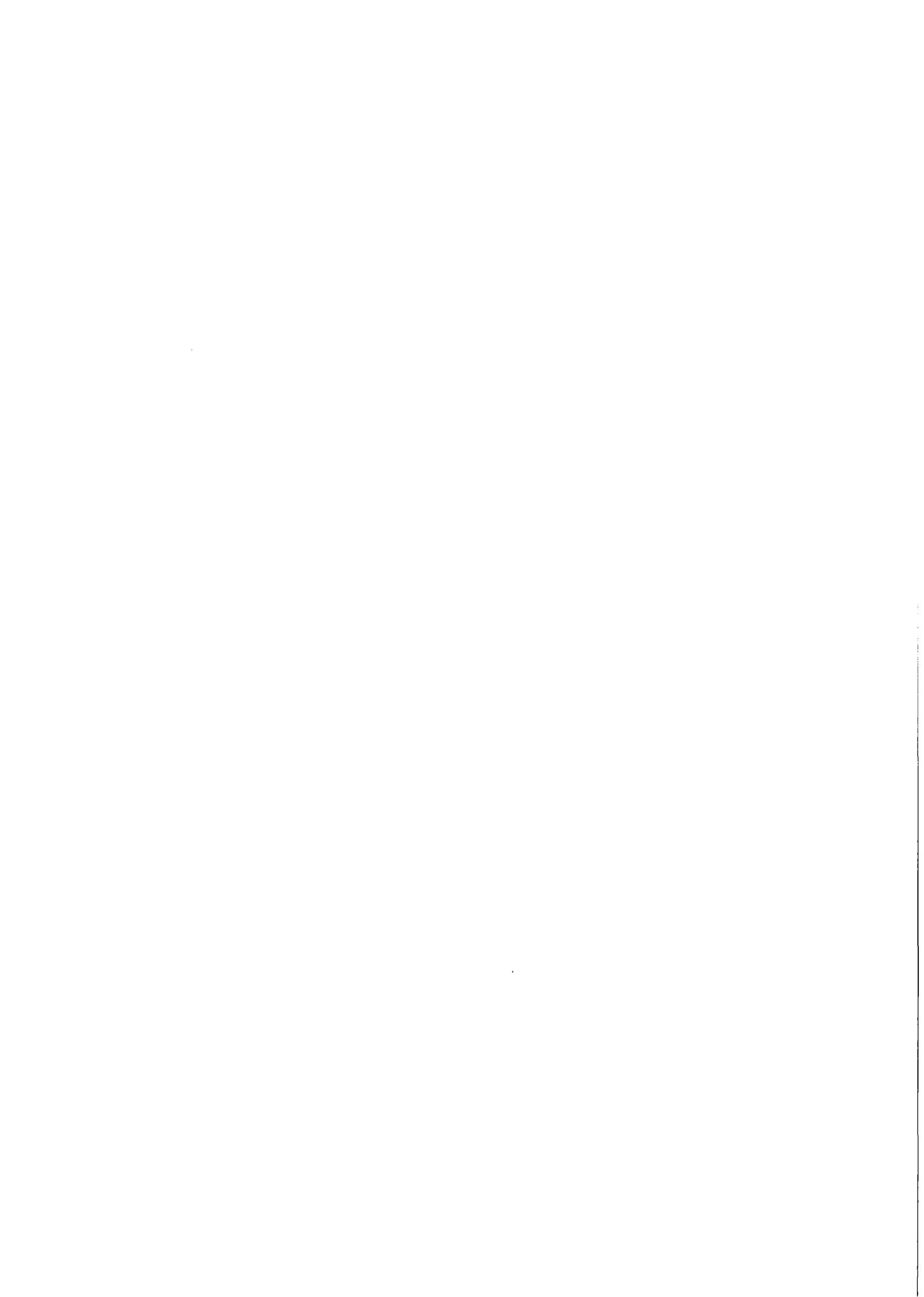


**KfK 3566**  
**November 1983**

# **Vergleich der Ausbreitungsmodelle UFOMOD und MESOS**

**S. Vogt, G. Neumann-Hauf**  
**Hauptabteilung Sicherheit**  
**Abteilung für Angewandte Systemanalyse**  
**Projekt Nukleare Sicherheit**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Sicherheit  
Abteilung für Angewandte Systemanalyse  
Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 3566

VERGLEICH DER AUSBREITUNGSMODELLE UFOMOD UND MESOS

S. Vogt, G. Neumann-Hauf

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

## Zusammenfassung

In der Deutschen Risikostudie für Kernkraftwerke wird zur Berechnung der Ausbreitung von Radionukliden in der Atmosphäre ein relativ einfaches Modell angewendet, das im Nahbereich um den Emittenten ( $\approx 20$  km) verifiziert wurde. Da die Berechnungen im Unfallfolgenmodell UFOMOD bis über 500 km Entfernung durchgeführt werden, erscheint es angebracht einen Vergleich mit einem Modell durchzuführen, das zur Berechnung des weiträumigen Transportes von Radionukliden bis zu 1000 km und mehr entwickelt wurde. Ein derartiges Modell ist das Trajektorien-Puffmodell MESOS. Die Verifikation des Modells erfolgte über den Vergleich von Messungen und Modellrechnungen in Europa zur Zeit des Windscale Unfalls.

UFOMOD und MESOS werden anhand berechneter Luftkonzentrationen von Edelgasen, abgelagerter bzw. noch in der Atmosphäre vorhandener Nuklidmengen sowie berechneter Bodenkontaminationen durch Caesium 137 und Jod-131 an wohldefinierten Orten in unterschiedlichem Abstand und Ausbreitungsrichtung vom Ort der Freisetzung (MESOS) und an wohldefinierten Orten in unterschiedlichem Abstand gemittelt über alle Ausbreitungsrichtungen (UFOMOD) miteinander verglichen (Freisetzungshöhe 10 m).

Im Mittelwert unterscheiden sich mittlere Luftkonzentrationen und Bodenkontaminationen um Faktoren kleiner als fünf. Vergleicht man die am Boden abgelagerten Nuklidmengen getrennt nur für die trockene bzw. nasse Deposition integral über alle Ausbreitungsrichtungen (MESOS und UFOMOD), so zeigen sich größere Modellunterschiede vor allem in der Berechnung der nassen Deposition. Die Abweichungen erreichen in diesem Falle den Faktor zwei. Wird dagegen die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Ort beaufschlagt wird, zusätzlich berücksichtigt, so unterscheiden sich beide Modelle an ausgewählten Orten um Faktoren bis 10.

Es wird gezeigt, wie mit Hilfe von zusätzlichen Informationen durch MESOS-Rechnungen die UFOMOD-Berechnungen verbessert und an die Realität angeglichen werden können.

## Comparison of the Atmospheric Dispersion Models UFOMOD and MESOS

### Abstract

The German Risk Study on Nuclear Power Plants uses a relatively simple model to calculate the atmospheric dispersion of radionuclides, which was verified in the near distance of the emitter (approx. 20 km). As the calculations in the UFOMOD accident consequence model are carried out for distances up to 500 km, it is advisable to compare it with a model developed for calculating long-distance transport of radionuclides up to 1000 km and above. The MESOS trajectory puff model is such a model. It was verified by comparisons of measurements and by model calculations performed in Europe at the time of the Windscale accident.

UFOMOD and MESOS are compared concerning the calculated airborne concentrations of noble gases, quantities of radionuclides deposited, or the fractions of radionuclides remaining in the atmosphere, respectively, as well as calculated ground-level contamination due to Cs-137 and I-131 at well-defined locations at different distances and directions from the point of release (MESOS) and at well-defined locations at different distances averaged over all directions of transportation (UFOMOD) (height of release 10 m).

On the average, the mean airborne concentration and ground-level contamination differ by a factor less than five. If one compares -- integrated overall deposited by dry deposition only without considering wet deposition during transport and vice versa integrated over all dispersion directions (MESOS and UFOMOD) considerable differences emerge between the models, especially concerning the calculation of wet deposition. Here, differences amount to a factor of two. However, if, in addition the probability of a location being exposed is also taken into account, the model differs by factors up to 10 at selected locations.

It is shown how UFOMOD calculations can be improved and adapted to reality by additional information from MESOS calculations.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Motivation für den Vergleich der Modelle	1
2. Beschreibung der Ausbreitungsmodelle	2
2.1 UFOMOD	2
2.2 MESOS	9
3. Modellvergleich	13
3.1 Anlage des Modellvergleichs	13
3.2 Spezifische Schwierigkeiten beim Vergleich der Modelle UFOMOD-MESOS	16
3.2.1 Meteorologische Daten für unterschiedliche Zeiträume	16
3.2.2 Unterschiedliche Freisetzungsdauer und ihre Bedeutung für die mittlere Breite der Fahne	16
3.2.3 Berechnung statistischer Kennzahlen an ausgewählten Orten aus unterschiedlichen Datenkollektiven	17
4. Ergebnisse	18
4.1 Luftkonzentration von Edelgasen	18
4.2 Abgelagerte bzw. noch in der Atmosphäre vorhandene Aktivitätsmenge	20
4.3 Bodenkontamination durch Aerosole und Jod	21
4.4 Erwartungswerte der Bodenkontamination	23
5. Schlußfolgerungen	25
6. Literatur	26

## 1. Motivation für den Vergleich der Modelle

In der Deutschen Risikostudie-Kernkraftwerke (DRS) wird das durch Störfälle in Kernkraftwerken verursachte kollektive Risiko ermittelt. Modellbeschreibung und Ergebnisse sind in /FA81/ und /HA80/ veröffentlicht. Das Risiko wird dargestellt anhand von Häufigkeitsverteilungen für somatische Fröhschäden (Tod durch akutes Strahlensyndrom), somatische Spätschäden (Tod durch Leukämie oder Krebs) und die genetische Belastung (genetisch signifikante Dosis).

Zur Berechnung der gesundheitlichen Schäden wird die Ausbreitung und Ablagerung radioaktiver Schadstoffe nach einer unfallbedingten Freisetzung der Schadstoffe in die Atmosphäre bis in eine Entfernung von 540 km verfolgt. Das hierzu verwendete Modell wurde in einem Entfernungsbereich bis etwa 20 km verifiziert. (Eine detaillierte Beschreibung dieses Modells erfolgt in Abschnitt 2.1.) Dieses einfache Modell wurde bisher auch für Rechnungen in größere Entfernungen angewendet, da jenseits von etwa 20 km nur noch Spätschäden auftreten. Deren Anzahl ist wegen der linearen Dosis-Risiko-Beziehung in erster Näherung unabhängig davon, ob eine gegebene Aktivitätsmenge bei sonst gleichen Randbedingungen auf einem schmalen oder breiten Sektor verteilt wird. Dies gilt streng ab 80 km Entfernung, da für Entfernungen größer als 80 km für die Berechnung von Schäden in der DRS die Bevölkerung in azimuthaler Richtung gleichverteilt angenommen wurde.

Diese Annahme der linearen Beziehung zwischen Dosis und Risiko ohne Schwellwert bis zur Dosis null wird möglicherweise in Phase B der DRS geändert. Neuere Erkenntnisse /KE82/ und /OB82/ schlagen nichtlineare Funktionen und teilweise auch die Einführung von Schwellenwerten vor. Daher wird es notwendig sein, die Aktivitätskonzentration in der Luft und die Bodenkontamination auch in größerer Entfernung vom Emittenten genauer zu berechnen.

Als Modell bietet sich das Trajektorien-Puff-Modell MESOS mit seiner meteorologischen Datenbasis für den europäischen Bereich an. (Eine detaillierte Beschreibung dieses Modells erfolgt in Abschnitt 2.2.) Das Modell wurde anhand der Daten des Windscale-Störfalls über Hunderte von Kilometern verifiziert /AP80/. Im vorliegenden Bericht wird untersucht, wie gut die Berechnungen des MESOS-Modell und des bisherigen Ausbreitungsmodells in der DRS übereinstimmen.

## 2. Beschreibung der Ausbreitungsmodelle

### 2.1 UFOMOD

Das in der Deutschen Risikostudie - Kernkraftwerke (DRS) in Phase A verwendete Modell zur Beschreibung der atmosphärischen Ausbreitung und Ablagerung ist ein Teilmodell des Unfallfolgenmodells UFOMOD. Abb. 1 enthält ein Schema des Unfallfolgenmodells und zeigt das Zusammenwirken der vier Teilmodelle:

- Modell der atmosphärischen Ausbreitung und Ablagerung,
- Dosismodell,
- Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen,
- Modell der gesundheitlichen Schäden.

Eine detaillierte Beschreibung von UFOMOD ist in /FA81/ zu finden. In /V082/ ist speziell das Teilmodell der atmosphärischen Ausbreitung und Ablagerung radioaktiver Schadstoffe ausführlicher beschrieben.

Nachfolgend wird dieses Teilmodell in seinen Grundzügen beschrieben:

Ausgehend von einem Freisetzungsprofil werden die Aktivitätskonzentration und die Bodenkontamination im Lee der Reaktoranlage berechnet. Vereinfachend wird angenommen, daß die Verteilung der Aktivität in einem Schnitt senkrecht zur Transportrichtung durch eine Gaußverteilung approximiert werden kann, und zwar sowohl horizontal als auch vertikal. Breite und Höhe der Aktivitätsfahne werden durch die Standardabweichungen  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$ , die sog. Ausbreitungsparameter, beschrieben. Dieses Modell (kurz "Gaußmodell") ist experimentell in einem Bereich bis etwa 20 km abgesichert, sofern keine besonderen meteorologischen Situationen vorliegen. Es zeigte sich, daß das Auftreten von Frühschäden, bei denen eine zuverlässige Ermittlung der Äquivalentdosis notwendig ist, etwa in diesem Entfernungsbereich zu erwarten ist.

Auch in Entfernungen über 20 km wird dasselbe Modell verwendet. Es gibt einige experimentelle Ergebnisse, die der Anwendbarkeit auch in größeren Entfernungen nicht grundlegend widersprechen, außerdem ist für das Ergebnis - die Zahl der Spätschäden - die genaue Kenntnis der horizontalen Konzentrations- bzw. Dosisverteilung aufgrund weiterer vereinfachender Annahmen in den Folgemodellen nicht entscheidend. Wegen der linearen Dosis-Risiko-Beziehung für somatische

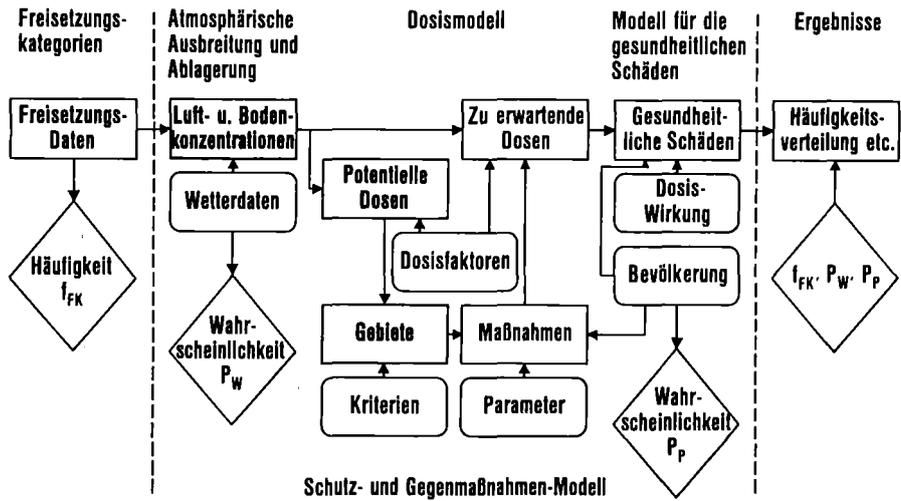


Abb. 1: Schema des Unfallfolgenmodells.

