KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

Oktober 1968 KFK 868

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Die Ausbreitung einer radioaktiven Wolke und die für die Gesamtbevölkerung zu erwartenden Dosen

A. Bayer

GESELLSCHAFT FUR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Oktober 1968 KFK 868

Institut für Neutronenphysik und Raktortechnik

Die Ausbreitung einer radioaktiven Wolke und die für die Gesamtbevölkerung zu erwartenden Dosen

von

A. Bayer

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

Zusammenfassung

Mit Hilfe der SUTTON'schen Ausbreitungsformel und den bei BLÄSSER-WIRTZ angegebenen meteorologischen Parametern werden für Normal- und Inversionswetterlagen die Populations-Ausbreitungsfaktoren für die Gesamtbevölkerung bestimmt, wobei punktförmige, konstante und geballte Bevölkerungsverteilungen (Stadtgebiete) angenommen werden. Die Überlegungen erstrecken sich bis zu Quellabständen von 100 km, wobei der Einfluß von Kaminhöhen mit H = 0 m, 50 m und 100 m studiert wird. Am Beispiel einer gegebenen Ausflußgefährdung durch Jod-Isotope werden einige zu erwartende Populations-Dosen ermittelt. Schließlich werden die zu erwartenden Populations-Dosen und die maximal zu erwartenden Individual-Dosen unter dem Gesichtspunkt des Quellabstandes in Beziehung zu den vorgeschlagenen Toleranzdosen gesetzt.

Einleitung

Bei der sicherheitstechnischen Beurteilung eines vorgesehenen Standortes für eine Reaktoranlage stellt die mögliche Größe der radiologischen Belastung der Umgebungsbevölkerung nach einem eventuellen Unfall das wichtigste Kriterium dar. Man unterscheidet hierbei zwischen der Belastung eines Individuums und der Belastung der Gesamtbevölkerung, wobei für beide in letzter Zeit Unfall-Toleranzgrenzen vorgeschlagen wurden. So besteht zum Beispiel eine Empfehlung der IAEA (Wien), die folgende Dosis-Höchstgrenzen vorsieht:

für das Individuum:	25 rem Äußere Bestrahlung 250 rem Schilddrüsenbestrahlung durch Jod 131
für die Gesamtbevölkerung:	1.000.000 man-rem Äußere Bestrahlung.

Während bei der Bestimmung der zu erwartenden Belastung einer Einzelperson aufgrund der Ausflußgefährdung im allgemeinen nur die Abstände zwischen dem vorgesehenen Reaktorstandort und den Wohngrenzen der nächsten Gemeinden in die bekannten Ausbreitungsformeln eingehen [1], muß zur Bestimmung der Belastung der Gesamtbevölkerung die Struktur der umgebenden Wohngebiete herangezogen werden. Obgleich es für einen speziellen Reaktorstandort notwendig sein mag, eine den Besonderheiten der Umgebung Rechnung tragende Bestimmung durchzuführen, sollen im folgenden anhand dreier einfacher Fälle - punktförmige Besiedlung, konstante Besiedlung und geballte Besiedlung - die wesentlichsten Merkmale bei der Bestimmung der Gesamtbelastung gezeigt und mit der Einzelbelastung verglichen werden. Die gewonnenen Ergebnisse lassen sich dann mutatis mutandis auch auf spezielle Fälle anwenden.

1. Der Ausbreitungsvorgang einschließlich der Berücksichtigung von Windschwankungen.

Der Ausbreitungsvorgang einer in x-Richtung ziehenden Wolke, die von einer punktförmigen Quelle am Ort x = 0, y = 0, z = H ausgeht, wird nach SUTTON [2] mit Hilfe des folgenden Ausbreitungsfaktors J beschrieben, der anschaulich das von der Einheitsquelle herrührende zeitliche Konzentrationsintegral am Ort x, y darstellt:

$$J(x,y) = \frac{2}{\pi \cdot C_y \cdot C_z \cdot \bar{u} \cdot x^{2-n}} \cdot \exp\left\{ - \frac{1}{x^{2-n}} \cdot \left(\frac{y^2}{C_y^2} + \frac{H^2}{C_z^2} \right) \right\} \qquad (1\text{-}1)$$

Dabei sind: J = Ausbreitungsfaktor [$sec \cdot m^{-3}$]

x, y = Koordinaten des Beobachters am Boden ($z = 0$) [m]

H = Höhe der Quelle über dem Boden [m]

$\bar{u}$ = mittlere Windgeschwindigkeit [$m sec^{-1}$]

n = meteorologischer Exponent

C_y, C_z = Diffusionsparameter [$m^{n/2}$]

Der Ausbreitungsfaktor nimmt bei x_M

$$x_M = \left(\frac{H}{C_z}\right)^{\frac{2}{2-n}} \qquad (1\text{-}2)$$

ein Maximum an.

Über die Genauigkeit, mit der atmosphärische Vorgänge durch obige Formel beschrieben werden, wurde bereits in [1] ausführlich berichtet.[x)]

Die folgenden Überlegungen werden in Anlehnung an BLÄSSER-WIRTZ [3] anhand der Wetterlagen "Normalwetter" und "Inversionswetter" durchgeführt.

---

x) Dort wurde u.a. auch gezeigt, daß die verschiedenen in der Literatur vorhandenen Ausbreitungsmodelle sich nicht wesentlich unterscheiden.

a) Normalwetter: $n = 0{,}25,\ C_y = 0{,}23\ m^{1/8},\ C_z = 0{,}23\ m^{1/8},\ \bar{u} = 1\ m \cdot sec^{-1}$

b) Inversionswetter: $n = 0{,}5\ ;\ C_y = 0{,}1\ m^{1/4};\ C_z = 0{,}06\ m^{1/4},\ \bar{u} = 1\ m \cdot sec^{-1}$

Aus Gleichung (1-1) resultiert, daß innerhalb des Flächenbereichs

$$y = \pm C_y \cdot x^{\frac{2-n}{2}} \qquad (1\text{-}3)$$

sich ca. 85 % der Ausbreitungswolke aufhält. Näherungsweise läßt sich für nicht zu große n diese Beziehung vereinfachen zu

$$y \approx \pm C_y \cdot x \qquad (1\text{-}4)$$

Cy steht hier für die Tangens-Funktion des halben Öffnungswinkels. Aufgrund von Windschwankungen, die selbst bei konstanter Wetterlage und konstanter Hauptwindrichtung im Laufe einiger Stunden auftreten, vergrößert sich dieser Öffnungswinkel. Bei BLÄSSER-WIRTZ [3] werden Windschwankungen angegeben, die sich über folgende Winkelbereiche Δ erstrecken:

a) Normalwetter: $\Delta \approx 30^\circ$

b) Inversionswetter: $\Delta \approx 7{,}5^\circ$

Berücksichtigt man diese Windschwankungen ab einer Entfernung von etwa 500 m, so resultieren daraus effektive Diffusionsparameter in y-Richtung, die etwa um den Faktor 4 größer sind als die oben angegebenen.

a) Normalwetter: $\overline{C_y} = 0{,}83\ m^{1/8}$

b) Inversionswetter: $\overline{C_y} = 0{,}39\ m^{1/8}$

Setzt man diese effektiven Diffusionsparameter $\overline{C_y}$ in (1-1) ein, erhält man den entsprechenden Ausbreitungsfaktor $\overline{J}$, der die Windschwankungen nun mit berücksichtigt.

2. Überlegungen zur Berechnung der Populations-Dosis

Entweicht einer punktförmigen Quelle am Ort $x = 0$, $y = 0$ ein Gefährdungsausfluß G_e [$\mathrm{rem} \cdot m^3 \cdot sec^{-1}$], der in Form einer Wolke, die durch den Ausbreitungsfaktor $J(x,y)$ bzw. $\overline{J}(x,y)$ [$sec \cdot m^{-3}$] beschrieben wird, über ein Gebiet streicht mit einer Bevölkerungsdichte $p(x,y)$ [$\mathrm{man} \cdot m^{-2}$], so wird der Bevölkerung die Populations-Dosis I_p bzw. $\overline{I_p}$ [man-rem] appliziert.

$$I_p = \iint G_e \cdot J(x,y) \cdot p(x,y)\, dxdy \tag{2-1}$$

bzw.

$$\overline{I_p} = \iint G_e \cdot \overline{J}(x,y) \cdot p(x,y)\, dxdy \tag{2-1a}$$

Da der Gefährdungsausfluß bei dieser Betrachtung von den Koordinaten x und y unabhängig ist, kann er vor das Integral gezogen werden. Das verbleibende Integral wird dann als Populations-Ausbreitungsfaktor J_p bzw. $\overline{J_p}$ [$\mathrm{man} \cdot m^{-3} \cdot sec$] definiert.

$$J_p = \iint J(x,y) \cdot p(x,y)\, dxdy \tag{2-2}$$

bzw.

$$\overline{J_p} = \iint \overline{J}(x,y) \cdot p(x,y)\, dxdy \tag{2-2a}$$

Die Populations-Dosis I_p bzw. $\overline{I_p}$ [man-rem] schreibt sich dann

$$I_p = G_e \cdot J_p \tag{2-3}$$

bzw.

$$\overline{I_p} = G_e \cdot \overline{J_p} \tag{2-3a}$$

Die Berechnung dieses Populations-Ausbreitungsfaktors für verschiedene Bevölkerungsdichten wird in den folgenden Abschnitten durchgeführt.

3. Berechnung des Populations-Ausbreitungsfaktors.

Die Integration des Ausbreitungsfaktors $J(x,y)$ über die Bevölkerungsverteilung $p(x,y)$ kann in einzelnen Schritten vollzogen werden. Die Integration über y liefert den differentiellen Populations-Ausbreitungsfaktor $J_p(x)$, der anschaulich das Profil des mit der Bevölkerungsverteilung gewichteten Ausbreitungsfaktors in Windrichtung darstellt,

$$J_p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} J(x,y)\; p(x,y)\; dy \tag{3-1}$$

während die Kumulation von $J_p(x)$ über den interessierenden Bevölkerungsbereich x_1 bis x_2 den eigentlichen Populations-Ausbreitungsfaktor J_p liefert.

$$J_p(x_1,x_2) = \int_{x_1}^{x_2} J_p(x)\; dx \tag{3-2}$$

Für $x_1 \longrightarrow 0$ und $x_2 \longrightarrow \infty$ erhält man den totalen Populations-Ausbreitungsfaktor J_p

$$J_p = \int_0^{\infty} J_p(x)\; dx \tag{3-3}$$

Im folgenden werden drei verschiedene Bevölkerungsdichten betrachtet.

3.1 Punktförmige Bevölkerungsdichte

Dieser Fall ist gegeben, wenn eine Gemeinde mit dem Radius a am Ort x_0, y_0 so weit von der Quelle entfernt ist, daß die Konzentration der Wolke über dieser Gemeinde praktisch konstant ist ($a \ll C_y \cdot x_0^{\frac{2-n}{2}}$). Der Populations-Ausbreitungsfaktor ist dann einfach

$$J_p = J(x_0,y_0) \cdot P \tag{3.1-1}$$

P = Bevölkerungszahl der Gemeinde [man]

Für Gemeinden, die derart weit entfernt sind, gilt das aus Gleichung (1-1) resultierende Abstandsgesetz

$$J_p \sim \frac{1}{x^{2-n}} \tag{3.1-2}$$

3.2 Konstante Bevölkerungsdichte

Die Voraussetzung einer konstanten Bevölkerungsdichte

$$p(x,y) = p_o \quad [\text{man} \cdot m^{-2}]$$

liegt näherungsweise in zwei Fällen vor.

1. Fall
Die Abluftwolke einer entfernten Quelle streicht über eine Landschaft, die nahezu homogen mit Siedlungen etwa gleicher Größe bedeckt ist.

Beispiele

Bäuerliche Landschaft: $p_o \approx 100 \; [\text{man} \cdot km^{-2}] = 10^{-4} \; [\text{man} \cdot m^{-2}]$

Industrielandschaft: $p_o \approx 1000 \; [\text{man} \cdot km^{-2}] = 10^{-3} \; [\text{man} \cdot m^{-2}]$

2. Fall
Die Abluftquelle steht dicht vor einer Großstadt und die Wolke überstreicht von x_1 bis x_2 ein Stadtgebiet mit etwa gleicher Bevölkerungsdichte.

$$p_o \approx 10.000 \; [\text{man} \cdot km^{-2}] = 10^{-2} \; [\text{man} \cdot m^{-2}]$$

Als Vergleich sei der Durchschnitt der Bundesrepublik Deutschland mit $p_o = 243 \; [\text{man} \cdot km^{-2}]$ angegeben.

3.2.1 Kaminhöhe H = 0

Für H = 0 ergibt sich nach Integration der Gleichung (1-1) über y der differentielle Populations-Ausbreitungsfaktor nach (3-1) zu

$$J_p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} J(x,y) \cdot p_o \, dy = p_o \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot C_z \cdot \bar{u} \cdot x^{\frac{2-n}{2}}} \qquad (3.2.1\text{-}1)$$

Infolge der Integration entfällt die Abhängigkeit des Ausbreitungsfaktors von C_y bzw. $\overline{C_y}$, d.h. das Ergebnis ist unabhängig von Windschwankungen.

Das Abstandsgesetz lautet jetzt

$$J_p(x) \sim \frac{1}{x^{\frac{2-n}{2}}} \qquad (3.2.1\text{-}2)$$

Die Reduktion der Potenz des Abstandsgesetzes auf den halben Wert der Potenz von Gleichung (1-1) erklärt sich daraus, daß nur noch die vertikale Diffusion in z-Richtung einen Verlust darstellt, während der horizontale Abfluß in y-Richtung durch Integration erhalten bleibt. Gleichung (3.2.1-1) ist für Normalwetter in Abbildung 1a ($a = \infty$) und für Inversionswetter in Abbildung 1b ($a = \infty$) graphisch dargestellt.

Der Populations-Ausbreitungsfaktor mit variabler oberer Grenze $J_p(0,x)$ ergibt sich nach Gleichung (3-2).

$$J_p(0,x) = p_o \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot C_z \cdot \bar{u}} \cdot \frac{2}{n} \cdot x^{\frac{n}{2}} \qquad (3.2.1\text{-}4)$$

Dieser Sachverhalt ist für Normalwetter in Abbildung 2a und für Inversion in Abbildung 2b dargestellt.

