., NARF-59-32-T/AFSWS-TR-59-44 (1959)
- /F8, 4-25/ Fission Product Field Release Test II  
General Dynamics Corp., NARF-60-10-T/AFSWC-60-26 (1960)
- /F8, 4-26/ Singer, I.A.:  
The Relationship between Peak and Mean Concentrations  
J. Air Poll. Control Ass. 11 (1961), S. 336/41
- /F8, 4-27/ Singer, I.A., und M.E. Smidt:  
Atmospheric Dispersion at Brookhaven National Laboratory  
Air and Wat. Poll. Int. J. 10 (1966), S. 125/35

- /F8, 4-28/ Singer, I.A., J.A. Frizzola und M.E. Smidt:  
A Simplified Method of Estimating Atmospheric Diffusion Parameters  
59th Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, San Francisco, Calif., June 20-24, 1966, AED-Conf.-66-190-1
- /F8, 4-29/ Hay, J.S., und F. Pasquill:  
Diffusion from a Continuous Source in Relation to the Spectrum and Scale of Turbulence  
in: Frenkiel, F.N., und P.A. Sheppard: Advances in Geophysics, Vol. 6: Atmospheric Diffusion and Air Pollution, Academic Press, New York, 1959
- /F8, 4-30/ Högstrom, U.:  
An Experimental Study on Atmospheric Diffusion  
Tellus 16 (1964), S. 205/51
- /F8, 4-31/ Quinio, R. le, und J. Hugon:  
Appareils et méthodes pour la mesure de la diffusion atmosphérique  
Actes du Colloque International sur la Pollution Radioactive des Milieux Gazeux, Saclay, 1965, S. 175/8
- /F8, 4-32/ Quinio, R. le, und J. Hugon:  
Résultats d'expériences de diffusion atmosphérique en vraie grandeur  
Actes du Colloque International sur la Pollution Radioactive des Milieux Gazeux, Saclay, 1965, S. 141/8
- /F8, 4-33/ Quinio, R. le:  
Evaluation de la diffusion d'effluents gazeux en atmosphère libre à partir d'une source ponctuelle continue - Abaques et commentaires  
CEA-R-3945 (1970)

- /F8, 4-34/ Markusch, H.:  
Über Experimente zur Gasausbreitung  
VDI-Bericht Nr. 53 (1961), S. 84/8
- /F8, 4-35/ Klug, W.:  
Meteorologische Einflußgrößen in der Ausbreitungs-  
rechnung  
Staub - Reinhaltung Luft 24 (1964), S. 396/400
- /F8, 4-36/ Venter, G.P.N., E.C. Halliday und L.A. Prinsloo:  
The Determination of the Sutton Diffusion Para-  
meters for the Highveld of South Africa  
Atmos. Environ. 7 (1973) Nr. 6, S.593/602
- /F8, 4-37/ Bortoli, M. de, et al.:  
Sulphur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) Diffusion Experiment  
EURATOM Communication No. 4038 (1973)
- /F8, 4-38/ Raynor, G.S., et al.:  
Studies of Atmospheric Diffusion from a Nearshore  
Oceanic Site  
J. of Appl. Meteor. 14 (1975), S. 1080/94
- /F8, 4-39/ Vogt, K.J.:  
Kurzzeit- und Langzeitausbreitungsfaktoren zur Be-  
rechnung der Umweltbelastung durch Abluftfahnen  
KFA-ZST-198 (1974)
- /F8, 4-40/ Vogt, K.J.:  
Ergebnisse der Jülicher Ausbreitungsexperimente  
für 50 und 100 m Emissionshöhe  
KFA-ZST 240 (1976)
- /F8, 4-41/ McElroy, J.L.:  
A Comparative Study of Urban and Rural Dispersion  
J of Appl. Meteor. 8 (1969), S. 19/31

- /F8, 4-42/ Archuleta, J., et al.:  
Some Atmospheric Tracer Experiments in Complex  
Terrain at LASL  
LA-7198-MS, Vol. I (1978)
- /F8, 4-43/ Lamb, B., und B. Sivertsen:  
Atmospheric Dispersion Experiments Using the NILU  
Automatic Weather Station and SF<sub>6</sub> Tracer Techniques  
NILU Teknisk Notat No. 12/78 (1978)
- /F8, 4-44/ Slade, D.H.:  
Meteorology and Atomic Energy  
TID-24190 (1968)
- /F8, 4-45/ Briggs, G.A.:  
Plume Rise  
TID-25075 (1969)
- /F8, 4-46/ Briggs, G.A.:  
Some Recent Analyses of Plume Rise Observations  
2nd International Clean Air Congress Conference,  
Washington, D.C., December 6-11, 1970
- /F8, 4-47/ Nester, K.:  
WINDOW - ein Computerprogramm zur Berechnung von  
Statistiken der integrierten Schadstoffkonzentra-  
tion in der Atmosphäre an Aufpunkten in der Umge-  
bung einer Einzelquelle  
KfK-2547 (1978)
- /F8, 4-48/ Chamberlain, A.C.:  
Aspects of Travel and Deposition of Aerosol and  
Vapor Clouds  
AERE-HP/R-1261 (1953)
- /F8, 4-49/ Atmosphere-Surface Exchange of Particulate and  
Gaseous Pollutants Symposium, Richland, Wash.,  
September 4-6, 1974, CONF-740921

- /F8, 4-50/ Engelmann, R.J., und R.W. Perkins:  
Snow and Rain Washout Coefficients for Process  
Plant Radioiodine Vapor  
Nature, July 2 (1968), S. 61
- /F8, 4-51/ Engelmann, R.J., et al.:  
Washout Coefficients for Selected Gases and Par-  
ticulates  
BNWL-SA-657 (1966)
- /F8, 4-52/ Dana, M.T.:  
Scavenging of Soluble Dye Particles by Rain  
Precipitation Scavenging Meeting, Richland, Wash.,  
June 2-4, 1970, CONF-700601
- /F8, 4-53/ Davis, W.E., und J.A. Young:  
Results of In-Cloud Tracers Releases in Frontal  
Storms  
Precipitation Scavenging Conference, Champaign,  
Ill., October 13-18, 1974, CONF-741003
- /F8, 4-54/ Burtsev, I.I., et al.:  
Washout Characteristics of a  $^{32}\text{P}$  Aerosol Injected  
into a Cloud  
Conference on the Atmospheric Scavenging of Radio-  
isotopes, Palanga, USSR, June 7-9, 1966, CONF-660673
- /F8, 4-55/ Dingle, A.N.:  
Scavenging and Dispersal of Tracer by a Self-Pro-  
pagation Convective Storm  
Precipitation Scavenging Conference, Champaign,  
Ill., October 13-18, 1974, CONF-741003
- /F8, 4-56/ Gatz, D.F.:  
A Review of Chemical Tracer Experiments on Precip-  
itation System  
Precipitation Scavenging Conference, Champaign,  
Ill., October 13-18, 1974, CONF-741003



- /F8, 4-57/ Young, J.A., et al.:  
The Entrainment of Tracers into Convective Clouds  
at 10 to 13.5 Thousand Feet  
Precipitation Scavenging Conference, Champaign,  
Ill., October 13-18, 1974, CONF-741003
- /F8, 4-58/ Garland, J.A.:  
Dry Deposition of SO<sub>2</sub> and other Gases  
Atmosphere-Surface Exchange of Particulate and  
Gaseous Pollutants Symposium, Richland, Wash.,  
September 4-6, 1974, CONF-740921
- /F8, 4-59/ Unsworth, M.N., und D. Fowler:  
Field Measurements of Sulphur Dioxide Fluxes to  
Wheat  
Atmosphere-Surface Exchange of Particulate and  
Gaseous Pollutants Symposium, Richland, Wash.,  
September 4-6, 1974, CONF-740921
- /F8, 4-60/ Hoven, I. van der:  
Deposition of Particles and Gases  
in: Slade, D.H.: Meteorology and Atomic Energy,  
TID-24190 (1968)
- /F8, 4-61/ Heinemann, K., K.H. Vogt und L. Angletti:  
Deposition and Biological Half-Life of Elemental  
Iodine on Grass and Clover  
Atmosphere-Surface Exchange of Particulate and  
Gaseous Pollutants Symposium, Richland, Wash.,  
September 4-6, 1974, CONF-740921
- /F8, 4-62/ Cawse, P.A., und D.M. Peirson:  
An Analytic Study of Trace Elements in the Atmos-  
pheric Environment  
AERE-R-7194 (1972)

- /F8, 4-63/ Krey, P.W.:  
Washout Ratios  
Precipitation Scavenging Conference, Champaign,  
Ill., October 13-18, 1974, CONF-741003
- /F8, 4-64/ Sehmel, G.A., und H.H. Hodgson:  
Particle Dry Deposition Velocities  
Atmosphere-Surface Exchange of Particulate and  
Gaseous Pollutants Symposium, Richland, Wash.,  
September 4-6, 1974, CONF-740921
- /F8, 4-65/ Small, S.W.:  
Wet and Dry Deposition of Fallout Materials at  
Kjeller  
Tellus 12 (1969), S. 308/14
- /F8, 4-66/ Slinn, W.G.N.:  
Some Approximations for the Wet and Dry Removal  
of Particles and Gases from the Atmosphere  
Water, Air and Soil Pollution 7 (1977), S. 513/43
- /F8, 4-67/ Marshall, J.S., und C.D. Holtz:  
Pattern Analysis of one Summers Multilevel Maps  
of Montreal Rain  
Monthly Weather Review 99 (1972), S. 335/45
- /F8, 4-68/ Vogt, S., u.a.:  
Meteorologische Messungen  
in: Jahresbericht 1977 der Abteilung Strahlen-  
schutz und Sicherheit, KfK-2620 (1978), S. 99/100
- /F8, 4-69/ Vogt, S., und W. Hübschmann:  
Influence of Meteorologic Parameters on the Conse-  
quences of Accidental Activity Releases from Nu-  
clear Power Reactor Safety, Brussels, October  
16-19, 1978

- /F8, 4-70/ Manier, G.:  
Vergleich zwischen Ausbreitungsklasse und Temperaturgradienten  
Meteorol. Rundschau 28 (1975), S. 6/11
- /F8, 4-71/ Dilger, H., und K. Nester:  
Aufstellung und Vergleich verschiedener Schemata zur Bestimmung der Ausbreitungskategorien  
Meteorol. Rundschau 28 (1975), S. 12/17
- /F8, 4-72/ Dilger, H.:  
Statistik besonderer Ausbreitungssituationen  
KfK-2383 (1977)
- /F8, 4-73/ Schückler, M., D. Aldrich und A. Bayer:  
Effects of Wind Shift and Cross-Plume Concentration Models on Calculated Accident Consequences  
ENC/FORATOM Conference: Nuclear Power Option for the World, Hamburg, May 6-11, 1979
- /F8, 4-74/ Holland, J.Z.:  
A Meteorological Survey of the Oak Ridge Area  
ORO-99 (1953)
- /F8, 4-75/ Priestley, C.H.B.:  
A Working Theory of the Bent-Over Plume of Hot Gas  
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 82 (1956) No. 352, S. 165/76
- /F8, 4-76/ Bosanquet, C.H.:  
The Rise of a Hot Waste Gase Plume  
J. Inst. Fuel. 30 (1957), S. 322/8
- /F8, 4-77/ Scorer, R.S.:  
The Behavior of Chimney Plumes  
Int. J. Air. Poll. 1 (1958/59) No. 3, S. 198/220

- /F8, 4-78/ Csanady, G.T.:  
Some Observation on Smoke Plume  
Int. J. Air Water Poll. 4 (1961) No. 1/2, S. 47/52
- /F8, 4-79/ Stümke, H.:  
Vorschlag einer empirischen Formel für die Schorn-  
steinüberhöhung  
Staub - Reinhaltung Luft 23 (1963), S. 549
- /F8, 4-80/ Schmidt, F.H.:  
On the Rise of Hot Plumes in the Atmosphere  
Int. J. Air Water Poll. 9 (1965) No. 4, S. 175/98
- /F8, 4-81/ Lucas, D.H.:  
Application and Evaluation of Results of the  
Tilbury Plume Rise and Dispersion Experiment  
Atmos. Environ. 1 (1967) No. 4, S. 421/4
- /F8, 4-82/ Moses, H., und J.E. Carson:  
Stack Design Parameters Influencing Plume Rise  
60th Annual Meeting of the Air Pollution Control  
Association, Cleveland, Ohio, June 1-16, 1967  
CONF-670609
- /F8, 4-83/ Russo, A.J.:  
Reactor Accident Plume Rise Calculations  
SAND-76-0340 (1976)
- /F8, 4-84/ Russo, A.J., J.R. Wayland und L.T. Ritchie:  
Influence of Plume Rise on the Consequences of  
Radioactive Material Releases  
SAND-76-0534 (1977)
- /F8, 4-85/ Holzworth, G.C.:  
Mixing Heights, Wind Speeds, and Potential for  
Urban Air Pollution Throughout the Contiguous  
United States  
U.S. Environ. Proct. Agency, Publ. No AP-101 (1977)

- /F8, 4-86/ Sprung, J.L., und H.W. Church:  
Sensitivity of the Reactor Safety Study Consequence Model to Mixing Heights  
SAND-76-0618 (1977)
- /F8, 4-87/ Brenk, H.D., und K.J. Vogt:  
Konzeption für eine praxisnahe Berechnung der Ablagerung radioaktiver Stoffe aus der Abluft kerntechnischer Anlagen durch Niederschlag  
Jül-1328 (1976)
- /F8, 4-88/ Becker, M., K. Nester, P. Thomas u.a.:  
Meteorologische Messungen  
in: Jahresbericht 1978 der Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit, KfK-2775 (1979)
- /F8, 4-89/ Dilger, H., K. Nester und S. Vogt:  
Statistische Auswertungen des Wind-Temperatur- und Feuchteprofils sowie der Strahlung und der Windrichtungsfluktuation am Kernforschungszentrum Karlsruhe  
KfK-2164 (1975)
- /F8, 4-90/ Kinzer, G.D., und W.E. Cobb:  
Laboratory Measurements and Analysis of the Growth and Collection Efficiency of Cloud Droplets  
J. Meteorolog. 15 (1958) No. 2, S. 138/48
- /F8, 4-91/ Mason, B.J.:  
The Physics of Clouds  
Oxford University Press, London, 1957
- /F8, 4-92/ Sprung, J.L., und H.W. Church:  
Effects of Wind Shear on the Consequence Model of the Reactor Safety Study  
SAND-76-0619 (1977)

- /F8, 4-93/ Aldrich, D.C., A. Bayer und M. Schückler:  
A Proposed Wind Shift Model for the German Reactor  
Safety Study  
KfK-2791 (1979)
- /F8, 4-94/ Sprung, J.L., G.P. Steck und A.W. Frazier:  
Correlations Between Wind Flow and Population  
Location at 67 Light Water Nuclear Power Plant  
Sites  
SAND-78-0557 (1978)
- /F8, 4-95/ Manier, G.:  
Bestimmung der erforderlichen Schornsteinhöhe  
TH Darmstadt, Institut für Meteorologie, 1968
- /F8, 5-1/ Report of the United Nations Scientific Committee  
on the Effects of Atomic Radiation to the General  
Assembly  
13th Session, Supplement No. 17 (A/3838), UNSCEAR,  
New York, 1958
- /F8, 5-2/ Ionizing Radiation: Levels and Effects  
Report of the United Nations Scientific Committee  
on the Effects of Atomic Radiation to the General  
Assembly  
27th Session, Supplement No. 25 (A/8725 and Cor-  
rection 1), UNSCEAR, New York, 1972
- /F8, 5-3/ Bayer, A., J. Ehrhardt und M. Schückler:  
Das Konzept der effektiven Schadensfaktoren zur  
Ermittlung stochastischer somatischer Schäden  
nach unfallbedingten Strahlenexpositionen  
KfK-3037 (1980)
- /F8, 5-4/ Slade, D.H.:  
Meteorology and Atomic Energy  
TID 24190 (1969)

- /F8, 5-5/ Reference Man: Anatomical, Physiological and Metabolic Characteristics  
ICRP Publication No. 23, Pergamon Press, Oxford, New York, Frankfurt, 1975
- /F8, 5-6/ Permissible Dose for Internal Radiation  
ICRP Publication No. 2, Pergamon Press, Oxford, New York, Frankfurt, 1959
- /F8, 5-7/ Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland  
Statistisches Bundesamt, Stuttgart, Mainz, 1977
- /F8, 6-1/ Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen  
GMB1 Nr. 31 (1977), S. 638/718
- /F8, 6-2/ Leitsätze für die Unterrichtung der Öffentlichkeit über die Katastrophenschutzplanung in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen  
Umwelt Nr. 61 (1978)
- /F8, 6-3/ Kerntechnik und Sicherheit in Nordrhein-Westfalen  
Hrsg.: Der Innenminister des Landes Nordrhein-Westfalen, 1978
- /F8, 6-4/ Notfallschutz in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen  
Hrsg.: Innenministerium Baden-Württemberg, 1978
- /F8, 6-5/ Unterrichtung der Öffentlichkeit über die Katastrophenschutzplanung für die Umgebung des Kernkraftwerks Stade  
Hrsg.: Landkreis Stade, 1979
- /F8, 6-6/ Prêtre, S.:  
Zwölf Faustregeln für das richtige Verhalten im Schutzraum bei bestrahlter Umgebung  
Forschungsinstitut für militärische Bautechnik, Zürich, FMB 70-1 (1970)

- /F8, 6-7/ Risk Analysis of the Fuel Cycle in the Netherlands  
Hrsg.: N.V. Samenwerkende Elektriciteits-Produktiebedrijven, Arnheim, 1975
- /F8, 6-8/ Gebäude- und Wohnungszählung vom 25. Oktober 1968,  
Heft 4: Gebäude und Wohnungen nach Baualter, Größe  
und Ausstattung  
Hrsg. Statistisches Bundesamt, Verlag W. Kohlhammer,  
Stuttgart, Mainz, 1972
- /F8, 6-9/ Szalai, A.:  
The Use of Time  
Verlag Mouton & Co., Holland, 1972
- /F8, 6-10/ 1-%-Wohnungsstichprobe 1972, Heft 2: Gebäude, Woh-  
nungen  
Hrsg.: Statistisches Bundesamt, Verlag W. Kohlham-  
mer, Stuttgart, Mainz, 1975
- /F8, 6-11/ Reactor Safety Study - An Assessment of Accident  
Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants  
WASH-1400 (NUREG-75/O14) App. VI, 1975
- /F8, 6-12/ Schnadt, H., und H. Storch:  
Evakuierungssimulation - Bericht über die Erstel-  
lung des Programmsystems EVAS  
Bericht Nr. St. Sch. 635 im Auftrag des Bundes-  
ministeriums des Innern, Verlag TÜV Rheinland,  
Köln, 1977
- /F8, 6-13/ Revier und Werk, Zeitschrift für die Betriebe des  
Rheinischen Braunkohlenbergbaus, Nr. 143 (1977)
- /F8, 6-14/ Die Organisationen des Deutschen Möbeltransportge-  
werbes - ihre Aufgaben und Ziele  
Arbeitsgemeinschaft Möbeltransport Bundesverband  
e.V. (AMÖ), Hattersheim/Main, März 1978



