

**KfK 3562**  
**Juli 1983**

# **Darstellungsformen für individuelle und kollektive Strahlendosen nach unfallbedingten Aktivitätsfreisetzungen**

**J. Ehrhardt, U. Zöller**  
**Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik**  
**Projekt Nukleare Sicherheit**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 3562

Darstellungsformen für individuelle und kollektive  
Strahlendosen nach unfallbedingten Aktivitätsfreisetzungen

J. Ehrhardt, U. Zöllner

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

Darstellungsformen für individuelle und kollektive Strahlendosen  
nach unfallbedingten Aktivitätsfreisetzungen

Kurzfassung:

Die bisher übliche alleinige Darstellung der Endergebnisse von Risikoabschätzungen für kerntechnische Anlagen in Form von Häufigkeitsverteilungen der gesundheitlichen Schäden (Todesfälle) erschwert die Interpretation und angemessene Beurteilung der ausgewiesenen Risiken. Insbesondere erfordern spezielle Aufgabenstellungen Aussagen über die Orts- und Zeitabhängigkeit von Strahlendosen, die beim Individuum und in der Bevölkerung auftreten. Darum wurde die modifizierte Version UFOMOD/B3-DOS des Unfallfolgenmodells erstellt und durch verschiedene Auswerteprogramme zur graphischen und numerischen Analyse erweitert. Besonderer Wert gelegt wurde auf die Darstellung des Zusammenhangs von Häufigkeit, Organdosis und Anzahl von Personen, da die Berechnung der Kollektivdosis in "man·rem" für viele Fragestellungen ungeeignet ist. Eine Systematik der möglichen zwei- und dreidimensionalen Abbildungen erleichtert die Auswahl geeigneter Darstellungsformen im Hinblick auf sachliche und persönliche Kriterien. Beispiele für Häufigkeitsverteilungen werden anhand von Freisetzungskategorien der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke" dargestellt.

Presentations for individual and collective radiation doses after  
accidental releases of radioactivity

Abstract:

The conventional presentation of only the final results of risk assessments in the form of frequency distributions of health detriments (fatalities) impedes the interpretation and adequate judgement of calculated risks. In particular special questions require information on the space- and time-dependency of radiation doses for individuals and for the population as a whole. For this reason the modified version of the accident consequence model UFOMOD/B3-DOS was developed and extended by various additional computer programs for graphical and numerical evaluations. Special emphasis was laid on the functional connection of frequency, organ dose and number of persons affected, since the calculation of the collective dose in "man·rem" is unsuitable for many problems. A systematic scheme of the possible 2- and 3-dimensional graphs facilitates the selection of the appropriate presentation in view of problem-oriented or personal criteria. Examples of frequency-dose diagrams are shown for release categories of the German Risk Study.

## Inhaltsverzeichnis:

1.	Einleitung	1
2.	Kurze Beschreibung der Dosisberechnung im Unfallfolgenmodell	3
2.1	Modell der atmosphärischen Ausbreitung und Ablagerung	4
2.2	Resuspensionsmodell	6
2.3	Modell zur Ermittlung der Strahlenexpo- sition (Dosismodell)	6
2.4	Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen	8
3.	Berechnungsgrundlagen	8
3.1	Individualdosen	8
3.1.1	Dosiswerte, Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten	8
3.1.2	Darstellungsformen	15
3.2	Personenkollektiv und Organdosen	18
3.2.1	Personenzahlen, Dosiswerte, Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten	18
3.2.2	Darstellungsformen	20
4.	Ergebnisse von Dosisberechnungen und ihre exem- plarische Darstellung	23
4.1	Individualdosen	24
4.1.1	Häufigkeitsverteilungen	24
4.1.2	Charakteristische Größen der Häufigkeits- verteilungen	27
4.2	Personenkollektiv und Strahlendosen	28
4.2.1	Dreidimensionale Häufigkeitsverteilungen	28
4.2.2	Charakteristische Größen der dreidimen- sionalen Häufigkeitsverteilungen	29
4.2.3	Höhenliniendarstellung der dreidimen- sionalen Häufigkeitsverteilungen	30
4.2.4	Zweidimensionale Häufigkeitsverteilungen	31
4.2.5	Charakteristische Größen der zweidimen- sionalen Häufigkeitsverteilungen	32
	Literatur	33
	Tabellen	35
	Abbildungen	39

## 1. Einleitung

Die Ergebnisse von Risikostudien für Anlagen des kerntechnischen Kreislaufs wurden bisher nahezu ausschließlich in Form von Häufigkeitsverteilungen und jährlichen Erwartungswerten der gesundheitlichen Schäden (Anzahl der Todesfälle) ausgewiesen. Die alleinige Darstellung der Endergebnisse umfangreicher Unfallfolgenrechnungen erschwert ihre Interpretation und die angemessene Beurteilung der ausgewiesenen Risiken. Die detaillierte Dokumentation auch der Zwischenergebnisse, die an den aufeinanderfolgenden Stufen der Ergebnisfindung bei der Berechnung der radiologischen Folgen von unfallbedingten Aktivitätsfreisetzungen vorliegen, würde dem Leser die Analyse von Risikoabschätzungen erleichtern und damit nicht zuletzt im Hinblick auf das Akzeptanzproblem aufklärend wirken.

Außer diesen mehr generellen Gesichtspunkten erfordern spezielle Aufgabenstellungen häufigkeitsbewertete Aussagen über die Orts- und Zeitabhängigkeit von Aktivitätskonzentrationen und Strahlendosen, die beim Individuum und in der Bevölkerung auftreten. Vor allem zur

- Entwicklung optimaler Notfallschutzkonzepte hinsichtlich administrativer und medizinischer Maßnahmen
- Beurteilung der Risikoabschätzungen hinsichtlich "Safety Goals"
- Entwicklung von Standortbewertungskriterien
- Bewertung von Modellvorstellungen zu den Schutz- und Gegenmaßnahmen

ist es notwendig, den Zusammenhang insbesondere zwischen dem Auftreten von Strahlendosen und den Ergebnissen der Schadensberechnung unter probabilistischen Gesichtspunkten zu quantifizieren. Der hauptsächliche Grund dafür ist, daß bei den o.g. Punkten die auftretenden Strahlendosen und nicht die gesundheitlichen Schäden Grundlage der Probendiskussion sind.

Das Unfallfolgenmodell UFOMOD der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke" erlaubte es in seiner bisherigen zur Risikoabschätzung

gen eingesetzten Version nicht, auch Dosishäufigkeitsverteilungen zu ermitteln, da Strahlendosen als Zwischenergebnis nicht explizit berechnet wurden. Darum wurde die modifizierte Programmversion UFOMOD/B3-DOS entwickelt, die durch Erweiterung mit verschiedenen Auswerteprogrammen zur graphischen und numerischen Analyse und Darstellung eine umfangreiche Dokumentation der häufigkeitsbewerteten Strahlenbelastung für Individuen und Personenkollektive ermöglicht. Dadurch wird der von verschiedenen Seiten erhobenen Forderung nach Detailinformationen über unfallbedingte Organdosen Rechnung getragen.

Im vorliegenden Bericht werden nach einer kurzen Beschreibung des Unfallfolgenmodells im Hinblick auf die Dosisberechnung die mathematischen Grundlagen zur Bestimmung häufigkeitsbewerteter Organdosen für Individuen und Personenkollektive dargestellt. Dabei werden die Rechenvorschriften sowohl zur Ermittlung der verschiedenen Häufigkeitsverteilungen der Dosiswerte als auch zur Berechnung ihrer charakteristischen Größen angegeben.

Die Verknüpfung von Strahlendosen und Personenzahlen erfolgt nicht - wie bisher allgemein üblich - multiplikativ durch Berechnung der Kollektivdosis in "man·rem". Der so definierte Begriff hört auf sinnvoll zu sein, wenn

- keine Linearität der Dosis-Wirkungs-Beziehung vorliegt,
- durch unfallbedingte Freisetzungen eine begrenzte Zahl von Personen stark unterschiedliche Strahlendosen erhält,
- zur Beurteilung medizinischer Maßnahmen die Zuordnung von Personenzahlen und Organdosen notwendig wird,
- kleinste Strahlendosen wesentlich zum Kollektivrisiko beitragen und damit die Problematik der Akzeptanz eine Analyse dieser Risiken durch Aufschlüsselung nach Organdosen und betroffenen Personenzahlen notwendig macht.

Darum werden im vorliegenden Bericht Darstellungsmöglichkeiten zur Veranschaulichung des Zusammenhangs von Häufigkeit, Organdosis und Anzahl von Personen vorgestellt und in bezug auf ihre Aussagefähigkeit untersucht.

Den Dosisberechnungen wurden die Freisetzungskategorien der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke" zugrunde gelegt. Aufgrund der Vielzahl möglicher Darstellungsformen konnte keine umfassende Dokumentation der möglichen Ergebnisse erfolgen; die wichtigsten Arten von Häufigkeitsverteilungen einzelner Organdosen und daraus abgeleitete Zahlenwerte (wie z.B. Mittelwerte, Medianwerte, Perzentilwerte) werden exemplarisch - i.a. am Beispiel der Freisetzungskategorie FK2 - dargestellt. Ziel des Berichts ist es, dem Leser und potentiellen Interessenten anhand dieser Ergebnisse von häufigkeitsbewerteten Dosisberechnungen die Möglichkeiten vor allem der graphischen Darstellung aufzuzeigen, die Auswahl zum eigenen Gebrauch jedoch persönlichen und der jeweiligen Fragestellung angemessenen Gesichtspunkten zu überlassen.

## 2. Kurze Beschreibung der Dosisberechnung im Unfallfolgenmodell

Das Unfallfolgenmodell UFOMOD der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke (DRS)" /1,2,3/ wurde in den Jahren 1977/78 erstellt. Es wurde im Hinblick auf die Abschätzung des Risikos konzipiert, das mit dem Betrieb eines Kollektivs von 25 Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren verbunden ist. Gemäß des danach erteilten Auftrags lehnt es sich in vielen Teilen an das entsprechende Unfallfolgenmodell der amerikanischen "Reactor Safety Study" /4/ an. Mit einer Überarbeitung des vorliegenden Unfallfolgenmodells im Rahmen der Phase B der DRS wurde begonnen; sie dürfte sich noch über ca. 2 Jahre erstrecken. Die vorliegenden Abschätzungen der Strahlenbelastung nach unfallbedingten Aktivitätsfreisetzungen wurden mit einer modifizierten Version des Unfallfolgenmodells UFOMOD/B3 /5/ durchgeführt, die speziell zur Dosisberechnung erstellt wurde.

Seit der ersten Konzeption des Unfallfolgenmodells liegen neuere wissenschaftliche Erkenntnisse vor; von besonderer Bedeutung sind

- neuere Erkenntnisse bezüglich der Deposition von Radionukliden bei trockenen Wettersituationen und bei Niederschlag
- die jüngsten Empfehlungen der "International Commission on Radiation Protection" (ICRP 30) bezüglich des metabolischen Verhaltens der Radionuklide im menschlichen Körper.

Aus diesem Grunde wurden neuere Ablagerungsgeschwindigkeiten und Washout-Koeffizienten sowie neuere Dosisfaktoren berücksichtigt.

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Eigenschaften des Unfallfolgenmodells kurz beschrieben. Auf die im Rechenprogramm UFOMOD/B3 durchgeführten Modifikationen wird im Detail eingegangen. Bei allen nicht speziell angesprochenen Punkten wurden die in der DRS /2/ beschriebenen Modelle und Parameter des Unfallfolgenmodells unverändert übernommen.

## 2.1 Modell der atmosphärischen Ausbreitung und Ablagerung

Die Ausbreitung der freigesetzten Radionuklide in der Atmosphäre wird durch eine spezielle Lösung der Diffusionsgleichung, dem sogenannten Gaußschen Ausbreitungsmodell beschrieben. Bei diesem Modell wird die Konzentrationsverteilung senkrecht zur Transportrichtung durch Gauß-Verteilungen angenähert. Um die Berechnung der Aktivitätskonzentration in einem diskreten Raster zu ermöglichen, wird diese Verteilung in azimuthaler Richtung durch eine 7-stufige Treppenfunktion approximiert (s. Abb. 1). Es wird berücksichtigt, daß i.a. der vertikale Turbulenzaustausch durch eine Sperrschicht begrenzt ist.

Der Aufstieg der Aktivitätsfahne infolge der freigesetzten thermischen Energie und der Einfluß von Gebäuden auf diesen Aufstieg wird ebenfalls in Rechnung gestellt.

Die in die Berechnung der Aktivitätskonzentrationen eingehenden meteorologischen Daten, wie Ausbreitungskategorie, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmenge, werden stündlich gemessenen, realen Wetterläufen angepaßt. Damit ergibt sich ein stündlich sich änderndes Ausbreitungsverhalten. Lediglich die Windrichtung bleibt starr. Wie in der amerikanischen "Reactor Safety Study" /4/ wird angenommen, daß jede Windrichtung gleich wahrscheinlich ist. Die Ablagerung von Radionukliden auf der Erdoberfläche wird bei Regenfällen mit Hilfe von "Washout"-Koeffizienten beschrieben, bei trockenen Wettersituationen erfolgt sie mit Hilfe der Ablagerungsgeschwindigkeit.

Aufgrund wissenschaftlicher Erkenntnisse seit Abschluß der DRS Phase A wurden für Ablagerung und Auswaschung Parameterwerte verwendet, deren Beibehaltung im Rahmen der DRS Phase B vorgesehen ist /6/. Danach betragen die Ablagerungsgeschwindigkeiten (trockene Ablagerung) für elementares Jod  $v_d = 0,01$  m/s und für Aerosole  $v_d = 0,001$  m/s. Der Wert für Aerosole fügt sich gut in den Wertebereich neuerer Untersuchungen ein /7/. Außerdem werden in einem neueren Bericht des englischen National Radiation Protection Boards für den Standort "Sizewell" /8/ für elementares Jod und für Aerosole dieselben Werte wie hier verwendet. Die nasse Ablagerung, charakterisiert durch die "Washout"-Koeffizienten beruht im wesentlichen auf Ergebnissen, die in /9,10/ beschrieben sind:

Niederschlagsintensität (mm/h)	Washout-Koeffizient /s <sup>-1</sup> /	
	elementares Jod	Aerosole
< 1	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
1-3	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$
> 3	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$3,40 \cdot 10^{-4}$

Edelgase werden weder trocken noch naß abgelagert.

## 2.2 Resuspensionsmodell

Der Zusammenhang zwischen der Aktivitätskonzentration am Boden und der Aktivitätskonzentration der Luft aufgrund der Resuspension abgelagerter Radionuklide wird durch den Resuspensionsfaktor  $r(t)$  beschrieben. Sein zeitabhängiges Verhalten wurde an die Vorgänge in humiden Klimazonen (Mitteleuropa) angepaßt /5/:

$$r(t) = r_0 \cdot e^{-\lambda_r \cdot t} + r_e$$

mit

$$r_0 = 10^{-5} \text{ m}^{-1}$$

$$r_e = 10^{-9} \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda_r = 5,1 \text{ a}^{-1} \quad (T_{1/2} = 0,136 \text{ a})$$

Allerdings hat diese Änderung wegen des beim LWR sowieso schon geringen Beitrags dieses Expositionspfades zur Strahlenbelastung /2/ keinen nennenswerten Einfluß auf die Ergebnisse.

## 2.3 Modell zur Ermittlung der Strahlenexposition (Dosismodell)

Die aus den Aktivitätskonzentrationen in der Luft und am Boden resultierende radiologische Belastung wird im Dosismodell in zwei Schritten ermittelt /2/ (s. Abb. 2).

Potentielle Dosen:

Zunächst werden potentielle Dosen berechnet, d.h. Dosen, die Personen bei ununterbrochenem Aufenthalt im Freien bzw. bei ständigem Verzehr von lokal erzeugten Lebensmitteln erhalten würden. An diesen Dosen orientieren sich die Gegenmaßnahmen. Als Entscheidungsgrundlage für Gegenmaßnahmen zur Verringerung der Frühschäden wird die Knochenmarks-Dosis infolge externer Bestrahlung durch die während der ersten 7 Tage am Boden abgelagerte Aktivität berechnet. Als Entscheidungsgrundlage für Gegenmaßnahmen zur Verringerung der somatischen Spätschäden und der genetischen Belastung dienen die Ganzkörper-Dosis infolge externer Bestrah-

lung während der ersten 30 Jahre durch die am Boden abgelagerte Aktivität und die Ganzkörper-, Knochenmark- und Schilddrüsen-Dosis infolge interner Bestrahlung während der ersten 50 Jahre durch die mit den Nahrungsmitteln inkorporierte Aktivität.

Zu erwartende Dosen:

Im zweiten Schritt werden dann die zu erwartenden Dosen berechnet, d.h. jene Dosen, die Personen unter Berücksichtigung der Schutz- und Gegenmaßnahmen erhalten würden. Zur Ermittlung der Frühschäden wird die Kurzzeit-Knochenmarks-Dosis berechnet. Diese setzt sich aus den Beiträgen der externen Bestrahlung durch die Aktivität der Abluftfahne, der externen Bestrahlung innerhalb der ersten 7 Tage durch die am Boden abgelagerte Aktivität sowie der internen Bestrahlung während der ersten 30 Tage durch die mit der Atemluft inkorporierten Aktivität der Abluftfahne zusammen. Zur Ermittlung der somatischen Spätschäden werden die Dosen für folgende "Organe" berechnet: Knochenmark, Knochenoberfläche, Lunge, Schilddrüse, und Ganzkörper (repräsentativ für die Organe Brust und "Restkörper"). Es wird über alle aus der Freisetzung von Radionukliden in die Atmosphäre resultierenden Expositionspfade summiert. Im vorliegenden Bericht werden nur die über 50 a integrierten Strahlendosen /11/, die oben beschriebene frührschadensrelevante Knochenmarkdosis sowie die über 1a integrierte Lungendosis ausgewiesen.

Die Dosisfaktoren des Unfallfolgenmodells der DRS Phase A sind noch die der amerikanischen "Reactor Safety Study" /4/. Aufgrund neuerer Empfehlungen der ICRP /12/ ergeben sich jedoch veränderte Zahlenwerte für die Dosisfaktoren bezüglich inkorporierter Radionuklide.

Um diese neuere Entwicklung zu berücksichtigen wurden Dosisfaktoren für die Expositionspfade "Inhalation" und "Ingestion" aus dem Dosismodell des vom englischen "National Radiation Protection Board" NRPB ausgearbeiteten Unfallfolgenmodells MARC /13,14/ übernommen, in denen die Empfehlungen der ICRP bereits eingearbeitet

sind. Bei den Dosisfaktoren für den Expositionspfad "Inhalation" wurden die Partikelgröße "1 µm" und die chemische Form "Oxid" zugrundegelegt. Eine Dokumentation der erstellten Datensätze befindet sich in /11/.

Im Rahmen der Überarbeitung des Dosismodells wurden auch die Dosisfaktoren für den Expositionspfad "Externe Bestrahlung vom Boden" durch einen neuen Datensatz ersetzt, der auf Arbeiten des "Oak Ridge National Laboratory" ORNL /15/ basiert. Er ist ebenfalls in /11/ angegeben.

## 2.4 Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen

In Anlehnung an vorliegende behördliche Regelungen werden im Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen der DRS folgende Maßnahmen berücksichtigt: Aufsuchen von Häusern, Evakuierung, Umsiedlung, Dekontamination und Einschränkungen beim Verzehr lokal erzeugter landwirtschaftlicher Produkte. Art und Dringlichkeit dieser Schutz- und Gegenmaßnahmen sind von Ort zu Ort verschieden. Dies führt zu einem Schema von Maßnahmen, Gebieten und Zeiten, das in Tab. 1 und Abb. 3 gezeigt wird. Die im vorliegenden Bericht dargestellten Ergebnisse wurden unter Berücksichtigung dieser Schutz- und Gegenmaßnahmen erzielt.

## 3. Berechnungsgrundlagen

### 3.1 Individualdosen

#### 3.1.1 Dosiswerte, Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten

Den möglichen Freisetzungen von Aktivität aus dem Sicherheitsbehälter eines DWR wurden die

8 Freisetzungskategorien

FK1 bis FK8 der DRS /1,2/ zugrunde gelegt. Die Ausbreitungsrechnungen erfolgten - ebenfalls wie in der DRS beschrieben - in jeder der

4 meteorologischen Standortregionen

für jeweils

115 mehrstündige Wetterabläufe.

Daraus ergeben sich für jede Freisetzungskategorie  $4 \times 115 = 460$  verschiedene Wettersituationen. Ihre Wahrscheinlichkeit ist gegeben durch

$$P_{1m} = P_1 \cdot P_m \quad (3.1)$$

mit

$P_1$  Wahrscheinlichkeit eines Wetterablaufs ( $l=1, \dots, 115$ ); da alle Wetterabläufe gleich wahrscheinlich angenommen werden, gilt  $P_1 = 1/115$

$P_m$  Wahrscheinlichkeit einer meteorologischen Standortregion ( $m=1, \dots, 4$ )

Der Wert  $P_m$  berechnet sich aus der Gesamtzahl  $N$  und der jeder einzelnen Region  $m$  zugeordneten Zahl  $N_m$  von Kernkraftwerken:

$$P_m = \frac{N_m}{N} \quad , \quad N = \sum_{m=1}^4 N_m = 25$$

Im Einzelnen gilt:

$P_1 = 0,28$  ("Oberrhein")

$P_2 = 0,16$  ("Süddeutschland")

$P_3 = 0,32$  ("Norddeutschland")

$P_4 = 0,24$  ("Tallage")

Die Berechnung der entfernungsabhängigen Individualdosen erfolgt für Teilflächen mit Aufpunkten des Abstands  $\bar{r}_i$  vom Ort der Freisetzung (s. Abb. 1). Diese Abstände sind repräsentativ für Kreisringe mit den Radien  $r_i$  und  $r_{i+1}$ , die die Teilflächen in radialer Richtung begrenzen. Im Gegensatz zur DRS (18 Radien) wurden durch bessere Auflösung im Nahbereich 20 Kreisringe gewählt (s. Tab. 2), die den Entfernungsbereich bis 540 km abdecken. In azimuthaler Richtung werden die Teilflächen durch Teilstrahlen begrenzt, die von den die Aktivitätskonzentrationsverteilung annähernden 7-stufigen Treppenfunktion ausgehen (s. Abb. 1).

Bei längeren Freisetzungsvorgängen, die durch mehrere einstündige Freisetzungsphasen approximiert werden können, und während derer sich im allgemeinen auch die Wetterbedingungen ändern, wird der beschriebene Vorgang der Teilflächenbildung entsprechend oft wiederholt. Durch Übereinanderlegen der resultierenden Teilflächen werden wegen ihrer voneinander abweichender Begrenzung in azimuthaler Richtung neue, in ihrer Anzahl erhöhte, aber in der Fläche kleinere Teilflächen gebildet. Innerhalb dieser endgültigen Teilflächen wird die vorhandene Aktivitätskonzentration bzw. Strahlendosis als konstant angenommen.

Im Rechenprogramm wird der Winkelsektor  $\Delta\varphi_{j,l,m}(\bar{r}_i)$  jeder Teilfläche  $F_{j,l,m}(\bar{r}_i)$  im Abstand  $\bar{r}_i$  bestimmt. Der für jede Wettersituation  $l$  in der meteorologischen Standortregion  $m$  ermittelte Dosiswert  $D_{j,l,m}(\bar{r}_i)$  tritt somit in der Entfernung  $\bar{r}_i$  mit der Wahrscheinlichkeit

$$P_{j,l,m}(\bar{r}_i) = P_{l,m} \cdot \frac{\Delta\varphi_{j,l,m}(\bar{r}_i)}{360^\circ} \quad (3.2)$$

$$j = 1, \dots, j_{\max} \quad ; \quad i = 1, \dots, 20$$

auf. Die Maximalzahl  $j_{\max}$  azimuthaler Teilflächen hängt ihrerseits von der jeweiligen Wettersituation  $j$ , meteorologischen Standortre-

gion  $m$  und Entfernung  $\bar{r}_i$  ab und wird vom Rechenprogramm für jede mögliche Kombination dieser Parameter berechnet. In Abb. 4 ist an einem Einzelbeispiel mit  $j_{\max} = 11$  die Bedeutung der oben definierten Dosiswahrscheinlichkeit dargestellt. In der Entfernung  $i$  erstreckt sich die Aktivitätsfahne in azimuthaler Richtung über  $j_{\max} = 11$  Teilflächen mit einer "Fahnenbreite"  $\bar{\Phi}_{1,m}(\bar{r}_i)$  von

$$\bar{\Phi}_{\ell,m}(\bar{r}_i) = \sum_{j=1}^{j_{\max}} \Delta\varphi_{j,\ell,m}(\bar{r}_i) \quad (3.3)$$

Innerhalb dieses Winkelsektors  $\bar{\Phi}_{1,m}(\bar{r}_i)$  werden aufgrund der vorhandenen Aktivitätskonzentrationen Individualdosen  $D_{j,1,m}(\bar{r}_i)$  berechnet. In den übrigen Bereichen des Kreisrings zwischen  $r_i$  und  $r_{i+1}$ , der durch den Winkelsektor  $360^\circ - \bar{\Phi}_{1,m}(\bar{r}_i)$  gegeben ist, hat sich die Aktivitätsfahne nicht ausgebreitet, dort sind folglich keine Strahlendosen zu erwarten. Da sich die durch Gl. (3.2) definierte Dosiswahrscheinlichkeit auf den gesamten Kreisring bezieht, schließt sie auch die Wahrscheinlichkeit für diese "Null-dosen" ein, d.h. für das betrachtete Individuum ist die Wahrscheinlichkeit überhaupt strahlenbelastet zu werden

$$P_{\ell,m}(\bar{r}_i) = \sum_{j=1}^{j_{\max}} P_{j,\ell,m}(\bar{r}_i) = P_{\ell,m} \cdot \frac{\bar{\Phi}_{\ell,m}(\bar{r}_i)}{360^\circ} \quad (3.4)$$

Für Individuen, die sich unter der Aktivitätsfahne befinden, gilt die bedingte Dosiswahrscheinlichkeit

$$P_{j,\ell,m}^{\mathcal{F}}(\bar{r}_i) = P_{\ell,m} \cdot \frac{\Delta\varphi_{j,\ell,m}(\bar{r}_i)}{\bar{\Phi}_{\ell,m}(\bar{r}_i)} \quad (3.5)$$

mit der Beziehung

$$P_{j,\ell,m}(\bar{r}_i) = P_{j,\ell,m}^{\mathcal{F}} \cdot \frac{\bar{\Phi}_{\ell,m}(\bar{r}_i)}{360^\circ} \quad (3.6)$$

Typische Werte der "Fahnenbreite" liegen im Bereich von  $25^\circ$  bis  $72^\circ$ .

Die beschriebenen Zusammenhänge zwischen der Individualdosis und ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit nach unfallbedingten Aktivitätsfreisetzungen gilt für alle (spätschadensrelevanten) 50 a-Dosen, wobei nach der DRS Phase A derzeit noch die Organe Ganzkörper, Knochenmark, Lunge, Knochenoberfläche und Schilddrüse berücksichtigt werden. Als Gonadendosis wird zusätzlich die genetisch signifikante Dosis der zum Zeitpunkt der Freisetzung lebenden Personen /11/ berechnet.

Die spätschadensrelevanten Organdosen (50 a) vermitteln Information darüber, welche Dosiswerte in den einzelnen Organen auftreten. Zur Abschätzung der "wirksamen" Dosis, die aufgrund der Strahlenexposition der einzelnen Organe das gesamte Spätschadensrisiko bestimmt, wurde unter Berücksichtigung der entsprechenden Rechenvorschriften die Schadenseintrittswahrscheinlichkeit für Spätschäden  $S_{SS}$  wie folgt ermittelt /2/:

Wegen der linearen Dosis-Risiko-Beziehung besteht die Möglichkeit der numerischen Überschätzung der Schadenseintrittswahrscheinlichkeit ( $s \gg 1!$ ). Darum müssen die jeweils berechneten Zahlenwerte für die Organe OG begrenzt werden:

$$s_{SS}^{OG} = \min \left\{ a^{OG} \cdot D^{OG}, 1 \right\}$$

Dabei bezeichnet  $a^{OG}$  den organspezifischen Dosis-Risiko-Koeffizienten. Aus den so berechneten organabhängigen Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten berechnet sich die gesamte Schadenseintrittswahrscheinlichkeit unter erneutem Ausschluß der Möglichkeit numerischer Überschätzung ( $s \gg 1!$ ) zu

$$S_{SS} = 1 - \prod_{OG} (1 - s_{SS}^{OG})$$

Schließlich ist die Eintrittswahrscheinlichkeit für Frührschäden  $S_{FS}$  wegen des zeitlich früheren Auftretens akuter Todesfälle zu berücksichtigen. Dies führt zur effektiven Eintrittswahrscheinlichkeit  $S_{SS_{eff}}$  für einen Spätschaden:

$$S_{SS_{eff}} = S_{SS} (1 - S_{FS})$$

Andererseits gilt für den gesamten Risikokoeffizienten

$$a = \sum_{OG} a^{OG} = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ rem}^{-1}$$

Die "wirksame" Dosis  $D_{SS}^{WD}$  berechnet sich folglich zu

$$D_{SS}^{WD} = S_{SS_{eff}} / a \quad (3.7)$$

Zusätzlich zu den Organdosen wird dieser Dosiswert als Maß für die spätschadensrelevante Dosis ausgewiesen. Die in seine Berechnung eingehende Schadenseintrittswahrscheinlichkeit für Frühschäden wird aufgrund der Knochenmarksdosis und der Dosis-Wirkungs-Beziehung der DRS ermittelt.

