



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

# SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

## UNTERSUCHUNGEN ZUR FESTLEGUNG VON PARAMETERN FÜR DIE MODELLIERUNG DER RADONFREISETZUNG AUS BODENNAHEN FLÄCHENQUELEN

BMU - 2003-621



WIR STEuern UM AUF ERNEUERBARE ENERGIEN.

**BMU – 2003-621**

**Untersuchungen zur Festlegung von Parametern für  
die Modellierung der Radonfreisetzung aus  
bodennahen Flächenquellen**

H. Thielen

R. Martens

M. Schatzmann

B. Leitl

R. Barthel

A. Lohmeyer

M. Stockhause

## **IMPRESSUM**

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

Der Bericht wurde durch die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH erstellt.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BMU übereinstimmen.

### **Herausgeber:**

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Arbeitsgruppe RS I 1  
Postfach 12 06 29  
53048 Bonn

Erscheinungsjahr: 2003

## **Kurzfassung**

Im Zusammenhang mit der Modellierung der Ausbreitung von Radon und Schwebstaub aus bodennahen Flächenquellen stellt sich die Frage, mit welcher Parameterisierung der atmosphärischen Turbulenz die bodennahe Schadstoffverteilung im Umfeld der Emissionsstelle realistisch ermittelt werden kann. Dieser Fragestellung wurde durch die Kombination von Windkanalexperimenten und begleitenden numerischen Ausbreitungsmodellierungen nachgegangen. Den Ausbreitungsrechnungen lagen gebräuchliche Modellansätze zugrunde (Euler-Modell mit vertikalem Diffusionskoeffizienten nach Mischungswegansatz; Partikelmodell LASAT Version 2.8; GRS-Version von LASAT mit Turbulenzparameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8). Damit wurden dreidimensionale Konzentrationsverteilungen für unterschiedliche Randbedingungen (ebenes Gelände; neutrale Schichtung; Punkt-, Linien- und Flächenquelle) berechnet und mit experimentellen Daten aus dem Windkanal verglichen. Die Abweichungen in den berechneten Konzentrationsverteilungen spiegeln die Bandbreite üblicher Turbulenzparametrisierungen wider. Aufgrund der Ergebnisse und aus Gründen einer einheitlichen Vorgehensweise bei der Ausbreitungsmodellierung empfiehlt die Mehrheit der am Projekt beteiligten Gruppen die Verwendung der Modellansätze nach der neuen TA-Luft.

## **Abstract**

Within the context of atmospheric dispersion modelling of Radon and airborne particles originating from near-surface area sources an appropriate turbulence parameterisation must be provided in order to determine realistically the near-surface airborne pollutant concentration in the vicinity of the emission. This question was investigated by means of wind tunnel experiments combined with numeric dispersion modelling. The calculations were based on commonly used approaches for atmospheric dispersion modelling, i.e. Eulerian model applying vertical diffusion according to mixing length theory; Lagrangian particle model LASAT, Version 2.8; GRS-version of LASAT together with turbulence parameterisation according to VDI 3783/8. For different boundary conditions (flat terrain; neutral stratification; point, line and area source) three-dimensional concentration distributions were computed and compared with corresponding wind tunnel data. The deviations in the concentration calculations reflect the range of common approaches of turbulence parameterisation. Based on the results of the numerical and wind tunnel data as well as for reasons of harmonising the atmospheric dispersion modelling the majority of the participants of the project recommends the application of the model approaches from the amended version of the German Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft, Technical Instruction on Air Quality Control).

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Turbulenzparameterisierung .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Ähnlichkeitsgesetze in laminaren und turbulenten Strömungen und Folgerungen für Windkanalexperimente .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Experimente im Windkanal und numerische Modellierungen für neutrale Schichtungsverhältnisse .....</b>	<b>19</b>
4.1	Bedingungen für den Modellvergleich .....	19
4.1.1	Festlegung des Rechengebietes .....	20
4.1.2	Meteorologische Gegebenheiten .....	22
4.1.3	Sonstige Ausbreitungsbedingungen .....	23
4.1.4	Zielgrößen der Modellierung und deren Darstellung .....	23
4.2	Experimente im Windkanal .....	23
4.3	Rechnungen von Brenk Systemplanung .....	23
4.4	Rechnungen des Ingenieurbüros Lohmeyer .....	24
4.5	Rechnungen der GRS .....	24
<b>5</b>	<b>Vergleich der Ergebnisse von Modellrechnungen und Windkanalexperimenten .....</b>	<b>25</b>
5.1	Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzparameter .....	25
5.2	Normierte Konzentrationen unter der Fahnenachse .....	30
5.3	Bodennahe querwindintegrierte Konzentrationen .....	33
5.4	Lateralschnitte der Konzentration in Bodennähe .....	35
5.5	Höhenprofile der querwindintegrierten Konzentrationen .....	37
5.6	Kreuzvergleich Ausbreitungsmodell/Turbulenzparameterisierung .....	39
5.7	Bewertung .....	41
<b>6</b>	<b>Rechnungen mit realer meteorologischer Statistik .....</b>	<b>45</b>
6.1	Meteorologische Verhältnisse .....	45
6.2	Anpassung der meteorologischen Statistik an den Standort Crossen .....	48
6.3	Statistik GERA-Leumnitz mit Punktquelle .....	49
6.4	Statistik GERA-Leumnitz mit realer Flächenquelle .....	52
6.5	Bewertung .....	56

7	Ergebnisse und Zusammenfassung .....	59
8	Literatur .....	65

**Anhang A Erzeugung qualitativ abgesicherter Validierungsdatensätze für die Ausbreitung von Luftschadstoffen aus Bodenquellen in einer horizontal homogenen, neutral geschichteten Grenzschicht**

**Anhang B Untersuchungen zur Festlegung von Parametern für die Modellierung der Radonausbreitung aus bodennahen Flächenquellen (K-Modell)**

**Anhang C Untersuchungen zur Festlegung von Parametern für die Modellierung der Radonausbreitung aus bodennahen Flächenquellen (Modellierung mit LASAT 2.8)**

**Anhang D Untersuchungen zur Festlegung von Parametern für die Modellierung der Radonausbreitung aus bodennahen Flächenquellen (Ausbreitungsrechnungen mit der GRS-Version von LASAT)**

# 1 Einleitung

Für die zuverlässige Berechnung des Transportes und der Ablagerung der aus bergbaulichen Hinterlassenschaften freigesetzten luftgetragenen Radionuklide ist neben der Spezifikation des Quellterms die Kenntnis des atmosphärischen Strömungs- und Turbulenzfeldes in der näheren und weiteren Umgebung notwendig. Bei einer Kopplung von Strömungs- und Ausbreitungsmodellen – z. B. zur realitätsnahen Berechnung der Ausbreitungssituation auf und im Umfeld von bergbaulichen Altlasten – müssen somit in der Regel neben dem advektiven Windfeld die für die atmosphärische Ausbreitung erforderlichen Turbulenzparameter bereitgestellt werden.

Die Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen hängen stark von den verwendeten Ansätzen zur Beschreibung der Turbulenzverhältnisse in der bodennahen Atmosphäre ab. Die Bestimmung der Turbulenzparameter erfolgt bei vielen Modellketten durch Ähnlichkeitstheoretische Ansätze in einem ein-dimensionalen Grenzschichtmodell (Turbulenzpräprozessoren). Je nach verwendetem Typ von Ausbreitungsmodell (Partikelmodell, Euler-Modell, Gauß-Modell) werden aus dem Grenzschichtmodell unterschiedliche Kenngrößen für die Turbulenz als Eingangsgrößen für das Modell abgeleitet (z. B. Standardabweichungen der Geschwindigkeitsfluktuationen, Lagrange'sche Zeitskalen, Diffusionskoeffizienten). In der Literatur liegen eine Vielzahl unterschiedlicher Parametrisierungsansätze für die modellspezifischen Kenngrößen vor, die bei identischen Randbedingungen für die Modellierung jeweils zu unterschiedlichen Schadstoffverteilungen im Umfeld des Quellortes führen. Insbesondere hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass die verschiedenen Verfahren zur Ableitung des Turbulenzzustandes der Atmosphäre auch zu Abweichungen bei der Berechnung der langzeitgemittelten bodennahen Radonkonzentration führen können. Es fehlen jedoch bisher qualitativ abgesicherte, reproduzierbare Datensätze (für bodennahe Quellen) im notwendigen Umfang anhand derer eine vergleichende Beurteilung der Güte der einzelnen Ansätze bzw. deren Validierung für bestimmte Turbulenzzustände in der Atmosphäre möglich ist.

Im Zusammenhang mit der Modellierung der Ausbreitung von Radon und Schwebstaub aus bodennahen Flächenquellen besteht somit Klärungsbedarf mit welcher Parametrisierung der atmosphärischen Turbulenz die realistischsten Schadstoffverteilungen im Umfeld der Emissionsstelle ermittelt werden können. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde dieser Fragestellung durch die Kombination von Windkanalexperimenten und numerischen Ausbreitungsmodellierungen nachgegangen.

Ziel des Vorhabens war es, die in der gutachterlichen Praxis bisher verwendeten Ansätze zu vergleichen und einen geeigneten Ansatz zur Beschreibung der Strömungs- und Turbulenzverhältnisse in der bodennahen Atmosphäre (Prandtl-Schicht) abzuleiten. Dazu wurden anhand von Rechnungen mit gebräuchlichen Modellansätzen (Euler/Gauß-Puffmodell von Brenk Systemplanung (BS); LASAT Version 2.8 des Ingenieurbüros Lohmeyer (IBL); GRS-Version von LASAT mit je nach Randbedingung wählbaren Ansätzen zur Turbulenzparameterisierung) dreidimensionale Konzentrationsverteilungen für unterschiedliche Randbedingungen berechnet und mit experimentellen Daten aus dem Windkanal verglichen.

Die Experimente und die Modellierungen wurden für ebenes Gelände bei neutralen Schichtungsverhältnissen der Atmosphäre für unterschiedliche Quellkonfigurationen und verschiedene Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Dabei wurde eine für die Gebiete mit bergbaulichen Hinterlassenschaften in den Bundesländern Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt typische Bodenrauigkeit von etwa 0,1 m festgelegt.

In einem weiteren Schritt wurde die Übertragbarkeit des für den neutralen Fall als leistungsfähigste Parameterisierung identifizierten Ansatzes auf eine reale Situation am Standort der Halde Crossen unter Berücksichtigung einer 3-parametrischen Wetterstatistik und konkreten Objektumrissen sowie örtlich variabler Quellstärken untersucht und eine Abschätzung der Unsicherheit bei der Ausbreitungsrechnung vorgenommen. Die Modellergebnisse wurden – unter Beachtung der geogenen Hintergrundkonzentrationen – mit Feldmesswerten verglichen.

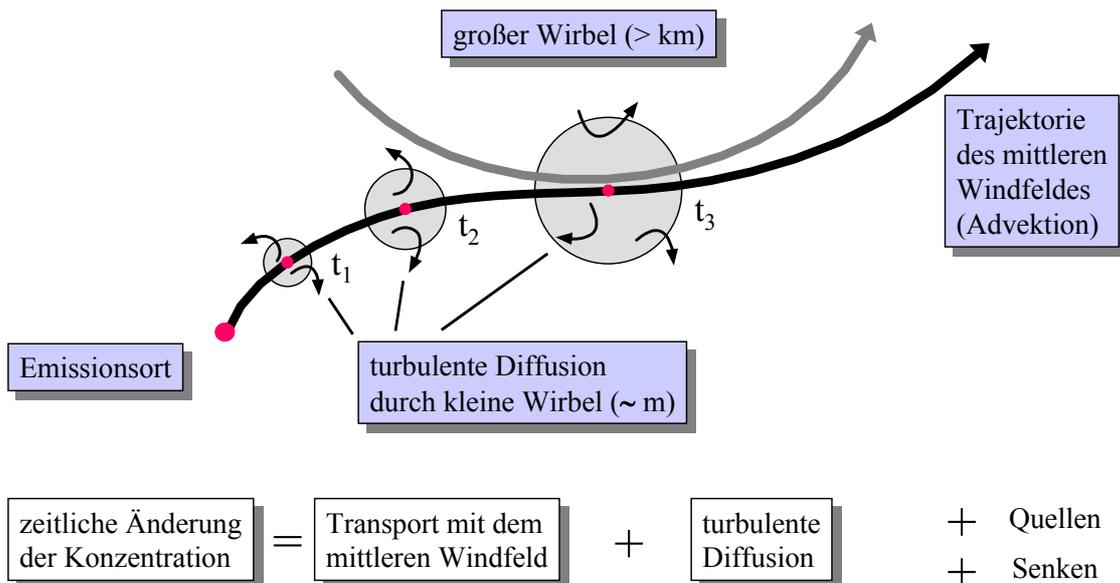
## 2 Grundlagen der Turbulenzparameterisierung

Grundlage zur Beschreibung des atmosphärischen Schadstofftransportes ist die Haushaltsgleichung für einen Luftschadstoff. Reynolds-Mittelung und der Gradientansatz zur Beschreibung des turbulenten Schadstoffflusses führen zur Advektions-Diffusionsgleichung:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - v \cdot \frac{\partial C}{\partial y} - w \cdot \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Q_C + S_C \quad (\text{Gl. 2-1})$$

mit:

$x, y, z$	Ortskoordinaten
$t$	Zeit
$C$	Schadstoffkonzentration am Ort $(x, y, z)$ zur Zeit $t$
$u, v, w$	Geschwindigkeitskomponenten am Ort $(x, y, z)$ zur Zeit $t$
$K_x, K_y, K_z$	Diffusionskoeffizienten am Ort $(x, y, z)$ zur Zeit $t$
$Q_C$	Schadstoffquellen am Ort $(x, y, z)$ zur Zeit $t$
$S_C$	Schadstoffsenken am Ort $(x, y, z)$ zur Zeit $t$



**Abb. 2.1** Schematische Darstellung der konzentrationsbestimmenden Prozesse bei der atmosphärischen Ausbreitung.

Mit Gl. 2-1 wird die atmosphärische Ausbreitung von Luftschadstoffen bestimmt durch

- die mittlere Windgeschwindigkeit, mit der eine Schadstoffwolke als ganzes transportiert wird,

- die atmosphärische Turbulenz, die für die Ausdehnung einer Schadstoffwolke infolge diffusiver Prozesse bei gleichzeitiger Verringerung der Konzentration verantwortlich ist, und
- die Randbedingungen.

Entsprechend müssen bei dem gekoppelten Einsatz von Strömungs- und Ausbreitungsmodellen neben dem advektiven Windfeld die für die atmosphärische Ausbreitung erforderlichen Turbulenzparameter bereitgestellt werden.

Im Falle des einfachen Gauß-Fahnenmodell (Gl 2-2) wird die turbulente Diffusion beschrieben durch die so genannten Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$ .

$$C(x) = \frac{Q_0}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot \bar{u}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (\text{Gl. 2-2})$$

$x, y, z$  Ortskoordinaten  
 $H$  Quellhöhe  
 $Q_0$  Freisetzungsrate für Schadstoff  
 $\bar{u}$  mittlere Geschwindigkeit in x-Richtung, meist in Emissionshöhe; es sind aber auch die folgenden Ansätze für  $\bar{u}$  üblich:

$$\bar{u} = \frac{\int_0^H u(z) \cdot C(x, z) dz}{\int_0^H C(x, z) dz}, \quad \bar{u} = \frac{\int_0^{2H} u(z) dz}{2H} \quad \text{oder} \quad \bar{u} = \frac{\int_0^H u(z) dz}{H}$$

$\sigma_y, \sigma_z$  horizontaler und vertikaler Ausbreitungsparameter;  
 charakteristische Breiten der Gauß-Fahne quer (horizontal und vertikal) zur Ausbreitungsrichtung mit  
 $\sigma_y = \sqrt{2 \cdot K_y \cdot t}$ ,  $\sigma_z = \sqrt{2 \cdot K_z \cdot t}$  und  $t = x/\bar{u}$   
 Es ist zu beachten, dass am Quellort  $x = 0$  die Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  Null werden und die Formel (Gl. 2-2) zur Berechnung der Schadstoffkonzentration undefiniert wird.

$\exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$  Spiegelterm, berücksichtigt Reflexion der Fahne am Erdboden

Die Erfahrung zeigt, dass Schadstoff-Fahnen mit zunehmender Quellentfernung breiter werden. Daraus ergibt sich, dass die Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  des Gauß-Fahnenmodells (Gl. 2-2) entweder mit der Zeit  $t$  oder mit der Entfernung  $x$  vom Quellort anwachsen. Eine gängige Darstellung stammt von Pasquill /PAS 71/:

$$\sigma_y = \sigma_v \cdot t \cdot S_y(t/T_L) \quad (\text{Gl. 2-3})$$

$$\sigma_z = \sigma_w \cdot t \cdot S_z(t/T_L) \quad (\text{Gl. 2-4})$$

$\sigma_v$  und  $\sigma_w$  sind die Standardabweichungen der lateralen und vertikalen Windgeschwindigkeitsfluktuationen

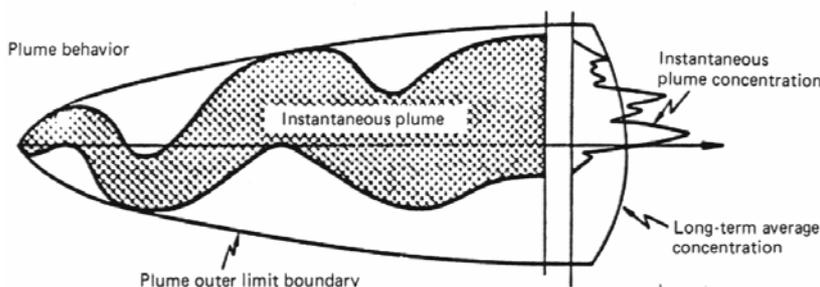
$S_y$  und  $S_z$  sind dimensionslose Funktionen der Reisezeit  $t$  und der Lagrange'schen Zeitskala  $T_L$ , einem Maß für die Korrelation turbulenter Bewegungen.