- /F8, 7-1/ Hersey, J.:  
Hiroshima  
Erste Veröffentlichung in "The New Yorker" 1946,  
Nachdrucke: Bantam Books, Knopf Inc., New York,  
1946 ff., 20. Aufl., 1966
- /F8, 7-2/ Glasstone, S. (ed.):  
The Effects of Nuclear Weapons  
United States Atomic Energy Commission, 1962
- /F8, 7-3/ Messerschmidt, O.:  
Auswirkungen atomarer Detonationen auf den Menschen  
Karl Thiemig Verlag, München, 1960
- /F8, 7-4/ Bond, V.P., T.M. Fliedner und J.D. Archambeau:  
Mammalian Radiation Lethality  
Academic Press, New York, 1965
- /F8, 7-5/ The Medical Basis of Radiation Accident Prepared-  
ness  
Symposium, Oak Ridge, 1979 (Proceedings im Druck)
- /F8, 7-6/ Johnson, R.E., und U. Rühl:  
Treatment of Chronic Lymphocytic Leukemia with Em-  
phasis on Total Body Irradiation  
Int. J. Radiat. Oncol. 1 (1976), S. 287
- /F8, 7-7/ Thomas, E.D., et al.:  
Bone Marrow Transplantation  
New Engl. J. Med. 292 (1975), S. 832
- /F8, 7-8/ Bender, C., et al.:  
Clinical Bone Marrow Transplantation in Children  
with Acute Lymphoblastic Leukemia  
Pathologie-Biologie 26 (1978), S. 44

- /F8, 7-9/ Cox, J.D.:  
Total Pulmonary Irradiation for Metastases from  
Testicular Carcinoma  
Radiology 105 (1972), S. 163
- /F8, 7-10/ Breur, K., et al.:  
Irradiation of the Lungs as an Adjuvant Therapy  
in the Treatment of Osteosarcoma of the Limbs  
Europ. J. Cancer 14 (1978), S. 461
- /F8, 7-11/ Roswit, B., S.J. Malsky und C.B. Reid:  
Radiation Tolerance of the Gastrointestinal Tract  
Front. Radiat. Ther. Oncol. 6 (1972), S. 160
- /F8, 7-12/ Rubin, P., und G.W. Casarett:  
Clinical Radiation Pathology  
W.B. Saunders, Philadelphia, 1968
- /F8, 7-13/ Stellungnahme: Ärztliche Hilfe bei Kernkraftwerks-  
katastrophen  
Hrsg.: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesärzte-  
kammer, Deutsches Ärzteblatt (in Vorbereitung)
- /F8, 7-14/ Fryer, C.J.H., et al.:  
Radiation Pneumonitis: Experience Following a Large  
Single Dose of Radiation  
Int. J. Radiat. Oncol. 4 (1978), S. 931
- /F8, 7-15/ Hahn, F.F.:  
Estimates of Mortality due to Radiation Pneumonitis  
and Pulmonary Fibrosis after Exposure to Radio-  
nuclide Releases in Hypothetical Light Water Re-  
actor Accidents  
Bericht Lovelace Foundation, 1975
- /F8, 7-16/ Becker, D.V., et al.:  
Further Advances in Thyroid Research  
Vol. 1, Giestel Verlag, Wien, 1971

- /F8, 7-17/ Langham, W.H. (ed.):  
Radiobiological Factors in Manned Space Flight  
National Academy of Sciences, National Research  
Council, Washington, 1967
- /F8, 7-18/ Boice, J.D. Jr., M. Rosenstein und D. Trout:  
Estimation of Breast Doses and Breast Cancer Risk  
Associated with Repeated Fluoroscopic Chest Examina-  
tions of Women with Tuberculosis  
Rad. Res. 73 (1978), S. 373/90
- /F8, 7-19/ Chronic Bronchitis in Great Britain  
A National Survey Carried out by the Respiratory  
Diseases Study Group of the College of General  
Practitioners  
Brit. Med. J. 1961 II, S. 973
- /F8, 7-20/ Messerschmidt, O.:  
Kombinationsschäden als Folge nuklearer Explosionen  
in: Chirurgie der Gegenwart IV; Urban & Schwarzen-  
berg, München, 1975
- /F8, 7-21/ Problems Involved in Developing an Index of Harm  
ICRP Publ. 27, Pergamon Press, 1977
- /F8, 7-22/ Mancuso, T.F., A.M. Stewart und G.W. Kneale:  
Radiation Exposures of Hanford Workers Dying from  
Cancer and other Causes  
Health Phys. 33 (1977), S. 369/85
- /F8, 7-23/ Kneale, G.W., A.M. Stewart und T.F. Mancuso:  
Re-analysis of Data Relating to the Hanford Study  
of the Cancer Risk of Radiation Workers  
in: Late Biological Effects of Ionizing Radiation,  
Vol. I, IAEA, Wien, 1978, S. 387/412

- /F8, 7-24/ Anderson, T.W.:  
Radiation Exposure of Hanford Workers; A Critique  
of the Mancuso, Stewart and Kneale Report  
Health Phys. 35 (1978), S. 743/50
- /F8, 7-25/ Feinendegen, L.E.:  
Gibt es ein erhöhtes Krebsrisiko in der Umgebung  
kerntechnischer Anlagen?  
Vortrag Reaktortagung, Hannover, 1978
- /F8, 7-26/ Gertz, S.M.:  
Some Major Statistical Comments on "Radiation Ex-  
posures of Hanford Workers Dying from Cancer and  
Other Causes"  
Health Phys. 35 (1978), S. 723/4
- /F8, 7-27/ Marks, S., E.S. Gilbert und B.D. Breitenstein:  
Cancer Mortality in Hanford Workers  
in: Proc. Symp. on Late Biological Effects of  
Ionizing Radiation, Vol. I, IAEA, Wien, 1979,  
S. 369/86
- /F8, 7-28/ Mole, R.H.:  
Occupational Exposure to Ionizing Radiation (Letter  
to the Editor)  
Lancet 1 (1978), S. 1155
- /F8, 7-29/ Reissland, J.A.:  
An Assessment of the Mancuso Study  
Report NRPB-R 79, Harwell/England, 1978
- /F8, 7-30/ Sanders, B.S.:  
Low-Level Radiation and Cancer Deaths  
Health-Phys. 34 (1978), S. 521/38
- /F8, 7-31/ Hutchison, G.B., B. MacMahon, S. Jablon und C.E.Land:  
Review of Report of Mancuso, Stewart and Kneale on  
Radiation Exposure of Hanford Workers  
Health Phys. 37 (1979), S. 207/20

- /F8, 7-32/ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR):  
Sources and Effects of Ionizing Radiation  
Vereinte Nationen, New York, 1977
- /F8, 7-33/ BEIR-Report: The Effects on Population of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiations  
U.S. Nat. Acad. of Sciences - National Research Council, Washington, D.C., 1972
- /F8, 7-34/ National Academy of Sciences:  
Research Needs for Estimating the Biological Hazards of Low Doses of Ionizing Radiations  
National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1974
- /F8, 7-35/ National Council on Radiation Protection and Measurements:  
Influence of Dose and its Distribution in Time on Dose-Response Relationships for Low-LET Radiations  
NCRP Report No. 64, Washington, D.C., 1980
- /F8, 7-36/ Recommendations of the International Commission on Radiological Protection  
ICRP Publ. 26, Pergamon Press, 1977
- /F8, 7-37/ Rasmussen, N.C.:  
Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants (NUREG-75/014), WASH-1400, Appendix VI  
USNRC, Washington, D.C., 1975
- /F8, 7-38/ Moriyama, I.M., und H. Kato:  
Mortality Experience of A-Bomb Survivors 1970-1972, 1950-1972  
JNIH-ABCC Life Span Study Report 7 (1973), S. 15/73

- /F8, 7-39/ Evans, R.D., A.T. Keane, R.J. Kolenkow et al.:  
Radiogenic Tumors in the Radium and Mesothorium  
Cases Studied at M.I.T.  
in: Delayed Effects of Bone-Seeking Radionuclides  
(C.W. Mays, W.S.S. Jee, R.D. Lloyd et al., eds.),  
University of Utah Press, 1969, S. 157/94
- /F8, 7-40/ Hempelmann, L.H., W.J. Hall, M. Phillips et al.:  
Neoplasms in Persons Treated with X-Rays in In-  
fancy: Fourth Survex in 20 Years  
J. Nat. Cancer Inst. 55 (1975), S. 519/30
- /F8, 7-41/ Mayneord, W.V.:  
The Time Factor in Carcinogenesis  
in: Proc. 4. Int. IRPA-Congress, Vol. 4, Paris,  
1977, S. 1423/39
- /F8, 7-42/ Jacobi, W.:  
Zeiteffekte bei der Bewertung des Krebsrisikos  
in: Quantifizierbarkeit des Strahlenrisikos, Uni-  
versität Bremen, Information zu Energie und Umwelt,  
Teil A Nr. 5 (1978), S. 37/55
- /F8, 7-43/ Druckrey, H., und D. Schmähl:  
Quantitative Analyse der experimentellen Krebser-  
zeugung  
Naturwissenschaften 49 (1962), S. 217/28
- /F8, 7-44/ Druckrey, H.:  
Quantitative Aspects in Chemical Carcinogenesis;  
Potential Carcinogenic Hazards from Drugs  
UICC Monograph Series, Vol. 7, Springer Verlag,  
New York, 1967, S. 60
- /F8, 7-45/ Moriyama, I.M.:  
Capsule Summary of Results of Radiation Studies on  
Hiroshima and Nagasaki Atomic Bomb Survivors,  
1945 - 1975  
Rad. Effects Res. Foundation, RERF Tr 5-77 (1977)

- /F8, 7-46/ Beebe, G.W., H. Kato und C.E. Land:  
Studies of the Mortality of A-Bomb Survivors;  
6. Mortality and Radiation Dose, 1950-1974  
Rad. Res. 75 (1978), S. 138/201
- /F8, 7-47/ Ohkita, T., und N. Kamada:  
Leukemia Among Atomic Bomb Survivors  
in: Proc. 6th Int. Congress of Radiation Research,  
Tokyo, 1979 (S. Okada et al., Eds.), S. 59/68
- /F8, 7-48/ Mays, C.W., R.R. Lloyd und J.H. Marshall:  
Malignancy Risk to Humans from Total Body  $\gamma$ -Ray  
Radiation  
Proc. Int. IRPA-Congress, Washington, 1973; Conf.  
730907-P2, NTIS, Febr. 1974, S. 417/28
- /F8, 7-49/ Court Brown, W.M., und R. Doll:  
Mortality from Cancer and Other Causes After  
Radiotherapy for Ankylosing Spondylitis  
Br. Med. J. 2 (1965), S. 1327
- /F8, 7-50/ Doll, R., und P.G. Smith:  
Mortality from Cancer and Other Causes After  
Radiotherapy for Ankylosing Spondylitis: Further  
Observations  
zitiert in /F8, 7-32/, S. 375
- /F8, 7-51/ Smith, P.G., und R. Doll:  
Late Effects of X-Irradiation in Patients Treated  
for Metropathia Haemorrhagica  
Br. J. Radiol. 49 (1976), S. 224/32
- /F8, 7-52/ Brinkley, D., und J.L. Haybittle:  
The Late Effects of Artificial Menopause by X-  
Radiation  
Br. J. Radiol. 42 (1969), S. 519/21

- /F8, 7-53/ Alderson, M.R., und S.M. Jackson:  
Long-term Follow-up of Patients with Menorrhagia  
Treated by Irradiation  
Brit. J. Radiol. 44 (1971), S. 295/8
- /F8, 7-54/ Schulz, R.J., und R.E. Albert:  
III. Dose to Organs of the Head from the X-Ray  
Treatment of Tinea Capitis  
Arch. Environ. Health 17 (1968), S. 935/50
- /F8, 7-55/ Atkinson, H.R.:  
Bone Marrow Distribution as a Factor in Estimating  
Radiation to Bloodforming Organs  
J. Coll. Radiol. Austr. 6 (1962), S. 149/54
- /F8, 7-56/ Stewart, A.M., und G.W. Kneale:  
Radiation Dose Effects in Relation to Obstetric  
X-Rays and Childhood Cancer  
Lancet 2 (1970), S. 1185/8
- /F8, 7-57/ MacMahon, B., und A.B. Hutchinson:  
Prenatal X-Ray and Childhood Cancer: A Review  
Acta Unio. Int. Contra Cancrum 20 (1964), S. 1172/
- /F8, 7-58/ Mole, R.H.:  
Antenatal Irradiation and Childhood Cancer: Causation  
or Coincidence?  
Br. J. Cancer 30 (1974), S. 199/208
- /F8, 7-59/ Faber, M.:  
Follow-up Danish Thorotrast Cases  
in: Proceedings of the Third International Meeting  
on the Toxicity of Thorotrast; Danish Atomic Energy  
Commission Report Risø (1973), S. 137/50



- /F8, 7-60/ Janower, M.L.:  
Follow-up of Thorotrast Patients from Boston, Massachusetts and Ann Arbor, Michigan, USA  
in: Proceedings of the Third International Meeting on the Toxicity of Thorotrast, Danish Atomic Energy Commission Report Risø 294 (1973), S. 126/36
- /F8, 7-61/ Silva Horta, J. da:  
Tumors Developed in People Injected with Thorium Dioxide (Thorotrast) (Portuguese Experience)  
in: Proceedings of the Third International Meeting on the Toxicity of Thorotrast, Danish Atomic Energy Commission Report Risø 294 (1973), S. 233/58
- /F8, 7-62/ Kaick, G. von, A. Kaul, D. Lorenz et al.:  
Late Effects and Tissue Dose in Thorotrast Patients; Recent Results of the German Thorotrast Study  
in: Proceedings Symposium on Late Biological Effects of Ionizing Radiation, Vol. I, IAEA, Wien, 1978, S. 263/76
- /F8, 7-63/ Lewis, E.B.:  
Leukemia, Multiple Myeloma and Aplastic Anaemia  
Am. Radiologists Science 142 (1963), S. 1492/4
- /F8, 7-64/ Seltser, R., und P.E. Sartwell:  
The Influence of Occupations Exposure to Radiation on the Mortality of American Radiologists and Other Medical Specialists  
Amer. J. Epidemiol. 81 (1965), S. 2/22
- /F8, 7-65/ Conard, R.A.:  
A 20-Year Review of Medical Finding in a Marshallese Population Accidentally Exposed to Radioactive Fallout  
Brookhaven National Laboratory, New York, BNL-50424 (1975)

- /F8, 7-66/ Conard, R.A.:  
Acute Myelogenous Leukemia Following Fallout Radiation Exposure  
J. Am. Med. Assoc. 232 (1975), S. 1356/7
- /F8, 7-67/ Mole, R.H.:  
The Sensitivity of the Human Breast to Cancer Induction by Ionizing Radiation  
Brit. J. Radiol. 51 (1978), S. 401/5
- /F8, 7-68/ Tokunaga, H., and J.E. Norman:  
Malignant Breast Tumors Among Atomic Bomb Survivors, Hiroshima and Nagasaki, 1950-1974  
Radiat. Effects Research Foundation, Techn. Report No. 17 (1977)
- /F8, 7-69/ Yoshizawa, Y., and T. Kusama:  
Search for the Lowest Irradiation Dose from Literatures on Radiation Induced Breast Cancer  
Nippon Acta Radiologica 35 (1975), S. 1125/30
- /F8, 7-70/ Baral, E., L.-E. Larsson und B. Mattson:  
Breast Cancer Following Irradiation of the Breast  
Cancer 40 (1977), S. 2905/10
- /F8, 7-71/ McGregor, D.H., C.E. Land, K. Choi et al.:  
Breast Cancer Incidence Among Atomic Bomb Survivors, Hiroshima and Nagasaki, 1950-1969  
J. Nat. Cancer Inst. 59 (1977), S. 799/811
- /F8, 7-72/ Upton, A.C., G.W. Beebe, J.M. Brown et al.:  
Report of NCI Ad-hoc Working Group on the Risks Associated with Mammography in Mass Screening for the Detection of Breast Cancer  
J. Nat. Cancer Inst. 59 (1977), S. 480/93
- /F8, 7-73/ Mackenzie, I.:  
Breast Cancer Following Multiple Fluoroscopies  
Brit. J. Cancer 19 (1965), S. 1-8

- /F8, 7-74/ Myrden, J.A., and J.E. Hiltz:  
Breast Cancer Following Multiple Fluoroscopies  
During Artificial Pneumothorax Treatment of Pul-  
monary Tuberculosis  
Can. Med. Assoc. J. 100 (1969), S. 1032/4
- /F8, 7-75/ Myrden, J.A., und J.J. Quinlan:  
Breast Carcinoma Following Multiple Fluoroscopies  
with Pneumothorax Treatment of Pulmonary Tubercu-  
losis  
Annals of Royal College of Physicians and Surgeons  
of Canada 7 (1974), S. 45
- /F8, 7-76/ Boice, J.D. Jr., M. Rosenstein und D. Trout:  
Estimation of Breast Doses and Breast Cancer Risk  
Associated with Repeated Fluoroscopic Chest Exami-  
nations of Women with Tuberculosis  
Rad. Res. 73 (1978), S. 373/90
- /F8, 7-77/ Boice, J.D. Jr., und R.R. Monson:  
Breast Cancer Following Repeated Fluoroscopic  
Examinations of the Chest  
J. Nat. Cancer Inst. 59 (1977), S. 823
- /F8, 7-78/ Mettler, F.A., L.H. Hempelmann, A.M. Dutton et al.:  
Breast Neoplasms in Women Treated with X-Rays for  
Acute Postpartum Mastitis, A Pilot Study  
J. Nat. Cancer Inst. 43 (1969), S. 803/11
- /F8, 7-79/ Shore, R., L. Hempelmann, E. Kowaluk et al.:  
Breast Neoplasms in Women Treated with X-Rays for  
Acute Postpartum Mastitis  
J. Nat. Cancer Inst. 59 (1977), S. 813
- /F8, 7-80/ Dolphin, G.W., und W.G. Marley:  
Risk Evaluation to the Protection of the Public in  
the Event of Accidents at Nuclear Installations  
United Kingdom Atomic Energy Authority, Report AHSB  
(RP) T 95, Harwell, 1969

- /F8, 7-81/ Kramer, R.:  
Ermittlung von Konversionsfaktoren zwischen Körperdosen und relevanten Strahlungskenngrößen bei externer Röntgen- und Gammastrahlung  
GSF-Bericht S-559 (1979)
- /F8, 7-82/ Kunz, E., J. Sevč, V. Plaček und J. Horaček:  
Lung Cancer in Man in Relation to Different Time Distribution of Radiation Exposure  
Health Phys. 36 (1979), S. 699/706
- /F8, 7-83/ Jacobi, W.:  
Interpretation of Measurements in Uranium Mines; Dose Evaluation and Biomedical Aspects  
in: Personal Dosimetry and Area Monitoring Suitable for Radon and Daughter Products, OECD, Paris, 1977, S. 33/48
- /F8, 7-84/ Jacobi, W.:  
Relation Between the Inhaled Potential  $\alpha$ -Energy of Rn-222 and Rn-220-Daughters and the Absorbed  $\alpha$ -Energy in the Bronchial and Pulmonary Region  
Health Phys. 23 (1972), S. 3/11
- /F8, 7-85/ Jacobi, W., und K. Eisfeld:  
Dose to Tissues and Effective Dose Equivalent by Inhalation of Radon-222, Radon 220 and their Short-Lived Daughters  
GSF-Bericht S-626, Februar 1980
- /F8, 7-86/ Sevč, J., E. Kunz und V. Plaček:  
Lung Cancer in Uranium Miners and Long-Term Exposure to Radon Daughter Products  
Health Phys. 30 (1976), S. 433/7
- /F8, 7-87/ Evans, R.D., J.H. Harley, W. Jacobi et al.:  
Estimate of Risk from Exposure to Environmental Levels of Radon-222 and its Decay Products  
Nature (1980), im Druck

