

KfK 4749
August 1992

WOLGA 2.1
Ein FORTRAN-77-Programm
zur Berechnung der kurzzeitigen
Submersions-Dosisleistung
durch die Gammastrahlung
aus einer radioaktiven
Abluftfahne

W. Hübschmann, D. Papadopoulos, M. Bär, S. Honcú
Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Hauptabteilung Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Hauptabteilung Sicherheit

KfK 4749

WOLGA 2.1

Ein FORTRAN-77-Programm zur Berechnung der kurzzeitigen
Submersions-Dosisleistung durch die Gammastrahlung
aus einer radioaktiven Abluftfahne

W. Hübschmann
D. Papadopoulos
M. Bär
S. Honcú

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Das Rechenprogramm WOLGA 2.1 berechnet die Kurzzeit-Gamma-Submersionsdosis, die durch die radioaktive Abluffahne eines Einzelemittenten an einem Aufpunkt in Bodennähe erzeugt wird. Dabei wird angenommen, daß die Abluffahne ihre Richtung und Form beibehält und daß die Radioaktivitätsverteilung in der Abluffahne einer doppelten Gaußverteilung entspricht. Die Aktivität kann aus einem Kamin oder aus einem Gebäude freigesetzt werden. Der Dosisaufbaufaktor sowie der Schwächungskoeffizient für Photonen in Luft werden nach neueren Berechnungsergebnissen energieabhängig interpoliert. Die Dosisleistung wird für beliebige Aufpunkte oder für ein Polarkoordinaten-Raster - zum Zeichnen von Isodosenlinien - berechnet.

Die Aufteilung der Aktivität auf eine endliche Anzahl von Punkten im Raum ist frei wählbar. Sie kann so fein aufgeteilt werden, daß der Fehler des Ergebnisses kleiner als etwa 3 % ist. Der auf die Windgeschwindigkeit von 1 m/s normierte Gamma-Ausbreitungsfaktor wird für 6 Stabilitätskategorien, für Emissionshöhen von 0 bis 200 m und für eine Gamma-Energie von 1 MeV in Form von Diagrammen angegeben. Diese Diagramme sind konsistent mit der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu §45 der Strahlenschutzverordnung.

Abstract

WOLGA 2.1 - A FORTRAN-77-Code for Calculation of the Short-term Gamma Submersion Dose Rate Caused by Gamma Radiation of a Radioactive Off-gas Plume

The WOLGA 2.1 computer code calculates the short-term gamma submersion dose rate caused by the radioactive off-gas plume of a single source located at a point near the ground. It is assumed that the off-gas plume maintains its direction and form and that a double Gaussian function describes the distribution of radioactivity within the plume. The activity is assumed to be released from a stack or a building. The buildup factor and the mass attenuation coefficient in air are interpolated - dependent on the gamma energy - from recent results of calculations. The dose rate is calculated for up to 600 defined locations or for a polar grid so that isodose charts can be drawn.

The subdivision of the plume into a finite number of volume elements can be chosen freely. It can be so finely divided that the error of the result obtained is less than about 3 %. The gamma dispersion factor normalized to a wind velocity of 1 m/s is shown in diagrams for 6 dispersion categories, for emission levels from 0 up to 200 m and for a gamma energy of 1 MeV. These diagrams are consistent with the *Allgemeine Verwaltungsvorschrift* referring to §45 of the German Radiation Protection Order.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1.0 Einführung | 1 |
| 2.0 Räumliche Verteilung der Aktivität | 2 |
| 2.1 Linienquelle | 2 |
| 2.2 Flächenquelle | 3 |
| 2.3 Volumenquelle | 6 |
| 3.0 Berechnung der γ-Dosisleistung | 9 |
| 3.1 Linienquelle | 11 |
| 3.2 Flächenquelle | 12 |
| 3.3 Volumenquelle | 15 |
| 4.0 Genauigkeit der berechneten Dosis und Ergebnisse | 17 |
| 5.0 Literaturverzeichnis | 18 |
| Anhang A. Beschreibung der Eingabe für WOLGA 2.1 | 20 |
| Anhang B. Beispiel für die Eingabe des Programms WOLGA 2.1 | 23 |
| Anhang C. Beispiel für die Ausgabe des Programms WOLGA 2.1 | 24 |
| C.1.1 Zusatz-Ausgabe auf TSO-HOLD (SPOOL-Datei) für RESTART-Lauf .. | 26 |
| C.1.2 Graphische Darstellung der Ergebnisse (Isolinien) | 27 |
| Anhang D. Diagramme des normierten Gamma-Kurzzeit-Ausbreitungsfaktors | 28 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Horizontale Aktivitätsverteilung | 3 |
| 2. | Geometrie zur Berechnung der horizontalen Aktivitätsverteilung auf der Emissionsebene in einer Entfernung r_n | 4 |
| 3. | Vertikale Verteilung der Aktivität | 7 |
| 4. | Aufbaufaktor $B(E, \mu\rho)$ für γ -Strahlung in Luft | 10 |
| 5. | Geometrie der Linienquelle und des Aufpunktes | 12 |
| 6. | Geometrie der Flächenquelle | 13 |
| 7. | Geometrie zur Bestimmung des Winkelbereichs von α | 15 |
| 8. | Graphische Ausgabe des Eingabe-Beispiels | 27 |
| 9. | Normierter Kurzzeit-Ausbreitungsfaktor, $H = 0$ m. | 28 |
| 10. | Normierter Kurzzeit-Ausbreitungsfaktor, $H = 50$ m. | 29 |
| 11. | Normierter Kurzzeit-Ausbreitungsfaktor, $H = 100$ m. | 30 |
| 12. | Normierter Kurzzeit-Ausbreitungsfaktor, $H = 150$ m. | 31 |
| 13. | Normierter Kurzzeit-Ausbreitungsfaktor, $H = 200$ m. | 32 |

1.0 Einführung

Die Berechnung der γ -Dosisleistung aus einer radioaktiven Abluffahne ist aufgrund des großen Durchdringungsvermögens der γ -Strahlung in Luft und der ungleichmäßigen Verteilung der Radioaktivität in der Atmosphäre relativ aufwendig. In der Literatur sind zur Lösung dieses Problems eine Reihe von Näherungsverfahren publiziert worden (/He-68/, /Vo-70/, /Wi-70/, /Co-68/, /Co-68-1/, /Ro-79/, /Ro-81/, /Mi-83/), wobei meist mehr oder weniger grobe Annahmen bezüglich der Aktivitätsverteilung im Raum getroffen wurden.

Um bei kurzzeitigen Emissionen (z. B. bei einem Störfall) die γ -Dosisleistung annähernd genau berechnen zu können, wurde ein Rechenprogramm mit folgenden Randbedingungen entwickelt:

Die Aktivitätsverteilung wird durch die zum Zeitpunkt der Emission vorherrschende Ausbreitungsrichtung (x), Windgeschwindigkeit (u) und Stabilitätskategorie (j) bestimmt. Es wird angenommen, daß in der Zeit T , während der die Aktivität emittiert wird, die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit und die Stabilitätskategorie konstant bleiben.

Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, kann entweder das Programm WOLGA 2.1 mehrmals für die Teilperioden $T_1, T_2 \dots T_n$ ($T_1 + T_2 + \dots + T_n = T$) mit jeweils konstanten meteorologischen Bedingungen gestartet werden, oder, falls n zu groß und die Emission annähernd konstant ist, die Emission als kontinuierlich angesehen und die Berechnung mit Hilfe der für die Zeit T erstellten meteorologischen Statistik und des Rechenprogramms WOLGA 1 /Ho-86/ durchgeführt werden. Das Rechenprogramm WOLGA 2.1 ist eine revidierte Fassung von WOLGA 2 /Pa-88/ und ersetzt dieses Programm. Es ist konsistent mit der "Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung" (AVV) /AV-90/. Da die Dosisfaktoren für Gammasubmersion in /AV-90/ neu definiert sind, ist WOLGA 2.1 nicht mit WOLGA 2 kompatibel.

2.0 Räumliche Verteilung der Aktivität

Die Quelle der radioaktiven Abluft wird als Punktquelle in der Höhe h angenommen, wenn der Gebäudequerschnitt BAU (Kap. Anhang A) gleich Null gesetzt ist. Andernfalls wird Freisetzung aus einem Gebäude mit dem wirksamen Querschnitt BAU angenommen, und die Ausbreitungsparameter σ_y und σ_z werden nach /St-83/ und der gleichlautenden Vorschrift in /AV-90/ erweitert.

Die emittierte Aktivität wird zur Erleichterung des Verständnisses schrittweise in die drei Dimensionen des Raumes (axial, azimutal und vertikal) verteilt. Zunächst wird die emittierte Aktivität in Ausbreitungsrichtung auf einer Geraden in der Emissionshöhe konzentriert angenommen (Linienquelle). Sodann wird die Aktivität jedes Linienelementes auf der Emissionsebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung entsprechend dem horizontalen Ausbreitungsparameter $\sigma_{yj}(x)$ normal verteilt (Flächenquelle). Schließlich wird die Aktivität jedes Flächenelementes der Flächenquelle in z-Richtung entsprechend dem vertikalen Ausbreitungsparameter $\sigma_{zj}(x)$ und unter Berücksichtigung der Reflexion am Boden normal verteilt (Volumenquelle).

Bei jeder der drei Quellenverteilungen wird die an sich kontinuierlich (auf einer Linie, einer Fläche oder im Raum) verteilte Aktivität in den Schwerpunkten der Linien-, Flächen- und Volumenelemente konzentriert angenommen (Punktquelle). Die γ -Dosis an einem Aufpunkt wird als Summe der Dosisbeiträge der einzelnen Punktquellen berechnet.

2.1 Linienquelle

Es wird angenommen, daß ein Emittent der Emissionshöhe h die Aktivität A in der kurzen Zeit T abgibt und daß diese in einem schmalen Sektor in Emissionshöhe konzentriert bleibt (Linienquelle).

Ist λ die Zerfallskonstante des emittierten Nuklids, \dot{A} die Emissionsrate und u die Windgeschwindigkeit, so ist die Aktivitätskonzentration pro Längeneinheit an der Stelle $x = r_n$ der Linienquelle

$$C_{Ln} = \frac{\dot{A}}{u} e^{-\lambda \frac{r_n}{u}} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}} \right]. \quad [2.1]$$

Die Aktivität der Linienquelle wird in eine Kette einzelner Aktivitätselemente aufgeteilt.

$$\Delta A_{Ln} = C_{Ln} \Delta r = \frac{\dot{A} \Delta r}{u} e^{-\lambda \frac{r_n}{u}} \quad [\text{Bq}]. \quad [2.2]$$

Es ist

$$r_n = n \Delta r; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [2.3]$$

2.2 Flächenquelle

Die Aktivität ΔA_{Ln} wird auf der Fläche in y-Richtung entsprechend dem horizontalen Ausbreitungsparameter $\sigma_{yj}(x)$ normal verteilt (s. Abb. 1).