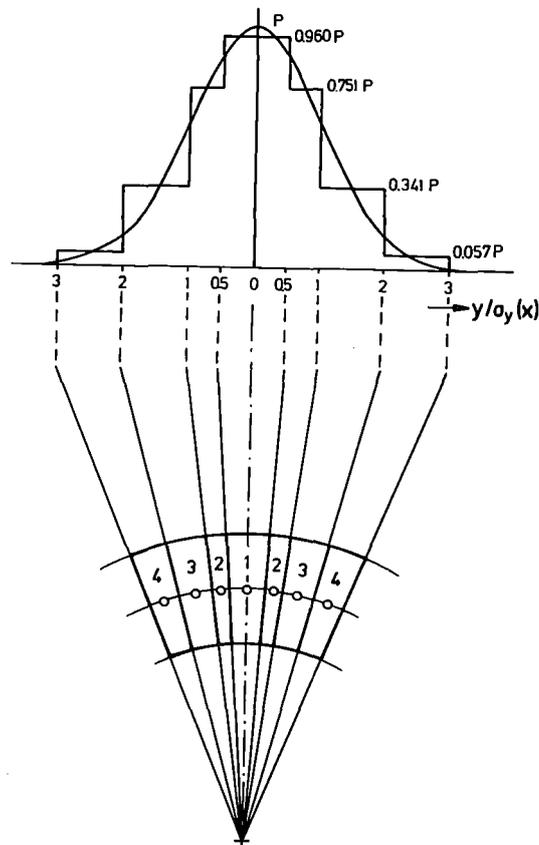


Abb. 2: Approximation der Gaußverteilung durch eine Treppenkurve.

Spätschäden ohne Schwellenwert kommt es weniger auf die unterschiedlichen Aktivitätskonzentrationen, sondern auf die insgesamt abgelagerte Aktivität an. Diese ist, abgesehen von gewissen Schwankungen der Transportzeit, proportional der freigesetzten Menge.

Da im Schutz- und Gegenmaßnahmen-Modell die Bevölkerungszahlen jeweils für bestimmte Flächen (Kreissegmente) vorliegen, müssen die für solche Flächen gemittelten Dosen berechnet werden. Daher wird die stetige Verteilung der Aktivitätskonzentration in azimuthaler Richtung durch eine Treppenfunktion ersetzt. Die Anzahl der Stufen ist sieben (s. Abb. 2). In Abb. 2 sind schematisch unter den Stufen die Bevölkerungsfelder (numeriert von 1 bis 7) in einem gegebenen Entfernungsbereich eingezeichnet.

Horizontaler und vertikaler Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  sind ein Maß für Breite und Höhe der Aktivitätsfahne. Die in UFOMOD verwendeten Ausbreitungsparameter wurden in Feldexperimenten im Umkreis des Kernforschungszentrums Karlsruhe bestimmt /TH76a/ und /TH76b/. Sie sind repräsentativ für ein Gelände mit rauher Oberfläche (Wald, Besiedelung), dessen Rauheitslänge  $z_0$  mindestens 1 m beträgt. Für weniger rauhes Gelände am Ort der Quelle wie man es an Standorten in der Norddeutschen Tiefebene vorfindet, werden diese Parameter nach einem in /NE77/ angegebenen Verfahren modifiziert. Die Rauheitslänge ist dabei mit 30 cm angenommen. Die vertikale Diffusion wird im allgemeinen durch eine Sperrschicht begrenzt. Deren Höhe, die sog. Mischungsschichthöhe, wird als abhängig von der Ausbreitungskategorie angenommen. Unter dieser Schicht bildet sich schließlich ein konstantes Vertikalprofil der Schadstoffkonzentration aus. Die Unterbindung der weiteren vertikalen Diffusion wird rechnerisch dadurch simuliert, daß der vertikale Ausbreitungsparameter  $\sigma_z$  bei Erreichen eines von der Ausbreitungskategorie abhängigen Wertes  $\sigma_{z,max}$  konstant gehalten wird. Eine Verminderung der Bodenkonzentration erfolgt danach nur noch durch die horizontale Ausbreitung.

Während einer vielstündigen Passage der Aktivitätsfahne ändert sich die Form (Breite und Höhe) der Fahne sowie deren Aufstiegshöhe und Transportgeschwindigkeit. Für die ersten drei Stunden eines Wetterablaufs ist die Form der Aktivitätsfahne in der Seitenansicht (Abb. 3) sowie in der Draufsicht (Abb. 4) schematisch dargestellt.

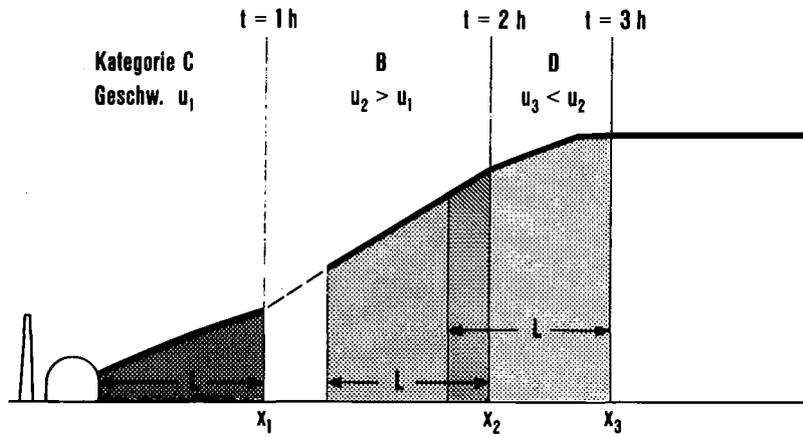


Abb. 3: Seitenansicht der Aktivitätsfahne,

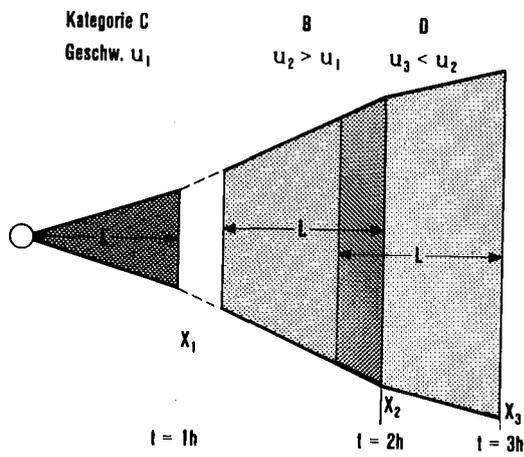


Abb. 4: Draufsicht der Aktivitätsfahne.

Für die Berechnung der Form der Aktivitätsfahne werden stündlich gemessene Wetterdaten (Windgeschwindigkeit, Ausbreitungskategorie, Niederschlag am Ort der Quelle) benutzt.

Die anfängliche Ausbreitungsrichtung wird im weiteren Verlauf im Modell der Phase A nicht geändert. Für die anfängliche Ausbreitungsrichtung wird eine Windrichtungsgleichverteilung angenommen. Diese Annahme wird dadurch realisiert, daß die Ausbreitungsrichtung mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf jeweils die Sektorenmitte von 36 Zehn-Grad-Sektoren fällt. Die für einen Wetterablauf errechneten Konzentrations- bzw. Kontaminationsfelder werden bei der Berechnung von Frühschäden somit 36 mal mit der relevanten Bevölkerungsverteilung gefaltet.

UFOMOD enthält eine Option, die es gestattet die Trajektorien der Aktivitätsfahne zu approximieren. Diese Option stellt kein Trajektorienmodell im eigentlichen Sinne dar, sondern verhindert bei mehrstündiger Freisetzung lediglich eine mögliche Überschätzung der Aktivitätskonzentrationsfelder.

Bei Anwendung dieser Option werden nämlich im Falle mehrstündiger Freisetzung die Aktivitätskonzentrationsfelder der einzelnen Fahnen nicht vollständig überlagert, sondern es werden die Windrichtungsdifferenzen aufeinanderfolgender Fahnen bei der Überlagerung berücksichtigt. Bei einer einstündigen Freisetzung ist diese Option nicht wirksam, da in diesem Fall keine Überlagerung erfolgt.

Eine weitere Modellverbesserung, die aber in Phase A der Risikostudie nicht angewendet wurde, betrifft die Vorgabe einer realen Windrichtungsverteilung am Ort der Quelle. An Stelle der Gleichverteilung der Windrichtung kann die tatsächliche Verteilung am jeweiligen Standort eingesetzt werden. Die Richtungsverteilung des geostrophischen Windes könnte dann gewählt werden, wenn in einigen hundert Kilometern Entfernung von der Quelle die Eintrittshäufigkeiten der errechneten Konzentrationen realistisch ermittelt werden sollen. In Abschnitt 4.4 wird gezeigt, wie diese Forderung z.B. mit Hilfe von Häufigkeitsverteilungen der Trajektorienzugrichtung an einem betrachteten Aufpunkt erfüllt werden kann.

Die effektive Emissionshöhe wird nach Ansätzen von Briggs /BR69, BR70/ berechnet. Da bei Unfällen die Freisetzung meist in Bodennähe erfolgt, werden die Briggsschen Formeln, die zunächst für Kamine gelten, modifiziert. Nach Nester /NE78/ wird der aufstiegshemmende Einfluß der Gebäude dadurch berücksichtigt, daß in die Formeln von Briggs ein negativer Summand eingeht, der der Ausdehnung der Flächenquelle entspricht. Der Einfluß der Zerfallsenergie der Spaltprodukte auf den Aufstieg wird seines anfänglich geringen Beitrags wegen vernachlässigt.

Sowohl bei der Berechnung der Konzentration als auch bei der Ermittlung der Aufstiegshöhe ist eine mittlere Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  einzusetzen. Zur Berechnung von  $\bar{u}$  wird das Windprofil über die effektive Emissionshöhe gemittelt. Der Windprofilexponent variiert dabei in Abhängigkeit der Ausbreitungskategorie zwischen 0,07 und 0,44.

Durch trockene und nasse Deposition wird die Schadstoffmenge in der Fahne vermindert. Zur Bestimmung des Anteils der trockenen Deposition wird das sogenannte "source depletion"-Modell verwendet. Die Schadstoffmenge in der Fahne wird jeweils um den Betrag verringert, der sich ablagert. Die Proportionalitätskonstante zwischen Ablagerungsrate und momentaner boden-naher Luftkonzentration stellt dabei die Ablagerungsgeschwindigkeit dar.

Zusätzlich zur trockenen Deposition werden im Falle von Niederschlag verstärkt Schadstoffpartikel oder Radionuklide am Boden abgelagert. Die Menge der durch Niederschlag ausgewaschenen und auf dem Flächenelement  $dF$  abgelagerten Aktivität ist proportional der Konzentration der Aktivität in der über  $dF$  befindlichen Luftsäule der Aktivitätsfahne. Es wird eine exponentielle Abnahme der Aktivitätskonzentration bei Niederschlag angenommen.

Die Zeitkonstante wird allgemein als Washoutkoeffizient bezeichnet. Dieser Washoutkoeffizient ist abhängig von der Niederschlagsintensität, die den stündlich am Ort der Quelle gemessenen Wetterdaten entnommen wird.

In einer Risikostudie, die mit probabilistischen Methoden arbeitet, muß bei der Berechnung der Unfallfolgen das Spektrum aller Wetterabläufe betrachtet werden. Theoretisch gibt es - bei einem kleinsten Zeitschritt von 1 h - 8760 verschiedene Wetterabläufe während eines Jahres, da zu jeder Stunde ein Unfall mit einem anderen Wetterablauf starten kann. Die Auswahl der zu berücksichtigenden Wetterabläufe muß einerseits repräsentativ für deren Vielfalt sein und auch extreme Situationen (z.B. starken Niederschlag) statistisch richtig wiedergeben. Andererseits darf die Anzahl aus praktischen Gründen nicht zu groß sein. Es hat sich gezeigt, daß beiden Forderungen durch eine zyklische Verschiebung der Startzeit um jeweils  $t$  Stunden Rechnung getragen wird. In der Deutschen Risikostudie wurde  $t = 77$  h gesetzt. Dies ergibt bei Verwendung der Wetterdaten eines Jahres 115 Wetterabläufe. Für den vorliegenden Modellvergleich wurde ein Wert von 7h für  $t$  gewählt; siehe hierzu auch Abschnitt 3.1.

Stündliche Werte der Windgeschwindigkeit, der Ausbreitungskategorie und der Niederschlagsintensität für mindestens ein Jahr sind nur an einer begrenzten Zahl von Meßstationen vorhanden. Die meteorologischen Daten des Meßortes, der im günstigen Fall mit dem Kernkraftwerksstandort zusammenfällt, werden als gültig für den gesamten Transportweg der Aktivitätsfahne angenommen. Diese Modelleigenschaft ist eine sehr grobe Vereinfachung der Realität.

## 2.2 MESOS

Eine der Schwierigkeiten in der Berechnung des weiträumigen Schadstofftransports und der Ausbreitung ist die Tatsache, daß mit zunehmender Entfernung von der Quelle die meteorologischen Bedingungen am Standort der Quelle an Bedeutung verlieren. Am Imperial College, London wurde daher das Trajektorien-Puffmodell MESOS entwickelt, das die räumlichen und zeitlichen Änderungen der meteorologischen Bedingungen in der atmosphärischen Grenzschicht während des Transports der freigesetzten Schadstoffe berücksichtigt. Das Modell berechnet die Exposition im Lee einer Punktquelle, die kontinuierlich eine Folge von Puffs oder auch nur kurzzeitig einzelne Puffs in die Atmosphäre emittiert, bis in eine Entfernung von 1000 km und mehr. Das Modell verwendet dazu empirische sowie einfache analytische Ansätze und baut auf den 3-stündigen synoptischen Daten\* und dem an den Bodenstationen gemessenen Luftdruck für das Jahr 1973/74 zwischen  $44^{\circ}$  und  $62^{\circ}$ N sowie  $10^{\circ}$ W und  $20^{\circ}$ O auf /WR79/. Radioaktiver Zerfall sowie Entstehung, Zerfall und Deposition von Tochternukliden und deren Töchtern wird in der vom Kernforschungszentrum Karlsruhe weiter entwickelten Modellversion berücksichtigt. Das Modell besteht aus zwei Teilen, einem rein Lagrangeschen Teil, in dem der Weg freigesetzter Puffs sowie die individuelle Entwicklung der Puffs in vertikaler Richtung (vertikale Säule) entsprechend den atmosphärischen Grenzschichtbedingungen berechnet wird, und einem Eulerschen Teil, in dem die Entwicklung der Fahne in lateraler Richtung und die Schadstoffimmission an einzelnen Punkten innerhalb eines Gitters ermittelt wird.

### a) Puffentwicklungsmodul (PDM)

Der Wind, mit dem ein Puff in der Atmosphäre transportiert wird, errechnet sich aus dem vertikalen Windprofil, wie es sich aufgrund der Bedingungen am unteren Rand der Atmosphäre (Land oder See), der atmosphärischen Stabilität und der reibungsfreien Strömung in der Höhe (geostrophischer Wind), ermittelt aus dem Bodendruckfeld, einstellt. Es handelt sich hierbei um einen über die vertikale Erstreckung des Puffs gemittelten Wind.