In der TA-Luft /TAL 86/ bzw. in /AVV 90/ ist z. B. folgender Potenzansatz für die Ausbreitungsparameter beschrieben:

$$\sigma_y(x) = p_y \cdot x^{q_y} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_z(x) = p_z \cdot x^{q_z} \quad (\text{Gl. 2-5})$$

Die Koeffizienten  $p_y, p_z$  und die Exponenten  $q_y, q_z$  hängen ab von

- der thermischen Stabilität der Schichtung: Bei labiler Schichtung resultieren breite Fahnen, bei stabiler Schichtung i. d. R. schmale Fahnen.
- der Emissionshöhe  $H$
- der Integrationszeit, d. h. ob Momentaufnahme oder zeitlicher Mittelwert der Konzentrationsverteilung berechnet werden soll: Bei langer Mittelungszeit resultieren breitere Fahnen, bei kurzer Mittelungszeit schmalere Fahnen (Siehe Abb. 2.2).
- den Eigenschaften des Standortes, z. B. Bodenrauigkeit  $z_0$ : Bei hoher Rauigkeit resultieren breite Fahnen, bei geringer Rauigkeit schmalere Fahnen.



**Abb. 2.2** Momentaufnahme einer Schadstofffahne in Aufsicht /MIK 84/.

Die in der TA-Luft /TAL 86/ niedergelegten Ausbreitungskoeffizienten und -exponenten wurden abgeleitet aus einer Vielzahl von an den Forschungszentren in Jülich und Karlsruhe durchgeführten Ausbreitungsexperimenten mit Freisetzungshöhen von 50 m und höher. Sie gelten für Integrationszeiten im Bereich von etwa 30 min und relativ große Bodenrauigkeit ( $z_0 \cong 1 \dots 1,5$  m). Alternativ stehen andere entfernungsabhängige  $\sigma$ -Parameterisierungen zur Verfügung (siehe z. B. /ZAN 90/): Beispielsweise wurde die

so genannte Pasquill-Gifford- $\sigma$ -Parameterisierung aus Ausbreitungsexperimenten mit bodennaher Freisetzung in flachem Gelände bei geringer Bodenrauigkeit ( $z_0 \cong 0,008\text{m}$ ) gewonnen. Die Pasquill-Gifford-Parameter wurden aus 3-minütigen Konzentrationsmittelwerten für Quellentfernungen bis zu 800 m abgeleitet.

Bei einer Anwendung von  $\sigma$ -Parametrisierungen, die aus Feldversuchen gewonnen wurden, ist zu überprüfen, ob die jeweiligen Randbedingungen, z. B. Emissionshöhe, Bodenrauigkeit und Mittelungszeitraum, im Hinblick auf den Anwendungsfall hinreichend adäquat sind. So liegen der  $\sigma$ -Parametrisierung nach TA-Luft Emissionshöhen über 50 m und große Bodenrauigkeiten zugrunde, die dem hier betrachteten Anwendungsfall bodennaher Radonemissionen in Gelände mit geringer Bodenrauigkeit nicht entsprechen. Hinsichtlich Emissionshöhe und Bodenrauigkeit sind die  $\sigma$ -Parameter nach Pasquill-Gifford besser geeignet. Wegen der kurzen Mittelungszeit bei den zu Grunde liegenden Experimenten ist die Anwendung der Pasquill-Gifford-Parameter für die Berechnung von Langzeitmittelwerten möglicherweise problematisch (Siehe Abschnitte 2.4.4 und 4.2.2 in Anhang B).

Eine explizite zeitabhängige Formulierung für  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$ . entsprechend dem allgemeinen Ansatz von Pasquill (siehe Gl. 2-3 und 2-4) ergibt sich mit dem Taylor-Theorem /PAS 83/ zu

$$\sigma_y^2 = 2 \cdot \sigma_v^2 \cdot T_{Lv} \cdot [t/T_{Lv} - 1 + \exp(-t/T_{Lv})] \quad (\text{Gl. 2-6})$$

$$\sigma_z^2 = 2 \cdot \sigma_w^2 \cdot T_{Lw} \cdot [t/T_{Lw} - 1 + \exp(-t/T_{Lw})] \quad (\text{Gl. 2-7})$$

mit

$t$  Reisezeit, kann mit mittlerer Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  umgerechnet werden in Abstand  $x$  von der Quelle mit:  $x = \bar{u} \cdot t$

$\sigma_v, \sigma_w$  Standardabweichungen der horizontalen und vertikalen turbulenten Windgeschwindigkeitskomponenten mit Parameterisierungen der Form

$$\sigma_v = \sigma_v(z, u_*, L, z_i) \quad \text{und} \quad \sigma_w = \sigma_w(z, u_*, L, z_i) \quad (\text{Gl. 2-8})$$

diese sind Funktionen der (charakteristischen) Grenzschichtparameter:

$u_*$  Schubspannungsgeschwindigkeit

$L$  Monin-Obukhov-Länge

$z_i$  Grenzschichthöhe

$T_{Lv}, T_{Lw}$  Lagrangesche Zeitskalen (horizontal und vertikal) mit Parameterisierungen der Form

$$T_{Lv} = T_{Lv}(z, u_*, L, z_i) \quad \text{und} \quad T_{Lw} = T_{Lw}(z, u_*, L, z_i) \quad (\text{Gl. 2-9}).$$

Hanna et al. /HAN 90/ schlagen anstelle der Gleichungen (Gl. 2-6,2-7) eine numerisch einfachere, aber qualitativ gleichwertige Darstellung vor:

$$\sigma_y = \sigma_v \cdot t / \sqrt{1 + 0.5 \cdot \frac{t}{T_{Lv}}} \quad \text{und} \quad \sigma_z = \sigma_w \cdot t / \sqrt{1 + 0.5 \cdot \frac{t}{T_{Lw}}} \quad (\text{Gl. 2-10})$$

Die Parameterisierungen für  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  (Gl. 2-8) sowie  $T_{Lv}$  und  $T_{Lw}$  (Gl. 2-9) sind "universell", d. h. sie hängen nur von der Höhe  $z$  und den Grenzschichtparametern  $u_*$ ,  $L$ ,  $z_i$  ab. Die Parameterisierungen wurden aus meteorologischen Feldexperimenten mit Methoden der Ähnlichkeitstheorie (Buckingham Pi-Theorem, z. B. /STU 88/) ermittelt und nicht – wie z. B. die  $\sigma$ -Parameter der TA-Luft – aus speziellen Tracer-Experimenten!

Beispiele für Parameterisierungen der Standardabweichungen der turbulenten Windgeschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  sowie der turbulenten Zeitskalen in den drei Raumrichtungen  $T_{Lu}$ ,  $T_{Lv}$  und  $T_{Lw}$  finden sich in der Literatur. Kerschgens et al. /KER 00/ haben gebräuchliche Ansätze zusammengestellt und miteinander verglichen. Die in der Fachliteratur angegebenen Parameterisierungen für  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  lassen sich in verallgemeinerter Form darstellen als

$$\sigma_{u,v,w} = \left[ (a_{u,v,w} \cdot u_*)^n + (b_{u,v,w} \cdot w_*)^n \right]^{1/n} \quad (\text{Gl. 2-11})$$

mit  $u_*$  Schubspannungsgeschwindigkeit

$$w_* = \text{konvektive Skalierungsgeschwindigkeit} \quad w_* = u_* \cdot \left( \frac{z_i}{-k \cdot L} \right)^{1/3} \neq 0$$

für  $L < 0$ , labil und  $w_* = 0$  sonst

$n$  Exponent i. a. gleich 2 oder 3 gesetzt

Es zeigt sich, dass die Koeffizienten  $a_{u,v,w}$ ,  $b_{u,v,w}$  (und die Exponenten  $n$ ) der verschiedenen Parameterisierungen in den Publikationen verhältnismäßig gering streuen /KER 00/.

In der Fachliteratur angegebene Parameterisierungen der turbulenten Zeitskalen in den drei Raumrichtungen  $T_{Lu}$ ,  $T_{Lv}$  und  $T_{Lw}$  lassen sich oft in der folgenden Form darstellen:

$$T_{Lu,v,w} = c_{u,v,w} \cdot \frac{z_i}{\sigma_{u,v,w}} \quad (\text{Gl. 2-12})$$

Allerdings streuen die aus verschiedenen Publikationen entnommenen Koeffizienten  $c_{u,v,w}$  stark und zeigen teilweise unplausibles bzw. uneinheitliches Verhalten beim Übergang von labiler zu stabiler Schichtung /KER 00/.

Vor diesem Hintergrund weitgehend unstrittig sind die Parameterisierungen für  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  in Abhängigkeit von der Höhe über Grund, der Schubspannungsgeschwindigkeit, der Monin-Obukhov-Länge und der Grenzschichthöhe. Uneinheitlich sind dagegen die entsprechenden Beschreibungen der turbulenten Zeitskalen  $T_{Lu}$ ,  $T_{Lv}$  und  $T_{Lw}$ . Allerdings zeigen die in LASAT /JAN 98a/ und in dem UK Atmospheric Dispersion Modelling System (UK-ADMS) /CAR 92, 93/ verwendeten Zeitskalen ebenso wie die Streuungen der Windgeschwindigkeitsfluktuationen ein sehr ähnliches Verhalten. Beide Modelle sind umfangreich validiert worden:

- LASAT wurde auf der Basis folgender Experimente validiert /JAN 98b/:
  - Ausbreitungsexperimente am Forschungszentrum Karlsruhe in den siebziger und achtziger Jahren (ebenes Gelände, inhomogene Landnutzung mit hoher Bodenrauigkeit  $z_0 \cong 1,5$  m, Freisetzungshöhe zwischen 60 und 195 m, Konzentrationsmessungen für verschiedene Freisetzungshöhen und Stabilitäten bis zu maximalen Quellentfernungen von 5000 m, Mittelungszeit 30 min)
  - Prairie-Grass-Experimente, 1956 (ebenes Gelände, geringe Bodenrauigkeit  $z_0 \cong 0,008$  m, Freisetzungshöhe ca. 0,5 m, Konzentrationsmessungen bis in 800 m Entfernung, Mittelungszeit 3 min)
  - Kopenhagen-Experiment (1978/1979) aus dem Model Validation Kit<sup>1</sup>, (ebenes Gelände, städtische Bebauung mit mittlerer Bodenrauigkeit  $z_0 \cong 0,6$  m, Freisetzungshöhe 115 m, Konzentrationsmessungen bis in 6000 m Entfernung)
- UK-ADMS wurde u. a. auf der Basis der Datensätze des Model Validation Kits validiert.

Die in LASAT und UK-ADMS verwendeten Parameterisierungen der turbulenten Zeitskalen stimmen sehr gut überein mit der als Funktion der Dissipationsrate  $\varepsilon$  für die turbulente kinetische Energie formulierten Darstellung von  $T_{Lu,v,w}$  /KER 00/ und /VDI 01/:

---

<sup>1</sup> Das Model Validation Kit enthält mehrere Datensätze atmosphärischer Tracer-Experimente (Kincaid/USA, Kopenhagen,DK, Lillestroem/N, Indianapolis/USA) zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Ausbreitungsmodellen. Zusätzlich steht Software zur Auswertung der Modellergebnisse zur Verfügung.

Siehe /OLE 98a,b/ und [www.dmu.dk/atmosphericenvironment/harmoni/M\\_V\\_KIT.htm](http://www.dmu.dk/atmosphericenvironment/harmoni/M_V_KIT.htm).

$$T_{Lu,v,w} = \frac{2 \cdot \sigma_{u,v,w}^2}{C_0 \cdot \varepsilon} \quad (\text{Gl. 2-13})$$

mit  $C_0$  Kolmogorov Konstante,  $C_0 = 5,7$   
 $\varepsilon$  Dissipationsrate für turbulente kinetische Energie.

Für neutral bis labil geschichtete Atmosphären mit  $L < 0$  m wird die Dissipationsrate der turbulenten kinetischen Energie als Funktion der Höhe über Grund und der Stabilität wie folgt berechnet:

$$\varepsilon = \max \left[ \frac{u_*^3}{k \cdot z} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{z}{z_i} \right)^2 + 2.5 \cdot k \cdot \frac{z}{z_i} \right] + \frac{w_*^3}{z_i} \cdot \left[ 1.5 - 1.3 \left( \frac{z}{z_i} \right)^{\frac{1}{3}} \right], \frac{u_*^3}{kz} \right] \quad (\text{2-14})$$

Für stabile Schichtung der Atmosphäre ( $L > 0$  m) ist folgender Ansatz zu verwenden:

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{k \cdot z} \cdot \phi_\varepsilon \quad (\text{2-15a})$$

mit  $\phi_\varepsilon = \phi_m - \frac{z}{L} \quad (\text{2-15b})$

und  $\phi_m = 1 + 5 \cdot \frac{z}{L} \quad (\text{2-15c})$

Für die Streuungen der Windgeschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$  gibt /VDI 01/ folgende Gleichungen an, die weitgehend auf einer Empfehlung von Kerschgens et al. /KER 00/ beruhen und qualitativ das gleiche Verhalten wie die in LASAT und UK-ADMS verwendeten Parameterisierungen aufweisen:

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \left[ (2.4u_*)^3 + (0.59w_*)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right) \\ \sigma_v &= \left[ (1.8u_*)^3 + (0.59w_*)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right) \\ \sigma_w &= \left( \left( 1.3u_* \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right) \right)^3 + \left( 1.3 \left( \frac{z}{z_i} \right)^{\frac{1}{3}} \left( 1 - 0.8 \frac{z}{z_i} \right) w_* \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (\text{2-16})$$

Die universellen, aus meteorologischen Feldexperimenten mit Methoden der Ähnlichkeitstheorie abgeleiteten Parameterisierungen von  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$ ,  $T_{Lu}$ ,  $T_{Lv}$  und  $T_{Lw}$  haben gegenüber den aus Tracer-Experimenten abgeleiteten Turbulenzparameterisierungen

den Vorteil, dass sie keine für das Ausbreitungsexperiment spezifischen Abhängigkeiten aufweisen. Mit diesen Parameterisierungen können mit Hilfe der Gleichungen (Gl. 2-10) auch die für Gauß-artige Ausbreitungsmodelle erforderlichen Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  berechnet werden. Für die bei Gauß-Puff-Modellen (siehe Gleichung (Gl. 2-1)) zusätzlich erforderliche Standardabweichung  $\sigma_x$  wird meist  $\sigma_x = \sigma_y$  gesetzt.

Lagrange Partikelmodelle können direkt die Streuungen  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  sowie die Zeitskalen  $T_{Lu}$ ,  $T_{Lv}$  und  $T_{Lw}$  verwenden (LASAT /JAN 98a/, LASAT(GRS-Version) /MAS 93/ und AIRPOL/L /JUN 99/).

Eine für die Beschreibung der turbulenten Diffusion durch Streuungen  $\sigma_{u,v,w}$  und turbulente Zeitskalen  $T_{Lu,v,w}$  äquivalente Darstellung stellen turbulente Diffusionskoeffizienten bzw. Austauschkoeffizienten  $K_{mx,y,z}$  dar. Sie können aus den Streuungen und den Zeitskalen nach  $K_{mx,y,z} = \sigma_{u,v,w}^2 \cdot T_{Lu,v,w}$  berechnet werden (Siehe z. B. /VDI 01/). Diese Diffusionskoeffizienten  $K_{mx,y,z}$  beschreiben den Austausch des Impulses, den turbulente Wirbel tragen, infolge turbulenter Diffusion. Es ist zu beachten, dass bei der Modellierung der Ausbreitung eines Luftschadstoffes mit einem Gittermodell anstelle des turbulenten Diffusionskoeffizienten für die vektorielle Größe „Impuls“ der turbulente Diffusionskoeffizient  $K_{hx,y,z}$  für eine skalare Größe, z. B. für die Wärme, die Feuchte oder einen Luftschadstoff, zu verwenden ist. In der Fachliteratur gibt es unterschiedliche Approximationen, mit denen der Diffusionskoeffizient für einen Skalar aus dem Diffusionskoeffizienten für Impuls bestimmt werden kann. Stull /STU 88/ gibt z. B. für neutrale Schichtung die folgende Formel an:

$$K_h = 1,35 \cdot K_m \quad (2-17)$$

Bei Roedel /ROE 94/ findet sich folgende stabilitätsabhängige Formel:

$$\frac{K_h(z/L)}{K_m(z/L)} = \frac{\phi_m(z/L)}{\phi_h(z/L)} \quad (2-18)$$

Dabei bedeuten  $\phi_m(z/L)$  und  $\phi_h(z/L)$  die dimensionslosen Dyer-Businger-Funktionen für Impuls und Wärme, die aus meteorologischen Feldexperimenten gewonnen wurden. In /VDI 01/ werden abhängig von der Schichtungsstabilität folgende Parameterisierungen angegeben:

- stabile Schichtung  $z/L > 0$ : 
$$\begin{aligned} \phi_m &= 1 + 5 \cdot z/L \\ \phi_h &= 0,74 + 5 \cdot z/L \end{aligned} \quad (2-19a)$$

- labile Schichtung  $z/L < 0$ : 
$$\begin{aligned} \phi_m &= (1 - 15 \cdot z/L)^{-1/4} \\ \phi_h &= 0,74 \cdot (1 - 9 \cdot z/L)^{-1/2} \end{aligned} \quad (2-19b)$$

Neutrale Schichtungsverhältnisse ergeben sich beim Übergang  $|L| \rightarrow \infty$ . Damit folgt aus (2-18) und (2-19) unmittelbar Gleichung (2-17). Mit zunehmender Stabilität,  $L \rightarrow 0$ , geht der Quotient  $K_h/K_m \rightarrow 1$ , d. h. die Diffusionskoeffizienten für Wärme und Impuls unterscheiden sich nicht. Bei zunehmend labiler Schichtung,  $-L \rightarrow 0$ , und großen Höhen,  $z$ , über Grund ist der Diffusionskoeffizient  $K_h$  deutlich größer als  $K_m$ . Beispielsweise ergibt sich für  $L = -10\text{m}$  und die Höhe  $z = 100\text{m}$  der Quotient zu  $K_h/K_m \cong 3,6$ .