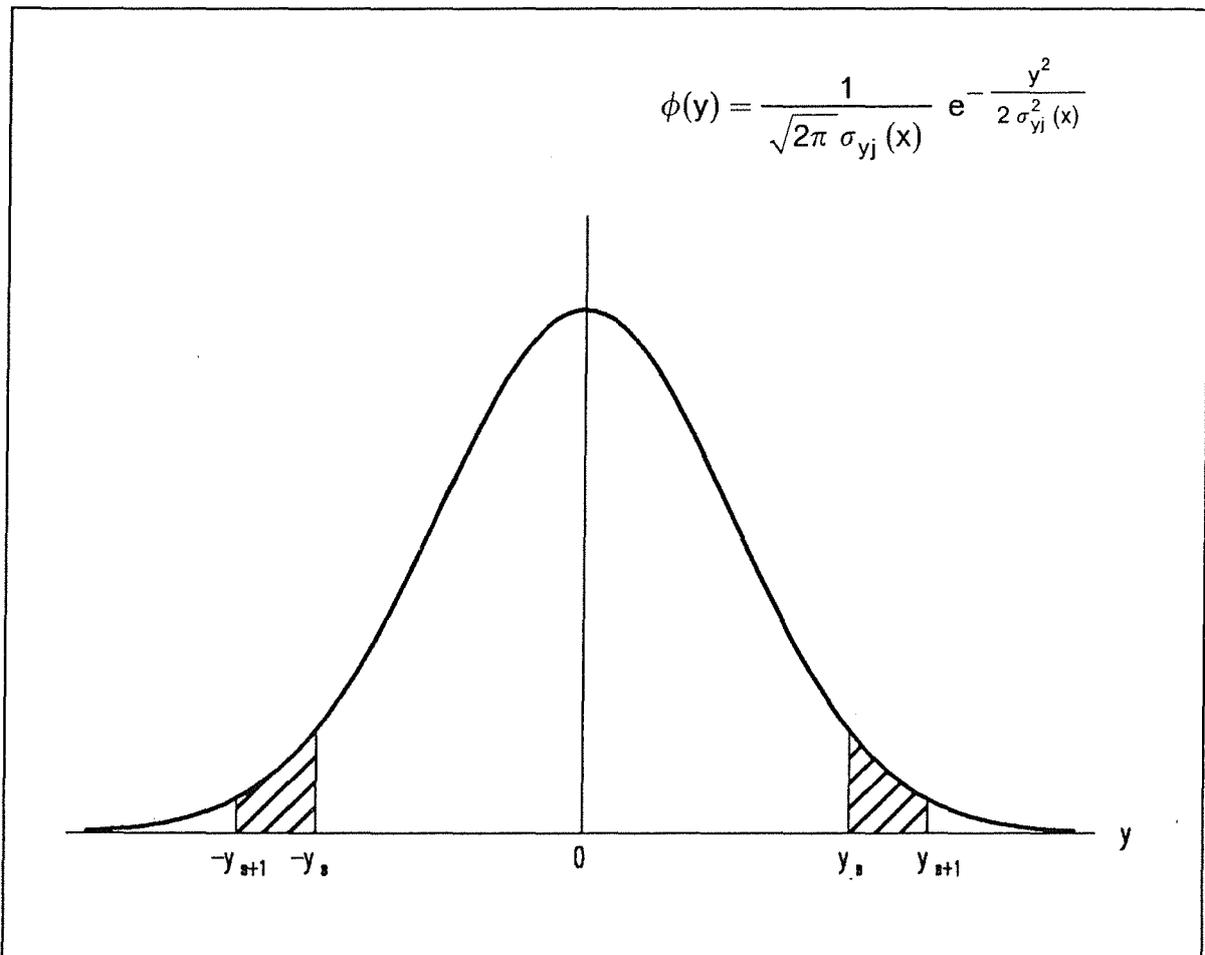


Abbildung 1. Horizontale Aktivitätsverteilung

Dabei ist der Winkelschritt $\Delta\alpha$ in jeder Entfernung r_n zwar konstant, so daß die Breite Δy der Flächenelemente mit wachsendem Abstand von der Ausbreitungsachse größer wird; $\Delta\alpha$ wird aber jeweils so gewählt, daß Δy_0 - die Breite unter der Fahnenachse - in jeder Entfernung r_n gleich groß ist (s. Abb. 2).

Die Fläche ΔF_s (s. Abb. 2) auf der Emissionsebene ist durch folgende Koordinaten gegeben:

$$x_n = r_n - \frac{\Delta r}{2} \quad [2.4a]$$

$$x_{n+1} = r_{n+1} - \frac{\Delta r}{2} \quad [2.4b]$$

$$y_s = r_n \tan\left(\frac{2s-1}{2} \Delta\alpha\right) \quad [2.5]$$

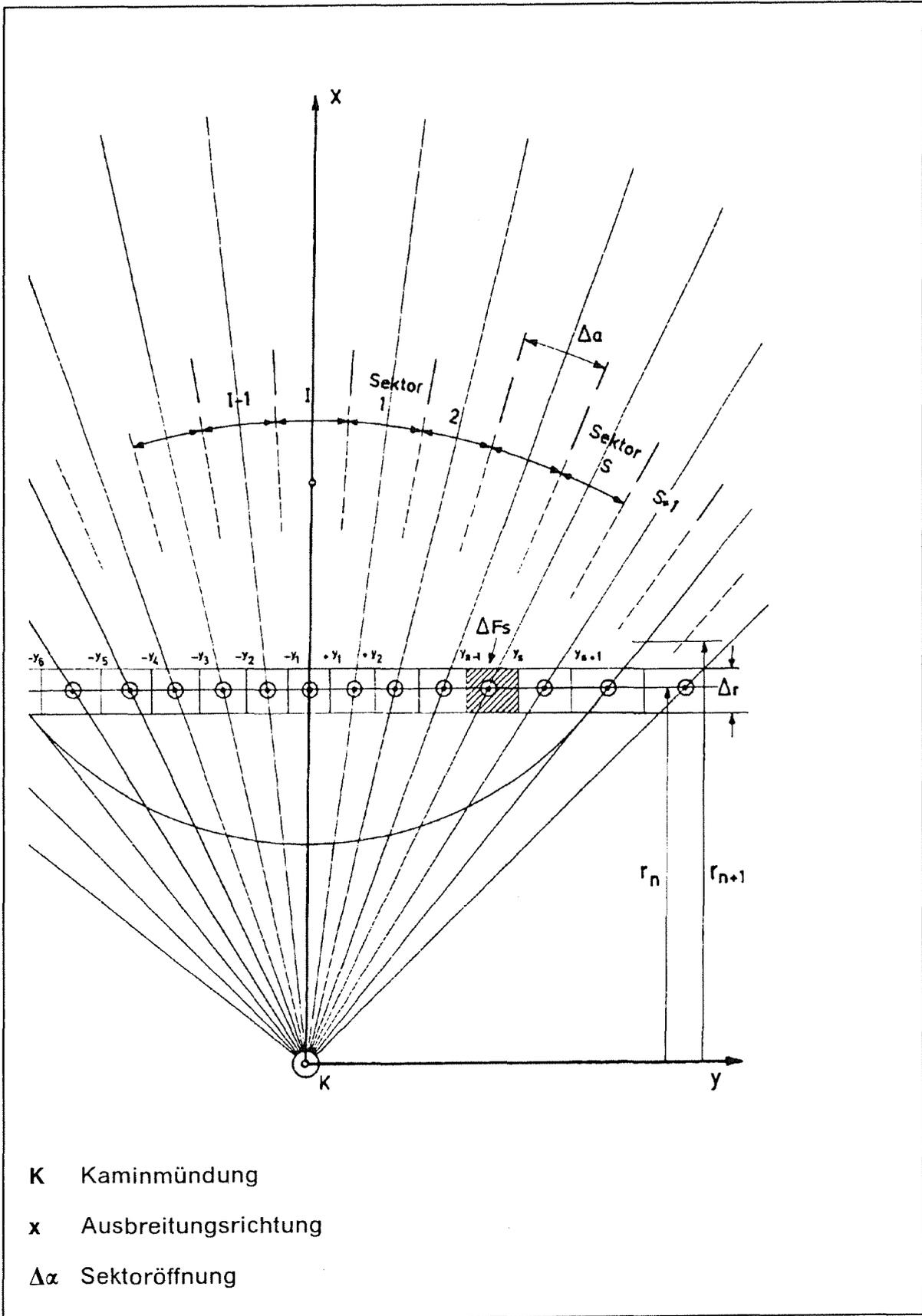


Abbildung 2. Geometrie zur Berechnung der horizontalen Aktivitätsverteilung auf der Emissionsebene in einer Entfernung r_n

$$y_{s+1} = r_n \tan\left(\frac{2s+1}{2} \Delta\alpha\right) \quad [2.6]$$

mit

$$\Delta\alpha = 2 \arctan \frac{\Delta y_0}{2 r_n} \quad [2.7]$$

Es ist also

$$\Delta F_s = (x_{n+1} - x_n) (y_{s+1} - y_s). \quad [2.8]$$

In diesen Gleichungen sind

x, y Kartesische Koordinaten mit x in Ausbreitungsrichtung und Koordinatenursprung im Kaminfoß

r, α Polarkoordinaten mit Koordinatenursprung im Kaminfoß; der Winkel α wächst von Nord über Ost - Süd - West - Nord.

n Index für den Entfernungsschritt ($n = 1, 2, \dots$)

s Index für den Winkelschritt ($s = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \pm \frac{1}{2}$) mit $l + 1 < \pi/\Delta\alpha$.

Die Flächenaktivität ΔA_{Fjns} für die Stabilitätskategorie j ist:

$$\Delta A_{Fjns} = \Delta A_{Ln} f_{js}(x) \quad [Bq] \quad [2.9]$$

mit

$$f_{js}(x) = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{yj}(x)} \left(\int_{-y_{s+1}}^{y_{s+1}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_{yj}(x)}\right)^2} dy - \int_{-y_s}^{y_s} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_{yj}(x)}\right)^2} dy \right) \quad [2.10]$$

Der Ausbreitungsparameter $\sigma_{yj}(x)$ wird entspr. /AV-90/ eingesetzt. Bei Freisetzung aus einem Gebäude ($BAU \neq 0$) wird $\sigma_{yj}(x)$ erweitert:

$$\sigma_{yj, BAU} = \left(\sigma_{yj}^2 + \frac{BAU}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Mit der Hilfsvariablen w und der Definition

$$\text{ERF}(w_s) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-w_s}^{w_s} e^{-w^2} dw \quad [2.11]$$

und

$$w = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{y}{\sigma_{yj}(x)} \quad [2.12]$$

erhält man den folgenden Ausdruck für f_{js} ($s = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \frac{1}{2}$):

$$f_{js}(x) = \frac{1}{2} \left(\text{ERF}\left(\frac{y_{s+1}}{\sqrt{2} \sigma_{yj}(x)}\right) - \text{ERF}\left(\frac{y_s}{\sqrt{2} \sigma_{yj}(x)}\right) \right) \quad [2.13]$$

Für den Zentralsektor ($s = 0$) gilt:

$$f_{j0}(x) = \text{ERF}\left(\frac{y_1}{\sqrt{2} \sigma_{yj}(x)}\right) \quad [2.14]$$