Wie aus Gleichung (3.2.1-4) hervorgeht, divergiert der totale Populations-Ausbreitungsfaktor $J_p(0,x)$ für $x \longrightarrow \infty$. Diese Divergenz ist aus zwei Gründen nicht sinnvoll. Zum einen wurde bislang angenommen, daß die einmal ausgestoßene Ausflußgefährdung G_e während der Transport- und Diffusionsvorgänge konstant bleibt, während sie tatsächlich sowohl durch den radioaktiven Zerfall als auch durch Ablagerung, Absorption usw. abnimmt. Zum anderen erscheint es wenig vernünftig, auch dann noch von einer radiologischen Belastung durch die Abluftwolke sprechen zu wollen, wenn diese Belastung auf die Größe der natürlichen Belastung gesunken ist; letztere beträgt in unseren Breiten etwa 0,1 rem/a.

Es empfiehlt sich daher, die Integration über die Ausbreitungswolke zum Beispiel bei jenem Quellabstand x_E abzubrechen, bei dem die Individual-Dosis auf die natürliche Jahresdosis von 0,1 rem abgefallen ist.

$$\frac{2\, G_e}{\pi \cdot C_y \cdot C_z \cdot \bar{u} \cdot x_E^{2-n}} \cdot \exp \left\{ - \frac{1}{x_E^{2-n}} \cdot \frac{H^2}{C_z^2} \right\} = 0{,}1 \text{ rem} \qquad (3.2.1\text{-}5)$$

Ähnliche Überlegungen zur endlichen Begrenzung des Integrationsbereichs in y-Richtung erübrigen sich, da aufgrund der GAUß-ähnlichen Verteilung die Belastung für einen auf die gleiche Weise begrenzten Bereich nur geringfügig unter der des unendlichen Bereichs läge. In Tab. 1 sind derartige Begrenzungsabstände x_E(o,1 rem), die schwankungsabhängig sind, für verschiedene Gefährdungsausflüsse G_e angegeben. Ebenso finden sie sich für H = 0 m in den Abbildung 2a und 2b wieder.

Wie aus den Abbildungen 2a und 2b hervorgeht, steigt der Populations-Ausbreitungsfaktor $J_p(0,x)$ in unmittelbarer Nähe der Quelle sehr rasch an. Für die Berechnung eines praktischen Falles ist dies jedoch unrealistisch, da die Wohnsiedlungen in den seltensten Fällen bis dicht an einen Reaktor heranreichen. Im folgenden wird deshalb stets ein Reaktorwerksgelände mit einem Mindest-Radius von R = 100 m vorausgesetzt, außerhalb dessen die Wohnsiedlungen erst beginnen. Für Berechnungen, die von den vorliegenden Annahmen abweichen, kann der Mindest-Radius jedoch ohne Schwierigkeiten abgeändert werden. Unter Berücksichtigung dieses Mindestabstandes kann mit Hilfe der Abbildungen 2a und 2b bereits eine Abschätzung über die mögliche Belastung eines Landstrichs nach einem Unfall gewonnen werden. Für das Beispiel "Stadtsiedlungen" mit Ausdehnungen von d = 2·a = 2 km, 6 km und 20 km in x-Richtung und "unendlicher" Ausdehnung in y-Richtung wurde unter Berücksichtigung eines Reaktor-Werksgeländes von R = 100 m der Populations-Ausbreitungsfaktor J_p gebildet. Dabei wurde der mögliche Standort des Reaktors vom Zentrum der Stadtsiedlung ($x_0 = 0$) beginnend bis zu einem Abstand von $x_0 = 100$ km variiert. Die Ergebnisse sind zusammen mit denen des Abschnitts 3.3.1, wo auch die genaue Diskussion erfolgt, in die Abbildungen 4a und 4b gezeichnet und in die Tabellen 3a und 3b eingetragen.

Ein Vergleich dieser und aller weiteren im vorliegenden Kapital ermittelten Populations-Ausbreitungsfaktoren J_p bzw. $\overline{J_p}$ mit den Individual-Ausbreitungsfaktoren J bzw. $\overline{J}$ erfolgt in Abschnitt 4. Dort werden im Zusammenhang mit den Individual-Dosen I bzw. $\overline{I}$ und den Populations-Dosen I_p bzw. $\overline{I_p}$ die Folgerungen erörtert.

3.2.2 Kaminhöhe $H \neq 0$

Für Kaminhöhen $H \neq 0$ ergibt sich der differentielle Populations-Ausbreitungsfaktor $J_p(x)$ zu

$$J_p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} J(x,y)\ p_o\ dy = p_o \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot C_z \cdot \bar{u} \cdot x^{\frac{2-n}{2}}} \cdot \exp\left\{- \frac{1}{x^{2-n}} \cdot \frac{H^2}{C_z^2}\right\}$$

(3.2.2-1)

Den in Abschnitt 3.2.1 bereits getroffenen Feststellungen ist lediglich hinzuzufügen, daß sich das Maximum des differentiellen Populations-Ausbreitungsfaktors $J_p(x)$ gegenüber dem des Ausbreitungsfaktors $J(x,y)$ um den Faktor $2^{\frac{1}{2-n}}$ zu größeren Entfernungen x hinverschoben hat.

$$x_{pM} = \left(\frac{H}{C_z}\right)^{\frac{2}{2-n}} \cdot 2^{\frac{1}{2-n}} \tag{3.2.2-2}$$

Die Faktoren nach Gleichung (3.2.2-1) sind in die Abbildungen 1a und 1b eingezeichnet. Der Populations-Ausbreitungsfaktor $J_p(0,x)$ ergibt sich wiederum nach Gleichung (3-2), wenn der Integrationsbeginn auf 0 gelegt und die obere Integrationsgrenze variabel gehalten wird

$$J_p(0,x) = p_o \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot C_z \cdot \bar{u}} \cdot \frac{2}{n} \cdot x^{\frac{n}{2}} \cdot F(x,H) \tag{3.2.2-3}$$

$$F(x,H) = \left| \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu}}{\nu !} \cdot \frac{\left(\frac{n}{2}\right)}{\left\{(1+2\nu)\frac{n}{2} - 2\nu\right\}} \cdot \xi^{-\nu(2-n)} \left(\frac{H}{C_z}\right)^{2\nu} \right|_{0}^{x}$$

Die Ergebnisse, welche graphisch ermittelt wurden, sind in die Abbildungen 2a und 2b eingetragen.

Wie ersichtlich vermindern sich die Populations-Ausbreitungsfaktoren mit wachsender Kaminhöhe. Für große Entfernungen verlaufen alle Ausbreitungsfaktoren etwa parallel zueinander. Extrapoliert man den Verlauf dieser Kurven zu kleineren Entfernungen hin, so ergeben sich Schnittpunkte mit der x-Achse in einer Entfernung von

$$x_K \approx \left(\frac{H}{C_z}\right)^{\frac{2}{2-n}} \cdot 2^n \tag{3.2.2-4}$$

x_K ist für

Normalwetter:	H = 50 m	: 560 m
	H = 100 m	: 1250 m
Inversionswetter:	H = 50 m	:11500 m
	H = 100 m	:27500 m

Diese Entfernungen können anschaulich als Kaminersparnisse interpretiert werden.

Aufgrund dieser Überlegungen kann Gleichung (3.2.2-3) für große Entfernungen in eine einfache Näherungsformel umgewandelt werden.

$$J_p(0,x) = p_o \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot C_z \cdot \bar{u}} \cdot \frac{2}{n} \left(x^{\frac{n}{2}} - x_K^{\frac{n}{2}}\right) \qquad (3.2.2\text{-}5)$$

$$\text{mit} \quad x_K = \left(\frac{H}{C_z}\right)^{\frac{2}{2-n}} \cdot 2^n$$

Bildet man, wie in Abschnitt 3.2.1 für das Beispiel "Stadtsiedlungen" mit Ausdehnungen von d = 2·a = 2 km, 6 km und 20 km in x-Richtung und "unendlicher" Ausdehnung in y-Richtung die Populations-Ausbreitungsfaktoren J_p unter Berücksichtigung der Kaminhöhen H = 50 m und 100 m, so zeigt sich erwartungsgemäß, daß für kurze Entfernungen die erhaltenen Werte, die in Tabelle 3a und 3b eingetragen und in die Abbildungen 5a, 5b, 6a und 6b eingezeichnet sind, unter denen für H = 0 liegen. Besonders auffällig ist die große Differenz bei Inversionswetterlagen.

3.3 Geballte Bevölkerungsdichte

Die Bevölkerungsdichte einer Gemeinde (Dorf oder Stadt) kann näherungsweise mit Hilfe einer GAUß'schen Verteilungsfunktion beschrieben werden.

$$p(x,y) = \frac{P}{\pi \cdot a^2} \cdot \exp\left\{-\frac{y^2}{a^2}\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-x_a)^2}{a^2}\right\} \quad [\text{man} \cdot m^{-2}] \qquad (3.3\text{-}1)$$

Die Gleichung (3.3-1) steht für eine Gemeinde, deren Zentrum Z in einem Abstand x_0 von der Quelle liegt. Innerhalb eines Radius a (Weichbild) um das Zentrum $Z(x_0,0)$ befinden sich dann ca. 71 % der Gesamtbevölkerung P [man]. Zwar sind die Gemeinden im allgemeinen stärker gegliedert als es obiger Ansatz zu beschreiben vermag, so weist zum Beispiel die Innenstadt im allgemeinen eine geringere Wohndichte auf als die daran angrenzenden Bezirke, doch liefert diese Näherung bereits eine gute Abschätzung. Für den speziellen Einzelfall wird man stets Stadtplan und Bevölkerungsstatistik zu Rate ziehen. Im folgenden sollen drei verschiedene Gemeindegrößen behandelt werden:

a = 1000 m	$P \approx$ 30000 man	z. B. Bruchsal
a = 3000 m	$P \approx$ 250000 man	z. B. Karlsruhe
a = 10000 m	$P \approx$ 3000000 man	z. B. Berlin

Die maximale Dichte beträgt jeweils

$$p_{max} = \frac{P}{\pi \cdot a^2} \tag{3.3-2}$$

$$\approx 10^{-2} \text{ man} \cdot m^{-2} = 10^4 \text{ man} \cdot km^{-2}$$

3.3.1 Kaminhöhe H = 0

Nach Integration von Gleichung (1-1) über y, gewichtet mit der Bevölkerungsdichte p(x,y) (3.3-1), erhält man den differentiellen Populations-Ausbreitungsfaktor.

$$J_p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} J(x,y) \cdot p(x,y)\, dy$$

$$= \frac{P}{\pi \cdot a^2} \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{a^2}\right\} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot C_z \cdot \bar{u} \cdot x^{\frac{2-n}{2}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\left(x^{\frac{2-n}{2}} \cdot \frac{C_y}{a}\right)^2}} \tag{3.3.1-1}$$

[illegible] $\sigma_p(x)$ktor ist, wie der letzte Faktor dieses Produkts zeigt, jetzt wieder von C_y bzw. $\overline{C_y}$ abhängig geworden. Da die Ausdehnung der Gemeinde in y-Richtung begrenzt ist, wird der Populations-Ausbreitungsfaktor durch die effektive Breite der Abluftfahne

$$C_y \cdot x^{\frac{2-n}{2}} \qquad \text{bzw.} \qquad \overline{C_y} \cdot x^{\frac{2-n}{2}} \tag{1-3}$$

mitbestimmt, womit obiges Ergebnis erklärt ist.

Die um diesen Faktor verminderten differentiellen Populations-Ausbreitungsfaktoren $J_p(x)$ aus vorigem Abschnitt (3.2.1-1) sind für die angegebenen Radien a mit in die Abbildungen 1a und 1b eingezeichnet.

Gleichung (3.3.1-1) beinhaltet zwei Grenzfälle: während der Übergang $a \longrightarrow 0$ zu der in Abschnitt 3.1 behandelten punktförmigen Siedlungsdichte führt, beschreibt der Übergang $a \longrightarrow \infty$ die bereits in Abschnitt 3.2 diskutierte konstante Bevölkerungsdichte.

Zur numerischen Berechnung des Populations-Ausbreitungsfaktors ist es von Vorteil, den letzten Faktor von Gleichung (3.3.1-2) mit Hilfe zweier Funktionen anzunähern.

1) Im Bereich $0 \leqslant x \leqslant \left(\frac{a}{C_y}\right)^{\frac{2}{2-n}}$

ist
$$\frac{1}{\sqrt{1 + \left(x^{\frac{2-n}{2}} \cdot \frac{C_y}{a}\right)^2}} \approx 1 \tag{3.3.1-2}$$

Diese Näherung überschätzt die exakte Funktion maximal bei $x = \left(\frac{a}{C_y}\right)^{\frac{2}{2-n}}$ um den Faktor $\sqrt{2}$

2) Im Bereich $\left(\frac{a}{C_y}\right)^{\frac{2}{2-n}} \leqslant x$

ist
$$\frac{1}{\sqrt{1 + \left(x^{\frac{2-n}{2}} \cdot \frac{C_y}{a}\right)^2}} \approx \frac{1}{x^{\frac{2-n}{2}}} \cdot \frac{a}{C_y} \tag{3.3.1-3}$$

Diese Näherung überschätzt die exakte Funktion ebenfalls bei $x = \left(\frac{a}{C_y}\right)^{\frac{2}{2-n}}$ maximal um den gleichen Faktor $\sqrt{2}$.