---

\* Temperatur, relative Feuchte, "gegenwärtiges Wetter" (verschlüsselt), Bedeckungsgrad, Höhe der Wolkenuntergrenze.

Die vertikale Verbreiterung eines Puffs wird über  $\sigma_z$ -Parameter berechnet, entsprechend der sich zeitlich ändernden atmosphärischen Stabilität solange, bis der Schadstoff den Boden oder die Obergrenze der Mischungsschicht erreicht. Die untere und obere Berandung des Ausbreitungsgebietes ist undurchlässig. Die nachfolgende vertikale Entwicklung des Puffs wird von der Änderung der Obergrenze der Mischungsschicht mit der Höhe bestimmt. Schadstoff kann mit zunehmender Höhe der Mischungsschichtobergrenze in höhere Luftschichten transportiert werden. Dort verbleibt er, wenn sich die Mischungsschichtobergrenze absenkt. Schadstoff, der sich oberhalb der Mischungsschicht befindet, kann somit nicht über die trockene Deposition am Boden abgelagert werden. Erst mit erneutem Anwachsen der Mischungsschichtobergrenze kann der zuvor oberhalb der Mischungsschichtobergrenze isolierte Schadstoff erneut der Mischungsschicht zugeführt werden. Dies kann in großen Entfernungen zu hohen Konzentrationen in Bodennähe führen (s. Abb. 6). Die vertikale und laterale Verbreiterung des Puffs sowie die trockene und nasse Deposition von Schadstoff und der radioaktive Zerfall führen zu einer Verdünnung und Reduktion der Schadstoffmenge in einem Puff. Innerhalb der Mischungsschicht verwendet man ein konstantes Konzentrationsprofil. Durch die Einführung einer effektiven Depositionsgeschwindigkeit, d.h. einer Depositionsgeschwindigkeit, die um einen stabilitätsabhängigen Widerstandsterm erweitert ist, berücksichtigt das Modell insbesondere bei stabiler Schichtung über See, die Verminderung des Schadstoffflusses zum Boden ("source depletion"). Die nasse Deposition ist je nach Schadstoff ein bedeutender Abreicherungsmechanismus und wird über eine von der Niederschlagsintensität und -andauer abhängigen Niederschlagsrate am Ort des Ereignisses berücksichtigt.

#### b) Expositionsmodul (PEM)

Eine kontinuierliche Schadstoffemission über eine Periode von 3 Stunden simuliert das MESOS Modell über die atmosphärische Schadstoffausbreitung einer Reihe von Puffs, die kontinuierlich innerhalb dieser 3 Stunden freigesetzt werden. Diese Puffs bewegen sich zwischen den beiden Trajektorien, die für Puffs  $P_1$  und  $P_2$  berechnet werden, die zum Zeitpunkt  $t_0$  und  $t_0 + \Delta t$  gestartet wurden ( $\Delta t = 3 \text{ h}$ ). Sie definieren eine Fahne. Das Gebiet zwischen diesen Trajektorien wird vollständig von der Schadstofffahne überstrichen.

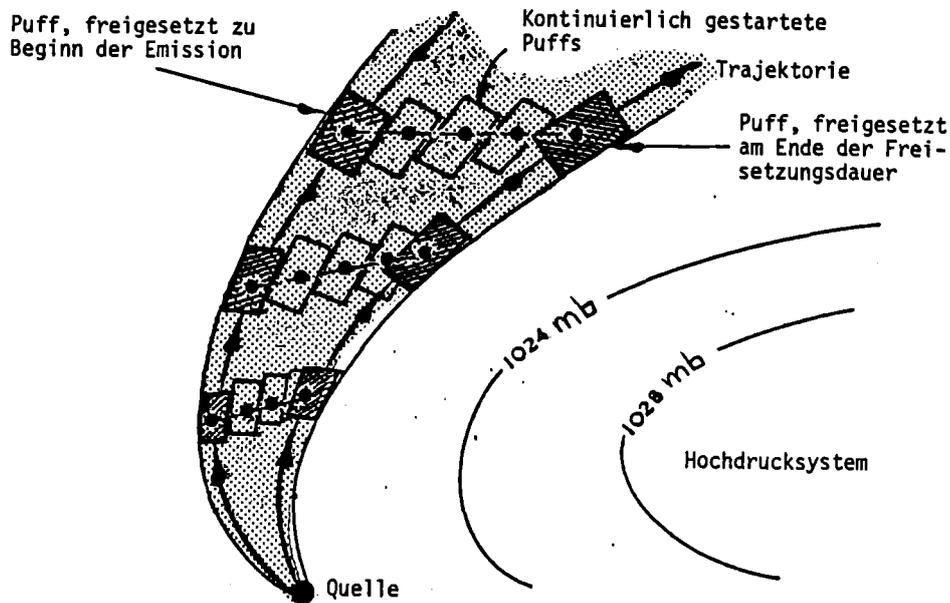


Abb. 5: Laterale Verbreiterung der Fahne.

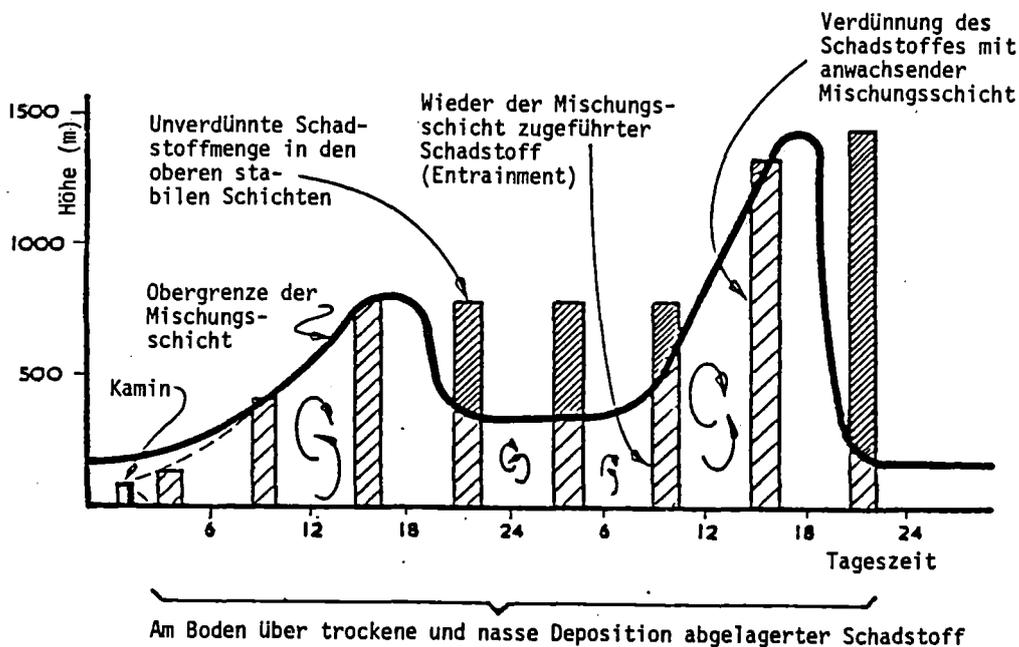


Abb. 6: Vertikale Ausbreitung der Fahne.

Abb. 5 und 6: Modellierung der Schadstoffausbreitung in MESOS während des weiträumigen Transportes.

Die synoptische laterale Verbreiterung der Fahne wird damit explizit über die Divergenz der aufeinanderfolgenden Trajektorien beschrieben. Die turbulente Diffusion der einzelnen Puffs in lateraler Richtung führt zu einer Verbreiterung der Schadstofffahne über die begrenzenden Trajektorien hinaus (s. Abb. 5).

Entsprechend der Entwicklung der Puffs  $P_1$  und  $P_2$  der begrenzenden Trajektorien werden die zeitlich integrierte atmosphärische Schadstoffkonzentration sowie die trockene und nasse Deposition innerhalb des Gebietes berechnet, das die Fahne überstreicht. Nimmt man an, ein Puff beinhalte die Schadstoffmenge  $Q(t)^*$  über die Mischungsschicht verteilt, wenn er über einen Punkt R streiche. Je nach longitudinaler Erstreckung des Puffs  $L$  und der Transportgeschwindigkeit  $u$  zum Zeitpunkt des Überstreichens von R errechnet sich die Immissionsandauer am Punkt R. Demnach ergibt sich die zeitlich integrierte atmosphärische Schadstoffkonzentration aufgrund eines einzigen Puffs zu

$$\frac{Q(t_0, t)}{B \cdot L \cdot h} \cdot \left(\frac{L}{u}\right) = \frac{Q(t_0, t)}{B \cdot u \cdot h}$$

$B$  bezeichnet die Breite des Puffs,  $h$  seine vertikale Erstreckung. Alle Puffs, die in einem Abstand kleiner als ihre halbe Puffbreite an dem Punkt R vorüberziehen, tragen zur Immission an diesem Punkt bei. Die Summe der zeitlich integrierten Konzentrationen und Depositionen einer Freisetzung über den Zeitraum ( $\Delta t$ ) berechnet sich demnach wie folgt:

Zeitlich integrierte Konzentration:  $\psi_r \left[ \frac{Q}{B \cdot u \cdot h} \right]$

Trockene Deposition:  $\psi_r \left[ \frac{v_e Q}{B \cdot u \cdot h} \right]$

$v_e$  - effektive Depositionsgeschwindigkeit

---

\*  $t$  ist die seit dem Zeitpunkt der Freisetzung verstrichene Zeit.

Nasse Deposition;

$$\psi_r \begin{bmatrix} \lambda & Q \\ B & u \end{bmatrix}$$

$\lambda$ - Washoutkoeffizient

$\psi_r$  bezeichnet den Anteil der Freisetzung, der zur Immission am Punkt R beiträgt.

Die Immission aufgrund andauernder Emissionen wird als Überlagerung der Immissionen aufeinanderfolgender 3-stündiger Freisetzungen simuliert. Eine zeitlich variierende Quellstärke kann über eine geeignete Wichtung der aus einer 3-stündigen Freisetzung resultierenden Immission in dem Modell ebenfalls berücksichtigt werden.

Für den vorliegenden Modellvergleich wurden im Abstand von 3 Stunden 2024 Puffs freigesetzt und in ihrer Entwicklung verfolgt.

### 3. Modellvergleich

#### 3.1 Anlage des Modellvergleichs

Mit den Ausbreitungsmodellen UFOMOD und MESOS wurden Berechnungen der Immission bis in 900 km Entfernung von einer 10 m hohen Quelle am Standort Jülich durchgeführt, aufgrund einer störfallbedingten Freisetzung von je 1 Ci Jod-131 (J-131), Caesium-137 (Cs-137) und Edelgas. Jülich wurde als Standort der Quelle ausgewählt, da in der weiteren Umgebung um die Quelle die meteorologischen Bedingungen keine wesentliche Modifikation durch lokale orographische Besonderheiten erfahren. In unterschiedlichen Entfernungen von der Quelle wurde zunächst die noch in der Atmosphäre vorhandene Schadstoffmenge integral über alle Richtungen bilanziert und an ausgewählten Orten wurden statistische Kennzahlen der Verteilung der Luftkonzentration und Bodenkontamination unter besonderer Berücksichtigung der Pfade der trockenen und nassen Deposition verglichen. In einem weiteren Schritt wurde die räumliche Verteilung des Erwartungswertes der Bodenkontamination im weiteren Umkreis um die Quelle (max. 1200 km) untersucht. Dieses Produkt aus Bodenkontamination und Eintrittswahrscheinlichkeit stellt bei Risikoanalysen ein wichtiges Zwischenergebnis dar. Das Risiko einen gesundheitlichen Schaden zu erleiden, resultiert nämlich weitgehend von den am Boden abgelagerten Nukliden. Allerdings ist nicht nur die Höhe der Bodenkontamination, sondern

auch die Wahrscheinlichkeit, daß es überhaupt zu einer Kontamination kommt, entscheidend für die Größe des Risikos.

Die räumliche Verteilung dieses Erwartungswertes muß für beide Modelle grundsätzlich verschieden sein, da das MESOS-Modell den Trajektorienverlauf entsprechend der am jeweiligen Aufenthaltsort der Fahne herrschenden Windrichtung berechnet und nicht am Ort der Emission von einer Gleichverteilung der Häufigkeit von 36 Ausbreitungsrichtungen ausgeht. Das heißt, daß mit dem MESOS-Modell für verschiedene Orte unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeiten für eine Bodenkontamination ermittelt werden können, während das UFOMOD-Modell an jedem Ort in der Umgebung der Quelle dieselbe Eintrittswahrscheinlichkeit annimmt.

Die erwähnten Nuklide wurden im Hinblick auf ihre Depositionseigenschaften ausgewählt (vgl. Tab. 1). Für elementares Jod-131 nimmt man heute an, daß die Depositionsraten für die trockene und nasse Deposition von vergleichbarer Größenordnung sind, während im Falle des Caesiums-137 im wesentlichen nur über die nasse Deposition Nuklide zur Ablagerung an den Boden gelangt. Eine deutliche Verbesserung der Modellierung der nassen Deposition in UFOMOD wird in /V083/ vorgeschlagen.

Tab. 1: Eingangsdaten für die Vergleichsrechnungen MESOS-UFOMOD

Standort: Jülich 50.92° Nord/6.42° Ost

Kaminhöhe: 10 m

Nuklid	J-131 (elementar)	Cs-137	Edelgas
Depositionsgeschwindigkeit in $\text{ms}^{-1}$	0,01	0,001	-
Washoutkoeffizient $\lambda = a I^b$ in $\text{s}^{-1}$	$0,8 \cdot 10^{-4} I^{0,6}$	$0,8 \cdot 10^{-4} I^{0,8}$	-
Halbwertszeit in d	8,1	$1,1 \cdot 10^4$	

Beide Ausbreitungsmodelle verwenden denselben Ansatz zur Berechnung der trockenen Deposition (vgl. Abschnitt 2); der Vergleich der naß deponierten Caesiumaktivität zeigt insbesondere die unterschiedliche Berechnung des Washoutkoeffizienten. Während das UFOMOD-Modell bisher nur 3 verschiedene Stufen der Regenintensität kennt (< 1 mm/h, 1-3 mm/h, > 3 mm/h), berechnet das MESOS-Modell den Niederschlagsparameter I am Aufenthaltsort der Fahne aus der Meldung der synoptischen Station über das gegenwärtige Wetter in Stufen 0-9, entsprechend der Niederschlagsintensität und des Niederschlags-typs (s. Tab. 2).

Tab. 2: Niederschlagsparameter für die häufigsten Niederschlags-typen

Niederschlagstyp		Niederschlagsrate in mm/h	Niederschlags- parameter I in mm/h
Regen	leicht	0,0 - 0,5	1
	mäßig	0,5 - 4,0	5
	stark	> 4,0	9
Schauer	leicht	0,0 - 2,0	1
	mäßig	2,0 - 10,0	2
	stark	10,0 - 50,0	6
Niesel	leicht	0,2	1
	mäßig	0,5	2
	stark	0,75	2

Das Modell reduziert den Niederschlagsparameter generell durch Multiplikation mit dem Faktor 0,5 und falls dieser den Wert 1 annimmt mit dem Faktor 0,25.