2.3 Volumenquelle

Als Volumenquelle wird die in der Ablufffahne räumlich verteilte Aktivität eines Emittenten verstanden. Die Aktivität ΔA_{Fjns} wird in der vertikalen z-Richtung nach einer Gaußverteilung der Varianz $\sigma_{zj}^2(x)$ verteilt. Es wird vollständige Reflexion am Boden angenommen. Die sich damit ergebende Aktivitätsverteilung (s. Abb. 3) wird innerhalb der Höenschicht

$$\Delta z_i = z_{i+1} - z_i \quad [2.15]$$

integriert, um die Aktivitätsmenge ΔA_{Vjnsi} (Volumenquelle) zu erhalten:

$$\Delta A_{Vjnsi} = \Delta A_{Fjns} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{zj}(x)} \left\{ \int_{z_i}^{z_{i+1}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{h-z}{\sigma_{zj}(x)}\right)^2} dz + \int_{z_i}^{z_{i+1}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{h+z}{\sigma_{zj}(x)}\right)^2} dz \right\} \quad [2.16]$$

$$z_i = i \Delta z; \quad i = 0, 1, 2 \dots$$

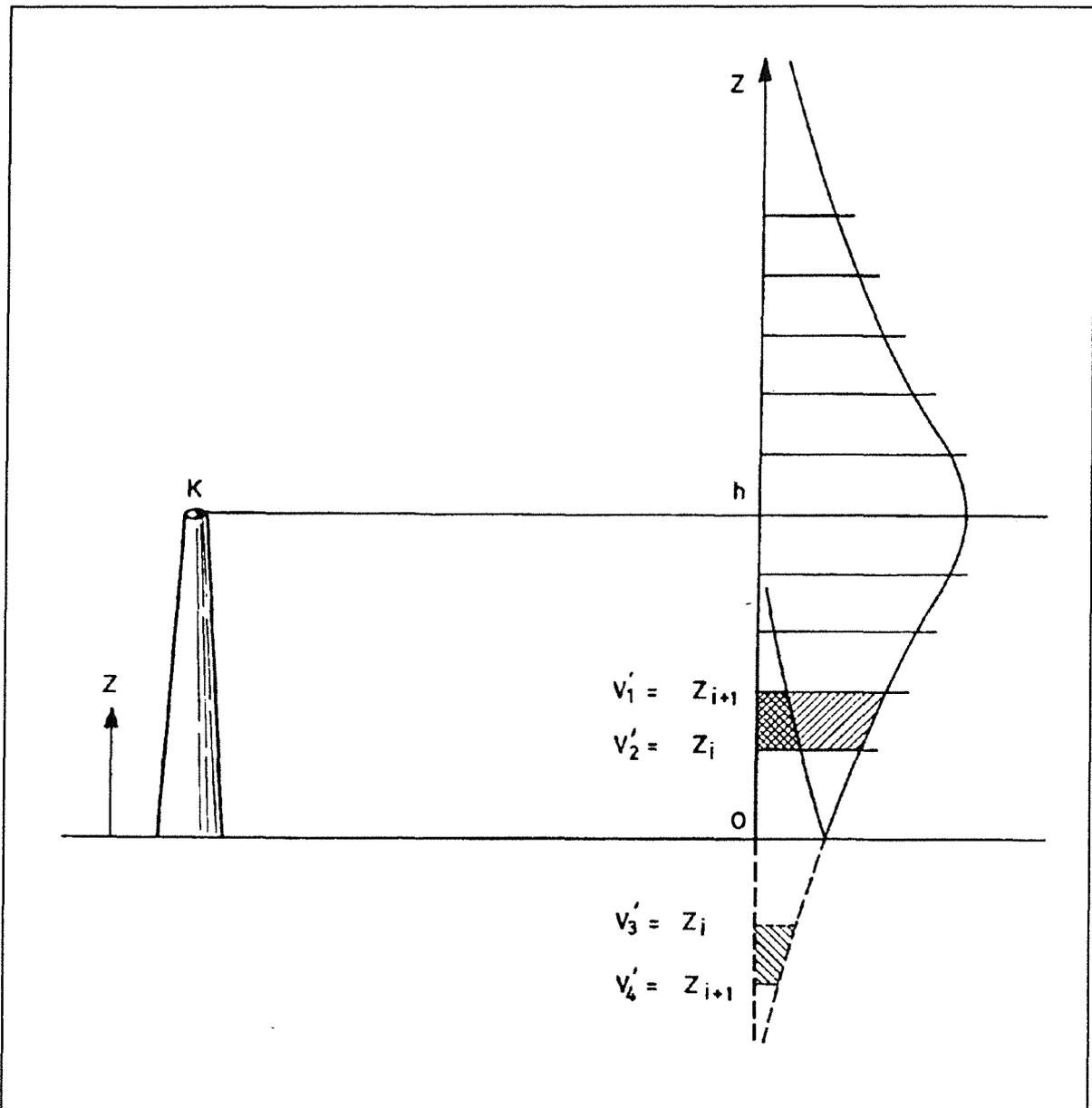


Abbildung 3. Vertikale Verteilung der Aktivität

Δz wird zweckmäßigerweise so gewählt, daß

$$\frac{h}{\Delta z} - \frac{1}{2} = p; \quad p = 0, 1, 2, \dots$$

($p = 6$ in Abb. 3), h ist die effektive Emissionshöhe. Der Ausbreitungsparameter $\sigma_{zj}(x)$ wird entspr. /AV-90/ eingesetzt. Bei Freisetzung aus einem Gebäude ($BAU \neq 0$) wird $\sigma_{zj}(x)$ erweitert:

$$\sigma_{zj, BAU} = \left(\sigma_{zj}^2 + \frac{BAU}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Es werden die Hilfsgrößen v' und v'' eingeführt

$$v' = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h - z}{\sigma_{zj}(x)} \quad [2.17]$$

$$v'' = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h + z}{\sigma_{zj}(x)} \quad [2.18]$$

Aus Gln. [2.16] bis [2.18] folgt (s. Abb. 3):

$$\Delta A_{Vjnsi} = \frac{\Delta A_{Fjns}}{2} [\text{ERF}(v'_i) - \text{ERF}(v'_{i+1}) + \text{ERF}(v''_{i+1}) - \text{ERF}(v''_i)] \quad [2.19]$$

mit

$$\begin{aligned} v'_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h - z_i}{\sigma_{zj}(x)} \\ v'_{i+1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h - z_{i+1}}{\sigma_{zj}(x)} \\ v''_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h + z_i}{\sigma_{zj}(x)} \\ v''_{i+1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h + z_{i+1}}{\sigma_{zj}(x)} \end{aligned} \quad [2.20]$$

Wir schreiben

$$\Delta A_{Vjnsi} = \Delta A_{Ln} f_{js} f_{ji} \quad [2.21]$$

mit f_{js} aus Gln. [2.13], [2.14] und

$$f_{ji} = \frac{1}{2} [\text{ERF}(v'_i) - \text{ERF}(v'_{i+1}) + \text{ERF}(v''_{i+1}) - \text{ERF}(v''_i)] \quad [2.22]$$

Mit ΔA_{Ln} aus Gl. [2.2] ist

$$\Delta A_{Vjnsi} = \frac{\dot{A}}{u} e^{-\lambda \frac{r_n}{u}} \Delta r f_{js} f_{ji} \quad [\text{Bq}]. \quad [2.23]$$

Theoretisch würde sich nach Gl. [2.16] die Aktivität unendlich weit nach oben erstrecken. Die tatsächlich endliche Aktivitätsverteilung wird durch eine Abschneidenvorschrift berücksichtigt, die in Kap. 3.3 angegeben ist.

3.0 Berechnung der γ -Dosisleistung

Aufgrund des großen Durchdringungsvermögens können γ -Strahlen aus einem großen Bereich der Abluffahne zur Strahlenexposition am betrachteten Aufpunkt P beitragen. Zur Ermittlung der γ -Dosisleistung sind daher die Dosisbeiträge aller Volumenaktivitätselemente (ΔA_{Vsj}) der Abluffahne unter Berücksichtigung der Absorption und Streuung der γ -Quanten in Luft zu integrieren.

Die γ -Dosisleistung, die durch die Emission von γ -Quanten des Radionuklids q verursacht wird, erhält man aus

$$\dot{D}_q = \sum_m 1.6 \cdot 10^{-10} \frac{\text{Gy g}}{\text{MeV Bq s}} \left(\frac{\mu_{a,m}}{d} \right) P_{\gamma, q, m} E_{q, m} \int_{(v)} \frac{C_q}{4\pi\rho^2} B(E, \mu_m \rho) e^{-\mu_m \rho} K_b dv \quad [3.1]$$

Hierbei ist

| | |
|---------------------------------------|--|
| ρ | Abstand zwischen dem Volumenquellenelement dv und dem Aufpunkt P (in m) |
| $P_{\gamma, q, m}$ | pro Zerfall ausgesandte γ -Quanten des Übergangs m (dimensionslos, q Index für Nuklid, m Index für γ -Energie des Übergangs) |
| $E_{q,m}$ | Energie des γ -Quants des Übergangs m (in MeV) |
| $\left(\frac{\mu_{a, m}}{d} \right)$ | zugehöriger Massenenergieabsorptionskoeffizient (in m^2/g) für Gewebe der Dichte d |
| μ_m | Schwächungskoeffizient für Photonen in Luft |
| C_q | Aktivitätskonzentration des Nuklids q in Luft |
| $B(E, \mu_m \rho)$ | Dosisaufbaufaktor in Luft |
| K_b | Korrekturfaktor für den Einfluß des Bodens /Ja-85/ |

Der Dosisaufbaufaktor (Build-up-Faktor) hängt von der Energie der γ -Quanten sowie der mittleren freien Weglänge $\mu\rho$ ab. Eine Berechnung dieses Faktors wurde von Jacob, Paretzke und Wölfel /Ja-84/ publiziert, s. Abb. 4. Durch Interpolation werden Build-up-Faktoren im Energiebereich $0.05 < E_\gamma < 10\text{MeV}$ aus diesen Kurven ermittelt.

Der Schwächungskoeffizient μ_m für Photonen in Luft hängt von der Dichte der Luft, d. h. im wesentlichen von der Lufttemperatur ab. μ_m ist für $T = 10^\circ \text{C}$ gegeben und wird, wenn T von 10°C abweicht, nach Gl. [3.2] umgerechnet:

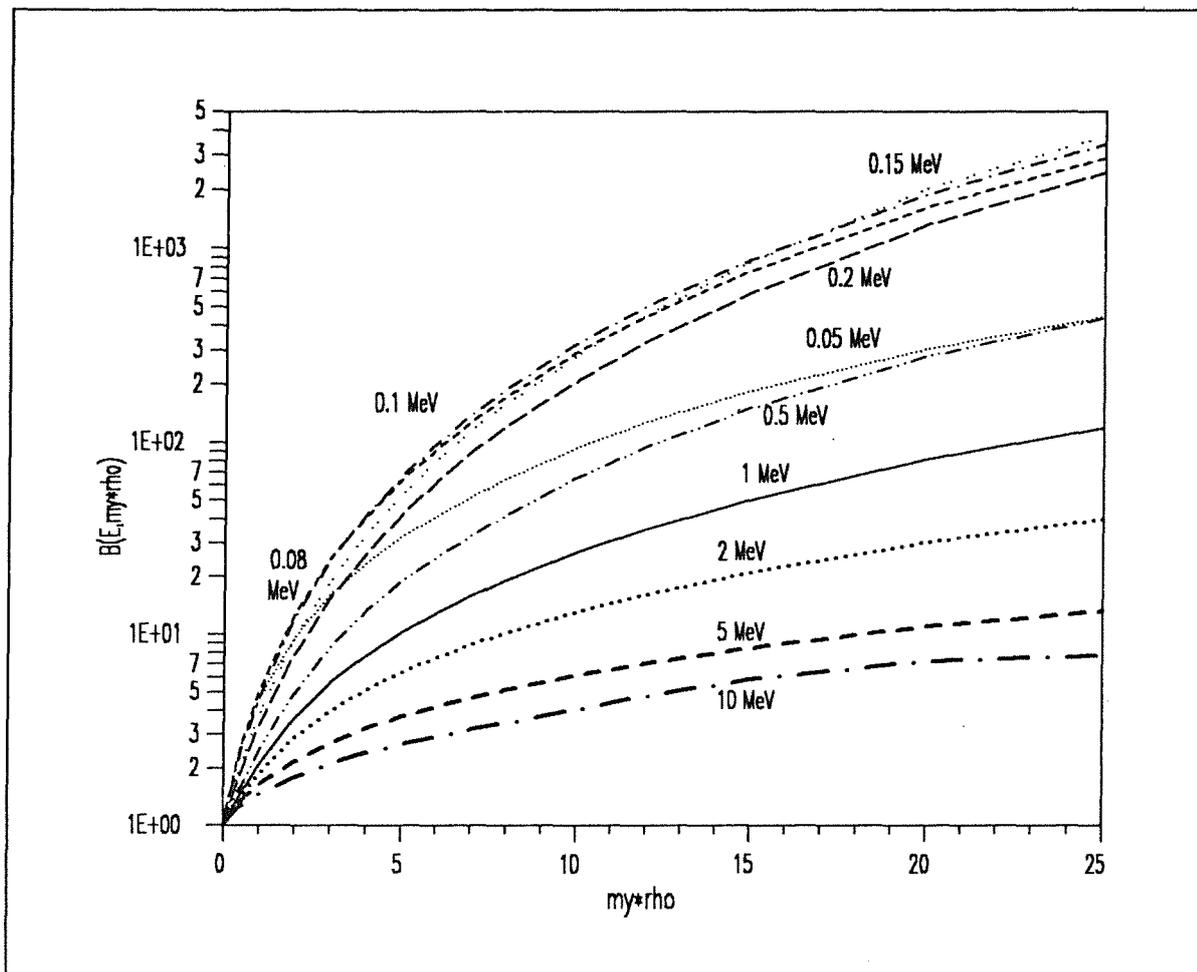


Abbildung 4. Aufbaufaktor $B(E, \mu\rho)$ für γ -Strahlung in Luft

$$\mu_T = \mu_{10} \frac{283.16}{T + 273.16} \quad \text{in } m^{-1} \quad [3.2]$$

Der Korrekturfaktor K_b berücksichtigt den Einfluß der Grenzfläche Luft/Boden gegenüber dem halbumendlichen Raum. Er wurde von Jacob und Paretzke berechnet /Ja-85/, abhängig von der Höhe z des Quellpunktes und dem horizontalen Abstand vom Aufpunkt. Die dort angegebene Approximationsformel wurde hier verwendet.

In Gl. [3.1] ist C_q die Aktivitätskonzentration innerhalb der Abluffahne. Die Energieabhängigkeit des Volumenintegrals ist relativ gering, s. /Vo-70/. Die Energieabhängigkeit der γ -Dosisleistung ist vornehmlich im Restterm von Gl. [3.1] enthalten. Dieser Restterm wird, wie in /AV-90/, als γ -Dosisfaktor $g_{\gamma q}$ des Radionuklids q bezeichnet. Damit nimmt Gl. [3.1] die folgende einfache Form an:

$$\dot{D}_q = g_{\gamma q} \int_{(v)} \frac{C_q}{4\pi \rho^2} B(E, \mu\rho) e^{-\mu\rho} K_b dv \quad [3.3]$$

$g_{\gamma q}$ ist z. B. aus /BMU-89/ zu entnehmen. Es ist zu beachten, daß der Faktor 4π nicht, wie in früheren Rechenverfahren (s. z. B. /Ho-86/, /Pa-88/) in $g_{\gamma q}$ einbezogen ist. Die Dosisleistung \dot{D}_q , normiert auf die Quellstärke \dot{A}_q , den Dosisfaktor $g_{\gamma q}$ und auf die Windgeschwindigkeit u , wird als γ -Ausbreitungsfaktor χ_γ bezeichnet.

$$\chi_\gamma = \frac{\dot{D}_q u}{g_{\gamma q} \dot{A}_q} \left[\frac{s}{m^2} \right] \quad [3.4]$$

Im Programm WOLGA 2.1 wird das Volumenintegral numerisch durch Aufsummieren der Volumenaktivitätselemente ΔA_{Vjnsi} gelöst. Wegen des quadratischen Abstandsgesetzes nimmt die Strahlungsintensität an einem Aufpunkt mit wachsender Entfernung des Strahlers rasch ab. Ist der Raum gleichmäßig mit Aktivität gefüllt, dann tragen die Aktivitätselemente in größerer Entfernung - relativ zum Beitrag der nähergelegenen - kaum noch zur Gesamtstrahlung bei. Daher kann der Bereich, dessen Aktivität bei der Dosisberechnung berücksichtigt wird, begrenzt werden. In horizontaler Richtung soll ein Kreis um den Aufpunkt mit dem Radius R_0 diesen Bereich begrenzen. Der Radius R_0 wird hier „Reichweite der γ -Strahlung“ genannt. Es wird jedoch betont, daß es sich um eine scheinbare Reichweite handelt, die sich nur aus den Anforderungen an die Genauigkeit des Rechenprogramms herleiten läßt.

Bei der Volumenquelle ist eine Begrenzung des Bereiches auch in vertikaler Richtung erforderlich. Dabei sorgt nicht nur das quadratische Abstandsgesetz, sondern auch die mit der Höhe rasch abnehmende Aktivitätskonzentration dafür, daß die Dosisbeiträge der Aktivitätselemente ab einer bestimmten Höhe vernachlässigt werden können. Eine entsprechende Abschneidevorschrift wird in Kap. 3.3 angegeben.

3.1 Linienquelle

Die Aktivität ΔA_{Ln} verursacht am Aufpunkt $P(x_p, \omega)$ (s. Abb. 5) die γ -Dosisleistung

$$\dot{\Delta D}_{Ln} = g_\gamma \frac{B(E, \mu\rho)}{4\pi\rho^2} \Delta A_{Ln} e^{-\mu\rho} K_b(E, \mu\rho', \mu h) \quad [3.5]$$

mit

$$\rho' = \sqrt{x_p^2 + r_n^2 - 2 x_p r_n \cos(\omega - \phi)} \quad [3.6a]$$

$$\rho = \sqrt{\rho'^2 + h^2} \quad [3.6b]$$

und r_n aus Gl. [2.3].

Sucht man die Dosisleistung der gesamten Flächenquelle am Aufpunkt P (x_p, ω), so muß man alle Flächenelemente berücksichtigen, die innerhalb eines Kreises mit dem Radius $R = R_0$ liegen¹. Um diese Fläche richtig zu erfassen, müssen der Wertebereich des r_n und für jedes r_n der Wertebereich des α festgelegt werden.

Die Summe der ΔD_{Fjns} über alle Entfernungen r_n und alle Sektoren s der Öffnung $\Delta\alpha$ (s. Abb. 6) wird zuerst für konstante r_n über alle $\Delta\alpha$ in den verschiedenen Sektoren und anschließend über alle Entfernungen r_n des Weges (maximal $2R$) berechnet. Es werden zwei Fälle unterschieden:

1. $R > x_p \cos(\omega - \phi)$

Nach Gl. [2.3] nimmt r_n Werte im folgenden Bereich an²

$$0 \leq r_n \leq x_p \cos(\omega - \phi) + R \quad [3.10]$$

2. $R < x_p \cos(\omega - \phi)$

In diesem Fall nimmt die Variable r_n Werte im Bereich

$$x_p \cos(\omega - \phi) - R \leq r_n \leq x_p \cos(\omega - \phi) + R \quad [3.11]$$

an.

Für jedes r_n nimmt α Werte im Bereich $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ an (s. Abb. 7), die der Bedingung $\alpha = s\Delta\alpha$ ($s = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) genügen.

In Abb. 7 ist

$$r' = x_p \cos(\omega - \phi) \quad [3.12]$$

$$b = \sqrt{R^2 - (r' - r_n)^2} \quad [3.13]$$

$$c_1 = b - x_p \sin(\omega - \phi) \quad [3.14]$$

$$c_2 = b + x_p \sin(\omega - \phi) \quad [3.15]$$

Hieraus erhält man

¹ An sich würde es für die Flächenquelle ausreichen, wenn der Radius R aus der Gleichung

$$R = \sqrt{R_0^2 - h^2}$$

berechnet würde. Für die Volumenquelle ist aber die Kenntnis der Dosisbeiträge der Aktivitäten innerhalb des Kreises R_0 notwendig.

² Entgegen der Ausbreitungsrichtung befindet sich keine Aktivität.