Die in Foken /FOK 90/ untersuchten Publikationen zu den Diffusionskoeffizienten  $K_h$  und  $K_m$ . geben einen Hinweis darauf, dass der Quotient  $K_h/K_m$  mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Auf diese Unsicherheiten weisen auch Panofsky und Dutton /PAN 84/ hin. Aus diesem Grund werden im Folgenden approximativ beide Diffusionskoeffizienten gleich gesetzt:  $K_h = K_m$

Die bei Eulerschen Gittermodellen benötigten Diffusionskoeffizienten  $K_x$ ,  $K_y$  und  $K_z$  können somit mit Hilfe der Gleichung

$$K_{x,y,z} = \sigma_{u,v,w}^2 \cdot T_{Lu,v,w} \quad (\text{Gl. 2-20})$$

aus  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$ ,  $T_{Lu}$ ,  $T_{Lv}$  und  $T_{Lw}$  berechnet werden. Mit (2-13), (2-15) und (2-16) folgt bei neutraler Schichtung aus (2-10) für den vertikalen Diffusionskoeffizienten  $K_z$  (siehe auch Anhang B, Abschnitt 2.3.3):

$$K_z = k \cdot u_* \cdot z \cdot \exp(-4 \cdot z/z_i) \quad (\text{Gl. 2-21})$$

Alternativ wird bei Eulerschen Gittermodellen oftmals der Diffusionskoeffizient mit Ansätzen für die Mischungsweglänge ermittelt. Danach lässt sich der Diffusionskoeffizient darstellen als Produkt aus dem vertikalen Geschwindigkeitsgradienten:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{k \cdot z} \cdot \phi_m \left( \frac{z}{L} \right) \quad (\text{Gl. 2-22})$$

und dem Quadrat der Mischungsweglänge  $l$ :

$$K_z = l^2 \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \quad (\text{Gl. 2-23})$$

Für die Mischungsweglänge  $l$  ist bei neutraler Schichtung der Ansatz von Blackadar /BLA 62/ üblich mit

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{k \cdot z} + \frac{1}{l_\infty} \quad (\text{Gl. 2-24})$$

Dabei bedeuten  $k$  die von Karman-Konstante und  $l_\infty$  der maximal mögliche Mischungsweg, der nach Etling /ETL 86/ mit dem geostrophischen Wind  $u_G$  und dem Coriolis-Parameter  $f_c \cong 1,11 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  berechnet werden kann:

$$l_\infty = \frac{2,7 \cdot 10^{-4} \cdot u_G}{f_c} \quad (\text{Gl. 2-25})$$

Es besteht auch die Möglichkeit, den Mischungsweg stabilitätsabhängig zu betrachten, indem der reziproke Mischungsweg (Gl. 2-24) mit der Dyer-Businger Stabilitätsfunktion (2-19) multipliziert wird (siehe z. B. /ETL 86/):

$$\frac{1}{l} = \left( \frac{1}{k \cdot z} + \frac{1}{l_\infty} \right) \cdot \phi_m \left( \frac{z}{L} \right) \quad (\text{Gl. 2-26})$$

Die erfolgreiche Anwendung von (Gl. 2-26) ist für stabile Schichtung belegt /FIE 72/.

Mit (2-22), (2-23), (2-24), (2-25) und wegen  $u_G \propto u_*$  folgt bei neutraler Schichtung für den vertikalen Diffusionskoeffizienten  $K_z$ :

$$K_z = k \cdot u_* \cdot z \cdot \frac{l_\infty^2}{(l_\infty + k \cdot z)^2} \quad (\text{Gl. 2-27})$$

In Bodennähe ( $z \rightarrow 0$ ) gilt

$$K_z \cong k \cdot u_* \cdot z.$$

In größerer Höhe ( $z \gg l_\infty/k$ ) gilt wegen  $u_G \propto u_*$ :

$$K_z \cong \frac{u_*}{k \cdot z} \cdot l_\infty^2 = \frac{u_*}{k \cdot z} \cdot \left( \frac{2,7 \cdot 10^{-4} \cdot u_G}{f_c} \right)^2 \propto u_*^3.$$

Damit ist der vertikale Diffusionskoeffizient  $K_z$  nicht mehr streng proportional zu  $u_*$ , sondern es gilt

$$K_z \propto u_*^a \text{ mit } a = a(z) \geq 1. \quad (\text{Gl. 2-28})$$

### 3 Ähnlichkeitsgesetze in laminaren und turbulenten Strömungen und Folgerungen für Windkanalexperimente

In diesem Abschnitt werden einige Grundlagen zum Reynoldsschen Ähnlichkeitsgesetz (siehe z. B. /SCH 97/) bei hydrodynamischen Strömungen zusammenfassend dargestellt und Schlussfolgerungen für turbulente Strömungen sowie für Anwendungen im Windkanal gezogen.

Strömungs- und Ausbreitungsvorgänge in der Atmosphäre lassen sich durch die so genannten hydrodynamischen Grundgleichungen beschreiben, die in Haushaltsgleichungen und in Zustandsgleichungen (z. B. Gasgleichung) unterteilt werden können. Bei den Haushaltsgleichungen unterscheidet man zwischen der Kontinuitätsgleichung sowie den Haushaltsgleichungen für den massenspezifischen Impuls (Navier-Stokes- oder Bewegungsgleichungen), für die Energie (1. Hauptsatz) und für die Feuchte. Sollen zusätzlich Luftbeimengungen in der Atmosphäre behandelt werden, so ist dieses System von Haushaltsgleichungen um entsprechende Haushaltsgleichungen zu ergänzen.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Strömungs- und Ausbreitungseffekte in Bodennähe für Quellentfernungen bis 1000 m betrachtet werden, kann eine Beeinflussung durch die Coriolis-Kraft vernachlässigt und von einer inkompressiblen Strömung ausgegangen werden. Bei den hier zu betrachtenden neutralen Schichtungsverhältnissen (d. h. keine Auftriebskräfte) vereinfachen sich die Navier-Stokes-Gleichungen<sup>2</sup> auf

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial t} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j}, \text{ für } i = 1, 2, 3$$

- mit
- $x_i$  Ortskoordinate in m,
  - $t_i$  Zeit in s,
  - $U_i$  Windgeschwindigkeitskomponente in m/s,
  - $\rho_0$  Dichte von Luft in kg/m<sup>3</sup>, wegen Inkompressibilität ist  $\rho_0 = \text{konst.}$ ,
  - $p$  Druck in N/m<sup>2</sup>,
  - $\nu$  kinematische Viskosität von Luft in m<sup>2</sup>/s, bei 20°C gilt  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

---

<sup>2</sup> Darstellung von Summationen in den Gleichungen erfolgt entsprechend Einstein'scher Summenkonvention /STU 88/.

Die Kontinuitätsgleichung lautet

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0.$$

Die Haushaltsgleichung für einen Luftschadstoff lautet

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + U_j \frac{\partial \chi}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 \chi}{\partial x_j \partial x_j}$$

mit  $\chi$  Luftschadstoffkonzentration, hier in Bq/m<sup>3</sup>,  
 $\alpha$  molekularer Diffusionskoeffizient in m<sup>2</sup>/s

Im Folgenden werden die Grundgleichungen für den Feuchtehaushalt (trockene Atmosphäre) und der Wärmehaushalt (1. Hauptsatz) nicht weiter betrachtet.

Auf der Basis der o. g. Haushaltsgleichungen soll untersucht werden, welche Einflussgrößen in ihre Lösungen eingehen. Hierzu bezieht man die unabhängigen und abhängigen Variablen und Parameter auf geeignet gewählte Referenzgrößen und transformiert die Gleichungen so, dass die dimensionslosen Lösungsgrößen nur noch von dimensionslosen Ortskoordinaten und von weiteren dimensionslosen (Ähnlichkeits-) Kennzahlen abhängen. Zwei Strömungen an ähnlichen Geometrien heißen dann physikalisch ähnlich, wenn alle Ähnlichkeitskennzahlen übereinstimmen. In diesem Fall sind außer den Begrenzungen auch die Stromlinien und die Linien konstanten Drucks ähnlich. Die Kenntnis der für ein Strömungsproblem relevanten Kennzahlen ist von grundlegender Bedeutung für die Durchführung von Modellversuchen, z. B. in einem Windkanal. Oft wird von dem eigentlichen Objekt, für welches man den Strömungsvorgang zu kennen wünscht, ein geometrisch ähnliches, verkleinertes Modell hergestellt und dieses in einem Windkanal untersucht. Hierbei erhebt sich dann die Frage nach der physikalischen Ähnlichkeit von Strömungen, d. h. nach den Kennzahlen, und die damit verbundene Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse von Modellversuchen (im Weiteren mit dem Index *model* bezeichnet) auf die reale Größenskala (bezeichnet mit Index *prototyp*) /SCH 97/.

Ausgehend von den o. g. Haushaltsgleichungen werden folgende Referenzgrößen gewählt:

- $L_r$  charakteristische Länge, z. B. Rauigkeitslänge  $z_0$ ,
- $U_r$  charakteristische (Referenz-)Geschwindigkeit,  
z. B. Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$ ,
- $\chi_r$  charakteristische Luftschadstoffkonzentration.

Folgende dimensionslose (bzw. skalierte) Größen werden eingeführt:

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i / L_r, & t' &= t \cdot U_r / L_r, \\ U'_i &= U_i / U_r, & p' &= p / (\rho_0 \cdot U_r^2), & \chi' &= \chi / \chi_r. \end{aligned}$$

Damit ergeben sich folgende dimensionslose Haushaltsgleichungen:

Kontinuitätsgleichung:  $\frac{\partial U'_i}{\partial x'_i} = 0$

Navier-Stokes-Gl.:  $\frac{\partial U'_i}{\partial t'} + U'_j \frac{\partial U'_i}{\partial x'_j} = -\frac{\partial p'}{\partial t'} + \frac{1}{Re} \cdot \frac{\partial^2 U'_i}{\partial x'_j \partial x'_j}$

mit der Reynolds-Zahl:  $Re = \frac{L_r \cdot U_r}{\nu}$

Schadstoffhaushalt:  $\frac{\partial \chi'}{\partial t'} + U'_j \frac{\partial \chi'}{\partial x'_j} = \frac{1}{Re \cdot Sc} \cdot \frac{\partial^2 \chi'}{\partial x'_j \partial x'_j}$

mit der Schmidt-Zahl:  $Sc = \frac{\nu}{\alpha}$

Für die hier interessierenden Gase ist  $Sc$  in der Größenordnung von 1.

Für die eingangs genannten Bedingungen bedeuten diese Formulierungen der Haushaltsgleichungen, dass unter der Annahme gleicher Anfangs- und Randbedingungen Strömungen dann physikalisch ähnlich sind, wenn die beiden Ähnlichkeitskennzahlen  $Re$  und  $Sc$  in der realen Größenskala (Prototyp) und im Windkanal (Model) jeweils einander gleich sind.

Für die Schmidt-Zahl in der Natur und im Windkanal gilt  $Sc_{prototyp} = Sc_{model}$ . Unter der Annahme gleicher Anfangs- und Randbedingungen resultieren damit bei gleichen Reynoldszahlen  $Re_{prototyp} = Re_{model}$  identische Geschwindigkeitsfelder  $\vec{U}'(\vec{x}', t')$  und Konzentrationsfelder  $\chi'(\vec{x}', t')$ . Dieses sowohl für laminare als auch für turbulente Strömungen geltende Resultat wird als Reynolds-Zahl-Ähnlichkeit bezeichnet.

Für vollturbulente Strömungen mit sehr großen Reynolds-Zahlen können in den dimensionslos gemachten Haushaltsgleichungen für Impuls (Navier-Stokes-Gleichung) und Luftschadstoff gegenüber den anderen Termen jeweils die Terme vernachlässigt werden, in denen die reziproke Reynolds-Zahl als Faktor steht. Das bedeutet, dass bei gleichen Anfangs- und Randbedingungen vollturbulente Strömungs- und Transportvorgänge unabhängig von der Reynolds-Zahl sind (/TOW 56/, /SNY 81/). Auf diesem Prinzip der von der Reynolds-Zahl unabhängigen Ähnlichkeit vollturbulenter Strömungs-

und Transportvorgänge beruht die Übertragbarkeit der im Windkanal gewonnenen Ergebnisse auf die reale Größenskala. Dieses Prinzip und seine Schlussfolgerungen für die Konzeption von Windkanalexperimenten werden in Anhang A, Abschnitt 3.2 näher erläutert. Im Folgenden werden einige wesentliche Gedanken hierzu zusammenfassend wiedergegeben.

Nach Townsend sind für von thermischer Schichtung und Coriolis-Effekten unbeeinflusste Strömungs- und Transportvorgänge in der bodennahen Atmosphäre, bei gleichen (d. h. durch Skalierung mit einer Referenzlänge  $L_r$  und einer Referenzgeschwindigkeit  $U_r$  dimensionslos gemachte) Anfangs- und Randbedingungen für alle "ausreichend hohen" Reynolds-Zahlen die Strukturen der turbulenten Strömung ähnlich. Bei ausreichend hoher Reynolds-Zahl, d. h. bei einer voll entwickelten und turbulenten "vollrauen" Grenzschichtströmung, sind die dimensionslosen Terme der Erhaltungsgleichungen für Impuls und Masse nur von Zeit- und Längenmaßstäben und nicht von der Reynoldszahl abhängig. Ausnahmen bilden Prozesse, die im kleinsten Skalenbereich der Turbulenz ablaufen und die Dissipation von turbulenter Energie bzw. die Reibung in der viskosen Unterschicht über einer festen Wand bestimmen.

Charakteristisch für eine vollraue Grenzschichtströmung ist, dass das mittlere Windprofil und die Turbulenzeigenschaften der Grenzschicht unabhängig von der Reynoldszahl sind. Aus diesem Grund können zum Beispiel die bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten über einer bestimmten Bodenrauigkeit gemessenen Wind- und Turbulenzprofile durch Skalierung mit einer Referenzgeschwindigkeit (z. B. Wandschubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$ ) und Referenzlänge (z. B. Rauigkeitslänge  $z_0$ ) sowohl in der Natur, als auch im Windkanalversuch zur Deckung gebracht werden. Nur unter diesen Voraussetzungen sind  $u_*$  und  $z_0$  für eine gegebene Grenzschicht universelle, nicht von der Überstreichungslänge (und damit vom Ort) abhängige Größen. Und nur unter diesen Voraussetzungen gelten auch alle anderen für die atmosphärische Prandtl-Schicht typischen Zusammenhänge, wie zum Beispiel die Konstanz des Impulsflusses mit der Höhe oder das logarithmische Geschwindigkeitsgesetz.

Folglich führt im turbulent rauen Strömungsregime eine Verdoppelung der Windgeschwindigkeit (entspricht Verdoppelung der Reynolds-Zahl) zu einer Verdoppelung von  $u_*$  und damit aller turbulenten Geschwindigkeitsmaße. Die Längenmaße der Turbulenz ändern sich nicht, sie hängen in der Prandtl-Schicht nur von der Höhe über dem Erdboden, nicht aber von der Strömungsgeschwindigkeit ab. Genau dies erklärt den Erfolg des Prandtl'schen Mischungswegansatzes in Gleichgewichtsgrenzschichten.

Diffusionskoeffizienten wiederum sind Produkte aus Geschwindigkeiten und Längen. Da an einem festen Ort in der Prandtl-Schicht die turbulenten Längenmaße fixiert sind, sind die Diffusionskoeffizienten direkt proportional zur Geschwindigkeit. Somit muss bei Schadstoffeinführungen in die Prandtl-Schicht die Verdoppelung der Strömungs- bzw. Windgeschwindigkeit genau eine Halbierung der örtlichen Konzentration zur Folge haben. Genau das wird in Windkanalversuchen, die unter streng kontrollierten Randbedingungen durchgeführt werden können, auch festgestellt. Die Prüfung, ob Messkonzentrationen mit  $u^{-1}$  abnehmen, dient damit als Test dafür, ob in den Modellversuchen Reynoldszahl-Unabhängigkeit erreicht worden ist.

Für die in dem Forschungsvorhaben durchgeführten physikalischen Modellversuche ebenso wie für die numerische Modellierung wurde neutrale Schichtung der Atmosphäre angenommen. Solche Bedingungen sind in der Realität nur bei Wind anzutreffen. Es stellt sich die Frage, welche Windgeschwindigkeit mindestens vorhanden sein muss, damit eine "ausreichend hohe" Reynolds-Zahl mit einer entsprechend vollrauen Grenzschichtströmung vorliegt. Eine feste Wand – hier der Erdboden – wird als aerodynamisch rau bezeichnet, wenn die Oberflächenrauigkeit größer als die sich ausbildende viskose Unterschicht einer turbulenten Grenzschicht ist. Nach Sutton /SUT 49/ bildet sich eine vollraue Grenzschichtströmung dann aus, wenn für die so genannte Rauigkeits-Reynoldszahl gilt

$$Re = \frac{u_* \cdot z_0}{\nu} \geq 2,5$$

Für eine typische Grenzschicht über Gras- und Ackerland ergeben sich beispielsweise mit  $u_* = 0,2$  m/s und  $z_0 = 0,1$  m und  $\nu_{\text{Luft},20^\circ\text{C}} = 1,5 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s Rauigkeits-Reynoldszahlen größer 1300. Es kann damit als sicher gelten, dass sich neutral geschichtete Grenzschichtströmungen in der Natur stets im turbulent-rauen Bereich befinden. Im Windkanalversuch wird die Ausbildung einer vollrauen Grenzschichtströmung üblicherweise experimentell nachgewiesen, indem Strömungs- oder Ausbreitungsmessungen für einen weiten Bereich von Windgeschwindigkeiten wiederholt und die Ergebnisse mit einer charakteristischen Länge und einer Referenzwindgeschwindigkeit normiert werden. Liegt eine vollraue Grenzschichtströmung vor, so zeigen die normierten Modellergebnisse die erwartete Unabhängigkeit von der Windgeschwindigkeit bzw. der Reynoldszahl der Anströmung.