In Abschnitt 4 wird neben einem Vergleich der unterschiedlichen Modellberechnungen versucht, das einfache Ausbreitungsmodell in UFOMOD mit Hilfe von Berechnungen des komplexeren Modells MESOS in seiner Aussagekraft zu verbessern. So wurde einmal über eine gezielte Parametervariation versucht, die UFOMOD-Ergebnisse den Berechnungen der Mittelwerte der Luftkonzentration bzw. der Kontamination mit dem MESOS-Modell anzugleichen. Des weiteren wurde

die mit MESOS errechnete Häufigkeitsverteilung der Trajektorienzugrichtung in unterschiedlichen Entfernungen vom Emittenten zur Berechnung der Verteilung des Erwartungswertes von Bodenkontamination und Eintrittswahrscheinlichkeit im weiteren Umkreis um den Emittenten verwendet.

### 3.2 Spezifische Schwierigkeiten beim Vergleich der Modelle UFOMOD - MESOS

#### 3.2.1 Meteorologische Daten für unterschiedliche Zeiträume

Für statistische Untersuchungen zur Ausbreitung und Ablagerung von Radionukliden mit dem MESOS-Modell stehen bei KfK/AFAS die aufbereiteten synoptischen Daten des Zeitraums 1973/74 zwischen  $44^{\circ}$  und  $62^{\circ}$  Nord,  $10^{\circ}$  West und  $20^{\circ}$  Ost im Abstand von drei Stunden zur Verfügung in einem Gitter mit einer Auflösung von einem Breitengrad und zwei Längengraden, das Druckfeld in einem Gitter mit einer Auflösung von 0,5 Breitengraden und einem Längengrad. Im Abstand von 3 Stunden startet das MESOS-Modell jeweils einen Puff mit einer Aktivität von 1 Ci und verfolgt sein Schicksal im Abstand von 10 Minuten innerhalb der ersten 3 Stunden und danach stündlich für insgesamt maximal 107 Zeitschritte. Das Ausbreitungsmodell UFOMOD hingegen benötigt meteorologische Daten am Standort der Quelle im stündlichen Abstand. Diese standen am Standort Jülich erst für das Jahr 1977 zur Verfügung. Auch für andere für den Vergleich ähnlich geeignete Standorte ließ sich das Datenproblem nicht auf befriedigende Weise lösen.

#### 3.2.2 Unterschiedliche Freisetzungsdauer und ihre Bedeutung für die mittlere Breite der Fahne

UFOMOD geht davon aus, daß die Aktivität von 1 Ci über einen Zeitraum von einer Stunde gleichmäßig freigesetzt wird und errechnet die Verbreiterung der Fahne über den Prozeß der turbulenten Diffusion während einer Stunde. Im MESOS-Modell hingegen findet der Prozeß der Freisetzung kontinuierlich über einen Zeitraum von 3 h statt. Die Änderungen der mittleren synoptischen Bedingungen während dieses Zeitintervalls können bereits nach einer Stunde zu einer mittleren horizontalen Verbreiterung der Fahne führen. Darüberhinaus trägt als Prozeß 2. Ordnung die turbulente

Diffusion in Abhängigkeit von der Transportzeit zur Verbreiterung der Fahne bei. UFOMOD beinhaltet diese mittlere horizontale Verbreiterung der Fahne nur indirekt durch die experimentell ermittelten Ausbreitungsparameter. Es ist daher zu erwarten, daß im Mittel über große Entfernungen hinweg, die MESOS-Fahne eine größere horizontale Ausdehnung hat.

### 3.2.3 Berechnung statistischer Kennzahlen an ausgewählten Orten aus unterschiedlichen Datenkollektiven

Die Berechnung der statistischen Kennzahlen in ausgewählten Abständen vom Ort der Emittenten erfolgte mit UFOMOD aus 1251 Einzelfreisetzungen während eines Jahres, wobei jede der 36 Ausbreitungsrichtungen in diesem Modell als gleichwahrscheinlich angenommen wurde. Das MESOS-Modell hingegen startete 2024 Puffs, jedoch können die Trajektorien ihre Richtungen gegebenenfalls nach jedem Zeitschnitt ändern. Die Berechnung statistischer Kennzahlen mit dem MESOS-Modell erfolgte daher an ausgewählten Punkten im Norden, Osten, Süden und Westen der Quelle in den Entfernungen 200, 400, 900, 1200 km im Norden und Osten, 200, 400, 600, 700 km im Süden und 200, 400, 900 und 1100 km im Westen. Die statistischen Kennzahlen wurden aus einem Ensemble von maximal 328 Werten und minimal 64 Werten an den einzelnen Punkten errechnet, d.h. ein Punkt wurde maximal 328 mal von einer freigesetzten Fahne überstrichen.

Die Anzahl der Einzelbeobachtungen für die statistische Analyse könnte zu einem späteren Zeitpunkt über eine Erweiterung der meteorologischen Datenbasis vergrößert werden. Dennoch treten an bestimmten Orten im Immissionsgebiet bestimmte Wettersituationen aus meteorologischen Gründen niemals auf, die unter Vernachlässigung der Ausbreitungsrichtung in die Berechnung der statistischen Kennzahlen eingehen, d.h. die statistischen Kennzahlen werden grundsätzlich aus unterschiedlichen Datenkollektiven bestimmt.

Minimal- und Maximalwerte der Immission an einem bestimmten Ort berechnet mit dem MESOS-Modell können sehr viel stärker differieren als bei Berechnungen mit UFOMOD, wo sich der Minimalwert immer in einem bestimmten Verhältnis am Maximalwert unter der Fahnenachse orientiert und letzterer wesentlich vom Alter der Fahne abhängt. Hingegen leisten alle diejenigen

MESOS-Puffs Beiträge zur Immission an einem bestimmten Ort, die über 3-Stunden hinweg die kontinuierliche Emission simulieren und weniger als eine halbe Puffbreite von dem betreffenden Ort entfernt vorbeiziehen. Die Puffbreite berechnet sich aus der Transportzeit. Je nach atmosphärischen Bedingungen während des Transports kann die mittlere Fahnenbreite sehr stark variieren und dabei sehr große Werte annehmen. Das Verhältnis von Puff zu Fahnenbreite bestimmt maßgeblich den Immissionsbeitrag. Es sind daher auch extrem kleine Immissionsbeiträge am betrachteten Aufpunkt zu erwarten. Im Vergleich zu UFOMOD spielt bei MESOS auch die zeitliche Variation der Mischungsschichtobergrenze für die Berechnung der Luftkonzentration bzw. Bodenkontamination eine Rolle, über die Schadstoff aus der Mischungsschicht isoliert sowie der Schicht zu jedem Zeitschritt neu beigemischt werden kann.

#### 4. Ergebnisse

##### 4.1 Luftkonzentration von Edelgasen

Zunächst vergleicht man die berechneten Luftkonzentrationen für Edelgase, um Unterschiede in den Ergebnissen allein auf die Modellierung des weiträumigen Transportes und der Ausbreitung zurückführen zu können.

Die Berechnung der Mittelwerte der Luftkonzentration in der bodennächsten Schicht ergibt sich bei UFOMOD aus den bekannten 1251 Wetterabläufen entsprechend 1251 Freisetzungen multipliziert mit sieben (Anzahl der Stufen der Approximationsfunktion). Auf diese Weise berücksichtigt man, daß ein betrachteter Aufpunkt nicht grundsätzlich unter der Fahnenachse liegen muß, sondern gegebenenfalls vom Fahnenrand berührt wird. Somit ergeben sich 10 757 Werte der Luftkonzentration. Bei der Mittelwertbildung wird jeder Einzelwert berücksichtigt, unabhängig davon, in welcher Richtung die Ausbreitung erfolgte. Im Gegensatz dazu werden bei MESOS aus den insgesamt 2023 betrachteten Freisetzungen nur jeweils diejenigen zur Mittelwertbildung herangezogen, die an genau spezifizierten Orten (Entfernung von der Quelle, Himmelsrichtung) zu einer Aktivitätskonzentration ungleich Null führen. Auf diese Unterschiede in den Datenkollektiven wurde bereits in Abschnitt 3.2 hingewiesen.

In 900 km Entfernung vom Emittenten am Standort Jülich verfolgt MESOS nur noch 1437 Trajektorien, da in den Ausbreitungssektoren 150-200 Grad, d.h. in südlicher Richtung die 900 km Grenze bereits außerhalb des Modellgebietes liegt. Das wiederum heißt, daß gewisse ausgewählte Wetterlagen nicht in die Berechnung eingehen.

In Tab. 3 und Abb. 7 werden die MESOS-Ergebnisse in den drei Entfernungen jeweils für Norden, Osten, Süden und Westen aufgeführt. Die Mittelwerte der Luftkonzentration zu den 4 Richtungen unterscheiden sich um das 1,3 - 1,7-fache. Die von UFOMOD errechneten Mittelwerte liegen im Mittel um den Faktor 2,0 höher. Gründe hierfür sind die geringere Fahnenbreite des UFOMOD-Modells, eine im Mittel niedrigere Transportgeschwindigkeit sowie der Transport der gesamten Masse in der atmosphärischen Mischungsschicht und die geradlinige Ausbreitung.

Eine Verminderung der bodennahen Luftkonzentration mit UFOMOD läßt sich erreichen, wenn mit einer erhöhten Windgeschwindigkeit oder Transportgeschwindigkeit gerechnet wird. Während im Referenzlauf mit einer Geschwindigkeit gerechnet wird, die als Mittelwert gültig für die untersten 100 m der Atmosphäre zu verstehen ist, ergibt sich die erhöhte Windgeschwindigkeit als Mittelwert über die untersten 500 m der Atmosphäre. Diese Annahme basiert auf der Überlegung, daß bei der Berechnung der Ausbreitung über eine horizontale Erstreckung von mehreren hundert Kilometern nicht nur eine bodennahe Schicht von 100 m, sondern eine weitaus mächtigere Schicht zu betrachten ist. Ein erneuter Lauf mit UFOMOD und erhöhter Wind- bzw. Transportgeschwindigkeit liefert UFOMOD-Mittelwerte, die um den Faktor 0,62 geringer sind.

Die Maximalwerte der Luftkonzentration der Edelgase in der bodennächsten Schicht liegen mit beiden Modellen nicht nur in der gleichen Größenordnung, sondern stimmen auch bis 400 km nahezu überein. Mit zunehmender Entfernung von der Quelle liegen die UFOMOD-Werte deutlich höher, das heißt, es machen sich bereits erwähnte Modellunterschiede deutlicher bemerkbar.

Die Minima errechnet mit UFOMOD liegen allerdings deutlich über den Werten von MESOS. Dies ist vor allem auf die unterschiedliche Berechnung der Aktivität für einen Aufpunkt zuzuschreiben; siehe hierzu auch Abschnitt 3.2.3.

#### 4.2. Abgelagerte bzw. noch in der Atmosphäre vorhandene Aktivitätsmenge

Um die Bedeutung unterschiedlicher Modellansätze zur Deposition quantitativ im Hinblick auf die Kontamination am Boden zu erfassen, wurden mit beiden Modellen Rechnungen durchgeführt, die lediglich den Pfad der trockenen oder der nassen Deposition berücksichtigen.

Aus Tab. 4 und Abb. 8 ist zu ersehen, daß die mit dem MESOS-Modell errechnete trockene Bodenkontamination im Mittel über alle Trajektorien bis zu 20 % geringer ist als die mit UFOMOD errechnete. Da das MESOS-Modell in allen Entfernungsbereichen auch niedrigere Luftkonzentrationen für Edelgas errechnet (an einzelnen Punkten ca. 50 %) und die trockene Bodenkontamination sich unmittelbar aus der bodennahen Luftkonzentration bestimmt, entspricht das Rechenergebnis den vorausgegangenen Überlegungen. Darüberhinaus reduziert der in das MESOS-Modell zusätzlich eingeführte Widerstandsterm die Depositionsrate bei extrem stabiler Schichtung.

Im MESOS-Modell wird je nach Wetterlage Schadstoff auch in stabilen Schichten oberhalb der Mischungsschicht transportiert. Dieser Schadstoff kann dann nicht am trockenen Ablagerungsprozeß teilnehmen.

Um letztere These zu erhärten, wurde in UFOMOD versuchsweise mit deutlich vergrößerten Mischungsschichthöhen gerechnet, die in der Folge zu geringeren bodennahen Luftkonzentrationen führen. Die gewählten Werte entsprechen denen der Phase A der Deutschen Risikostudie. Dieses Vorgehen soll die im vorangegangenen Absatz skizzierte Modelleigenschaft von MESOS simulieren. Bis 200 km zeigt sich nach Einbau dieser Änderung kaum eine Verringerung, danach aber lagert UFOMOD etwa 10 bis 20 % weniger Aktivität am Boden ab gegenüber dem Referenzlauf mit niedrigen Mischungsschichthöhen. Wird wie in Abschnitt 4.1 ein erneuter Lauf für UFOMOD mit einer erhöhten Wind- bzw. Transportgeschwindigkeit durchgeführt, erreicht man eine weitere Verminderung der trockenen Deposition.

Berechnungen der Bodenkontamination allein über die nasse Deposition von Nukliden mit den Modellen MESOS und UFOMOD zeigen die unterschiedliche Berechnung des Niederschlagsparameters I aus dem vorliegenden meteorologischen Datenmaterial (vgl. Abschnitt 3.1). Das MESOS-Modell kennt für diesen

Parameter zehn Stufen, UFOMOD hingegen nur drei, wobei jedoch der Wert der 3. Stufe den Maximalwert des MESOS-Modells übertrifft. Während das UFOMOD-Modell die nasse Deposition für alle Entfernungen auf der Basis der Niederschlagstätigkeit am Standort berechnet, verwendet MESOS das am Aufenthaltsort der Fahne herrschende gegenwärtige Wetter. D.h. ausgehend vom Standort Jülich ist zu erwarten, daß eine Vielzahl von Trajektorien in die niederschlagsreicheren Gebiete der Mittelgebirge zieht und erst in großen Entfernungen östlich der Quelle niederschlagsärmere Gebiete erreicht (vgl. Abb. 15). Die Berechnungen zeigen (vgl. Tab. 5 und Abb. 9), daß bis zu 200 km Entfernung von der Quelle das MESOS-Modell die doppelte Schadstoffmenge ablagert, während in 900 km beide Modelle MESOS und UFOMOD annähernd dieselben abgelagerten Mengen von ca. 50 % errechnen.

Realistische Rechnungen zur Schadstoffdeposition berücksichtigen während des Transportes sowohl die trockene als auch die nasse Deposition. Tab. 6 enthält die auf diese Weise errechneten Bilanzen der freigesetzten Aerosol- und Jodmengen. Abb. 10 zeigt die Bilanzen der Jodmengen bei trockener und nasser Deposition. Vergleicht man die Ergebnisse der Modelle MESOS und UFOMOD, so zeigen sich dieselben Unterschiede in der mit den Modellen MESOS und UFOMOD berechneten Aerosolkontamination wie in den Berechnungen unter Vernachlässigung der trockenen Deposition bzw. in der Jodkontamination wie in den Berechnungen unter Vernachlässigung der nassen Deposition entsprechend den nuklidspezifisch dominierenden Depositionsraten (vgl. Abschnitt 3.1).

#### 4.3 Bodenkontamination durch Aerosole und Jod

Eine Betrachtung des Fachbandes der Deutschen Risikostudie /FA81/ hinsichtlich der Aufteilung der Spätschäden nach Expositionspfaden ergibt im Mittel über alle Freisetzungskategorien einen Anteil von über 90 % der beiden Expositionspfade externe Bodenstrahlung und Ingestion. Da Ingestion und Bodenstrahlung direkt proportional der abgelagerten Aktivitätsmenge sind, bekommen diese beiden Größen beim vorliegenden Modellvergleich eine hohe Wertigkeit.