- /F8, 7-88/ Nakamura, K.:  
Relation Between Radiation Exposure Dose and Stomach  
Cancer Mortality Rate in Atomic Bomb Survivors  
Radiat. Effects Res. Foundation, Techn. Report No. 8  
(1977)
- /F8, 7-89/ Parker, L.N., J.L. Belsky, R. Yamamoto et al.:  
Thyroid Carcinoma Diagnosed Between 13 and 26 Years  
After Exposure to Atomic Radiation  
A Study of the ABCC-HNIH Adult Health Study Popula-  
tion Hiroshima and Nagasaki 1958-1971, Technical  
Report (1973), S. 5/73
- /F8, 7-90/ Conard, R.A., B.M. Dobyns und W.W. Sutow:  
Thyroid Neoplasia as Late Effect of Exposure to  
Radioactive Iodine in Fallout  
J. Am. Med. Assoc. 214 (1970), S. 316/24
- /F8, 7-91/ Coleman, M., L.R. Simpson, L.K. Patterson et al.:  
Thyroid Cancer Associated with Radiation Exposure  
Proc. Symp. on Biological and Environmental Effects  
of Low-Level Radiation, Chicago, IAEA, Wien, 1975,  
Vol. II, S. 285
- /F8, 7-92/ Modan, B., D. Baidatz, H. Mart et al.:  
Radiation-Induced Head and Neck Tumors  
Lancet 1 (1974), S. 277/9
- /F8, 7-93/ Modan, B., E. Ron und A. Werner:  
Thyroid Cancer Following Scalp Irradiation  
Radiology 123 (1974), S. 741
- /F8, 7-94/ Refetoff, S., et al.:  
Continuing Occurance of Thyroid Carcinoma After  
Irradiation to the Neck in Infancy and Childhood  
New Engl. J. Med. 292 (1975), S. 171/5

- /F8, 7-95/ Pochin, E.E.:  
Untowards Effects of Radioiodine Treatment of  
Hyperthyroidism  
Minerva Nucleare 8 (1964), S. 106/10
- /F8, 7-96/ Dobyns, B.M., G.W. Sheline, J.B. Worman et al.:  
Malignant and Benign Neoplasms of the Thyroid in  
Patients Treated for Hyperthyroidism  
A Report of the Cooperative Thyrotoxicosis Therapy  
Follow-up Study; J. Clin. Endocrinol. 38 (1974),  
S. 976/98
- /F8, 7-97/ Safa, A.M., O.P. Schumacher und A. Rodriguez-  
Antunez:  
Long-Term Follow-up Results in Children and Ado-  
lescents Treated with Radioactive Iodine (J-131)  
for Hyperthyroidism  
New Engl. J. Med. 292 (1975), S. 167/71
- /F8, 7-98/ Holm, L.E.:  
Incidence of Malignant Thyroid Tumors in Man After  
Diagnostic and Therapeutic Doses of Iodine-131  
Epidemiologic and Histopathologic Study, Doktor-  
arbeit, Universität Stockholm, 1980
- /F8, 7-99/ Tamplin, A.R., und H.L. Fisher:  
Estimation of Dosage to Thyroids of Children in  
the US from Nuclear Test Conducted in Nevada Dur-  
ing 1952 through 1955  
UCRL-14707 (1966)
- /F8, 7-100/ Mays, C.W.:  
Cancer Induction in Man from Internal Radioactivity  
Health Phys. 25 (1973), S. 585/92
- /F8, 7-101/ Groot, L.J. de, und E. Paloyan:  
Thyroid Carcinoma and Radiation. A. Chicago Epi-  
demic  
J. Am. Med. Assoc. 225 (1973), S. 487/91

- /F8, 7-102/ Raventos, A., und T. Winship:  
The Latent Interval for Thyroid Cancer Following  
Irradiation  
Radiology 83 (1964), S. 501/8
- /F8, 7-103/ Greene, M.:  
The Treatment of Thyrotoxicosis with Iodine-131  
and Thyroidectomy  
M.D. Thesis, University of Sheffield, 1964
- /F8, 7-104/ Wilson, S.M., C. Platz und G.M. Block:  
Thyroid Carcinoma After Irradiation  
Arch. Surg. 100 (1970), S. 330/7
- /F8, 7-105/ Shore, R.E., R.E. Albert und B.S. Pasternack:  
Follow-up Study of Patients Treated by X-Ray  
Epilation for Tinea Capitis  
Arch. Environ. Health 31 (1976), S. 21/8
- /F8, 7-106/ Finkel, A.J., C.E. Miller und R.J. Hasterlik:  
Radium-Induced Malignant Tumors in Children and  
Adults  
in: Delayed Effects of Bone-Seeking Radionuclides  
(C.W. Mays, W.S.S. Jee, R.D. Lloyd et al., eds.),  
University of Utah Press, 1969, S. 195/225
- /F8, 7-107/ Rowland, R.E., P.M. Failla, A.R. Keane et al.:  
Some Dose-Response Relationships for Tumor Inci-  
dence in Radium Patients  
in: Radiological Physics Division, Center for  
Human Radiobiology Annual Report, July 1969 -  
June 1970, U.S. Atomic Energy Commission, Report  
ANL-7760, Pt. 2 (1971), S. 1/17
- /F8, 7-108/ Mays, C.W., und H. Spiess:  
Bone Sarcoma to Man from Ra-224, Ra-226 and Pu-239  
in: Biological Effects of Ra-224 (Hrsg. W.A. Mül-  
ler und H.G. Ebert), M. Nijhoff Medical Division,  
The Hague, Boston, S. 168/81

- /F8, 7-109/ Harley, N.H., und B.S. Pasternack:  
A Comparison of the Dose to Cells on Trabecular  
Bone Surface from Pu-239 and Ra-226 Based on Ex-  
perimental  $\alpha$ -Absorption Measurements  
Health Phys. 30 (1976), S. 35/46
- /F8, 7-110/ Dolphin, G.W.:  
Problems in Radiological Protection Involving  $\alpha$ -  
Emitters in Bone  
in: Biological Effects of Ra-224 (Hrsg. W.A. Mül-  
ler und H.G. Ebert), M. Nijhoff Medical Division,  
The Hague, Boston, 1978, S. 182/200
- /F8, 7-111/ Rowland, R.E., und A.F. Stehney:  
Exposure Data for Radium Patients  
Argonne National Laboratory Report ANL-75-3,  
Pt. II (1974), S. 177/231
- /F8, 7-112/ Stewart, A.M.:  
Factors Controlling the Recognition of Leukemia  
and Childhood Cancer  
in: Health Physics and Healing Arts, 7th Media  
Topical Symposium of the Health Physics Society,  
U.S. Department of Health, Education and Welfare,  
Washington, 1973
- /F8, 7-113/ Goss, S.G.:  
The Risk of Death from Radiation-Induced Cancer  
as Estimated from the Published Data on the Japa-  
nese Atomic Bomb Survivors  
Harwell, NRPB-R 20 (1974)
- /F8, 7-114/ Schückler, M., und S. Vogt:  
UFOMOD - Programm zur Berechnung der radiologi-  
schen Folgen von Reaktorunfällen im Rahmen von  
Risikostudien  
KfK-3092 (1980)



- /F8, 7-115/ Bayer, A., J. Ehrhardt und M. Schückler:  
Das Konzept der effektiven Schadensfaktoren zur  
Ermittlung stochastischer somatischer Schäden  
nach unfallbedingten Strahlenexpositionen  
KfK-3037 (1980)
- /F8, 7-116/ Entwicklung eines EDV-unterstützten Entschei-  
dungsinstruments zur Standortvorauswahl von Kern-  
energieanlagen  
Hrsg. Battelle und Bonnenberg + Drescher, BF-R-  
63.037-2 (1978)
- /F8, 8-1/ Schückler, M., und S. Vogt:  
UFOMOD - Programm zur Berechnung der radiologi-  
schen Folgen von Reaktorunfällen im Rahmen von  
Risikostudien  
KfK-3092 (1980)
- /F8, 8-2/ Thomas, P.:  
Beständigkeit der atmosphärischen Ausbreitungs-  
bedingungen in Abhängigkeit der Tageszeit  
KfK-2214 (1975)
- /F8, 9-1/ Hays, W.L., und R.L. Winkler:  
Statistics, Vol. I, Holt  
Rinehart and Winston Inc., New York, 1970
- /F8, 9-2/ Lewis, H.W., et al.:  
Risk Assessment Review Group  
Report to the U.S. Nuclear Regulatory Commission,  
NUREG/CR-0400 (1978)
- /F8, 9-3/ Gibbons, J.D.:  
Nonparametric Statistical Inference  
McGraw-Hill, New York, 1971
- /F8, 9-4/ Myers, R.H.:  
Response Surface Methodology  
Allyn and Bacon, Boston, 1971

- /F8, 9-5/ Mazumdar, M., et al.:  
Review of the Methodology for Statistical Evaluation of Reactor Safety Analyses  
EPRI 309 (1975)
- /F8, 9-6/ Maekawa, M., W.E. Vesely und N.C. Rasmussen:  
An Application of Risk Analysis: Functional Relationships of Nuclear Risks, Proceedings of the International Conference on "Nuclear Systems Reliability Engineering and Risk Assessment", Gatlinburg, June 1977, SIAM, Philadelphia, 1977

11. STICHWORTVERZEICHNIS

- A
- Aktivitätsausbreitung siehe Atmosphärische Ausbreitung
- Aktivitätsfahne
- Aufstieg 37
  - Einfluß des thermischen Aufstiegs auf die Ausbreitung 69
  - externe Strahlung 178, 320, 327
  - Form 54, 359, 370
  - Transportzeit 318
  - Verhalten 22
- Aktivitätsfreisetzung siehe Freisetzung
- Aktivitätsinventar des Reaktorkerns 16
- Aktivitätskonzentrationen bei unfallbedingten Freisetzungen, Berechnung radioaktiver Zerfall und Verwitterung 109
- Resuspension 109
  - Vorgehen 107
- Akute Strahlenschäden siehe Frühschäden
- Altersabhängigkeit der Strahlenempfindlichkeit
- Brustkrebs 229, 239
  - Krebs im Magen-Darm-Trakt und an anderen Verdauungsorganen 249, 253
  - Leukämie 222, 269
  - Lungenkrebs 242, 247
  - Schilddrüsenkrebs 255
  - Summe aller Krebsarten außer Leukämie 269
- Äquivalentdosis, Definition 89
- Atmosphärische Ausbreitung
- Ablagerung 40
    - . nasse Ablagerung ("washout") 42, 76
    - . trockene Ablagerung ("fallout") 41, 76
  - Aktivitätsfahne
    - . Aufstieg 37
    - . Einfluß des thermischen Aufstiegs auf die Ausbreitung 69
    - . Form, 54, 359, 370
    - . Transportzeit 318
    - . Verhalten 22
  - Aktivitätskonzentration, Zeitintegral
    - . bei einstündiger Freisetzung 60
    - . bei länger dauernder Freisetzung 61
  - Aufpunkte, Anordnung 50, 327
  - Ausbreitungskategorien 22
    - . Andauer 318
  - Ausbreitungsmodell ("Gaußmodell")
    - . Allgemeines 27, 62
    - . Auswahl der Wetterabläufe 63, 316
    - . Bedeutung für Frühschäden 62
    - . Bedeutung für Spätschäden 62
    - . Einfluß besonderer meteorologischer Situationen 63
    - . Einfluß der azimutalen Konzentrationsverteilung 69
    - . Einfluß der Mischungsschichthöhe 73
    - . Einfluß der nassen Ablagerung 76
    - . Einfluß der trockenen Ablagerung 76
    - . Einfluß des thermischen Aufstiegs der Aktivitätsfahne 69
    - . Einfluß einer gleichbleibenden Ausbreitungsrichtung 83
    - . Einfluß einer Windrichtungs-gleichverteilung 86
    - . Einfluß von Windscherungen 82
    - . Optionen zur Berücksichtigung von Windrichtungsänderungen 83
    - . räumliche Verteilung der Aktivitätskonzentration 359, 361
    - . Sensitivitätsanalysen, Zusammenfassung 86
  - Ausbreitungsparameter 27
    - . Einfluß der Sonneneinstrahlung (Mischungshöhe) 35
    - . Einfluß von Rauigkeit und Topographie 28
  - Diffusionsgleichung 26
  - Gebäudeeinfluß 36
  - Längen- und Zeit-"scales" 21
  - meteorologische Standortregionen 46, 291
    - . Ausbreitungsstatistik (Tabelle) 49
  - Mischungsschichthöhe 73
  - Schadstoffkonzentration in der Aktivitätsfahne 26
  - Wetterabläufe 44, 63, 316
    - . typische (Charakterisierung) 317
  - Windgeschwindigkeit 39
  - Windrichtung 82
- Atombombenabwürfe, Strahlenfolgen 180, 209, 213, 215, 219, 229, 240, 248, 255, 257, 261, 265, 267
- Aufsuchen von Häusern (Aufenthalt in geschützten Räumen) 132, 148, 149
- Ausbreitung siehe Atmosphärische Ausbreitung
- Ausbreitungskategorien 22
- Aussagesicherheit der Ergebnisse
- Auswahl der unsicheren Parameter, Quantifizierung der Unsicherheit 438
    - . Bestwerte 439
    - . Fraktile 444
    - . Freisetzungshäufigkeiten, zu erwartende (Zuschläge aus den Nachbarkategorien) 439
    - . Funktionalparameter 453
    - . Leitvariable 453
    - . logarithmisch normalverteilte Zufallsvariable 439
    - . logarithmische Normalverteilung, Verwendung 452
    - . Mediane 444
    - . Monte-Carlo-Simulation 440
    - . Referenzfall 448
    - . Referenzwerte 448
    - . Streufaktor 453
  - Beschreibung der "response surface"-Methode 456
    - . Bestimmung von Vertrauensbereichen für den Schaden 477
    - . Festlegung der Parameterkombinationen ("design") 456
    - . Konstruktion der "response"-Funktion 464
    - . Simulation und Bestimmung der Vertrauensintervalle für die Häufigkeit 472
  - Ermittlung lokaler Vertrauensbereiche 454
    - . Ermittlung von 90-%-Vertrauensintervallen 454
    - . Monte-Carlo-Simulation, reine 454
    - . "response surface"-Methode 454
  - Fortpflanzung von Schätzunsicherheiten, Einfluß auf die Ergebnisse 434 (siehe auch Fachband 2)
    - . globaler Vertrauensbereich 436
    - . lokale Vertrauensintervalle 437
    - . subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung 435
    - . subjektives Vertrauensintervall 435
  - "Full three-level factorial design" 480
  - Quantifikation und probabilistische-mathematische Modellierung 432
    - . Expertenurteil 434
    - . Grad des Fürwahrhaltens 432
    - . Maß an Intensität bei der Beurteilung 432
    - . Stichprobenevidenz 434

- . subjektive Aussagesicherheit 433
- . subjektivistische Interpretation der Wahrscheinlichkeit 432
- . traditionelle (frequentistische) Interpretation der Wahrscheinlichkeit 432
- . Vertrauensintervall 434
- Schätzunsicherheiten 431
  - . aus genäherter funktionaler Beschreibung von Gesetzmäßigkeiten in Ereignis- und Expositionsabläufen 431
  - . aus ungenauer Kenntnis fester Größen 431
- Simulationsstudien 480
  - . gestutzte Normalverteilung 481
  - . Histogramm-Verteilung 481
  - . Loguniformverteilung 480
  - . "Weibull-Ansatz" zur Ermittlung von Vertrauensbereichen bei der Schadensart "frühe Todesfälle" 493

## B

- Belastungspfade siehe Expositions-pfade
- Berufliche Strahlenüberexposition, Folgen 181, 200, 210, 213, 217, 228, 244, 265
- Bestwerte 439
- Bevölkerungsverteilung
- gleichförmige (80-540 km) 281, 291
  - gleichförmige (540-2500 km) 281, 291
  - standortspezifische (bis 80 km) 281, 282, 291, 294, 359
  - Teilflächen für Freisetzungsphasen 291
- Bodenstrahlung 178, 322, 327, 418
- zeitlicher Verlauf der potentiellen Dosis 331
- Broschüren für die Öffentlichkeit über Katastrophenschutzplanung 131
- Brustkrebs
- relativer Anteil an den Spätschäden 420
  - Risiko 229

## D

- Dampfexplosion (Freisetzungskategorie 1) 18, 354, 360, 375, 414, 418, 421
- Dekontamination 132, 154, 158
- Deterministische Ergebnisse
- Definition 313
  - Übersicht 314
- Dosen bei unfallbedingten Freisetzungen, Berechnung
- bevölkerungsstatistische Daten 127
    - . Geburtenrate 128
    - . Lebenserwartungs-Dichtefunktion 128, 129
    - . mittlere Lebenserwartung 128
    - . mittleres Zeugungsalter 128
    - . Zeugungserwartungs-Dichtefunktion 128, 130
  - externe Bestrahlung durch die Aktivität des Bodens 111
    - . Bodenrauigkeit 115
    - . Dosisfaktoren 111, 112
  - externe Bestrahlung durch die Aktivitätsfahne 111
    - . Dosisfaktoren 111, 112
    - . Fahnenkorrekturfaktor 111, 113, 114
  - interne Bestrahlung durch die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität 115
    - . Atemrate 115, 117
    - . Dosisfaktoren zur Berechnung der Frühschäden 116, 118
    - . Dosisfaktoren zur Berechnung der Spätschäden 119, 120
  - interne Bestrahlung durch die mit den Nahrungsmitteln inkorporierte Aktivität 119

- . Dosisfaktoren 120, 127
  - . normierte integrale Inkorporation, Zahlenwerte 119, 127
- Dosis/Risiko-Beziehung 174
- für Strahlenkrebs, Typen 212
  - für Strahlenkrebs, wahrscheinlicher Verlauf 275
  - für Strahlenkrebs, zugrunde gelegter Verlauf 276, 288
- Dosis/Wirkungs-Beziehung 174
- für akute Strahlenschäden 198, 204
  - für akute Strahlenschäden, zugrunde gelegter Verlauf 281, 282, 287, 348
  - für Spätschäden, zugrunde gelegter Verlauf 281, 286, 288, 361

## E

- Energiedosis, Definition 89
- Erwartungswert, Definition 345
- Evakuierung 132, 148, 160, 392, 394, 416
- Evakuierungssimulationssystem EVAS 160
- Expertenurteil, Expertenschätzung 434
- Expositionspfade
- Beiträge zu den Kollektivschäden 418
  - Beiträge zur genetisch signifikanten Dosis 430
  - Definition 89

## F

- Fahrzeitermittlung für Evakuierung und schnelle Umsiedlung 159
- Fraktile 444
- Freisetzung 15
- aus dem Sicherheitsbehälter 15
  - Häufigkeiten, Zuschläge aus den Nachbarkategorien 443
  - Kategorien 17, 358 (siehe auch Fachband 7)
    - . Aufschlüsselung für abstandsabhängige mittlere Individualrisiken 410
    - . Aufschlüsselung für Expositions-pfade für Frühschäden 419
    - . Aufschlüsselung für Expositions-pfade für genetisch signifikante Dosis 429
    - . relativer Anteil an den Erwartungswerten der von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen 417
    - . relativer Anteil an den Kollektivrisiken 407
- Frühschäden 177
- Abhängigkeit der tödlich verlaufenden Strahlenkrankheit von der Strahlendosis 198
    - . Berücksichtigung sensibilisierender Erkrankungen 202
  - Allgemeines 90, 91, 136, 177, 281, 282
  - Berechnung 282
  - Betastrahlung aus der Aktivitätsfahne 178, 320
  - charakteristische Größen 357
  - Dosis/Wirkungs-Beziehung 198, 204
    - . zugrunde gelegter Verlauf 281, 282, 287, 348
  - Gammastrahlung aus der Aktivitätsfahne 178, 320
  - Gammastrahlung vom Boden 178, 322
  - interne Strahlenbelastung 179, 322
    - . Lunge 179
    - . Magen-Darm-Trakt 179
    - . Schilddrüse 13, 179
  - Knochenmarkdosis 320
    - . entfernungsabhängiger Verlauf 320
  - Personen, deren Darm einer Strahlenbelastung ausgesetzt war 184