Bei den frühschadensrelevanten Dosen sind zusätzlich die im Schutz- und Gegenmaßnahmenmodell im Nahbereich gemachten wahr-scheinlichkeitsbewerteten Annahmen zu berücksichtigen.

In den Gebieten A ("Evakuierung") und B1/B2 ("schnelle Umsiedlung") wird die Bevölkerung entsprechend ihres Verhaltens während der Anlauf- und Schutzphase in 3 Gruppen NA eingeteilt /2,3/:

NA	Aufenthaltort während der		Relativer Anteil PAUF
	Anlaufphase	Schutzphase	
1	im Freien	im Freien	0.03
2	Mischaufenthalt	kleinere Gebäude	0.32
3	Mischaufenthalt	größere Gebäude, Keller	0.65

In den weiter entfernten Gebieten C ("Umsiedlung") und D<sub>1</sub>/D<sub>2</sub> wird nur Mischaufenthalt angenommen. Jedem Aufenthaltort sind Abschirmfaktoren gegenüber externer Strahlung zugeordnet, welche

die Abschirmwirkung der Bodenrauhigkeit und der Gebäude in bezug auf die Ortsdosis über einer unendlich ausgedehnten ebenen Fläche bzw. bei Strahlung aus der Aktivitätsfahne beschreiben.

Auf die Schutzphase folgt der Zeitraum für das Verlassen der Gebiete. Die benötigte Fahrzeit wird im Gebiet A für alle Personengruppen einheitlich zu 1,5 h angenommen. Im Gebiet B1/B2 erfolgt eine Verteilung auf verschiedene Fahrzeiten, deren Zahlenwerte von der Bevölkerungsdichte BD abhängen (s. Tab. 3). Der relative Anteil der Fahrtgruppe NF an der Gesamtbevölkerung innerhalb des Bereichs NFZ der Bevölkerungsdichte BD (NFZ) ist gegeben durch  $PFD(NF, NFZ) = 0,333$ . Mit diesen Angaben berechnen sich die Wahrscheinlichkeiten  $P_{j,l,m}(\bar{r}_i)$  der fröhschadensrelevanten Organdosen  $D_{j,l,m}(\bar{r}_i; NA, NF, NFZ)$  zu

$$P_{j,l,m}^{FS}(\bar{r}_i; NA, NF, NFZ) = P_{l,m} \cdot \frac{\Delta\varphi_{j,l,m}(\bar{r}_i)}{360^\circ} \cdot PAUF(NA) \cdot PFD(NF, NFZ)/3. \quad (3.8)$$

Dabei wurde vorausgesetzt, daß die 3 Gruppen der Bevölkerungsdichte gleich wahrscheinlich auftreten.

Als fröhschadensrelevante Dosis wurde in der DRS Phase A nur die Knochenmarksdosis berechnet. Zusätzlich wurde die über 1a akkumulierte Lungendosis ermittelt.

Insgesamt liefern also die Unfallfolgenrechnungen für jede Freisetzungskategorie FK die nachstehend aufgeführten Individualdosen:

a) fröhschadensrelevante Dosen (FS)

$$D_{j,l,m}^{OG}(\bar{r}_i; NA, NF, NFZ, FK) \quad (3.9)$$

mit OG = KM (Knochenmark), akkumuliert in 30 d  
und OG = LG (Lunge), akkumuliert in 1a.

b) 50 a-Dosen (SS)

$$D_{j,l,m}^{OG}(\bar{r}_i; FK) \quad (3.10)$$

mit OG = GK (Ganzkörper)

= KM (Knochenmark)

= LG (Lunge)

= KD (Keimdrüsen, genetisch signifikante Dosis)

= KN (Knochenoberfläche)

= SD (Schilddrüse)

= WD ("wirksame" Dosis zur Spätschadensberechnung)

Die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten

$$P_{j,l,m}^{FS}(\bar{r}_i; NA, NF, NFZ) \quad (3.11)$$

$$P_{j,l,m}^{SS}(\bar{r}_i) \quad (3.12)$$

ergeben zusammen mit den Eintrittshäufigkeiten  $f_{FK}$  der Freisetzungskategorien FK1 bis FK8 die Eintrittshäufigkeiten  $h$  der genannten Dosiswerte:

$$h_{j,l,m}^{FS}(\bar{r}_i; NA, NF, NFZ, FK) = P_{j,l,m}^{FS}(\bar{r}_i; NA, NF, NFZ) \cdot f_{FK} \quad (3.13)$$

$$h_{j,l,m}^{SS}(\bar{r}_i; FK) = P_{j,l,m}^{SS}(\bar{r}_i) \cdot f_{FK} \quad (3.14)$$

### 3.1.2 Darstellungsformen

Zur Darstellung und Auswertung der Gesamtzahl von Rechenergebnissen werden die Dosiswerte einzelnen Dosisklassen  $k$  zugeordnet, deren Intervallbreite derart gewählt wurde, daß jede Dekade im logarithmischen Maßstab in 200 gleiche Abschnitte aufgeteilt ist. Die Klassenhäufigkeit  $H(D_k, \Delta D_k)$  der Individualdosis  $D_k$ , die das Dosisintervall

$$D_k - \frac{\Delta D_k}{2} \leq D < D_k + \frac{\Delta D_k}{2} \quad (3.15)$$

repräsentiert, berechnet sich für jede Entfernung  $\bar{r}_i$  und jede Freisetzungskategorie FK zu

$$H^{FS}(D_k, \Delta D_k; \bar{r}_i; FK) = \sum_{j, l, m, NA, NF, NFZ} h_{j, l, m}^{FS}(\bar{r}_i; NA, NF, NFZ; FK) \quad (3.16)$$

bzw.

$$H^{SS}(D_k, \Delta D_k; \bar{r}_i; FK) = \sum_{j, l, m} h_{j, l, m}^{SS}(\bar{r}_i; FK), \quad (3.17)$$

wobei die zugehörigen Dosiswerte die Nebenbedingung (3.14) erfüllen müssen.

Die Klassenhäufigkeitsdichten werden durch Normierung auf die Intervallbreite der Klassen gebildet:

$$\omega(D_k, \Delta D_k; \bar{r}_i; FK) = \frac{H(D_k, \Delta D_k; \bar{r}_i; FK)}{\Delta D_k} \quad (3.18)$$

Die komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilungen berechnen sich nach der Vorschrift

$$W(D_k, \Delta D_k; \bar{r}_i; FK) = \sum_{k'=k}^{\infty} H(D_{k'}, \Delta D_{k'}; \bar{r}_i; FK) \quad (3.19)$$

Sie geben für jeden Dosiswert  $D_k$  die Häufigkeit an, mit der diese Strahlendosis aufgrund der Unfallfolgenrechnungen nach Aktivitätsfreisetzungen der Kategorie FK am Ort  $\bar{r}_i$  erreicht oder überschritten wird.

Zur graphischen Darstellung können die Ergebnisse in Form von dreidimensionalen Häufigkeitsverteilungen, zweidimensionalen Höhenlinien der Häufigkeiten und zweidimensionalen Häufigkeitsverteilungen ausgewiesen werden. In Abb. 5 sind die möglichen Darstellungsformen der Häufigkeitsverteilungen und der daraus ableitbaren charakteristischen Größen dargestellt und mit Kennziffern zur besseren Identifizierung versehen. Freie Parameter sind immer die Organe OG und die Freisetzungskategorien FK, d.h. die 2-dimensionalen Abbildungen können sowohl für ein Wertepaar (OG, FK) als

auch für Kurvenscharen mit OG bzw. FK als Parameter erstellt werden. Die 3-dimensionalen Abbildungen I31 sind jeweils für nur ein Wertepaar (OG, FK) möglich; das gleiche gilt für ihre Höhenliniendarstellungen HI31. Als charakteristische Größen der Häufigkeitsverteilungen können folgende Werte ausgewiesen werden:

- Kenngrößen der Dosen  $D^{CH}$ :

$$D^{CH} = \{ D_{\min}, \bar{D}, D_{\max}, D_{\alpha} \text{ mit } 0\% \leq \alpha \leq 100\% \}$$

wobei  $D_{\min}$  kleinster berechneter Dosiswert  
 $\bar{D}$  mittlerer Dosiswert  
 $D_{\max}$  höchster berechneter Dosiswert  
 $D_{\alpha}$  Perzentilwerte der Dosis

- Kenngrößen der Häufigkeiten  $h^{CH}$ :

$$h^{CH} = h (D \geq D_{GR})$$

Häufigkeit, mit der die Dosiswerte größer sind als ein vorgegebener Grenzwert  $D_{GR}$ .

Außer in graphischer Darstellung können die Ergebnisse auch in Tabellenform angegeben werden. Insbesondere sind von Bedeutung die 50%-Fraktile (Medianwert  $D_{50\%}$ ) und die weiteren Perzentile  $D_{90\%}$ ,  $D_{95\%}$  und  $D_{99\%}$  sowie der Mittelwert  $\bar{D}$ . Er berechnet sich direkt aus den Dosiswerten zu

$$\bar{D}_{SS}^{OG}(\bar{r}_i; FK) = \frac{\sum_{j,e,m} D_{j,e,m}^{OG}(\bar{r}_i; FK) \cdot P_{j,e,m}^{SS}(\bar{r}_i)}{\sum_{j,e,m} P_{j,e,m}^{SS}(\bar{r}_i)} \quad (3.20)$$

Die gleiche Vorschrift gilt - sinngemäß übertragen - auch für die fröhschadensrelevanten Dosen  $D_{FS}^{OG}$ .

Die Perzentile  $D_{\alpha}(\bar{r}_i; FK)$  sind definiert durch

$$F_{FK} \cdot (1 - \alpha) = W(D_{\alpha}(\bar{r}_i; FK), \bar{r}_i; FK) \quad (3.21)$$

also direkt aus der komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilung zu entnehmen.

Entsprechend der derzeitigen Modellierung werden bei Freisetzungskategorien mit einer Freisetzungsphase in der Entfernung  $r_i$  Dosiswerte  $D_{j,1,m}^{OG}(\bar{r}_i; NA, NF, NFZ; FK)$  und  $D_{j,1,m}^{OG}(\bar{r}_i; FK)$  berechnet. Unter Berücksichtigung des Wertebereichs der einzelnen Parameter (Maximalwerte:  $j = 7, l = 115, m = 4, NA = 3, NF = 3, NFZ = 3$ ) ergeben sich  $7 \cdot 115 \cdot 4 = 3220$  50 a-Dosiswerte und  $3220 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 86940$  fröhschadensrelevante Dosiswerte. Bei Freisetzungen mit 2 bis 5 Freisetzungsphasen erhöht sich die Anzahl der Dosiswerte um maximal den Faktor 2 bis 5. So können bei der Kategorie FK2 mit 3 Freisetzungsphasen bis zu 9660 Dosiswerte  $D_{FS}^{OG}$  und 260'820 Dosiswerte  $D_{FS}^{OG}$  in die Verteilungsfunktionen eingehen.

Bei Charakterisierung einer Verteilungsfunktion durch ihren Perzentilwert von z.B.  $D_{90\%}$  bleiben - je nach Freisetzung - zwischen 322 und 966 (SS) bzw. 8694 und 26082 (FS) der höchsten Dosiswerte unberücksichtigt. Diese Dosiswerte entstammen unterschiedlichen Wetterabläufen, da vor allem die Aktivitätskonzentrationen unter der Fahnenachse zu hohen Dosiswerten führen; die Dosiswerte am Rand der Aktivitätsfahne sind bis etwa um den Faktor 17 geringer (s. Abb. 1).

Die charakteristischen Größen der Verteilungen werden auch graphisch als Funktion der Entfernung als zweidimensionale Funktionen dargestellt.

## 3.2 Personenkollektiv und Organdosen

### 3.2.1 Personenzahlen, Dosiswerte, Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten

Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, tritt für jede Wettersituation  $l$  in der meteorologischen Standortregion  $m$  in der Entfernung  $\bar{r}_i$  und dem azimuthalen Winkelsektor  $\Delta\varphi_{j,1,m}(\bar{r}_i)$  der Dosiswert  $D_{j,1,m}(\bar{r}_i)$  mit der Wahrscheinlichkeit  $P_{j,1,m}(\bar{r}_i)$  auf, wobei zwischen fröhschadensrelevanten und 50 a-Dosen zu unterscheiden

ist. Der Entfernungsbereich bis 540 km ist - bis auf die ersten 2 Radian - in 20 Kreisringe mit logarithmisch nahezu äquidistanter Teilung entsprechend der DRS Phase A aufgelöst. Für diese Rasterung liegen für azimutale 10°-Winkelsektoren die Bevölkerungszahlen

$$B_{m,n,j_0}(\bar{r}_i)$$

vor, wobei

$$n = 1, \dots, N_{S,m}$$

Index der Standorte  $N_{S,m}$  in der meteorologischen Zone  $N_m$

$$j_0 = 1, \dots, 36$$

Index des azimutalen 10°-Sektors.

Die Wahrscheinlichkeit, daß diese Personenzahl  $B_{m,n,j_0}(\bar{r}_i)$  die Strahlendosis  $D_{j,1,m}(\bar{r}_i)$  erhält, berechnet sich somit zu

$$P_{j,e,m,n,j_0}^{SS}(\bar{r}_i) = P_{j,e,m}^{SS}(\bar{r}_i) \cdot P_{m,n} \cdot b_{j,j_0,e,m}(\bar{r}_i) \quad (3.22)$$

wobei

$$P_{m,n}$$

Wahrscheinlichkeit des Standorts  $n$  in der meteorologischen Zone  $m$

und

$$b_{j,j_0,1,m}(\bar{r}_i)$$

Anteil des Winkelsektors  $\Delta\varphi_{j,1,m}(\bar{r}_i)$  am 10°-Winkelsektor  $\Delta\varphi_{j_0}$  ( $0 \leq b \leq 1$ ).

Der Zahlenwert von  $P_{m,n}$  hängt ab von der Anzahl der Anlagen  $Z_{m,n}$  am jeweiligen Standort  $N_{S,m}$

$$P_{m,n} = \frac{Z_{m,n}}{\sum_n Z_{m,n}} = \frac{Z_{m,n}}{N_m}$$

Die entsprechenden Relationen gelten für die frühschadensrelevanten Größen. Nach Multiplikation mit den Eintrittshäufigkeiten  $f_{FK}$  der Freisetzungskategorien FK1 bis FK8 ergeben sich analog zu Gl. (3.13) die Eintrittshäufigkeiten  $h_{j,1,m,n,j_0}(\bar{r}_i)$ .

### 3.2.2 Darstellungsformen

Zur Darstellung und Auswertung der gegenüber den Individualdosen (s. Abschnitt 3.1.2) um ein Vielfaches größeren Zahl von Rechen-  
ergebnissen werden sowohl die Dosiswerte als auch die Personenzah-  
len, für die diese Dosiswerte rechnerisch zutreffen, einzelnen  
Klassen  $k$  zugeordnet. Wegen der veränderten Fragestellung ist es  
nicht notwendig, die Klasseneinteilung so fein wie bei den  
Individualdosen zu wählen. Die Dosisklassen  $\Delta D_k$  wurden derart  
gewählt, daß jede Dekade im logarithmischen Maßstab in 4 gleiche  
Abschnitte aufgeteilt ist. Für die Personenklassen  $\Delta B_k$  wurde die  
gleiche Einteilung gewählt.

Für jeden Dosiswert  $D_k$ , der das Dosisintervall

$$D_k - \frac{\Delta D_k}{2} \leq D < D_k + \frac{\Delta D_k}{2}$$

repräsentiert, wird in der Entfernung  $\bar{r}_i$  die Klassenhäufigkeit  
 $H(B_k, \Delta B_k; D_k, \Delta D_k; \bar{r}_i; FK)$  der Personenzahlen  $B$ , die im  
Intervall

$$B_k - \frac{\Delta B_k}{2} \leq B < B_k + \frac{\Delta B_k}{2}$$

liegen, analog zu Gl. (3.16) bzw. (3.17) berechnet zu

$$H(B_k, \Delta B_k; D_k, \Delta D_k; \bar{r}_i; FK) = \sum_{j, l, m, n, j_0} h_{j, l, m, n, j_0}(\bar{r}_i; FK) \quad (3.23)$$

Entsprechend den Gl. (3.18) und (3.19) können hieraus Klassenhäu-  
figkeitsdichten und komplementäre kumulative Häufigkeitsvertei-  
lungen ermittelt werden. Die Beziehung (3.23) gilt folgerichtig ange-  
wandt sowohl für die 50 a Dosen (SS) als auch für die frühscha-  
densrelevanten Dosiswerte (FS).

Die Vielzahl der nach (3.23) berechneten Ergebnisse (Häufigkeits-  
verteilungen für 20 Entfernungen und sämtliche Intervalle der Per-

sonenzahlen und Strahlendosen einzelner Organe) bedarf einer weiteren Reduktion im Sinne einer anwendungsorientierten Kondensierung. Je nach Aufgabenstellung und Interessenlage sind verschiedene Vorgehensweisen denkbar.

a) Summation über die Entfernungsintervalle

Für jeden Dosiswert  $D_k$  wird die Klassenhäufigkeit  $\bar{H}^r(B_k, \Delta B_k; D_k, \Delta D_k; r \leq r_{\max}; FK)$  der Personenzahlen  $B_k$  berechnet, die im Entfernungsbereich

$$0 \leq r \leq r_{\max}$$

aufzutreten:

$$\begin{aligned} \bar{H}^r(B_k, \Delta B_k; D_k, \Delta D_k; r \leq r_{\max}; FK) = \\ \sum_{\bar{r}_i \leq r_{\max}} H(B_k, \Delta B_k; D_k, \Delta D_k; \bar{r}_i; FK) \end{aligned} \quad (3.24)$$

b) Summation über die Dosisintervalle

Für alle Dosiswerte  $D_k \geq D_{GR}$  wird in der Entfernung  $\bar{r}_i$  die Klassenhäufigkeit  $\bar{H}^D(B_k, \Delta B_k; D \geq D_{GR}; \bar{r}_i; FK)$  der Personenzahlen  $B_k$  berechnet:

$$\begin{aligned} \bar{H}^D(B_k, \Delta B_k; D \geq D_{GR}; \bar{r}_i; FK) = \\ \sum_{D_k \geq D_{GR}} H(B_k, \Delta B_k; D_k, \Delta D_k; \bar{r}_i; FK) \end{aligned} \quad (3.25)$$

c) Summation über die Entfernungs- und Dosisintervalle

Für alle Dosiswerte  $D_k \geq D_{GR}$  wird die Klassenhäufigkeit  $\bar{H}(B_k, \Delta B_k; D \geq D_{GR}; r \leq r_{\max}; FK)$  der Personenzahlen  $B_k$  berechnet, die im Entfernungsbereich

$$0 \leq r \leq r_{\max}$$

aufzutreten:

$$\begin{aligned} \bar{H}(B_k, \Delta B_k; D \geq D_{GR}; r \leq r_{\max}; FK) = \\ \sum_{\bar{r}_i \leq r_{\max}} \sum_{D_k \geq D_{GR}} H(B_k, \Delta B_k; D_k, \Delta D_k; \bar{r}_i; FK) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Wie bei den Individualdosen stehen auch für die personenbezogenen Strahlendosen als graphische Darstellungsformen dreidimensionale Häufigkeitsverteilungen, zweidimensionale Höhenlinien der Häufigkeiten und zweidimensionale Häufigkeitsverteilungen zur Verfügung. Die Vielzahl der graphischen Darstellungsmöglichkeiten ist in den Abb. 6a,b schematisch eingezeichnet; zur besseren Identifizierung der einzelnen Häufigkeitsverteilungen und den daraus abgeleiteten charakteristischen Größen sind Kennziffern eingetragen. Wie bei den Individualdosen sind freie Parameter immer die Organe OG und die Freisetzungskategorien FK, d.h. die 2-dimensionalen Abbildungen können sowohl für Einzelwerte als auch als Kurvenscharen dargestellt werden.

Aufgrund der Berechnungsmethode - es werden primär immer Klassenhäufigkeitsverteilungen der Anzahlen von Personen ermittelt, die mit Dosen im Dosisintervall  $D_{k-1} \leq D < D_k$  betroffen sind - sind die 3-dimensionalen Abbildungen zusammengesetzt aus den 2-dimensionalen Verteilungen (z.B. K31 aus K21 für alle Werte von  $\bar{r}_1$ ). Demgemäß sind als charakteristische Größen analog zu Abschnitt 3.1.2 berechenbar:

- Kenngrößen der Personenzahlen  $B^{CH}$ :

$$B^{CH} = \left\{ B_{\min}, \bar{B}, B_{\max}, B_{\alpha} \text{ mit } 0\% \leq \alpha \leq 100\% \right\}$$

- Kenngrößen der Häufigkeiten  $h^{CH}$ :

$$h^{CH} = h (B \geq B_{GR})$$

Häufigkeit, mit der die Personenzahlen größer sind als ein vorgegebener Grenzwert  $B_{GR}$ .

Zusätzlich können außer der graphischen Darstellung die Häufigkeitsverteilungen und ihre charakteristischen Größen in Tabellenform angegeben werden. Die Charakterisierung erfolgt - wie in Abschnitt 3.12 beschrieben - durch Mittelwerte, 50%-Fraktile (Medianwerte) und weitere Perzentilwerte.

Nach Abschnitt 3.1.2 werden entsprechend dem Wertebereich der einzelnen Parameter in jeder Entfernung  $\bar{r}_1$  für jede Freisetzungskategorie

phase und jedes Organ maximal 3220 Individualdosen (integriert über 50 a) und 86940 fröhschadensrelevante Dosiswerte berechnet, wobei 4 unterschiedliche meteorologische Standortregionen berücksichtigt wurden. An jedem Standort treten in der Entfernung  $\bar{r}_i$  pro Freisetzungsphase folglich  $3220/4 = 805$  (SS) bzw.  $86940/4 = 21735$  (FS) Individualdosiswerte auf. Aufgrund der Bevölkerungsverteilung im Umkreis der Standorte und der Möglichkeit von 36 Ausbreitungsrichtungen, die sich aus der azimutalen  $10^\circ$ -Rasterung ergeben, werden jedem dieser Dosiswerte maximal 36 verschiedene Personenzahlen zugeordnet. An jedem Standort sind folglich in jeder Entfernung  $\bar{r}_i$  pro Freisetzungsphase  $805 \cdot 36 = 28'980$  (SS) bzw.  $21735 \cdot 36 = 782460$  (FS) Personenzahl-Dosis-Kombinationen möglich. Unter Einbeziehung aller 19 Standorte erhöhen sich diese Zahlenwerte auf 550620 (SS) und 14'866'740 (FS). Bei der Freisetzungskategorie FK2 mit 3 Freisetzungsphasen werden die Verteilungsfunktionen folglich aus maximal  $1,65 \cdot 10^6$  (SS) bzw.  $4,46 \cdot 10^7$  (FS) Personenzahl-Dosis-Kombinationen ermittelt.

#### 4. Ergebnisse von Dosisberechnungen und ihre exemplarische Darstellung

Die in Abschnitt 3.1.2 und 3.2.2 beschriebenen Darstellungsformen für die Ergebnisse von Dosisberechnungen nach unfallbedingten Aktivitätsfreisetzungen ermöglichen eine Vielzahl unterschiedlicher Abbildungen und Tabellen (siehe Abb. 5 und Abb. 6a,b). Unter Verwendung der Modelle und Voraussetzungen der "Deutschen Risiko-studie Kernkraftwerke" sind sie charakterisiert durch die

Parameter der Unfallfolgenrechnungen

- Freisetzungskategorie FK
- Integrationszeitraum der Organdosen  
(fröhschadensrelevant oder 50 a)
- betrachtetes Organ OG

und den Detailierungsgrad der Ergebnisausweisung hinsichtlich der funktionalen Zusammenhänge von

- Häufigkeit  $h$
- Dosis  $D$
- Anzahl von Personen  $B$
- Entfernung  $r$ .

Unter Berücksichtigung der Möglichkeiten

- 3-dimensionale Darstellung
- Höhenliniendarstellung
- 2-dimensionale Darstellung
- Tabellen

ist eine vollständige Dokumentation aller Ergebnisse im Rahmen dieses Berichts nicht möglich. Hier kann nur anhand von Beispielen aufgezeigt werden, welche Darstellungsformen denkbar und sinnvoll sind und welche Informationen und Aussagen dabei jeweils besonders anschaulich dokumentiert werden. Allerdings wird nicht zuletzt durch die subjektive Beurteilung des Betrachters und seine speziellen Vorstellungen, Neigungen und Ziele eine unterschiedliche Bewertung und Auswahl erfolgen.

Das Ziel des vorliegenden Berichts ist es darum, exemplarisch die derzeitigen Möglichkeiten des Rechenprogramms aufzuzeigen, so daß in späteren Dokumentationen unter dem Gesichtspunkt der Aufgabenstellung die bestgeeignetsten Darstellungsformen ausgewählt werden können. Darum wurden die Unfallfolgenrechnungen - wenn nicht anders vermerkt - nur für die Freisetzungskategorie FK2 der DRS Phase A /2/ durchgeführt.

#### 4.1 Individualdosen

##### 4.1.1 Häufigkeitsverteilungen

Ausgehend von den Rechenergebnissen "Organdosen" und "Häufigkeiten" bieten sich zunächst zweidimensionale Darstellungsformen an. Je nach Wahl der freien Parameter ergeben sich für die fröhschadensrelevanten und 50 a-Organ-dosen die in Abb. 5 mit der Kennzif-

fer I21 bezeichneten Verteilungen. In Abb. 7a-c und Abb. 8a-c sind exemplarisch die Klassenhäufigkeitsdichte, Klassenhäufigkeit und komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der fröhschadensrelevanten Knochenmarksdosis und der 50 a-Ganzkörperdosis für  $\bar{r}_1 = 20$  km dargestellt.

Der Verlauf von Klassenhäufigkeitsdichte und Klassenhäufigkeit zeigt, daß nur in einem begrenzten Bereich Dosiswerte auftreten. Dies gilt generell für alle Ergebnisse unabhängig von der Wahl freier Parameter und ist zurückzuführen auf die Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung. Nach Abb. 1 wird die Gauß'sche Verteilungsfunktion approximiert durch eine Stufenfunktion, die das maximale Konzentrationsverhältnis 17 zwischen Fahnenmitte und Fahnenrand zuläßt. Daraus folgt - in Verbindung mit der endlichen Zahl betrachteter Wetterabläufe und weiterer "mittlerer" Parameterwerte - eine Begrenzung des Bereichs möglicher Dosiswerte.

Die dargestellte Modelleigenschaft wirkt sich allerdings auf die Schadensberechnung und die Aussagefähigkeit der Dosisverteilungen nur unwesentlich aus, da

- i.a. kleinste Strahlendosen bei der Beurteilung von Unfallfolgen-szenarien nicht von Bedeutung sind,
- Strahlendosen kleiner 100 rem nicht in die Fröhschadensberechnung eingehen
- die Spätschäden unter Voraussetzung einer linearen Dosis-Risiko-Beziehung auch unter obigen Modelleigenschaften richtig berechnet werden (evtl. abgesehen von Schutz- und Gegenmaßnahmen, die sich an Dosisgrenzwerten orientieren).

Dosisverteilungen werden i.a. zur Beurteilung der Dosisbereiche herangezogen, die am häufigsten auftreten. Darum ist die Darstellung in Form von Klassenhäufigkeiten der Klassenhäufigkeitsdichte vorzuziehen, da letztere besonders in der logarithmischen Darstellung einen falschen optischen Eindruck von den relevanten Dosisbereichen vermittelt. Wegen des Verlaufs über viele Zehnerpotenzen und der damit dem Betrachter nicht möglichen "linearen" Wich-

tung der Häufigkeiten erfolgt eine Verschiebung der Bedeutung zugunsten kleiner Dosiswerte. In der Klassenhäufigkeit mit äquidistanter Klasseneinteilung im logarithmischen Maßstab gibt der Kurvenverlauf direkt den Beitrag in den jeweiligen Dosisintervallen an, die ja auch vom Betrachter gedanklich für jede Dekade erhöht werden (z.B. interessiert man sich im Dosisbereich 0,1-1 rem für eine Unterteilung in 0,1 rem Schritten; diese "Auflösung" wäre im Dosisbereich von z.B. 100-1000 rem nicht mehr sinnvoll; dort wird dem gleichen Betrachter eine Schrittweite von 100 rem genügen).