In den Abb. 11 und 12 sowie den Tab. 7 und 8 werden wie im vorangegangenen Abschnitt 4.1 in jeder Entfernung die MESOS-Ergebnisse für die Orte in den vier Himmelsrichtungen und der UFOMOD-Mittelwert über alle Richtungen aufgezeigt. Für Jod-131 zeigt UFOMOD die Tendenz, höherer Kontamination im quellnahen Bereich, mit zunehmender Entfernung eine raschere Abnahme der Bodenkontamination zu errechnen, während für Aerosol die Mittelwerte selbst sowie die entfernungsabhängige Abnahme der Mittelwerte mit UFOMOD in etwa mit den MESOS-Werten in westlicher Richtung übereinstimmen.

Auf eine weitere Interpretation der tendenziellen Abnahme der Mittelwerte der Kontamination mit zunehmender Entfernung von der Quelle sollte weitgehend verzichtet werden, da hier ein Mittelwert der Kontamination über alle Ausbreitungsrichtungen mit Einzelwerten in verschiedenen Richtungen verglichen wird. So zeigt die Aerosol-Kontamination in nördlicher Richtung von 400 km nach 900 km sogar einen leichten Anstieg der mittleren Kontamination. Effekte dieser Art stellen sich insbesondere in niederschlagsreichen Gebieten ein, wenn Aerosole im wesentlichen über die nasse Deposition zur Kontamination auf den Boden gelangen. Eine andere Möglichkeit des MESOS-Modells, noch in großen Entfernungen von der Quelle vergleichsweise hohe Kontaminationen zu errechnen, besteht über den weiträumigen Transport oberhalb der Mischungsschicht. Dieser isolierte Schadstoff kommt erst beim Aufbrechen der Inversion in die Mischungsschicht und damit zur trockenen Deposition auf den Boden.

Vergleicht man die Maxima und Minima errechnet mit den Modellen MESOS und UFOMOD, so stellt man insbesondere in großen Entfernungen vom Emitter erwartungsgemäß größere Maxima errechnet mit MESOS fest (s. Abschnitt 3.2.3) sowie unabhängig von der Entfernung geringere Minima mit UFOMOD (s. Abschnitt 3.2.3). Die MESOS-Rechnungen zeigen deutlich, daß aufgrund der variierenden meteorologischen Bedingungen nicht generell gilt: "Für jeden Ort im Lee einer Punktquelle nimmt die Kontamination mit zunehmender Entfernung von der Quelle ab".

#### 4.4 Erwartungswerte der Bodenkontamination

Betrachtet man die räumliche Verteilung dieser Größe im Modellgebiet zwischen  $44^{\circ}$  und  $62^{\circ}$ N und  $10^{\circ}$ W und  $20^{\circ}$ O (vgl. Abb. 13 und 14) errechnet mit dem MESOS-Modell, so zeigt der Verlauf der Isolinien des Produktes aus Bodenkontamination und Eintrittswahrscheinlichkeit\* für Aerosole (Cs-137) und Jod (Jod-131) eine höchst komplexe Struktur. Einen Erwartungswert der Aerosol-Kontamination größer als  $3 \cdot 10^{-13} \text{ Ci m}^{-2}$  findet man im Umkreis von ca. 200-500 km um die Quelle. Während der Erwartungswert in südwestlicher Richtung von der Quelle bis ca. 80 km um den Faktor 13 abnimmt, treten ähnliche Gradienten in östlichen und südöstlichen Richtungen über Entfernungen von ca. 350 km auf. Eine Erklärung hierfür liefert die Niederschlagsverteilung im Modellierungsgebiet. Niederschlag ist ein räumlich äußerst stark schwankender meteorologischer Parameter (vgl. Abb. 15). Eine starke Abnahme der jährlichen Niederschlagsmenge in südwestlicher Richtung führt zur schnellen Abnahme der Aerosolkontamination von  $3 \cdot 10^{-12}$  auf  $3 \cdot 10^{-13} \text{ Ci m}^{-2}$  in südwestlicher Richtung, während hohe Niederschlagsmengen insbesondere in den südlicheren Landesteilen der Bundesrepublik Deutschland nur eine langsame Abnahme der Bodenkontamination bewirken. Eine Drängung der Isolinien der Aerosol- und Jod-Kontamination fällt südlich des Alpenhauptkammes auf, wo die jährliche Niederschlagsmenge um nahezu 50 % abnimmt. Isolinien größer als  $1 \cdot 10^{-13} \text{ Ci m}^{-2}$  aufgrund einer 3-stündigen Freisetzung von 1 Ci Aerosolaktivität am Standort Jülich errechnet das MESOS-Modell für jeden Ort südlich des Alpenrandes, über Mittelfrankreich und England bis Südschweden und über den Ostrand des Modellierungsgebietes hinaus.

Generell zeigen die Isolinien des Erwartungswertes der Jodkontamination einen ausgeglicheneren Verlauf mit weniger ausgeprägten Unterschieden in den verschiedenen Richtungen vom Ort der Emission. Grund hierfür ist die zunehmende Bedeutung der trockenen Deposition für die Bodenkontamination.

---

\* Hierbei handelt es sich um die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit; d.h. die Aktivitätsfreisetzung hat die Eintrittswahrscheinlichkeit eins.

Vergleicht man die räumlichen Verteilungen des Erwartungswertes der Aerosol- und Jodkontamination, so stellt man fest, daß in größeren Entfernungen von der Quelle höhere Werte der Aerosolkontamination im Vergleich zur Jodkontamination zu finden sind, diese Relation sich jedoch für Isolinien größer gleich  $3 \cdot 10^{-13} \text{Ci m}^{-2}$  in nahezu allen Ausbreitungsrichtungen umgekehrt.

Führt man dieselben Berechnungen mit dem UFOMOD-Modell durch, so erhält man aufgrund der Annahme einer Gleichverteilung der Ausbreitungsrichtungen, Orte gleichen Erwartungswertes in allen Richtungen in jeweils denselben Abständen von der Quelle. Berechnungen mit UFOMOD wurden nur für den Entfernungsbereich 200 bis 900 km durchgeführt. In der hier gewählten Darstellung, vergleiche Abbildung 16, bilden die Isolinien Ellipsoide um die Quelle. In dieser Abbildung zeigen sich die entscheidenden Unterschiede in den Berechnungen mit den MESOS-Modellen und UFOMOD. Für verschiedene Gebiete ergeben sich in der Berechnung des Erwartungswertes Unterschiede um das 10-fache. Räumliche Strukturen wie oben beschrieben, können in dieser Version mit UFOMOD nicht dargestellt werden.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten wurde auch hier versucht, mit Hilfe von zusätzlichen Informationen durch MESOS-Rechnungen, die UFOMOD-Berechnungen an die Realität anzugleichen. Unter Hinzunahme der Häufigkeitsverteilung der Trajektorienzugrichtung in unterschiedlichen Entfernungen von der Quelle wurde eine räumliche Verteilung des Erwartungswertes konstruiert. Abbildung 18 stellt die Häufigkeitsverteilung der Trajektorienzugrichtung in unterschiedlichen Entfernungen von der Quelle dar. In allen Entfernungsbereichen zieht die Mehrzahl der Trajektorien in östliche Richtungen aufgrund der vorherrschenden Wetterlagen. Ein zweites Maximum findet man in westsüdwestlicher Richtung, hervorgerufen durch länger anhaltende kontinentale Hochdruckwetterlagen, die insbesondere im Winter und Sommer unser Wetter bestimmen. Ein interessantes Phänomen stellt dabei das Maximum in südsüdwestlicher Richtung in 750 km Entfernung von der Quelle dar. Offensichtlich werden im Bereich der Alpen eine Menge Trajektorien mit ursprünglich südöstlicher Zugrichtung in südliche Richtungen gelenkt.

Die modifizierten UFOMOD-Rechnungen liefern Ergebnisse, die sich gut in die MESOS-Berechnungen einpassen (vgl. Abb. 17). Es werden nun räumliche Strukturen auch mit UFOMOD befriedigend erfaßt. D.h. die Berücksichtigung der Ausbreitungsrichtung als zusätzlichen Parameter an jedem Raum-Zeitpunkt ist entscheidend für die Berechnungen des Erwartungswertes der Kontamination.

## 5. Schlußfolgerungen

Der Vergleich der Ausbreitungsmodelle UFOMOD und MESOS zeigt Unterschiede in der mittleren Luftkonzentration bzw. Bodenkontamination bis zu einem Faktor 5 und erheblich größere Unterschiede im Minimum und Maximum. Trotz spezifischer Schwierigkeiten beim Vergleich hinsichtlich der meteorologischen Daten für einen gemeinsamen Zeitraum und unterschiedliche Freisetzungsdauer, lassen sich diese Unterschiede eindeutig auf die Instationarität und Inhomogenität des MESOS-Modells, die Berücksichtigung der Ausbreitungsrichtung als zusätzlichen Freiheitsgrad und die Berechnung der Fahnenbreite zurückführen.

Instationarität und räumliche Inhomogenität der meteorologischen Parameter führen bei der Berechnung des Erwartungswertes der Bodenkontamination zu Unterschieden um Faktoren bis 10. Wie in Abschnitt 3.1 dargelegt wirken sich derartige Unterschiede bis auf die Risikoergebnisse aus. Daher ist es aus der Sicht des Meteorologen erforderlich, Risikoberechnungen im europäischen Erstreckungsbereich mit Hilfe von Modellen durchzuführen, die speziell für den weiträumigen Schadstofftransport entwickelt wurden, wie z.B. das hier verwendete Trajektorien-Puffmodell MESOS.

Es ist jedoch möglich, die Berechnung einfacher Modelle wie des Ausbreitungsmodells im Unfallfolgenmodell UFOMOD mit Hilfe zusätzlicher Information aus Berechnungen mit MESOS wesentlich zu verbessern und an die Realität anzugleichen. Um jedoch zu entscheiden, inwieweit ein komplexeres Ausbreitungsmodell für realistischere Berechnungen eines kollektiven Schadens oder Risikos im europäischen Bereich notwendig ist, wären Folgerechnungen zur hier vorliegenden Untersuchung durchzuführen. Eine solche Entscheidung wird in Abhängigkeit von Annahmen hinsichtlich der zu verwendenden Dosis-Wirkungsbeziehung ohne oder mit Schwellenwert und der Modellierung der Bevölkerungsverteilung für große Entfernungen sowie der zukünftigen Schutz- und Gegenmaßnahmen zu treffen sein.

## 6. Literatur

- /AP80/ ApSimon, H.M., Goddard, A.J.H., Wrigley, J.: Estimating the possible transfrontier consequences of accidental releases, the MESOS model for long range atmospheric dispersal. Proc. C.E.C. Seminar - Radioactive Releases and their dispersion in the atmosphere following a hypothetical reactor accident - 22-25 April 1980, Risø, Denmark (1980)
- /BR69/ Briggs, C.A.: Plume rise. Reo. TID-25075 (1969)
- /BR70/ Briggs, C.A.: Some recent analyses of plume rise observations. 2nd Internat. Clean Air Congr., Washington, D.C. (1970)
- /FA81/ Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke; Fachband 8. Unfallfolgenrechnung und Risikoergebnisse, Verlag TÜV Rheinland, Köln (1981)
- /HA79/ Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke; Eine Untersuchung zu dem durch Störfälle in Kernkraftwerken verursachten Risiko. Hauptband, 262 S. IS3N 3-921059-67-4, Verlag TÜV Rheinland, Köln (1979)
- /KE82/ A.M. Kellerer: Biophysikalische Grundlagen der Wirkung kleiner Strahlendosen. ATW, Atomwirtschaft-Atomtechnik, S. 99-103 (1982)
- /NE77/ Nester, K., Hübschmann, W., Thomas, P.: The influence of ground roughness on atmospheric diffusion. Proc. of the Fourth Internat. Clean Air Congr., Tokyo, 153-156 (1977)
- /NE78/ Nester, K.: Window - Ein Computerprogramm zur Berechnung von Statistiken der integrierten Schadstoffkonzentration in der Atmosphäre an Aufpunkten in der Umgebung einer Einzelquelle. KfK 2547, 1-45 (1978)
- /OB82/ E. Oberhausen: Die Dosiswirkungsbeziehung bei der Strahlenexposition. GRS-Fachgespräch Köln 1982, GRS-Bericht 52 (1983)

- /TH76a/ Thomas, P. et al.: Experimental determination of the atmospheric dispersion parameters over rough terrain. Part 1, Measurements at the Karlsruhe Nuclear Research Center. KfK 2285, S. 1-131 (1976)
- /TH76b/ Thomas, P., Nester, K.: Experimental determination of the atmospheric dispersion parameters over rough terrain. Part 2, Evaluation of Measurements. KfK 2286, S. 1-201 (1976)
- /V082/ Vogt, S., Hübschmann, W.: Das Modell der atmosphärischen Ausbreitung und Ablagerung radioaktiver Stoffe in der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke, Meteorol. Rdsch. 35, S. 35-39 (1982)
- /V083/ Vogt, S., Hübschmann, W., Wittek, P.: Niederschlag und Washout im Unfallfolgenmodell der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke. KfK 3548, S. 1-25 (1983)
- /WR79/ Wrigley, J., ApSimon, H.M., Goddard, A.J.H.: Meteorological data and the MESOS model for the long range transport of atmospheric pollutants. WMO Symposium no 538. Sophia, October 1979

Tab. 3 Statistische Kennzahlen der Luftkonzentration  
Edelgas in Ci s m<sup>-3</sup>

Mittelwert

Entfernung in km	MESOS				UFOMOD
	Norden	Osten	Süden	Westen	
200	2,0 E-9 *	1,9 E-9	1,6 E-9	2,1 E-9	3,3 E-9
400	9,9 E-10	9,1 E-10	7,5 E-10	1,1 E-9	1,8 E-9
900	3,7 E-10	4,8 E-10	--	6,3 E-10	9,6 E-10

Maximum

Entfernung in km	MESOS				UFOMOD
	Norden	Osten	Süden	Westen	
200	2,6 E-8	1,5 E-8	2,3 E-8	2,8 E-8	2,4 E-8
400	9,0 E-9	5,9 E-9	7,2 E-9	8,1 E-9	9,4 E-9
900	2,2 E-9	4,1 E-9	--	4,4 E-9	7,6 E-9

Minimum

Entfernung in km	MESOS				UFOMOD
	Norden	Osten	Süden	Westen	
200	1,4 E-12	4,8 E-12	1,3 E-11	6,0 E-12	3,3 E-11
400	9,0 E-12	2,5 E-14	3,6 E-12	2,1 E-12	6,4 E-11
900	5,5 E-12	2,0 E-13	--	1,4 E-11	2,5 E-11

\* bedeutet  $2,0 \cdot 10^{-9}$

Tab. 4: Trocken abgelagerte bzw. noch vorhandene Aktivitätsmenge in Prozent ohne Berücksichtigung des Pfades der nassen Deposition

Jod

Entfernung in km	abgelagerte Aktivitätsmenge in %		Restaktivität der Fahne in %	
	MESOS	UFOMOD	MESOS	UFOMOD
200	46	52	54	48
400	56	68	44	32
900	67	87	33	13

Tab. 5: Naß abgelagerte bzw. noch vorhandene Aktivitätsmenge in Prozent ohne Berücksichtigung des Pfades der trockenen Deposition