Auf der Grundlage dieser Ausführungen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

Dem Windkanalversuch bzw. allgemein einem physikalischen Modell liegen Ähnlichkeitsbetrachtungen zu Grunde, die die Abbildung eines physikalischen Phänomens auf der Grundlage der hydrodynamischen Grundgleichungen für vereinfachte oder physikalisch ähnliche Randbedingungen ermöglichen. Die Strömung in der Messtrecke eines Windkanals ist grundsätzlich eine "physikalisch richtige Lösung" der Haushaltsgleichungen für Impuls, Masse und Energie. Ob ein Versuch in einem Grenzschichtwindkanal die realen Verhältnisse richtig bzw. ausreichend genau abbildet, ist eine Frage der korrekten Einstellung und der hinreichend vollständigen Dokumentation der Versuchsrandbedingungen eines Windkanalexperiments. Jede Grenzschichtströmung in einem Windkanal, sowohl die sich über einer rauhen Platte auf "natürliche Weise" ausbildende, als auch die durch Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten künstlich verdickte Grenzschichtströmung repräsentiert eine Lösung der o. g. Haushaltsgleichungen für Impuls, Masse und Energie.

Für den Fall, dass alle Randbedingungen im Windkanalversuch, d. h. Temperaturverteilung, Geometrie des Kanals, Bodenrauigkeit, Druckverteilung und mittlere Windprofile gleich bleiben, müssen alle Ergebnisse mit der mittleren Windgeschwindigkeit skalieren, da oberhalb einer kritischen Reynolds-Zahl keine nichtlineare Abhängigkeit der mittleren und Turbulenzparameter der Grenzschicht von der mittleren Windgeschwindigkeit existiert (d. h. die mit  $U_r$  normierten Navier-Stokes-Gleichungen enthalten keinen Term mit einer  $U_r^a$ -Abhängigkeit mit  $a \neq 1$ ). In der Natur wird selbst bei geringen Windgeschwindigkeiten die kritische Reynoldszahl zum Erreichen einer vollturbulenten Grenzschichtströmung erreicht. Im Windkanal ist die Reynoldszahl infolge des Modellmaßstabes deutlich geringer. Ob trotzdem das zu den Verhältnissen in der Natur ähnliche, vollturbulente Strömungsregime erreicht worden ist, muss im Windkanal gerade aus diesem Grund durch entsprechende Messungen bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten nachgewiesen werden (siehe Anhang A). Im vollturbulenten Bereich (bei den im Projekt durchgeführten Windkanalexperimenten für Windgeschwindigkeiten ab etwa 2..3 m/s) wird die erwartete  $1/u$ -Abhängigkeit der Strömungs- und Konzentrationswerte gemessen, da sich die dimensionslosen Randbedingungen nicht ändern.

## **4 Experimente im Windkanal und numerische Modellierungen für neutrale Schichtungsverhältnisse**

Für verschiedene Quellkonfigurationen (Punktquelle, Linienquelle, Flächenquelle) und verschiedene Windgeschwindigkeiten wurden im Rahmen des Vorhabens Experimente im Windkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg – Abt. Technische Meteorologie - bei horizontal homogener Topografie durchgeführt (siehe Anhang A).

Die im Windkanal eingestellten Situationen wurden mit verschiedenen Ausbreitungsmodellen und unterschiedlichen Turbulenzparameterisierungen nachgerechnet, die in der Vergangenheit an mehreren Standorten bergbaulicher Hinterlassenschaften in Sachsen und Thüringen eingesetzt worden sind. Angewendet wurden

- Ein Euler-Modell von Brenk Systemplanung (BS) Die Modellierung der atmosphärischen Turbulenz erfolgt über die Mischungsweglänge (siehe Anhang B).
- Das Lagrange-Partikelmodell LASAT (Version 2.8) in Verbindung mit dem Grenzschichtmodell 2.1 durch das Ingenieurbüro Lohmeyer (IBL); (siehe Anhang C).
- Die GRS-Version von LASAT mit verschiedenen (anderen) Turbulenzparameterisierungen; z. B. nach dem VDI-Entwurf, VDI 3783, Bl. 8 (siehe Anhang D).

Die detaillierten Modellbeschreibungen und Hinweise zum Stand der Validierung der einzelnen Modelle sind den jeweiligen Anhängen zu entnehmen.

### **4.1 Bedingungen für den Modellvergleich**

Im Vorfeld der Rechnungen aber auch der Modellierungen im Windkanal wurden zur besseren Vergleichbarkeit die Bedingungen genau festgelegt. Diese Festlegungen betreffen das Rechengebiet für den ebenen Fall (horizontale und vertikale Struktur, Lage und Stärke der Quellen, Bodenrauigkeit), die meteorologischen Gegebenheiten (Schichtung, Winddrehung), sonstige Ausbreitungsbedingungen (radioaktiver Zerfall, Deposition, Quellen) sowie die Zielgrößen der Modellierung und deren Darstellung.

#### 4.1.1 Festlegung des Rechengebietes

Für alle drei Quellformen (Punkt-, Linien- und Flächenquelle) wurde das gleiche Rechengitter verwendet. Dies erleichterte eine einheitliche Auswertung der Modellergebnisse.

##### **Horizontalstruktur**

Aufgrund einer für reale Objekte typischerweise relevanten Nachlaufänge von ca. 800 m, einer Quellerstreckung von max. 100 m und einem erforderlichen Vorlauf von ca. 100 m sollte die Länge des Rechengebietes etwa 1000 m betragen. Die Breite des Rechengebietes sollte so gewählt werden, dass Randeffekte auch in etwa 1000 m Entfernung vernachlässigbar sind. Das Sechsfache der max. Quellbreite von 50 m - also etwa 300 m - erfüllte diese Bedingung. Für die räumliche Auflösung wurde eine Gitterzellengröße von 10 m x 10 m gewählt. Daraus ergab sich die horizontale Struktur des Rechengebietes:

- Länge 1000 m, Breite 310 m
- $\Delta x = \Delta y = 10$  m
- 31 x 100 Gitterzellen (Die Erhöhung der Zellenzahl in lateraler Richtung um eins liefert eine bessere Zentrierbarkeit der Quellen und eine eindeutige Festlegung der Fahnenachse)

##### **Vertikalstruktur**

Die Modellrechnungen sowie die Experimente im Windkanal erfolgten für neutrale atmosphärische Bedingungen. Die VDI-Richtlinie 3783, Blatt 8 gibt dafür eine Grenzschichthöhe von 800 m an, die den Modelloberrand definiert. In Bodennähe sollte die vertikale Auflösung hoch sein und das Zentrum der untersten Gitterbox in 1,50 m (Atemhöhe) liegen. Aufgrund der geringen Entfernungen und der bodennahen Freisetzung wurden 46 vertikale Schichten bei der Modellierung mit einer vertikalen Spreizung mit feinerer Auflösung in Bodennähe vorgegeben. Bei Verwendung einer geometrischen Reihe (Verdichtung in den unteren Schichten) ergab sich die folgende Vertikaleinteilung:

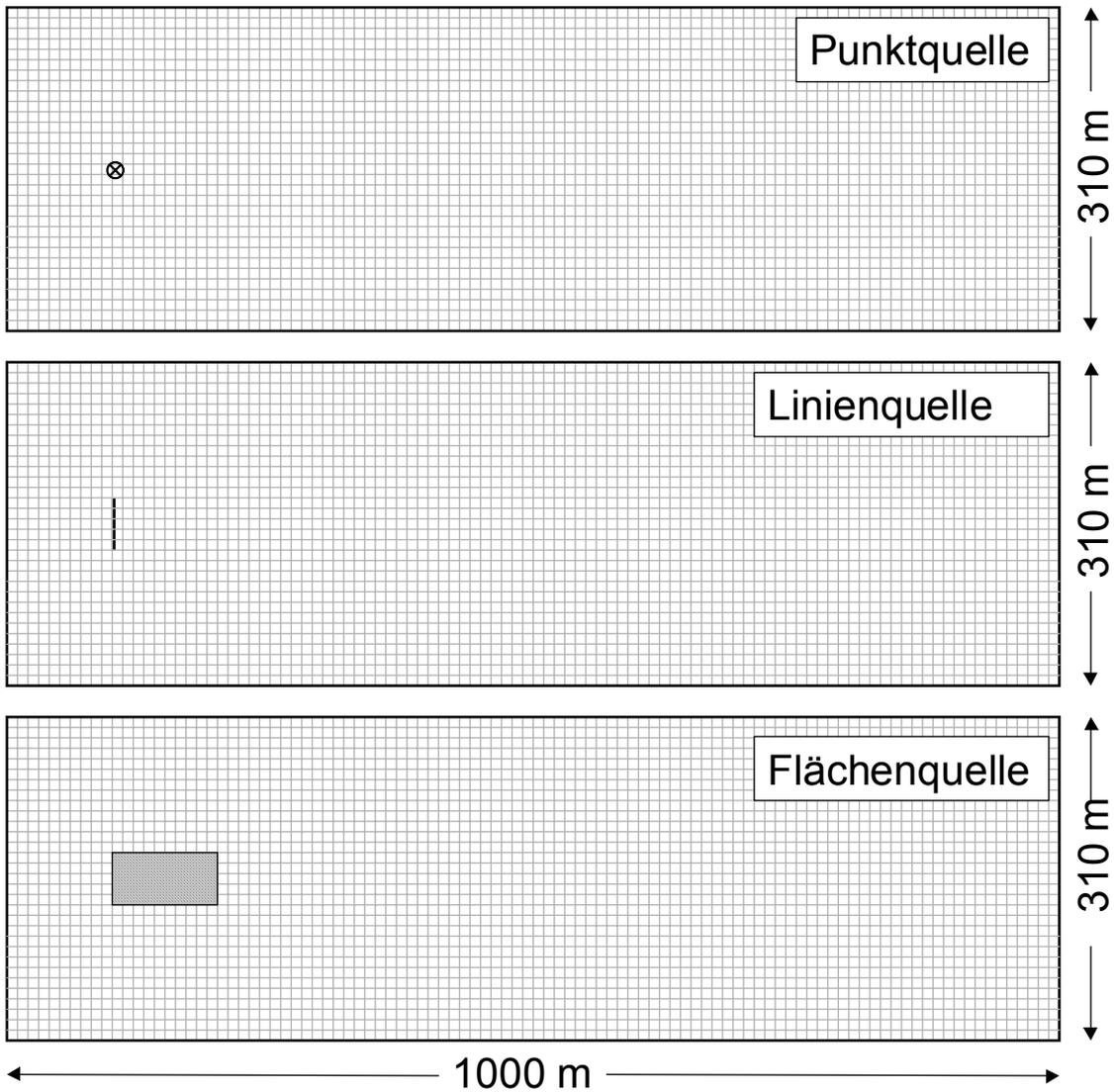
**Tab. 4.1** Vertikaleinteilung des Rechengebietes

Level	Unter- kante (m)	Ober- kante (m)	Level	Unter- kante (m)	Ober- kante (m)	Level	Unter- kante (m)	Ober- kante (m)
1	0,0	0,75	17	30,0	32,0	33	84,0	88,0
2	0,75	2,0	18	32,0	34,0	34	88,0	92,0
3	2,0	4,0	19	34,0	36,0	35	92,0	96,0
4	4,0	6,0	20	36,0	38,0	36	96,0	100,0
5	6,0	8,0	21	38,0	40,0	37	100,0	108,0
6	8,0	10,0	22	40,0	44,0	38	108,0	116,0
7	10,0	12,0	23	44,0	48,0	39	116,0	132,0
8	12,0	14,0	24	48,0	52,0	40	132,0	164,0
9	14,0	16,0	25	52,0	56,0	41	164,0	228,0
10	16,0	18,0	26	56,0	60,0	42	228,0	342,0
11	18,0	20,0	27	60,0	64,0	43	342,0	456,0
12	20,0	22,0	28	64,0	68,0	44	456,0	570,0
13	22,0	24,0	29	68,0	72,0	45	570,0	685,0
14	24,0	26,0	30	72,0	76,0	46	685,0	800,0
15	26,0	28,0	31	76,0	80,0			
16	28,0	30,0	32	80,0	84,0			

Die Rechnungen sollten im horizontal homogenen Gelände ohne Berücksichtigung einer Verdrängungshöhe erfolgen. Die Modellrechnungen wurden für die im Winkanal eingestellten neutralen Grenzschichtbedingungen durchgeführt. Dies betraf unter anderem die Rauigkeitslänge (Wert etwa 0,1 m).

### **Quellen**

Es wurden die drei Quellformen Punkt, Linien und Flächenquelle gerechnet. Zur konsequenten Nachrechnung der Windkanalexperimente wurde bei den Partikel-Modellen die Punktquelle als Kreis mit einem Durchmesser von 2,5 m angenommen. Beim K-Modell wurde die Punktquelle einer Gitterzelle mit 10 m x 10 m = 100 m<sup>2</sup> zugeordnet. Ebenso wurde bei der quer zur Anströmrichtung orientierten Linienquelle neben der Länge von 50 m eine Breite von 2,5 m festgelegt. Aus Abb. 4.1 ist neben dem Rechengebiet auch die genaue Lage der Quellen ersichtlich.



**Abb. 4.1** Rechengebiete und Lage der Quellen.

#### 4.1.2 Meteorologische Gegebenheiten

Die neutrale atmosphärische Schichtung sollte - je nach Modelltyp - durch die Setzung einer der folgenden Parameter realisiert werden:

- Monin-Obukhov-Länge betragsmäßig größer als 1000 m,
- Diffusionskategorie D (Pasquill-Gifford) oder
- Ausbreitungsklasse III<sub>1</sub> (Klug-Manier)

Zur besseren Abbildung der Verhältnisse im Windkanal und einer möglichst einfachen Darstellung der meteorologischen Gegebenheiten sollte eine Winddrehung mit der Höhe (Ekman Spirale) nicht vorgenommen werden. Niederschlag sollte ebenfalls nicht berücksichtigt werden. Das Windfeld wurde durch die Vorgabe der Windgeschwindigkeit (1, 2, und 5 m/s) in einer Referenzhöhe (z. B. 10 m ü. G.) bestimmt.

#### **4.1.3 Sonstige Ausbreitungsbedingungen**

Bei den Nachrechnungen der im Windkanal mit einem inerten Tracergas durchgeführten Ausbreitungsexperimente brauchte weder trockene noch nasse Deposition und kein radioaktiver Zerfall berücksichtigt werden. Ebenso wurde keine thermische oder mechanische Überhöhung der Fahne unterstellt. Da zeitlich konstante Emissionsraten aus den jeweiligen Quellen angenommen und zudem stationäre meteorologische Bedingungen vorgegeben wurden, bildete das Abbruchkriterium für die Modellrechnungen die Stationarität der resultierenden Tracergasfahne. Die Quellstärken wurden für alle Quellarten mit einem einheitlichen Radonfluss von 10.000 Bq/s vorgegeben.

#### **4.1.4 Zielgrößen der Modellierung und deren Darstellung**

Als Ergebnis einer jeden Modellrechnung sollte die Konzentration (in Bq/m<sup>3</sup>) in jeder der 100 x 31 x 46 = 142.600 Gitterzellen vorliegen. Daraus konnten dann z. B. die horizontale Verteilung in der bodennahen Schicht, der Konzentrationsverlauf unter der Fahnenachse und die querwindintegrierte Konzentration ( $C_{qwi}$ ) als Funktion des Abstandes von der Quelle berechnet und in entsprechenden Grafiken dargestellt werden.

#### **4.2 Experimente im Windkanal**

Die Experimente im Windkanal wurden durch das Meteorologische Institut der Universität Hamburg – Abt. Technische Meteorologie - durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Arbeiten und der Ergebnisse findet sich im Anhang A.

#### **4.3 Rechnungen von Brenk Systemplanung**

Die Berechnung der Radonausbreitung von Brenk Systemplanung (BS) erfolgte mit Hilfe eines Euler-Modells (auch K-Modell), das in den vergangenen Jahren insbeson-

dere zur Analyse, Bewertung und Prognose von Radonbelastungen an den großen Standorten der WISMUT GmbH durch BS eingesetzt wurde. Die Modellierung der atmosphärischen Turbulenz erfolgt über eine stabilitätsabhängige Mischungsweglänge. Eine detaillierte Beschreibung der Arbeiten und der Ergebnisse findet sich im Anhang B.

#### **4.4 Rechnungen des Ingenieurbüros Lohmeyer**

Das Ingenieurbüro Lohmeyer (IBL) setzte für die Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung das Lagrange-Partikelmodell LASAT (Version 2.8) in Verbindung mit dem Grenzschichtmodell 2.1 ein. Eine detaillierte Beschreibung der Arbeiten und der Ergebnisse findet sich im Anhang C.

#### **4.5 Rechnungen der GRS**

Die GRS wendete bei Ihren Ausbreitungsrechnungen die eigene Version des Lagrange-Partikelmodells LASAT an. Die Turbulenzparameterisierung erfolgte nach dem Entwurf der Richtlinie zur Turbulenzparameterisierung des VDI /VDI 01/. Eine detaillierte Beschreibung der Arbeiten und der Ergebnisse findet sich im Anhang D.