Neben der leichteren Interpretierbarkeit hat die Klassenhäufigkeit auch den Vorteil, daß aus ihr direkt die komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung bestimmt und deren Verlauf verstanden werden kann. Nach Abschnitt 3.1.2 ergibt sich die komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung durch Aufsummieren der Häufigkeiten der einzelnen Dosisklassen von hohen Dosiswerten her. Insofern ist die Klassenhäufigkeit das "Differential" der komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilung, was durch Vergleich der Abb. 7b und 7c bzw. 8b und 8c verifizierbar ist. Der "konstante" Verlauf der komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilungen bei niedrigen Dosiswerten resultiert aus der Tatsache, daß dort keine Häufigkeiten berechnet werden bzw. die Häufigkeiten klein sind (logarithmische Skalierung auch der Ordinate!).

Aus den o.g. Gründen werden im Verlauf der noch folgenden Diskussionen von Darstellungsformen die Klassenhäufigkeitsdichten nicht weiter betrachtet, da aufgrund logarithmischer Skalierung falsche optische Eindrücke entstehen könnten, durch die von mit dem mathematischen Hintergrund nicht vertrauten Betrachtern falsche Schlussfolgerungen möglichen wären.

Die Ergebnisdarstellung in Form von Kurvenscharen I21 (OG) und I21 (FK) ist am Beispiel der komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilungen der 50 a-Dosen in der Entfernung  $\bar{r}_1 = 20$  km und

$\bar{r}_1 = 350$  m in Abb. 9a,b für die FK2 bzw. das Organ Ganzkörper veranschaulicht. Hierdurch ist es möglich, die Strahlenbelastung der einzelnen Organe zu beurteilen bzw. die Bedeutung der einzelnen Freisetzungskategorien hinsichtlich der auftretenden Expositionen zu analysieren.

Die Veränderung der Häufigkeitsverteilungen mit zunehmender Entfernung wird anschaulich in der 3-dimensionalen Darstellung I31. Sie entsteht durch Aneinanderfügen der Verteilungen I21 im Abstand der Aufpunkte  $\bar{r}_1$ . Die Abb. 10 zeigt ein typisches Beispiel für die 50 a-Ganzkörperdosis. Die 3-dimensionale Darstellung ist i.a. für die quantitative Auswertung nicht gut geeignet, da "Berge" und "Täler" sich gegenseitig verdecken können und vor allem die Zahlenwertzuweisung der "z-Achse" schwierig ist. Dafür vermittelt sie einen hohen Grad an Anschaulichkeit, da mit einem Blick sämtliche Ergebnisse erfaßbar und qualitativ interpretierbar sind.

#### 4.1.2 Charakteristische Größen der Häufigkeitsverteilungen

Wie in Abschnitt 3.1.2 dargestellt besteht die Möglichkeit, charakteristische Größen der Häufigkeitsverteilungen in den 2-dimensionalen Darstellungsformen I21C1 und I21C2 anzugeben (s. Abb. 5). Für spezielle Fragestellungen genügen z.B. Mittelwerte oder Perzentilwerte der Organdosen zur Beurteilung der Strahlenexposition; auch Wahrscheinlichkeitsangaben zu Dosiswerten, die oberhalb eines Grenzwertes liegen können die Auswertung der Häufigkeitsverteilungen hinsichtlich Einzelproblemen erleichtern.

Die Abb. 11-13 zeigen exemplarisch die Kurvenscharen der Mittelwerte, 95%-Fraktilen und Wahrscheinlichkeiten  $p(D > 5 \text{ rem})$  der 50 a-Ganzkörperdosen als Funktion der Entfernung bei verschiedenen Freisetzungskategorien. Bei der Interpretation der Darstellungen vom Typ I21C2 (entfernungsabhängige Wahrscheinlichkeiten für das Überschreiten von Dosisgrenzwerten) ist zu berücksichtigen,

daß sich die Wahrscheinlichkeit auf ein "mittleres" Individuum bezieht, das sich irgendwo auf einem Kreisring im Abstand  $r$  vom Ort der Freisetzung befindet. Da die Aktivitätsfahne in jedem Abstand eine endliche "Breite" besitzt, die durch den Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  bestimmt wird, schließt die Wahrscheinlichkeit auch die Möglichkeit der "Null Dosen" im Bereich außerhalb der Fahne ein (siehe Abschnitt 3.1.1). Deswegen beginnt der Kurvenverlauf bei Werten  $p < 1$ , die ein Maß für die Fahnenbreite sind. In Abb. 13 ist diese mittlere Fahnenbreite für alle Entfernungen mit eingezeichnet. Sie liegt im Nahbereich bei Werten um 0,11, was einem azimutalen Winkelsektor von etwa  $40^\circ$  entspricht.

## 4.2 Personenkollektiv und Strahlendosen

### 4.2.1 Dreidimensionale Häufigkeitsverteilungen

Bei Berücksichtigung der Bevölkerungsverteilung im Umkreis der Standorte tritt zu den Rechenergebnissen "Organdosen" und "Häufigkeiten" als weitere Information die "Anzahl von Personen", die die entsprechenden Organdosen erhält. Rein rechenstechnisch wird für jede Dosisklasse die Häufigkeitsverteilung dieser Personenzahlen ermittelt. Durch Aneinanderreihen dieser Ergebnisse im Abstand der Dosisklassen ergeben sich die 3-dimensionalen Abbildungen der Form  $K_{31}$  (siehe Abb. 6a). Da als freie Parameter für die fröhschadensrelevanten und 50 a-Dosen Organ, Freisetzungskategorie und Radius wählbar sind, ist eine Vielzahl von Abbildungen möglich. Exemplarisch werden in den Abb. 14 a,b für die FK2 die fröhschadensrelevanten Knochenmarksdosis und die 50 a-Dosis in 3 verschiedenen Entfernungen ( $\bar{r}_i = 2 \text{ km}, 20 \text{ km}, 200 \text{ km}$ ) dargestellt. Die Bilder zeigen deutlich die mit der Entfernung anwachsende Wahrscheinlichkeit, daß nach stattgefundenener Freisetzung große Personenzahlen kleine Strahlendosen erhalten. Im Nahbereich überwiegt dagegen die Wahrscheinlichkeit, daß von den auftretenden Strahlendosen überhaupt keine Personen betroffen sind (bzw. rechnerisch Anzahlen  $0 < B < 1$  im ersten Intervall). Der

optische Eindruck ermöglicht ein schnelles qualitatives Erfassen des Zusammenhangs zwischen Organdosen, Personenzahlen und Eintrittshäufigkeit.

Dieser Gesamteindruck wird verstärkt bei Betrachtung der Darstellungsform K311, in der die Häufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen angegeben ist, die im Entfernungsbereich  $r \leq r_{\max}$  Organdosen innerhalb der jeweiligen Dosisklassen erhalten. Die Abb. 15a, b zeigen die Ergebnisse für die frühschadensrelevante Knochenmarksdosis für  $r_{\max} = 80$  km und die 50 a-Ganzkörperdosis für  $r_{\max} = 540$  km. In beiden Verteilungen ist deutlich zu erkennen, daß die Zunahme der Häufigkeit mit der Personenzahl verbunden ist mit einer deutlichen Abnahme der zugehörigen Dosiswerte. So liegt z.B. das Maximum in Abb. 15b bei Ganzkörperdosiswerten im Bereich von 1-3 rem, die zugehörigen Personenzahlen im Intervall  $3 \cdot 10^6$ - $5 \cdot 10^6$  Personen. Die Kollektivdosis als Produkt aus Anzahl von Personen und Organdosis ("man·rem") wird also überwiegend aufgrund kleinster Strahlendosen berechnet, die eine große Personenzahl erhält. Dies zeigt auch die Darstellungsform K312, in der die entfernungsabhängigen Häufigkeit für die Anzahl von Personen angegeben ist, die Organdosen oberhalb eines bestimmten Wertes  $D_{GR}$  erhalten. Die Abb. 16a,b zeigen die Ergebnisse für die frühschadensrelevante Knochenmarksdosis mit  $D_{GR} = 100$  rem und die 50 a-Ganzkörperdosis mit  $D_{GR} = 5$  rem. Die Häufigkeiten liegen insgesamt sehr viel niedriger als in den Abb. 14a und 15a bzw. 14b und 15b. Bei den Ganzkörperdosen werden - entgegen obigen Ergebnissen - die Häufigkeiten bei großen Personenzahlen bzw. Entfernungen wieder kleiner, d.h. dort treten mit großer Wahrscheinlichkeit Ganzkörperdosen unterhalb 5 rem auf.

#### 4.2.2 Charakteristische Größen der dreidimensionalen Häufigkeitsverteilungen

Nach der Systematik in Abb. 6a sind für die charakteristischen Größen der Häufigkeitsverteilungen K31 die dreidimensionalen

Darstellungsformen K31C1 und K31C2 möglich. Die Abb. 17a,b zeigen exemplarisch die entfernungsabhängige mittlere Anzahl von Personen B mit Organdosen der zugehörigen Dosisklassen. Wegen der starken Zunahme der Personenzahlen mit der Entfernung mußte die logarithmische Teilung der "z-Achse" stark reduziert werden, so daß viele Dekaden überstrichen werden. Dadurch geht die Struktur der Verteilungen in den einzelnen Entfernungen verloren und es entsteht der Eindruck einer "Kastenfunktion".

Anhand dieser Art von Darstellung wird vor allem das - im wesentlichen auf dem quadratischen Abstandsgesetz beruhende - Anwachsen der betroffenen Personenzahlen und der in den jeweiligen Entfernungen berechnete Wertebereich der Organdosen deutlich. Auf eine beispielhafte Darstellung vom Typ K31C2 wurde verzichtet, da der optische Eindruck ähnlich dem der Abb. 17a,b wäre.

#### 4.2.3 Höhenliniendarstellung der dreidimensionalen Häufigkeitsverteilungen

Wie in Abschnitt 3.2.2 und Abb. 6a vermerkt, sind für alle dreidimensionalen Häufigkeitsverteilungen zweidimensionale Höhenliniendarstellungen möglich. Die Abb. 18a,b zeigen dies beispielhaft für in den Abb. 14a,b gezeigte Verteilungen. Die Kurven beschreiben den Verlauf von Isohäufigkeitslinien der Klassenhäufigkeitsverteilung im Personenzahl-Dosis-Diagramm. Der Abstand zweier Höhenlinien gibt den Unterschied in der Klassenhäufigkeit an; die äußerste Kurve beschreibt den Verlauf der Isohäufigkeitslinie mit dem gleichen Zahlenwert (in den Abbildungen jeweils  $5 \cdot 10^{-3}$ , Freisetzung vorausgesetzt). Innerhalb des von der äußersten Höhenlinie umschlossenen Bereichs liegen also all jene Personenklassen, für die in mindestens 50/100 der Unfallfolgesituation Strahlendosen aus den entsprechenden Dosisklassen berechnet werden. Zur quantitativen Interpretation ist darauf zu achten, daß die Klasseneinteilung (in den Beispielen 4 Stützstellen pro Dekade) insofern die Klassenhäufigkeitsverteilung und ihre Höhen-

liniendarstellung beeinflusst, als sich bei Veränderung der Anzahl von Stützstellen die Häufigkeitsangaben in entgegengesetzter Richtung verändern. So bedeutet eine Verdopplung der Klassenzahl ungefähr eine Halbierung der Häufigkeitswerte gegenüber der ursprünglichen Verteilung, da nur noch etwa die Hälfte der Ergebnisse in die neuen Klassen fällt; allerdings gilt dies nur ungefähr, da mit wachsender Klassenzahl die Glättung der Verteilung reduziert bzw. ihr Detaillierungsgrad erhöht wird. Der Einfluß der Klasseneinteilung bei Dosen und Personenzahlen ist in den Abb. 18a,b bei größeren Entfernungen deutlich sichtbar.

Die quantitative Auswertung der Isohäufigkeitslinien ist folglich wegen der Klasseneinteilung mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Sie eignet sich darum - ähnlich wie die dreidimensionale Darstellung - nur zur qualitativen Beurteilung der Hauptbeiträge zu den Häufigkeiten, mit denen Personen Dosiswerte aus den entsprechenden Dosisklassen erhalten. Die gleiche Aussage gilt für die Höhenliniendarstellungen HK311 und HK312; von ihnen ist die Abb. 19 exemplarisch im Vergleich zu der dreidimensionalen Verteilung Abb. 16a wiedergegeben. Der wohl einzige Vorteil der Höhenliniendarstellung ist die bessere Lokalisierung von Maxima bei mehrgipfligen Verteilungen, die sich in der dreidimensionalen Form möglicherweise gegenseitig verdecken. Auch die Zuordnung dieser Bereiche zu Klassen von Personenzahlen und Dosiswerten ist schneller möglich und erleichtert die quantitative Beurteilung der Ergebnisse.

#### 4.2.4 Zweidimensionale Häufigkeitsverteilungen

Die Vielzahl möglicher zweidimensionaler Darstellungsformen (siehe Abb. 6b) macht es notwendig im Hinblick auf gewisse Fragestellungen eine Auswahl zu treffen und exemplarisch darzustellen. Anhand der dreidimensionalen Verteilungen K31, K311 und K312, die aus den zweidimensionalen Verteilungen K21, K211 und K212 zusammengesetzt sind, ist der Verlauf zweidimensionaler Klassenhäufig-

keitsverteilungen der Personenzahlen für die einzelnen Dosisklassen leicht abzuleiten. Eine weitere Kondensation erfolgt durch Kombination der Bedingungen  $r \leq r_{\max}$  und  $D \geq D_{GR}$  von K211 und K212 in der Darstellungsform K213. Zur Veranschaulichung sind in den Abb. 20a-c und 21 beispielhaft die Klassenhäufigkeitsverteilungen der Anzahl von Personen mit Strahlendosen im angegebenen Dosis- und Entfernungsbereich angegeben (K212 und K213). Aus ihnen können quantitativ die Häufigkeiten abgelesen werden, mit denen nach stattgefundener Freisetzung im jeweiligen Abstand von der Anlage Personen mit Strahlendosen oberhalb des Grenzwertes  $D_{GR}$  auftreten. Insofern sind die Darstellungen der Ergebnisse von Dosisberechnungen nach K211, K212 und K213 vor allem zur quantitativen Beurteilung administrativer und medizinischer Schutz- und Gegenmaßnahmen geeignet.

#### 4.2.5 Charakteristische Größen der zweidimensionalen Häufigkeitsverteilungen

Ähnlich wie bei den Häufigkeitsverteilungen sind die Darstellungsformen K21C1 und K21C2 schon in den dreidimensionalen Abbildungen vom Typ K31C1 und K31C2 als Einzelkurven der jeweiligen Dosisklassen enthalten. Verlauf und Aussagefähigkeit kann z.B. Abb. 17a,b entnommen werden. Exemplarisch für die aus K211 und K212 ableitbaren Darstellungsformen für charakteristische Größen (s. Abb. 6b) ist in den Abb. 22a,b und 23a,b die mittlere Anzahl von Personen in Abhängigkeit von der Organdosis im Umkreis bis  $r_{\max}$  (K211C1) und in Abhängigkeit vom Radius für Organdosen  $D \geq D_{GR}$  (K212C1) für den Fall einer stattgefundenen Freisetzung angegeben. Die aus den Häufigkeitsverteilungen K213 ableitbaren charakteristischen Größen können wegen der fehlenden Abhängigkeiten nicht graphisch dargestellt werden. Darum sind in Tab. 4 die mittleren Bevölkerungszahlen für verschiedene Organe als mögliche charakteristische Größe angegeben. Wie schon im Zusammenhang mit den zugrundeliegenden Häufigkeitsverteilungen erwähnt, kann die Dokumentation derartiger Zusammenhänge zur quantitativen Beurteilung von Schutz- und Gegenmaßnahmen hilfreich sein.

Literatur:

- /1/ Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Hauptband  
Verlag TÜV-Rheinland, Köln, 1979
- /2/ Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachband 8  
Verlag TÜV-Rheinland, Köln, 1981
- /3/ M. Schückler, S. Vogt  
UFOMOD - Programm zur Berechnung der radiologischen Folgen  
von Reaktorunfällen im Rahmen von Risikostudien  
Bericht KfK-3092 (1981)
- /4/ US Nuclear Regulatory Commission  
Reactor Safety Study  
Report WASH-1400 (1975)
- /5/ J. Ehrhardt, S. Vogt  
Unfallfolgenrechnungen und Risikoabschätzungen für Druck-  
wasserreaktoren mit dem Rechenprogramm UFOMOD/B3  
Bericht KfK 3373 (1983)
- /6/ W. Hübschmann, S. Vogt, KfK-Karlsruhe  
Private Mitteilung (1982)
- /7/ R. Jonas, K.J. Vogt  
Untersuchungen zur Ermittlung der Ablagerungsgeschwindig-  
keit von Aerosolen auf Vegetation und andere Probenahme-  
flächen  
Bericht Jül-1780 (1982)
- /8/ G.N. Kelly, R.H. Clarke  
An Assessment of the Radiological Consequences of Releases  
from Degraded Core Accidents for the "Sizewell PWR"  
Report NRPB-R137 (1982)
- /9/ H.D. Brenk, K.J. Vogt  
The Calculation of Wet Deposition from Radioactive Plumes  
Nuclear Safety 22, 362-370 (1981)
- /10/ E. Schrödl, H. Urban  
Literaturstudie zum Kurzzeit-Washout-Faktor von Aerosolen  
GRS-Bericht A-609 (1981)
- /11/ J. Ehrhardt  
Dokumentation der Datensätze im Dosismodell des Rechenpro-  
gramms UFOMOD/B3  
Bericht KfK-3390 (1982)
- /12/ ICRP Publication No. 30  
Limits for Intakes of Radionuclides by Workers  
Annals of the ICRP, Vol. 2, No. 2, 1979 (Part 1)  
Annals of the ICRP, Vol. 3, No. 1-4, 1979 (Supplement to  
Part 1)

- /13/ R.H. Clarke, G.N. Kelly  
MARC - The NRRCP Methodology for Assessing Radiological  
Consequences of Accidental Releases of Activity  
Report NRPB-R127 (1981)
- /14/ D. Charles, M.J. Crick, T.P. Fell, J.R. Greenhalgh  
DOSE-MARC: The Dosimetric Module in the Methodology for  
Assessing the Radiological Consequences of Accidental  
Releases  
Report NRPB-M74 (in Vorbereitung)
- /15/ D.C. Kocher  
Dose-Rate Conversion Factors for External Exposure to  
Photon and Electron Radiation from Radionuclides Occuring  
in Routine Releases from Nuclear Fuel Cycle Facilities  
Health Physics 38 (1980) 543-621

Gebiet	Gebietsdefinition		Präventive Maßnahmen (unabhängig von Unfallart und Wetterlage außer Windrichtung)	Dosisabhängige Maßnahmen
	Begrenzung durch Winkel und Entfernungen	Begrenzung durch Linien gleicher potentieller Dosis		
A	$r \leq 2,4 \text{ km}$ $\pm 360^\circ$ sowie $2,4 < r < 8 \text{ km}$ $\alpha \leq \pm 15^\circ$	—	Aufsuchen von Häusern 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 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. [ $2 h_{\text{rel}}$ , $14 h_{\text{abs}}$ ]
B <sub>2</sub>	$r > 24 \text{ km}$	—	—	Normale Tätigkeit. Dann schnelle Umsiedlung nach max. [ $2 h_{\text{rel}}$ , $14 h_{\text{abs}}$ ]
C	—	$D_{\text{EB}}^{\text{GK}}(30a) > 250 \text{ rad}$	—	Normale Tätigkeit. Danach Umsiedlung, beginnend nach 30 d, durchschnittlich ca. $5 \text{ km}^2$ 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. 1 Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen [2\_7]

Nummer $i$	Innerer Radius $r_i$ [km]	Äußerer Radius $r_{i+1}$ [km]	Repräsentativer Radius $\bar{r}_i$ [km]
1	0,0	0,2	0,15
2	0,2	0,5	0,35
3	0,5	0,8	0,65
4	0,8	1,2	1,0
5	1,2	1,6	1,4
6	1,6	2,4	2,0
7	2,4	3,6	3,0
8	3,6	5,4	4,5
9	5,4	8,0	6,7
10	8,0	12,0	10,0
11	12,0	16,0	14,0
12	16,0	24,0	20,0
13	24,0	36,0	30,0
14	36,0	54,0	45,0
15	54,0	80,0	67,0
16	80,0	120,0	100,0
17	120,0	160,0	140,0
18	160,0	240,0	200,0
19	240,0	360,0	300,0
20	360,0	540,0	450,0

Tab. 2: Rasterung der radialen Entfernungen

Bevölkerungs- gruppe NF	Bevölke- rungsanteil PFD	Fahrzeiten bei der schnellen Umsiedlung [ Stunden ]		
1	0,33	0,1	0,3	0,5
2	0,33	0,25	1,25	2
3	0,33	1	4,5	7
Bevölkerungsdichte BD [ Personen/km <sup>2</sup> ]		<100	100-400	>400
Gruppe NFZ		1	2	3

Tab. 3: Fahrzeiten und -gruppen bei der schnellen Umsiedlung

Organ OG	Dosisgrenzwert $D_{GR}$ [rem]	Mittlere Anzahl von Personen $\bar{B}$
KM (FS-relev.)	100	450
LG (1a)	2500	270
GK (50a)	5	2282000
KM (50a)	5	3111000
LG (50a)	15	991400
KN (50a)	30	274200
SK (50a)	15	3131000
WD (50a)	5	3115000

$r_{max} = 80$  km bei KM (FS-relev.) und LG (1a)

$r_{max} = 540$  km bei den 50a-Dosen

Tab. 4: Mittlere Anzahl von Personen mit Organdosen  $D > D_{GR}$  im Entfernungsbereich  $r \leq r_{max}$  nach stattgefunderer Freisetzung der Kategorie FK2

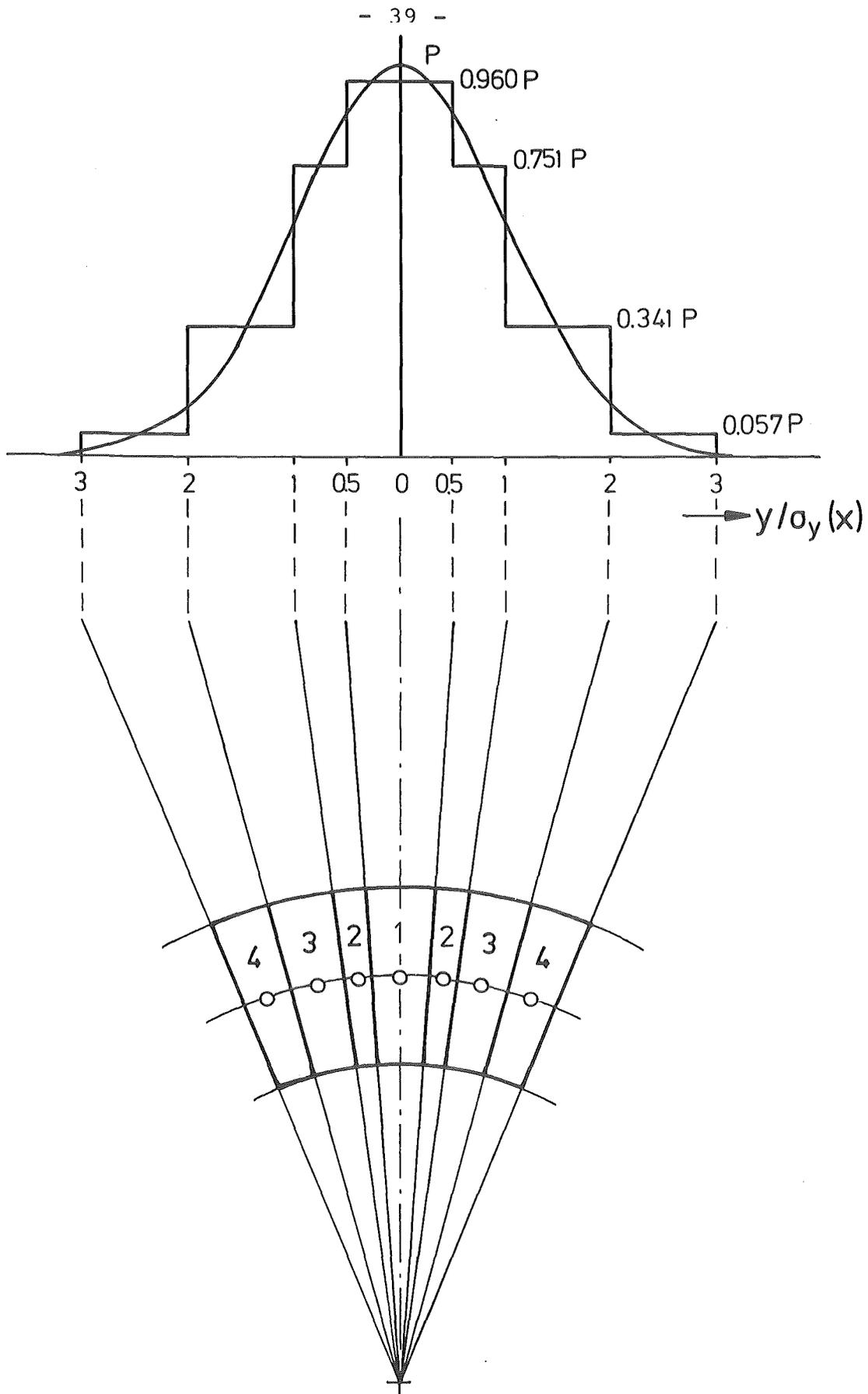


Abb. 1 Schematische Darstellung der Konstruktion repräsentativer Kreisringsektoren