Jod

Entfernung in km	abgelagerte Aktivitätsmenge in %		Restaktivität der Fahne in %	
	MESOS	UFOMOD	MESOS	UFOMOD
200	25	12	75	88
400	38	24	62	76
900	50	48	50	52

Tab. 6: Abgelagerte bzw. noch vorhandene Aktivitätsmenge  
in Prozent bei trockener und nasser Deposition

Aerosol

Entfernung in km	abgelagerte Aktivitätsmenge in %		Restaktivität der Fahne in %	
	MESOS	UFOMOD	MESOS	UFOMOD
200	24	19	76	81
400	36	29	64	71
900	48	50	52	50

Jod

Entfernung in km	abgelagerte Aktivitätsmenge in %		Restaktivität der Fahne in %	
	MESOS	UFOMOD	MESOS	UFOMOD
200	56	57	44	43
400	69	74	31	26
900	81	92	19	8

Tab. 7: Statistische Kennzahlen der Bodenkontamination  
Aerosol in Ci m<sup>-2</sup>

Mittelwert

Entfernung in km	MESOS				UFOMOD
	Norden	Osten	Süden	Westen	
200	2,9 E-12*	6,0 E-12	2,5 E-12	7,6 E-12	8,0 E-12
400	2,3 E-12	4,1 E-12	1,3 E-12	2,6 E-12	4,3 E-12
900	2,5 E-12	1,7 E-12	--	1,2 E-12	1,4 E-12

Maximum

Entfernung in km	MESOS				UFOMOD
	Norden	Osten	Süden	Westen	
200	5,1 E-11	2,1 E-10	2,0 E-10	7,7 E-10	3,3 E-10
400	3,7 E-11	8,3 E-11	4,2 E-11	5,5 E-11	7,2 E-11
900	5,5 E-11	4,3 E-11	--	2,8 E-11	2,3 E-11

Minimum

Entfernung in km	MESOS				UFOMOD
	Norden	Osten	Süden	Westen	
200	1,3 E-17	2,0 E-18	6,0 E-18	2,1 E-18	4,6 E-14
400	1,0 E-17	2,6 E-19	3,2 E-18	5,0 E-18	2,4 E-14
900	1,1 E-15	5,5 E-17	--	8,3 E-18	9,1 E-15

\* bedeutet 2,9 · 10<sup>-12</sup>

Tab. 8: Statistische Kennzahlen der Bodenkontamination  
Jod in Ci m<sup>-2</sup>

Mittelwert

Entfernung in km	MESOS				UFOMOD
	Norden	Osten	Süden	Westen	
200	5,9 E-12*	9,2 E-12	3,2 E-12	8,0 E-12	1,4 E-11
400	2,2 E-12	4,3 E-12	1,0 E-12	2,0 E-12	4,8 E-12
900	1,0 E-12	1,1 E-12	--	6,2 E-13	6,1 E-13

Maximum

Entfernung in km	MESOS				UFOMOD
	Norden	Osten	Süden	Westen	
200	6,5 E-11	2,0 E-10	1,2 E-10	6,1 E-10	1,7 E-10
400	2,5 E-11	7,5 E-11	1,6 E-11	3,8 E-11	5,2 E-11
900	1,0 E-11	1,9 E-11	--	8,9 E-12	7,8 E-12

Minimum

Entfernung in km	MESOS				UFOMOD
	Norden	Osten	Süden	Westen	
200	7,5 E-18	1,0 E-18	2,7 E-18	1,0 E-18	1,3 E-14
400	2,0 E-16	1,6 E-19	2,1 E-18	3,2 E-18	5,8 E-15
900	1,3 E-15	6,3 E-17	--	1,2 E-17	2,8 E-16

\* bedeutet 5,9 · 10<sup>-12</sup>

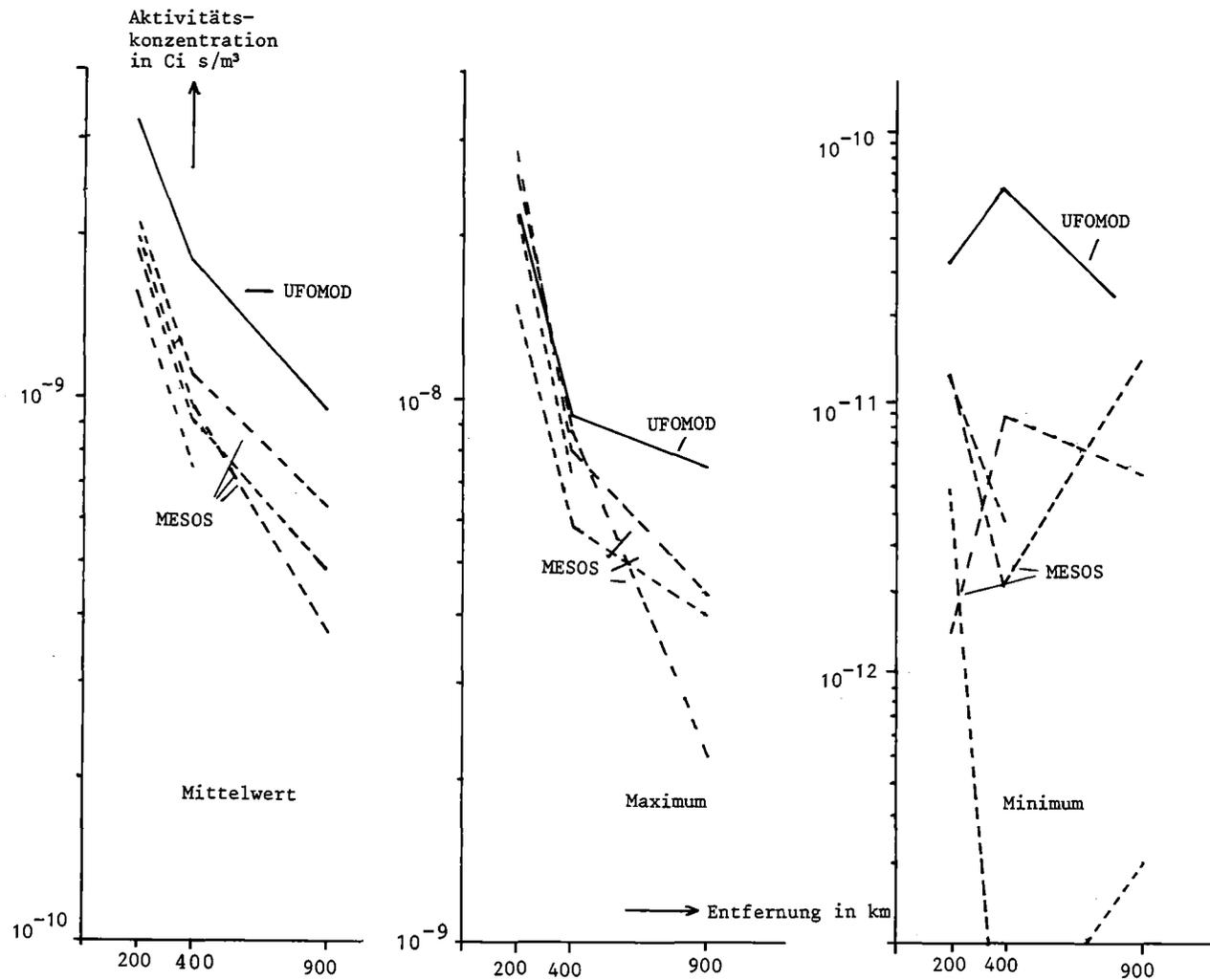


Abb. 7: Statistische Kennzahlen der Luftkonzentration in  $\text{Ci s/m}^3$  Edelgas.  
 (Die gestrichelten Kurven gelten für MESOS in den Richtungen N-O-S-W).

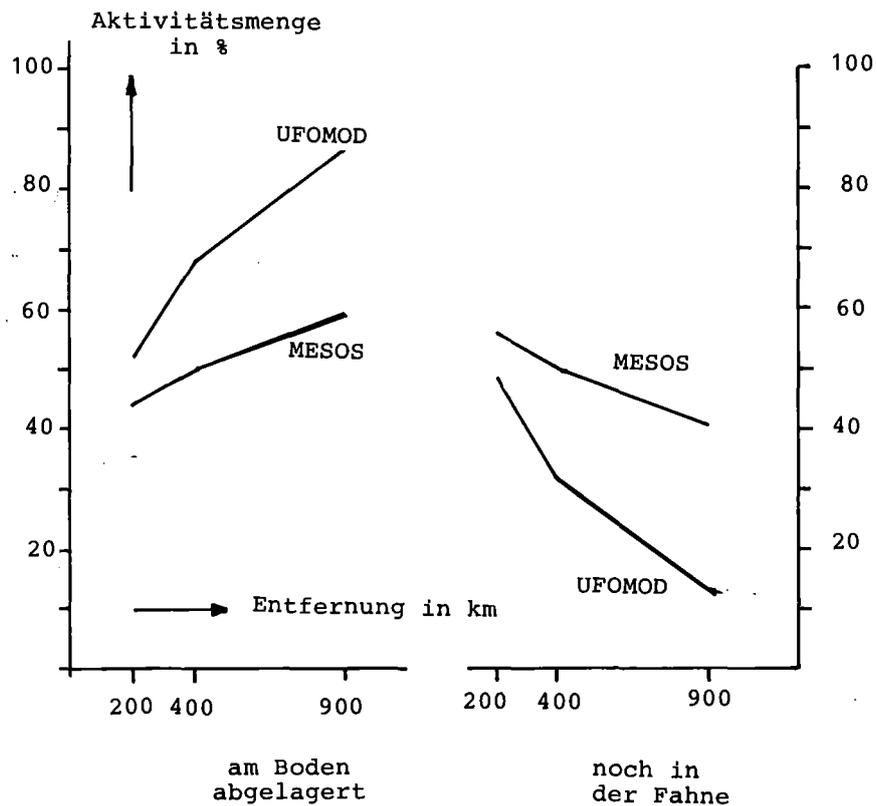


Abb. 8: Trocken abgelagerte bzw. noch vorhandene Jodaktivitätsmenge in Prozent ohne Berücksichtigung des Pfades der nassen Deposition.

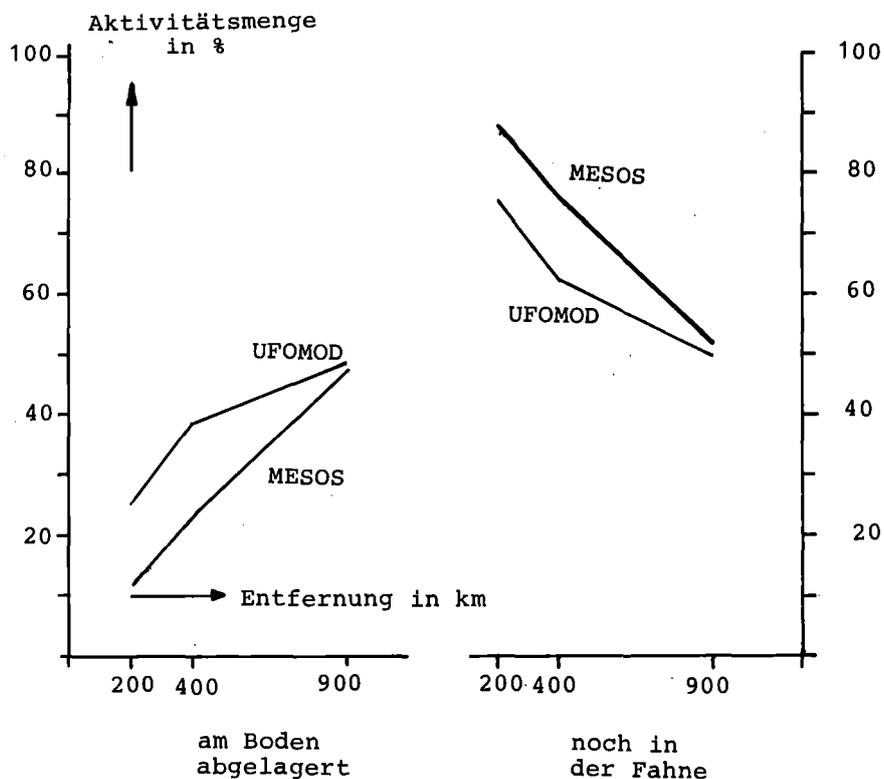


Abb. 9: Naß abgelagerte bzw. noch vorhandene Jodaktivitätsmenge in Prozent ohne Berücksichtigung des Pfades der nassen Deposition.

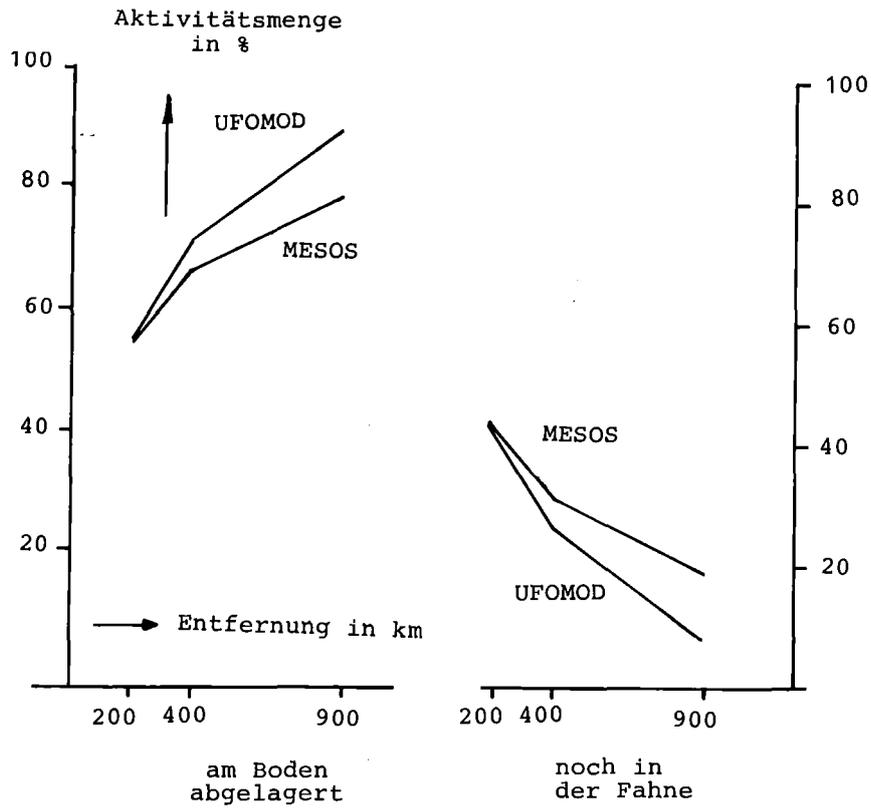


Abb. 10: Abgelagerte bzw. noch vorhandene Jodaktivitätsmenge in Prozent bei trockener und nasser Deposition.