## **5 Vergleich der Ergebnisse von Modellrechnungen und Windkanalexperimenten**

In diesem Kapitel werden die Ergebnisdaten der im „kleinen Grenzschichtwindkanal“ der Universität Hamburg durchgeführten Experimente mit den theoretischen Ansätzen und den Modellierungen der am Projekt beteiligten Institutionen verglichen. Gegenstand des Abschnitts 5.1 ist die Modellierung der atmosphärischen Grenzschichtströmung im Windkanal und in den Modellrechnungen. Dazu werden gemessene und berechnete Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzparameter verglichen und diskutiert. In den dann folgenden Abschnitten 5.2 bis 5.5 werden die Ergebnisse der physikalischen und numerischen Modellierungen auf verschiedene Arten aufbereitet und analysiert.

Brenk Systemplanung vergleicht - wie in Anhang B (Abschnitte 2.4.1 bis 2.4.3) beschrieben - drei verschiedene Parameterisierungen zur Berechnung des lateralen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y(x)$ . In diese und die folgenden Auswertungen werden nur die Ergebnisse der Modellierungen mit dem an die Messungen im Windkanal angepassten Parameterisierungen einbezogen.

Die numerischen Modellierungen erfolgten für die drei Windgeschwindigkeiten  $u_{10} = 1, 2, \text{ und } 5 \text{ m/s}$ . Da aber bei den Rechnungen des IBL und der GRS (wie auch bei der Modellierung im Windkanal) die ermittelten Konzentrationen mit  $1/u$  skalieren, kann auf eine Aufspaltung der Untersuchungen in die drei Windgeschwindigkeiten verzichtet werden. Es werden deshalb normierte Konzentrationen (Einheit  $1/\text{m}^2$ ) angegeben, die sich ergeben, wenn man den für einen Aufpunkt ermittelten Konzentrationswert (in  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) mit der für den Modellantrieb verwendeten Windgeschwindigkeit  $u_{10}$  in  $10 \text{ m}$  über Grund multipliziert und durch die Quellstärke  $Q$  dividiert.

Die Modellierungen von BS zeigen einen von  $1/u$  abweichenden Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die berechneten Konzentrationen. Aus diesem Grund sind in den Auswertungen die Konzentrationen der Rechnungen für  $1 \text{ m/s}$  und  $5 \text{ m/s}$  getrennt angegeben.

### **5.1 Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzparameter**

Für die Ausbreitungsexperimente im kleinen Grenzschichtkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg war zunächst eine naturähnliche Grenzschichtströ-

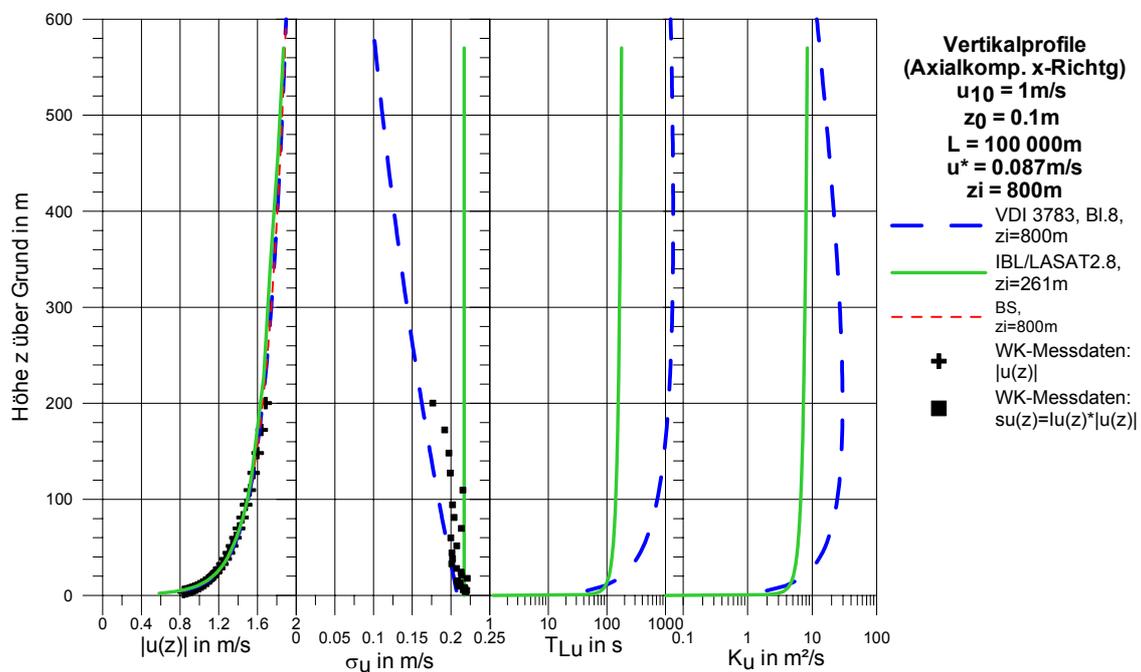
mung in der Messstrecke des Windkanals bereitzustellen, die sich bei horizontal homogenen Bedingungen, einer Rauigkeitslänge  $z_0 = 0,1$  m und neutralen Schichtungsverhältnissen einstellt. Technische Einzelheiten zur Lösung dieser Aufgabe sowie der Nachweis der Qualifizierung der Grenzschichtströmung können dem Anhang A (Abschnitte 3.1 und 4.1) entnommen werden. In diesem Abschnitt werden einige der im Windkanal gemessenen meteorologischen Daten mit den entsprechenden bei den Ausbreitungsrechnungen verwendeten modellspezifischen Parameterisierungen verglichen. Dies betrifft im Einzelnen

- das mittlere vertikale Windprofil  $|u(z)|$ . Hier werden die Messdaten im Höhenbereich bis etwa 200 m Höhe über Grund mit den entsprechenden berechneten Windgeschwindigkeiten auf der Basis der in den Ausbreitungsmodellen verwendeten Grenzschichtmodelle verglichen. Alle drei Ausbreitungsmodelle gehen dabei von dem für neutrale Schichtungsverhältnisse typischen logarithmischen Windprofil  $u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln \frac{z}{z_0}$  aus. Mit der Rauigkeitslänge  $z_0 = 0,1$  m und der Windgeschwindigkeit  $u_{10} = 1$  m/s resultiert eine Schubspannungsgeschwindigkeit von  $u_* = 0,087$  m/s .
- die Standardabweichungen der Fluktuation der Windgeschwindigkeitskomponenten  $\sigma_u(z)$ ,  $\sigma_v(z)$  und  $\sigma_w(z)$ , die aus den im Grenzschichtwindkanal komponentenweise gemessenen Vertikalprofilen der Turbulenzintensitäten  $I_u(z) = \sigma_u(z)/|u(z)|$ ,  $I_v(z) = \sigma_v(z)/|u(z)|$ ,  $I_w(z) = \sigma_w(z)/|u(z)|$  sowie dem gemessenen mittleren vertikalen Windprofil  $|u(z)|$  bestimmt wurden. Diese aus Messungen ermittelten Werte für  $\sigma_{u,v,w}(z)$  wurden den entsprechenden aus den Grenzschichtparameterisierungen berechneten Werten gegenübergestellt. Die von IBL (Standard-Grenzschichtmodell, Version 2.1, in LASAT 2.8) und GRS (VDI 3783, Blatt 8) in den Ausbreitungsrechnungen verwendeten Gleichungen für  $\sigma_{u,v,w}(z)$  finden sich in den Anhängen C und D, jeweils im Abschnitt 2.2. Die von der Fa. Brenk Systemplanung verwendete Turbulenzparameterisierung verwendet anstelle der Standardabweichung der Fluktuation der vertikalen Windgeschwindigkeitskomponente  $\sigma_w(z)$  den vertikalen turbulenten Diffusionskoeffizienten  $K_z(z)$  (Siehe Anlage B, Abschnitt 2.3).

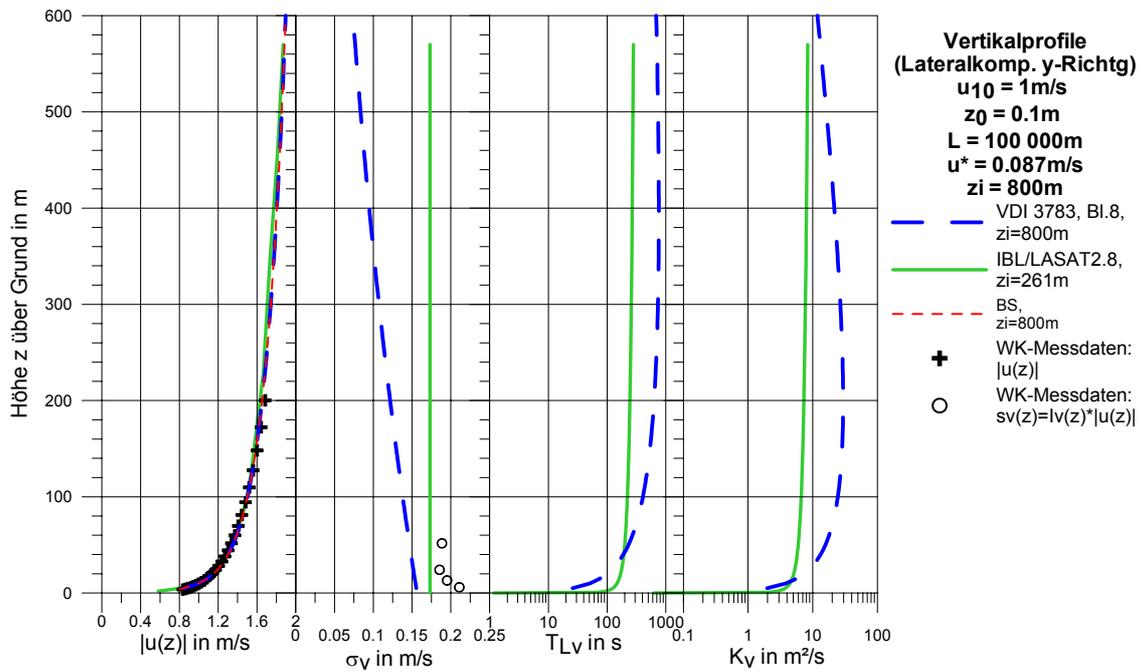
Ausgehend von  $u_{10} = 1$  m/s sind in den Abbildungen 5.1 bis 5.3 Vertikalprofile des Betrages der Windgeschwindigkeit  $|u(z)|$  sowie für die Komponenten der drei Raumrichtungen  $x$ ,  $y$  und  $z$  die Standardabweichungen der Fluktuation der Windgeschwindig-

keitskomponenten  $\sigma_u(z)$ ,  $\sigma_v(z)$  und  $\sigma_w(z)$ , die turbulenten (Lagrange'schen) Zeitskalen  $T_{Lu}(z)$ ,  $T_{Lv}(z)$  und  $T_{Lw}(z)$  und die Diffusionskoeffizienten  $K_u(z)$ ,  $K_v(z)$  und  $K_w(z)$  wiedergegeben. Bei der Darstellung der funktionalen Abhängigkeiten wurde in diesen Abbildungen als Grenzschichthöhe  $z_i = 800$  m zugrunde gelegt. Allerdings ist festzuhalten, dass das Standard-Grenzschichtmodell 2.1 aus in LASAT 2.8 (IBL, Anhang C) aufgrund der gewählten Monin-Obukhov-Länge ( $L = 100\,000$  m) für neutrale Schichtung und der o. a. Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_* = 0,087$  m/s bei der Bestimmung von  $\sigma_w(z)$ ,  $K_{u,v,w}(z)$  und  $T_{u,v,w}(z)$  als Grenzschichthöhe  $z_i$  anstelle von 800 m den kleineren Wert  $z_i = 261$  m ansetzt; mit dieser Grenzschichthöhe werden dann Vertikalprofile bis in 800 m Höhe berechnet. In den Abbildungen 5.1 bis 5.3 sind die Windgeschwindigkeit und die Turbulenzparameter bis in 600 m über Grund vergleichend dargestellt; im Einzelnen sind die Abbildungen folgendermaßen strukturiert:

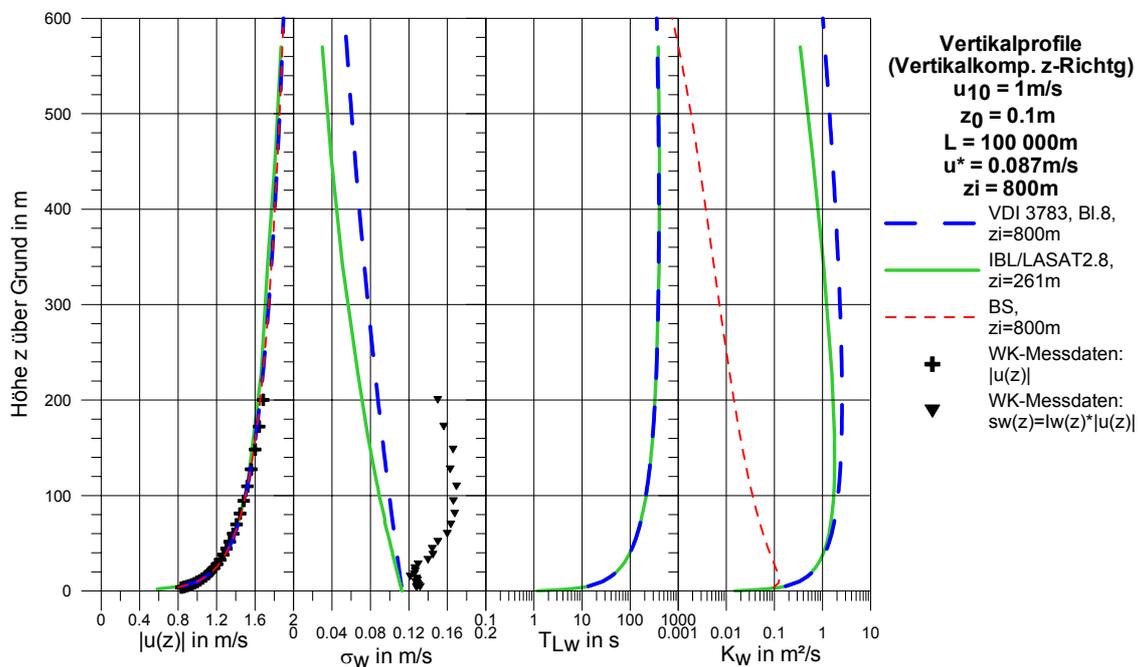
- Ganz links findet sich jeweils das Vertikalprofil des Betrages der Windgeschwindigkeit  $|u(z)|$ . Alle drei Ausbreitungsmodelle benutzen das gleiche Vertikalprofil  $|u(z)|$ . Die berechneten Windgeschwindigkeiten stimmen mit den im Windkanal gemessenen Windgeschwindigkeiten sehr gut überein.



**Abb. 5.1** Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzparameter (Axialkomponente, x-Richtung).



**Abb. 5.2** Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzparameter (Lateralkomponente, y-Richtung).



**Abb. 5.3** Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzparameter (Vertikalkomponente, z-Richtung).

- Bei den Windgeschwindigkeitsfluktuationen zeigt sich, dass das Standard-Grenzschichtmodell 2.1 in LASAT 2.8 (IBL, Anhang C) höhenkonstante  $\sigma_u$ - und  $\sigma_v$ -Werte liefert, während nach der Parameterisierung der VDI 3783, Blatt 8, die  $\sigma_u$ - und  $\sigma_v$ -Werte mit der Höhe abnehmen. Die im Windkanal gemessenen  $\sigma_u$ -Werte liegen zwischen VDI-Richtlinie und Standard-Grenzschichtmodell 2.1 und zeigen tendenziell ebenfalls eine Abnahme mit der Höhe (Abbildung 5.1). Die aus Windkanalmessungen gewonnenen Standardabweichungen der lateralen Windgeschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_v$  nehmen ebenfalls mit der Höhe ab. Allerdings ergeben sich mit VDI 3783, Bl.8, deutlich geringere  $\sigma_v$ -Werte: In Bodennähe beträgt der berechnete  $\sigma_v$ -Wert nur etwa 74 % des Messwertes. Das Standard-Grenzschichtmodell 2.1 liefert dagegen – trotz höhenkonstanter  $\sigma_v$ -Werte – eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten (Abbildung 5.2). Bei Ausbreitungsrechnungen mit bodennahen Quellen sind deshalb mit der Parameterisierung nach VDI 3783, Bl.8, schmalere Fahnen und ggf. höhere Konzentrationswerte zu erwarten als mit dem Standard-Grenzschichtmodell 2.1.

Die mit VDI 3783, Bl.8, und Standard-Grenzschichtmodell 2.1 berechneten Standardabweichungen der vertikalen Windgeschwindigkeitsfluktuation  $\sigma_w(z)$  (Abbildung 5.3) zeigen in Bodennähe geringe Abweichungen, beide Parameterisierungen nehmen – wie bei neutraler Schichtung zu erwarten – mit der Höhe über Grund ab; in größerer Höhe ergeben sich mit dem Standard-Grenzschichtmodell 2.1 kleinere  $\sigma_w$ -Werte. Die aus den Windkanalmessungen gewonnenen  $\sigma_w$ -Werte sind in Bodennähe um etwa 20 % größer als die Modellwerte und nehmen ebenfalls mit der zunehmenden Höhe ab; für Höhen  $z > 30$  m zeigen die Windkanalmessungen wieder einen Anstieg der  $\sigma_w$ -Werte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Einstellung der Turbulenzverhältnisse im Windkanal vornehmlich die Verhältnisse in der bodennahen Zone nachgebildet wurden. Im Bereich der Prandtl-Schicht liegen auch hier die Werte noch innerhalb der in der „Windkanal-Richtlinie“ VDI 3783, Blatt 12 /VDI 00/ angegebenen Bandbreite.