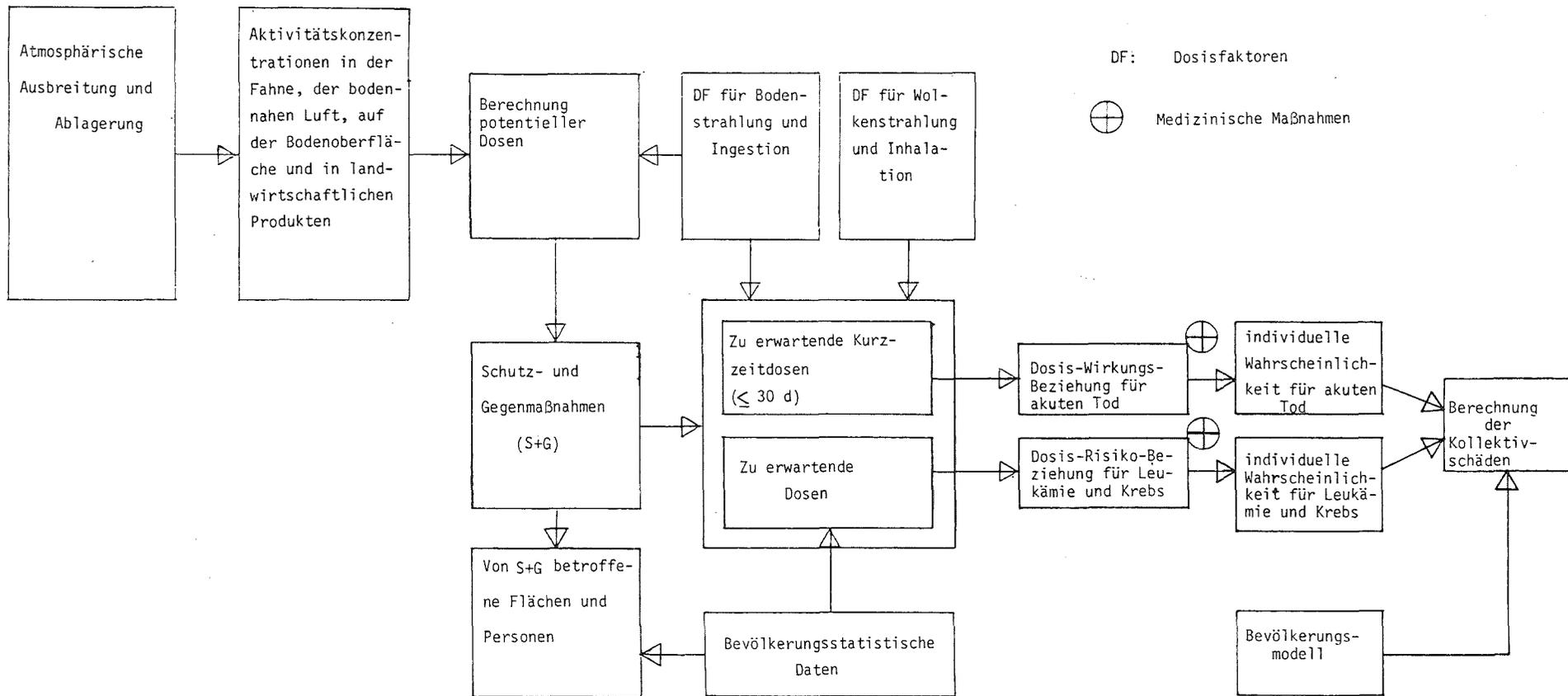
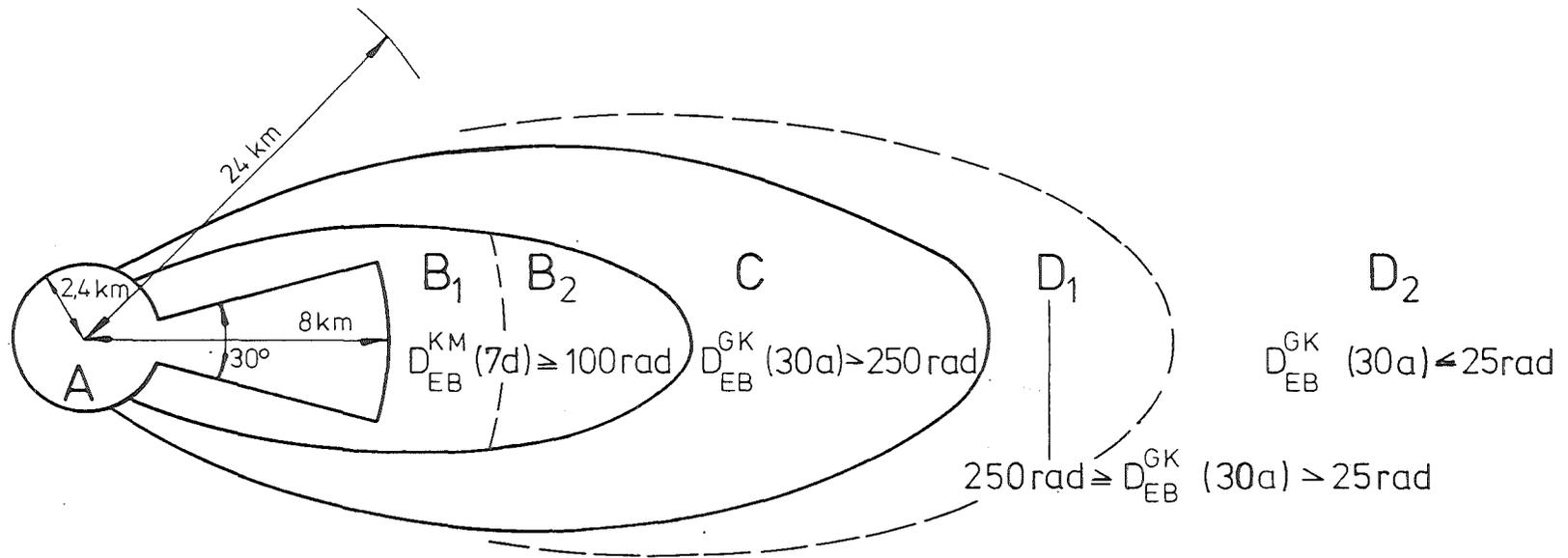


Abb. 2 Dosis- und Schadensmodell (DRS, Phase A)



$D_{EB}^{KM} (7d)$  = potentielle Knochenmarkdosis (KM) durch externe Bestrahlung vom Boden (EB),  
akkumuliert in 7 Tagen

$D_{EB}^{GK} (30a)$  = potentielle Ganzkörperdosis (GK) durch externe Bestrahlung vom Boden (EB),  
akkumuliert in 30 Jahren

Abb. 3 Gebiete der Schutz- und Gegenmaßnahmen (schematisch) /2/

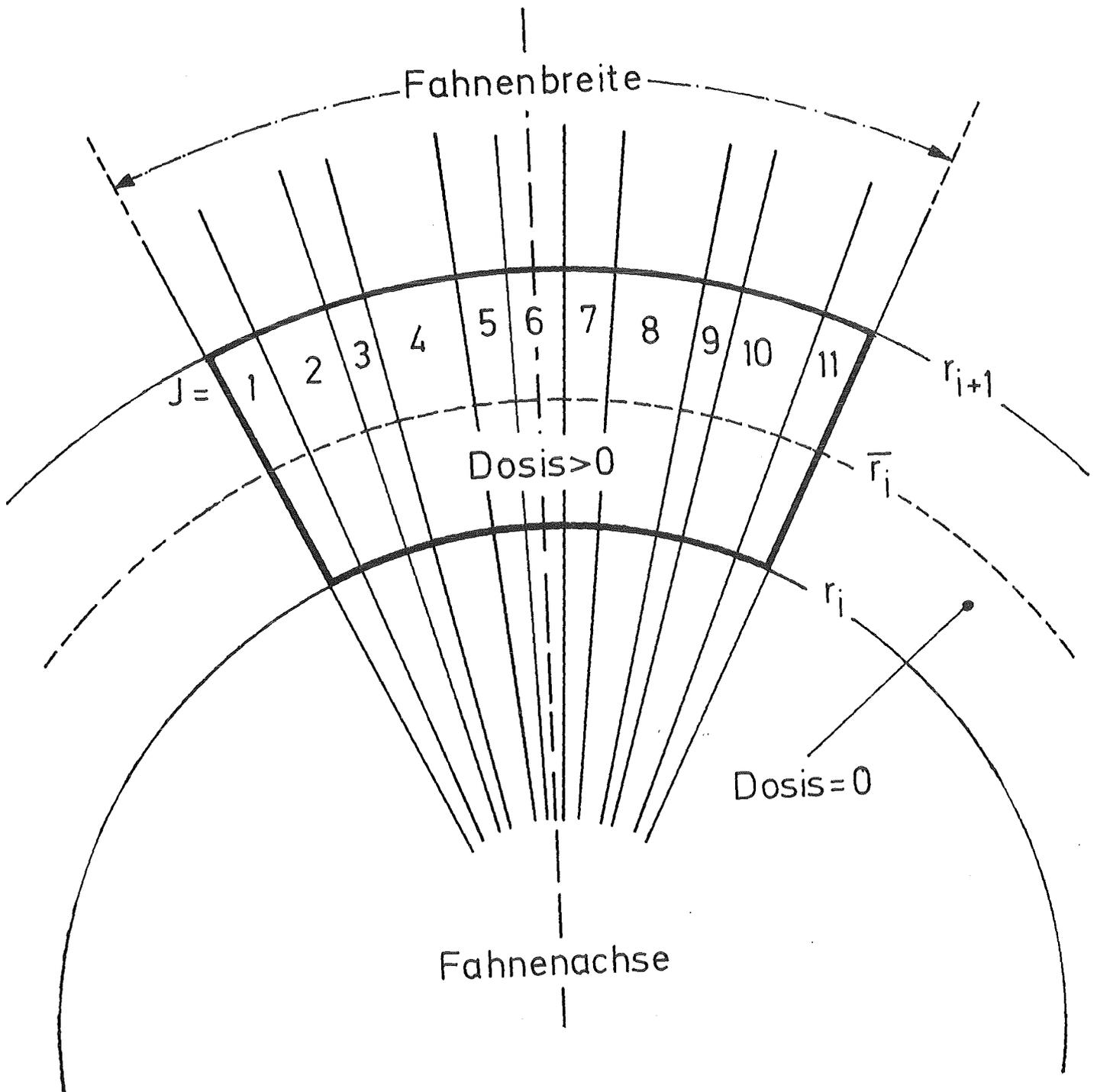
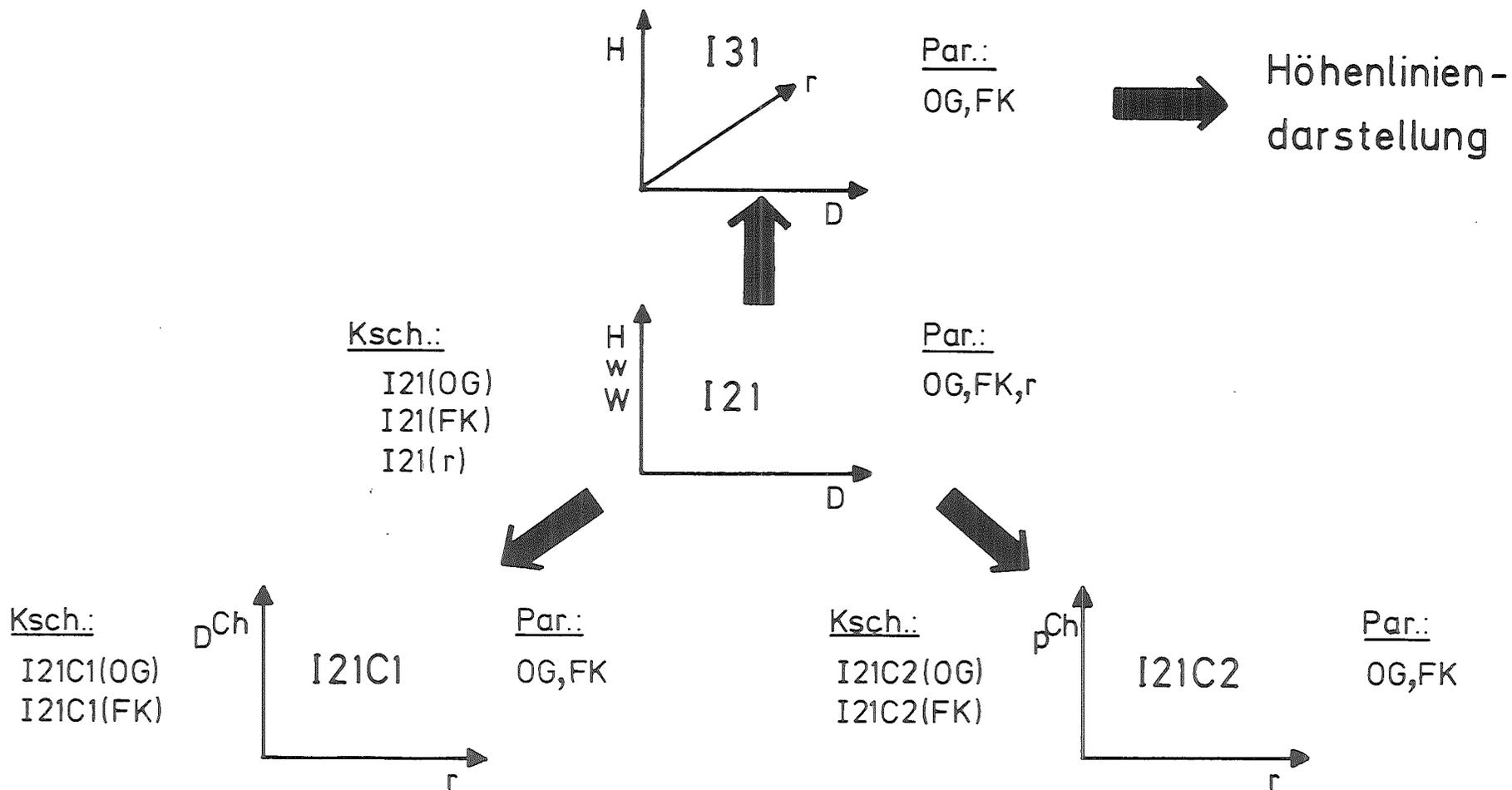


Abb. 4: Zusammenhang zwischen Dosis und Fahnenbreite



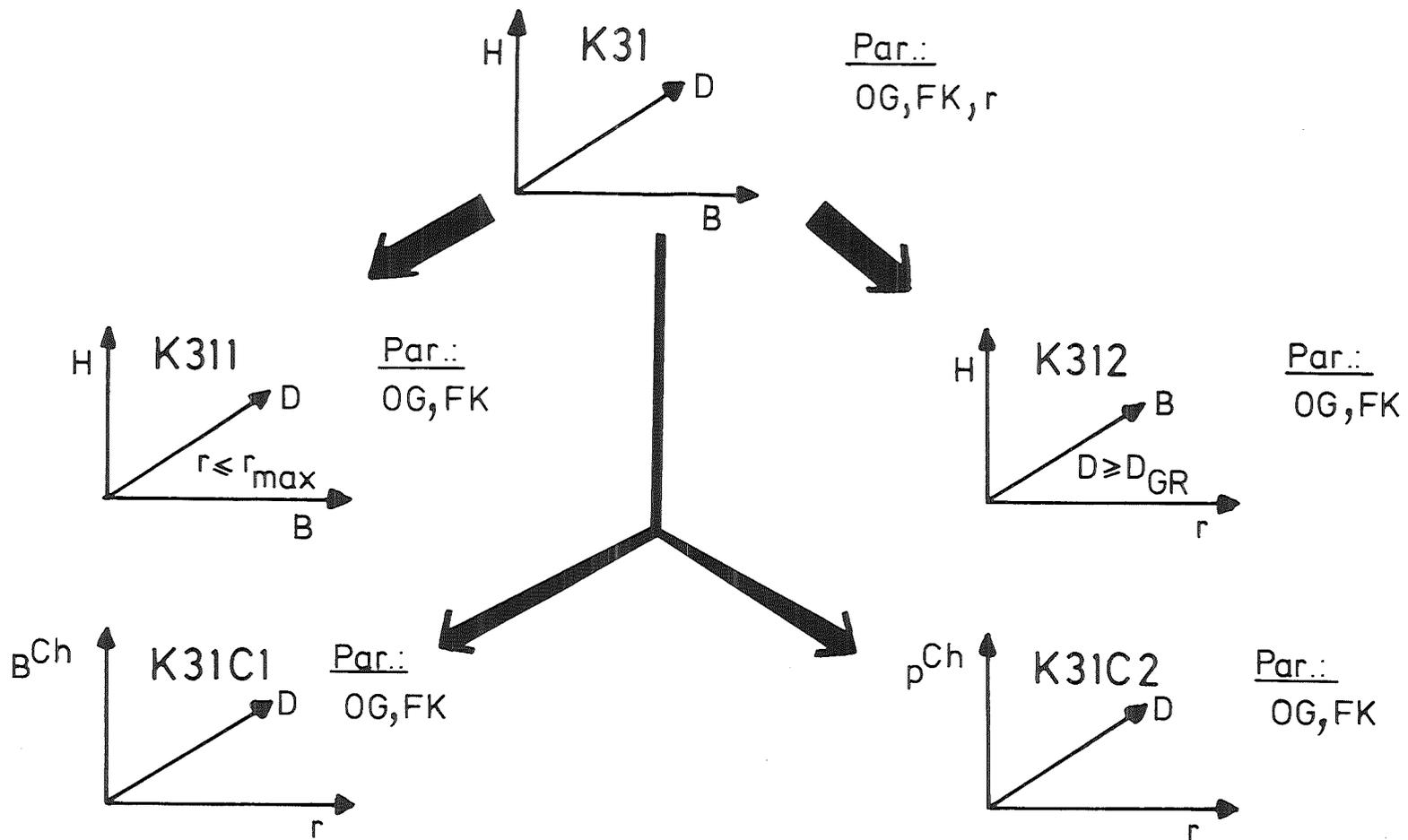
OG — Organ  
 FK — Freisetzungskategorie

Par. — Parameter  
 Ksch. — Kurvenschar

$$D^{Ch} = \{ \bar{D}, D_{min}, D_{max}, D_{\alpha} \}$$

$$p^{Ch} = p(D \geq D_{GR})$$

Abb. 5 Darstellungsformen für Individualdosen



### Höhenliniendarstellungen: HK31 , HK311 , HK312

Par.—Parameter    OG—Organ    FK—Freisetzungskategorie     $B^{Ch} = \{ \bar{B}, B_{min}, B_{max}, B_{\alpha} \}$   
 $p^{Ch} = p(B \geq B_{GR})$

Abb. 6a    Dreidimensionale Darstellungsformen für Organdosen in der Bevölkerung

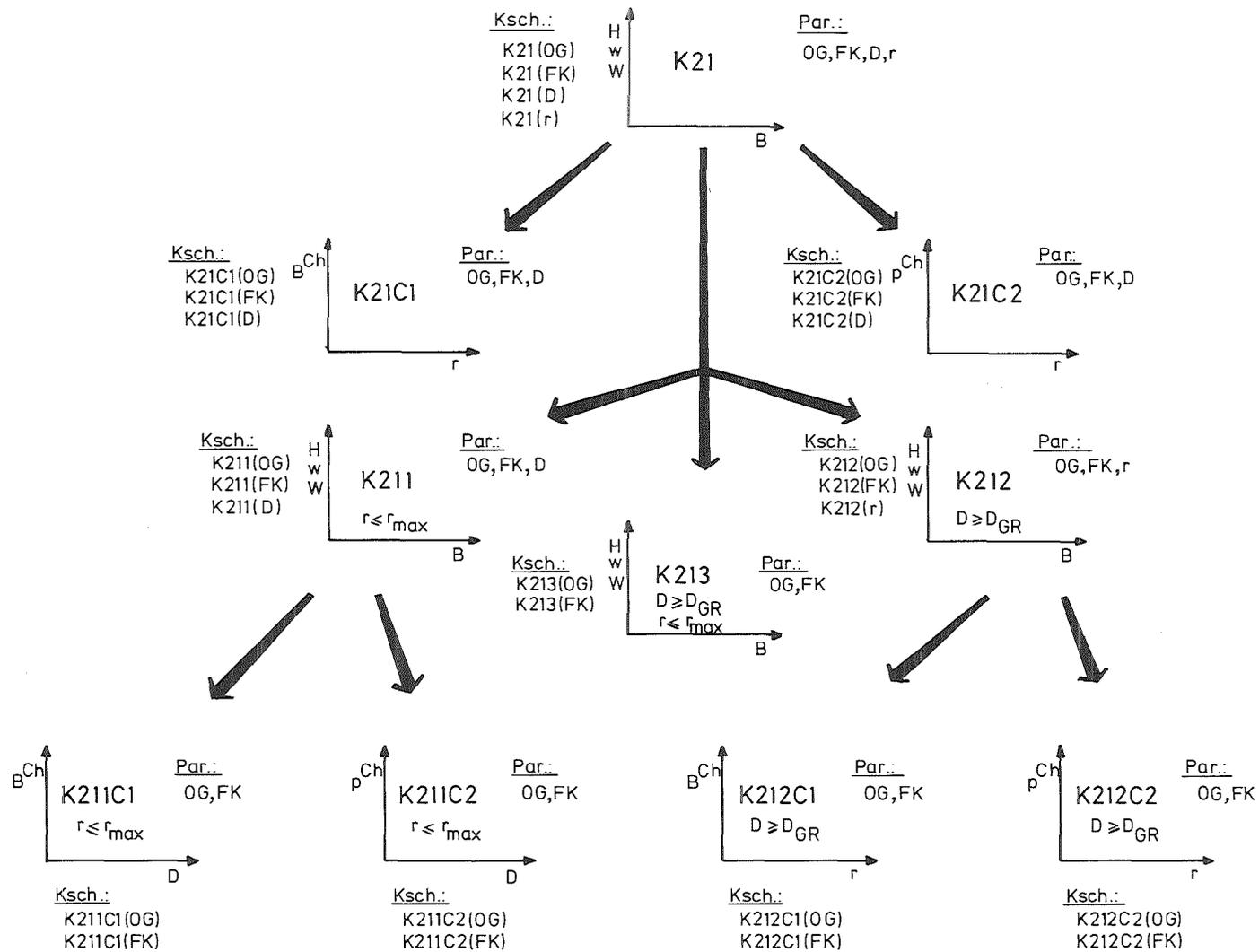
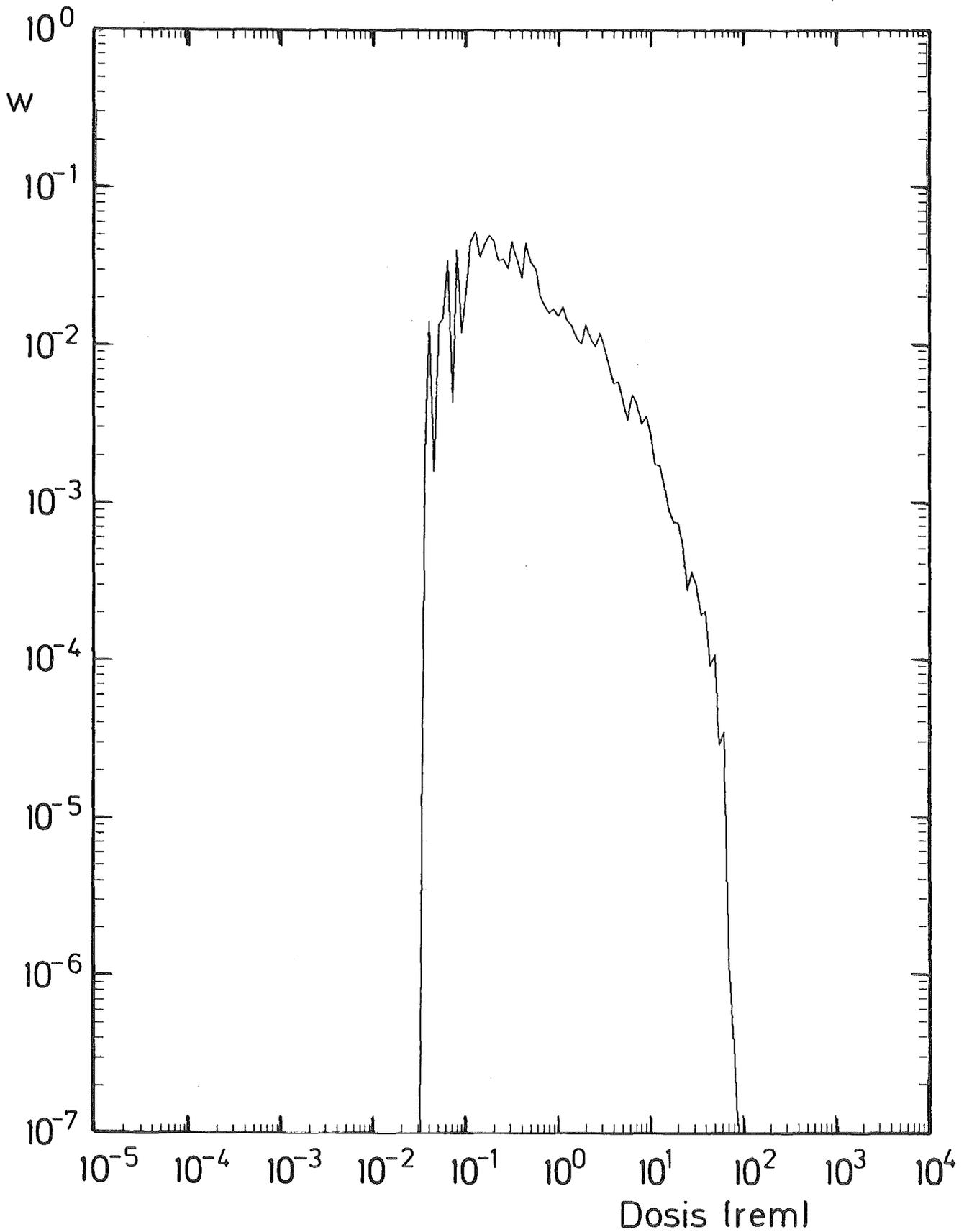


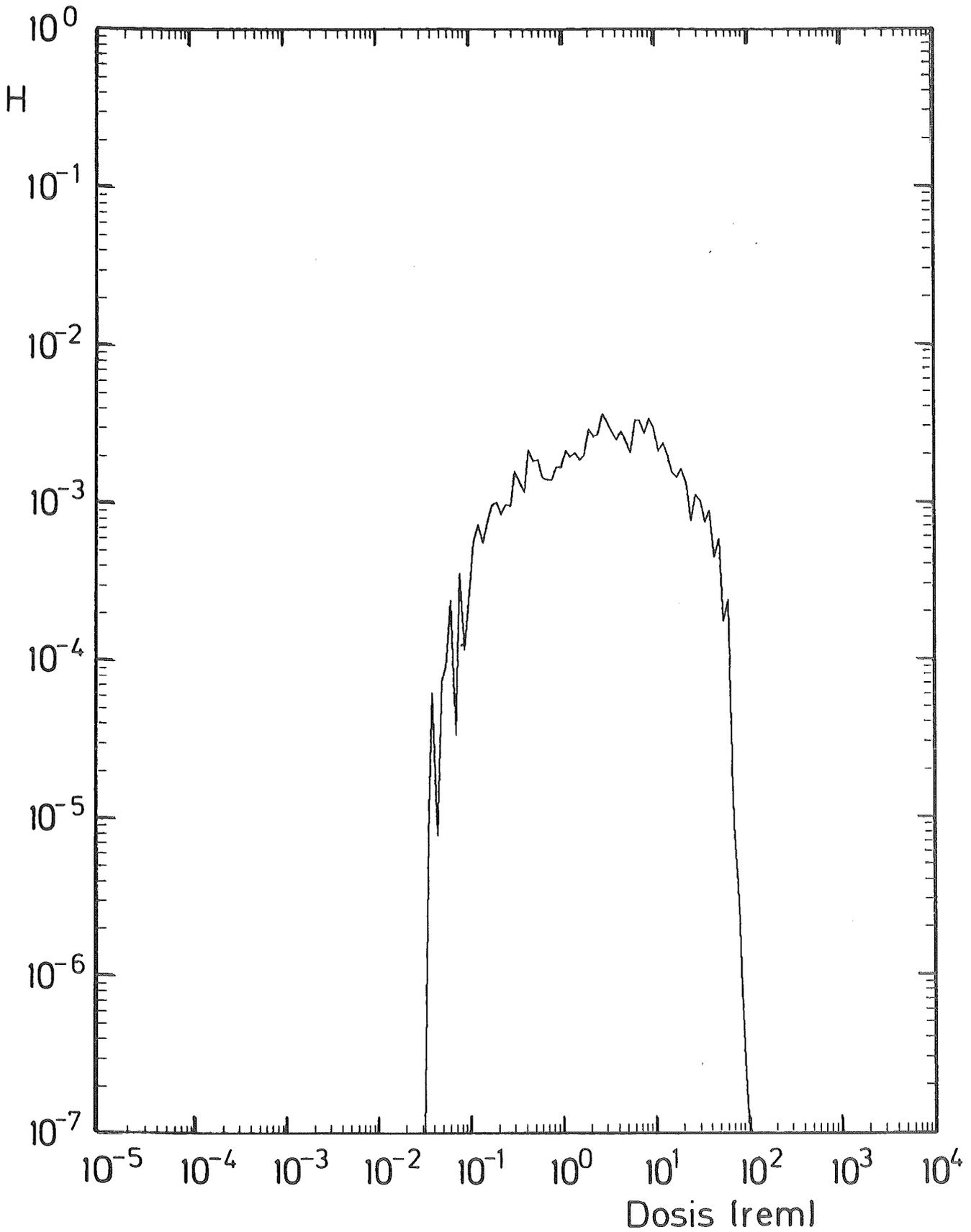
Abb. 6b Zweidimensionale Darstellungsformen für Organdosen in der Bevölkerung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: KM

Integrationszeitraum: FS-relev. Entfernung:  $\sqrt[2]{16 \text{ km}, 24 \text{ km}}$

Abb. 7a      Klassenhäufigkeitsdichte der Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



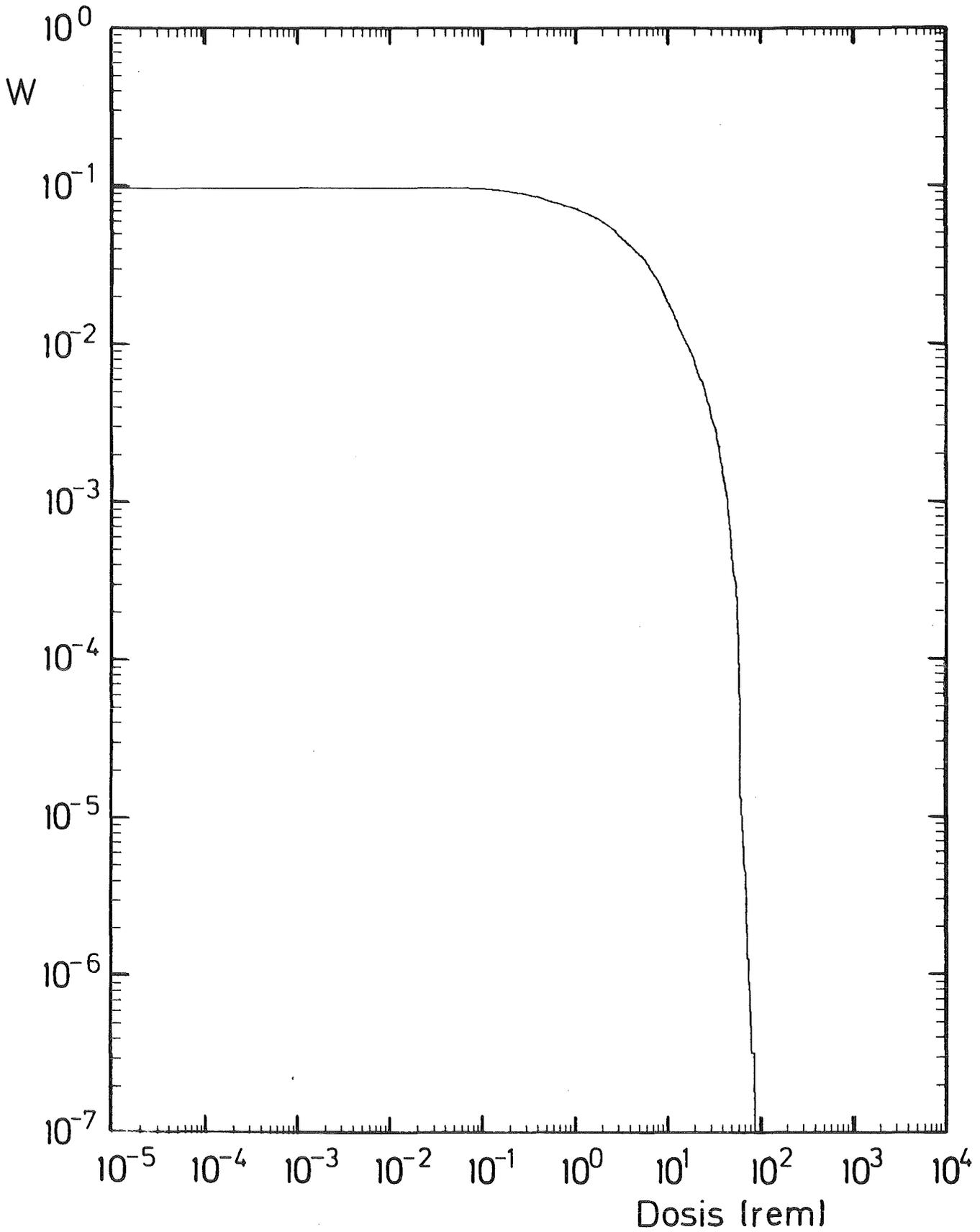
Freisetzungskategorie: FK2

Organ: KM

Integrationszeitraum: FS-relev. Entfernung:  $\sqrt{16}$  km,  $24 \text{ km}$

Stützstellen: 4/Dek.