Setzt man den Abstand $x_ü = \left(\frac{a}{C_y}\right)^{\frac{2}{2-n}}$ in die Gleichung (1-3) ein, so erhält man $y = \pm a$. Dies bedeutet, daß eine Gemeinde mit dem Radius a, auf deren Zentrum die Abluftfahne einer Quelle gerichtet ist, von 100 bis 84 % der Abluftfahne überstrichen wird, wenn sich das Zentrum der Gemeinde im Abstandsbereich von 0 bis $\left(\frac{a}{C_y}\right)^{\frac{2}{2-n}}$ befindet. Erst für größere Entfernungen zieht ein jetzt schneller wachsender Anteil der Abluftwolke am Ortsrand vorbei. Für den unteren Entfernungsbereich gilt demnach das $\frac{1}{x^{\frac{2-n}{2}}}$-Abstandsgesetz, während ab etwa $x_ü = \left(\frac{a}{C_y}\right)^{\frac{2}{2-n}}$ das $\frac{1}{x^{2-n}}$-Abstandsgesetz zum Tragen kommt; beides geht auch aus den Abbildungen 1a und 1b hervor. In Tabelle 2 sind diese "Übergangsabstände" eingetragen, wobei die angegebenen großen Entfernungen für Inversionswetter nicht ganz realistisch sind, da diese Wetterlage sich im allgemeinen nicht über so weite Bereiche erstreckt. Doch vermitteln diese Zahlen eine Vorstellung darüber, ab welcher Entfernung etwa das "$\frac{1}{x}$-Gesetz" in das "$\frac{1}{x^2}$-Gesetz" übergeht.

Die Bildung des Populations-Ausbreitungsfaktors (3-2) liefert

$$J_p(0,x) = \frac{P}{\pi \cdot a^2} \cdot \frac{2}{\sqrt{2\pi} \cdot C_z \cdot \bar{u}} \cdot \left\{ \left| F\left(\alpha = \frac{2-n}{2}, a, x, x_0\right) \right|_{x=0}^{x=\left(\frac{a}{C_y}\right)^{\frac{2}{2-n}}} + \frac{a}{C_y} \cdot \left| F(\alpha = 2-n, a, x, x_0) \right|_{x=\left(\frac{a}{C_y}\right)^{\frac{2}{2-n}}}^{x} \right\}$$

$$F = x^{-\alpha+1} \cdot \sum_{m=0,2,..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m}{2}}}{\frac{m}{2}!} \; \frac{m!}{a^m} \left(\sum_{\nu=0} \frac{(-1)^{\nu}}{\nu\,!} \; \frac{x^{m-\nu}(x-x_0)^{\nu}}{\sum_{n=0}^{m-\nu}(n+1-\alpha)} \right) \qquad (3.3.1\text{-}4)$$

Eine Vereinfachung ergibt sich, wenn der Stadtkern mehr als zwei Radien von der Quelle entfernt ist $x_0 \geqslant 2a$. Dann kann der Ausbreitungsfaktor , da er über dem Stadtgebiet wenig abfällt, näherungsweise konstant gehalten werden $J(x) = J(x_0)$. Die Integration über die Bevölkerungsdichte ergibt dann

$$J_p \approx P \cdot \sqrt{\pi}\, a \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot c_z \cdot u \cdot x_0^{\frac{2-n}{2}}} \; \frac{1}{\sqrt{1 + (x_0^{\frac{2-n}{2}} \cdot \frac{c_y}{a})^2}} \qquad (3.3.1\text{-}5)$$

Die graphisch ermittelten Populations-Ausbreitungsfaktoren J_p sind für Abstände bis 100 km aus den Tabellen 3a und 3b und den Abbildungen 4a und 4b ersichtlich. Zum Vergleich sind die in Abschnitt 3.2.1 definierten Bevölkerungsgürtel von 2a-Breite in x-Richtung und unendlicher Ausdehnung in y-Richtung mit eingetragen. Es wurde in allen Fällen ein Reaktorwerksgelände mit einem Radius von 100 m berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, daß die Populations-Ausbreitungsfaktoren für den Bevölkerungsgürtel besonders für weite Entfernungen über denen der GAUßverteilten Bevölkerung liegen, was sowohl auf die unendliche Ausdehnung in y-Richtung als auch auf die scharfen Begrenzungen bei $x = x_0 \pm a$ und die konstante maximale Dichte $p_0 = 1$ zurückzuführen ist. Da für nicht zu große Entfernungen diese jedoch nur unwesentlich über denen der geballten Bevölkerung liegen, können sie als gute Näherung verwandt werden, was besonders bei ersten Abschätzungen von Großstadtbelastungen nützlich ist. Für größere Entfernungen, etwa ab $x_ü$, wenn die betreffende Gemeinde nicht mehr von der ganzen Breite der Wolke überzogen wird, wächst der Unterschied der Werte von Gürtelverteilung und GAUßverteilung erheblich an. Ab diesen Entfernungen tritt auch der Unterschied der Populations-Ausbreitungsfaktoren für feste und schwankende Windrichtungen in Erscheinung und muß mit berücksichtigt werden.

Die unbedeutenden Maxima der Populations-Ausbreitungsfaktoren I_p bei $x_0 \approx a$ besagen, daß eine am Stadtrand stehende Abluftquelle, im Falle ungünstiger Windrichtung, eine etwas größere Gefährdung für die Stadt darstellt als eine Abluftquelle, die sich direkt im Stadtzentrum befindet, da im ersten Fall mehr "abgeladen" werden kann.

Eine merkliche Verringerung des Ausbreitungsfaktors I_p tritt ein, wenn es gelingt, alle Abluft durch einen hohen Kamin abzulassen.

3.3.2 Kaminhöhe H $\neq$ 0

Bei Berücksichtigung eines Kamins ergibt sich der differentielle Populations-Ausbreitungsfaktor zu

$$J_p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} J(x,y)\; p(x,y)\; dy$$

$$= \frac{P}{\pi a^2} \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{a^2}\right\} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}\cdot C_z \cdot \bar{u} \cdot x^{\frac{2-n}{2}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(x^{\frac{2-n}{2}}\frac{C_y}{a})^2}}$$

$$\exp\left\{-\frac{1}{x^{2-n}} \cdot \frac{H^2}{C_z^{\,2}}\right\} \qquad (3.3.2\text{-}1)$$

Dem Produkt, das bezüglich der ersten Faktoren bereits in den vorangegangenen Abschnitten diskutiert wurde, wird nun ein die Abhängigkeit von der Kaminhöhe H beschreibender Faktor hinzugefügt.

Die Bildung des Populations-Ausbreitungsfaktors $J_p(0,x)$ erfolgt wie in Abschnitt 3.3.1 in zwei Teilintegrationen. Man erhält

$$J_p(0,x) = \frac{P}{\pi \cdot a^2}\; \frac{2}{\sqrt{\pi}\cdot C_z \cdot \bar{u}} \left\{ \left| F(\alpha = \frac{2-n}{2},\, a,x,x_0) \right|_{x=0}^{x=(\frac{a}{C_y})^{\frac{2}{2-n}}} \right.$$

$$\left. + \frac{a}{C_y} \cdot \left| F(\alpha = 2-n, a,x,x_0) \right|_{x=(\frac{a}{C_y})^{\frac{2}{2-n}}}^{x} \right\} \qquad (3.3.2\text{-}2)$$

mit

$$F(x) = \sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu}}{\mu!} \left(\frac{H}{C_z}\right)^{2\mu} \cdot x^{-(2-n)\mu-\alpha+1}$$

$$\cdot \left\{ \sum_{m=0,2,4}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m}{2}}}{\frac{m!}{2}} \frac{m!}{a^m} \left(\sum_{\nu=0} \cdot \frac{(-1)}{\nu\,!} \; \frac{x^{m-\nu}\,(x-x_0)^{\nu}}{\sum_{n=0}^{m-} (n+1-\alpha-(2-n)\mu)} \right) \right\}$$

Die Populations-Ausbreitungsfaktoren J_p bzw. $\overline{J_p}$, die wie in Abschnitt 3.3.1 graphisch ermittelt wurden, sind in die Tabellen 4a und 4b eingetragen und in die Abbildungen 5a, 5b, 6a und 6b eingezeichnet. Der Abstand der Abluftquelle mit H = 50 m und 100 m wurde wiederum zwischen x_0 = 0 und 100 km variiert.

Erwartungsgemäß liegen die ermittelten Populations-Ausbreitungsfaktoren zum Teil beträchtlich unter denen für H = 0 m. Diese Abnahme, die für Inversionswetter bedeutender ist als für Normalwetter, wirkt sich jedoch nur bei nicht zu großen Abständen Quelle - Stadtzentrum aus. Näherungsweise läßt sich die Faustregel aufstellen, daß die Wirksamkeit von Abluftkaminen mit Höhen von 50 - 100 m bezüglich der Populations-Ausbreitungsfaktoren bei Normalwetter bis etwa x_0 = 2a und für Inversionwetter bis etwa x_0 = 10 a reicht.

4. Populations-Dosis und Individual-Dosis

4.1 Berechnung der Populations-Dosis für Jod

Im folgenden werden als Beispiel die zu erwartenden Populations-Inhalationsdosen I_p für Jodisotope berechnet, wobei wie in der bereits zitierten Arbeit [1] die Freisetzung der Spaltprodukte eines Reaktor-Cores als vorausgehendes Ereignis angenommen wird. Folgende Parameter werden vorausgesetzt:

Reaktorleistung:	P = 1 MWt
Leckrate (aus dem Containment):	$c = 10^{-3}\ d^{-1}$
Freisetzungsfaktor (für Jod):	v = 0,5
Inhärenter Filterfaktor (für Jod):	f = 0,5

Weitere Annahmen, die in [1] ausführlich erläutert sind, führen schließlich zu dem Gefährdungsausfluß von Jod:

$$G_e = 1{,}76 \cdot 10^4\ \text{rem} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

Unter Verwendung dieses Zahlenwertes gelangt man mit Hilfe der bereits bestimmten Populations-Ausbreitungsfaktoren J_p bzw. $\overline{J}_p$ zu den entsprechenden Populations-Dosen I_p bzw. $\overline{I}_p$.

In Tabelle 4 sind für den wichtigsten Fall "Abluftquelle am Stadtrand ($x_0 = a$)", bei dem Windschwankungen noch vernachlässigbar sind, die Zahlenwerte für $I_p = \overline{I}_p$ zusammengestellt. Den Bevölkerungsdichten $\frac{p}{\pi \cdot a^2}$ bzw. p_0 sind dabei die Zahlenwerte 10^{-2} man$\cdot$m^{-2} = 10.000 man$\cdot$km^{-2} zugrunde gelegt (siehe Abschnitt 3.3).

Zum Vergleich sind in Tabelle 4 auch die maximal zu erwartenden Individual-Dosen I bzw. $\overline{I}$ [rem] für feste bzw. schwankende Windrichtungen eingetragen [1], unter gleichzeitiger Angabe der Entfernungen bei der diese Dosen innerhalb des Stadtgebietes auftreten. Setzt man in Abweichung von der in der Einleitung zitierten maximalen Individual-Schilddrüsendosis von I = 250 rem eine solche von 25 rem voraus und eine Populations-Schilddrüsendosis von I_p = 1.000.000 man-rem, so zeigt sich, daß der maximal zulässige Jod-Gefährdungsausfluß bei den in Tabelle 4 behandelten Fällen meistens durch die Individualdosis begrenzt wird. Lediglich für a = 10.000 m ($3 \cdot 10^6$ man) wird bei schwankender Windrichtung und Kaminhöhen von 50 und 100 m die Jod-Ausflußgefährdung durch die angenommene Populations-Schilddrüsendosis von 10^6 man-rem begrenzt. Bei der Voraussetzung von 250 rem und 10^6 man-rem als Toleranzdosen, würde der Gefährdungsausfluß im zunehmenden Maße durch die Populations-Dosis beschränkt. Der Einfluß, den die Entfernung ausübt, wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

4.2 Vergleich von Individual- und Populations-Dosis

Wie in der Einleitung zitiert, schlägt die IAEA, Wien, bei äußerer Bestrahlung Höchstgrenzen vor in Form einer Individual-Dosis von 25 rem und einer um den Faktor 40.000 höheren Populations-Dosis von 1.000.000 man-rem. Wie sich diese beiden Höchstgrenzen auf die maximal zulässige Ausflußgefährdung auswirken, soll im folgenden anhand der in Abschnitt 3 beschriebenen Bevölkerungsverteilungen untersucht werden.

4.2.1 Punktförmige Bevölkerungsdichte

Sind die in Abschnitt 3.1 angegebenen Bedingungen für eine punktförmige Bevölkerungsverteilung erfüllt, so wird der maximal zulässige Gefährdungsausfluß bei Gemeinden mit Einwohnerzahlen bis zu 40.000 man durch die Individual-Dosis und für größere Gemeinden durch die Populations-Dosis begrenzt.

4.2.2 Konstante Bevölkerungsdichte

Für eine konstante Bevölkerungsdichte erhält man das Problem in der Weise, daß für einen bestimmten Quellabstand x, von dem ab sich das Siedlungsgebiet ausdehnt, nach jenem Gefährdungsausfluß gefragt wird, bei dem

1) einer Einzelperson an diesem Ort ($x = x_{25}$) höchstens eine Individual-Dosis von 25 rem appliziert wird,

2) der Gesamtbevölkerung, die sich hinter dieser Grenze ($x = x_A$) aufhält, höchstens eine Populations-Dosis von 1.000.000 appliziert wird.

Da keine von den beiden Höchstgrenzen überschritten werden soll, wird der maximal zulässige Gefährdungsausfluß dann durch diejenige Dosis bestimmt, die den geringeren Ausfluß fordert.