- Die mit VDI 3783, Bl.8, und dem Standard-Grenzschichtmodell 2.1 berechneten Lagrange'schen Zeitskalen  $T_{Lu}(z)$ ,  $T_{Lv}(z)$  und  $T_{Lw}(z)$  nehmen alle mit der Höhe über Grund zu. Mit VDI 3783, Bl.8, ergeben sich im Höhenbereich zwischen 20 und 40 m über Grund deutlich größere  $T_{Lu}(z)$ - und  $T_{Lv}(z)$ -Werte. Dagegen zeigen die Vertikalprofile der turbulenten Zeitskala  $T_{Lw}(z)$  nach VDI 3783, Bl.8, und dem Standard-

Grenzschichtmodell 2.1 praktisch keine Abweichungen. Ein Vergleich der turbulenten Zeitskalen mit Messdaten aus dem Windkanal ist nicht möglich.

- Die entsprechenden turbulenten Diffusionskoeffizienten  $K_u(z)$ ,  $K_v(z)$  und  $K_w(z)$  zeigen ein ähnliches Verhalten wie die turbulenten Zeitskalen  $T_{Lu,v,w}(z)$ : Mit VDI 3783, Bl.8, ergeben sich für  $K_u(z)$  und  $K_v(z)$  kleinere Werte als beim Standard-Grenzschichtmodell 2.1; in größerer Höhe sind die mit VDI 3783, Bl.8, berechneten  $K_u(z)$ - und  $K_v(z)$ -Werte größer. Das Vertikalprofil des vertikalen Diffusionskoeffizienten  $K_w(z)$  zeigt dagegen – besonders bis in Höhen von etwa 100 m – keine großen Abweichungen zwischen IBL und GRS. Im Gegensatz dazu ergeben sich, wie in den Anhängen B (Abschnitt 2.3.4) und D (Abschnitt 4.3) dargestellt, mit der Parameterisierung des vertikalen Diffusionskoeffizienten  $K_w(z)$  der Fa. Brenk Systemplanung (BS) deutlich kleinere Diffusionskoeffizienten: Der Verlauf von  $K_w(z)$  ist in Bodennähe zunächst sehr ähnlich zu IBL und GRS, für Höhen  $z > 10$  m liefert die BS-Parameterisierung im Fall  $u_{10} = 1$  m/s jedoch deutlich kleinere  $K_w$ -Werte: in 100 m Höhe über Grund beträgt der Unterschied knapp einen Faktor 100. – Aufgrund dieses Sachverhaltes nehmen im Lee einer bodennahen Quelle bei kleiner Windgeschwindigkeit die mit der Turbulenzparameterisierung von BS berechneten bodennahen Konzentrationen deutlich langsamer ab als bei Verwendung der VDI-Parameterisierung. Dies bestätigen die in den Anhängen B (Abschnitt 3.3.4) und D (Abschnitt 4.3) dargestellten Testrechnungen.

## 5.2 Normierte Konzentrationen unter der Fahnenachse

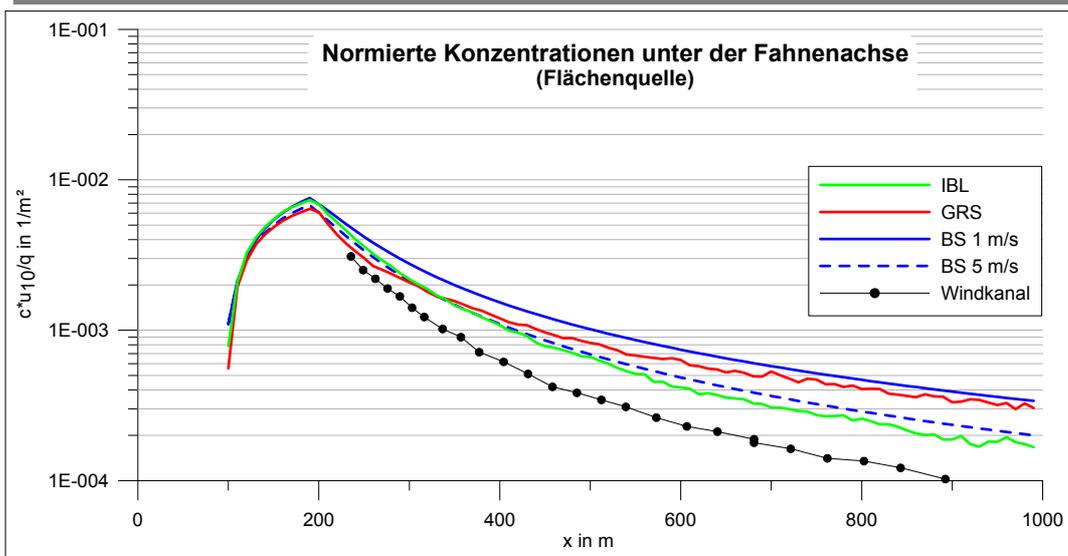
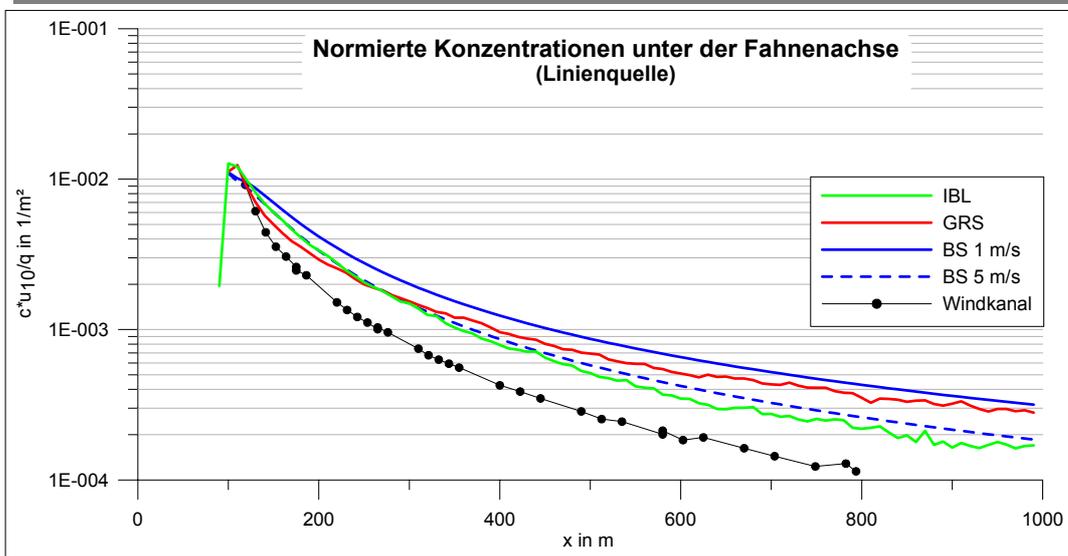
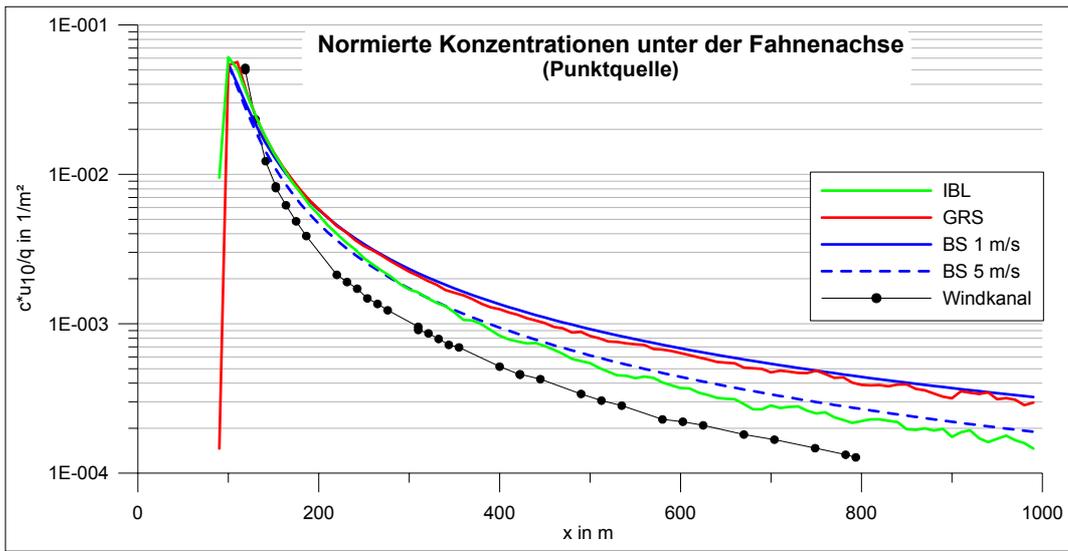
Ein wesentliches Kriterium bei der Bewertung von Ausbreitungsmodellierungen sind die Konzentrationsverläufe unter der Fahnenachse. Aus diesen Verläufen können der für die jeweilige Ausbreitungssituation ermittelte Maximalwert und der Abfall der Konzentration als Funktion von der Quellentfernung ermittelt werden.

In der Abbildung 5.4. sind die normierten Konzentrationsverläufe unter der Fahnenachse für die Punktquelle (oben), die Linienquelle (Mitte) und die Flächenquelle (unten) angegeben. Die Ergebnisse der Rechnungen des IBL sind durch die grünen, der GRS durch die roten und von BS durch die blauen Linien (durchgezogen für 1 m/s und gestrichelt für 5 m/s) dargestellt. Die schwarzen Punkte entsprechen den Messwerten des Windkanals (bodennahe Longitudinalprofile).

Die Kurven für die Punktquelle steigen schnell auf einen (hohen) Maximalwert von etwa  $5\text{-}6\cdot 10^{-2}$   $1/\text{m}^2$  an. Bei der Linienquelle liegt dieser Maximalwert mit  $1\text{...}1,5\cdot 10^{-2}$   $1/\text{m}^2$  bereits deutlich niedriger. Die Kurven für die Flächenquellen steigen langsamer an und liegen an der Leekante ( $x = 200$  m) etwas unter dem Wert von  $1\cdot 10^{-2}$   $1/\text{m}^2$ . Man erkennt erwartungsgemäß, dass mit größer werdendem Abstand zur Quelle der Einfluss der Quellform abnimmt – die berechneten Konzentrationen für  $x = 1000$  m sind nur noch abhängig vom Modellansatz und nicht mehr von der Quellform.

Der Vergleich der Kurven untereinander und mit den Ergebnissen des Windkanals liefert die folgenden Aussagen:

- Die Maximalkonzentration in Quellnähe unter der Fahnenachse wird von allen Modellen bei allen drei untersuchten Quellformen sehr gut wiedergegeben. Die Abweichungen der Modelle untereinander und von den Windkanalergebnissen liegen hier im Bereich von 5-10 %. Bei der Flächenquelle war eine Messung unmittelbar auf der Quelle oder kurz dahinter aus technischen Gründen nicht möglich. Aber auch hier lässt die Extrapolation der Kurve des Windkanals (schwarze Punkte) zur Stelle ( $x = 200$  m, Leekante) auf eine sehr gute Übereinstimmung der Maximalwerte schließen.
- Alle Modelle überschätzen im Vergleich mit den gemessenen Konzentrationen des Windkanals den Konzentrationsverlauf unter der Fahnenachse ab ca. 100 m hinter der Quelle.
- Je größer der Abstand von der Quelle ist, desto größer ist die relative Abweichung der Modellergebnisse untereinander und von den Werten des Windkanals. Bei 800 m liegt diese Spreizung etwa bei einem Faktor 3-4.
- Im Nahbereich (bis etwa  $x = 300$  m) liegt für die Punktquelle die Modellierung von BS (5 m/s) am nächsten an den Ergebnissen des Windkanals. Für die Linien- und die Flächenquelle liegen die Kurven der GRS näher an den Messwerten.
- Im Bereich ab etwa  $x = 300$  m liefert die Modellierung von IBL die besten Ergebnisse. Die größten Abweichungen zeigt hier die Rechnung von BS (für 1 m/s).



**Abb. 5.4** Normierte Konzentrationen unter der Fahnenachse für die Punktquelle (oben), die Linienquelle (Mitte) und die Flächenquelle (unten).

### 5.3 Bodennahe querwindintegrierte Konzentrationen

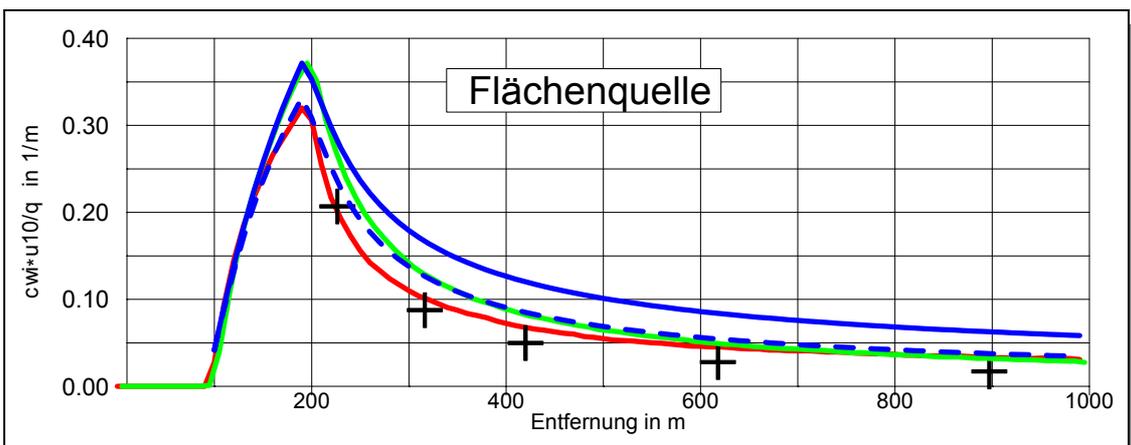
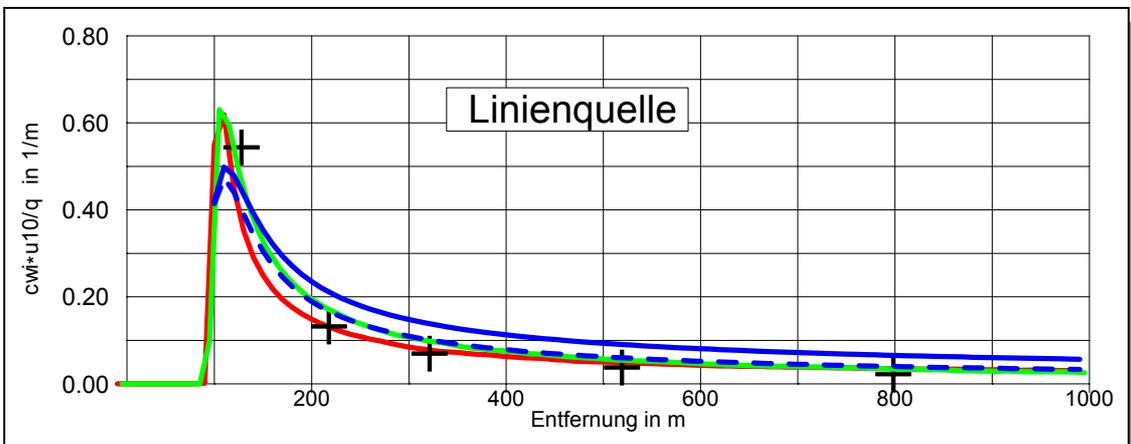
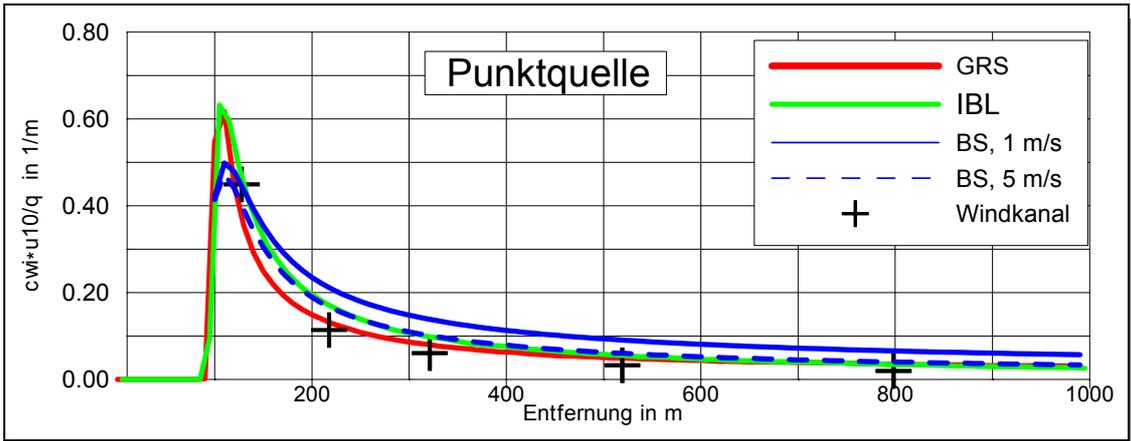
Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass es gewisse Unterschiede in den Modellen bei der Berechnung der Diffusion lateral zur Ausbreitungsrichtung gibt. Diese Unterschiede sind besonders relevant bei der Betrachtung von Einzelfällen. Bei der Berechnung einer langzeitgemittelten flächenhaften Verteilung der Rn-Konzentration (siehe Anhang B und Kapitel 5) sind diese Unterschiede aufgrund der Überlagerung von sehr vielen Ausbreitungssituationen von untergeordneter Bedeutung.

Um die Unterschiede in der horizontalen Diffusion von denen in vertikaler Richtung zu trennen, wurden im nächsten Schritt querwindintegrierte Konzentrationen ausgewertet. Dabei werden die von den Modellen für die jeweilige Situation berechneten Konzentrationen quer zur Fahnenachse aufintegriert. Zum Vergleich mit den Ergebnissen des Windkanals wurden die dort ermittelten bodennahen Lateralprofile (fünf pro Quellart) quer zur Fahnenachse ebenfalls aufintegriert.

In der Abbildung 5.5 sind die querwindintegrierten Konzentrationsverläufe in Ausbreitungsrichtung für die Punktquelle (oben), die Linienquelle (Mitte) und die Flächenquelle (unten) angegeben. Die Farbgebung entspricht derjenigen in Abbildung 5.4. Die schwarzen Kreuze entsprechen wiederum den aus den Messwerten des Windkanals abgeleiteten querwindintegrierten Konzentrationen.