- . Bestrahlung des Bauches 184
  - . Kontamination des Darminhalts 184
  - Personen, deren Lunge einer Strahlenbelastung ausgesetzt war 183
    - . Ablagerung radioaktiver Stäube in den Bronchien 183
    - . vorsorgliche Lungenbestrahlungen bei der Krebstherapie 183
  - Personen, deren Schilddrüse einer Strahlenbelastung ausgesetzt war 184
  - Personengruppen, die einer praktisch gleichmäßigen Bestrahlung des ganzen Körpers mit Strahlendosen über 100 rad ausgesetzt waren 180
    - . Erfahrungen aus Atombombenabwürfen und Testexplosionen 180
    - . Erfahrungen aus Strahlenunfällen in Forschung und Technik 181, 200
    - . Erfahrungen mit Ganzkörperbestrahlten Patienten 182, 200
  - Risikofaktoren 284
  - strahlenbiologische Tierexperimente 177, 183, 184, 198, 200, 204
  - Verlauf der Erkrankungen nach Bestrahlung 185
    - . der Lunge mit einer Dosis über 2000 rad, über einige Wochen verteilt 191
    - . der Schilddrüse durch Radiojod 194
    - . des Darms mit einer über einige Tage verteilten Dosis von über 1000 rad 193
    - . mit einer Ganzkörperdosis über 500 rad 190
    - . mit einer Dosis von ca. 100 rad (kurzfristig oder über 24 Stunden akkumuliert) 185
    - . mit einer Dosis von 200 bis 500 rad (kurzfristig oder über 24 Stunden akkumuliert) 187
- "Full three-level factorial design" 480
- Funktionalparameter 453

## G

- Gammastrahlung aus der Aktivitätsfahne 178
- Gammastrahlung vom Boden 178, 322, 327, 331, 418
- Genetisch signifikante kollektive Strahlendosis
- Definition 92, 282
  - Ermittlung 92, 282
- Genetische Strahlenschäden 279
- Allgemeines 90, 92, 279
  - charakteristische Größen 389
    - . Vergleich mit Daten von somatischen Spätschäden 390
  - dominante Mutationen 279
  - genetisch signifikante kollektive Strahlendosis 280
  - Gründe für den Verzicht zahlenmäßiger Angaben 279
  - rezessive Mutationen 279
  - Risikofaktor 280
  - Spektrum 279
  - spontane Mutationen 279
  - strahlenbiologische Tierexperimente 279
  - Vergleich mit der natürlichen genetisch signifikanten Kollektivdosis 391, 409

## I

- Individualdosis, Definition 93
- Individualrisiko, mittleres, Definition 345
- Inhalationsdosen 179, 322
- Ganzkörper 342

- Knochenmark 338
  - Knochenoberfläche 339
  - Lunge 340
  - Schilddrüse 341
- Interne Strahlenbelastung 179

## J

- Jodtablettenprophylaxe, Gründe für die Nichtberücksichtigung 13, 132

## K

- Katastrophenschutzpläne 131
- Kerma (Definition) 219
- Klassenhäufigkeitsdichten 343
- Frühschäden 348, 359
  - genetische Belastung 378
  - Spätschäden 361
- Knochenkrebs
- relativer Anteil an den Spätschäden 420
  - Risiko 263
- Knochenmarkdosis 281, 320, 331, 338
- Kollektivdosis, Definition 93
- Kollektivrisiko, Definition 345
- Kollektivschäden 280
- Komplementäre Häufigkeitsverteilungen 343
- Frühschäden 355, 360
  - genetische Belastung 378, 387
  - Spätschäden 361, 371
  - Vergleich der Daten von Spätschäden und genetisch signifikanten Kollektivdosen 390
  - von den Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffene Flächen 395, 401
  - von den Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffene Personenzahl 394
- Krebsarten, Beiträge zu den Kollektivschäden 418
- Krebsmorbiditätsrisiko bei Ganzkörperbestrahlung 274
- Kühlmittelverluststörfälle
- beherrschte 20
  - nicht beherrschte 18

## L

- Latenzzeit beim Strahlenkrebs 215, 288
- Brustkrebs 233
  - Krebs im Magen-Darm-Trakt und an anderen Verdauungsorganen 251
  - Leukämie 224
  - Lungenkrebs 242
  - Schilddrüsenkrebs 259, 262
  - Summe aller Krebsarten außer Leukämie 268
- Leitsätze für die Unterrichtung der Öffentlichkeit über die Katastrophenschutzplanung in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen 131
- Leitvariable 453
- Leukämie
- relativer Anteil an den Spätschäden 420
  - Risiko 219
- Logarithmisch normalverteilte Zufallsvariable 439
- Logarithmische Normalverteilung, Verwendung 452
- Lokale Vertrauensbereiche, Ermittlung 454
- Lungenkrebs
- relativer Anteil an den Spätschäden 420
  - Risiko 240

## M

- Magen-Darm-Trakt und andere Verdauungsorgane, Krebsrisiko 248

- Mediane 444
- Medizinische Strahlenexposition, Folgen
  - 182, 200, 209, 217, 224, 226, 234, 235, 244, 251, 258, 260, 265, 266
- Monte-Carlo-Simulation 440, 454
- Mortalitätsrisiko bei Strahleneinwirkung
  - allgemein 173, 198, 270, 273
  - bei ärztlicher Behandlung 202
  - bei Berücksichtigung von Gruppen mit erhöhter Strahlenempfindlichkeit 202
  - bei gesunden Menschen 198, 202
  - bei kranken Menschen 200

## N

- Natürliche Strahlenexposition
  - Vergleich der durch sie hervorgerufenen genetisch signifikanten Kollektivdosis mit den Dosen aufgrund von Kernkraftwerksunfällen 391, 409
  - Vergleich der durch sie verursachten Leukämie- und Krebsfälle mit denen aufgrund von Kernkraftwerksunfällen 373, 377, 408, 412
- Nichtstochastische Strahleneffekte, Definition 173
- Nuklidspezifische Aufschlüsselung der potentiellen Dosis
  - durch externe Strahlung aus der Aktivitätsfahne 327
  - durch externe Strahlung vom Boden 331
  - durch Inhalation 338

## O

- Organe, zur Berechnung der Strahlenexposition berücksichtigte 89, 91, 273, 281, 285, 289

## P

- Potentielle Dosen
  - Definition 88
  - Ergebnisse
    - . Ganzkörper 327
    - . Knochenmark 320
    - . Lunge 327
  - Ermittlung 90, 94, 135
    - . Frühschäden 90
    - . genetische Belastung 90
    - . Spätschäden 90
  - zeitabhängiger Verlauf bei Bodenstrahlung 331
- Probabilistische Ergebnisse
  - Darstellung 333
  - Definition 313

## R

- Radiojod (Strahlenbelastung der Schilddrüse) 179, 194, 254, 258, 260
- Radon-222 (Strahlenbelastung der Lunge bei Bergarbeitern) 244
- Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen 131
  - Dosiskriterienvergleich für Bevölkerungsbewegung mit deutscher Risiko-studie 136, 137, 139
- Rechenprogramme
  - EVAS 160
  - ORIGEN 15
  - UFOMOD 13, 282, 313, A-7
- Referenzfall 448
- Referenzwerte 448

- "response surface"-Methode 454
  - "response"-Funktion 464
- Risiken für gesundheitliche Schäden
  - Individualrisiken
    - . akute Todesfälle 409
    - . somatische Spätschäden 409
  - Kollektivrisiken
    - . akute Todesfälle 405
    - . genetisch signifikante Kollektivdosis 405
    - . somatische Spätschäden 405
- Risikofaktoren
  - genetische Strahlenschäden 280
  - somatische Strahlenschäden, für verschiedene Organe 273
- Rückführung der Bevölkerung 158

## S

- Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten, individuelle 280
- Schilddrüsenkrebs
  - relativer Anteil an den Spätschäden 420
  - Risiko 254
- Schnelle Umsiedlung 132, 153, 161, 322, 392, 395, 398, 418
- Schutz- und Gegenmaßnahmen, Modell, Fahrzeitermittlung für Evakuierung und schnelle Umsiedlung
  - Evakuierung, Ergebnisse der Simulationsrechnungen 160
  - Evakuierungssimulationssystem EVAS 160
  - schnelle Umsiedlung 161
    - . Bevölkerungsdichte 166
    - . Bevölkerung und Transportmittel 162
    - . Ergebnisse der Simulationsrechnungen 164
    - . Fahrzeitverteilung 165, 168
    - . Gebietsgröße 166
    - . Interpolation zwischen den berechneten Fahrzeiten 167
    - . Modellvorgaben 163
    - . Rüstzeit 169
    - . Straßennetzverhältnisse 162
  - Umsiedlung 165
    - . Staffelung des Ablaufs 166
    - . Transportkapazität 165
- Schutz- und Gegenmaßnahmen, Modell, Gebiete
  - allgemeine Kriterien 90, 134, 135, 375
    - . Bevölkerungsbewegungen, Dosiskriterien 136, 137
    - . Bevölkerungsbewegungen, Dosiskriterien, Vergleich mit Rahmenempfehlungen 136, 137
    - . Frühschäden (Gebiete A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>) 136
    - . Ganzkörperdosis 136
    - . Isodosislinien 135
    - . Knochenmarkdosis (Gebiete A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>) 136
    - . Spätschäden 136, 375
    - . Standort-Freisetzungskategorie-Wetterablauf-Windrichtung-Kombinationen 138
    - . Übernahme von Teilmodellen aus WASH-1400 132, 157
  - Gebiet A 139
    - . Abwicklung der Schutz- und Gegenmaßnahmen 139
    - . Form und Größe 139, 392
    - . Vergleich mit der Zoneneinteilung der Rahmenempfehlungen 139
  - Gebiet B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub>, Festlegung 140
    - . Freisetzungskategorie-Klimazone-Wetterablauf-Kombinationen 140
  - Gebiete C, D<sub>1</sub> und D<sub>2</sub>, Festlegung 141
- Schutz- und Gegenmaßnahmen, Modell, Maßnahmen

- Abschirmwirkung von Gebäuden, Berücksichtigung 142
  - . Abschirmfaktoren für verschiedene Aufenthaltsorte 143, 144, 146, 155
  - . mittlerer Abschirmfaktor für Mischaufenthalt 146
  - . Verfügbarkeit von Kellerräumen 143, 147
  - . Verteilung von Gebäudegrößen und Bevölkerung 145, 146
- Anlaufphase 141
- Gebiet A 148
  - . Aufsuchen von Häusern 148
  - . Evakuierung 148, 160, 392, 394, 416
  - . Dekontamination 158
  - . Hauptzweck der Maßnahmen 148
  - . Rückführung der Bevölkerung 158
- Gebiete B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub> 149
  - . Aufsuchen von Häusern 149
  - . Dekontamination 158
  - . Fahrzeiten, Bewertung für die Dosisberechnung 153, 322, 346, 413
  - . Rückführung der Bevölkerung 158
  - . schnelle Umsiedlung 153, 161, 322, 392, 395, 398, 418
  - . Teilgebiet B<sub>2</sub>, Ausbildung 153
- Gebiete C, D<sub>1</sub> und D<sub>2</sub> 154
  - . Dekontamination 154, 158
  - . Fehlen eines Regenablaufmodells 156
  - . niedrige Auslöseschwelle für Umsiedlung 156
  - . Rückführung der Bevölkerung 158
  - . Umsiedlung 132, 154, 165, 400, 403, 418
  - . Verzehrverbot landwirtschaftlicher Produkte 154, 157, 158
- Jodtablettenprophylaxe, Nichtberücksichtigung 132
- von den Maßnahmen betroffene Flächen und Personen 391, 415
- Schutz- und Gegenmaßnahmen, Modell, Schema von Gebieten, Maßnahmen und Zeitabläufen 133, 150
- Sicherheitsbehälter
  - großes Leck 19
  - mittleres und kleines Leck 19
  - spätes Überdruckversagen 19
  - Versagen aufgrund einer Dampfexplosion 18, 354, 360, 375, 414, 418, 421
- Somatische Strahlenfrühschäden siehe Frühschäden
- Somatische Strahlenspätsschäden siehe Spätsschäden
- Spätsschäden 206
  - Allgemeines 90, 91, 136, 206, 281
  - aufgrund natürlicher und zivilisatorischer Ursachen 373, 377, 408, 412
  - Beobachtungen an beruflich strahlenexponierten Personen 210, 213, 217, 229, 244
  - Beobachtungen an Patientengruppen nach medizinischer Strahlenanwendung 209, 217, 224, 234, 235
  - Beobachtungen an Überlebenden von Atombombenabwürfen 209, 213, 215, 219, 229, 240
  - Berechnung 285
  - charakteristische Größen 374
    - . Vergleich mit Daten der genetisch signifikanten Kollektivdosen 390
  - Definition 206
  - Dosis/Kerma-Konversionsfaktoren bei Neutronen- und Gammaabstrahlung 277
  - Dosis/Risiko-Beziehung, Typen 211
  - Dosis/Wirkungs-Beziehung, zugrunde gelegter Verlauf 281, 286, 288, 361
    - . Vergleich mit Schäden aus Kernkraftwerksunfällen 377, 408, 412
  - Krebsarten, Beiträge zu den Kollektivschäden 418
- Latenzperiode 206
- Latenzzeit-Verteilung beim Strahlenkrebs 215, 288
  - . Abhängigkeit von der Dosis und ihrer zeitlichen Verteilung 217, 276
  - . andere Krebsarten 215, 233, 242, 251, 259, 262
  - . Leukämie 215, 224
- spontanes Krebsrisiko 208
- strahlenbiologische Tierexperimente 206, 213, 218, 221, 276
- Strahlenkrebsrisiko 206
  - . Brustkrebs bei Patienten nach therapeutischer Strahlenbehandlung 235
  - . Brustkrebs bei Überlebenden von Atombombenabwürfen 229
  - . Brustkrebs nach diagnostischer Strahlenexposition 234
  - . Knochenkrebs bei beruflich strahlenexponierten Personen 265
  - . Knochenkrebs bei Patienten nach therapeutischer Strahlenbehandlung 265, 266
  - . Knochenkrebs bei Überlebenden von Atombombenabwürfen 263
  - . Krebs im Magen-Darm-Trakt und an anderen Verdauungsorganen bei Patienten nach therapeutischer Strahlenbehandlung 251
  - . Krebs im Magen-Darm-Trakt und an anderen Verdauungsorganen bei Überlebenden von Atombombenabwürfen 248
  - . Krebsmortalitätsrisiko bei Ganzkörperbestrahlung 274
  - . Leukämie bei beruflich strahlenexponierten Personen 228
  - . Leukämie bei Patienten mit Strahlenbehandlung 224
  - . Leukämie bei Überlebenden von Atombombenabwürfen 219
  - . Leukämie nach diagnostischer Strahlenexposition 226
  - . Lungenkrebs bei Patienten nach therapeutischer Strahlenbehandlung 244
  - . Lungenkrebs bei Radon-222-exponierten Bergarbeitern 244
  - . Lungenkrebs bei Überlebenden von Atombombenabwürfen 240
  - . Mortalitätsrisiko bei Strahleneinwirkung (nach Beobachtungen an den Überlebenden von Atombombenabwürfen) 267
  - . Mortalitätsrisiko bei Strahleneinwirkung, summarisch 272
  - . Risikofaktoren für verschiedene Organe 273, 289, 377
  - . Risikoverhältnis Leukämie/alle anderen Krebsarten bei Überlebenden von Atombombenabwürfen 267
  - . Schilddrüsenkrebs bei Patienten nach interner Bestrahlung durch Jod-131 260
  - . Schilddrüsenkrebs bei Patienten nach therapeutischer externer Strahlenbehandlung 258
  - . Schilddrüsenkrebs bei Überlebenden von Atombombenabwürfen 255
  - . Schilddrüsenkrebs durch "fallout" nach Kernwaffenversuchen 257, 261
- Spontanes Krebsrisiko 208
- Stochastische Strahleneffekte, Definition 173
- Strahlenempfindlichkeit, erhöhte 202
- Strahlenexposition, Definition 88
- "Strahlenkater" 185, 187, 190, 193
- Strahlenkrankheit, akute 185
  - Blutbildstörungen 185, 187, 190
  - Blutungsherde 187
  - Durchfall 190, 193
  - Fieber 187
  - Infektionen 187
  - Lungenfibrose 192

- Mißbildungsrisiko bei Embryonen und Feten 186, 189, 191
- Pneumonitis 191
- Schilddrüsenunterfunktion 195
- Schwangerschaftsunterbrechung 186, 189, 191
- Störung der Gonadenfunktion 186, 188, 191
- "Strahlenkater" 185, 187, 190
- Strahlenkrebsrisiko, Organe 206, 218
  - Brust 229
  - Knochen 263
  - Knochenmark 219
  - Lunge 240
  - Magen-Darm-Trakt und andere Verdauungsorgane 248
  - Schilddrüse 254
- Strahlenschäden, Arten (Schema) 172
- Strahlenschadensrisiko, Definition 171
- Strahlenwirkung im biologischen Organismus
  - Äquivalentdosis 176
  - Dosis/Kerma-Konversionsfaktoren bei Neutronen- und Gammaabstrahlung 277
  - Dosis/Risiko-Beziehung
    - . nichtstochastische Strahlenschäden 174
    - . stochastische Strahlenschäden 174
  - Dosis/Wirkungs-Beziehung 174
  - Energiedosis 174, 176
  - Kerma (Definition) 219
  - Mortalitätsrisiko 173
  - nichtstochastische Strahleneffekte (Definition) 173
  - Qualitätsfaktor 176
  - Reaktionsketten (Schema) 172
  - Reparaturmechanismen 171
  - stochastische Strahleneffekte (Definition) 173
  - Strahlenart und -qualität 174
  - Strahlenenergie, Absorption von 170
  - Strahlenschäden, Arten (Schema) 172
  - Strahlenschadensrisiko (Definition) 171
  - zeitliche Verteilung der aufgenommenen Dosis 174
- Streufaktor 453
- Subjektive Aussagesicherheit 433

## T

- Tierexperimente, strahlenbiologische 177, 183, 184, 198, 200, 204, 206, 213, 218, 221, 276, 279

## U

- Umsiedlung 132, 154, 165, 400, 403, 418
- Unfallabläufe (siehe auch Fachband 5)
  - beherrschte Kühlmittelverluststörfälle 20
  - Dampfexplosion 18
  - großes Leck im Sicherheitsbehälter 19
  - mittleres und kleines Leck im Sicherheitsbehälter 19
  - spätes Überdruckversagen des Sicherheitsbehälters 19
- Unfallfolgen, Berechnung
  - Bevölkerungsverteilung
    - . gleichförmige (80-540 km) 281, 291
    - . gleichförmige (540-2500 km) 281, 291
    - . standortspezifische (bis 80 km) 281, 282, 291, 294
    - . Teilflächen für Freisetzungsphasen 291
  - Dosis/Wirkungs-Beziehung für Fröh-schäden 281, 287
  - Dosis/Wirkungs-Beziehung für Spät-schäden 281, 286, 288

- Fröh-schäden 281, 282
  - . Bevölkerungsverteilung, standortspe-zifische 282
  - . Dosis/Wirkungs-Beziehung 281, 287
  - . Eintrittswahrscheinlichkeit 282
- genetische Belastung 282
- genetisch signifikante Dosis 282
- Knochenmarkdosis 281
- Kollektivschäden 280
- Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten, individuelle 280
- Spät-schäden 281, 283
  - . berücksichtigte Organe 281, 283
  - . Berücksichtigung der Eintrittswahr-scheinlichkeit für Fröh-schäden 286
  - . Bevölkerungsverteilung 285, 286
  - . differentieller Risikokoeffizient 284
  - . Dosis/Risiko-Beziehung 288
  - . Dosis/Wirkungs-Beziehung 286, 288
  - . Eintrittswahrscheinlichkeit 284, 286
  - . Geburtenrate 285
  - . Latenzzeit 288
  - . Lebenserwartungs-Dichtefunktion 285
  - . Risikofaktoren 289, 290
  - . Risikokoeffizient, differentieller 284
- Unfallfolgenmodell, Schema 9
- Unterschiede zu den Ergebnissen des Haupt-bandes
  - Ergebnisse im Hauptband A-7
  - Korrekturen am Unfallfolgenmodell A-3
    - . Aufstiegshöhe A-3
    - . Dosisfaktoren A-4
    - . Informationsübertragung A-6
    - . Meeresflächen A-6
    - . Mindestwindgeschwindigkeit A-4
    - . Standortkoordinaten A-5
  - Ursache 13, A-3