Für das Beispiel H = 0 formuliert sich die erste Forderung in der Form

$$G_e(x_{25}) = \frac{\pi \cdot C_y \cdot C_z \cdot \bar{u} \cdot x_{25}^{2-n}}{2} \cdot 25 \text{ rem} \qquad (4.2.2\text{-}1)$$

während die zweite Forderung zu folgender Form führt

$$G_e(x_A) = \frac{\sqrt{\pi} \cdot C_z \cdot \bar{u}}{2} \cdot \frac{n}{2} \quad \frac{1}{(x_E^{\frac{n}{2}} - x_A^{\frac{n}{2}})} \cdot 1.000.000 \text{ man-rem} \quad (4.2.2\text{-}2)$$

x_E ist die obere Integrationsgrenze, bei der, für eine vorgegebene Ausflußgefährdung, die Individual-Dosis gerade auf die natürliche Jahresdosis von 0,1 rem abgefallen ist (siehe Abschnitt 3.2.1).

$$x_E = \left(\frac{2\, G_e}{0{,}1 \cdot \pi \cdot C_y \cdot C_z \cdot \bar{u}}\right)^{\frac{1}{2-n}} \qquad (4.2.2\text{-}3)$$

Für die in Abschnitt 3.2 bereits angegebenen Beispiele konstanter Bevölkerungsdichten

$p_o = 10^{-4}$ man $\cdot$ m^{-2} (Bäuerliche Landschaft)
$p_o = 10^{-3}$ man $\cdot$ m^{-2} (Industrielandschaft),

die noch um das Beispiel einer hypothetischen, sehr weit ausgedehnten Stadtlandschaft erweitert wurden

$$p_o = 10^{-2} \text{ man} \cdot m^{-2} \qquad \text{(Stadtlandschaft)},$$

sind in Abbildung 3a und 3b jene Gefährdungsausflüsse eingezeichnet, die den oben angegebenen Bedingungen genügen. Die Untersuchungen erstreckten sich wieder auf Normal- und Inversionswetterlagen bei fester und schwankender Windrichtung, wobei Kaminhöhen von $H = 0$ m, 50 m und 100 m berücksichtigt wurden. Um die Übersicht der Abbildungen nicht zu beeinträchtigen, wurde im Fall schwankender Windrichtung auf die Eintragung der Ergebnisse für $H = 50$ m und 100 m verzichtet.

Wie aus den Abbildungen hervorgeht, wird für große Quellabstände der Besiedlungsgrenze der maximal erlaubte Gefährdungsausfluß durch die Populations-Dosis begrenzt, während zu kleineren Abständen hin in den meisten Fällen ein Übergang zur Individual-Dosis erfolgt. Bei Inversionswetter und $H \neq 0$ kann es vorkommen, daß der Gefährdungsausfluß überall durch die Populations-Dosis eingeschränkt wird. In Tabelle 5 sind jene Entfernungen $x_{i,p}$ zusammengefaßt, bei denen der Übergang der Ausflußbegrenzung durch die Individual-Dosis auf die Populations-Dosis übergeht. Erfolgt die Begrenzung nur durch die Populations-Dosis, so wird dies in der Tabelle durch eine 0 gekennzeichnet. Zusätzlich sind die für jene Abstände $x_{i,p}$ noch zulässigen Gefährdungsausflüsse eingetragen.

4.2.3 Geballte Bevölkerungsdichte.

Bei Stadtsiedlungen stellt sich die Frage, ob die maximale Ausflußgefährdung einer in der Nachbarschaft befindlichen Quelle durch die Populations-Dosis der ganzen Stadtbevölkerung begrenzt wird oder durch die Individual-Dosis einer Einzelperson, die sich innerhalb des Stadtgebiets aufhält. Die Beantwortung dieser Frage wurde in den Abbildungen 4a, 4b, 5a, 5b, 6a und 6b graphisch durchgeführt. In diese Abbildungen wurden zu den bereits eingetragenen Populations-Ausbreitungsfaktoren J_p und $\overline{J_p}$, die aus [1] entnommenen und um den Faktor $40.000 \cdot \frac{1}{p_o} = 4 \cdot 10^6$ ($p_o = 10^{-2}$ man $\cdot\, m^{-2}$) vermehrten Individual-Ausbreitungsfaktoren J bzw. $\overline{J}$ eingezeichnet. Derjenige Ausbreitungsfaktor, der für eine bestimmte Entfernung den höheren

Zahlenwert annimmt, führt auch zur höheren Dosis und begrenzt somit die Ausflußgefährdung. Dabei muß der zu einer bestimmten Entfernung x_0 des Stadtzentrums von der Abluftquelle gehörige Populations-Ausbreitungsfaktor J_p bzw. $\overline{J_p}$ dem maximalen Individual-Ausbreitungsfaktor J bzw. $\overline{J}$, der sich innerhalb des Stadtgebiets $x_0 \pm a$ einstellen kann, gegenüber gestellt werden. Wie aus den Abbildungen hervorgeht, wird für a = 1.000 m (P≈30.000Man) der maximal erlaubte Gefährdungsausfluß ausschließlich von der Individual-Dosis begrenzt, was auch im Einklang mit der in Abschnitt 4.2.1 getroffenen Feststellung steht. Bei den restlichen Beispielen erkennt man, daß in den meisten Fällen für große Entfernung die Populations-Dosis und für stadtnahe Entfernungen die Individual-Dosis die Begrenzung darstellt. Bei Inversionswetter und $H \neq 0$ kann es ebenfalls vorkommen, daß der Gefährdungsausfluß durchwegs von der Populations-Dosis eingeschränkt wird.

In Tabelle 6 sind jene Entfernungen des Zentrums x_0 und des Stadtrandes $x_0 - a$ zusammengestellt, bei denen die Ausflußbegrenzung durch die Individual-Dosis auf die Populations-Dosis übergeht. Erfolgt die Begrenzung nur durch die Populations-Dosis, so wird dies in der Tabelle durch eine 0 gekennzeichnet. Zusätzlich sind die bei diesen Abständen x_0 auftretenden Populations-Ausbreitungsfaktoren J_p bzw. $\overline{J_p}$ eingetragen, aus denen sich dann leicht der noch zulässige Gefährdungsausfluß ermitteln läßt. Aus dieser Tabelle läßt sich weiterhin entnehmen, daß für Städte in der Größenordnung von Karlsruhe (a = 3.000 m) bis Berlin (a = 10.000 m) der Übergang, in den meisten Fällen, etwa bei einem Zentrumsabstand von 10 bis 15 km stattfindet. Diesen Entfernungen von 10 bis 15 km können im Sinne einer optimalen Standortauslegung eines Reaktors eine besondere Bedeutung zugemessen werden, da dort beide Toleranzgrenzen etwa gleichzeitig erreicht werden.

Literaturverzeichnis

[1] A. Bayer. Die Ausbreitung der radioaktiven Wolke und die zu erwartenden Inhalationsdosen. KFK 646, 1967.

[2] O.G. Sutton. Micrometeorology, 1955

[3] G. Blässer, K. Wirtz. Nukleare Grundlagen für Standort- und Geländewahl von Kernreaktoren. Nukleonik, 3, 164-178, 210-231 (1961).

Tabelle 1: Quellabstände x_E, bei denen für bestimmte Gefährdungsflüsse die Individual-Dosis auf die natürliche Jahresdosis von 0,1 rem abgefallen ist

Gefährdungsausfluß G_e $\left[rem \cdot \frac{m^3}{sec}\right]$	Quellabstand x_E [m] ($x_E \geq 100$ m)											
	Normalwetter $\bar{u} = 1 \frac{m}{sec}$						Inversionswetter $\bar{u} = 1 \frac{m}{sec}$					
	feste Windrichtung			schwankende Windrichtung			feste Windrichtung			schwankende Windrichtung		
	H = 0 m	H = 50m	H =100m	H = 0 m	H = 50m	H =100m	H = 0 m	H = 50m	H =100m	H = 0 m	H = 50m	H =100m
10^1	-	-	-	-	-	-	$4{,}5 \cdot 10^2$	-	-	$2{,}4 \cdot 10^2$	-	-
10^2	$2 \cdot 10^2$	-	-	$1{,}3 \cdot 10^2$	-	-	$2{,}3 \cdot 10^3$	- -	-	$9 \cdot 10^2$	-	-
10^3	$8 \cdot 10^2$	$(4 \cdot 10^2)$	-	$4{,}5 \cdot 10^2$	-	-	$1 \cdot 10^4$	-	-	$3{,}5 \cdot 10^3$	-	-
10^4	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$2{,}5 \cdot 10^3$	$1{,}5 \cdot 10^3$	$1{,}4 \cdot 10^3$	$(1 \cdot 10^3)$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$1{,}3 \cdot 10^4$	$(7 \cdot 10^3)$	-
10^5	$1{,}2 \cdot 10^4$	$1{,}2 \cdot 10^4$	$1{,}2 \cdot 10^4$	$5{,}5 \cdot 10^3$	$5{,}5 \cdot 10^3$	$5{,}5 \cdot 10^3$	$2{,}5 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^5$	$4{,}5 \cdot 10^4$	$4{,}5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$
10^6	$4 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$1{,}8 \cdot 10^4$	$1{,}8 \cdot 10^4$	$1{,}8 \cdot 10^4$						
10^7	$1{,}5 \cdot 10^5$	$1{,}5 \cdot 10^5$	$1{,}5 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$						

Bei den in Klammern angegebenen Entfernungen liegen die Dosiswerte geringfügig unter 0,1 rem.

Tabelle 2

Quellabstände $x_{ü} = (\frac{a}{C_y})^{\frac{2}{2-n}}$, bei denen das "$\frac{1}{r}$ - Abstandsgesetz" in das "$\frac{1}{r^2}$ - Abstandsgesetz" übergeht.

Stadtradius	Normalwetter $n = 0,25$, $C_z = 0,23\ m^{1/8}$: feste Windrichtung $C_y = 0,23\ m^{1/8}$	Normalwetter $n = 0,25$, $C_z = 0,23\ m^{1/8}$: schwankende Windrichtung $\overline{C}_y = 0,83\ m^{1/8}$	Inversionswetter $n = 0,5$, $C_z = 0,06\ m^{1/8}$: feste Windrichtung $C_y = 0,1\ m^{1/4}$	Inversionswetter $n = 0,5$, $C_z = 0,06\ m^{1/8}$: schwankende Windrichtung $\overline{C}_y = 0,39\ m^{1/4}$
a = 1 000 m	x_o = 15 km	x_o = 3,4 km	x_o = 220 km	x_o = 35 km
a = 3 000 m	x_o = 50 km	x_o = 12 km	x_o = 950 km	x_o = 148 km
a =10 000 m	x_o = 200 km	x_o = 47 km	x_o = 4 600 km	x_o = 730 km

Tabelle 3a

Populations - Ausbreitungsfaktoren J_p, $\overline{J}_p$

H = 0 m, 50 m, 100 m

a) Normalwetter

a [m]	x_o [m]	J_p, $\overline{J}_p$ [$\frac{sec}{m^3} \cdot man$]: $p(x,y) = \frac{p}{\pi a^2} \cdot \exp\left\{-\frac{y^2}{a^2}\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-x_o)^2}{a^2}\right\}$, $\frac{p}{\pi a^2} = 1$ [$\frac{man}{m^2}$]; $C_y = 0{,}23\ m^{1/8}$			$\overline{C_y} = 0{,}83\ m^{1/8}$			$p(x,y) = p_o$; $-\infty \leq y \leq +\infty$; $x_o - a \leq x \leq x_o + a$; $p_o = 1$ [$\frac{man}{m^2}$]		
		H = 0 m	50 m	100 m	H = 0 m	50 m	100 m	H = 0 m	50 m	100 m
a = 1 000	0 x)	19	5	1,5	19	5	1,5	23	7	2
	500	25	8	3	25	8	3	28	10	4
	1 000 xx)	22	12	5	22	12	5	31	14	7
	2 000	10	10	6,5	10	8	6	13	12	8
	5 000	4,8	4,8	4,8	3	3	3	6	6	6
	10 000	2,4	2,4	2,4	1,2	1,2	1,2	3,2	3,2	3,2
	20 000	1	1	1	0,4	0,4	0,4	1,8	1,8	1,8
	50 000	0,23	0,23	0,23	0,075	0,075	0,075	0,8	0,8	0,8
	100 000	0,065	0,065	0,065	0,018	0,018	0,018	0,44	0,44	0,44
a = 3 000	0 x)	32	15	8	32	15	8	36	19	11
	1 500	37	18	14	37	18	14	42	24	16
	3 000 xx)	30	21	15	30	21	15	46	28	20
	6 000	15	14	13	15	14	13	16	15	15
	10 000	8	8	8	6,5	6,5	6,5	9,5	9,5	9,5
	20 000	39	39	39	2,4	2,4	2,4	5	5	5
	50 000	1,3	1,3	1,3	0,53	0,53	0,53	2,3	2,3	2,3
	100 000	0,53	0,53	0,53	0,16	0,16	0,16	1,3	1,3	1,3
a = 10 000	0 x)	46	30	22	46	30	22	52	36	27
	5 000 xx)	48	34	26	48	34	26	60	43	34
	10 000	39	31	28	39	31	28	64	48	38
	20 000	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	50 000	6	6	6	4	4	4	8	8	8
	100 000	3,2	3,2	3,2	1,6	1,6	1,6	4,4	4,4	4,4

x) Stadtmitte
xx) Stadtrand

Tabelle 3b

<u>Populations - Ausbreitungsfaktoren J_p, $\overline{J}_p$</u>

$H = 0$ m, 50 m, 100 m

b) <u>Inversionswetter</u>

		J_p, $\overline{J}_p$ $[\frac{\sec}{m^3} \cdot \text{man}]$								
		$p(x,y) = \frac{p}{\pi a^2} \cdot \exp\left\{-\frac{y^2}{a^2}\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{a^2}\right\}$ $\frac{p}{\pi a^2} = 1\ [\frac{\text{man}}{m^2}]$						$p(x,y) = p_0$ $-\infty \leq y \leq +\infty$; $x_0 - a \leq x \leq x_0 + a$ $p_0 = 1\ [\frac{\text{man}}{m^2}]$		
a $[m]$	x_0 $[m]$	$C_y = 0{,}1\ m^{1/4}$			$\overline{C}_y = 0{,}39\ m^{1/4}$					
		H = 0 m	50 m	100 m	H = 0 m	50 m	100 m	H = 0 m	50 m	100 m
1 000	0 *)	160	-	-	160	-	-	190	-	-
	500 **)	205	-	-	205	-	-	230	-	-
	1 000	200	-	-	200	-	-	270	-	-
	2 000	120	0,15	-	120	0,15	-	135	0,2	-
	5 000	57	6	0,08	57	6	0,08	65	8	0,1
	10 000	35	17	4	35	17	4	40	20	5
	20 000	21	18	7,5	18	14	7,5	24	20	10
	50 000	10	10	8	5,5	5,5	4,5	12	12	12
	100 000	5	5	5	2,0	2,0	2,0	7,5	7,5	7,5
3 000	0 *)	270	-	-	270	-	-	320	-	-
	1 500 **)	320	1,3	-	320	1,3	-	380	2	-
	3 000	300	5	-	300	5	-	440	8	-
	6 000	160	20	1,5	160	20	1,5	210	30	3
	10 000	100	53	7	100	53	7	115	60	12
	20 000	60	53	20	60	53	20	67	60	25
	50 000	30	30	21	30	30	21	35	35	25
	100 000	18	18	18	14	14	14	20	20	20
10 000	0 *)	460	31	-	460	31	-	530	40	-
	5 000 **)	530	65	14	530	65	14	600	90	20
	10 000	510	122	27	510	122	27	680	140	40
	20 000	240	177	75	240	177	75	250	190	80
	50 000	100	100	75	100	100	75	110	110	85
	100 000	60	60	60	60	60	60	65	65	65