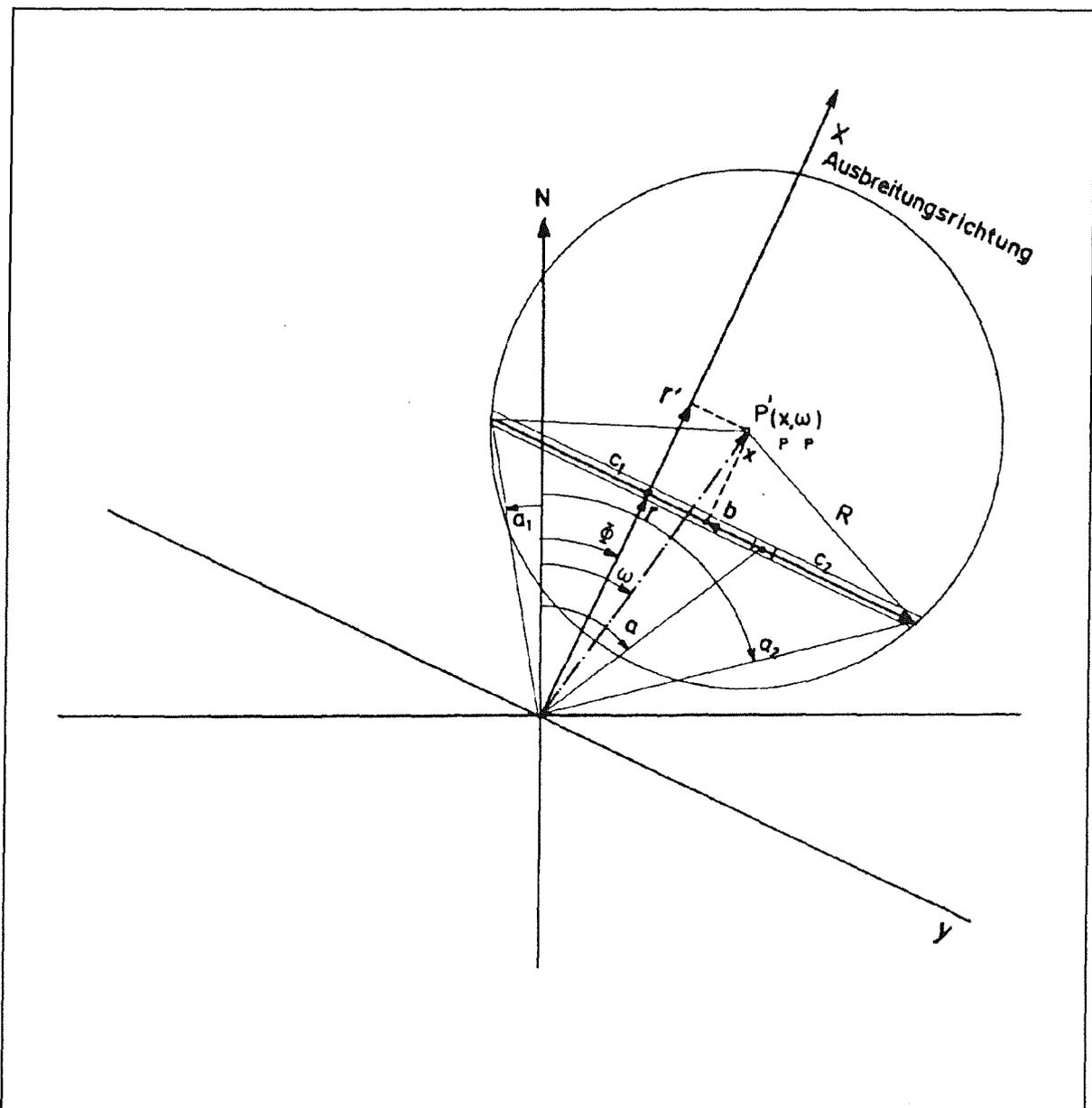


Abbildung 7. Geometrie zur Bestimmung des Winkelbereichs von α

$$\alpha_1 = \phi - \arctan \frac{c_1}{r} \quad [3.16]$$

$$\alpha_2 = \phi + \arctan \frac{c_2}{r} \quad [3.17]$$

3.3 Volumenquelle

Die Aktivität ΔA_{Vjnsi} verursacht am Aufpunkt P (x_p, ω) die Dosisleistung

$$\dot{\Delta D}_{Vjnsi} = g_y \frac{B(E, \mu\rho)}{4\pi\rho^2} \Delta A_{Vjnsi} e^{-\mu\rho} K_b(E, \mu\rho', \mu z) \quad [3.18]$$

mit ρ' aus Gl. [3.9]. In Gl. [3.18] wird die Entfernung

$$\rho = \sqrt{\frac{r_n^2}{\cos^2(\alpha - \phi)} + x_p^2 - 2x_p r_n \frac{\cos(\alpha - \omega)}{\cos(\alpha - \phi)} + z^2} \quad [3.19]$$

mit $z = \frac{1}{2}(z_i + z_{i+1})$ eingesetzt.

Die Dosisleistung \dot{D}_V am Aufpunkt P (x_p, ω), durch γ -Strahlung aus der radioaktiven Wolke wird aus der Summe der ΔD_{Vjnsi} über alle Entfernungen r_n im Kreis R, über alle Winkel α und über alle Höhen i berechnet.

$$\dot{D}_V = \sum_n \sum_s \sum_i \dot{D}_{Vjnsi} \quad [3.20]$$

Die Summation wird in folgender Weise durchgeführt:

Für einen Aufpunkt P (x_p, ω) wird zuerst der Wertebereich von r_n nach Gl. [3.10] oder Gl. [3.11] und der Wertebereich von α nach Gl. [3.16] und Gl. [3.17] innerhalb des Kreises R bestimmt. Für das jeweils geltende r werden die Varianzen $\sigma_{zj}(x)$ und $\sigma_{yj}(x)$ ($x = r_n$ in Ausbreitungsrichtung) bestimmt. Für das laufende r_n bzw. x wird nach Gl. [3.16] und Gl. [3.17] der Wertebereich des Winkels α festgelegt und mit den laufenden Werten r_n und α das z -Feld im Bereich $0 \leq z \leq z_0$ festgelegt. z_0 wird folgendermaßen bestimmt:

Oberhalb der Emissionsebene ($z > h$) nimmt der Beitrag der einzelnen Aktivitätsmengen zur Gesamtdosis mit steigender Höhe rasch ab. Diese Abnahme ist sowohl durch die abnehmende Aktivitätskonzentration als auch durch das quadratische Abstandsgesetz bedingt. Daher kann der z -Bereich erstens entsprechend dem $\sigma_{zj}(x)$ -Wert begrenzt werden. Da $ERF(2) = 0.9953$, muß lediglich bis zur Höhe $z_0 = 2\sqrt{2} \sigma_{zj}(x) + h$ summiert werden, um 99,5 % der Aktivität zu berücksichtigen. Die restliche Aktivität (0,5 %) wird, um die berechnete Dosis nach oben und nicht nach unten abzurunden, jeweils dem letzten Aktivitätspunkt (in der Höhe $z_0 = 2\sqrt{2} \sigma_{zj}(x) + h$) zugeschlagen. Die zweite Begrenzung ergibt sich durch das quadratische Abstandsgesetz und kann ähnlich wie die „Reichweite“ R_0 formuliert werden. Z. B. trägt bei Aktivitätsverteilung im Raum mit einer γ -Energie $E = 1.0$ MeV die Aktivität ab $z = 800$ m einen Beitrag zur Dosisleistung kleiner als 1 % bei. Daher wird ab einer solchen Grenzhöhe z_G die Summation abgebrochen, auch wenn $z_G < 2\sqrt{2} \sigma_{zj}(x) + h$ ist. Die Grenzhöhe z_G wird durch Wahl des Eingabeparameters IZZ (Kap. Anhang A, Karte A) dimensioniert:

$$IZZ = \frac{z_G}{\Delta z}$$

4.0 Genauigkeit der berechneten Dosis und Ergebnisse

Durch die notwendige Diskretisierung des Aktivitätsgehalts der Abluffahne in einzelnen Punktquellen wird die Genauigkeit des Ergebnisses zwangsläufig eingeschränkt. Der Fehler, d. h. die Abweichung von der „exakten“ Berechnung der mathematischen Formel (Gl. [3.2]) (Auflösung der Aktivitätsfahne in annähernd unendlich viele Punktquellen), steigt mit abnehmender Anzahl dieser Aktivitätspunkte. Dieser Fehler kann auf etwa 3 Prozent beschränkt werden (maximaler Fehler bei allen Entfernungen, Emissionshöhen, Stabilitätskategorien, γ -Energien usw.), wenn folgende Eingabewerte gewählt werden:

$$IZZ = 40$$

$$R_0 = 1000 \quad (\text{in m})$$

$$\Delta y_0 = \Delta r = \Delta z = 20 \quad (\text{in m})$$

Damit wird das Genauigkeitspotential dieser Berechnungsmethode praktisch ausgeschöpft. Als Berechnungsbeispiel wird im Anhang D der γ -Ausbreitungsfaktor $\hat{\chi}_\gamma$ (unter der Fahnenachse) für eine Gammaenergie von 1 MeV, für die Stabilitätskategorien A bis F und für verschiedene Emissionshöhen von 0 bis 200 m angegeben.

1.0 Literaturverzeichnis

- /AV-90/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu §45 der Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger 42, Nr. 64a (1990)
- /BMU-89/ Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Bekanntmachung der Dosisfaktoren Bundesanzeiger 41, Nr. 185a, 329 (1989)
- /Co-68/ R. E. Cooper
RADOS, A Code to Estimate Gamma Dose from a Cloud of Radioactive Gases.
USAEC DP-1098 (Rev. 1), E. I., du Pont de Nemours and Co., Savannah River Laboratory, Aiken S. C. (1968)
- /Co-68-1/ R. E. Cooper, B. C. Rusche
The SRL Meteorological Program and Off-Site Dose Calculations. USAEC DP-1163, (1968)
- /He-68/ J. W. Healy, E. Baker
Radioactive Cloud-dose Calculations in Meteorology and Atomic Energy -1968 (Editor D. H. Slade)
USAEC Juli 1968, 301 - 377
- /Ho-86/ S. Honcu
WOLGA 1 - Ein FORTRAN-Programm zur Berechnung der Dosisleistung durch Gammastrahlung aus der radioaktiven Abluft eines oder mehrerer Daueremittenten.
KfK 4108 (1986)
- /Ja-84/ P. Jacob, H. G. Paretzke, J. Wölfel
Monte Carlo Calculation and Analytical Approximation of Gamma-Ray Buildup Factors in Air.
Nucl. Sci. and Eng. 87, 113 - 122 (1984)
- /Ja-85/ P. Jacob, H. G. Paretzke
Air-Ground Interface Correction Factors for γ -Emitters in Air.
Health Physics 48, 183 - 191 (1985)
- /Mi-83/ M. Mills, D. Vogt
Summary of Computer Codes for Radiological Assessment.
NUREG/CR-3204, p. 198 (1983)
- /Na-71/ D. Nachtigall
Physikalische Grundlagen für Dosimetrie und Strahlenschutz.
Karl-Thiemig Verlag, München (1971)

- /Pa-88/ D. Papadopoulos, M. Bär, S. Honcu
WOLGA 2 - Ein FORTRAN-77-Programm zur Berechnung der bodennahen Dosisleistung durch Gammastrahlung aus der radioaktiven Abluftfahne aufgrund kurzzeitiger radioaktiver Freisetzungen eines Emittenten.
KfK 3980 (1988)
- /Ro-79/ F. Rohloff, E. Brunen, H. D. Brenk, H. Geiß, K.J. Vogt
LIGA - Ein Programm zur Berechnung der lokalen, individuellen Gammasubmersionsdosis durch Abluftfahnen aus kerntechnischen Anlagen.
Jül-1577 (1979)
- /Ro-81/ F. Rohloff, E. Brunen
LIGA 2 - Ein verbessertes Rechenprogramm zur Berechnung der lokalen, individuellen Gammasubmersionsdosis durch Abluftfahnen aus kerntechnischen Anlagen.
Jül-1736 (1981)
- /St-83/ Störfallberechnungsgrundlagen
Bundesanzeiger 35, Nr. 245a (1983)
- /Vo-70/ K. J. Vogt
Umweltkontamination und Strahlenbelastung durch radioaktive Abluft aus kerntechnischen Anlagen.
Jül-737-ST (1970)
- /Wi-70/ C. A. Willis, G. A. Spangler, W. A. Rhoades
A New Technique for Reactor Siting Dose Calculations
Health Physics 19, 47 - 54 (1970)

Anhang A. Beschreibung der Eingabe für WOLGA 2.1

Karte A:

Format (2I5, 4F10.0)

| | |
|-----|---|
| NN | Anzahl der Aufpunkte, $NN \leq 600$ NWAY=1 s. Karte D NWAY=2 $NN = IANZ \cdot IE$ |
| IZZ | Anzahl der Schritte in z-Richtung |
| RK | Radius der Kreisfläche der Integration in m (Defaultwert 1000) |
| DY0 | Breite des zentralen Segments in m (Defaultwert 20) |
| DR | ΔR , Integrationsschritt in radialer Richtung in m (Defaultwert 20) |
| DZ | Δz , Integrationsschritt in vertikaler Richtung in m (Defaultwert 20) |

Karte B: **Emittent und Charakteristik des emittierten Nuklids**

Format (F10.1, 4E10.3)

| | |
|----|---|
| H | h, Höhe des Emittenten in Meter (der Emittent befindet sich im Koordinatenursprung) |
| Q | \dot{A} , Quellstärke des Emittenten (z. B. in Bq/Zeitperiode) |
| G | g_γ , Gammadosisleistungskonstante in $\frac{\text{Sv m}^2}{\text{Bq s}}$ |
| ZE | λ , Zerfallskonstante in 1/s |
| EN | E, Gamma-Energie in MeV |

Karte C: **meteorologische Bedingungen**

Format (5F10.1)

| | |
|------|---|
| CAT | Stabilitätskategorie j (A=1, B=2, C=3, D=4, E=5, F=6) |
| U | u, Windgeschwindigkeit in m/s |
| PHI | ϕ , Winkel Nord-Ausbreitungsrichtung im Uhrzeigersinn in Grad ($\Phi = U_{\text{Wind}} - 180$ mit $U_{\text{W}} = \text{Windrichtung}$) |
| BAU | wirksamer Gebäudequerschnitt in Anströmrichtung, in m^2 |
| TEMP | T, Temperatur der Luft in $^\circ\text{C}$ (optional; wenn T nicht eingegeben, wird $T = 10^\circ\text{C}$ angenommen) |

Karte D: Steuer-Variable

Format (2I5)

NWAY Hilfsvariable zur Programmsteuerung

- = 1 Berechnung der Dosis an einzelnen Aufpunkten
> > > Es folgen Karten E1 und K < < <
- = 2 Berechnung der Dosis für einen Raster für Isodosendiagramme
> > > Es folgen Karten E2, F, G, H, I und K < < <
- = 3 Ein abgebrochener Lauf mit NWAY = 2 soll fortgesetzt werden, oder es soll nur aus zuvor berechneten Werten eine Isodosenzeichnung erstellt werden.