Die Auswertungen zeigen:

- Die Modelle überschätzen auch bei der querwindintegrierten Konzentration die Messwerte des Windkanals. Die Überschätzung ist allerdings geringer als bei der Konzentration unter der Fahnenachse.
- Die Rechnungen der GRS entsprechen bei allen Quellarten den Ergebnissen des Windkanals im Nahbereich (bis  $x = 500$  m) am besten.
- Im Fernbereich (ab  $x = 500$  m) liefern die Modelle sehr ähnliche Ergebnisse. Die Abweichungen liegen im Bereich von bis zu 10 %. Eine Ausnahme bildet die Rechnung von BS für 1 m/s. Sie liegen für die Punktquelle bei  $x = 800$  m etwa mit einem Faktor 2 über den anderen Modellergebnissen und mit einem Faktor 3,5 über den Ergebnissen des Windkanals.



**Abb. 5.5** Normierte bodennahe querwindintegrierte Konzentrationen für die Punktquelle (oben), die Linienquelle (Mitte) und die Flächenquelle (unten).

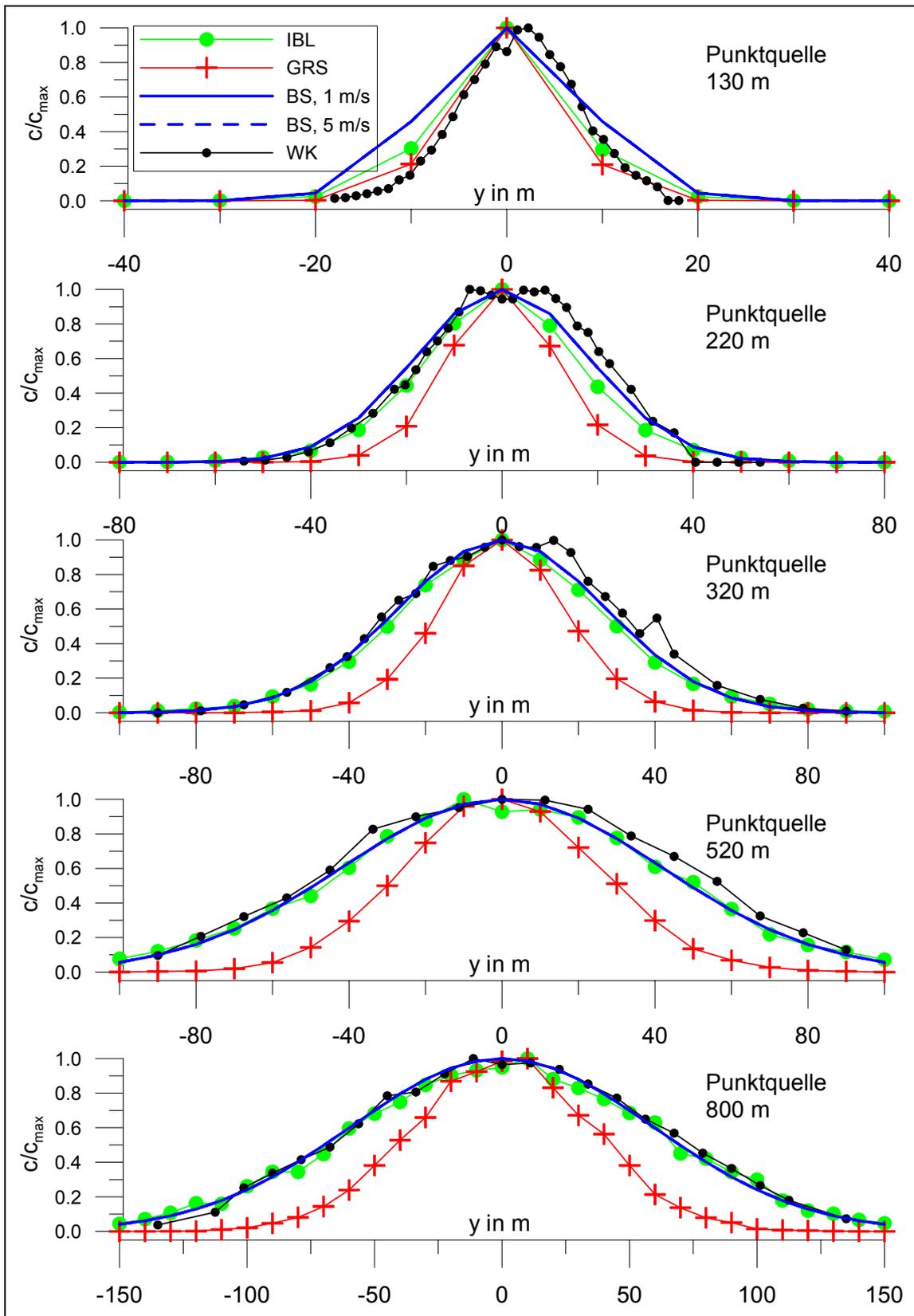
#### 5.4 Lateralschnitte der Konzentration in Bodennähe

Die Abbildungen 14, 17, 20 (Anhang B, BS), 4.7 (Anhang C, IBL) und 4.8 (Anhang D, GRS) zeigen, dass die Modelle unterschiedliche Fahnenbreiten erzeugen. Den Abbildungen 14, 17, 20 liegt dabei eine an die Windkanalergebnisse angepasste Parametrisierung des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$ , der maßgeblich für die Modellierung der Fahnenbreite ist, zugrunde.

In der Abbildung 5.6 sind die Lateralschnitte der Konzentration in Bodennähe der einzelnen Modelle und die Ergebnisse des Windkanals (exemplarisch für die Punktquelle) gegenübergestellt. Angegeben sind nicht die absoluten Konzentrationen sondern das Verhältnis zum Maximum des jeweiligen Lateralschnittes (d. h. die Kurven haben alle an einer Stelle den Wert 1). Die Entfernungen von der Quelle (bei  $x = 100$  m) nehmen von oben nach unten zu.

Man erkennt, dass

- in unmittelbarer Quellnähe sich die Fahnenbreiten nicht signifikant unterscheiden,
- nicht nur die bereits an die Messwerte angepassten (und somit nicht unabhängigen) Fahnenbreiten von BS, sondern auch die Rechnungen des IBL sehr gut mit den Ergebnissen des Windkanals (auch in größeren Entfernungen) übereinstimmen.
- die mit der GRS-Version und der Turbulenzparameterisierung nach VDI 3783, Bl. 8, /VDI 01/ berechneten Verteilungen im Vergleich zum Windkanal und den anderen numerischen Modellierungen zu schmale Fahnen liefern.
- die Kurven von BS für  $u = 1$  m/s und  $u = 5$  m/s aufgrund des Berechnungsverfahrens (siehe Anhang B) und der Normierung der Grafik übereinander liegen.



**Abb. 5.6** Lateralschnitte (der normierten Konzentrationsverteilung) in Bodennähe der einzelnen Modelle und der Ergebnisse des Windkanals für die Punktquelle.

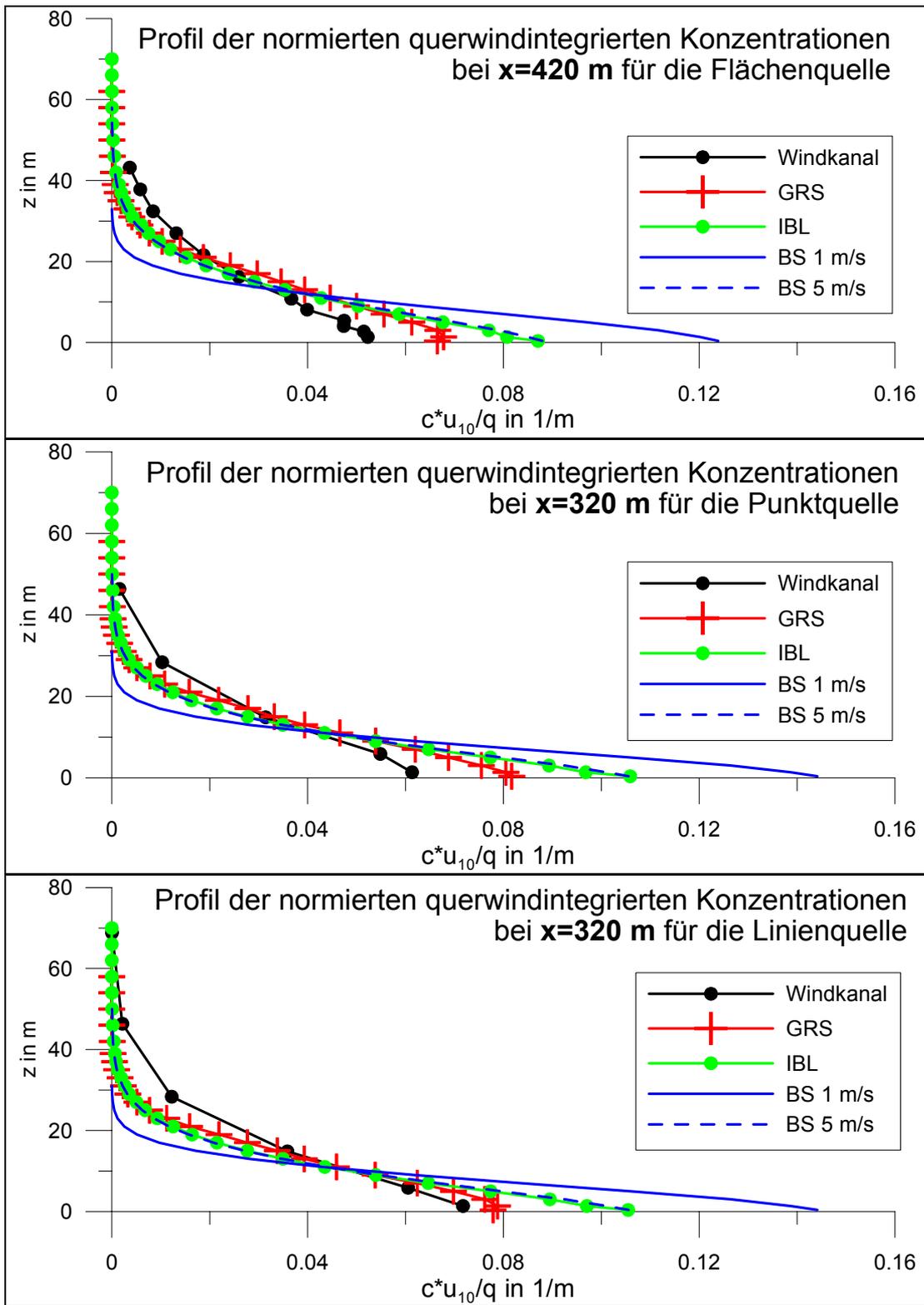
## 5.5 Höhenprofile der querwindintegrierten Konzentrationen

Die Modellunterschiede in den Konzentrationsverläufen unter der Fahnenachse (s. Abschnitt 5.2) und der lateralen Verteilung (s. Abschnitt 5.4) haben ihre Ursache u. a. in der unterschiedlichen Modellierung der lateralen Dispersion. Die Unterschiede bei den querwindintegrierten Konzentrationsverläufen (s. Abschnitt 5.3) können damit nicht erklärt werden. Auf der Basis der im Windkanal ermittelten Konzentrationen in einer Lateralebene (yz-Schnitt) bei  $x = 320$  m (Punktquelle und Linienquelle) bzw.  $x = 420$  m (Flächenquelle) können Vertikalprofile der querwindintegrierten Konzentrationen berechnet und mit den entsprechenden Profilen - abgeleitet von den numerischen Modellierungen - verglichen werden.

Die Abbildung 5.7 zeigt die Vertikalprofile der normierten querwindintegrierten Konzentrationen für die Punktquelle (oben), die Linienquelle (Mitte) und die Flächenquelle (unten).

Aus den Abbildungen kann man ablesen, dass

- alle Modelle die im Windkanal gemessenen Konzentrationen im unteren Höhenbereich ( $<10$  m) überschätzen im oberen Höhenbereich ( $>15$  m) unterschätzen,
- die Modellierung der GRS mit der Turbulenzparameterisierung nach VDI 3783, Bl.8 den Windkanalergebnissen im unteren Höhenbereich ( $<10$  m) am nächsten kommt und
- die Rechnungen von BS für  $1$  m/s die geringste Diffusion in Vertikalrichtung liefern.



**Abb. 5.7** Vertikalprofile der normierten querwindintegrierten Konzentrationen für die Punktquelle (oben), die Linienquelle (Mitte) und die Flächenquelle (unten).

## 5.6 Kreuzvergleich Ausbreitungsmodell/Turbulenzparameterisierung

Bei den Ausbreitungsrechnungen mit den beiden Partikelmodellen und den Turbulenzparameterisierungen in LASAT 2.8, Standard-Grenzschichtmodell (Version 2.1) (Anhang C, IBL) bzw. VDI 3783, Blatt 8 (Anhang D, GRS) skalieren die Konzentrationen mit  $1/u$ . Dagegen ergeben die Ausbreitungsrechnungen mit dem Euler-Modell, das querwindintegrierte Konzentrationen berechnet<sup>3</sup>, und einem vertikalen Diffusionskoeffizienten nach dem Mischungswegansatz (Abschnitt 2.1 in Anhang B, Brenk Systemplanung, BS) Konzentrationsverteilungen, die mit  $1/u^a$  skalieren, wobei  $a > 1$  ist. Dieses Verhalten wurde unter den Teilnehmern des Projektes kontrovers diskutiert, weil es nach gängigen Vorstellungen über die turbulente Grenzschicht unter den vorgegebenen Randbedingungen (vollentwickelte turbulente Strömung und longitudinale Diffusion vernachlässigbar gegen Advektion) nicht erwartet wird.

Im Rahmen dieser Diskussion wurde angeregt, dass die GRS mit ihrem Partikelmodell und der Turbulenzparameterisierung von Brenk Systemplanung einerseits sowie Brenk Systemplanung mit dem Euler-Modell in Kombination mit der von der GRS verwendeten Turbulenzparameterisierung (VDI 3783, Blatt 8) andererseits Ausbreitungsrechnungen für die Linienquelle und Anströmgeschwindigkeiten  $u_{10} = 1\text{m/s}$ ,  $2\text{m/s}$  und  $5\text{m/s}$  durchführen und die bodennahen querwindintegrierten Konzentrationen miteinander vergleichen. Die Betrachtung der querwindintegrierten Konzentration bietet den Vorteil, dass hier im wesentlichen nur die vertikale Diffusion wirksam ist; Effekte durch unterschiedliche Parameterisierungen der lateralen Diffusion, d. h. quer zur Ausbreitungsrichtung, werden ausgeschaltet. Anhand dieses Kreuzvergleiches soll ausgeschlossen werden, dass das unterschiedliche Skalierungsverhalten der berechneten Konzentrationen von dem jeweiligen Ausbreitungsmodell – hier Partikelmodell und Eulersches Gittermodell – verursacht wird.

---

<sup>3</sup> In dem BS-Modell wird unter der Annahme, dass  $K_y$  nicht (bzw. zumindest nicht stark) von  $y$  und  $z$  abhängt, die Lösung der 3-dimensionalen Diffusions-Advektions-Gleichung für  $C(x, y, z)$  vereinfacht, indem die  $y$ -Abhängigkeit separiert und durch eine Gauß-Verteilung approximiert wird. Die Berechnung der Abhängigkeit von  $x$  und  $z$  reduziert sich dadurch auf die Lösung einer 2-dimensionalen Gleichung.

Die entsprechenden Rechnungen sind in Anhang B, Abschnitt 3.3.4 (BS) und in Anhang D, Abschnitt 4.3 (GRS) dokumentiert. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die mit beiden Ausbreitungsmodellen (Partikel- und Euler-Modell) berechneten bodennahen querwindintegrierten Konzentrationen skalieren bei Verwendung der vertikalen Diffusionskoeffizienten nach dem Mischungswegansatz von BS **nicht** mit der Anströmgeschwindigkeit. Dagegen skaliert bei beiden Ausbreitungsmodellen mit der Turbulenzparameterisierung nach der VDI-Richtlinie 3783, Blatt 8, die bodennahe querwindintegrierte Konzentration streng umgekehrt proportional zur Anströmgeschwindigkeit.
- Die mit beiden Ausbreitungsmodellen und der BS-Parameterisierung für  $u_{10} = 5$  m/s berechneten Konzentrationsverteilungen kommen der mit der VDI-Parameterisierung berechneten Verteilung am nächsten.
- Bei Anströmgeschwindigkeiten  $u_{10} < 5$  m/s sind die mit der Turbulenzparameterisierung nach BS berechneten Konzentrationen gegenüber den mit der Parameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8, berechneten Konzentrationen größer. Der Unterschied ist umso größer, je kleiner die Anströmgeschwindigkeit ist. Der Unterschied beträgt bei  $u_{10} = 1$  m/s bis zu einem Faktor 2.
- Bei jeweils gleicher Turbulenzparameterisierung und gleicher Windgeschwindigkeit ergeben sich mit dem Euler-Modell im Vergleich zum Partikel-Modell etwa um 30 % kleinere Maximalwerte der bodennahen querwindintegrierten Konzentration, d. h. das Euler-Modell berechnet im Vergleich zum Partikel-Modell kleinere Konzentrationen.
- Bei jeweils gleichem Ausbreitungsmodell und gleicher Windgeschwindigkeit ergeben sich mit der Turbulenzparameterisierung nach BS im Vergleich zur Parameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8 um bis zu 10 % höhere Maximalwerte der bodennahen querwindintegrierten Konzentration. Mit zunehmender Geschwindigkeit werden die Unterschiede kleiner.
- Die für gleiche Turbulenzparameterisierungen mit beiden Ausbreitungsmodellen in größerer Entfernung (1000 m) jeweils berechneten Konzentrationen sind vergleichbar. Dabei sind die mit der VDI-Parameterisierung berechneten Konzentrationen kleiner als die entsprechenden mit der BS-Parameterisierung berechneten (nicht streng zu  $1/u$  proportionalen) Werte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das unterschiedliche Skalierungsverhalten der berechneten Konzentrationen nicht von dem Ausbreitungsmodell (hier: Partikelmodell und Eulersches Gittermodell), sondern von der jeweiligen Turbulenzparameterisierung verursacht wird.