*) Stadtmitte

**) Stadtrand

Tabelle 4

Vergleich von Populations-Dosis I_p und Individual-Dosis I, $\bar{I}$

(Abluftquelle am Stadtrand ($x_o = a$), Ausflußgefährdung $G_e = 1{,}76 \cdot 10^4$ rem·m^3·sec^{-1})

	a) Normalwetter I_p [man - rem] ($I_p = \bar{I}_p$)							b) Invasionswetter I_p [man - rem] ($I_p = \bar{I}_p$)						
	$p(x,y) = \frac{p}{\pi a^2} \cdot \exp\left\{\frac{-y^2}{a^2}\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-x_o)^2}{a^2}\right\}$ $\frac{p}{\pi a^2} = 10^{-2}$ [$\frac{\text{man}}{\text{m}^2}$]			$p(x,y) = p_o$ $-\infty \leq y \leq +\infty$ $x_o - a \leq x \leq x_o + a$ $p_o = 10^{-2}$ [$\frac{\text{man}}{\text{m}^2}$]			I ($\bar{I}$) [rem]	$p(x,y) = \frac{p}{\pi a^2} \cdot \exp\left\{\frac{-y^2}{a^2}\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-x_o)^2}{a^2}\right\}$ $\frac{p}{\pi a^2} = 10^{-2}$ [$\frac{\text{man}}{\text{m}^2}$]			$p(x,y) = p_o$ $-\infty \leq y \leq +\infty$ $x_o - a \leq x \leq x_o + a$ $p_o = 10^{-2}$ [$\frac{\text{man}}{\text{m}^2}$]			I ($\bar{I}$) [rem]
$a = x_o$ [m]	1 000	3 000	10 000	1 000	3 000	10 000		1 000	3 000	10 000	1 000	3 000	10 000	
H = 0 m	3 900	5 300	6 900	5 500	8 100	11 300	x =100m 60 (30)	35 200	52 800	89 800	47 500	77 400	119 700	x = 100m 1 600 (800)
H = 50 m	2 100	3 700	5 500	2 500	5 000	8 500	x =400m 1,6 (0,6)	-	900	21 500 *)	-	1 400	24 600 *)	x =8000m 1 (0,15)
H =100 m	900	2 700	5 000	1 200	3 500	6 700 *)	x=1000m 0,4 (0,15)	-	-	4 800 *)	-	-	7 000 *)	x=20000m 0,25 (0,03)

*) $\frac{I_p}{\bar{I}} > 40\,000$

Tabelle 5: Quellabstände $x_{i,p}$, bei denen die Begrenzung der Ausflußgefährdung durch die Individual-Dosis von 25 rem auf die Populations-Dosis von 1.000.000 man-rem übergeht.

Konstante Bevölkerungsdichte

Bevölkerungs-dichte p_o [$man \cdot m^{-2}$]	Quellabstand $x_{i,p}$ [m]											
	Normalwetter $\bar{u} = 1 \frac{m}{sec}$						Inversionswetter $\bar{u} = 1 \frac{m}{sec}$					
	feste Windrichtung			schwankende Windrichtung			feste Windrichtung			schwankende Windrichtung		
	H = 0 m	H = 50 m	H = 100 m	H = 0 m	H = 50 m	H = 100 m	H = 0 m	H = 50 m	H = 100 m	H = 0 m	H = 50 m	H = 100 m
10 Bäuerliche-Landschaft (G_e) [$rem \cdot m^3 \cdot sec^{-1}$]	30 000 ($1,4 \cdot 10^8$)	30 000 ($1,4 \cdot 10^8$)	30 000 ($1,4 \cdot 10^8$)	15 000 ($1,8 \cdot 10^8$)	15 000 ($1,8 \cdot 10^8$)	15 000 ($1,8 \cdot 10^8$)	80 000 ($4,5 \cdot 10^6$)	80 000 ($4,5 \cdot 10^6$)	80 000 ($4,5 \cdot 10^6$)	25 000 ($9 \cdot 10^6$)	25 000 ($9 \cdot 10^6$)	0 ($7 \cdot 10^6$)
10^{-3} Industrie-Landschaft (G_e) [$rem \cdot m^3 sec^{-1}$]	9 000 ($1,7 \cdot 10^7$)	9 000 ($1,7 \cdot 10^7$)	9 000 ($1,7 \cdot 10^7$)	4 500 ($2 \cdot 10^7$)	4 500 ($2 \cdot 10^7$)	4 500 ($2 \cdot 10^7$)	21 000 ($7 \cdot 10^5$)	18 000 ($7 \cdot 10^5$)	0 ($5 \cdot 10^5$)	8 000 ($1,2 \cdot 10^6$)	0 ($1 \cdot 10^6$)	0 ($1,5 \cdot 10^6$)
10^{-2} Stadt-Landschaft (G_e) [$rem\ m^3\ sec^{-1}$]	2 500 ($2 \cdot 10^6$)	2 500 ($2 \cdot 10^6$)	2 500 ($2 \cdot 10^6$)	1 500 ($2,3 \cdot 10^6$)	1 500 ($2,3 \cdot 10^6$)	0 ($1 \cdot 10^6$)	5 500 ($1 \cdot 10^5$)	0 ($1 \cdot 10^5$)	0 ($1,4 \cdot 10^5$)	2 300 ($1,4 \cdot 10^5$)	0 ($1,5 \cdot 10^5$)	0 ($2 \cdot 10^5$)

Tabelle 6: Quellabstände x_o bzw. $x_o - a$, bei denen die Begrenzung der Ausflußgefährdung durch die Individual-Dosis von 25 rem auf die Populations-Dosis von 1.000.000 man-rem übergeht.

Geballte Bevölkerungsdichte

	Quellabstand x_o und $x_o - a$ [m]											
	Normalwetter $\overline{u} = 1 \frac{m}{sec}$						Inversionswetter $\overline{u} = 1 \frac{m}{sec}$					
	feste Windrichtung			schwankende Windrichtung			feste Windrichtung			schwankende Windrichtung		
	H = 0 m	H = 50 m	H = 100 m	H = 0 m	H = 50 m	H = 100 m	H = 0 m	H = 50 m	H = 100 m	H = 0 m	H = 50 m	H = 100 m
a = 3 000m x_o =	11 000	11 000	11 000	6 000	6 000	6 000	85 000	80 000	80 000	12 000	8 000	0
$x_o - a$ =	8 000	8 000	8 000	3000	3 000	3 000	82 000	77 000	77 000	9 000	5 000	0
$J_p, \overline{J_p}$ [$man \cdot m^{-3} \cdot sec$] =	7	7	7	15	13,5	12	20	20	18	85	34	-
a =10 000m x_o =	14 000	14 000	14 000	12 000	12 000	11 500	30 000	26 000	16 000	13 000	0	0
$x_o - a$ =	4 000	4 000	4 000	2 000	2 000	1 500	20 000	16 000	6 000	3 000	0	0
$J_p, \overline{J_p}$ [$man \cdot m^{-3} \cdot sec$] =	26	24	22	32	28	25	150	150	57	400	-	-

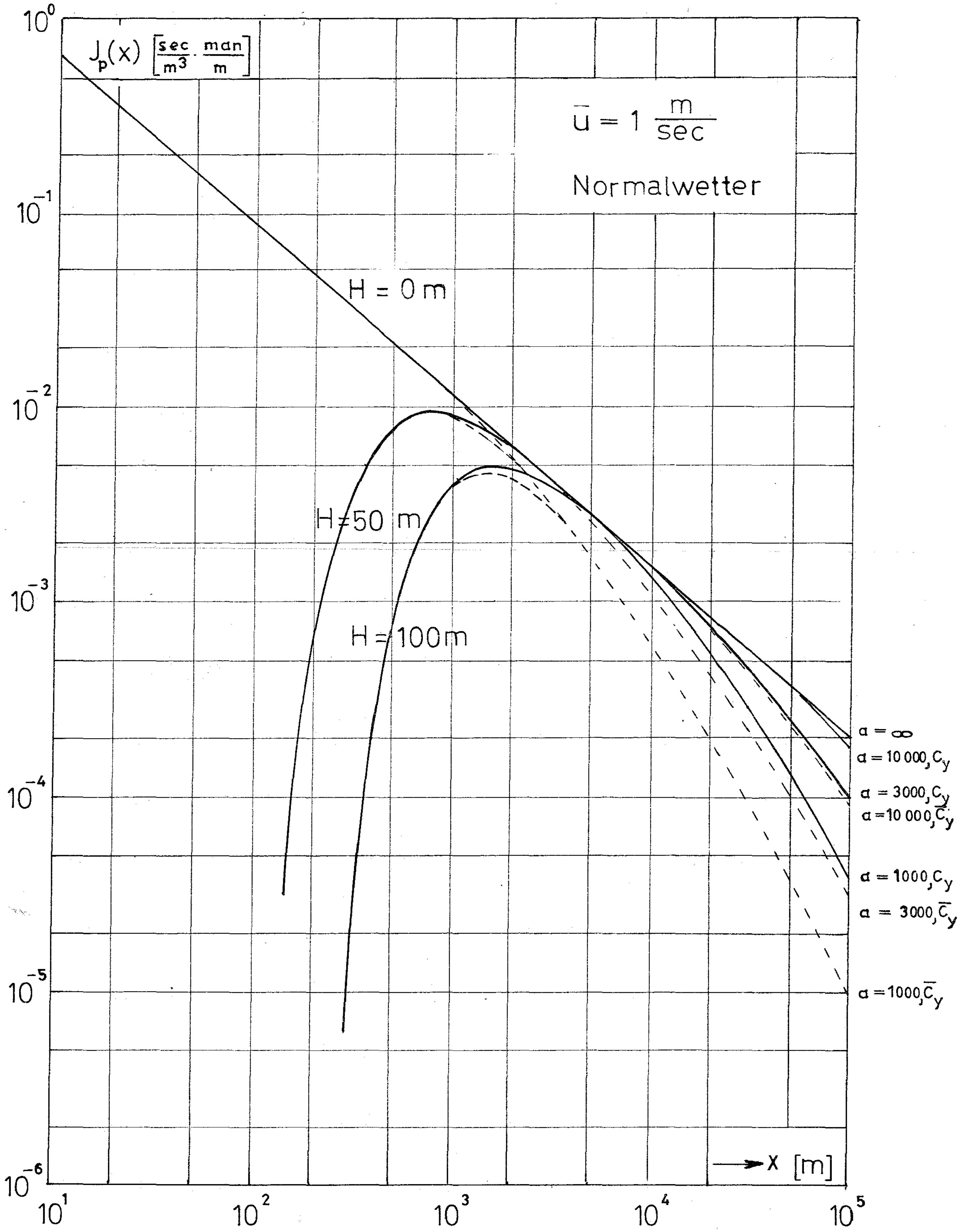

Abb. 1a Differentieller Populations-Ausbreitungsfaktor

$$J_p(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}\, C_z \bar{u}\, x^{\frac{2-n}{2}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (x^{\frac{2-n}{2}} \cdot C_y/a)^2}} \cdot P_o \cdot \exp\left[-\frac{1}{x^{2-n}}\frac{H^2}{C_z^2}\right]$$

$P_o = 1\,\frac{man}{m^2}$; a = 1000 m , 3000 m , 10 000 m , ∞ ; H = 0 m , 50 m , 100 m ,