Die sonstige Eingabe ist identisch mit der Eingabe für NWAY = 2.

IUNIT Ausgabe-Einheit für Ausgabe auf Spool-Datei. (Eine richtige Datei würde bei einem Programmabbruch nicht korrekt geschlossen und wäre daher für einen Restart-Lauf nicht verwendbar.)

Wurde ein Lauf abgebrochen, oder soll nachträglich eine Zeichnung erstellt werden, so ist die Spool-Ausgabe in eine permanente Datei umzukopieren, die bei einem Restart-Lauf mit NWAY = 3 über die Einheit IUNIT – 1 wieder eingelesen wird.

= 0 Die Ausgabe auf Datei wird unterdrückt

Karte E1: (IP-mal) für NWAY = 1: Polarkoordinaten der Aufpunkte

Format (A40, 2X, F7.1, 1X, F6.2)

IDENT Bezeichnung des Aufpunktes

XP x_p , Entfernung vom Koordinatenursprung in m

WF ω , Winkel gegen Nord in Grad im Uhrzeigersinn; WF = 0 bezeichnet die Nordrichtung.

WF wird im Programm bezüglich der Ausbreitungsrichtung transformiert und ins Bogenmaß umgerechnet. Diese neue Winkelkoordinate heißt WP.

Karte E2: für NWAY = 2: Raster-Parameter

Format (2I5, 2F10.0)

IANZ Anzahl der Winkel des Rasters

Wegen der Symmetrie genügt es, nur für die Winkel von 0° bis 180° , bezogen auf die Ausbreitungsrichtung ϕ , zu rechnen. Bei $IANZ = 180/DW + 1$ werden die Werte zum Zweck der Zeichnung gespiegelt.

IE Anzahl der Entfernungen

WA erster Winkel in Grad (falls $WA = 0.$, wird mit $WA = \Phi$ begonnen.)

DW Schrittweite der Winkel des Rasters in Grad

Karte F: für **NWAY = 2: Entfernungen**
Format (7E10.0)

XP(I), I=1,IE Entfernungen des Rasters in m

Karte G: für **NWAY = 2:**
Format (E10.0)

RMASS Maßstab für die Zeichnung $M = 1 : RMASS$

Karte H: für **NWAY = 2:**
Format (I5)

NH Anzahl der Höhenlinien

> 0 Die Niveaus der Höhenlinien werden eingelesen.

≤ 0 Die Niveaus der Höhenlinien werden vom Programm aufgrund des Maximums bestimmt. Als Anzahl wird |NH| verwendet.

>>> Es folgt unmittelbar Karte K <<<

= 0 9 Isolinien werden vom Programm bestimmt.

Karte I: für **NWAY = 2 falls NH > 0:**
Format (7E10.4)

HV(I), I=1,NH Niveaus der Höhenlinien

Karte K: für **NWAY = 1 und NWAY = 2:**
Format (A72)

NTEXT Text, der in Druckausgabe und Zeichnung geschrieben wird (maximale Länge = 72 Zeichen).

Anhang B. Beispiel für die Eingabe des Programms WOLGA 2.1

```

//IMK906W2 JOB ..... ,TIME=7
//**-----
//**      JES3-Steueranweisungen für WOLGA-2
//**-----
//**
// EXEC F7CG,IMSL=MATH,PARM.C=ASTER,PARM.G='SIZE=1000K'
//C.SYSIN DD DISP=SHR,DSN=IMK906.WOLGA.FORT(WOLGA2)
//      DD DISP=SHR,DSN=IMK906.WOLGA.FORT(W2ZEICH)
//**-----
//**      Eingabe-Datei fuer Dosiswerte ( - Restart - ) ==> IUNIT-1
//G.FT32F001 DD DISP=SHR,DSN=IMK906.WOL20UT.DATA
//**-----
//**      Ausgabe-Klasse fuer Dosiswerte (Sicherheits-File) ==> IUNIT
//G.FT33F001 DD SYSOUT=C,DCB=LRECL=80
//**-----
//**      Eingabe für Isodosenzeichnung (NWAY=2 mit 10 Entf. u. 36 Winkeln).
//**      Hier wird nur ein Halbkreis (IANZ=19) gerechnet und danach
//**      die Werte an der Ausbreitungsachse gespiegelt.
//**-----
//G.SYSIN DD *
190  40      1000.      20.      20.      20. NN, IZZ, RK, DY0, DR, DZ
      100.0  3.70E+10  4.90E-17  1.052E-04  1.00E+00 H, Q, G, ZE, EN
      4.0      1.0      135.      0.      CA, U, PHI, BAU, TEMP
2   33      1      NWAY, IUNIT, KORF
19  10      0.0      10.      IANZ, IE, WA, DW
50.0E0  100.0E0  200.0      400.0      700.0      1200.      2000.
3.0E3   4.0E3   5.0E3      (XP(I),I=1,IE)
50000.0      RMASS
-7      NH
BERECHNUNG DER GAMMADOSIS NACH AVV MIT BODENKORREKTURFAKTOR
//

```

Anhang C. Beispiel für die Ausgabe des Programms WOLGA 2.1

W O L G A I I

SEITE 1

ANZAHL DER RECHENSCHRITTE IN Z-RICHTUNG : 40 DELTA Z : 20.0 M
RADIUS DER KREISFLAECHE : 1000.0 M DELTA R : 20.0 M
BREITE DES ZENTRALEKTORS: 20.0 M

METEOROLOGISCHE BEDINGUNGEN:

AUSBREITUNGSRICHTUNG 135.0 GRAD
WINDGESCHWINDIGKEIT 1.0 M/S
AUSBREITUNGSKATEGORIE D
LUFTTEMPERATUR 10.0 C

HOEHE DES EMITTENTEN UND CHARAKTERISTIK DES NUKLIDES:

| HOEHE | QUELLST. | GAMMADOSISL. | ZERFALL | GAMMA-ENERGIE | MUE |
|-------|-----------|--------------|-----------|---------------|-----------|
| 100.0 | 3.700D+10 | 4.900D-17 | 1.052D-04 | 1.000D+00 | 7.921D-03 |

BERECHNUNG DER DOSIS FUER EINEN PUNKTRASTER AUS 10 ENTFERNUNGEN UND 19 WINKELN
UND ZEICHNUNG EINER ISODOSEN-KARTE IM MASSSTAB M=1: 50000.

| ENTFERNUNGEN IN M : | 50.00 | 100.00 | 200.00 | 400.00 | 700.00 | 1200.00 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | 2000.00 | 3000.00 | 4000.00 | 5000.00 | | |

1. WINKEL : 135.00 GRAD, SCHRITTWEITE : 10.00 GRAD

ANZAHL DER ISODOSENLINIEN = 7

DIE ISODOSEN WERDEN VOM PROGRAMM BESTIMMT

```
*****  
* WOLGA-2 # RECHNUNG VOM 14.01.1992 # H = 100 M, KATEGORIE D *  
* BERECHNUNG DER GAMMADOSIS NACH AVV MIT BODENKORREKTUR *  
*****
```

KOORDINATEN DER AUFPUNKTE DOSISLEISTUNG

| NR. | BEZEICHNUNG | ENTF. | WINKEL | DOSIS |
|-----|-------------|--------|--------|--------------|
| 1 | | 50.0 | 135.0 | 2.280212D-08 |
| 2 | | 100.0 | 135.0 | 2.667204D-08 |
| 3 | | 200.0 | 135.0 | 2.911221D-08 |
| 4 | | 400.0 | 135.0 | 2.867646D-08 |
| 5 | | 700.0 | 135.0 | 2.597942D-08 |
| 6 | | 1200.0 | 135.0 | 1.902132D-08 |
| 7 | | 2000.0 | 135.0 | 1.112333D-08 |
| 8 | | 3000.0 | 135.0 | 6.209977D-09 |
| 9 | | 4000.0 | 135.0 | 3.800015D-09 |
| 10 | | 5000.0 | 135.0 | 2.486549D-09 |
| 11 | | 50.0 | 145.0 | 2.257702D-08 |
| 12 | | 100.0 | 145.0 | 2.597805D-08 |
| 13 | | 200.0 | 145.0 | 2.699581D-08 |
| 14 | | 400.0 | 145.0 | 2.323279D-08 |
| 15 | | 700.0 | 145.0 | 1.771721D-08 |
| 16 | | 1200.0 | 145.0 | 1.038930D-08 |
| 17 | | 2000.0 | 145.0 | 4.933093D-09 |
| 18 | | 3000.0 | 145.0 | 2.280922D-09 |
| 19 | | 4000.0 | 145.0 | 1.202208D-09 |
| 20 | | 5000.0 | 145.0 | 7.025449D-10 |
| : | | | | |
| 181 | | 50.0 | 315.0 | 9.471379D-09 |
| 182 | | 100.0 | 315.0 | 5.124908D-09 |
| 183 | | 200.0 | 315.0 | 1.566853D-09 |
| 184 | | 400.0 | 315.0 | 1.882906D-10 |
| 185 | | 700.0 | 315.0 | 1.045395D-11 |
| 186 | | 1200.0 | 315.0 | 0.000000D+00 |
| 187 | | 2000.0 | 315.0 | 0.000000D+00 |
| 188 | | 3000.0 | 315.0 | 0.000000D+00 |
| 189 | | 4000.0 | 315.0 | 0.000000D+00 |
| 190 | | 5000.0 | 315.0 | 0.000000D+00 |