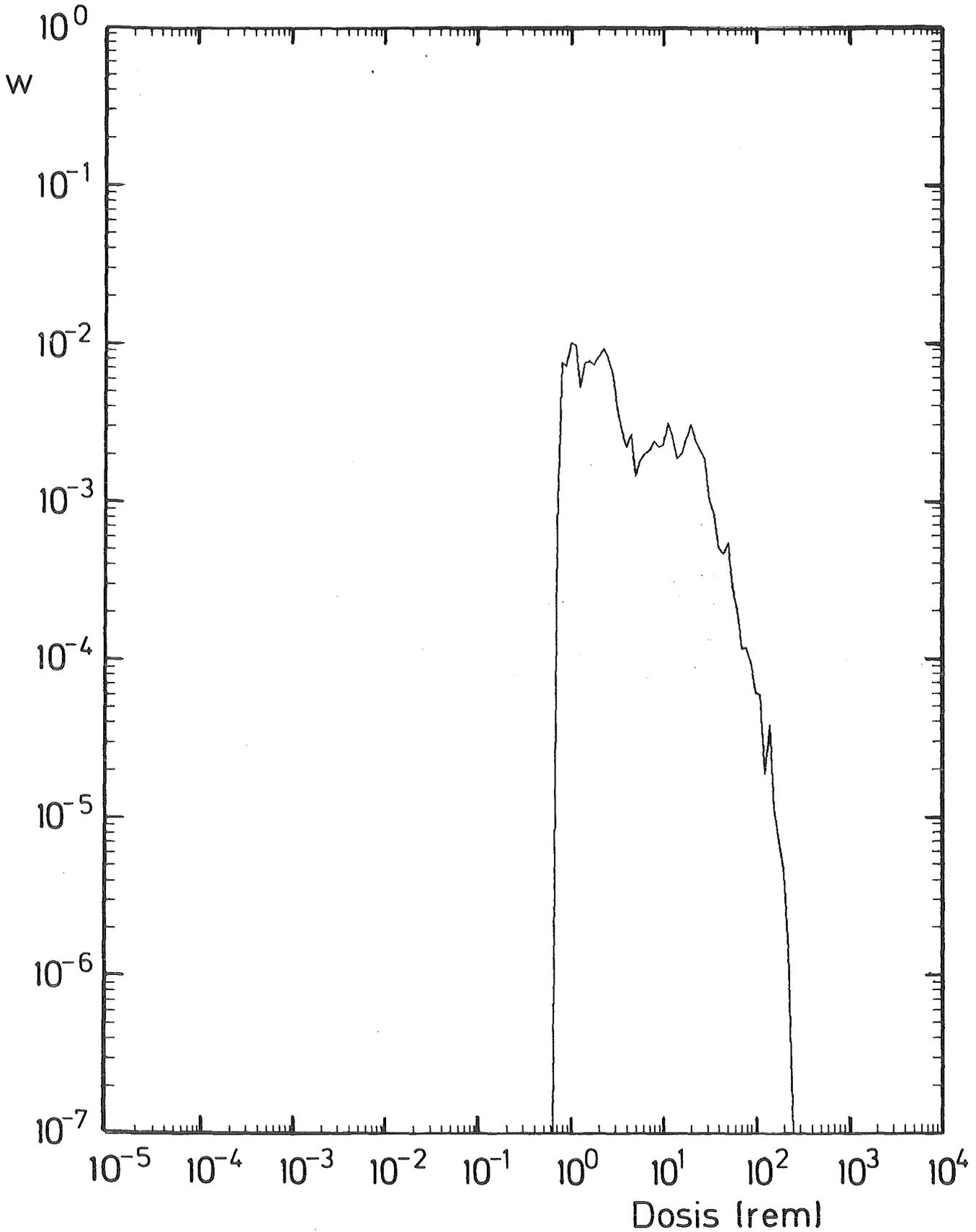
Abb. 7b Klassenhäufigkeitsverteilung der Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: KM

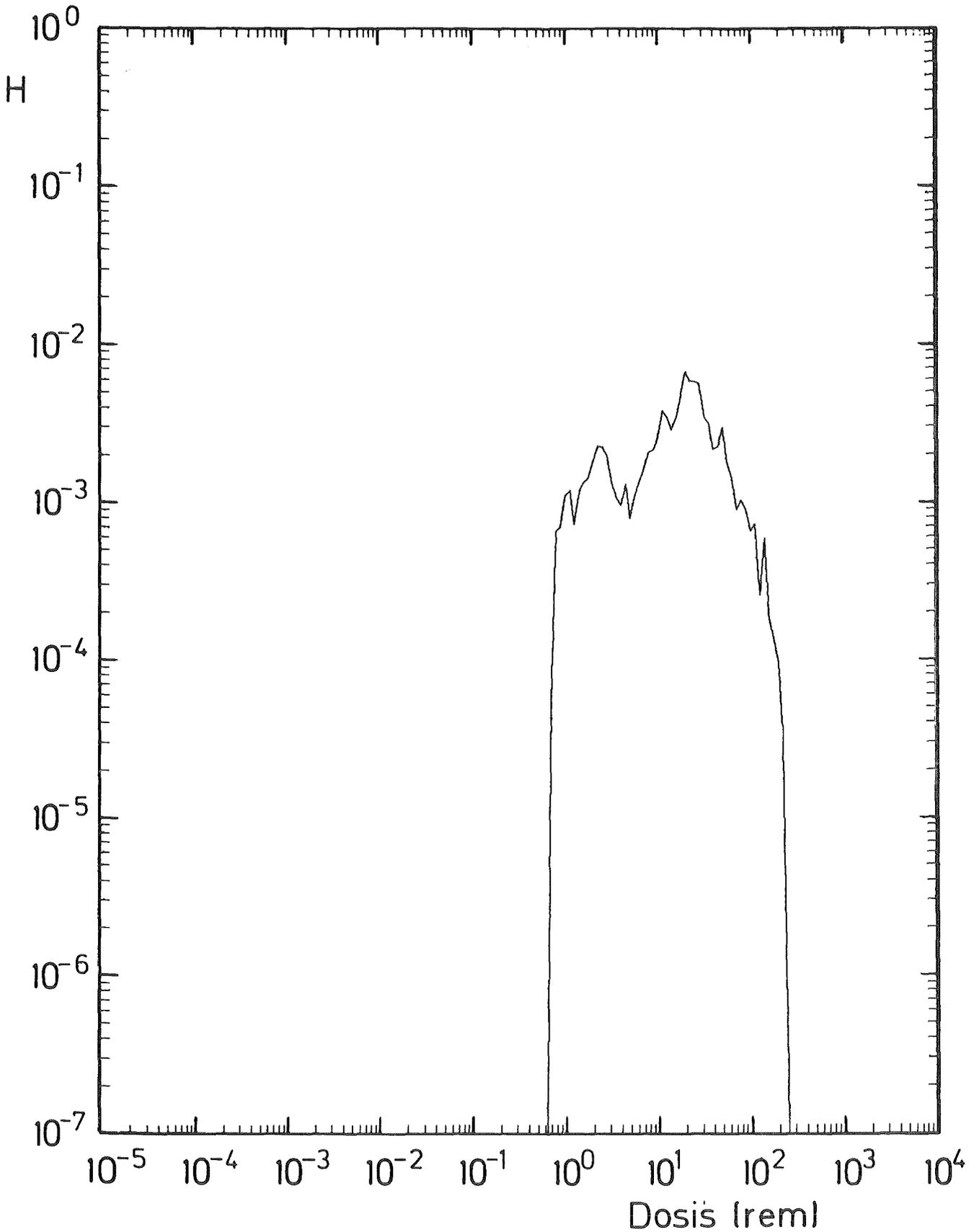
Integrationszeitraum: FS-relev. Entfernung:  $\sqrt{16 \text{ km}, 24 \text{ km}}$

Abb. 7c    Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: GK  
Integrationszeitraum: 50a      Entfernung:  $\sqrt{16}$  km,  $24 \text{ km}$

Abb. 8a      Klassenhäufigkeitsdichte der Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2

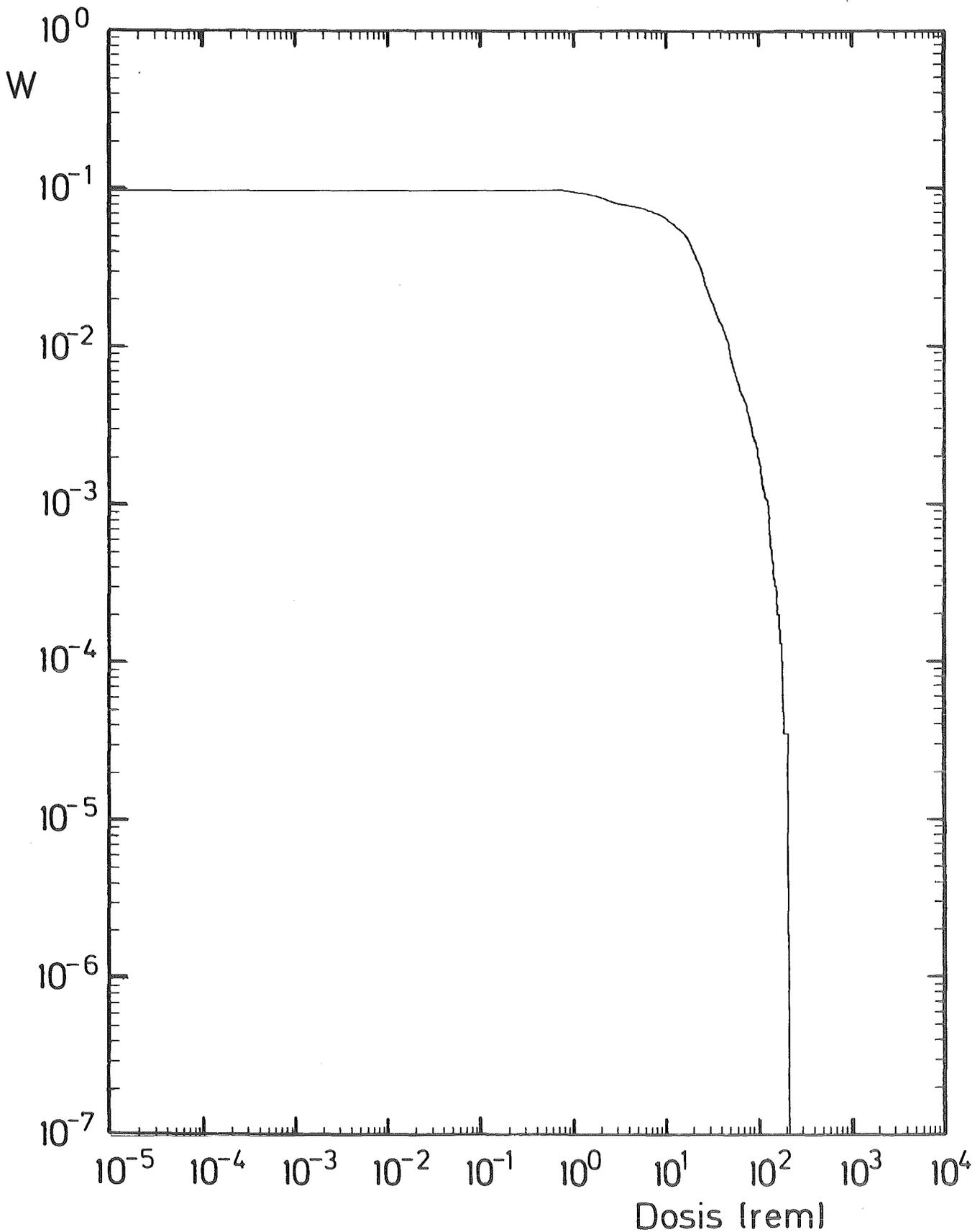
Organ: GK

Integrationszeitraum: 50a

Entfernung:  $\sqrt[2]{16 \text{ km}, 24 \text{ km}}$

Stützstellen: 4/Dek.

Abb. 8b Klassenhäufigkeitsverteilung der Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



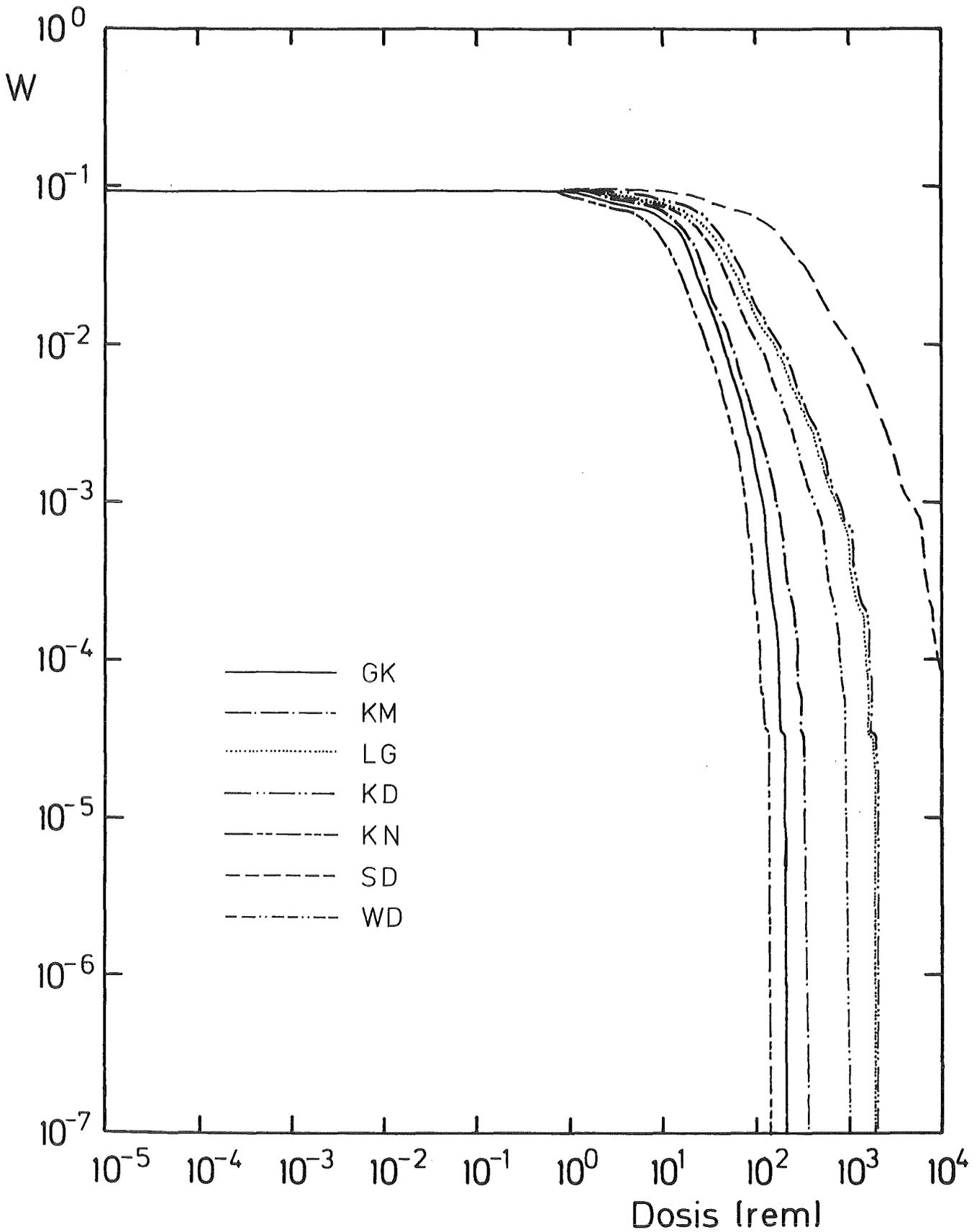
Freisetzungskategorie: FK2

Organ: GK

Integrationszeitraum: 50a

Entfernung:  $\sqrt{16}$  km,  $24$  km

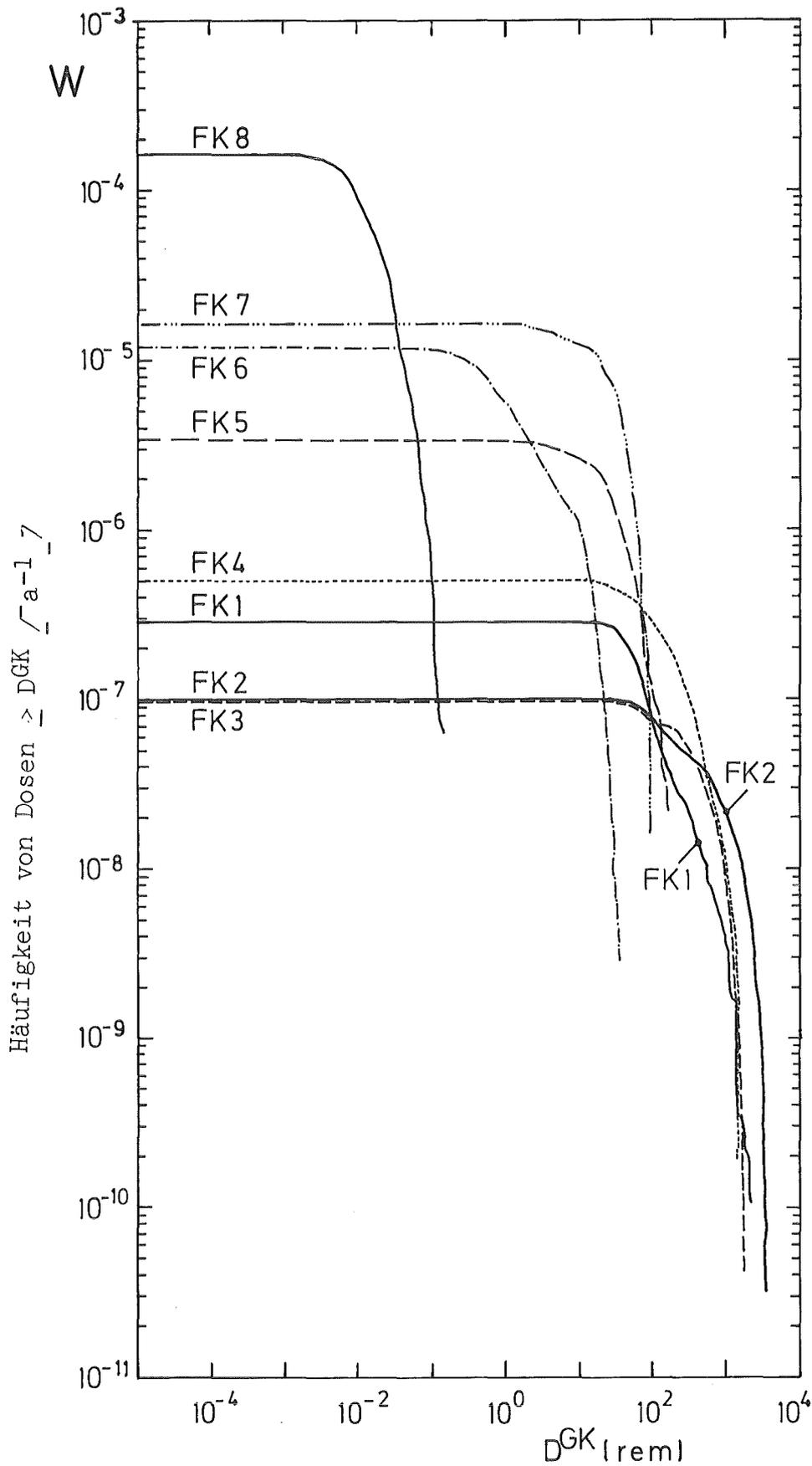
Abb. 8c Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: s.o.

Integrationszeitraum: 50a      Entfernung:  $\sqrt[2]{16 \text{ km}, 24 \text{ km}}$

Abb. 9a      Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der Organ Dosen unter der Voraussetzung stattgefundenener Freisetzung



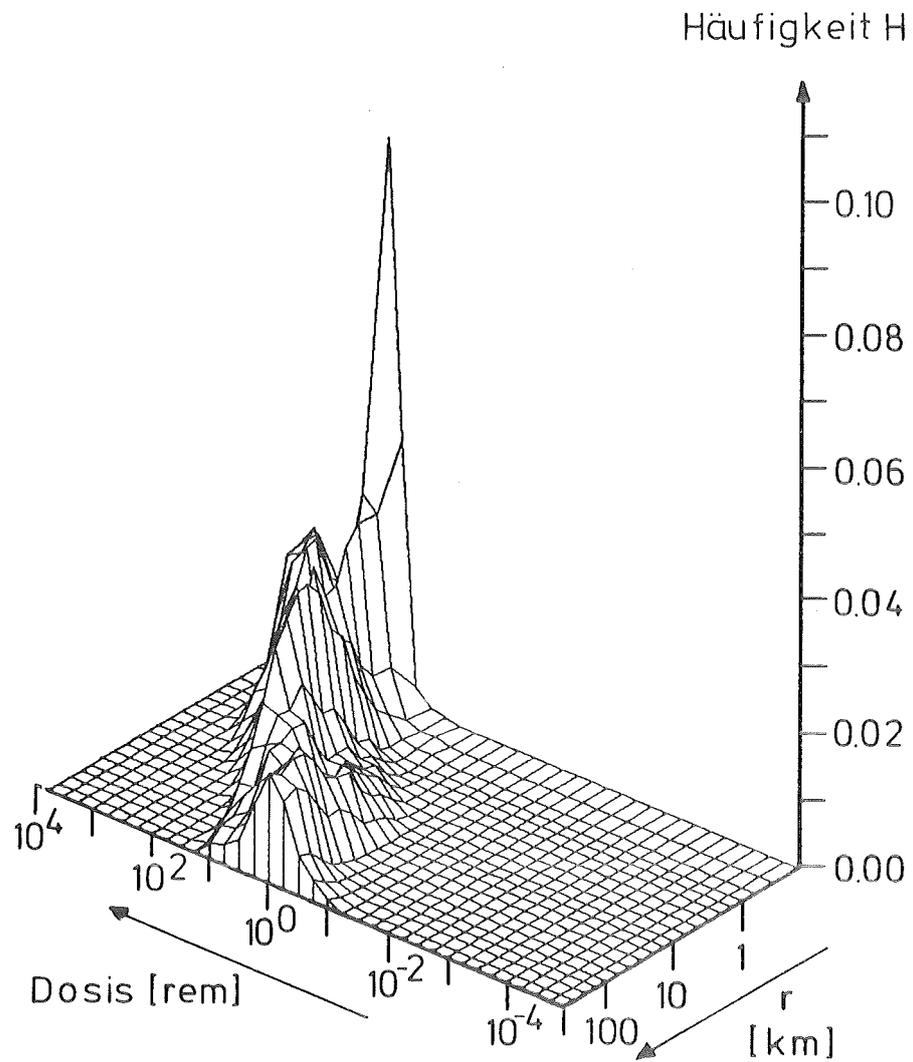
Freisetzungskategorie: s.o.

Organ: GK

Integrationszeitraum: 50a

Entfernung:  $\sqrt{200m, 500m}$

Abb. 9b Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der Organdosen



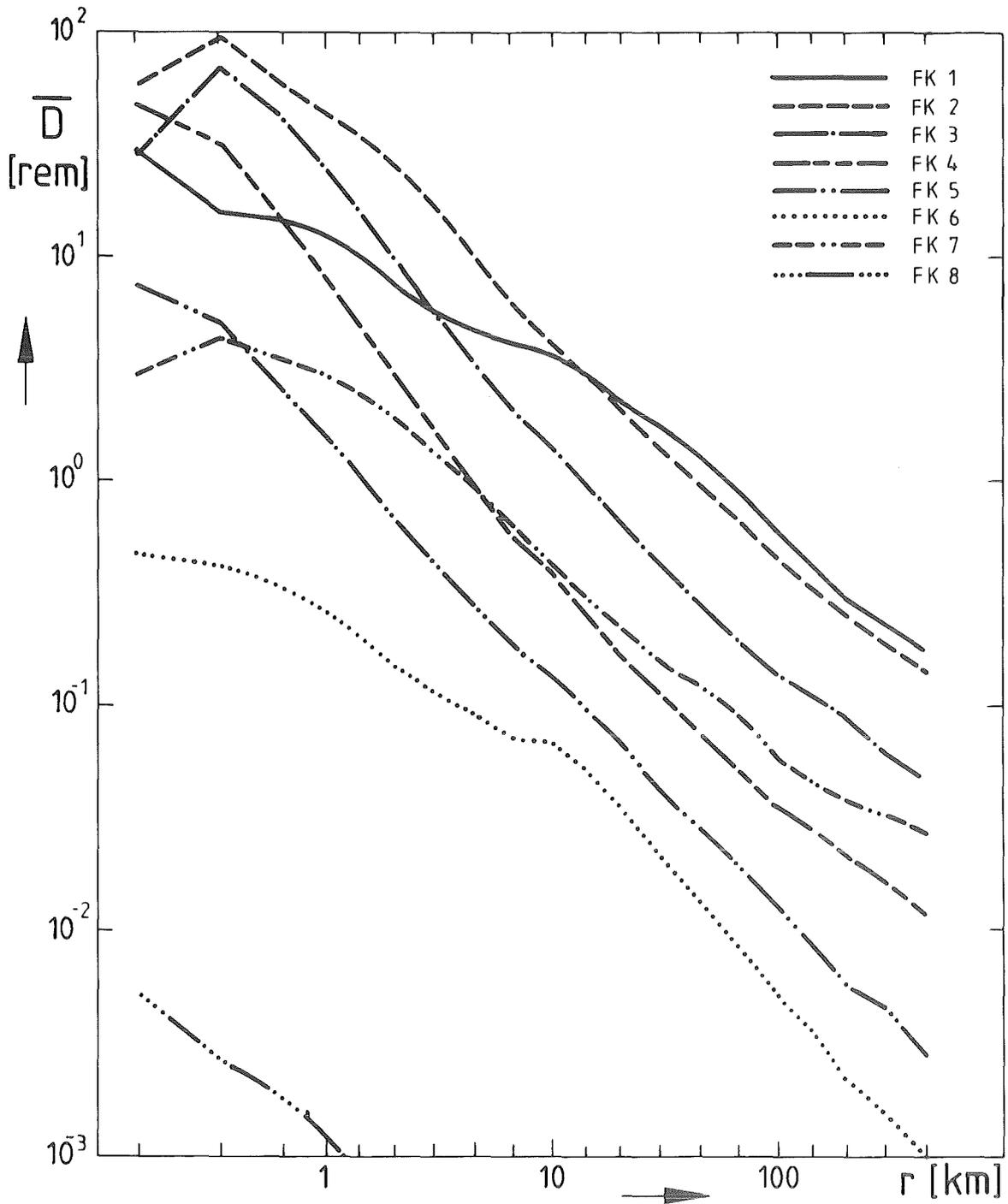
Freisetzungskategorie: FK2

Organ: GK

Integrationszeitraum: 50a

Stützstellen: 4/Dek.