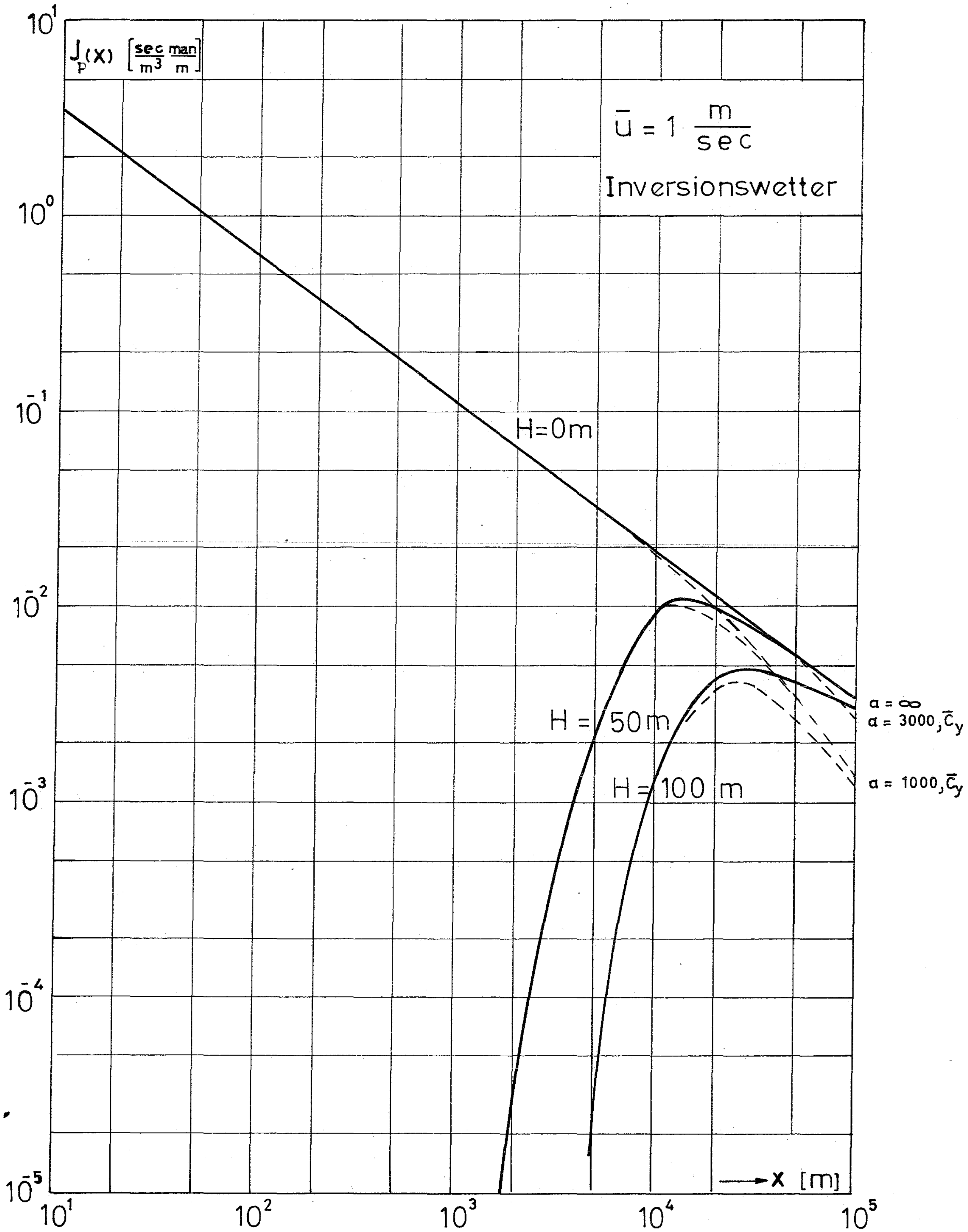

Abb. 1b Differentieller Populations-Ausbreitungsfaktor

$$J_p(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}\; C_z \bar{u}\; x^{\frac{2-n}{2}}} \; \frac{1}{\sqrt{1 + (x^{\frac{2-n}{2}} \cdot C_y / a)^2}} \; P_o \exp\left[- \frac{1}{x^{2-n}} \cdot \frac{H^2}{C_z^2} \right]$$

$P_o = 1 \frac{man}{m^2}$; a = 1000 m, 3000 m, 10 000 m, ∞ ; H = 0 m, 50 m, 100 m

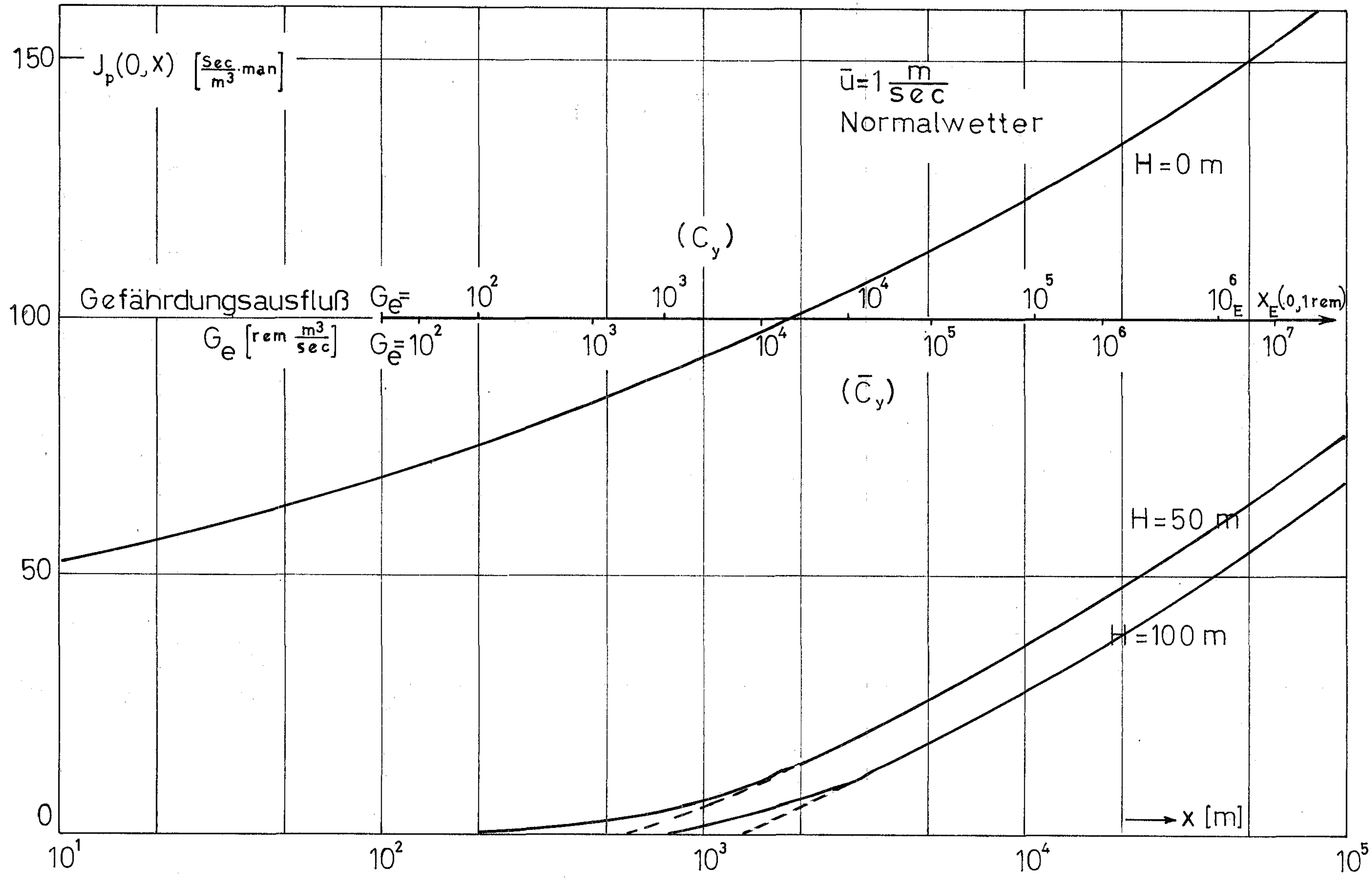

Abb. 2 a Populations - Ausbreitungsfaktor $J_P(0,x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}\cdot C_z \cdot \bar{u}} \cdot \frac{2}{n} \cdot x^{\frac{n}{2}} \cdot F(x,H) \cdot p_o$

$p_o = 1 \frac{man}{m^2}$ H = 0 m , 50 m , 100 m

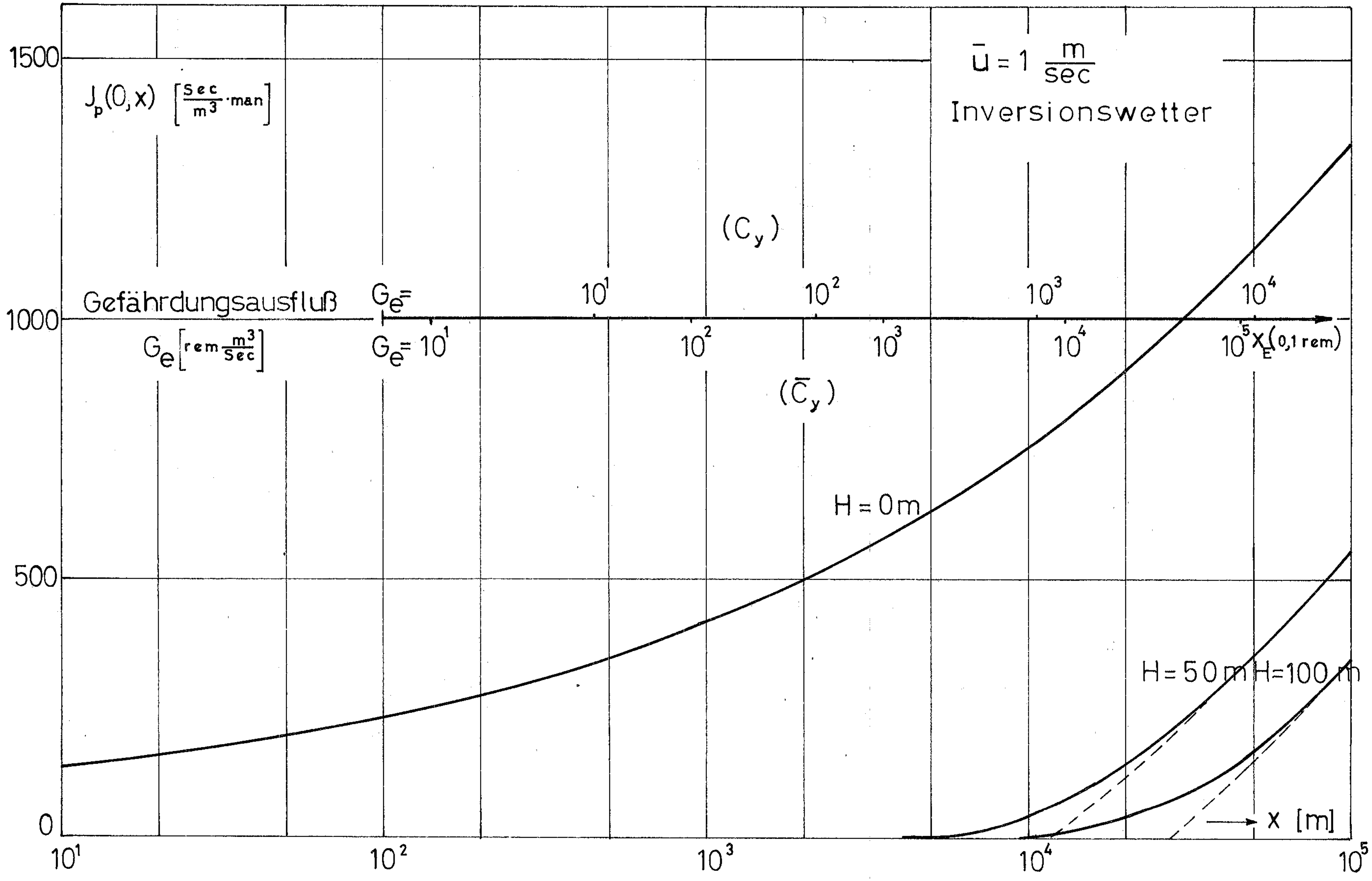

Abb. 2 b Populations-Ausbreitungsfaktor $J_P(0,x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}\, C_z\, \bar{u}} \cdot \frac{2}{n} \cdot x^{\frac{n}{2}} \cdot F(x,H) \cdot p_o$

$p_o = 1 \frac{man}{m^2}$ H = 0 m , 50 m , 100 m

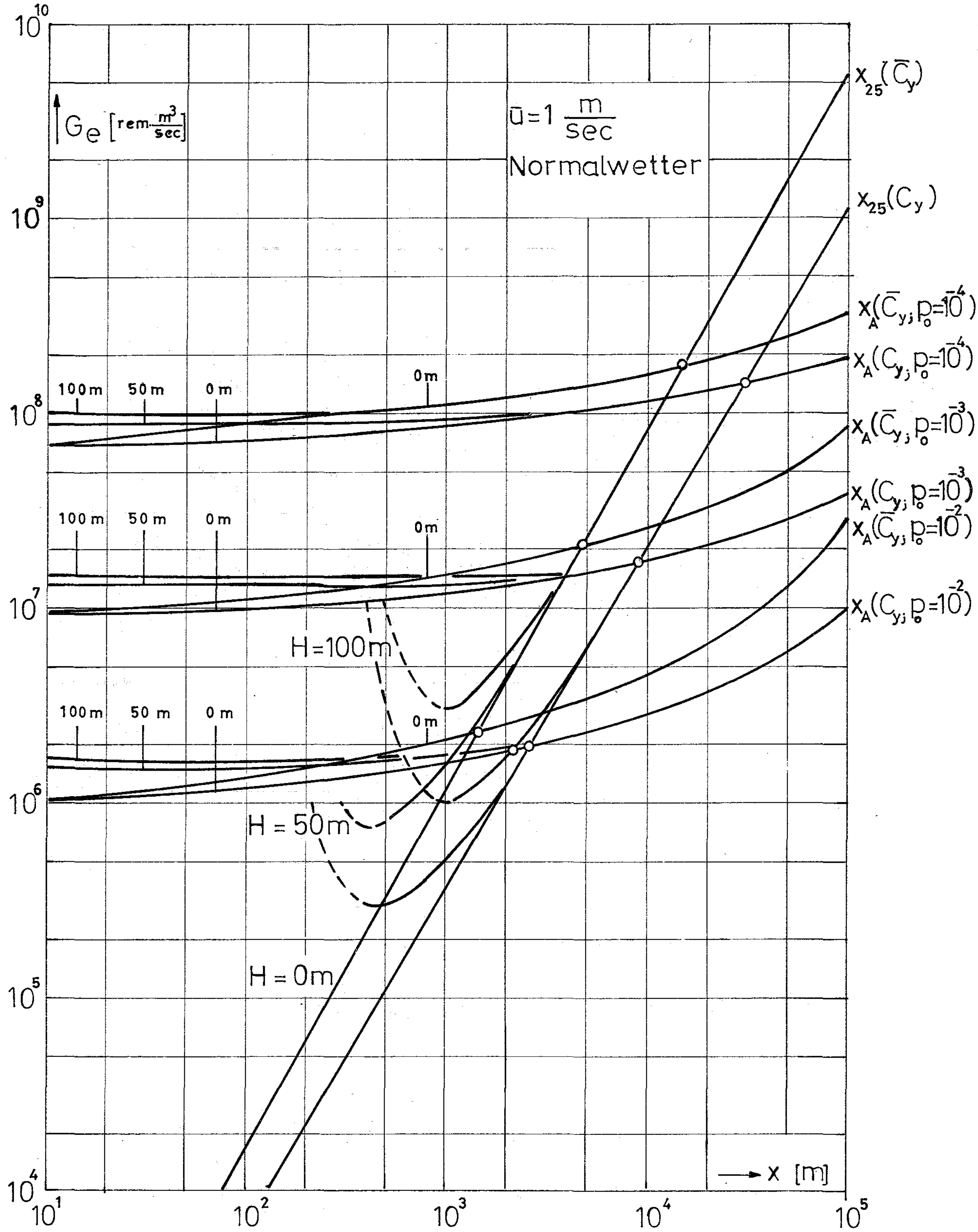

Abb. 3a Begrenzung der Ausflußgefährdung G_e durch die Individual-Dosis von 25 rem (x_{25}) und durch die Populations-Dosis von 1 000 000 man-rem (x_A)