## V

- Vergleich der genetisch signifikanten Kol-lektivdosen aufgrund von Kernkraftwerks-unfällen und aufgrund der natürlichen Strahlenexposition 391, 409
- Vergleich von Todesfällen durch Leukämie und Krebs aufgrund von Kernkraftwerksunfäl-len und aufgrund natürlicher und zivi-lisatorischer Ursachen 373, 377, 408, 412
- Verkehrsstrukturen, Berücksichtigung im Mo-dell der Schutz- und Gegenmaßnahmen 132, 162
- Vertrauensintervall 434
- Verkehrverbot landwirtschaftlicher Produkte 132, 154, 157, 158
- Vorsorge zur Gefahrenabwehr 131, 135

## W

- Wahrscheinlichkeitsinterpretation
  - subjektivistisch
    - . Grad des Fürwahrhaltens (subjektive Aussagesicherheit) 432
    - . Maß an Intensität bei der Beurtei-lung 432
  - traditionell (frequentistisch) 432
- WASH-1400 13, 15, 18, 19, 20, 30, 41, 43, 44, 46, 59, 64, 65, 77, 109, 111, 116, 117, 119, 127, 132, 146, 154, 157, 158, 198, 199, 200, 202, 212, 260, 287, 288, 348, 407, 443, 478, 479, 493, A-6
- "Weibull-Ansatz" 493
- Wetterabläufe 44, 63, 316
  - mit Niederschlag 322
  - typische (Charakterisierung) 317



Z

Zeitliche Entwicklung der Dosis

- Bodenstrahlung 331
  - . Ganzkörper 337
  - . Knochenmark 332
  - . Knochenoberfläche 334
  - . Lunge 335
  - . Schilddrüse 336
- Inhalation 333

Zu erwartende Dosen

- Berücksichtigung von Altersstruktur und Lebenserwartung 103
  - . Geburtenrate 105
  - . komplementäre Lebenserwartungs-Verteilungsfunktion 104
  - . Lebenserwartungs-Dichtefunktion 104
  - . mittlere Lebenserwartung 105
  - . mittleres Zeugungsalter 105
  - . repräsentatives Individuum 104, 105, 106
  - . Zeitskala für die Dosis- und Schadensberechnung (Schema) 101
  - . Zeugungserwartungs-Dichtefunktion 105
- Definition 88
- Frühschäden, Knochenmarkdosis 91
- genetische Belastung 92
  - . genetisch signifikante Dosis, Berechnung 92, 106
  - . genetisch signifikante Dosis, Definition 92
- Schutz- und Gegenmaßnahmen als Reduktionsfaktoren 98, 135
  - . Aufsuchen von Häusern 100
  - . Dekontamination 100
  - . Evakuierung, schnelle Umsiedlung, Umsiedlung 100
  - . Verwerfen von Lebensmitteln 102
- Spätschäden, berechnete Organdosen 91

Unterschiede zu den Ergebnissen des Hauptbandes

## Inhalt:

	Seite
1. Einleitung . . . . .	A-3
2. Korrekturen am Unfallfolgenmodell . . . . .	A-3
2.1 Aufstiegshöhe . . . . .	A-3
2.2 Mindestwindgeschwindigkeit . . . . .	A-4
2.3 Dosisfaktoren . . . . .	A-4
2.4 Standortkoordinaten . . . . .	A-5
2.5 Meeresflächen . . . . .	A-6
2.6 Informationsübertragung . . . . .	A-6
3. Ergebnisse im Hauptband . . . . .	A-7

## 1. Einleitung

Der Hauptband der "Deutschen Risikostudie - Kernkraftwerke" wurde im Herbst 1979 fertiggestellt und im Dezember desselben Jahres veröffentlicht. Für den Fachband 8 anschließend durchgeführte ergänzende Rechnungen und Ergebnisanalysen ließen einige Inkonsistenzen und Ungenauigkeiten erkennen. Sie machten Korrekturen im Unfallfolgenmodell notwendig. Diese Korrekturen und ihre Auswirkungen werden in den nächsten Abschnitten besprochen.

Zweck der Fachbände ist es, den Hauptband zu ergänzen und interessierten Lesern die Möglichkeit zu bieten, die zur Phase A der Risikostudie vorliegenden Ergebnisse im Detail nachzuvollziehen und zu beurteilen. Es wurde daher eingehend darüber diskutiert, ob der vorliegende Fachband vorrangig mit dem Hauptband oder mit dem aktuellen Stand der Daten und des Rechenprogramms konsistent sein sollte. Die Autoren des vorliegenden Fachbandes sind der Meinung, daß die Übereinstimmung mit dem aktuellen Stand der Daten und des Rechenprogramms für den fachkundigen Leser Priorität besitzt. Deshalb wurden in Kapitel 8 dieses Fachbandes die korrigierten Ergebnisse ausführlich dargestellt. Die folgenden Abschnitte sollen in knappgehaltener Form den Bezug zum Hauptband herstellen.

## 2. Korrekturen am Unfallfolgenmodell

### 2.1 Aufstiegshöhe

Im meteorologischen Modell wird die Aufstiegshöhe durch die freigesetzte Energie, die geometrische Freisetzungshöhe und den zugehörigen Wetterablauf bestimmt. Bei den Berechnungen der Ergebnisse des Hauptbandes wurde die geometrische Freisetzungshöhe außer Betracht gelassen (siehe auch Abschnitt 4.6). Nach der Richtigstellung verringerte sich der mittlere Kollektivschaden für akute Todesfälle vor allem bei den Freisetzungskategorien mit niedriger freigesetzter Energie (FK2 und FK3).

Der Einfluß auf den Umfang der Spätschäden war vernachlässigbar gering.

## 2.2 Mindestwindgeschwindigkeit

Bei den Berechnungen zum Hauptband betrug die minimale Windgeschwindigkeit 0,5 m/s. Diese untere Begrenzung wurde auf 1,0 m/s heraufgesetzt (siehe auch Abschnitt 4.7). Dadurch wird bei Schwachwindlagen die errechnete Aufstiegshöhe verringert, was eine Erhöhung der Aktivitätskonzentration der bodennahen Luft in Quellnähe bewirkt. Dadurch wiederum wird die Aktivitätsablagerung auf den Boden verstärkt, wodurch die Aktivitätskonzentration in Bodennähe in größeren Entfernungen reduziert werden kann. Der Einfluß auf den Umfang der Frühschäden ist daher komplex und weist Trends in beide Richtungen auf. Insgesamt betrachtet, beeinflusst diese Änderung die charakteristischen Größen der Häufigkeitsverteilung für Frühschäden jedoch weniger als die in 2.1 beschriebene Korrektur im Aufstiegsmodell.

## 2.3 Dosisfaktoren

Mit Hilfe der Dosisfaktoren werden aus den Luft- und Bodenkonzentrationen der einzelnen Nuklide die Organdosen berechnet. In der deutschen Risikostudie werden die Originaldaten des im amerikanischen Unfallfolgenmodell verwendeten Rechenprogramms CRAC übernommen. Beim Übertragen der Daten wurden die Dosisfaktoren für externe Bestrahlung bei drei Organen irrtümlich zyclisch vertauscht:

- Der Knochenoberfläche wurden die Faktoren für die Schilddrüse,
  - der Schilddrüse wurden die Faktoren für die Gonaden und
  - den Gonaden wurden die Faktoren für die Knochenoberfläche zugeordnet. Die Korrektur dieser Vertauschung hatte folgende Konsequenzen:
- Die Summe der Spätschäden änderte sich nur wenig, denn die Erhöhung einzelner Faktoren wurde durch entsprechende Er-

niedrigung anderer Faktoren weitgehend kompensiert. Die Beiträge der einzelnen Organe zu den Spätschäden, die im Hauptband nicht im einzelnen aufgeschlüsselt worden sind, änderten sich entsprechend.

- Die korrigierten Gonadendosen wurden kleiner, da die irrtümlich verwendeten Dosisfaktoren zu hoch waren (Tabelle F8, 5-1).

Für die Berechnung der Frühschäden ist die den Organen Knochenoberfläche, Schilddrüse und Gonaden applizierte Dosis nicht relevant.

#### 2.4 Standortkoordinaten

Die Populationsschäden bis zu einer Entfernung von 80 km vom Kraftwerksstandort werden sektorweise durch Falten der abstandsabhängigen Individualrisiken mit der zugehörigen Bevölkerungsverteilung berechnet. Die Bevölkerungsverteilung wiederum ergibt sich aus der in bestimmten Flächenelementen wohnenden Bevölkerung und der zugehörigen geographischen Lage, bezogen auf die Koordinaten des Kraftwerksstandorts. Eine Überprüfung dieser Lagekoordinaten führte zu Korrekturen für einige Kraftwerksstandorte. Die Korrekturen waren im allgemeinen geringfügig, führten jedoch im Einzelfall bis zu Änderungen von 3 Breitenminuten und 41 Sekunden bzw. 3 Längenminuten und 13 Sekunden. Infolgedessen wurden die zu den Einzelereignissen gehörenden Frühschäden teils größer und teils kleiner, denn eine Verschiebung von Standortkoordinaten ist stets mit entsprechenden Änderungen der Abstände zu den umliegenden Dörfern und Städten verbunden. Sie können sich vergrößern oder verkleinern. Beispielsweise erhöhte sich das Maximum der Frühschäden, während der Mittelwert bzw. das Kollektivrisiko kleiner wurde (Tabelle F8, 8-3 und Tabelle F8, A-2). Für Freisetzungskategorien mit niedriger Aufstiegshöhe der Aktivitätsfahne (FK3, FK4) ergaben sich größere Änderungen; die Frühschäden treten hier in geringer Entfernung von der Reaktoranlage auf, wo sich auch die Korrektur der Bevölkerungsverteilungen am stärksten auswirkte.

Die somatischen Spätschäden treten großflächig auf; sie wurden daher von den Koordinatenverschiebungen praktisch nicht beeinflusst.

## 2.5 Meeresflächen

Jenseits von 80 km bis zu einer Entfernung von 540 km wurde bei allen Standorten eine konstante Bevölkerungsdichte von 250 Einwohnern/km<sup>2</sup> zugrunde gelegt. Zur realistischen Abschätzung der Kollektivschäden ist bei den norddeutschen Standorten zu berücksichtigen, daß in diesen Entfernungsbereichen mehrere Sektoren auf Wasserflächen (Nord- und Ostsee) fallen. Bei den Rechnungen zum Fachband wurde im Gegensatz zum Hauptband in den betreffenden Sektoren ohne Bevölkerung gerechnet. Dadurch reduzierte sich der mittlere Kollektivschaden für die Krebsfälle und die mittlere genetisch signifikante Kollektivdosis geringfügig.

## 2.6 Informationsübertragung

Zum Zeitpunkt der Berechnung der Ergebnisse für den Hauptband bestand das Unfallfolgenmodell aus zwei getrennten Rechenprogrammen. Sie waren im Rechenablauf derart miteinander verknüpft, daß mit dem ersten Rechenprogramm zwischengespeicherte Ergebnisse als notwendige Eingabedaten vom zweiten Programm eingelesen wurden. Dabei kam es in einem Rechenlauf zu einer falschen Datenkombination.

Der Freisetzungskategorie FK1 wurde bei einigen Rechenläufen außer dem jetzigen Referenzwert für die thermische Energiefreisetzung (nach WASH-1400) ein um den Faktor 3 höherer Wert zugeordnet. Bei der Berechnung der Gegenmaßnahmen in den Gebieten B<sub>1</sub>/B<sub>2</sub> (schnelle Umsiedlung) wurden irrtümlich die Ergebnisse aus dem Rechenlauf mit der hohen Energiefreisetzung als Eingabedaten für das zweite Rechenprogramm verwendet.

Nach Korrektur dieses Fehlers reduzierte sich insbesondere die Maximalzahl der schnell umzusiedelnden Personen. Andere Ergebnisse wurden durch diesen Fehler nicht betroffen.

### 3. Ergebnisse im Hauptband

Um dem Leser die Möglichkeit zu geben, die Unterschiede zu den korrigierten Ergebnissen des vorliegenden Fachbandes zu erkennen, werden die wichtigsten Ergebnisse des Hauptbandes nochmals wiederholt. Die folgende Übersicht enthält die Bezeichnungen der Tabellen und Abbildungen, die miteinander zu vergleichen sind. Die Bilder F8, A-1 bis -5 und die Tabellen F8, A-1 bis -9 zeigen Ergebnisse des Fachbandes 8. Ihnen sind jeweils die entsprechenden Bilder und Tabellen aus dem Hauptband gegenübergestellt. Die Abweichungen in Kurvenverläufen und Zahlenwerten sind durch die im vorangegangenen Abschnitt aufgeführten Korrekturen im Rechenprogramm UFOMOD und den durchgeführten Rechenläufen erklärbar. Insbesondere sind Unterschiede bei den Frühschäden und den von den Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen zurückzuführen auf

- Korrekturen im meteorologischen Modell und zugehöriger Eingabeparameter (Abschnitte 2.1, 2.2 und 2.6),
- Änderungen in den Bevölkerungsverteilungen (Abschnitt 2.4).

Veränderte Zahlenwerte bei den somatischen Spätschäden sind hauptsächlich durch die Korrektur der Dosisfaktoren (Abschnitt 2.3) und die Berücksichtigung der Wasserflächen bei den norddeutschen Standorten bedingt (Abschnitt 2.5).

Übersicht

Vergleichbare Bilder und Tabellen aus dem Fachband 8 und dem Hauptband

F a c h b a n d		H a u p t b a n d
Text	Anhang	
Bild F8, 8-9(2)	Bild F8, A-1	Bild 8-2
Bild F8, 8-11(1)	Bild F8, A-2	Bild 8-5
Bild F8, 8-13(2)	Bild F8, A-3	Bild 8-7
Bild F8, 8-17(1)	Bild F8, A-4	Bild 8-8
Bild F8, 8-17(2)	Bild F8, A-5	Bild 8-9
Tab. F8, 8-3	Tab. F8, A-1	Tab. 8-2
Tab. F8, 8-4	Tab. F8, A-2	Tab. 8-3
Tab. F8, 8-6	Tab. F8, A-3	Tab. 8-5
Tab. F8, 8-8	Tab. F8, A-4	Tab. 8-7
Tab. F8, 8-9	Tab. F8, A-5	Tab. 8-8
Tab. F8, 8-11	Tab. F8, A-6	Tab. 8-10
Tab. F8, 8-13	Tab. F8, A-7	Tab. 8-11
Tab. F8, 8-14	Tab. F8, A-8	Tab. 8-12
Tab. F8, 8-15	Tab. F8, A-9	Tab. 8-13



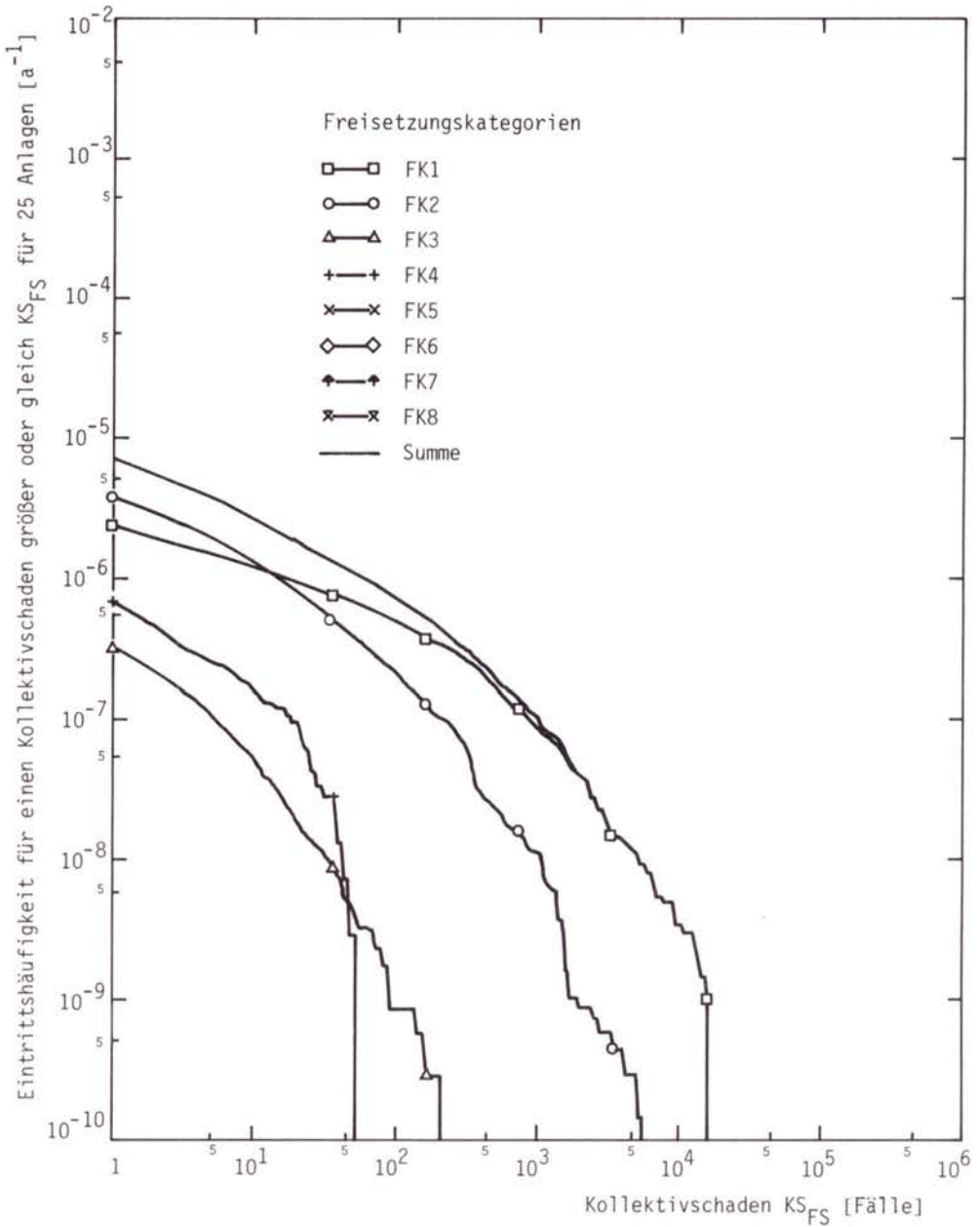


Bild F8, A-1:

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der Frühschäden, aufgeschlüsselt nach den Freisetzungskategorien (deutsche Dosis/Wirkungs-Beziehung)