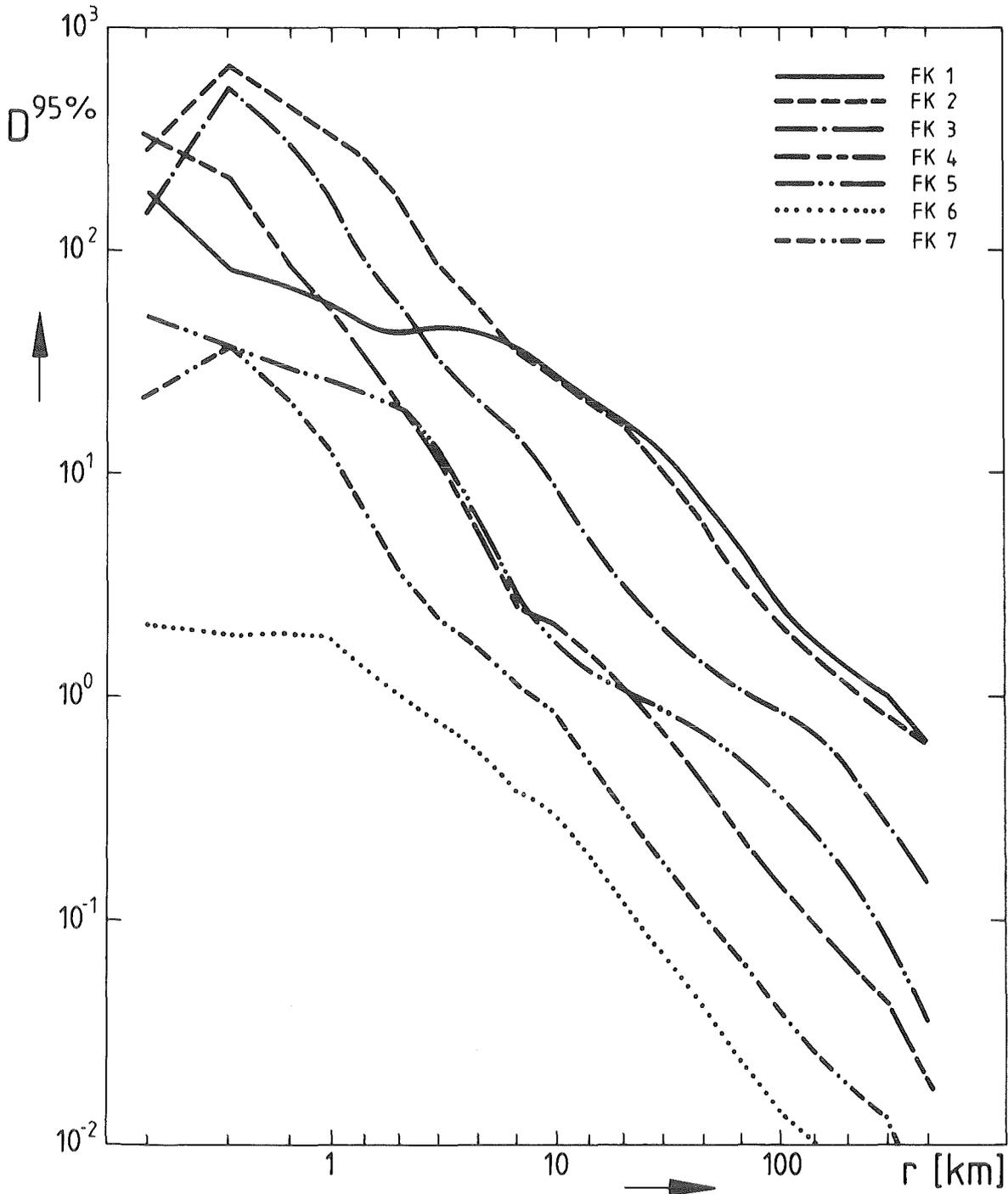
Abb. 10 Klassenhäufigkeitsverteilung der Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: GK

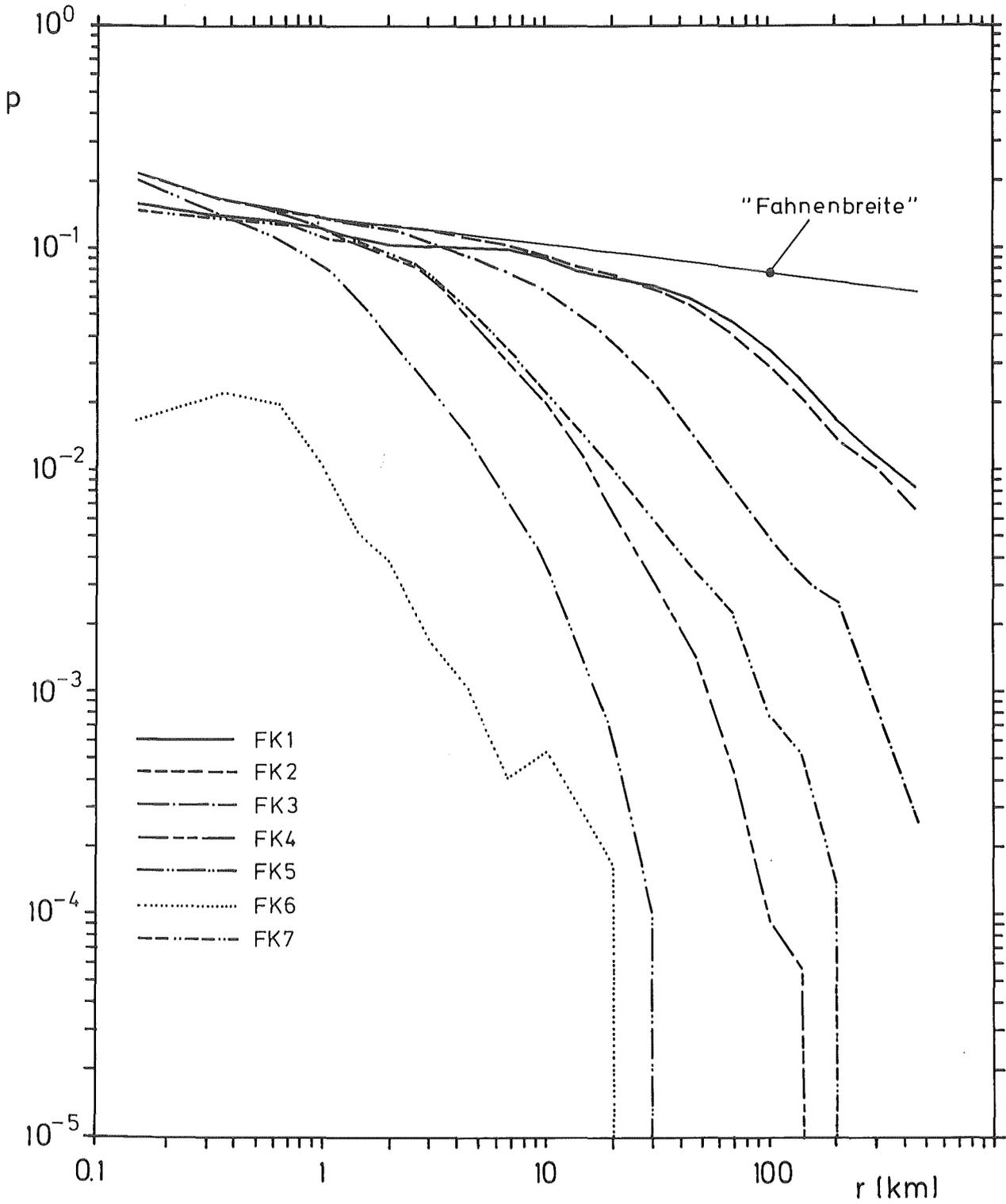
Integrationszeitraum: 50a

Abb. 11      Entfernungabhängiger Mittelwert der Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: GK  
Integrationszeitraum: 50a      Fraktile: 95%

Abb. 12      Entfernungabhängige Perzentilen der Dosishäufigkeitsverteilung unter der Voraussetzung stattgefunderer Freisetzung



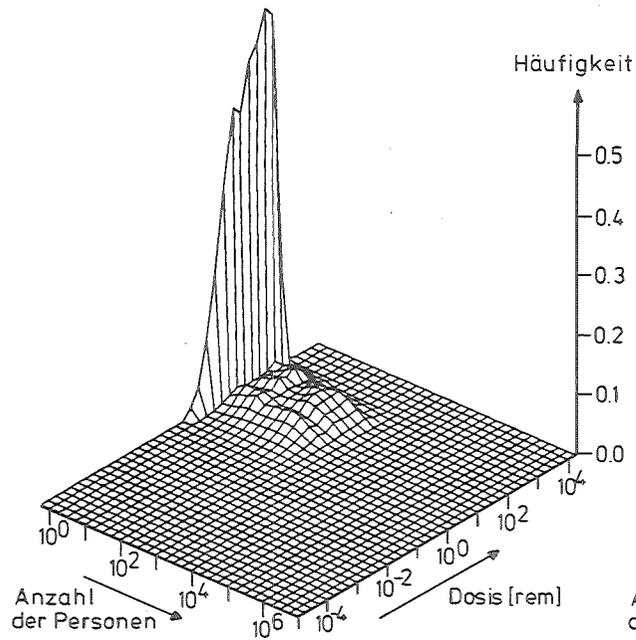
Freisetzungskategorie: s.o.

Organ: GK

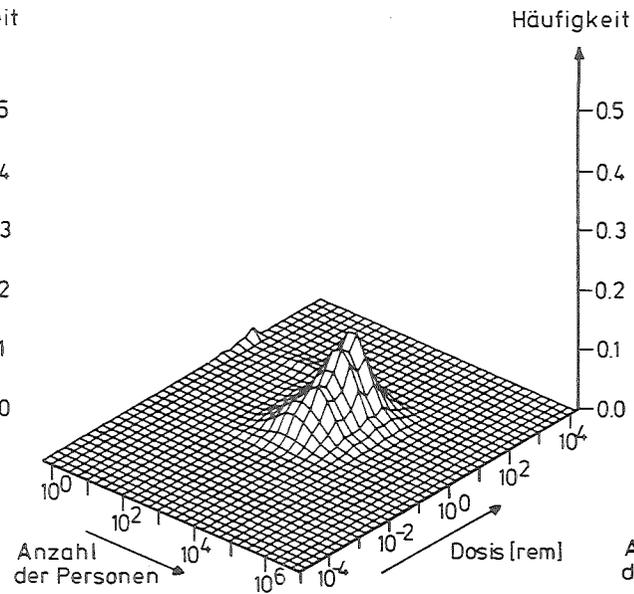
Integrationszeitraum: 50a

Schwellendosis: 5 rem

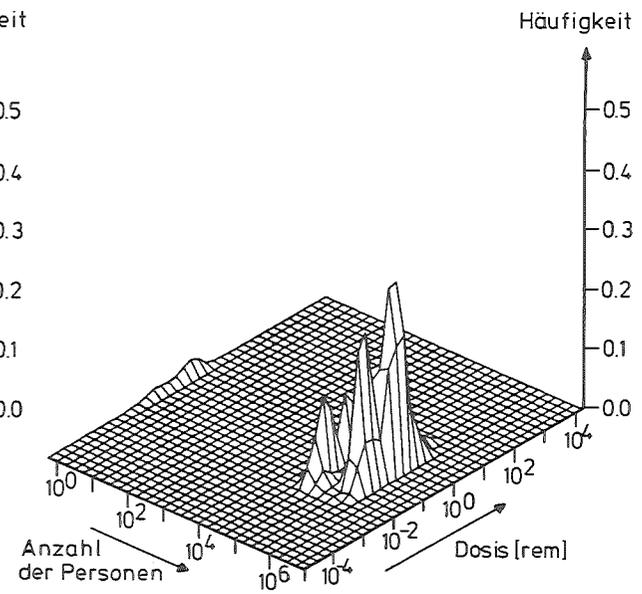
Abb. 13 Entfernungabhängige Wahrscheinlichkeit für Organdosen über der Schwellendosis unter der Voraussetzung stattgefundenener Freisetzung



$$r = \underline{[1,6\text{km}, 2,4\text{km}]}$$



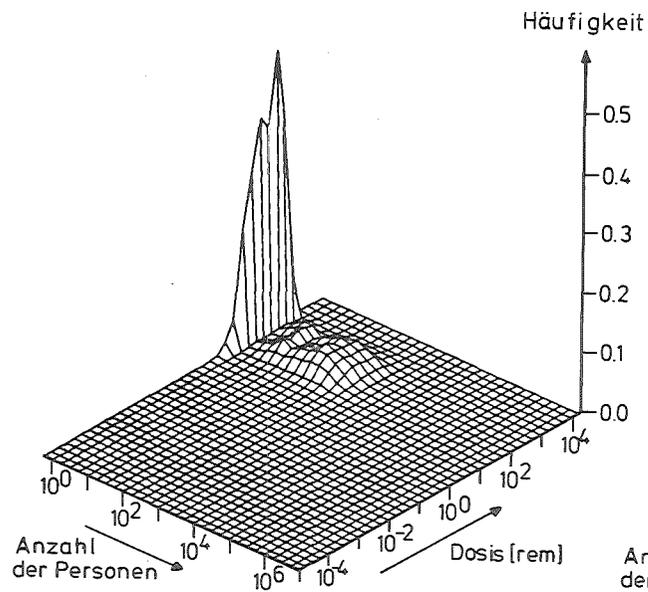
$$r = \underline{[16\text{km}, 24\text{km}]}$$



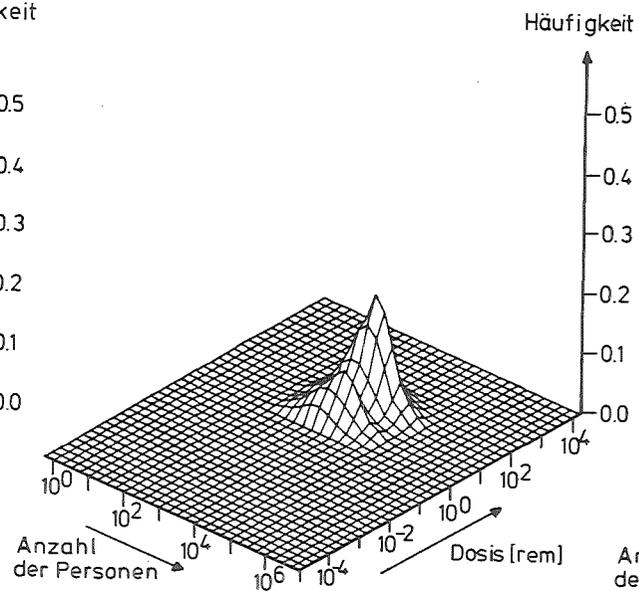
$$r = \underline{[160\text{km}, 240\text{km}]}$$

Freisetzungskategorie: FK2      Organ: KM  
 Integrationszeitraum: FS-relev. Entfernung: s.o.  
 Stützstellen: 4/Dek.

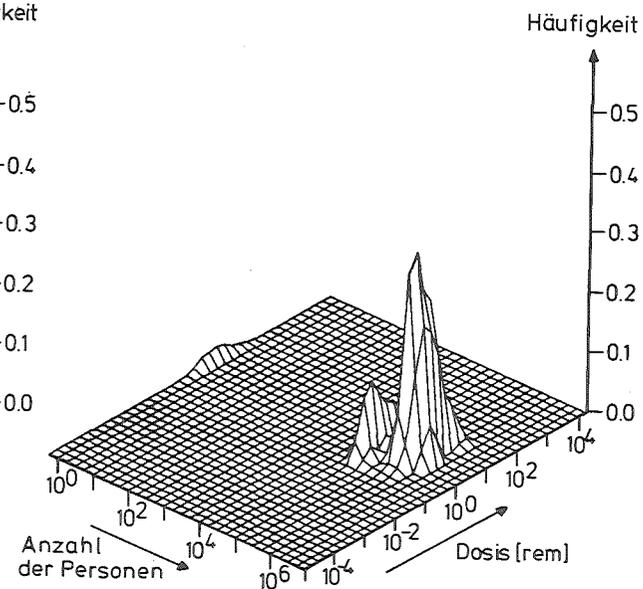
Abb.14a      Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



$$r = \underline{\underline{[1,6\text{km}, 2,4\text{km}]}}$$



$$r = \underline{\underline{[16\text{km}, 24\text{km}]}}$$



$$r = \underline{\underline{[160\text{km}, 240\text{km}]}}$$

Freisetzungskategorie: FK2

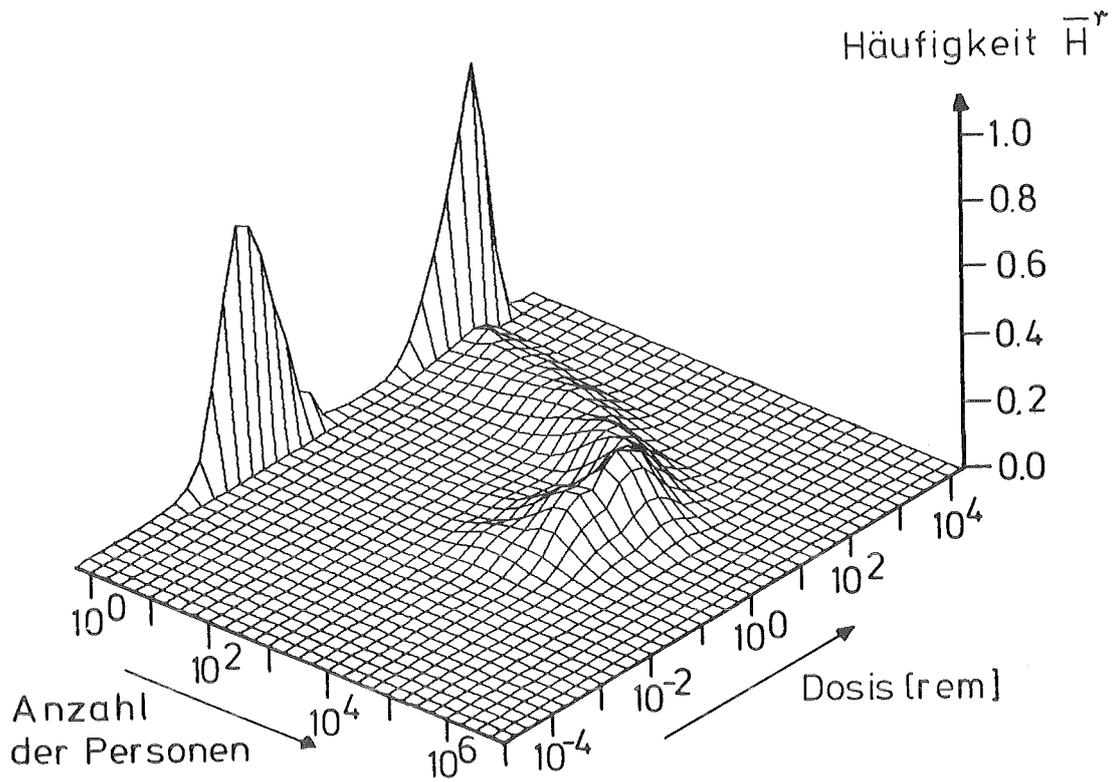
Organ: GK

Integrationszeitraum: 50a

Entfernung: s.o.

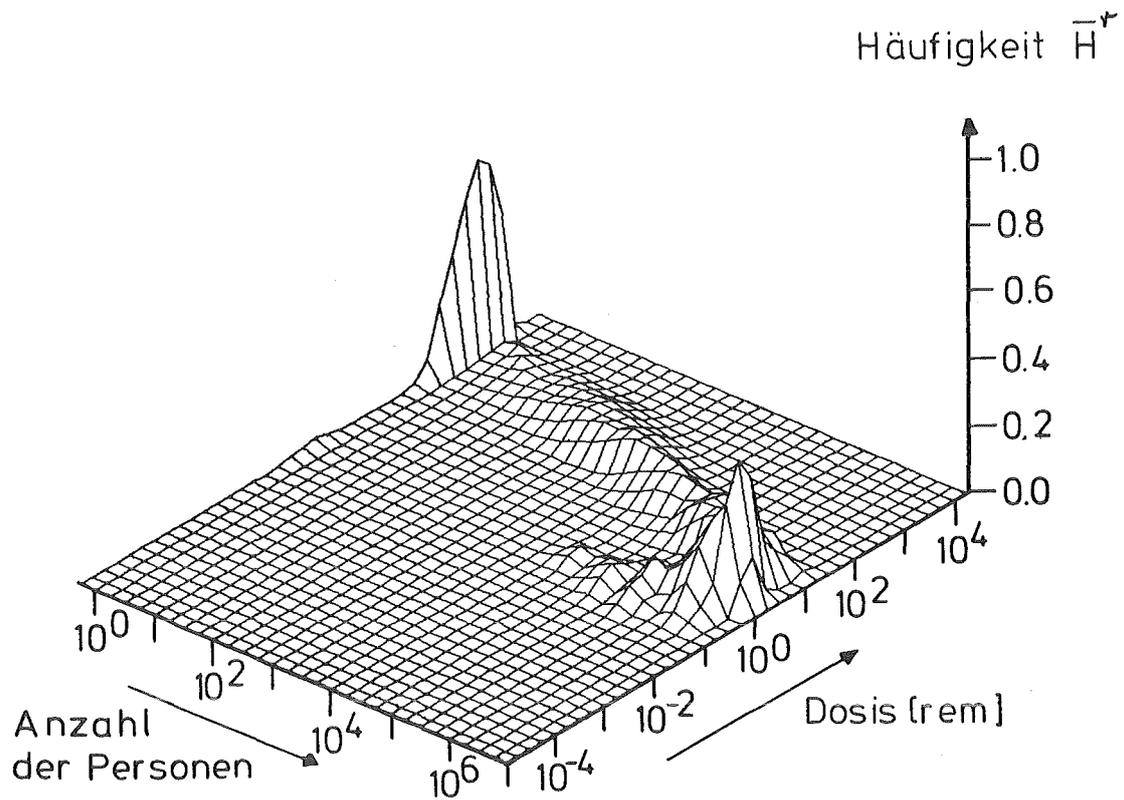
Stützstellen: 4/Dek.

Abb. 14b Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen unter der Voraussetzung stattgefunderer Freisetzung



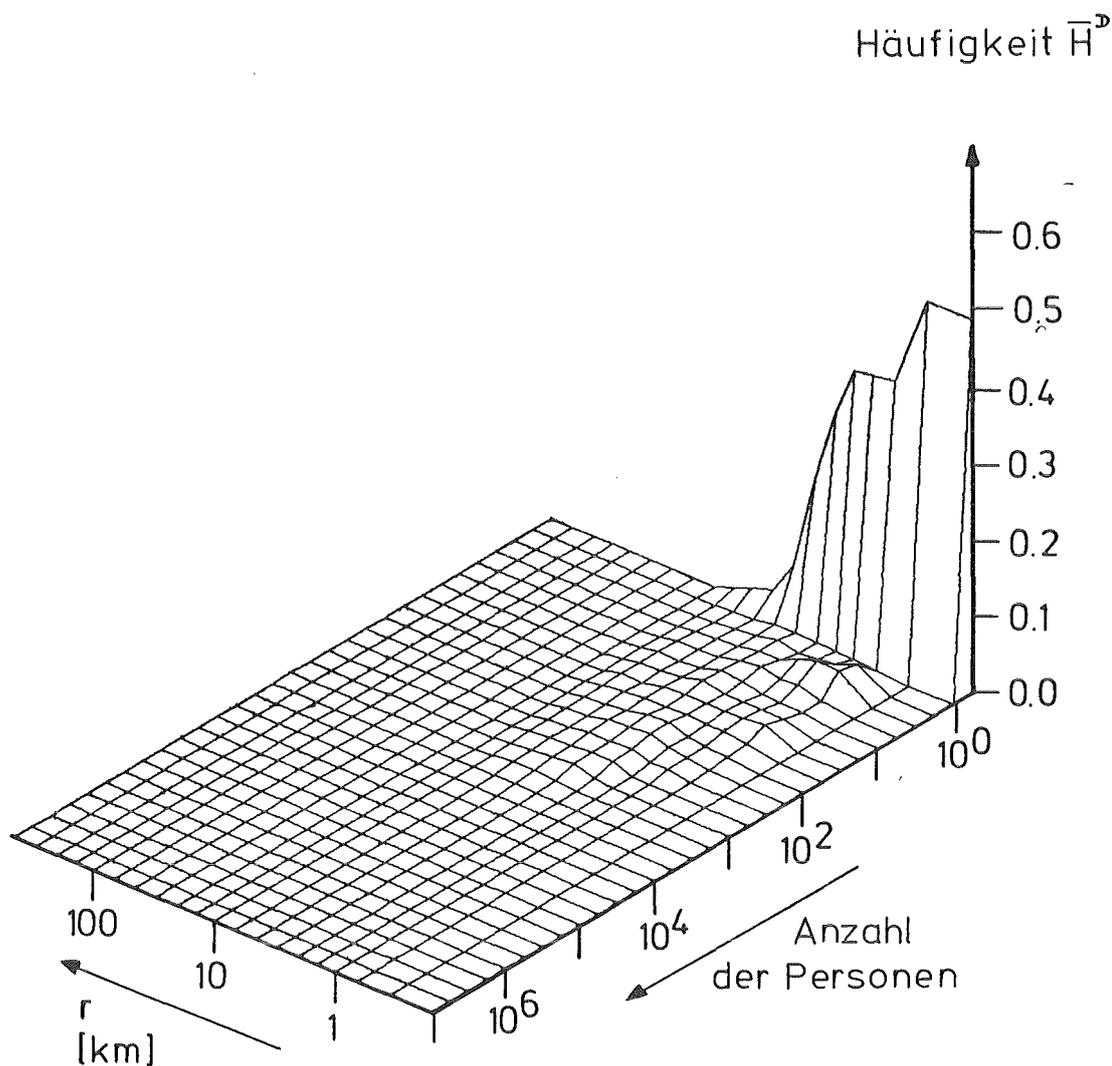
Freisetzungskategorie: FK2      Organ: KM  
Integrationszeitraum: FS-relev. Stützstellen: 4/Dek.  
Integration bis: 80 km