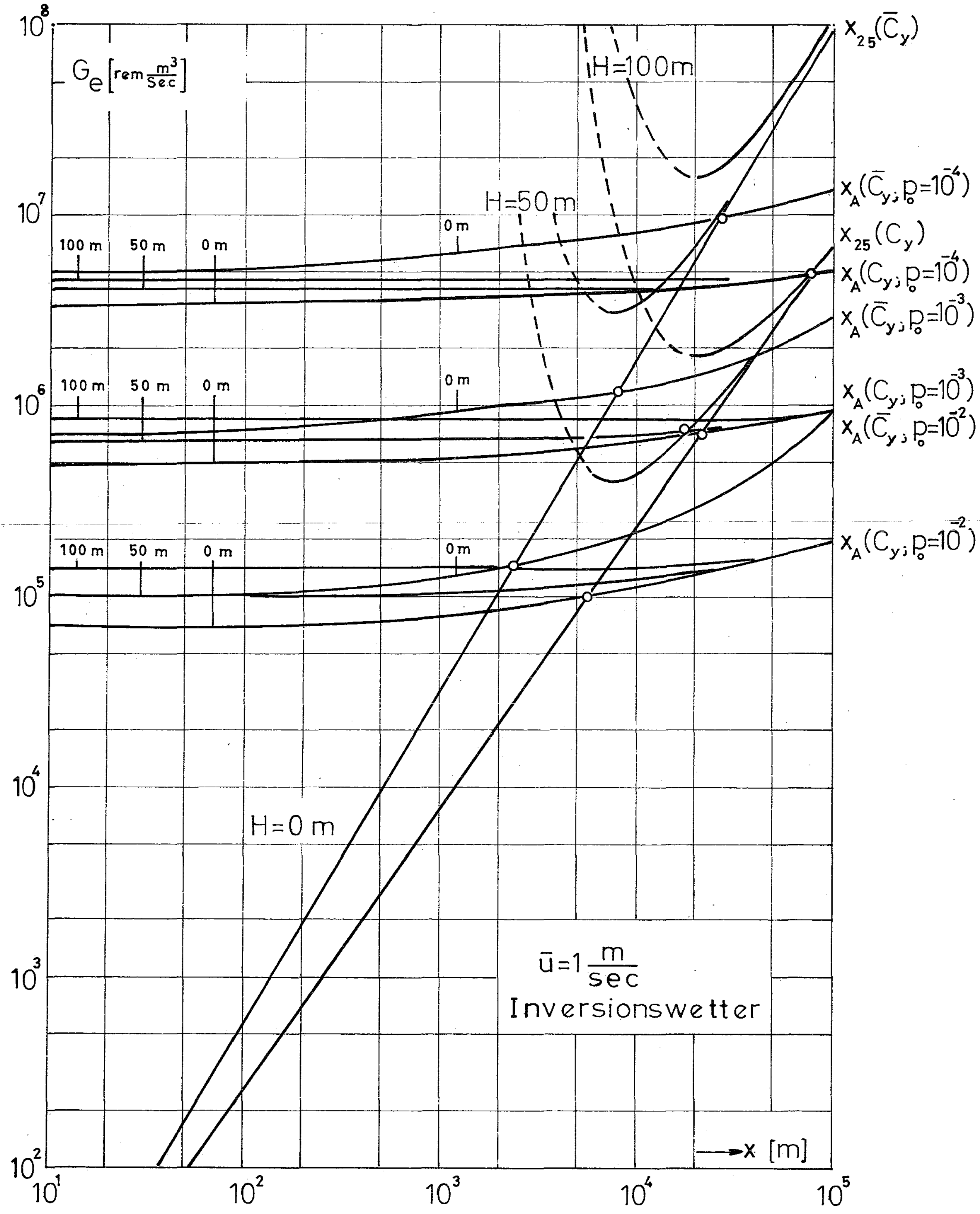

Abb. 3b Begrenzung der Ausflußgefährdung G_e durch die Individual-Dosis von 25 rem (x_{25}) und durch die Populations-Dosis von 1 000 000 man-rem (x_A)