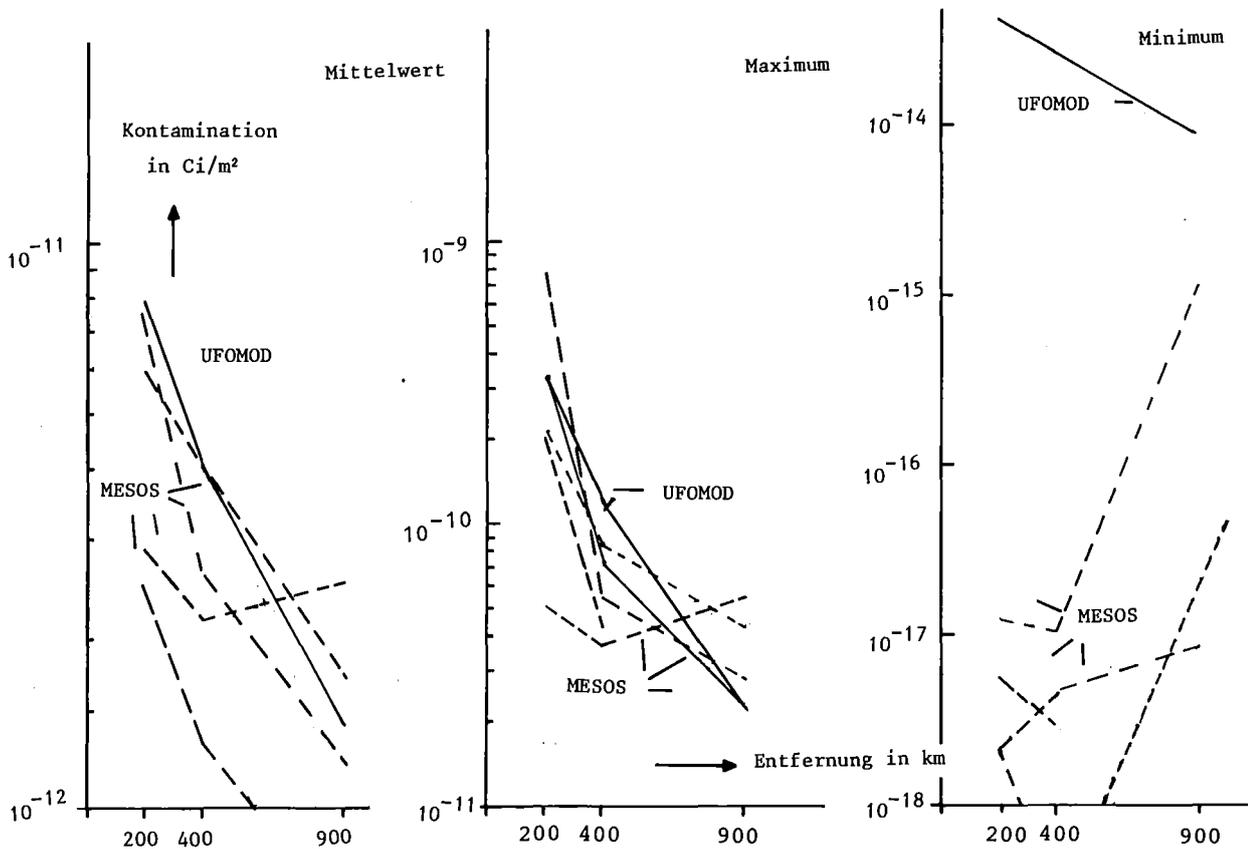


Abb. 11: Statistische Kennzahlen der Aerosolkontamination in  $\text{Ci}/\text{m}^2$ .  
(Die gestrichelten Kurven gelten für MESOS in den Richtungen N-O-S-W.)

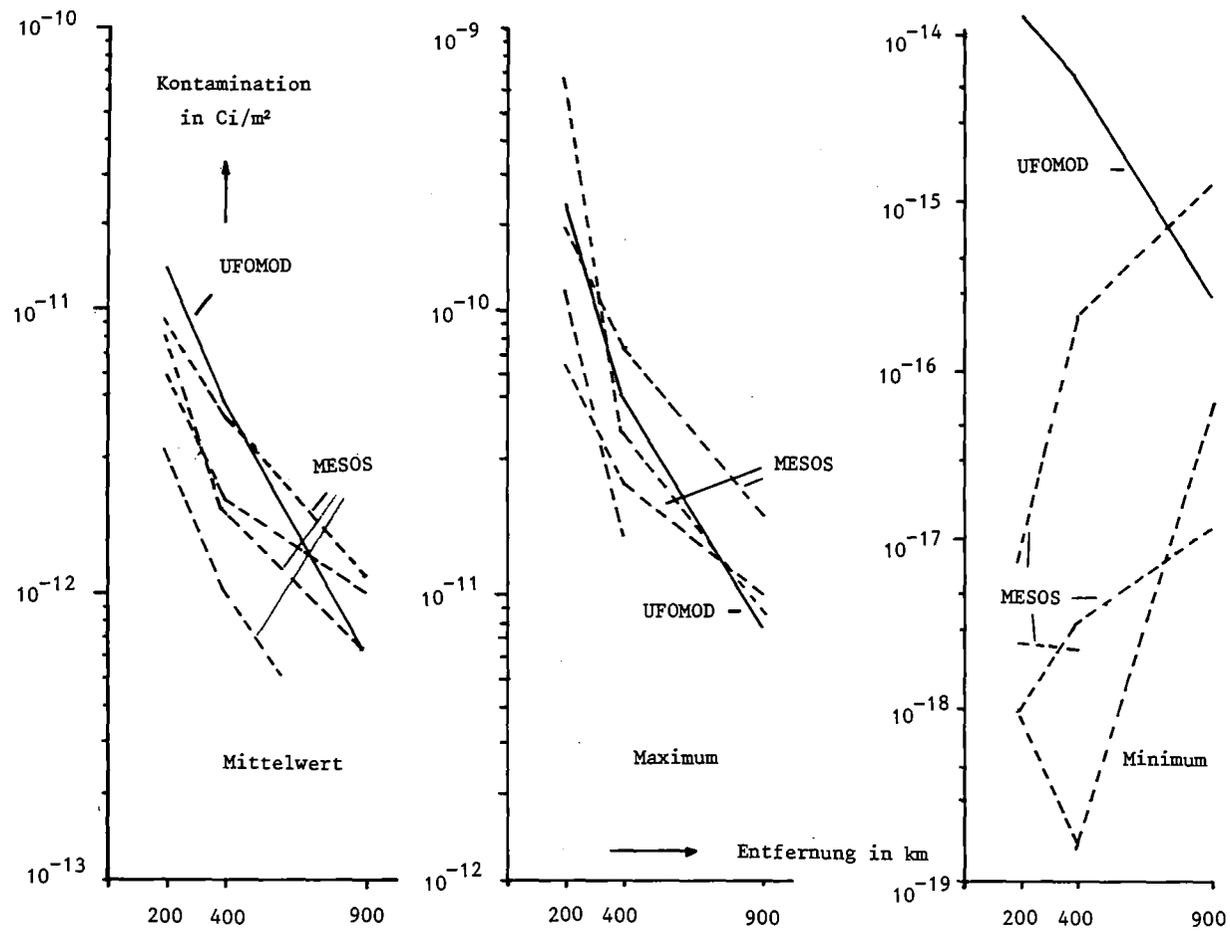


Abb. 12: Statistische Kennzahlen der Jodkontamination in  $\text{Ci}/\text{m}^2$ .  
 (Die gestrichelten Kurven gelten für MESOS in den Richtungen N-O-S-W.)

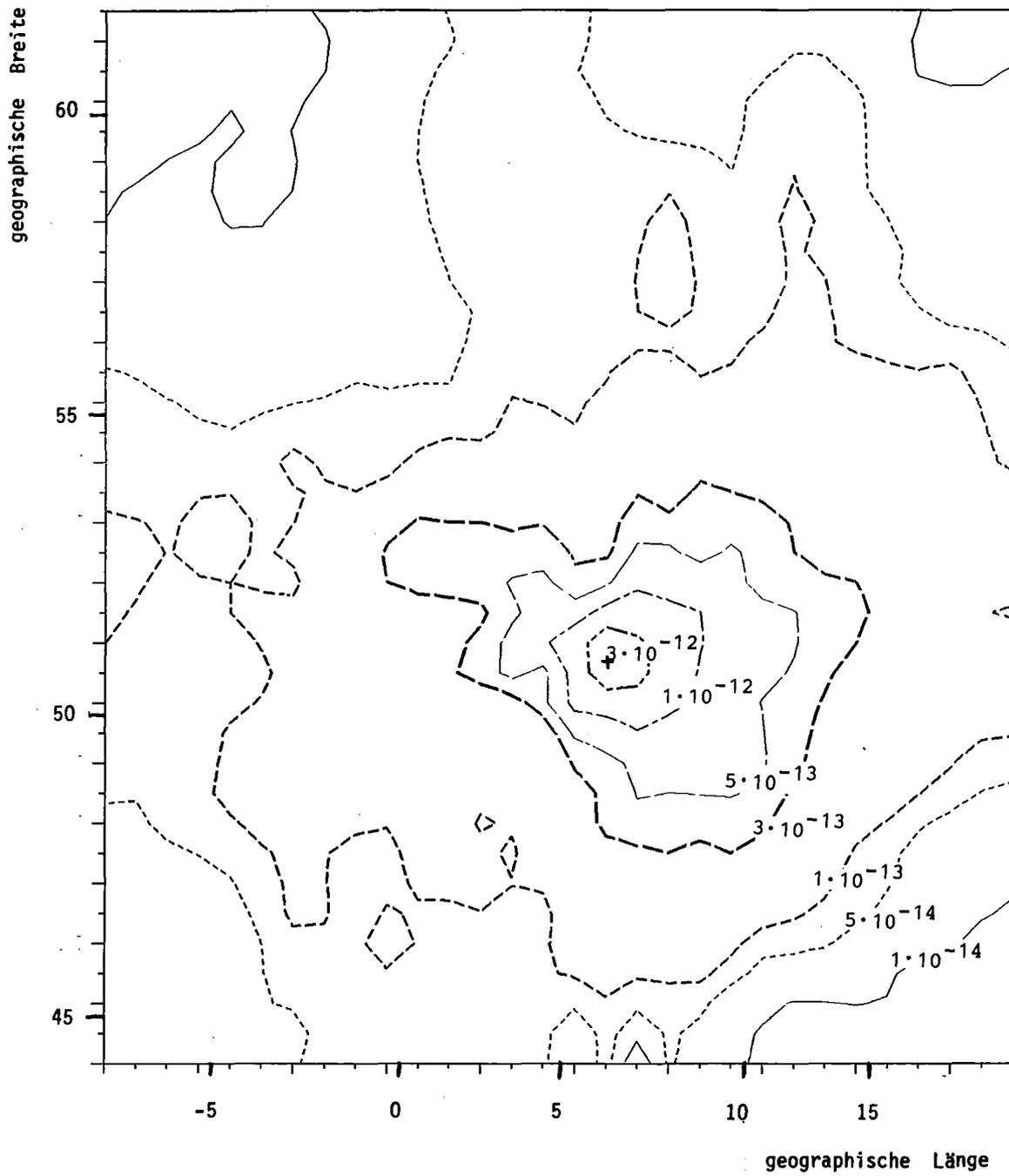


Abb. 13: Verteilung des Erwartungswertes der Aerosolkontamination in  $\text{Ci m}^{-2}$ .  
(Quellstärke  $1\text{Ci}$ )

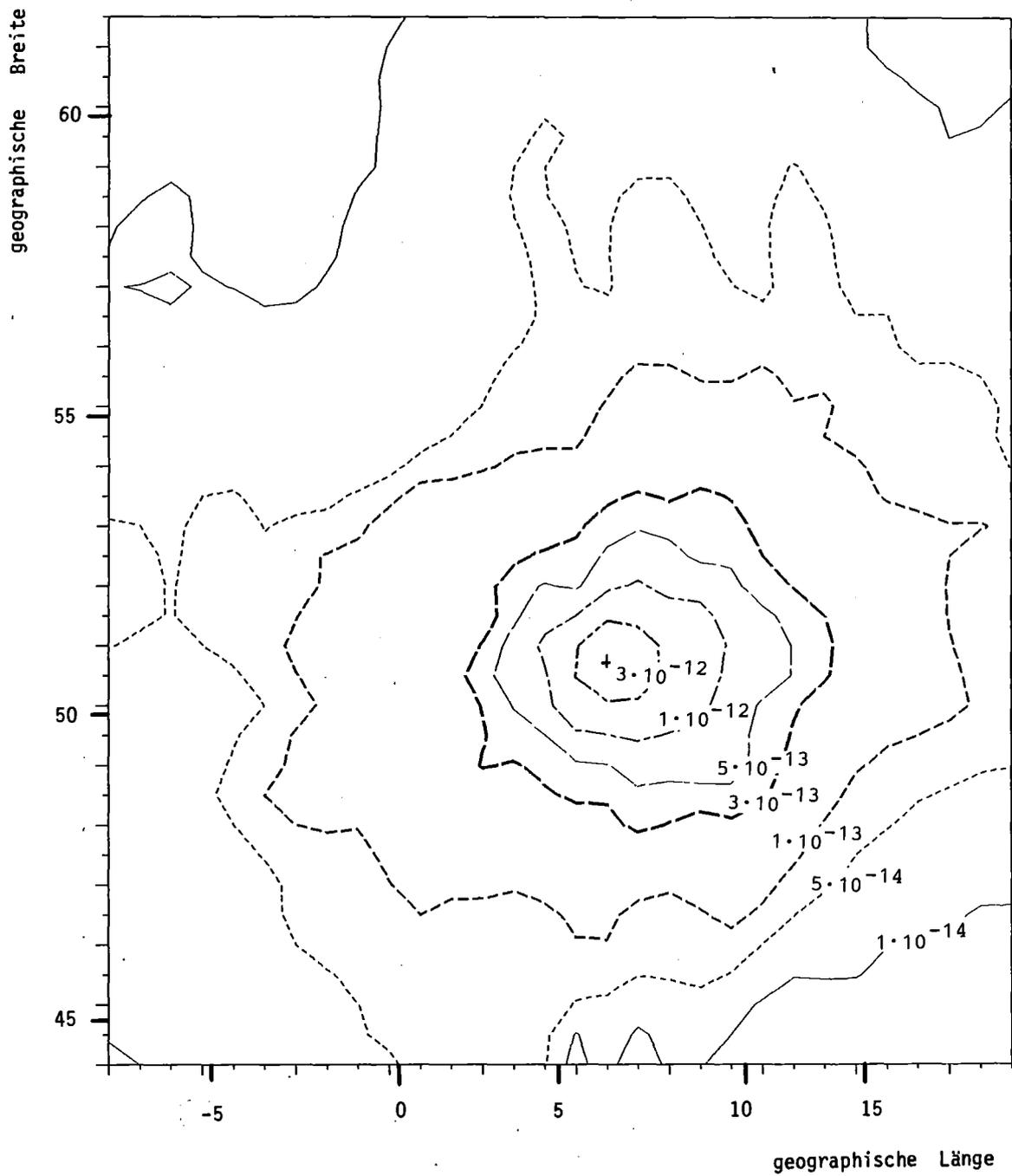
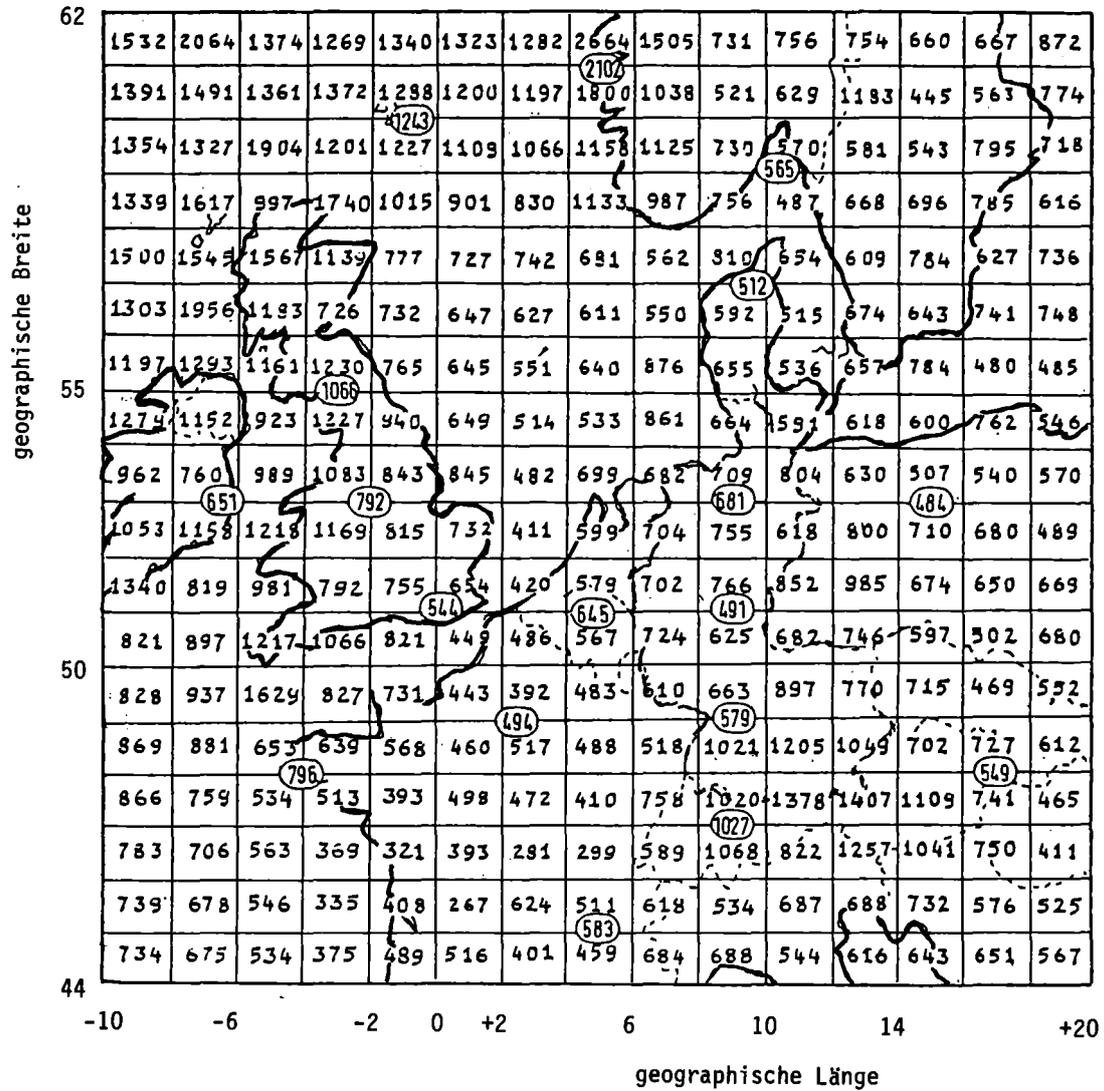