Abb.15a    Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



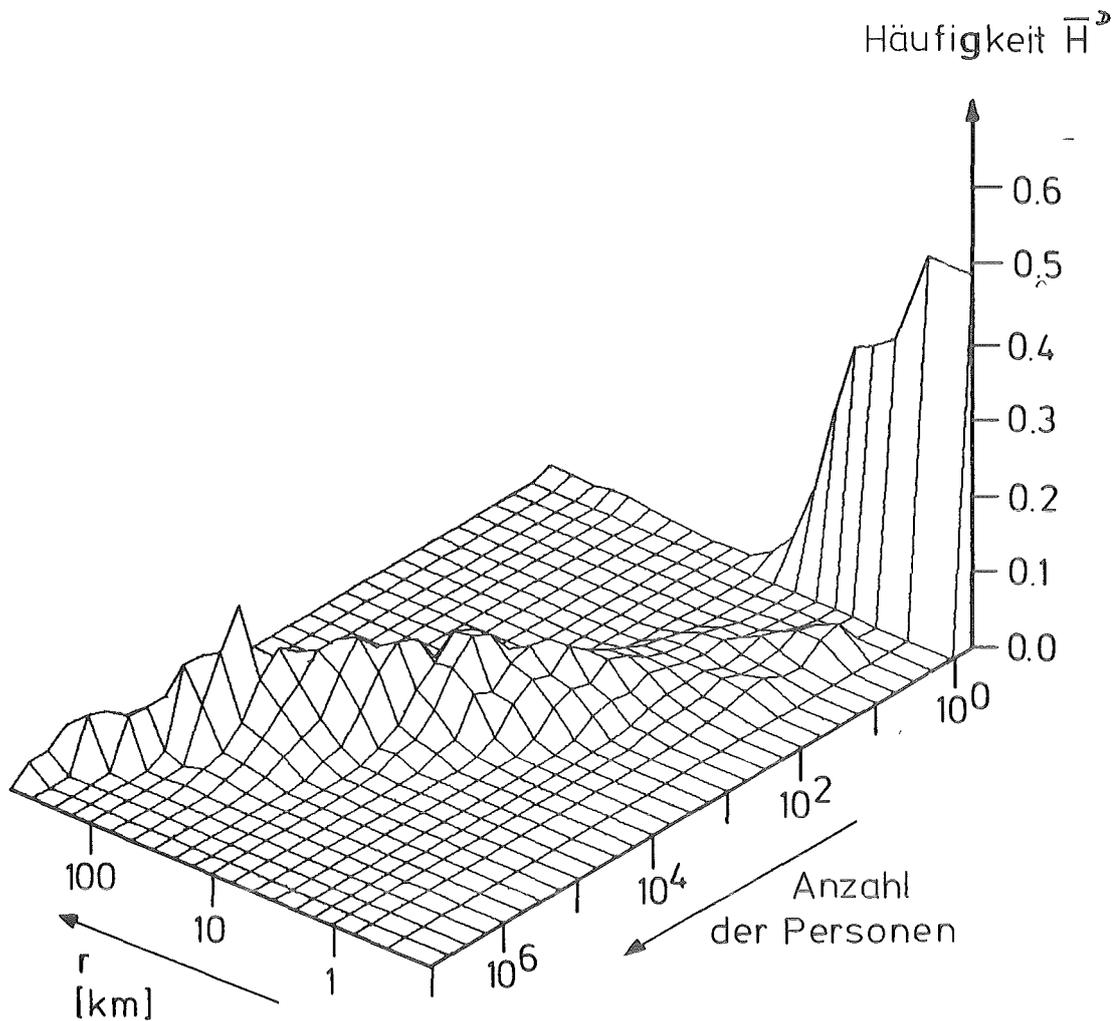
Freisetzungskategorie: FK2      Organ: GK  
Integrationszeitraum: 50a      Stützstellen: 4/Dek.  
Integration bis: 540 km

Abb. 15b    Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundenener Freisetzung



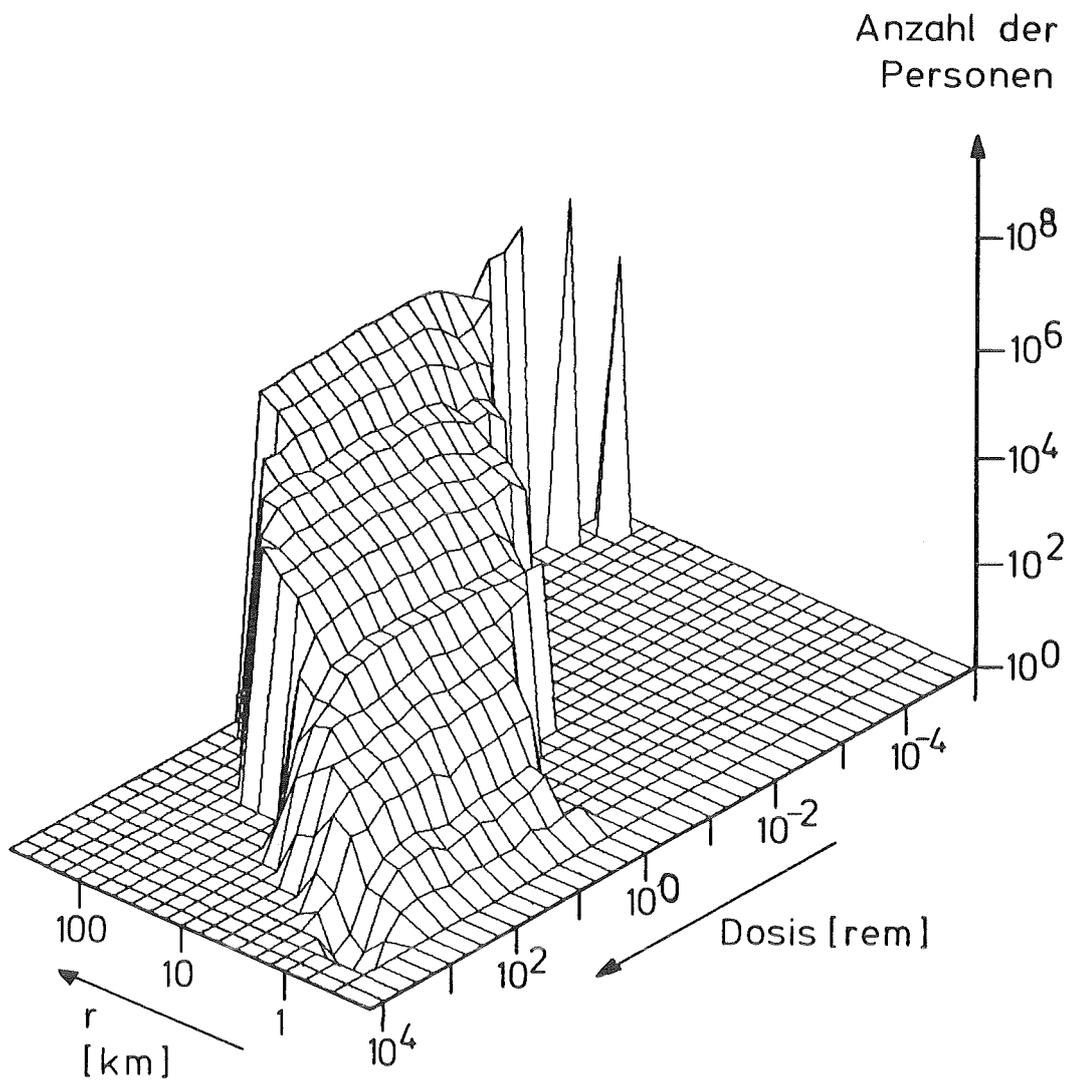
Freisetzungskategorie: FK2      Organ: KM  
Integrationszeitraum: FS-relev.      Schwellenwert: 100 rem  
Stützstellen: 4/Dek.

Abb.16a      Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen über dem Schwellenwert unter der Voraussetzung stattgefundenener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: GK  
Integrationszeitraum: 50a      Schwellenwert: 5 rem  
Stützstellen: 4/Dek.

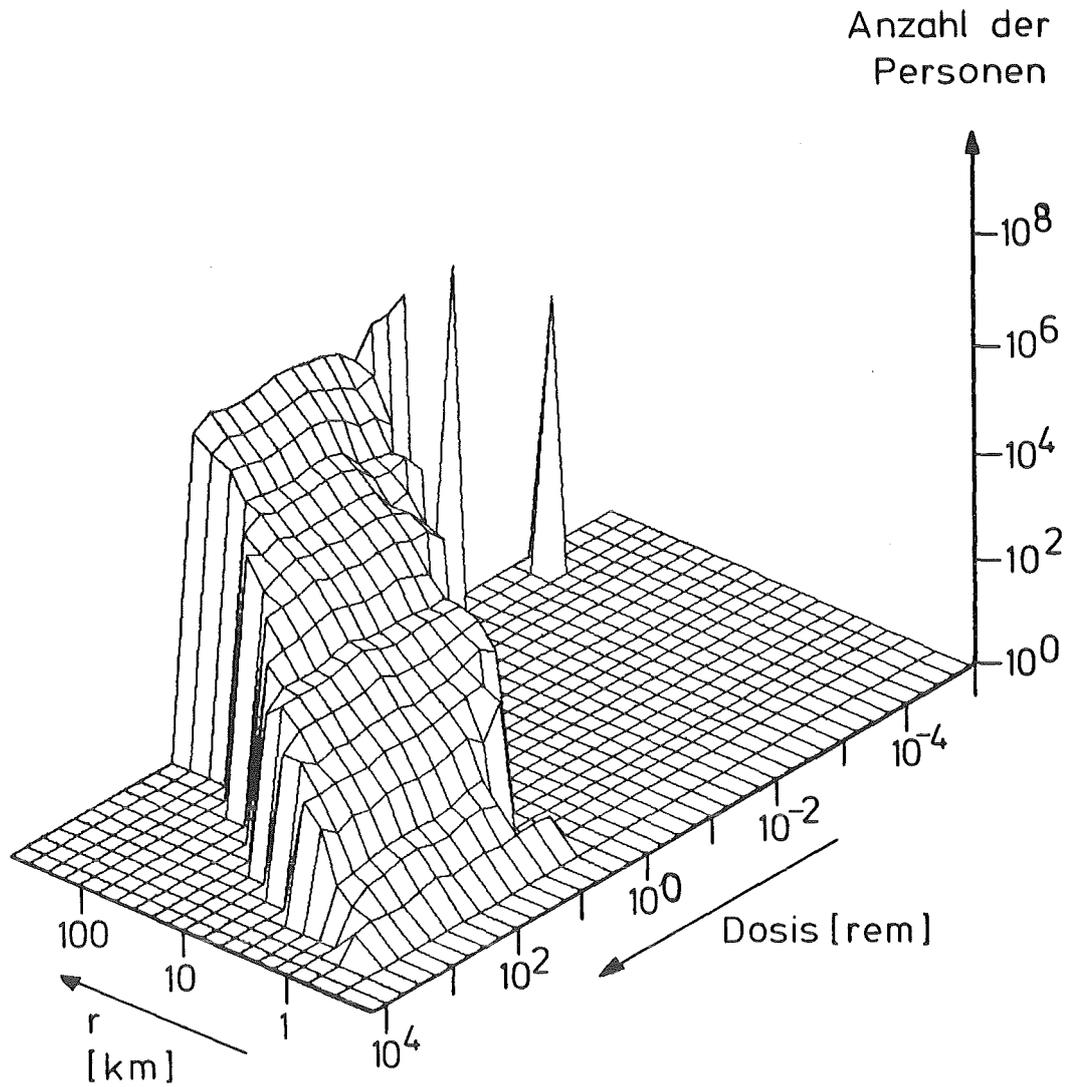
Abb. 16b      Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen über dem Schwellenwert unter der Voraussetzung stattgefundenener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: KM

Integrationszeitraum: FS-relevant

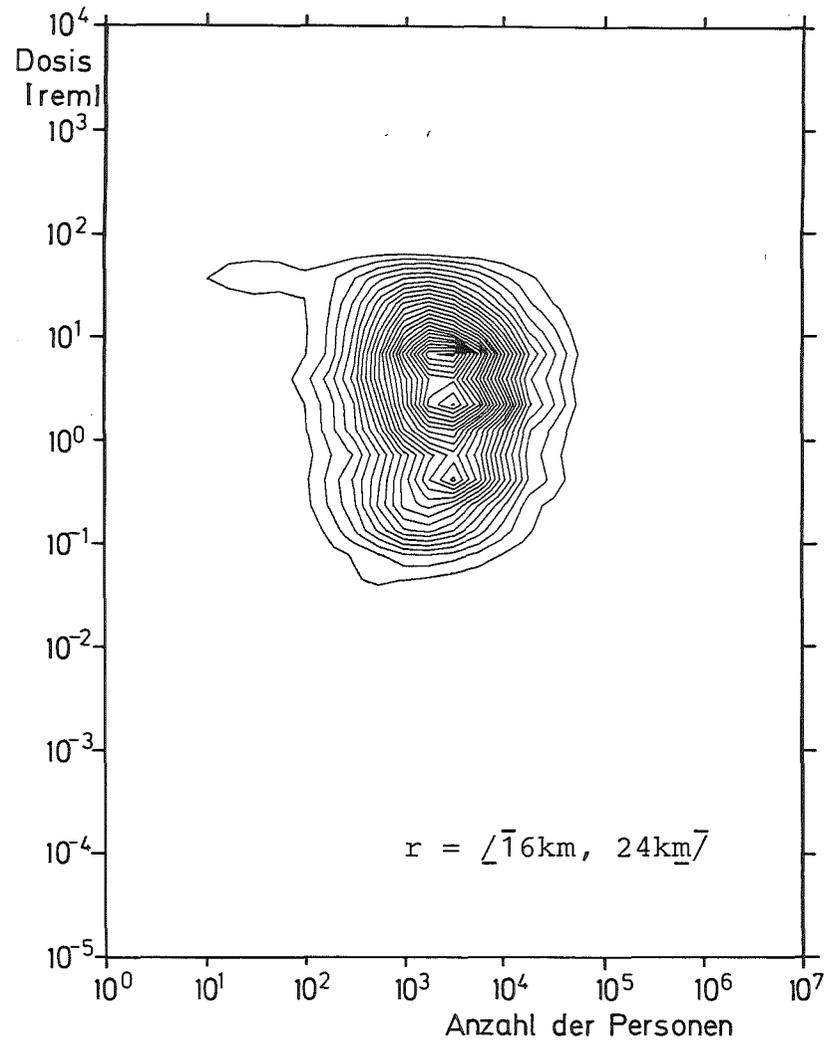
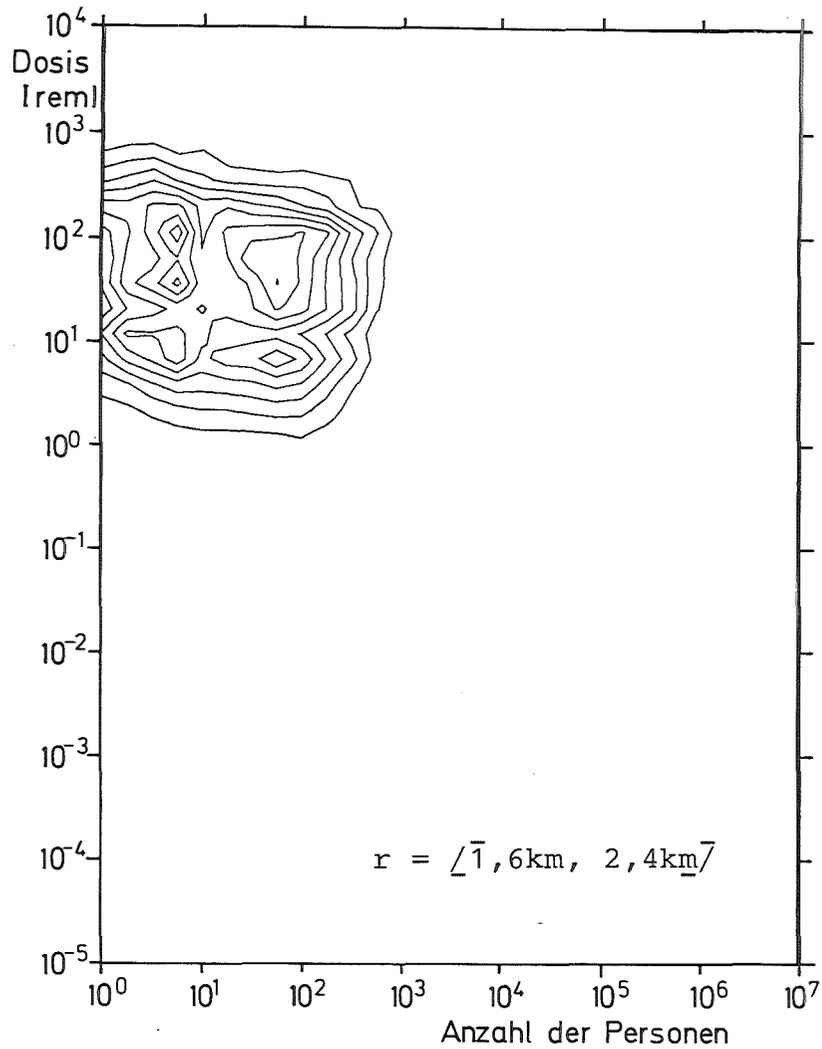
Abb. 17a      Mittlere Anzahl von Personen mit Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundenener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: GK

Integrationszeitraum: 50a

Abb.17b      Mittlere Anzahl von Personen mit Organdosen unter der Voraussetzung stattgefundenener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2

Organ: KM

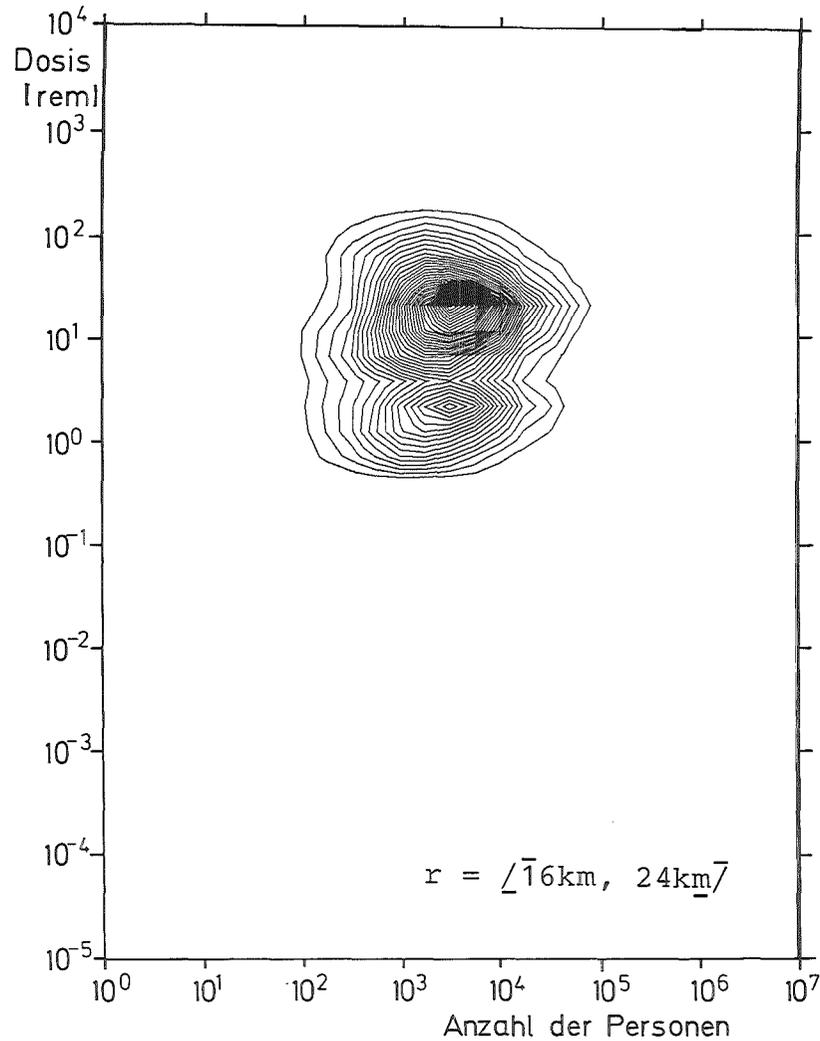
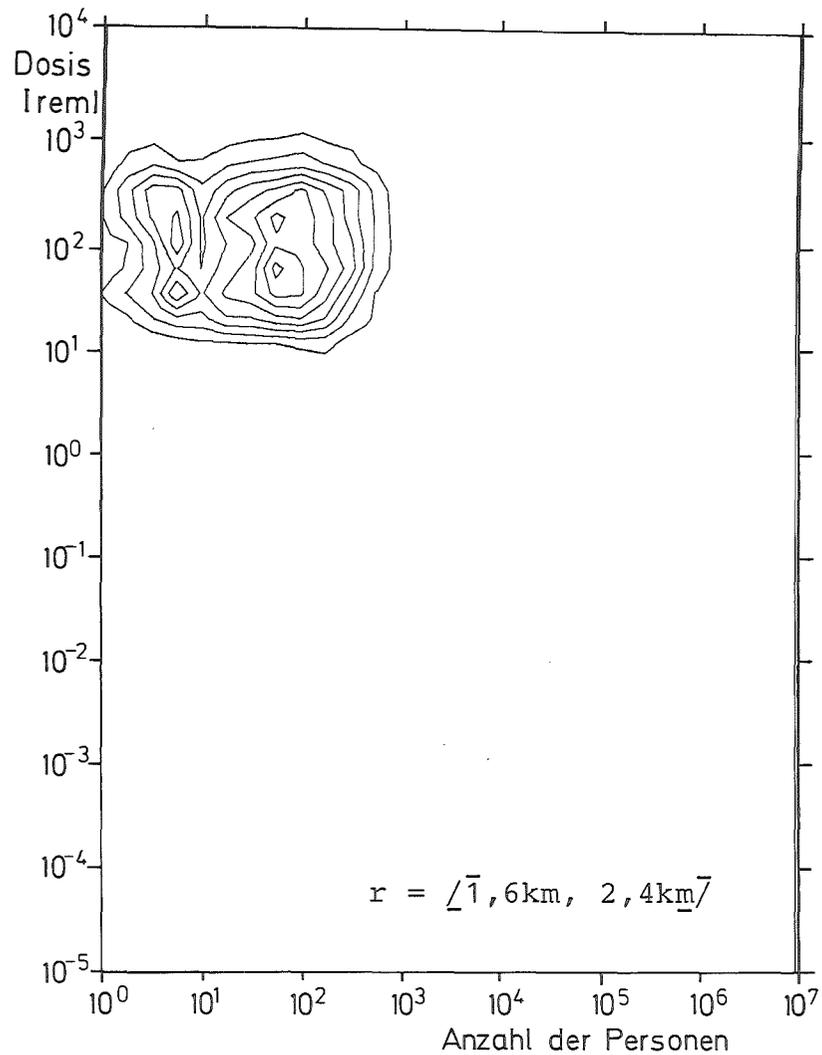
Integrationszeitraum: FS-relevant

Entfernung: s.o.

Abstand der Höhenlinien:  $5 \cdot 10^{-3}$

Stützstellen: 4/Dek.

Abb. 18a Höhenliniendarstellung der Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen nach stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2

Organ: GK

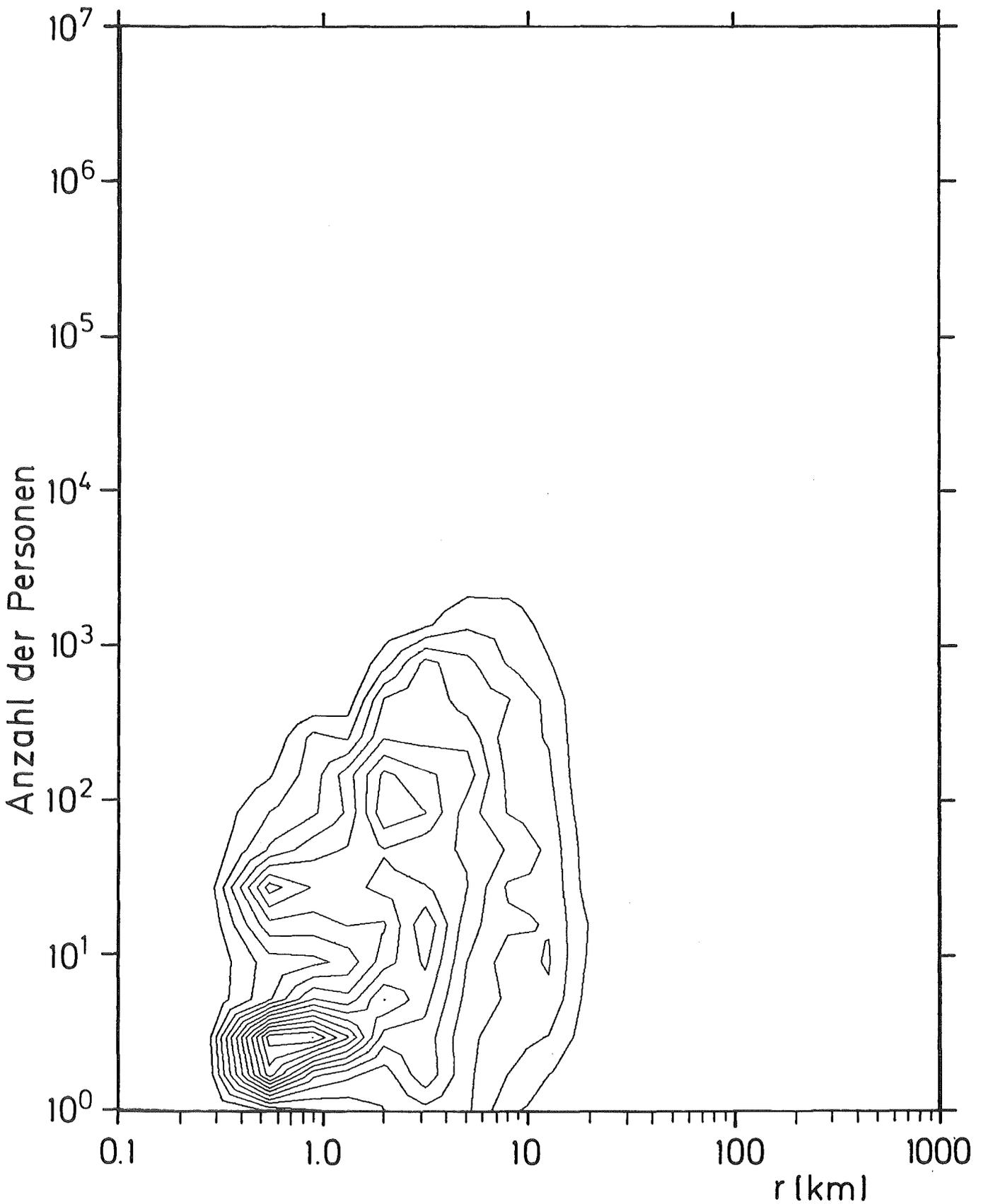
Integrationszeitraum: 50a

Entfernung: s.o.

Abstand der Höhenlinien:  $5 \cdot 10^{-3}$

Stützstellen: 4/Dek.

Abb.18b Höhenliniendarstellung der Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen nach stattgefundenener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2

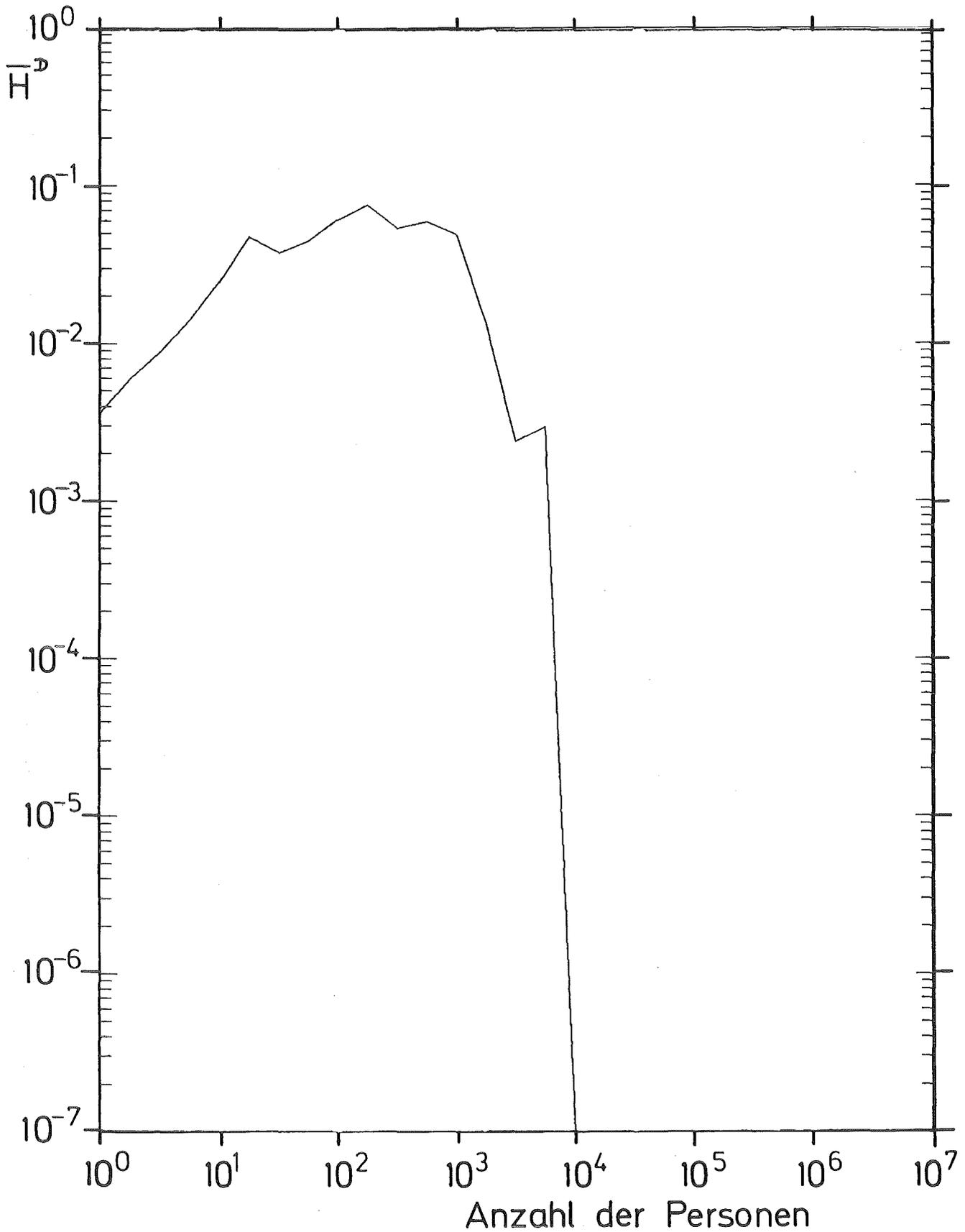
Organ: KM

Integrationszeitraum: FS-relev.