MAXIMUM IM PUNKT 3 (R = 200. M, WINKEL = 135.0 GRAD) = 2.911E-08

C.1.1 Zusatz-Ausgabe auf TSO-HOLD (SPOOL-Datei) für RESTART-Lauf

WOLGA-2 # RECHNUNG VOM 14.01.1992 # H = 100 M, KATEGORIE D

| | | | |
|-----|--------|--------------|--------------|
| 1 | 50.0 | 1.350000D+02 | 2.280212D-08 |
| 2 | 100.0 | 1.350000D+02 | 2.667204D-08 |
| 3 | 200.0 | 1.350000D+02 | 2.911221D-08 |
| 4 | 400.0 | 1.350000D+02 | 2.867646D-08 |
| 5 | 700.0 | 1.350000D+02 | 2.597942D-08 |
| 6 | 1200.0 | 1.350000D+02 | 1.902132D-08 |
| 7 | 2000.0 | 1.350000D+02 | 1.112333D-08 |
| 8 | 3000.0 | 1.350000D+02 | 6.209977D-09 |
| 9 | 4000.0 | 1.350000D+02 | 3.800015D-09 |
| 10 | 5000.0 | 1.350000D+02 | 2.486549D-09 |
| 11 | 50.0 | 1.450000D+02 | 2.257702D-08 |
| 12 | 100.0 | 1.450000D+02 | 2.597805D-08 |
| 13 | 200.0 | 1.450000D+02 | 2.699581D-08 |
| 14 | 400.0 | 1.450000D+02 | 2.323279D-08 |
| 15 | 700.0 | 1.450000D+02 | 1.771721D-08 |
| 16 | 1200.0 | 1.450000D+02 | 1.038930D-08 |
| 17 | 2000.0 | 1.450000D+02 | 4.933093D-09 |
| 18 | 3000.0 | 1.450000D+02 | 2.280922D-09 |
| 19 | 4000.0 | 1.450000D+02 | 1.202208D-09 |
| 20 | 5000.0 | 1.450000D+02 | 7.025449D-10 |
| : | | | |
| 181 | 50.0 | 3.150000D+02 | 9.471379D-09 |
| 182 | 100.0 | 3.150000D+02 | 5.124908D-09 |
| 183 | 200.0 | 3.150000D+02 | 1.566853D-09 |
| 184 | 400.0 | 3.150000D+02 | 1.882906D-10 |
| 185 | 700.0 | 3.150000D+02 | 1.045395D-11 |
| 186 | 1200.0 | 3.150000D+02 | 0.000000D+00 |
| 187 | 2000.0 | 3.150000D+02 | 0.000000D+00 |
| 188 | 3000.0 | 3.150000D+02 | 0.000000D+00 |
| 189 | 4000.0 | 3.150000D+02 | 0.000000D+00 |
| 190 | 5000.0 | 3.150000D+02 | 0.000000D+00 |

C.1.2 Graphische Darstellung der Ergebnisse (Isolinien)

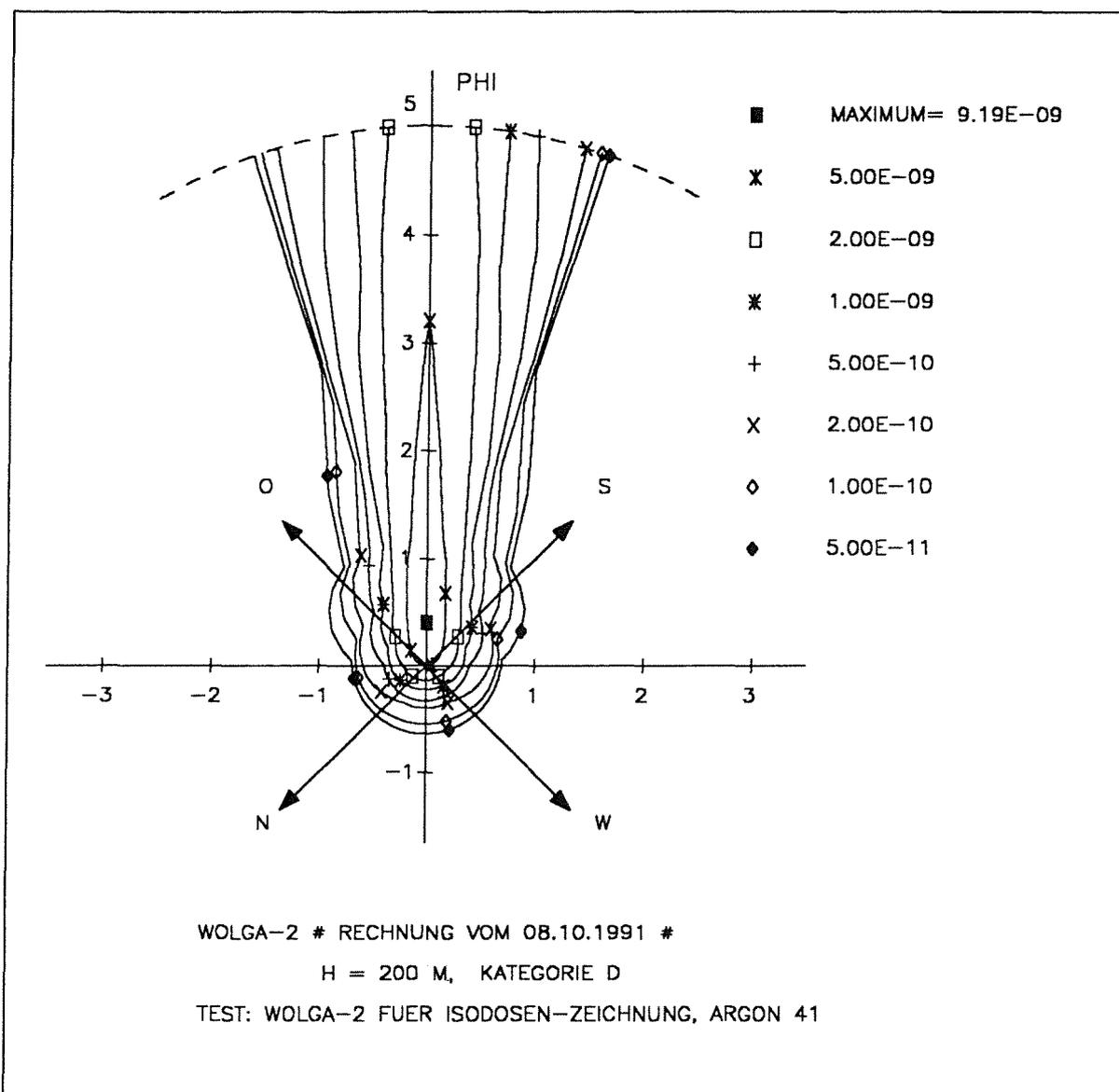


Abbildung 8. Graphische Ausgabe des Eingabe-Beispiels

Anhang D. Diagramme des normierten Gamma-Kurzzeit-Ausbreitungsfaktors

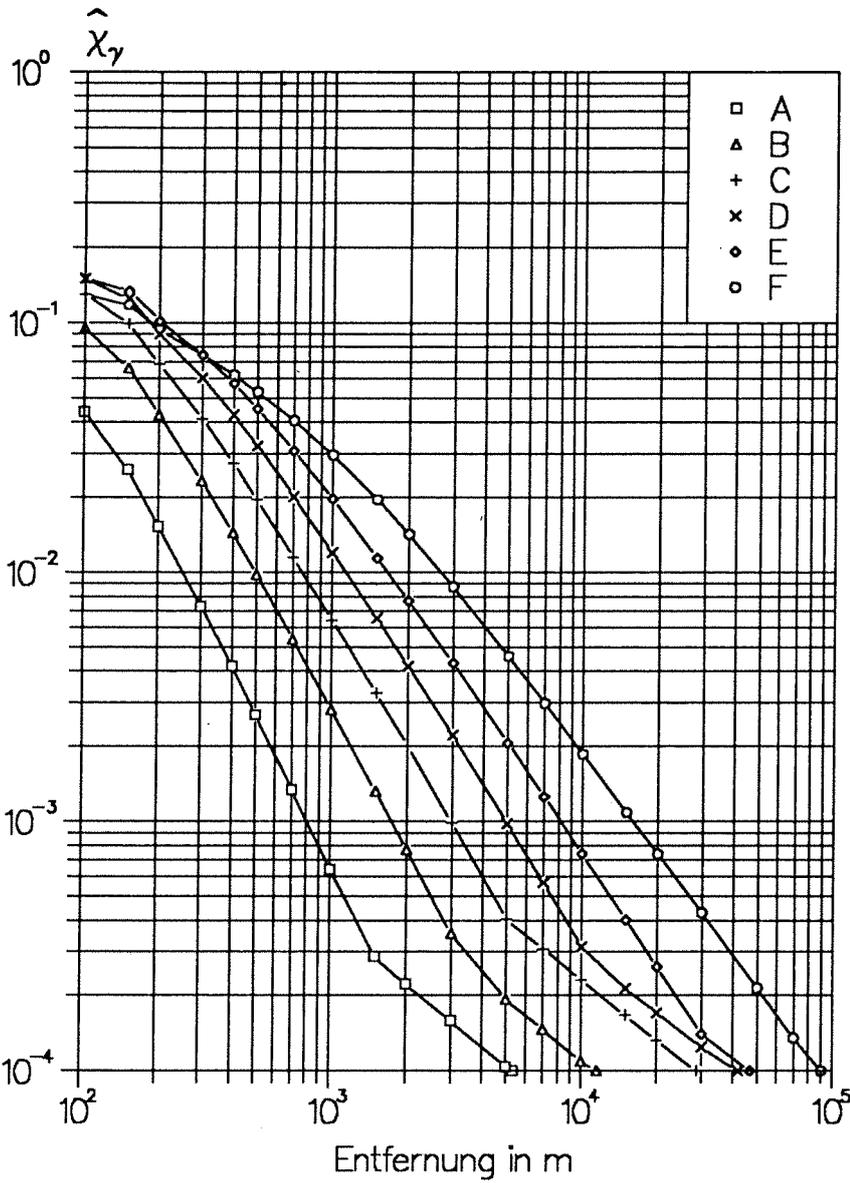


Abbildung 9. Normierter Kurzzeit-Ausbreitungsfaktor, $H = 0$ m.

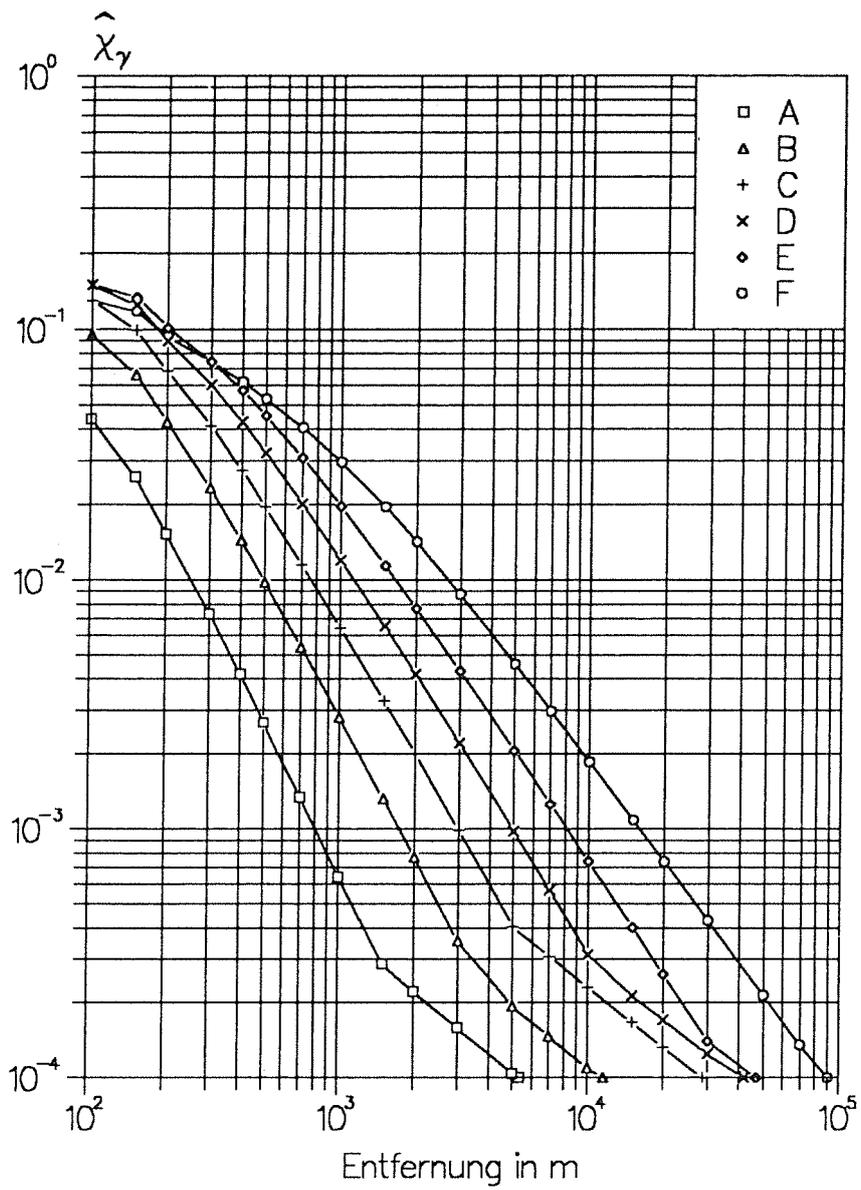


Abbildung 10. Normierter Kurzzeit-Ausbreitungsfaktor, $H = 50$ m.