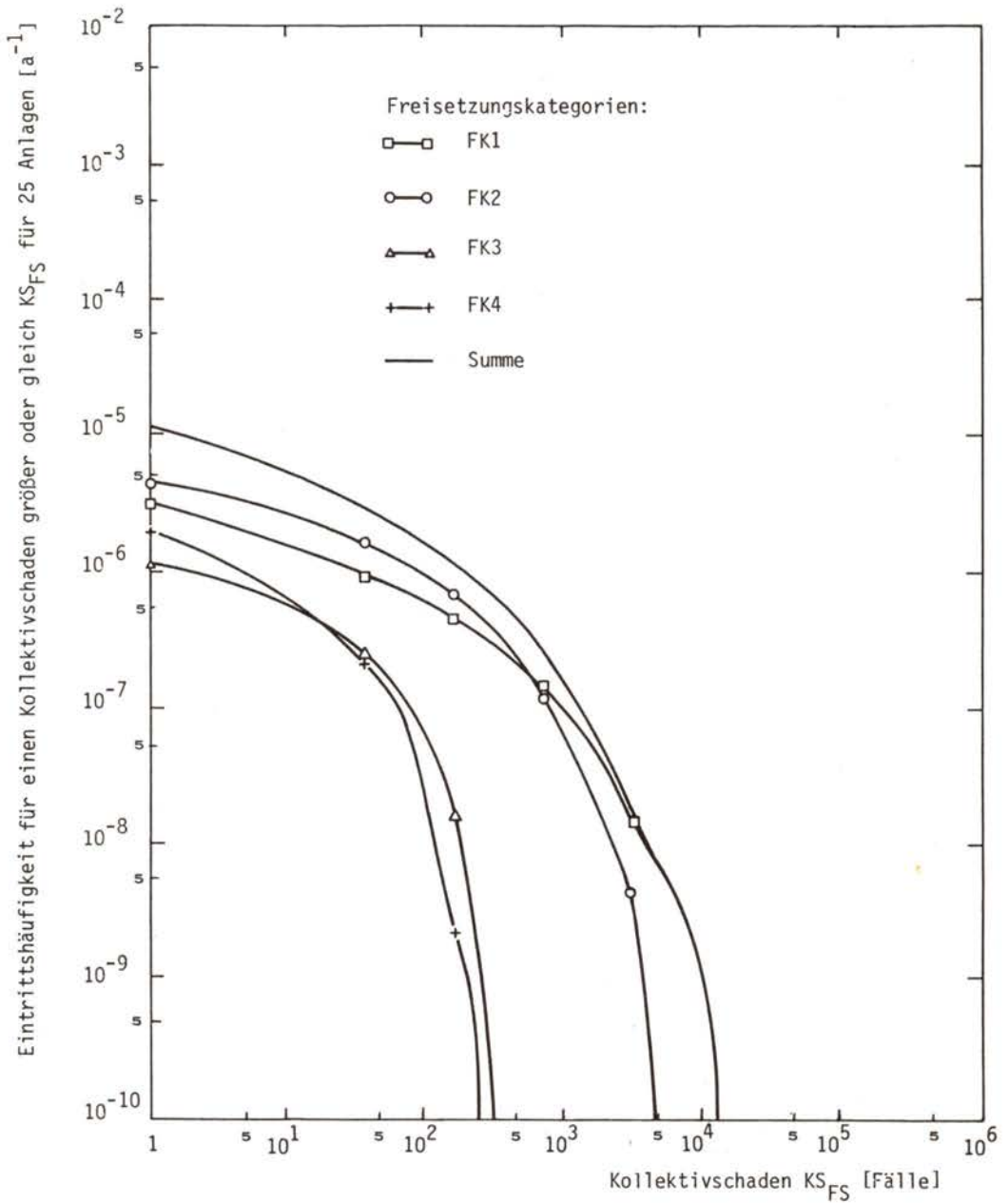


Bild 8-2:

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der Frühschäden, aufgeschlüsselt nach den Freisetzungskategorien (deutsche Dosis/Wirkungs-Beziehung)

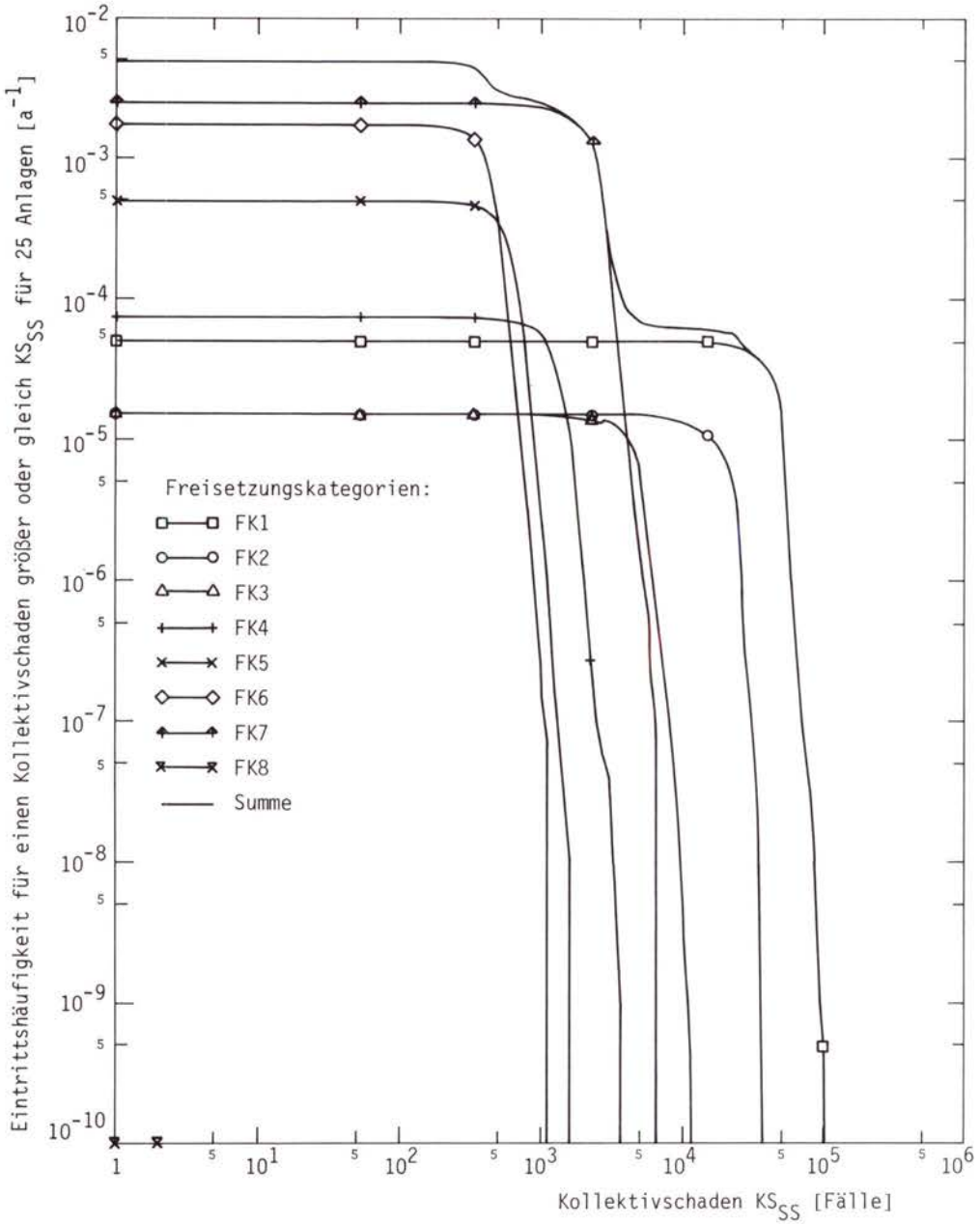


Bild F8, A-2:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen der somatischen Spätschäden, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien

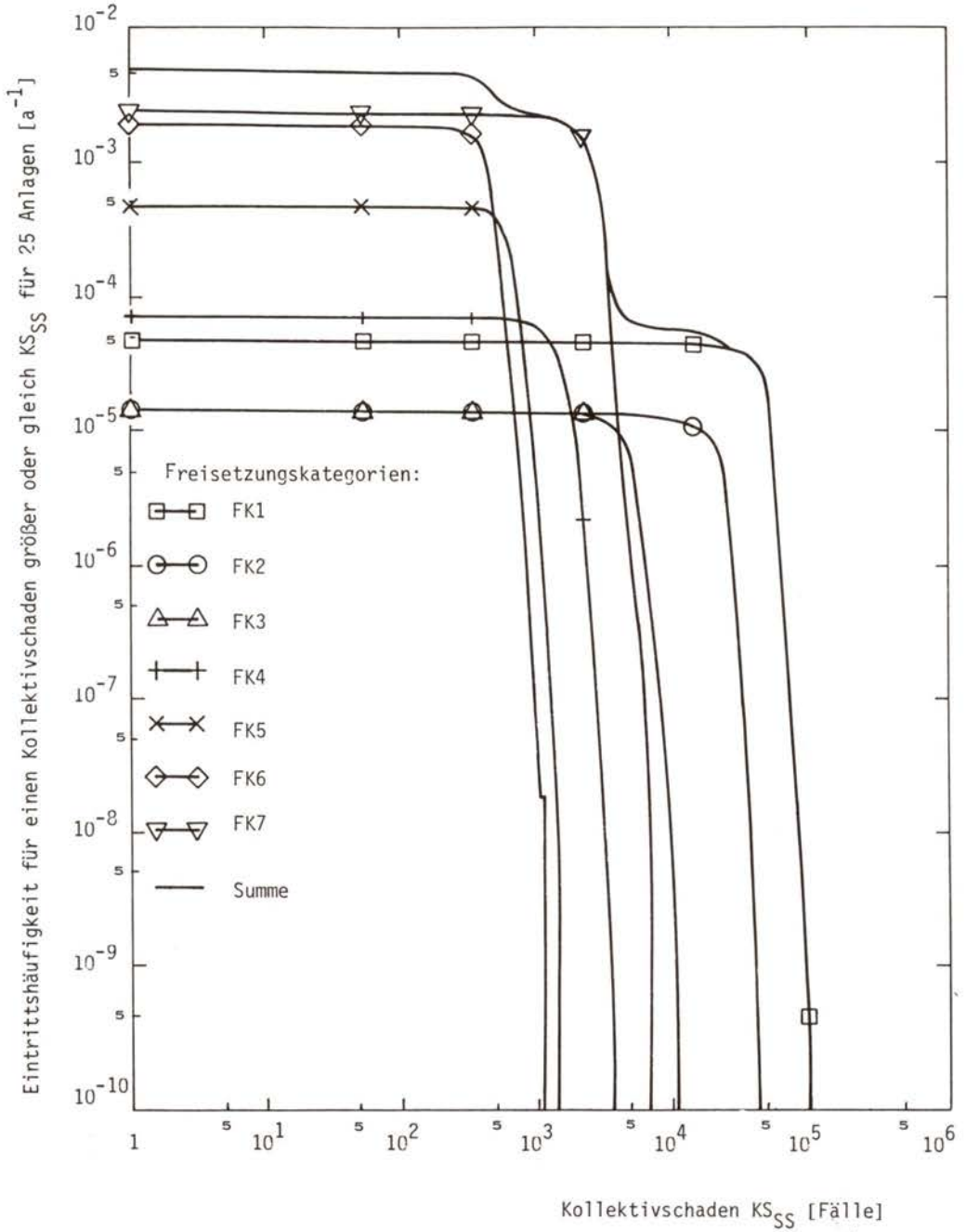


Bild 8-5:

Komplementäre Häufigkeitsverteilungen der somatischen Spätschäden, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien

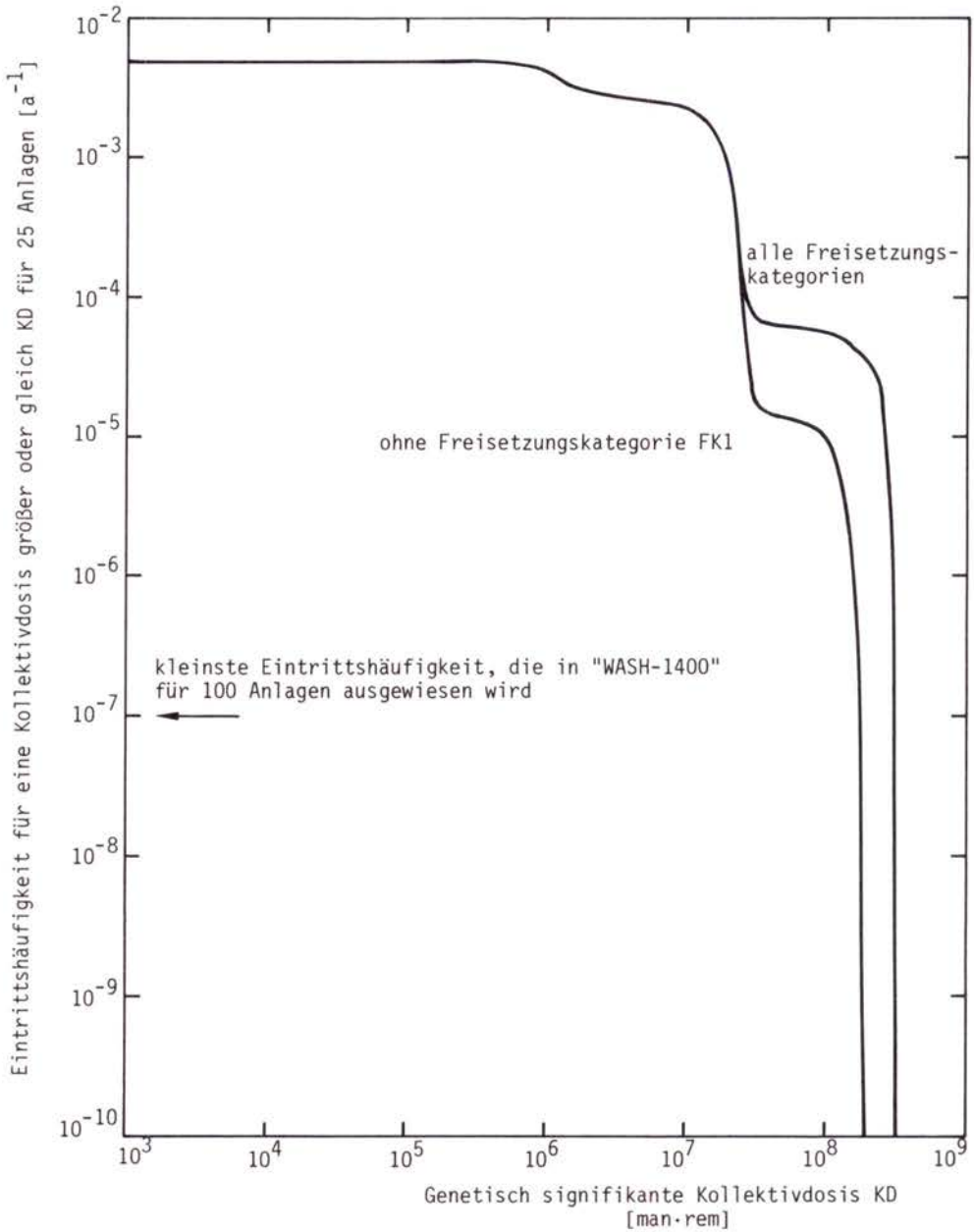


Bild F8, A-3:

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der genetisch signifikanten Kollektivdosis

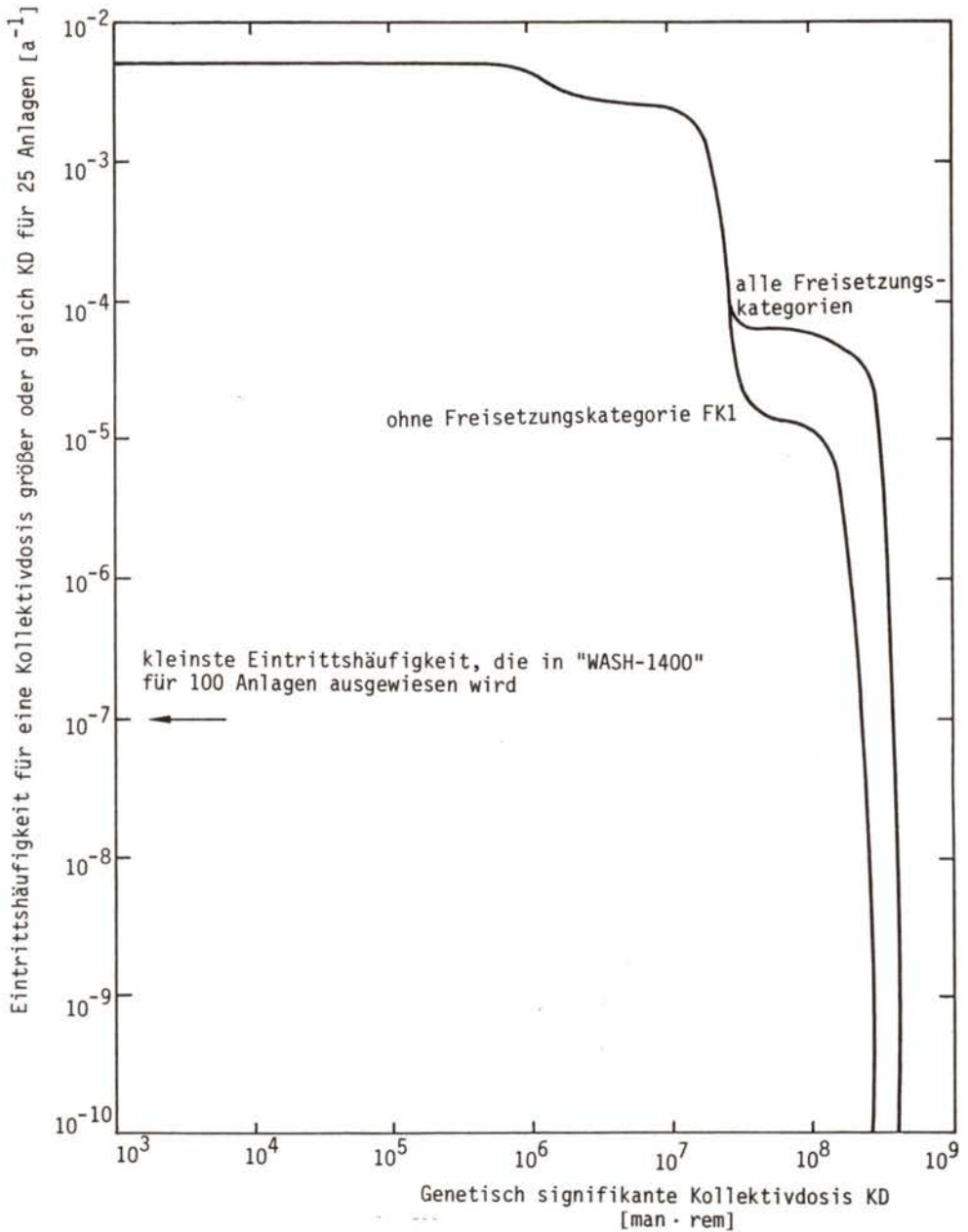


Bild 8-7:

Komplementäre Häufigkeitsverteilung der genetisch signifikanten Kollektivdosis

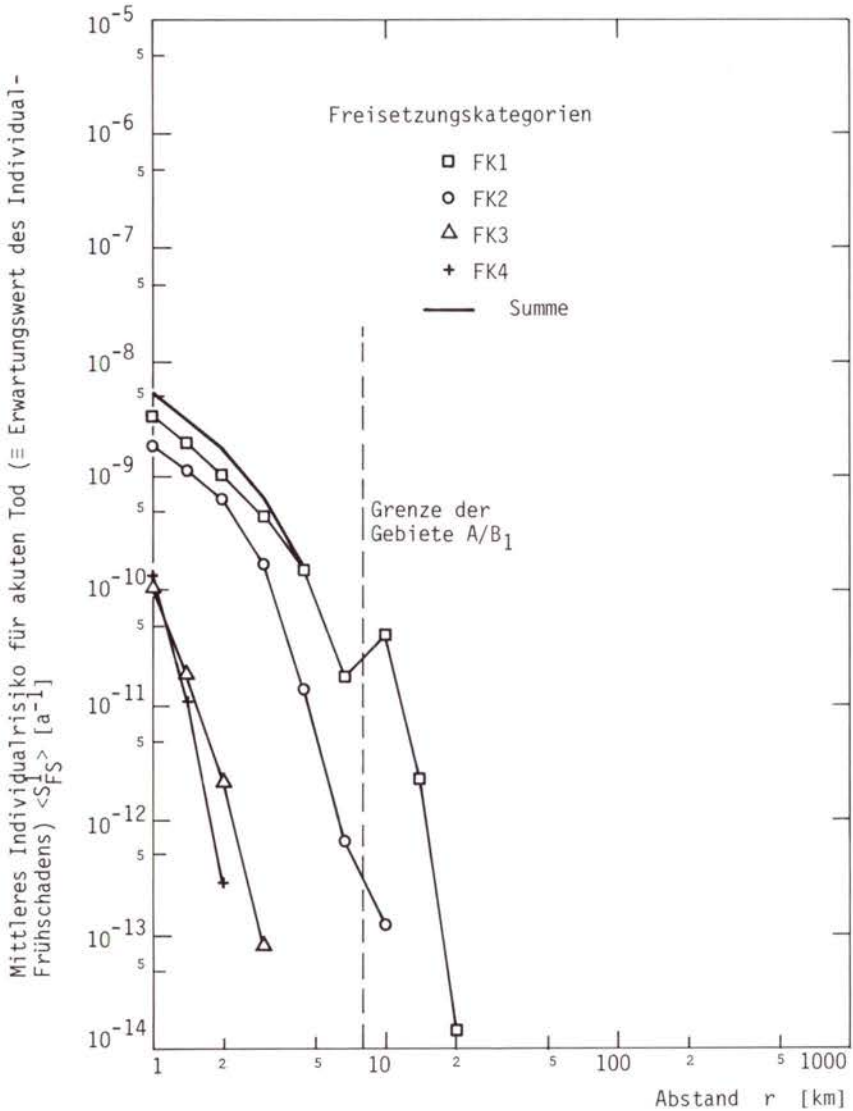


Bild F8, A-4:

Abstandsabhängiges mittleres Individualrisiko für akuten Tod (Erwartungswert von Individual-Frühschäden), normiert auf eine Anlage, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien (deutsche Dosis/Wirkungs-Beziehung)

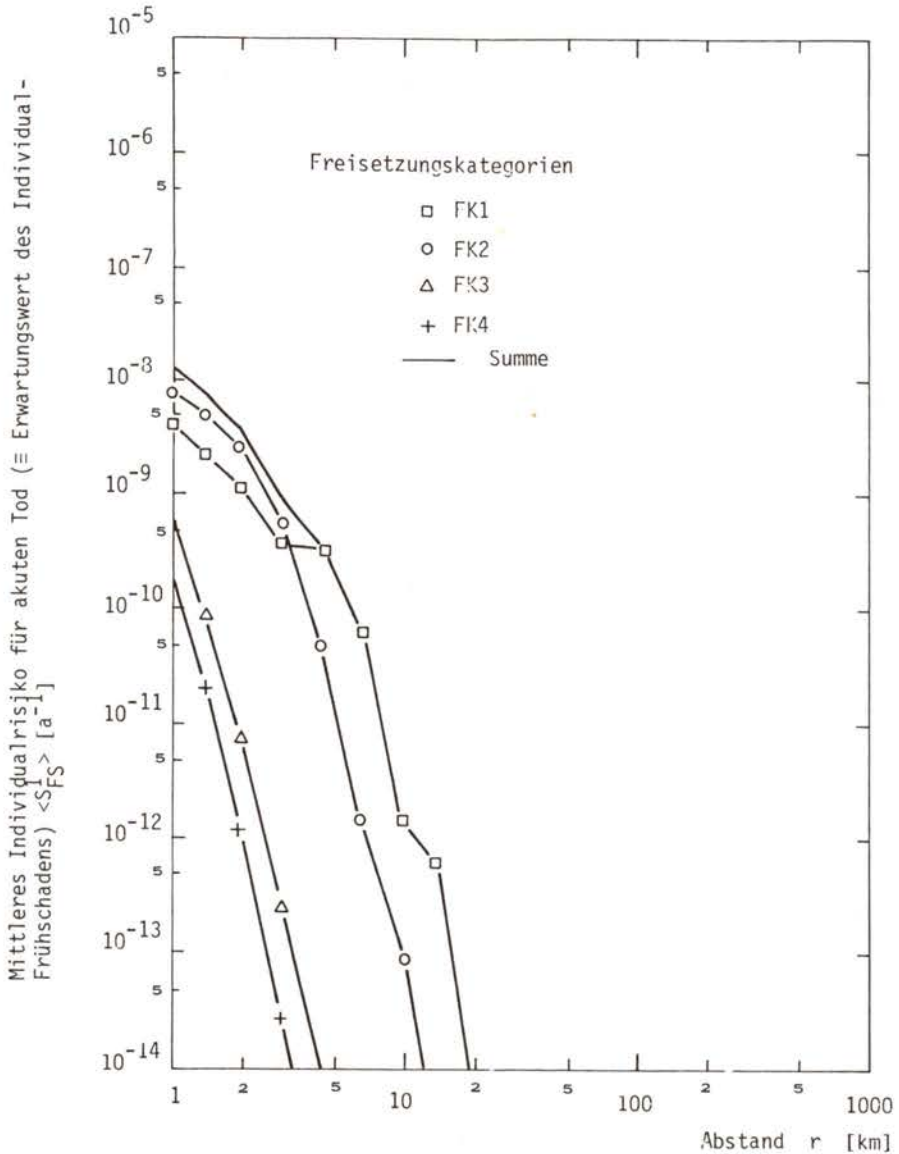


Bild 8-8:

Abstandsabhängiges mittleres Individualrisiko für akuten Tod (Erwartungswert von Individual-Frühschäden), normiert auf eine Anlage, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien (deutsche Dosis/Wirkungs-Beziehung)



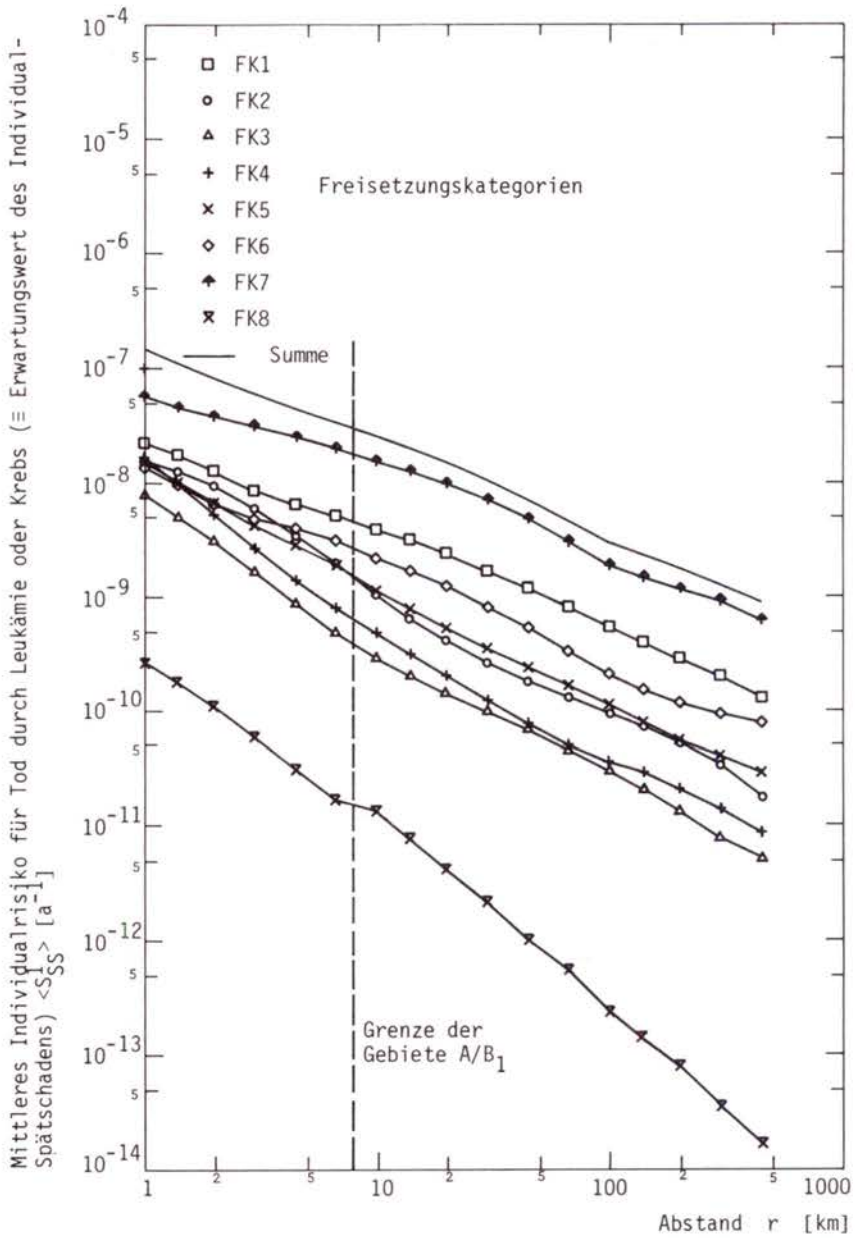


Bild F8, A-5:

Abstandsabhängiges mittleres Individualrisiko für Tod durch Leukämie oder Krebs ( $\equiv$  Erwartungswert von Individual-Spät Schäden), normiert auf eine Anlage, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien

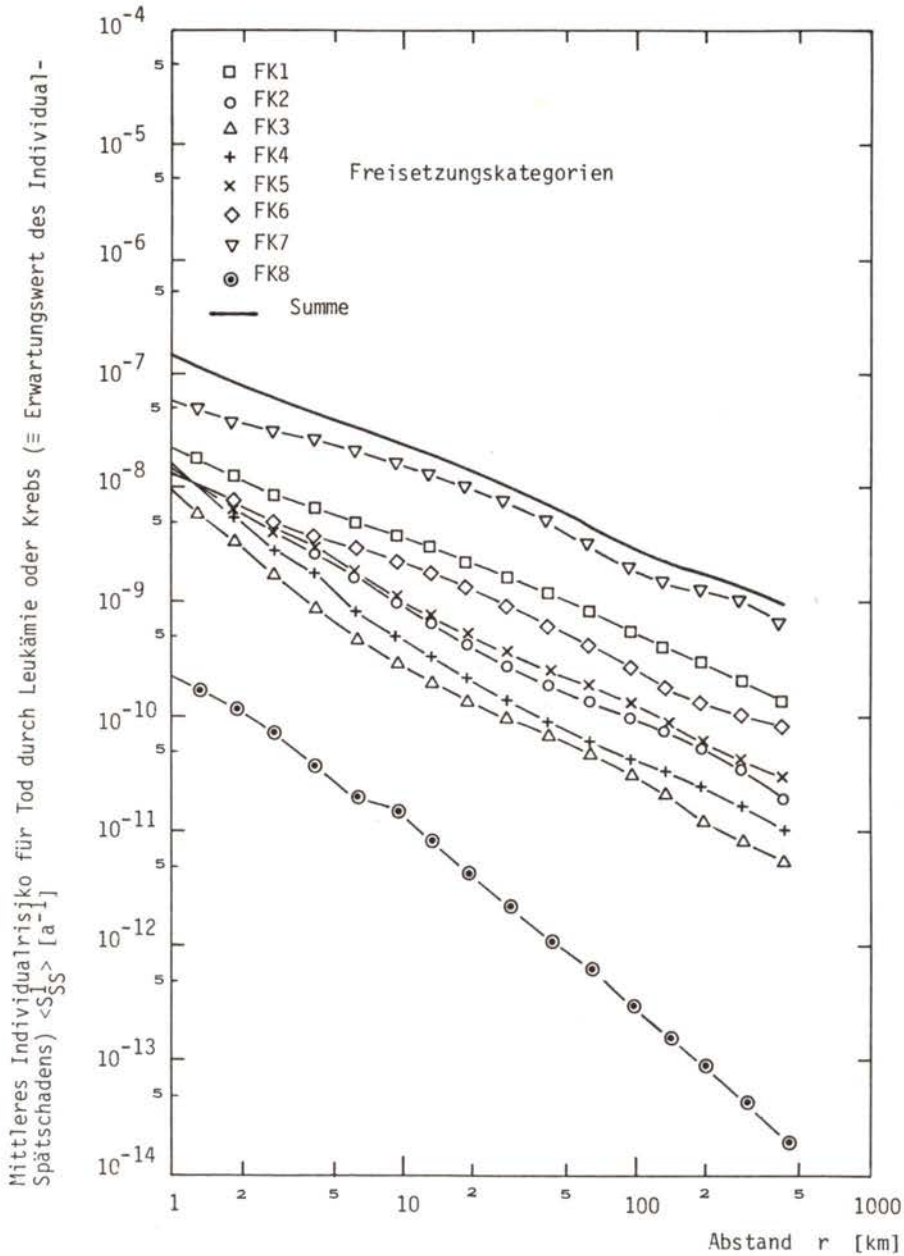


Bild 8-9:

Abstandsabhängiges mittleres Individualrisiko für Tod durch Leukämie oder Krebs ( $\equiv$  Erwartungswert von Individual-Spätsschäden), normiert auf eine Anlage, aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien

Freisetzungskategorie	Deutsche Dosis-Wirkungs-Beziehung (Kurve D)				Amerikanische Dosis-Wirkungs-Beziehung (Kurve B)			
	Wahrscheinlichkeit eines $KS \geq 1$	kleinster Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\min}(a)^2$	größter Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\max}$	mittlerer Kollektivschaden $\overline{KS}(b c)^3$	Wahrscheinlichkeit eines $KS > 0$	kleinster Kollektivschaden $KS_{\min}(a)^2$	größter Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\max}$	mittlerer Kollektivschaden $\overline{KS}(b c)^3$
FK1	4,7 %	0 (95,3 %)	16 600	8 (97 % 3 %)	3,1 %	0 (96,9 %)	15 400	6 (98 % 2 %)
FK2	24,5 %	0 (75,5 %)	5 700	8 (90 % 10 %)	9,3 %	0 (90,7 %)	4 600	3 (93 % 7 %)
FK3	1,1 %	0 (98,9 %)	200	0,1 (94 % 6 %)	0,7 %	0 (99,3 %)	150	0,04(98 % 2 %)
FK4	0,9 %	0 (99,1 %)	50	0,06(97 % 3 %)	0,5 %	0 (99,5 %)	30	0,02(99 % 1 %)
FK5	0 %				0 %			
FK6	0 %				0 %			
FK7	0 %				0 %			
FK8	0 %				0 %			

<sup>1)</sup> Der größte und der kleinste Kollektivschaden ( $KS_{\max}$  und  $KS_{\min}$ ) resultiert aus  $115 \times 36 \times 19 = 78\ 660$  betrachteten Unfallabläufen.

<sup>2)</sup> a % der Ergebnisse führen zum kleinsten Kollektivschaden  $KS_{\min}$ .

<sup>3)</sup> Bei b % der Fälle ist der Kollektivschaden kleiner als  $\overline{KS}$ , bei c % größer als  $\overline{KS}$ .

Alle in dieser Tabelle angegebenen Wahrscheinlichkeiten sind bedingte Wahrscheinlichkeiten, d.h., es wurde eine Freisetzung vorausgesetzt.

Tab. F8, A-1:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilungen für Frühschäden (25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	Deutsche Dosis-Wirkungs-Beziehung (Kurve D)				Amerikanische Dosis-Wirkungs-Beziehung (Kurve B)			
	Wahrscheinlichkeit eines $KS \geq 1$	kleinster Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\min}(a)^2$	größter Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\max}$	mittlerer Kollektivschaden $\overline{KS}(b c)^3$	Wahrscheinlichkeit eines $KS > 0$	kleinster Kollektivschaden $KS_{\min}(a)^2$	größter Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\max}$	mittlerer Kollektivschaden $\overline{KS}(b c)^3$
FK1	7,1 %	0 (92,9 %)	14 500	9,4 (96,5 %   3,5 %)	5,2 %	0 (95,8 %)	12 200	8,2 (97,0 %   3,0 %)
FK2	33,1 %	0 (66,9 %)	5 100	32 (97,9 %   2,1 %)	27,6 %	0 (72,4 %)	4 900	29 (98,0 %   2,0 %)
FK3	8,2 %	0 (91,8 %)	320	2,1 (92,8 %   7,2 %)	6,8 %	0 (93,2 %)	330	1,7 (93,3 %   6,7 %)
FK4	2,8 %	0 (97,2 %)	260	0,4 (97,2 %   2,8 %)	2,3 %	0 (97,7 %)	270	0,3 (97,7 %   2,3 %)
FK5	0 %				0 %			
FK6	0 %				0 %			
FK7	0 %				0 %			
FK8	0 %				0 %			

<sup>1)</sup> Der größte und der kleinste Kollektivschaden ( $KS_{\max}$  und  $KS_{\min}$ ) resultiert aus  $115 \times 36 \times 19 = 78\ 660$  betrachteten Unfallabläufen.

<sup>2)</sup> a % der Ergebnisse führen zum kleinsten Kollektivschaden  $KS_{\min}$ .

<sup>3)</sup> Bei b % der Fälle ist der Kollektivschaden kleiner als  $\overline{KS}$ , bei c % größer als  $\overline{KS}$ .

Alle in dieser Tabelle angegebenen Wahrscheinlichkeiten sind bedingte Wahrscheinlichkeiten, d.h., es wurde eine Freisetzung vorausgesetzt.

#### Tab. 8-2:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilungen für Frühschäden (25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	Eintrittshäufigkeit pro Betriebsjahr [a <sup>-1</sup> ]	Wahrscheinlichkeit von Schäden bei stattgefundener Freisetzung	Eintrittshäufigkeit eines Schadens pro Betriebsjahr [a <sup>-1</sup> ]	Eintrittshäufigkeit eines Schadens bei 25 Anlagen <sup>1)</sup> [a <sup>-1</sup> ]	Mittlerer Schaden bei stattgefundener Freisetzung [Todesfälle]
FK1	$2 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	7,9
FK2	$6 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	7,6
FK3	$6 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$	0,14
FK4	$3 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$6,8 \cdot 10^{-7}$	0,06
FK5	$2 \cdot 10^{-5}$				
FK6	$7 \cdot 10^{-5}$				
Summe	$1 \cdot 10^{-4}$		$2,8 \cdot 10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	

<sup>1)</sup> Beispiel für FK1 bei 25 Anlagen:  $2 \cdot 10^{-6} \cdot 4,7 \cdot 10^{-2} \cdot 25 \text{ a}^{-1} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$

Tab. F8, A-2:

Eintrittshäufigkeit einer Freisetzung, bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Schaden, Schadens-  
eintrittshäufigkeit und mittlerer Schaden für akute Todesfälle bei verschiedenen Freisetzungskategorien

Freisetzungskategorie	Eintrittshäufigkeit pro Betriebsjahr [a <sup>-1</sup> ]	Wahrscheinlichkeit von Schäden bei stattgefunderer Freisetzung	Eintrittshäufigkeit eines Schadens pro Betriebsjahr [a <sup>-1</sup> ]	Eintrittshäufigkeit eines Schadens bei 25 Anlagen <sup>1)</sup> [a <sup>-1</sup> ]	Mittlerer Schaden bei stattgefunderer Freisetzung [Todesfälle]
FK1	$2 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	9,4
FK2	$6 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	32,0
FK3	$6 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	2,1
FK4	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	0,4
FK5	$2 \cdot 10^{-5}$				
FK6	$7 \cdot 10^{-5}$				
Summe	$1 \cdot 10^{-4}$		$4,7 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	

<sup>1)</sup> Beispiel für FK1 bei 25 Anlagen:  $2 \cdot 10^{-6} \cdot 7,1 \cdot 10^{-2} \cdot 25 \text{ a}^{-1} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$

Tab. 8-3:

Eintrittshäufigkeit einer Freisetzung, bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Schaden, Schadens-eintrittshäufigkeit und mittlerer Schaden für akute Todesfälle bei verschiedenen Freisetzungskategorien

Freisetzungskategorie	Kleinsten Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\min}$	Größten Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\max}$	Mittlerer Kollektivschaden $\overline{KS} (b c)^2$
FK1	160	107 800	43 100 (36 %   64 %)
FK2	180	36 600	19 100 (44 %   56 %)
FK3	50	11 500	4 400 (42 %   58 %)
FK4	11	4 000	1 200 (45 %   55 %)
FK5	18	1 600	600 (43 %   57 %)
FK6	8	1 100	400 (42 %   58 %)
FK7	15	6 900	2 200 (45 %   55 %)
FK8	0	< 1	-

<sup>1)</sup> Der größte und der kleinste Kollektivschaden ( $KS_{\max}$  und  $KS_{\min}$ ) resultiert aus  $115 \times 36 \times 19 = 78\,660$  betrachteten Unfallabläufen.