Schwellenwert: 100 rem

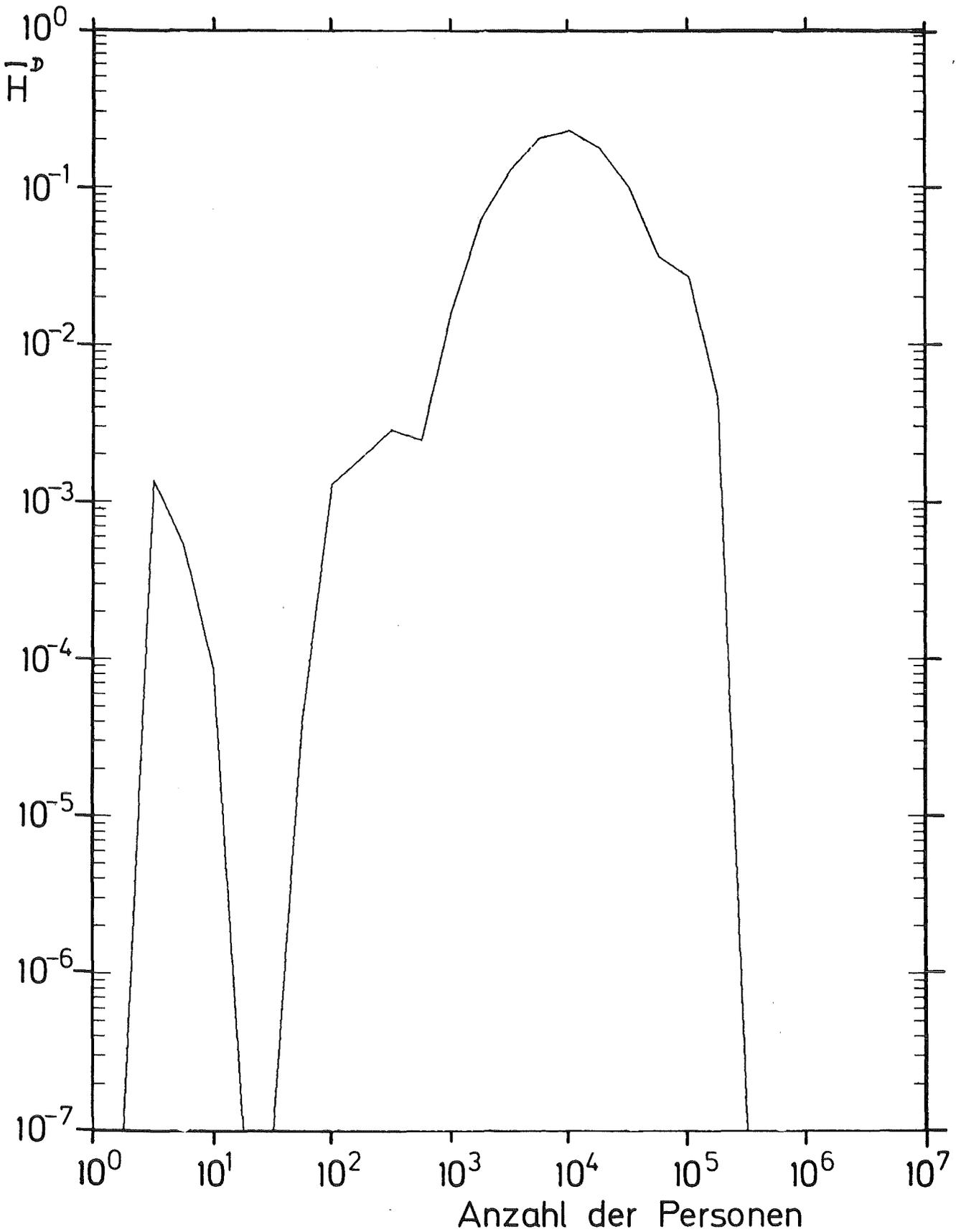
Abstand zweier Höhenlinien:  $5 \cdot 10^{-3}$

Abb. 19 Höhenliniendarstellung der Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen über dem Schwellenwert unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: GK  
Integrationszeitraum: 50a      Entfernung:  $\sqrt{1,6 \text{ km}, 2,4 \text{ km}}$   
Schwellendosis: 5 rem      Stützstellen: 4/Dek.

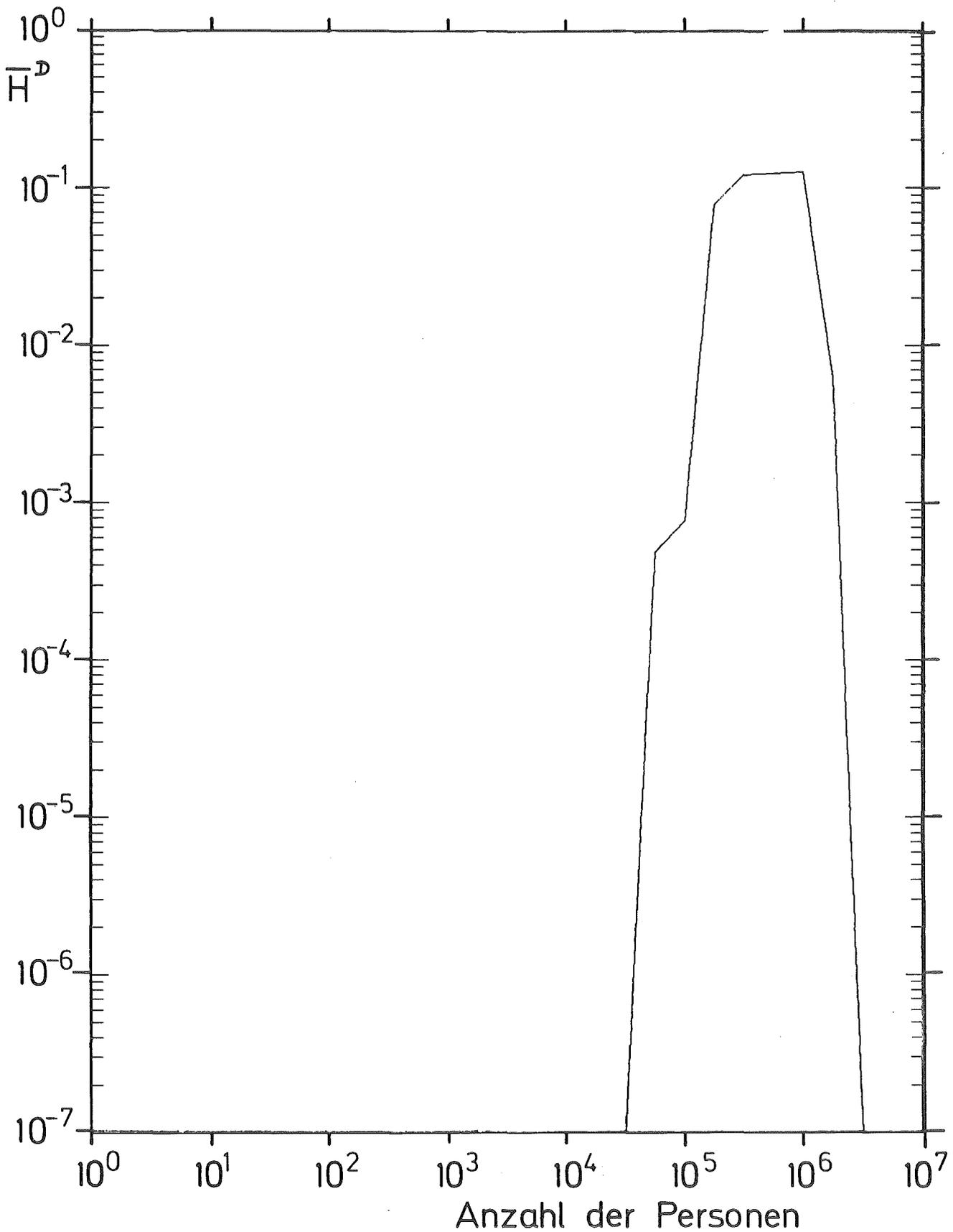
Abb.20a      Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen über dem Schwellenwert unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2  
Integrationszeitraum: 50a  
Schwellendosis: 5 rem

Organ: GK  
Entfernung:  $\sqrt[2]{16 \text{ km}, 24 \text{ km}}$   
Stützstellen: 4/Dek.

Abb. 20b Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen über dem Schwellenwert unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2

Organ: GK

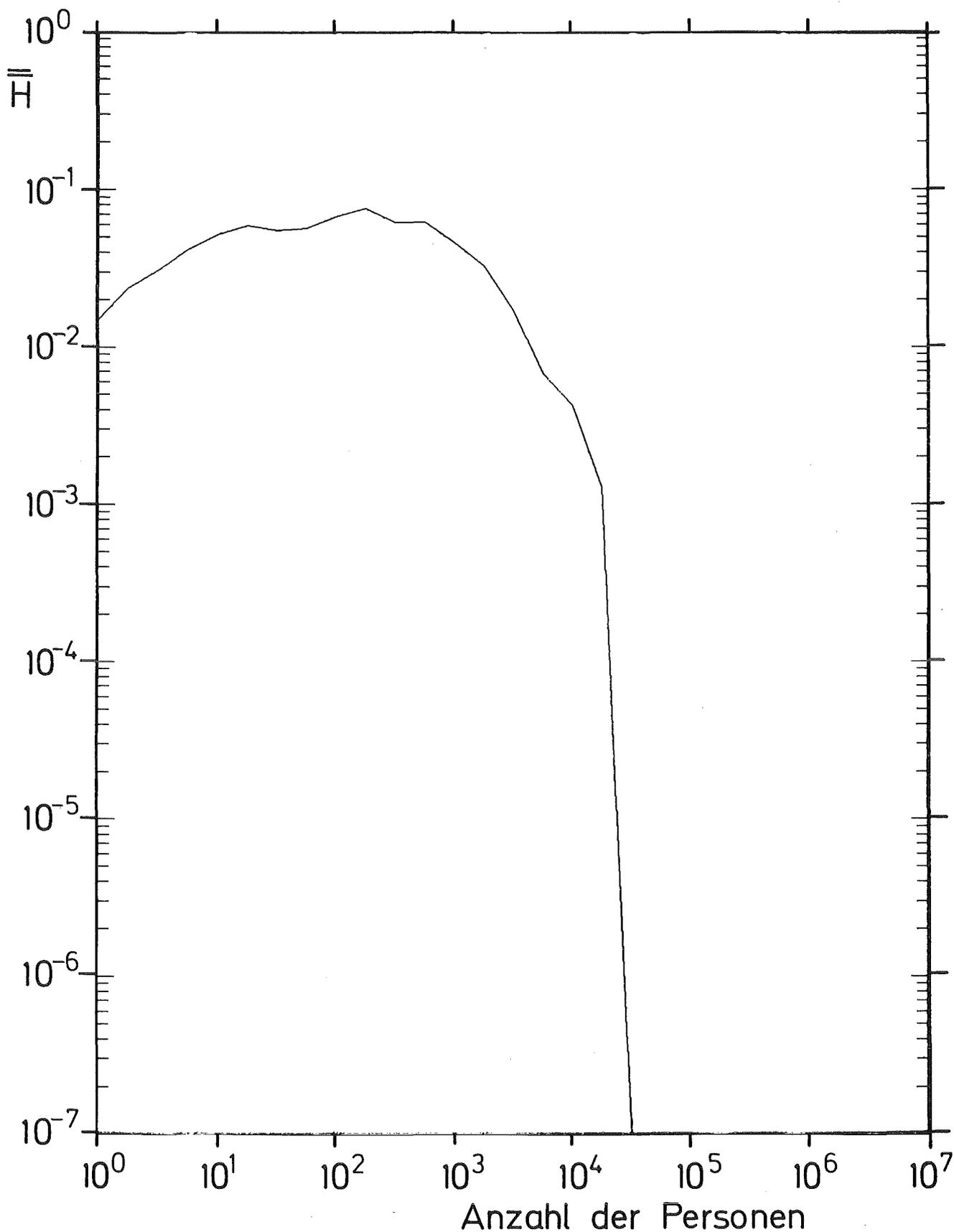
Integrationszeitraum: 50a

Entfernung:  $\angle 160 \text{ km}, 240 \text{ km}$

Schwellendosis: 5 rem

Stützstellen: 4/Dek.

Abb. 20c Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen über dem Schwellenwert unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2

Organ: KM

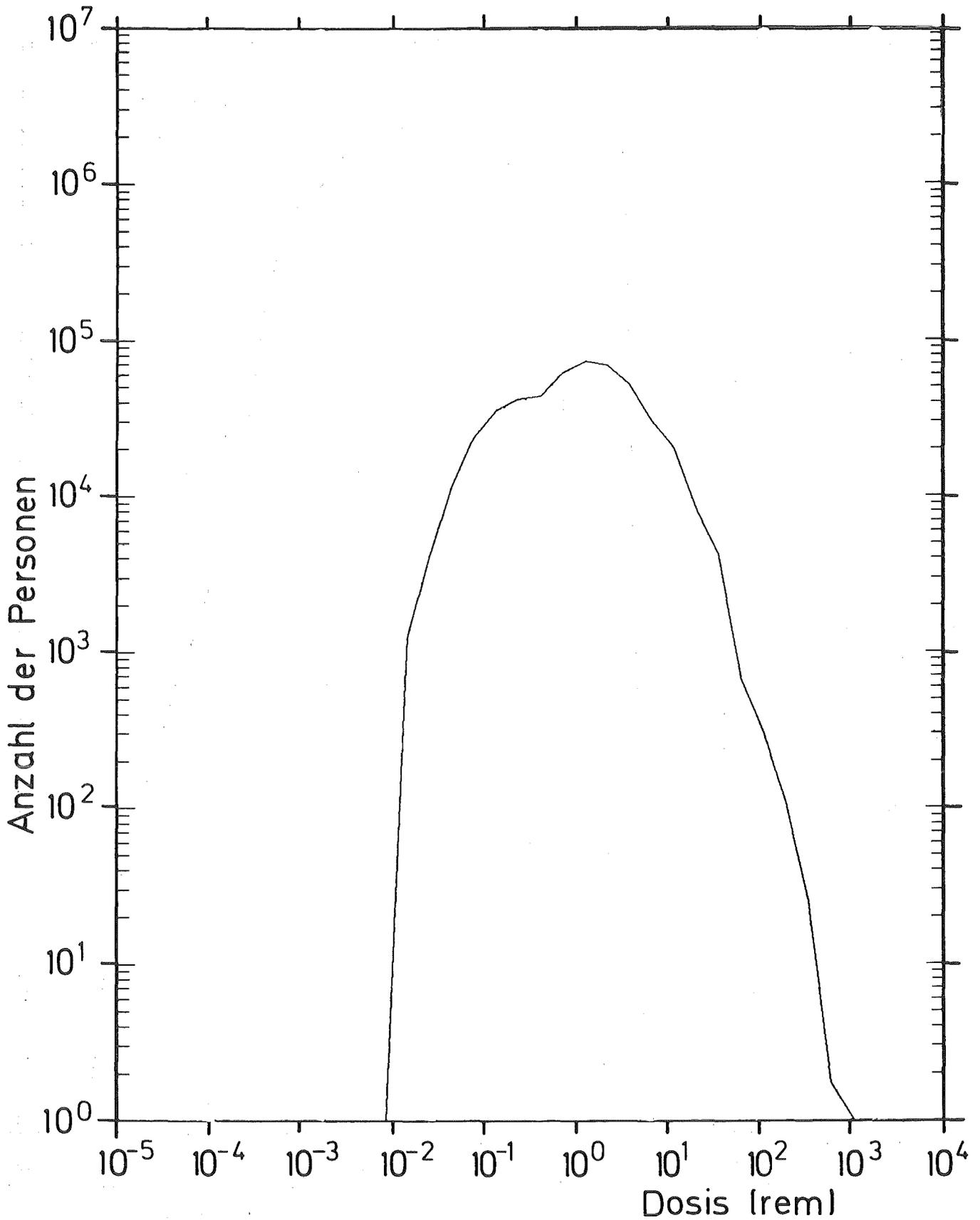
Integrationszeitraum: FS-relev.

Schwellenwert: 100 rem

Integration bis: 80 km

Stützstellen: 4/Dek.

Abb. 21 Klassenhäufigkeitsverteilung der Anzahl von Personen mit Organdosen über dem Schwellenwert unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2

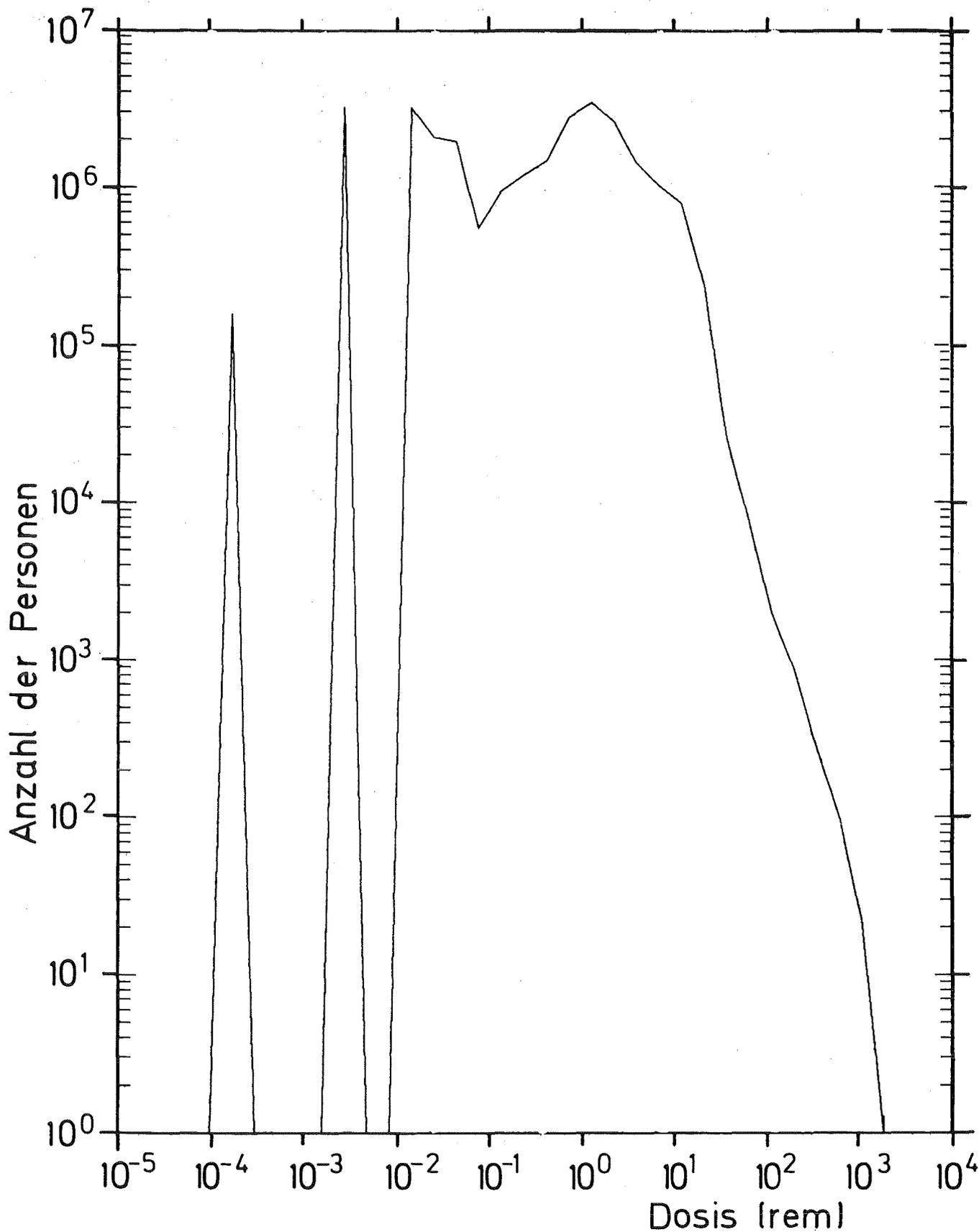
Organ: KM

Integrationszeitraum: FS-relev.

Stützstellen: 4/Dek.

Integration bis: 80 km

Abb. 22a Mittlere Anzahl von Personen mit Organdosen nach stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2

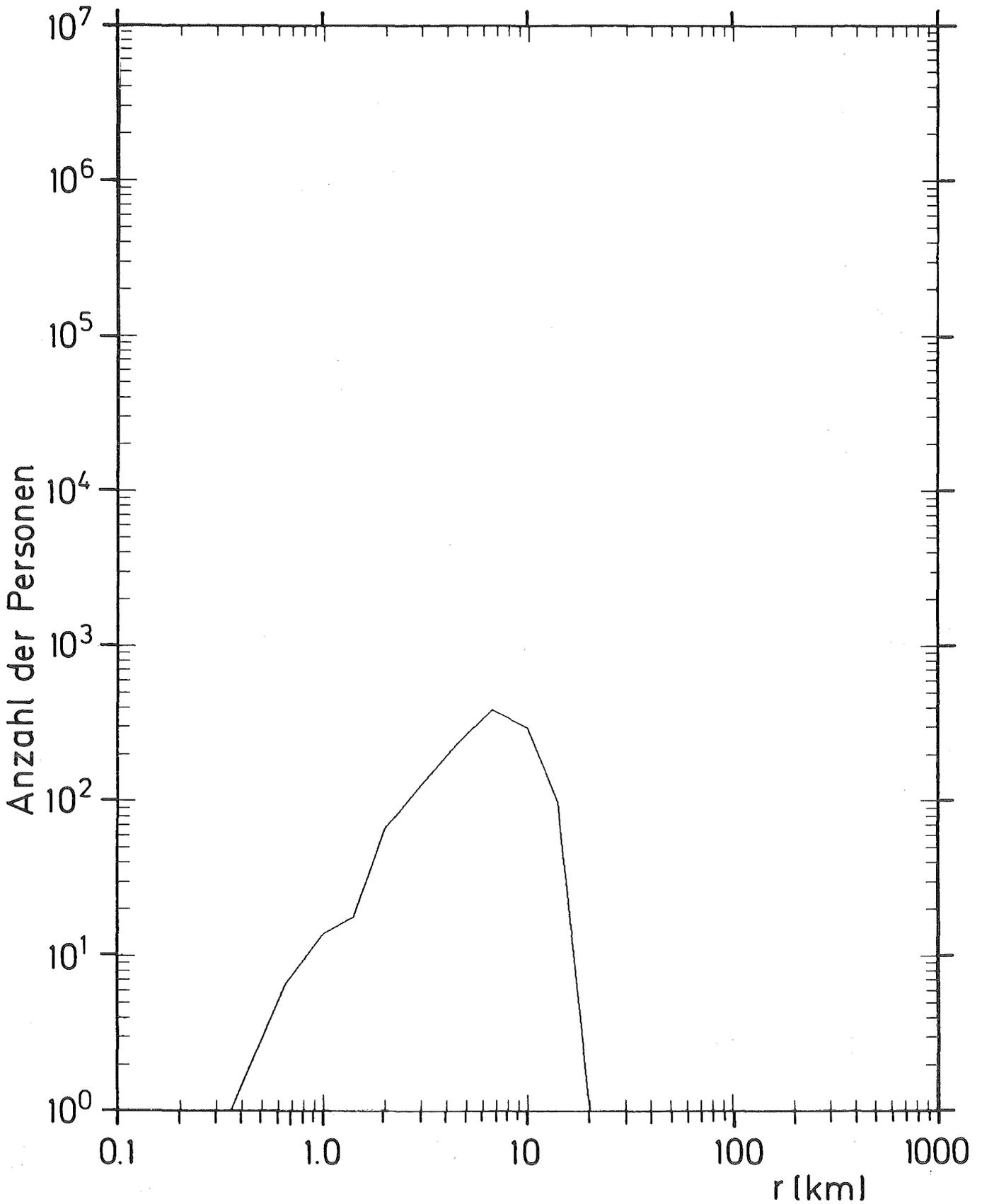
Integrationszeitraum: 50a

Integration bis: 540 km

Organ: GK

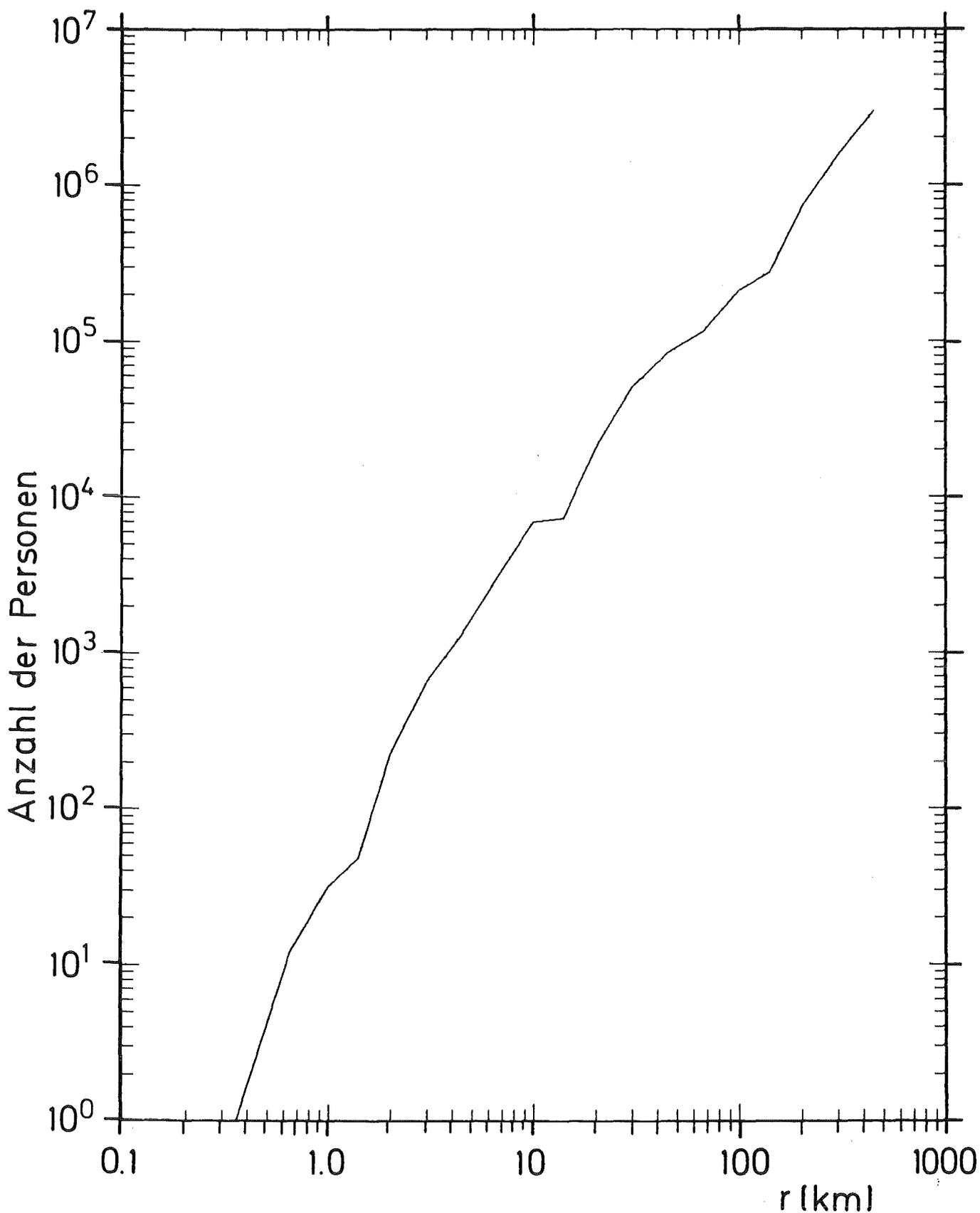
Stützstellen: 4/Dek.

Abb. 22b Mittlere Anzahl von Personen mit Organdosen nach stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2      Organ: KM  
Integrationszeitraum: FS-relev.      Schwellenwert: 100 rem

Abb. 23a    Mittlere Anzahl von Personen mit Organdosen über dem Schwellenwert unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung



Freisetzungskategorie: FK2

Organ: GK

Integrationszeitraum: 50a

Schwellenwert: 5 rem

Abb. 23b Mittlere Anzahl von Personen mit Organdosen über dem Schwellenwert unter der Voraussetzung stattgefundener Freisetzung