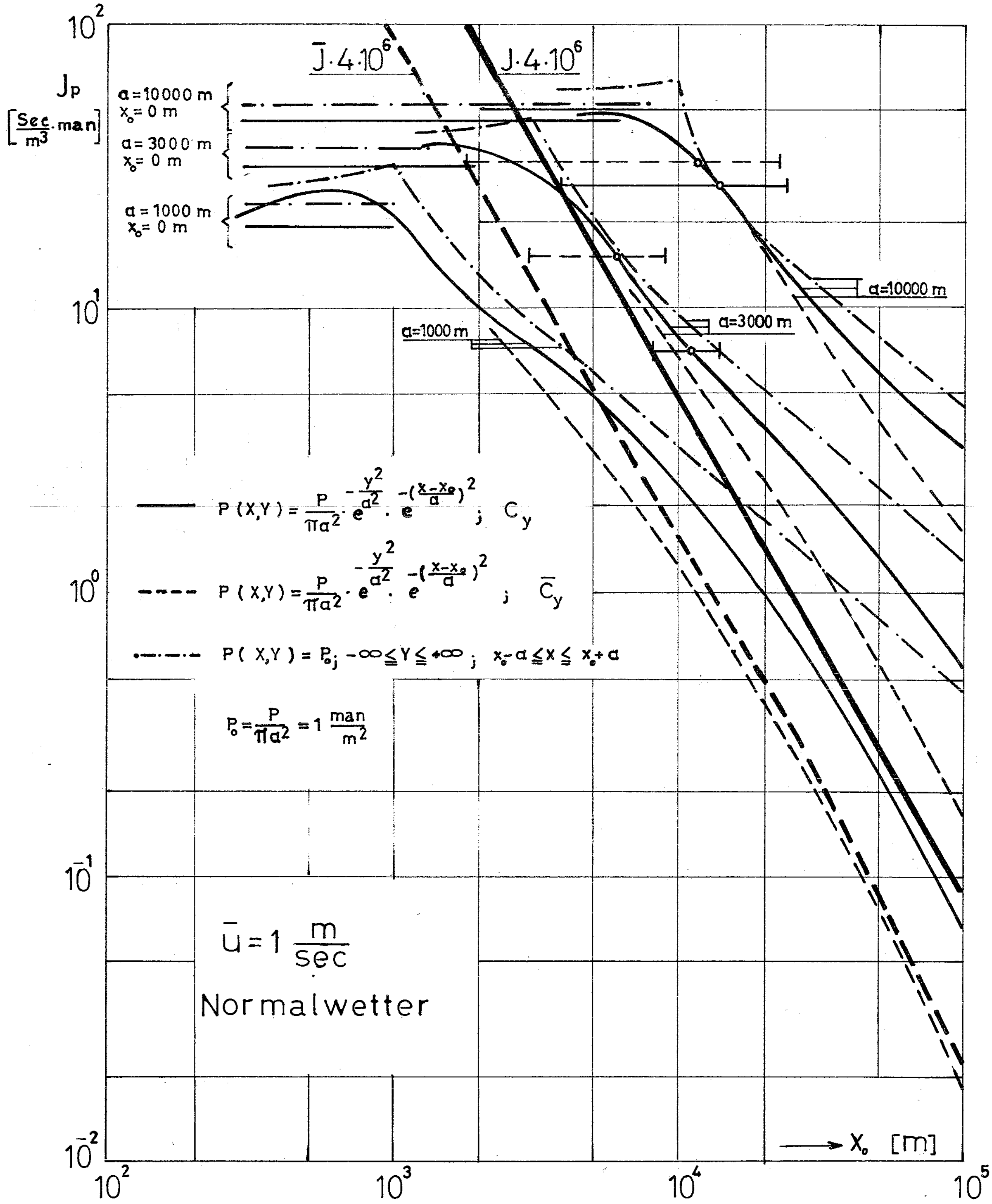

Abb. 4a Populations–Ausbreitungsfaktor $J_p, \bar{J}_p$

$a = 1000$ m , 3000 m , $10\,000$ m ; $H = 0$ m

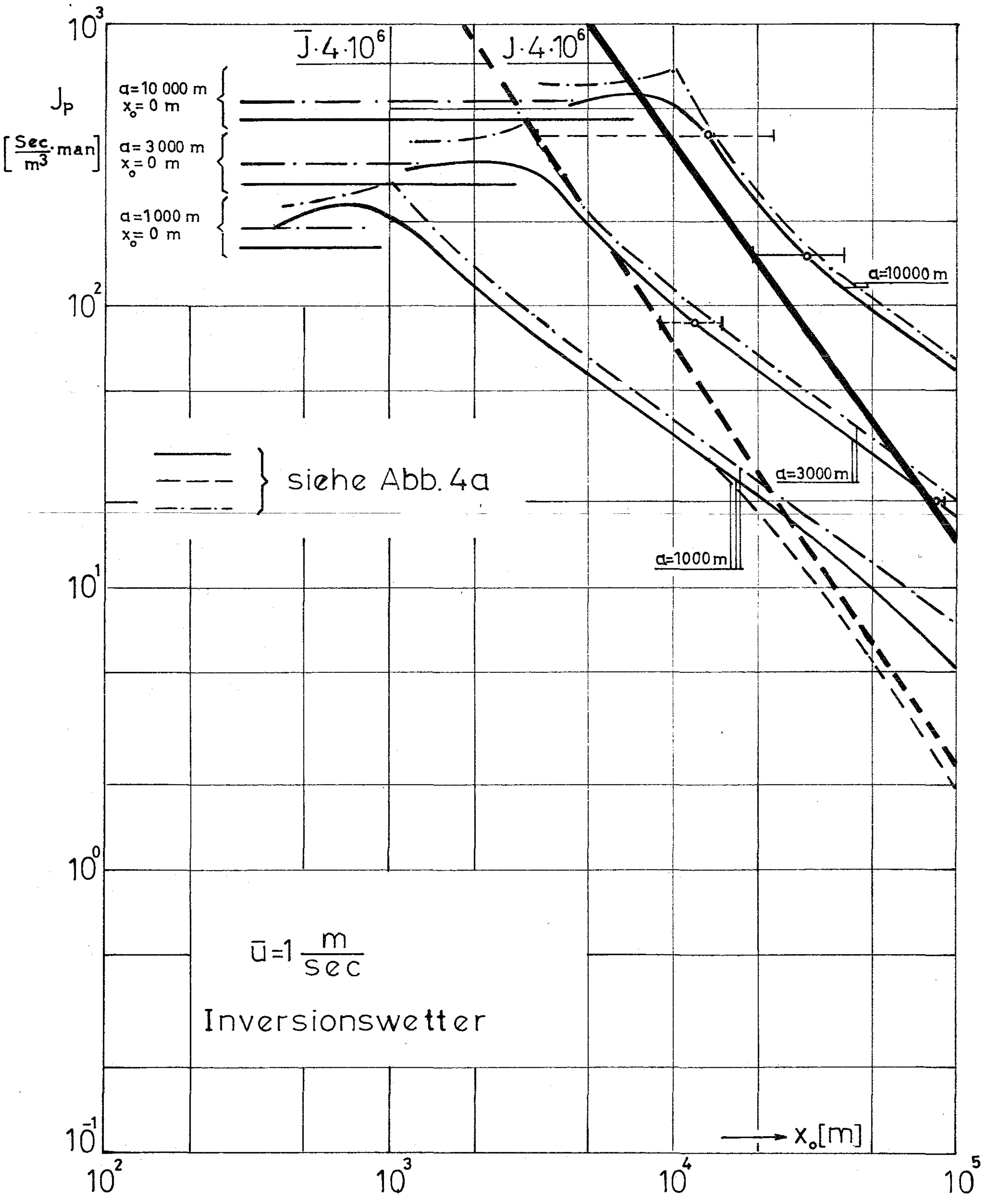

Abb. 4b Populations-Ausbreitungsfaktor J_p, $\bar{J}_p$

a= 1000 m, 3000 m, 10 000 m ; H= 0 m

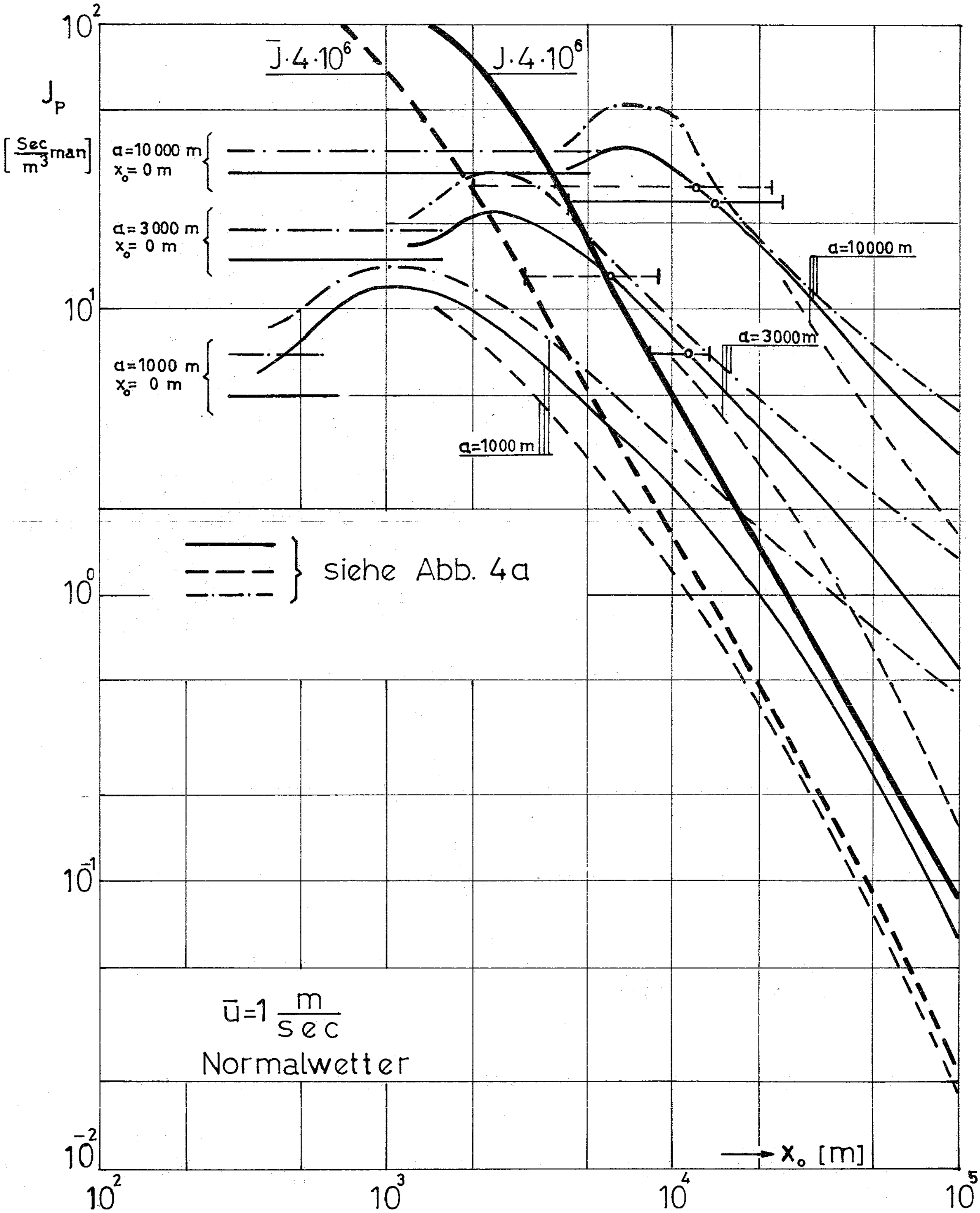

Abb. 5a Populations-Ausbreitungsfaktor J_P ; $\bar{J}_P$

a = 1000 m , 3000 m , 10000 m ; H = 50 m

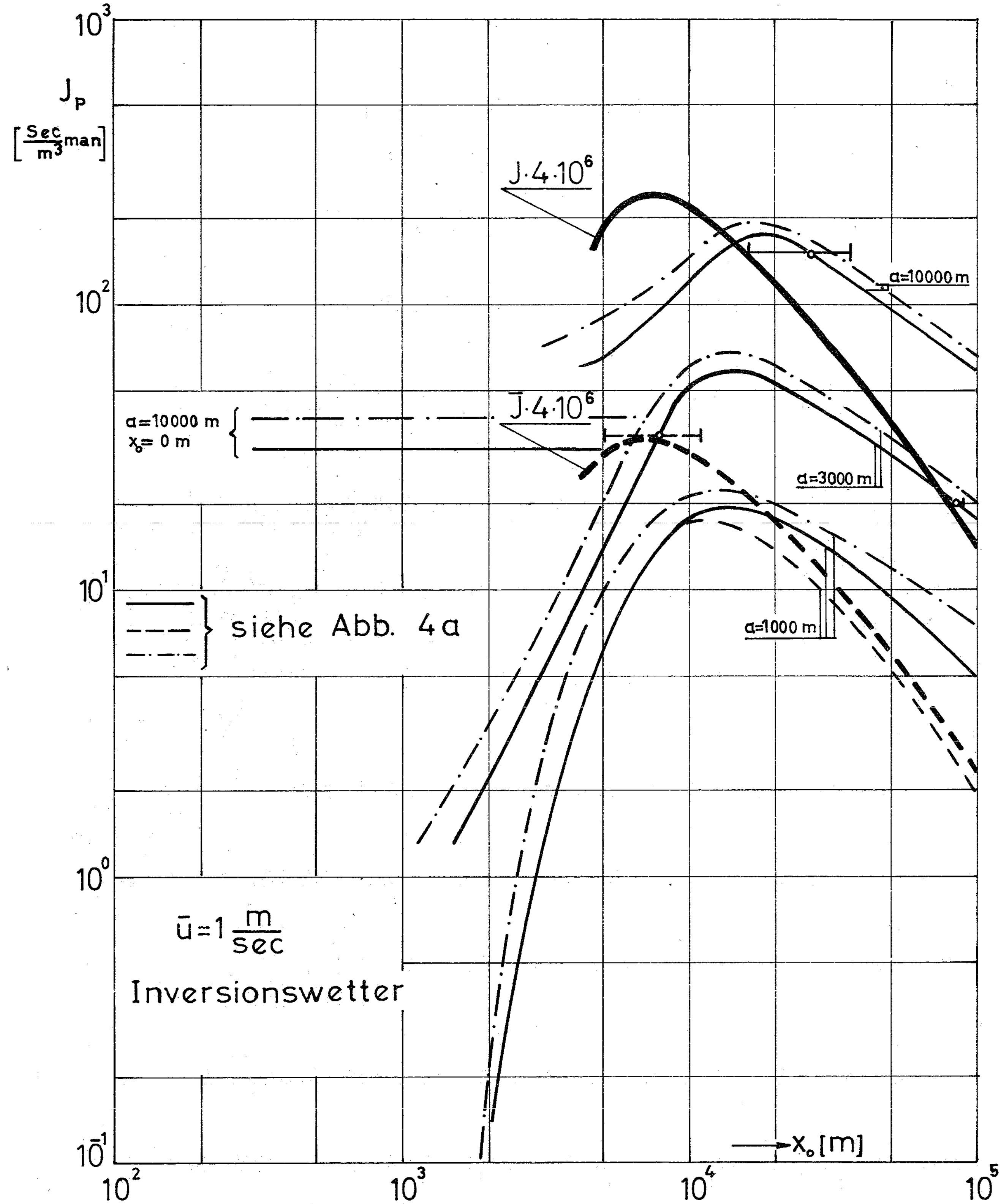

Abb. 5b Populations-Ausbreitungsfaktor J_p ; $\bar{J}_p$

a=1000 m , 3000 m , 10 000 m H = 50 m

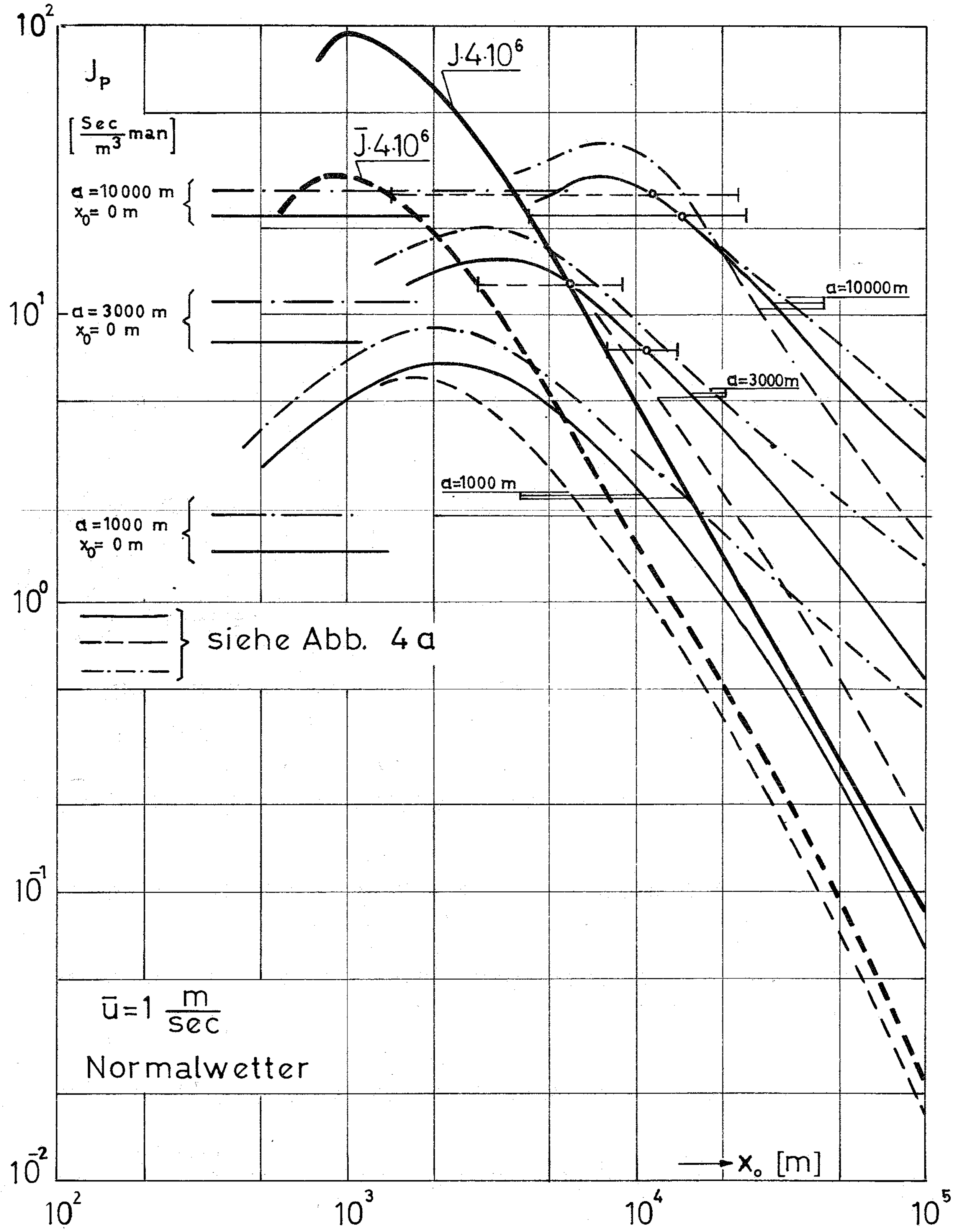

Abb. 6a Populations-Ausbreitungsfaktor J_P ; $\bar{J}_P$

a = 1000 m , 3000 m , 10 000 m ; H = 100 m

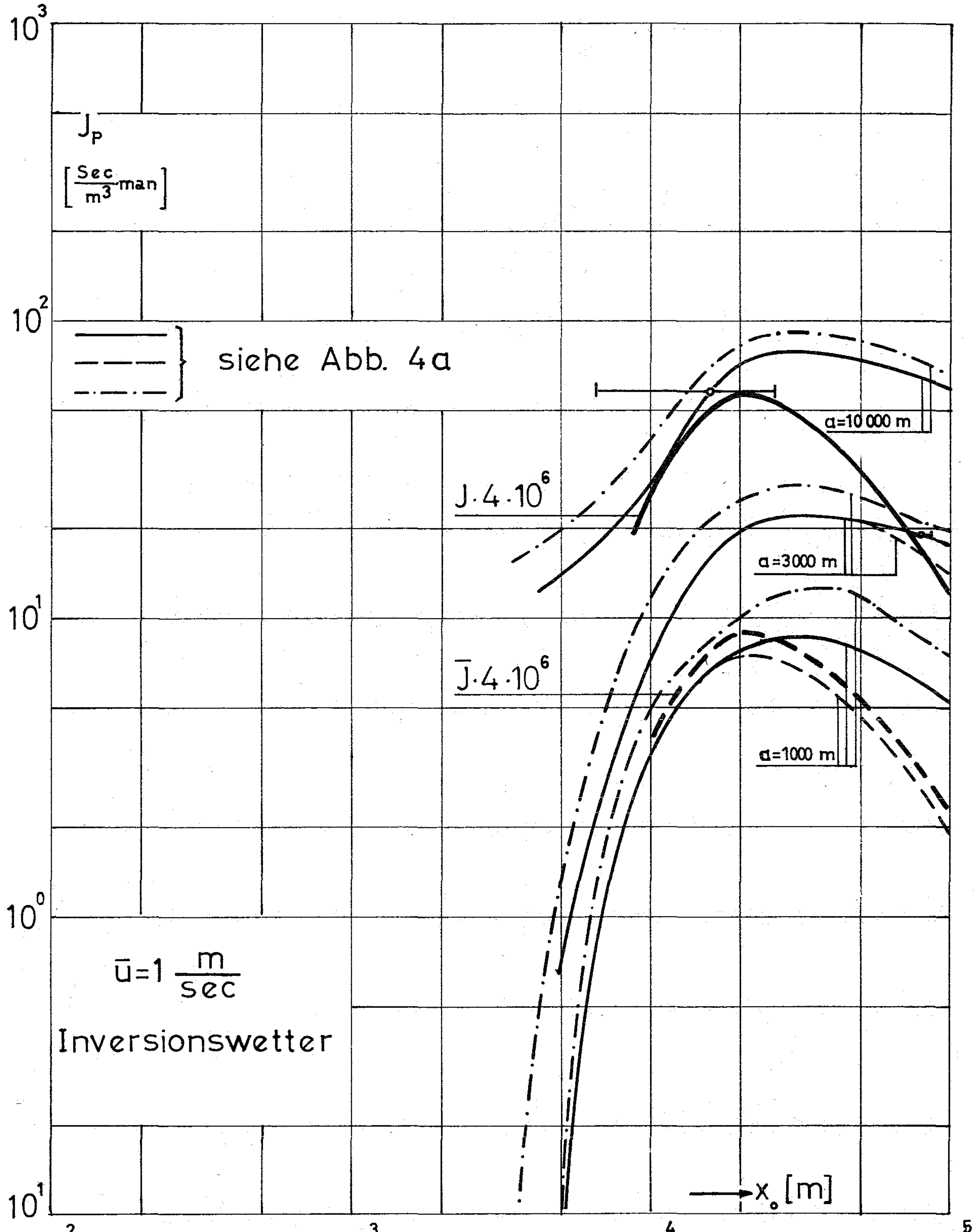

Abb. 6b Populations-Ausbreitungsfaktor J_P , $\bar{J}_P$

$a = 1000$ m ; 3000 m ; $10\,000$ m $H = 100$ m