<sup>2)</sup> Bei b % der Fälle ist der Kollektivschaden kleiner als  $\overline{KS}$ , bei c % größer als  $\overline{KS}$ .

Tab. F8, A-3:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilungen der somatischen Spätschäden (25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	Kleinsten Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\min}$	Größter Kollektivschaden <sup>1)</sup> $KS_{\max}$	Mittlerer Kollektivschaden $\bar{KS} (b c)^2$
FK1	3 200	104 000	49 000 (27,7 %   72,3 %)
FK2	1 000	44 000	22 000 (43,5 %   56,5 %)
FK3	160	11 300	5 000 (50,4 %   49,6 %)
FK4	30	3 700	1 600 (51,6 %   48,4 %)
FK5	160	1 500	660 (55,6 %   44,4 %)
FK6	80	1 200	420 (47,2 %   52,8 %)
FK7	130	7 000	2 400 (42,8 %   57,2 %)
FK8	0	< 1	0,02

<sup>1)</sup> Der kleinste und der größte Kollektivschaden ( $KS_{\min}$  und  $KS_{\max}$ ) resultiert aus  $115 \times 36 \times 19 = 78\ 660$  betrachteten Unfallabläufen.

<sup>2)</sup> Bei b % der Fälle ist der Kollektivschaden kleiner als  $\bar{KS}$ , bei c % größer als  $\bar{KS}$ .

Tab. 8-5:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilungen der somatischen Spätschäden (25 Anlagen)



Freisetzungskategorie	% der Todesfälle durch Strahlendosen	
	über 5 rem	unter 5 rem
FK1	84	16
FK2	75	25
FK3	31	69
FK4	7	93
FK5	3	97
FK6	1	99
FK7	10	90

Tab. F8, A-4:

Anteil der Todesfälle durch Krebs und Leukämie, die durch unfallbedingte Ganzkörper-Strahlendosen über bzw. unter 5 rem hervorgerufen werden

Freisetzungskategorie	% der Todesfälle durch Strahlendosen	
	über 5 rem	unter 5 rem
FK1	95	5
FK2	67	33
FK3	33	67
FK4	11	89
FK5	5	95
FK6	2	98
FK7	11	89

Tab. 8-7:

Anteil der Todesfälle durch Krebs und Leukämie, die durch unfallbedingte Ganzkörper-Strahlendosen über bzw. unter 5 rem hervorgerufen werden

Freisetzungskategorie	Kleinste Kollektivdosis $KD_{\min}$	Größte Kollektivdosis $KD_{\max}$	Mittlere Kollektivdosis $\overline{KD} (b c)^1$
	[man·rem]	[man·rem]	[man·rem]
FK1	$0,29 \cdot 10^6$	$344 \cdot 10^6$	$213 \cdot 10^6$ (38 % 62 %)
FK2	$0,45 \cdot 10^6$	$201 \cdot 10^6$	$106 \cdot 10^6$ (44 % 56 %)
FK3	$0,22 \cdot 10^6$	$67 \cdot 10^6$	$25 \cdot 10^6$ (42 % 58 %)
FK4	$0,47 \cdot 10^5$	$23 \cdot 10^6$	$6,9 \cdot 10^6$ (49 % 51 %)
FK5	$0,53 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^6$ (50 % 50 %)
FK6	$0,16 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$ (54 % 46 %)
FK7	$0,88 \cdot 10^5$	$43 \cdot 10^6$	$15,5 \cdot 10^6$ (46 % 54 %)
FK8	2,6	$1,2 \cdot 10^3$	110 (64 % 36 %)

<sup>1)</sup> Bei b % der Fälle ist die Kollektivdosis kleiner als  $\overline{KD}$ , bei c % größer als  $\overline{KD}$ .

Tab. F8, A-5:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilungen der genetisch signifikanten Kollektivdosen (25 Anlagen, alle Generationen)

Freisetzungskategorie	Kleinste Kollektivdosis $KD_{\min}$ [man·rem]	Größte Kollektivdosis $KD_{\max}$ [man·rem]	Mittlere Kollektivdosis $\overline{KD}$ (b c) <sup>1)</sup> [man·rem]
FK1	$20,0 \cdot 10^6$	$420 \cdot 10^6$	$260 \cdot 10^6$ (35,1 %   64,9 %)
FK2	$6,3 \cdot 10^6$	$280 \cdot 10^6$	$140 \cdot 10^6$ (44,1 %   55,9 %)
FK3	$0,6 \cdot 10^6$	$78 \cdot 10^6$	$32 \cdot 10^6$ (49,2 %   50,8 %)
FK4	$0,2 \cdot 10^6$	$23 \cdot 10^6$	$8,2 \cdot 10^6$ (55,5 %   44,5 %)
FK5	$0,3 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^6$ (56,8 %   43,2 %)
FK6	$0,2 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$ (61,5 %   38,5 %)
FK7	$1,0 \cdot 10^6$	$54 \cdot 10^6$	$18 \cdot 10^6$ (50,5 %   49,5 %)
FK8	$< 1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$0,14 \cdot 10^3$

<sup>1)</sup> Bei b % der Fälle ist die Kollektivdosis kleiner als  $\overline{KD}$ , bei c % größer als  $\overline{KD}$

Tab. 8-8:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilungen der genetisch signifikanten Kollektivdosen (25 Anlagen, alle Generationen)

Freisetzungskategorie	Wahrscheinlichkeit für F>0 bzw. P>0	Flächen F [km <sup>2</sup> ]			Personen P [Anzahl]		
		kleinste Fläche F <sub>min</sub>	größte Fläche F <sub>max</sub>	mittlere Fläche F̄	kleinste Personenzahl P <sub>min</sub>	größte Personenzahl P <sub>max</sub>	mittlere Personenzahl P̄ (b c) <sup>1)</sup>
FK1 . . . FK8	100 %		33,3		0	40 100	6 300 (66,5 %   33,5 %)

<sup>1)</sup> Bei b % der Fälle ist die Personenzahl kleiner als  $\bar{P}$ , bei c % größer als  $\bar{P}$ .

Alle in dieser Tabelle angegebenen Wahrscheinlichkeiten sind bedingte Wahrscheinlichkeiten, d.h., es wurde eine Freisetzung vorausgesetzt.

Tab. F8, A-6:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilungen für die von der Gegenmaßnahme "Evakuierung" (Gebiet A) betroffenen Flächen F und Personen P

Freisetzungskategorie	Wahrscheinlichkeit für F>0 bzw. P>0	Flächen F [km <sup>2</sup> ]			Personen P [Anzahl]		
		kleinste Fläche F <sub>min</sub>	größte Fläche F <sub>max</sub>	mittlere Fläche $\bar{F}$	kleinste Personenzahl P <sub>min</sub>	größte Personenzahl P <sub>max</sub>	mittlere Personenzahl $\bar{P}$ (b c) <sup>1)</sup>
FK1 . . . FK8	100 %	33,3			360	42 000	6 800 (ca.60 % ca.40 %)

<sup>1)</sup> Bei b % der Fälle ist die Personenzahl kleiner als  $\bar{P}$ , bei c % größer als  $\bar{P}$ .

Alle in dieser Tabelle angegebenen Wahrscheinlichkeiten sind bedingte Wahrscheinlichkeiten, d.h., es wurde eine Freisetzung vorausgesetzt.

Tab. 8-10:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilungen für die von der Gegenmaßnahme "Evakuierung" (Gebiet A) betroffenen Flächen F und Personen P.

Freisetzungskategorie	Eintrittshäufigkeit pro Jahr der Ausbildung der Gebiete $B_1 + B_2$ für 25 Anlagen	Wahrscheinlichkeit der Ausbildung eines Gebiets $B_1 + B_2$ bei stattgefundenener Freisetzung	Betroffene Fläche F [km <sup>2</sup> ]			Betroffene Personen P [Anzahl]		
			kleinste Fläche	größte Fläche	mittlere Fläche	kleinste Personenzahl	größte Personenzahl	mittlere Personenzahl
			$F_{\min} (a)^1$	$F_{\max}$	$\bar{F} (b c)^2$	$P_{\min} (a)^1$	$P_{\max}$	$\bar{P} (b c)^2$
FK1	$1,8 \cdot 10^{-5}$	35,4 %	0 (64,6 %)	397	18,4 (76,1 %   23,9 %)	0 (65,1 %)	645 000	4 700 (82,2 %   17,8 %)
FK2	$5,7 \cdot 10^{-6}$	38,3 %	0 (61,7 %)	95	6,8 (70,7 %   29,3 %)	0 (62,8 %)	444 000	1 800 (80,5 %   19,5 %)
FK3	$4,2 \cdot 10^{-7}$	2,8 %	0 (97,2 %)	4	0,1 (97,2 %   2,8 %)	0 (97,4 %)	24 400	36 (97,5 %   2,5 %)
FK4	0	0						
FK5	0	0						
FK6	0	0						
FK7	0	0						
FK8	0	0						

<sup>1)</sup> a % der Ereignisse führen zur kleinsten Fläche  $F_{\min}$  bzw. zur kleinsten Personenzahl  $P_{\min}$ .

<sup>2)</sup> Bei b % der Fälle ist die Fläche kleiner als  $\bar{F}$  bzw. die Personenzahl kleiner als  $\bar{P}$ , bei c % größer als  $\bar{F}$  bzw. größer als  $\bar{P}$ .

Tab. F8, A-7:

Charakteristische Größen komplementärer Häufigkeitsverteilung für die von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" (Gebiet  $B_1$  und  $B_2$ ) betroffenen Flächen F und Personen P

Freisetzungskategorie	Eintrittshäufigkeit pro Jahr der Ausbildung der Gebiete B <sub>1</sub> und B <sub>2</sub> für 25 Anlagen	Wahrscheinlichkeit der Ausbildung eines Gebiets B <sub>1</sub> + B <sub>2</sub> bei stattgefundener Freisetzung	Betroffene Flächen F [km <sup>2</sup> ]			Betroffene Personen P [Anzahl]		
			kleinste Fläche	größte Fläche	mittlere Fläche	kleinste Personenzahl	größte Personenzahl	mittlere Personenzahl
			F <sub>min</sub> (a) <sup>1)</sup>	F <sub>max</sub>	$\bar{F}$ (b c) <sup>2)</sup>	P <sub>min</sub> (a) <sup>1)</sup>	P <sub>max</sub>	$\bar{P}$ (b c) <sup>2)</sup>
FK1	$1,9 \cdot 10^{-5}$	37,8 %	0 (62,2 %)	379	20 (80,5 %   19,5 %)	0 (62,2 %)	1 010 000	5 200 (83,7 %   16,3 %)
FK2	$6,2 \cdot 10^{-6}$	41,3 %	0 (58,7 %)	125	7,8 (77,4 %   22,6 %)	0 (58,7 %)	280 000	2 200 (81,2 %   18,8 %)
FK3	$7,2 \cdot 10^{-7}$	4,9 %	0 (95,1 %)	4	0,2 (95,1 %   4,9 %)	0 (95,1 %)	18 500	55 (95,4 %   4,6 %)
FK4	0	0 %						
FK5	0	0 %						
FK6	0	0 %						
FK7	0	0 %						
FK8	0	0 %						

1) a % der Ereignisse führen zur kleinsten Fläche F<sub>min</sub> bzw. zur kleinsten Personenzahl P<sub>min</sub>.

2) Bei b % der Fälle ist die Fläche kleiner als  $\bar{F}$  bzw. die Personenzahl kleiner als  $\bar{P}$ , bei c % größer als  $\bar{F}$  bzw. größer als  $\bar{P}$ .

Tab. 8-11:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilung für die von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" (Gebiete B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub>) betroffenen Flächen F und Personen P



Freisetzungskategorie	Eintrittshäufigkeit pro Jahr der Ausbildung eines Gebiets C für 25 Anlagen	Wahrscheinlichkeit der Ausbildung eines Gebiets C bei stattgefundener Freisetzung	Betroffene Flächen F [km <sup>2</sup> ]			Betroffene Personen P [Anzahl]		
			kleinste Fläche F <sub>min</sub> (a) <sup>1)</sup>	größte Fläche F <sub>max</sub>	mittlere Fläche $\bar{F}(b c)^2$	kleinste Personenzahl P <sub>min</sub> (a) <sup>1)</sup>	größte Personenzahl P <sub>max</sub>	mittlere Personenzahl $\bar{P}(b c)^2$
FK1	$5,0 \cdot 10^{-5}$	99,8 %	12 (0,2 %)	3 780	610 (66,5 % 33,5 %)	0 (<0,1 %)	3 150 000	153 000 (71,9 % 28,1 %)
FK2	$1,5 \cdot 10^{-5}$	99,4 %	12 (0,6 %)	2 070	290 (67,3 % 32,7 %)	0 (<0,1 %)	2 430 000	73 900 (73,5 % 26,5 %)
FK3	$1,5 \cdot 10^{-5}$	99,1 %	1 (0,9 %)	230	27 (66,0 % 34,0 %)	0 (7,3 %)	731 000	6 800 (75,4 % 24,6 %)
FK4	$7,5 \cdot 10^{-5}$	99,9 %	0 (0,1 %)	11	2,3 (65,3 % 34,7 %)	0 (39,5 %)	27 900	460 (79,4 % 20,6 %)
FK5	$3,0 \cdot 10^{-4}$	60,6 %	0 (39,4 %)	2	0,3 (68,5 % 31,5 %)	0 (81,2 %)	6 500	37 (89,5 % 10,5 %)
FK6	$3,3 \cdot 10^{-5}$	1,9 %	0 (98,1 %)	1	0,01(98,1 % 1,9 %)	0 (99,5 %)	2 200	0,5 (99,5 % 0,5 %)
FK7	$2,4 \cdot 10^{-3}$	96,3 %	0 (3,7 %)	49	3,6 (71,2 % 28,8 %)	0 (31,8 %)	146 000	790 (78,3 % 21,7 %)
FK8	0	0						

<sup>1)</sup> a % der Ereignisse führen zur kleinsten Fläche F<sub>min</sub> bzw. zur kleinsten Personenzahl P<sub>min</sub>.

<sup>2)</sup> Bei b % der Fälle ist die Fläche kleiner als  $\bar{F}$  bzw. die Personenzahl kleiner als  $\bar{P}$ , bei c % größer als  $\bar{F}$  bzw. größer als  $\bar{P}$ .

Tab. F8, A-8:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilungen für die von der Gegenmaßnahme "Umsiedlung" (Gebiet C) betroffenen Flächen F und Personen P

Freisetzungskategorie	Eintrittshäufigkeit pro Jahr der Ausbildung eines Gebiets C für 25 Anlagen	Wahrscheinlichkeit der Ausbildung eines Gebiets C bei stattgefundener Freisetzung	Betroffene Flächen F [km <sup>2</sup> ]			Betroffene Personen P [Anzahl]		
			kleinste Fläche	größte Fläche	mittlere Fläche	kleinste Personenzahl	größte Personenzahl	mittlere Personenzahl
			$F_{\min} (a)^1$	$F_{\max}$	$\bar{F} (b c)^2$	$P_{\min} (a)^1$	$P_{\max}$	$\bar{P} (b c)^2$
FK1	$5 \cdot 10^{-5}$	ca. 100 %	0 (<0,1 %)	5 680	680 (65,7 %   34,3 %)	0 (<0,1 %)	2 910 000	180 000 (69,8 %   30,2 %)
FK2	$1,5 \cdot 10^{-5}$	ca. 100 %	0 (<0,1 %)	1 950	340 (65,0 %   35,0 %)	0 (<0,1 %)	2 400 000	90 000 (71,9 %   28,1 %)
FK3	$1,4 \cdot 10^{-5}$	92,9 %	0 (7,1 %)	230	30 (68,2 %   31,8 %)	0 (7,1 %)	660 000	7 600 (76,7 %   23,3 %)
FK4	$4,5 \cdot 10^{-5}$	58,3 %	0 (41,7 %)	13	2,7 (58,0 %   42,0 %)	0 (41,7 %)	36 000	600 (77,3 %   22,7 %)
FK5	$9,3 \cdot 10^{-5}$	18,4 %	0 (81,6 %)	2	0,3 (87,0 %   13,0 %)	0 (81,6 %)	9 100	50 (51,1 %   48,9 %)
FK6	$1,1 \cdot 10^{-5}$	0,6 %	0 (99,4 %)	2	0,01	0 (99,4 %)	7 600	2 (99,4 %   0,6 %)
FK7	$1,7 \cdot 10^{-3}$	66,5 %	0 (33,5 %)	49	4,7 (75,0 %   25,0 %)	0 (33,5 %)	150 000	1 100 (78,4 %   21,6 %)
FK8	0	0 %						

<sup>1)</sup> a % der Ereignisse führen zur kleinsten Fläche  $F_{\min}$  bzw. zur kleinsten Personenzahl  $P_{\min}$ .

<sup>2)</sup> Bei b % der Fälle ist die Fläche kleiner als  $\bar{F}$  bzw. die Personenzahl kleiner als  $\bar{P}$ , bei c % größer als  $\bar{F}$  bzw. größer als  $\bar{P}$ .

Tab. 8-12:

Charakteristische Größen der komplementären Häufigkeitsverteilungen für die von der Gegenmaßnahme "Umsiedlung" (Gebiet C) betroffenen Flächen F und Personen P

Freisetzungskategorie	Kollektivrisiko $\langle KS^{25} \rangle$ [ $a^{-1}$ ]			Erwartungswert der genetisch signifikanten Kollektivdosis $\langle KD^{25} \rangle$ [ $man\ rem\ a^{-1}$ ]
	Frühschäden $\langle KS_{FS}^{25} \rangle$		Somatische Spätschäden $\langle KS_{SS}^{25} \rangle$	
	dt. DWB	am. DWB		
FK1	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	2,2	$1,1 \cdot 10^4$
FK2	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^3$
FK3	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^2$
FK4	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^2$
FK5	0	0	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^3$
FK6	0	0	$7,4 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^3$
FK7	0	0	5,6	$4,0 \cdot 10^4$
FK8	0	0	$4,5 \cdot 10^{-4}$	3,0
Summe	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	9,3	$5,6 \cdot 10^4$
Summe ohne FK1	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	7,1	$4,5 \cdot 10^4$

Tab. F8, A-9:

Kollektivrisiken der gesundheitlichen Schäden und Erwartungswerte der Kollektivdosen für 25 Anlagen

Freisetzungskategorie	Kollektivrisiko $\langle KS^{25} \rangle$ [ $a^{-1}$ ]			Erwartungswert der genetisch signifikanten Kollektivdosis $\langle DK^{25} \rangle$ [ $man\ rem\ a^{-1}$ ]
	Frühschäden $\langle KS_{FS}^{25} \rangle$		Somatische Spätschäden $\langle KS_{SS}^{25} \rangle$	
	dt. DWB	am. DWB		
FK1	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	2,4	$1,3 \cdot 10^4$
FK2	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^3$
FK3	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^2$
FK4	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^2$
FK5	0	0	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^3$
FK6	0	0	$8,4 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^3$
FK7	0	0	6,0	$4,6 \cdot 10^4$
FK8	0	0	$4,8 \cdot 10^{-4}$	3,4
Summe	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$	10,1	$6,6 \cdot 10^4$
Summe ohne FK1	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	7,7	$5,3 \cdot 10^4$

Tab. 8-13:

Kollektivrisiken der gesundheitlichen Schäden und Erwartungswerte der Kollektivdosen für 25 Anlagen