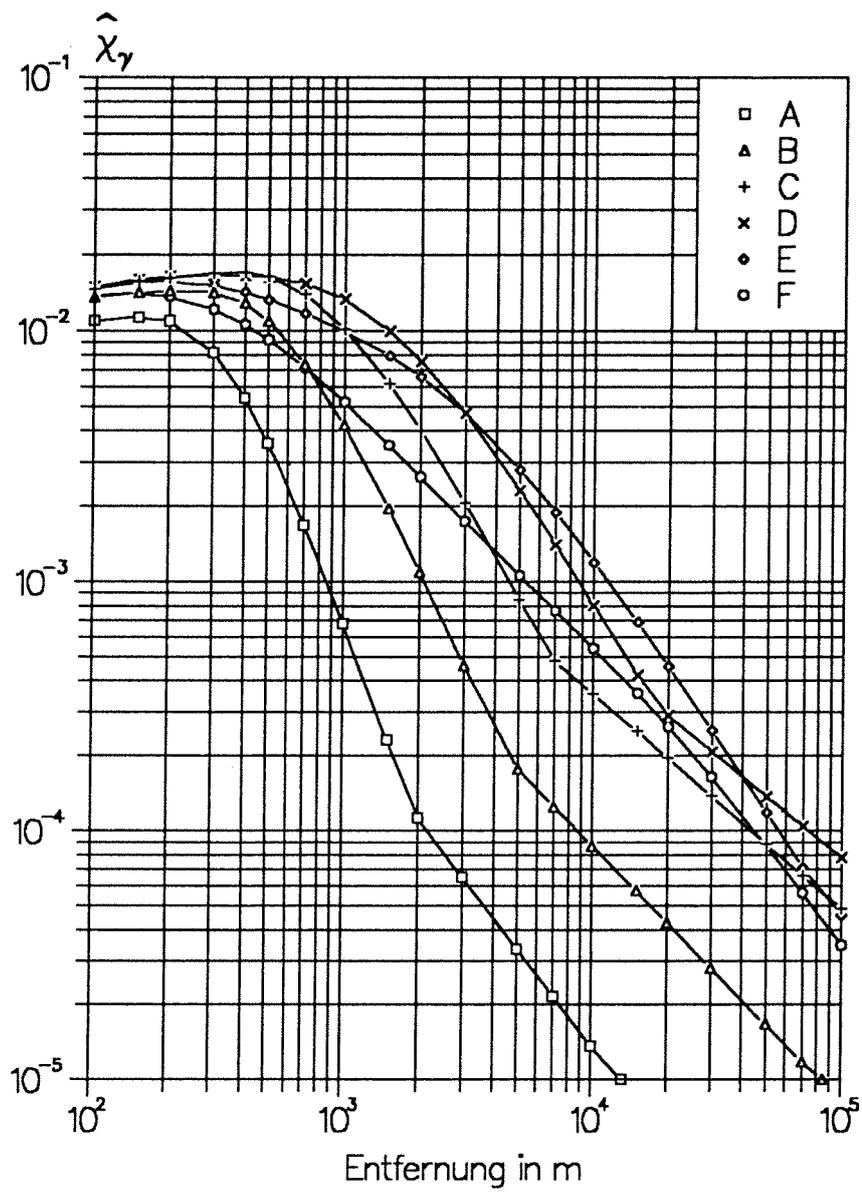


Abbildung 11. Normierter Kurzzeit-Ausbreitungsfaktor, $H = 100$ m.

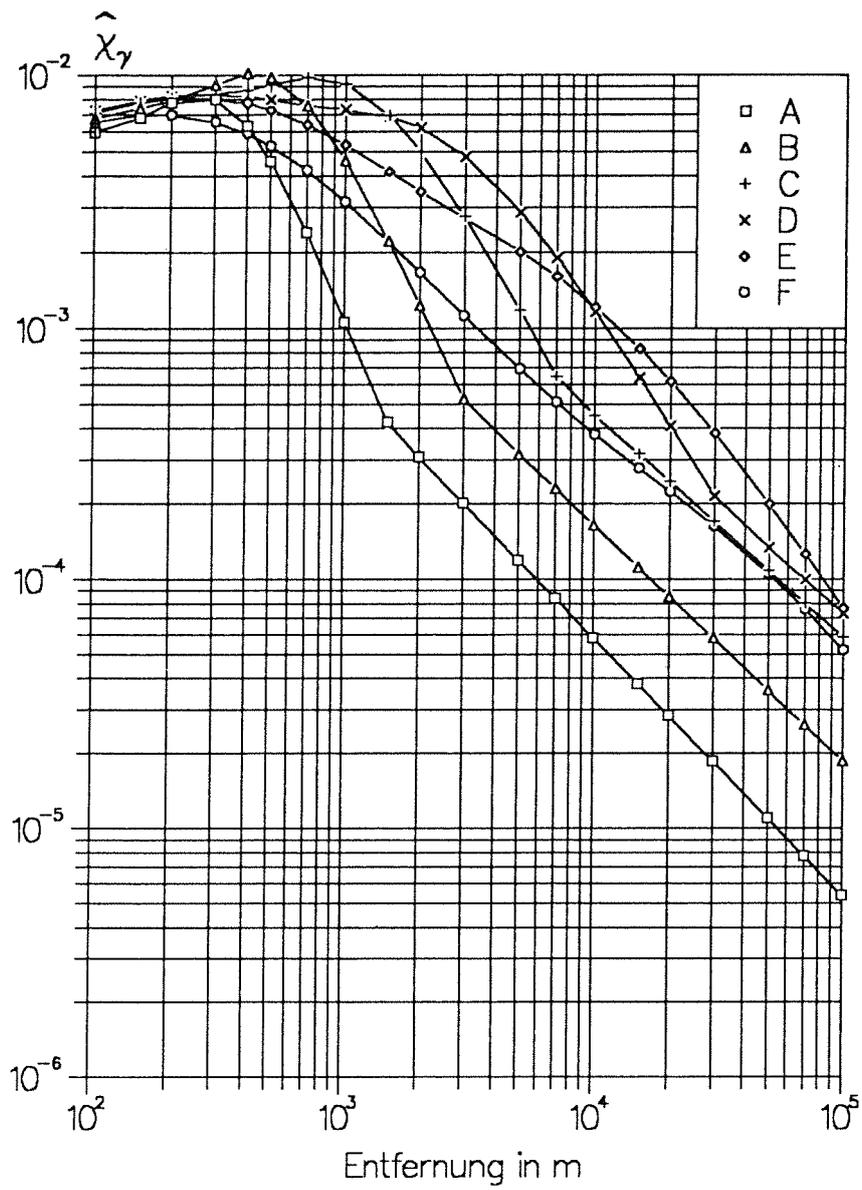


Abbildung 12. Normierter Kurzzeit-Ausbreitungsfaktor, $H = 150$ m.

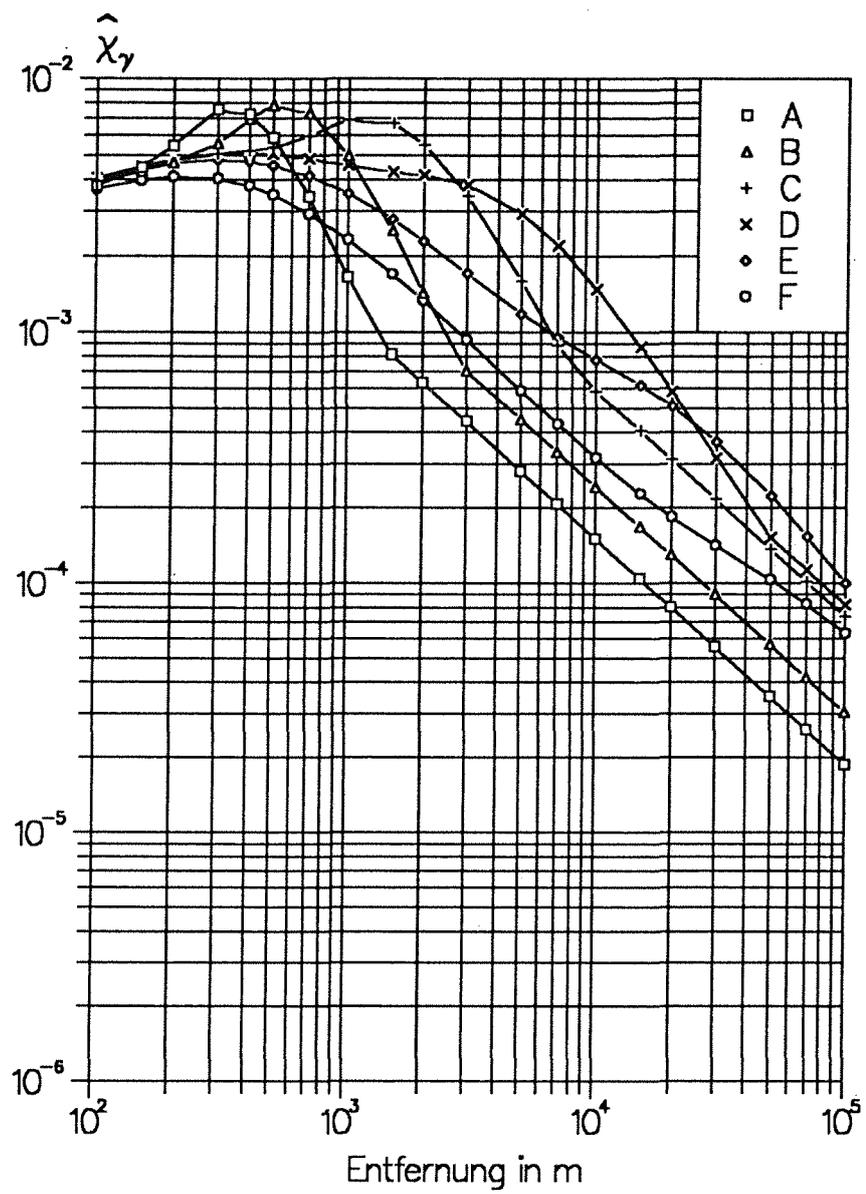


Abbildung 13. Normierter Kurzzeit-Ausbreitungsfaktor, $H = 200$ m.