Abb. 14: Verteilung des Erwartungswertes der Jodkontamination in  $\text{Ci m}^{-2}$ .  
(Quellstärke 1Ci)



○ Jährliche Niederschlagsmenge an Wetterstationen (WMO (1973-74))

Abb. 15: Vergleich jährlicher Niederschlagsmengen:  
MESOS-Datenbasis - Messungen an Wetterstationen.

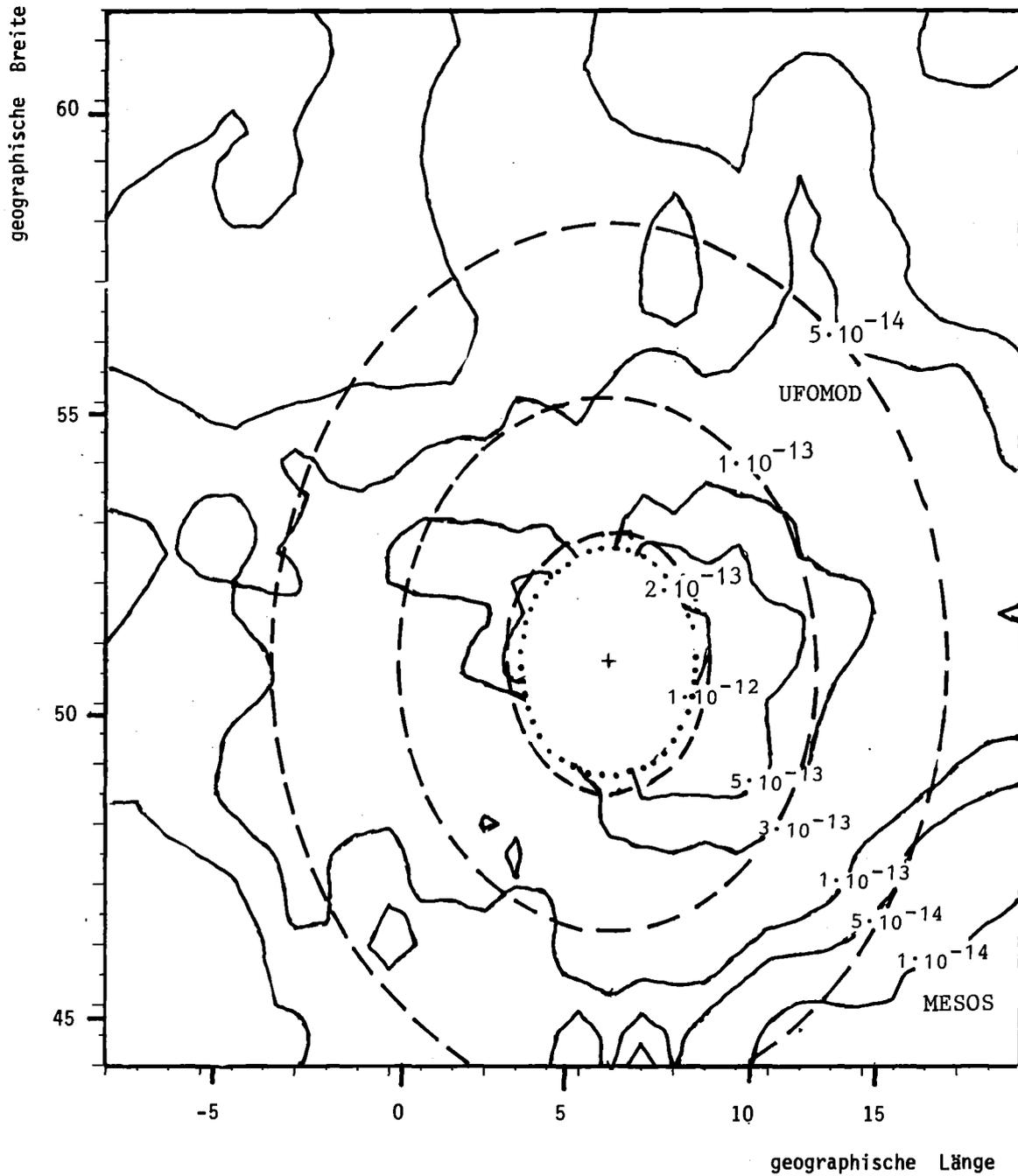


Abb. 16: Vergleich der Erwartungswerte der Aerosolkontamination in  $\text{Ci m}^{-2}$  berechnet mit den Modellen MESOS und UFOMOD. (Innerhalb des gepunkteten Bereichs, < 200 km, erfolgte kein Vergleich. Quellstärke 1Ci).

— MESOS  
- - - UFOMOD

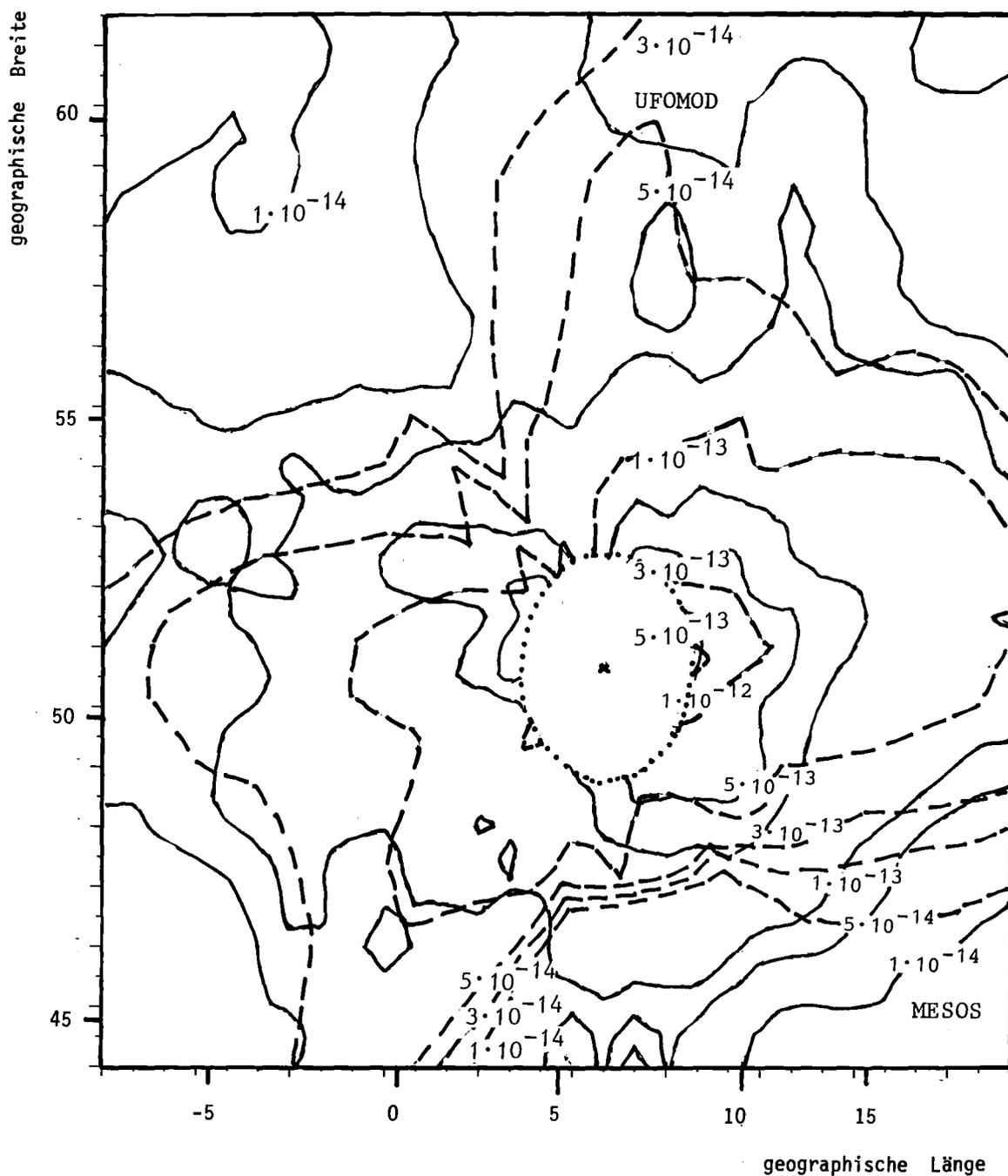
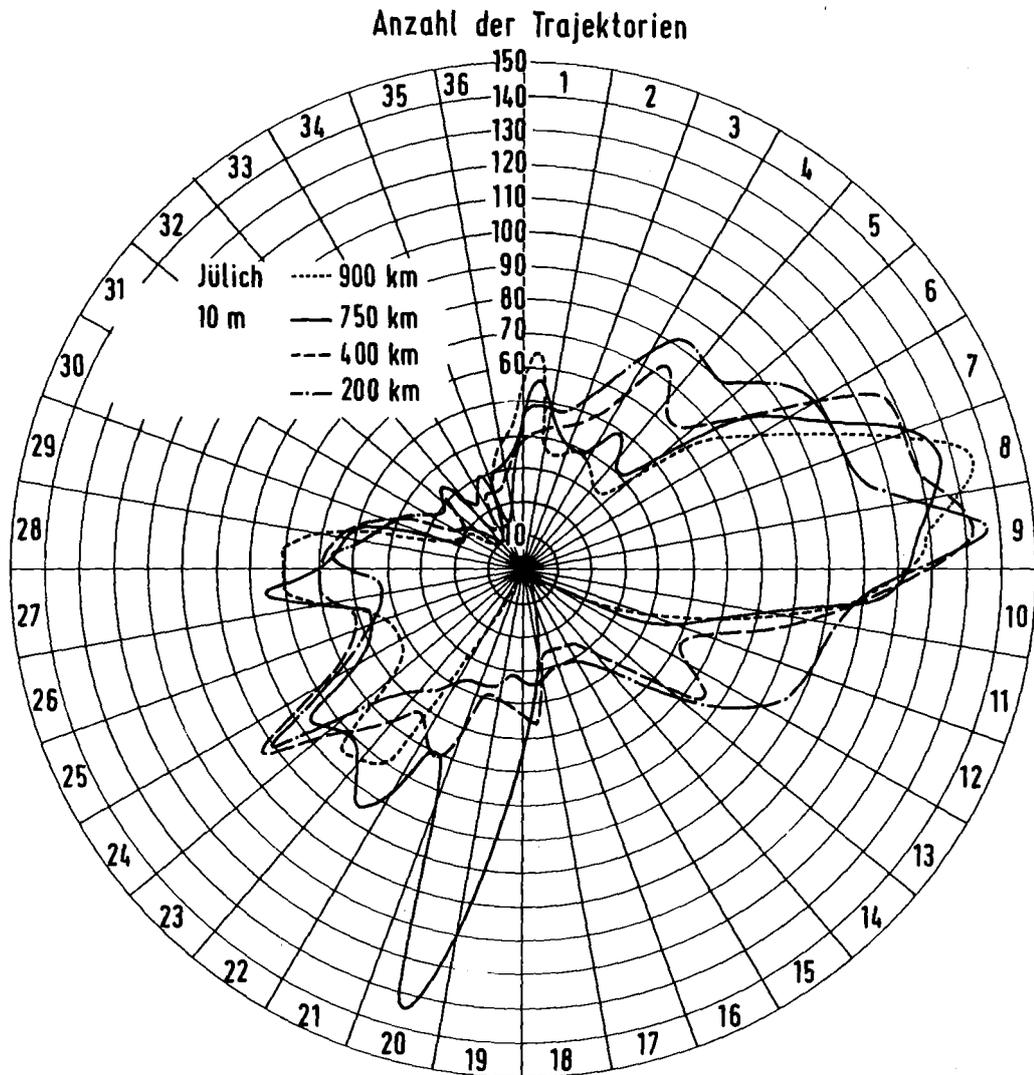


Abb. 17: Vergleich der Erwartungswerte der Aerosolkontamination in  $\text{Ci m}^{-2}$  berechnet mit den Modellen MESOS und einer mit MESOS-Ergebnissen modifizierten UFOMOD-Version.  
(Innerhalb des gepunkteten Bereichs, < 200 km, erfolgte kein Vergleich. Quellstärke 1Ci).

— MESOS  
- - - UFOMOD



**Trajektorienrose für die Station Jülich 10 m**

Abb. 18: Häufigkeitsverteilung der Trajektorienzugrichtungen in unterschiedlichen Entfernungsbereichen.