## 5.7 Bewertung

Die in den Anhängen A bis D dokumentierten und in den vorangegangenen Abschnitten gegenübergestellten Ergebnisse der Experimente im Windkanal und der begleitenden Ausbreitungsrechnungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Ausgangspunkt war, dass der Windkanal belastbare Referenzwerte für die untersuchten Ausbreitungsszenarien (verschiedene Anströmgeschwindigkeiten und Quellkonfigurationen bei neutraler Schichtung, horizontal homogenen Verhältnissen) liefert. Die Ausbreitungsexperimente im Windkanal zeigen das nach gängigen Vorstellungen über die turbulente Grenzschicht (vollentwickelte turbulente Strömung und longitudinale Diffusion vernachlässigbar gegenüber Advektion) erwartete Verhalten, dass die Konzentration mit der reziproken Windgeschwindigkeit skaliert.
2. Bei den Ausbreitungsrechnungen mit den beiden Partikelmodellen und den Turbulenzparameterisierungen in LASAT 2.8, Standard-Grenzschichtmodell (Version 2.1) (Anhang C, IBL) bzw. VDI 3783, Blatt 8 (Anhang D, GRS) skalieren die Konzentrationen mit  $1/u$ . Dagegen ergeben die Ausbreitungsrechnungen mit dem Euler-Modell, das querwindintegrierte Konzentrationen berechnet, und einem vertikalen Diffusionskoeffizienten nach dem Mischungswegansatz (BS) Konzentrationsverteilungen, die mit  $1/u^a$  skalieren, wobei  $a > 1$  ist. In einem Kreuzvergleich (Abschnitt 5.6) wurde nachgewiesen, dass das unterschiedliche Skalierungsverhalten der berechneten Konzentrationen nicht von dem verwendeten Ausbreitungsmodell, sondern von der jeweiligen Turbulenzparameterisierung verursacht wird:

Für die mit den Partikel-Modellen verwendeten Turbulenzparameterisierungen für die vertikale Diffusion lassen sich Diffusionskoeffizienten  $K_z$  formulieren, die streng proportional zu  $u_*$  sind. Beispielsweise ergibt sich mit der VDI-Parameterisierung bei neutraler Schichtung für den Diffusionskoeffizienten  $K_z = k \cdot u_* \cdot z \cdot \exp(-4 \cdot z/z_i)$  (siehe (2-21) sowie Anhang B, Abschnitt 2.3.3).

Dagegen wirkt bei der Turbulenzparameterisierung nach dem Mischungswegansatz über den maximal möglichen Mischungsweg  $l_\infty$  noch eine zusätzliche Abhängigkeit

von  $u_*$  auf den vertikalen Diffusionskoeffizienten  $K_z$ . Diese Abhängigkeit drückt sich durch die Gleichung  $K_z \propto u_*^{a(z)}$  mit  $a(z) \geq 1$  aus. Sie folgt aus dem Zusammenspiel der Formeln (2-22) bis (2-25).

3. Die mit LASAT 2.8 und Standard-Grenzschichtmodell (Version 2.1) (IBL), mit GRS-LASAT und VDI 3783, Blatt 8 (GRS) sowie mit Euler-Modell und Diffusionskoeffizient nach Mischungswegansatz für  $u_{10} = 5$  m/s (BS) berechneten bodennahen querwindintegrierten Konzentrationen liegen im gleichen Größenbereich (Abb. 5.5). Die entsprechenden von BS mit Eulermodell und Diffusionskoeffizient nach Mischungswegansatz für  $u_{10} = 1$  m/s berechneten bodennahen querwindintegrierten Konzentrationen fallen deutlich höher aus.

In Bodennähe trifft die Parameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8 die Messwerte des Windkanals am besten, jedoch werden die querwindintegrierten Konzentrationen auch von diesem Turbulenzansatz überschätzt werden. Anscheinend ist bei allen Ansätzen die Turbulenzintensität in vertikaler Richtung zu gering. In Höhen ab einigen Dekametern unterschätzt die Parameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8 – ebenso wie alle anderen Parameterisierungen auch – die aus dem Windkanal ermittelten querwindintegrierten Konzentrationen (Abb. 5.7). Jedoch liegt die VDI-Parameterisierung für Vertikaldiffusion den Messdaten insgesamt am nächsten.

Es ergibt sich ein Bild, das darauf hindeutet, dass die Höhenabhängigkeit der Vertikaldiffusion von allen Modellen nicht richtig wiedergegeben wird: In Bodennähe ergibt sich eine zu geringe, dagegen in der Höhe eine zu große vertikale Diffusion.

4. Die mit LASAT 2.8 und Standard-Grenzschichtmodell (Version 2.1) berechneten lateralen bodennahen Konzentrationsverteilungen sind im Vergleich zu den mit GRS-LASAT und VDI 3783, Blatt 8 (GRS) berechneten Verteilungen deutlich breiter (Abb. 5.6) und stimmen mit den Messdaten aus dem Windkanal am besten überein. Die bei IBL resultierenden Konzentrationen unter der Fahnenachse sind dementsprechend niedriger als bei den GRS-Rechnungen (Abb. 5.4). Die von IBL verwendete Turbulenzparameterisierung trifft die im Windkanal gemessenen Konzentrationsverteilungen am besten. Die Turbulenzparameterisierung nach VDI liefert demnach unter der Fahnenachse zu hohe, d. h. konservative Konzentrationen; seitlich der Fahnenachse können sich Konzentrationsunterschätzungen ergeben. Ausgehend von den mit dem BS-Euler-Modell und Diffusionskoeffizient nach Mischungswegansatz berechneten querwindintegrierten Konzentrationen hat BS folgende verschiedene horizontale bodennahe Konzentrationsverteilungen unter der

Annahme einer Gauß-verteilten lateralen Dispersion verglichen (Siehe Abbildung 10 in Anhang B):

a)  $\sigma_y$ -Parameter nach /TAL 86 bzw. AVV 90/

$$\text{mit } \sigma_y(x) = p_y \cdot x^{q_y}; p_y = 0,640 \text{ m}; q_y = 0,784,$$

b)  $\sigma_y$ -Parameter unter Verwendung von Parameterisierungen nach VDI 3783, Bl.8

$$\text{nach Anpassung ergibt sich } \sigma_y(x) = p_y \cdot x^{q_y}; p_y = 0,556 \text{ m}; q_y = 0,536,$$

c) an die im Windkanal gemessenen lateralen Konzentrationsverteilungen,

$$\text{angepasste } \sigma_y\text{-Parameter mit } \sigma_y(x) = p_y \cdot x^{q_y}; p_y = 0,614 \text{ m}; q_y = 0,696.$$

Eingangs des Abschnitts 5 wurde erwähnt, dass in die Auswertungen nur BS-Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen eingehen, die an die im Windkanal gemessenen lateralen Konzentrationsverteilungen angepasst worden sind (Variante c). Weil diese Ergebnisse nicht unabhängig von den Windkanalmessungen sind, konnten die mit dem BS-Eulermodell und Diffusionskoeffizient nach Mischungswegansatz berechneten lateralen Konzentrationsverteilungen nicht in den Modellvergleich einbezogen werden.



## 6 Rechnungen mit realer meteorologischer Statistik

Zur Beurteilung der Übertragbarkeit der für neutrale Schichtungsverhältnisse untersuchten Ansätze zur Turbulenzparameterisierung auf reale meteorologische Verhältnisse wurden auf der Basis der angepassten 3-parameterigen Wetterstatistik (Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Diffusionskategorie) der DWD-Station Gera-Leumnitz (siehe Abschnitte 6.1 und 6.2) Ausbreitungsklimatologien berechnet. Diese Rechnungen erfolgten mit der GRS-Version von LASAT mit der Turbulenzparameterisierung nach VDI 3783, Bl. 8. (siehe Anhang D). Parallel wurden für die gleiche Quellkonfiguration und die gleiche meteorologische Datenbasis Rechnungen von BS durchgeführt (siehe Anhang B).

Im ersten Schritt wurden - zum Vergleich des Einflusses verschiedener Quellformen - die Rechnungen für eine bodennahe Punktquelle mit den meteorologischen Daten des 10 Jahreszeitraumes von 1979 bis 1988 durchgeführt (s. Abschnitt 6.3). Des Weiteren wurde mit den Modellen für eine reale Flächenquelle (Halde Crossen) unter Berücksichtigung der tatsächlichen Objektumrisse und vorgegebener Quellstärkeverteilung mit zwei verschiedenen meteorologischen Statistiken (1979-1988 bzw. Winter 1992/Sommer 1993) und zwei verschiedenen Rauigkeitslängen (0,1 m und 0,3 m) gerechnet. Die Rechenergebnisse wurden jeweils mit vorliegenden Messdaten (Winter 1992/Sommer 1993) der bodennahen langzeitgemittelten Rn-Konzentration verglichen (s. Abschnitt 6.4).

### 6.1 Meteorologische Verhältnisse

Die 3-parametrische Statistik der DWD-Station Gera-Leumnitz hat insgesamt  $37 \times 32 \times 7 = 8288$  Klassen. Diese setzen sich zusammen aus

- 37 Windrichtungsklassen (36 x 10°-Klassen zzgl. umlaufende Winde),
- 32 Windgeschwindigkeitsklassen in 12 m Höhe ü. G. (Kalmen, 0,75 kn und 30 weitere Geschwindigkeitsstufen von 2 bis 31 kn) sowie
- 7 Ausbreitungsklassen (Klug/Manier (I, I, III<sub>1</sub>, III<sub>2</sub>, IV und V) zzgl. der unbekannteren Ausbreitungsklasse).

Um die Statistik mit der Modellkette der GRS verwenden zu können, wurden bei den GRS-Rechnungen folgende Veränderungen an der Statistik vorgenommen:

- Die Kalmen wurden entsprechend der Windrichtungshäufigkeit der Windgeschwindigkeitsklasse 2 (1,5 – 2,5 kn) auf die Windgeschwindigkeitsklasse 1 (0,75 kn) verteilt.<sup>4</sup>
- Die umlaufenden Winde wurden entsprechend ihrer Windgeschwindigkeitsklasse auf die Windrichtungen verteilt.
- Unbekannte Ausbreitungsklassen wurden auf die Ausbreitungsklassen I bis III<sub>1</sub> verteilt (auf die Klasse I bei den niedrigen Geschwindigkeitsstufen 1 bis 4; II: Geschwindigkeitsstufen 5 bis 6; III<sub>1</sub>: höhere Geschwindigkeitsstufen).
- Die 31 Geschwindigkeitsklassen (in kn) wurden auf die 5 Klassen (0-1 m/s), (1-2 m/s), (2-3 m/s), (3-5 m/s) und (über 5 m/s) aufgeteilt.
- Die 36 Windrichtungsklassen (10°-Sektoren) wurden auf 12 Windrichtungsklassen (zu 30°-Sektoren) komprimiert.

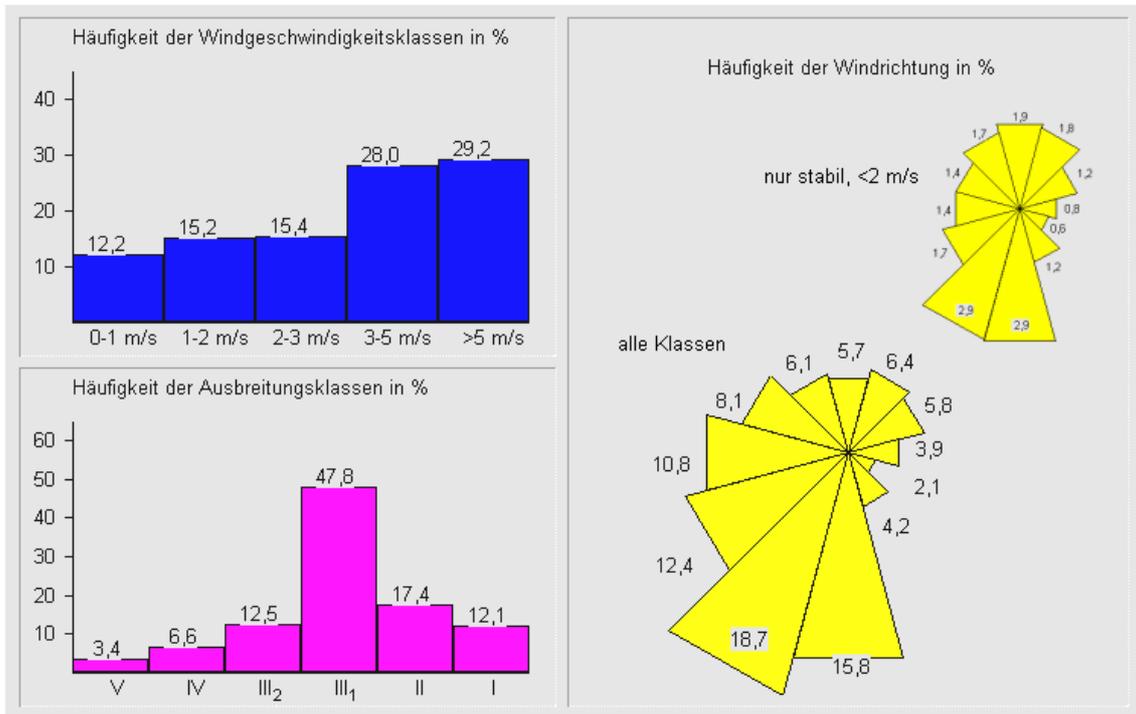
In der Abbildung 6.1 sind die statistischen Verteilungen von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Diffusionskategorie auf die jeweiligen Klassen für die Station Geraleumnitz im Zeitraum 1979-1988 dargestellt. Die meteorologischen Verhältnisse werden danach charakterisiert mit der Hauptwindrichtung aus Südwest und relativ hohen Windgeschwindigkeiten.

Bei stabilen Situationen (Klassen I und II) mit geringen Windgeschwindigkeiten (< 2 m/s) ergibt sich eine leicht veränderte Windrichtungsverteilung mit einem geringeren Anteil von Winden aus westlichen Richtungen und häufigerem Auftreten von Nord- bzw. Nordostwinden.

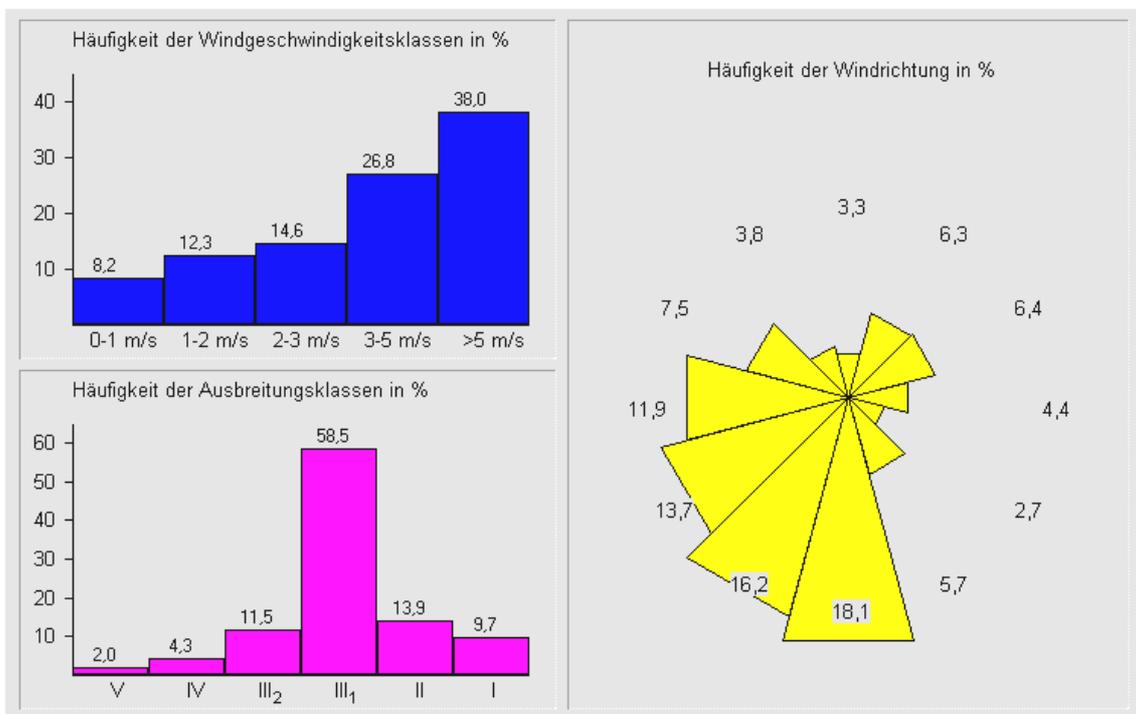
Die Abbildung 6.2 zeigt die entsprechenden Verteilungen für den Zeitraum Winter 1992 bis Sommer 1993.

---

<sup>4</sup> Bei den BS-Rechnungen wurden Kalmen und umlaufende Winde mit gleicher Häufigkeit auf die 36 Windrichtungen verteilt.



**Abb. 6.1** Statistische Verteilung von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Diffusionskategorie auf die jeweiligen Klassen für die Station Gera-Leumnitz im Zeitraum 1979-1988.



**Abb. 6.2** Statistische Verteilung von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Diffusionskategorie auf die jeweiligen Klassen für die Station Gera-Leumnitz im Zeitraum Winter 1992 bis Sommer 1993.

## 6.2 Anpassung der meteorologischen Statistik an den Standort Crossen

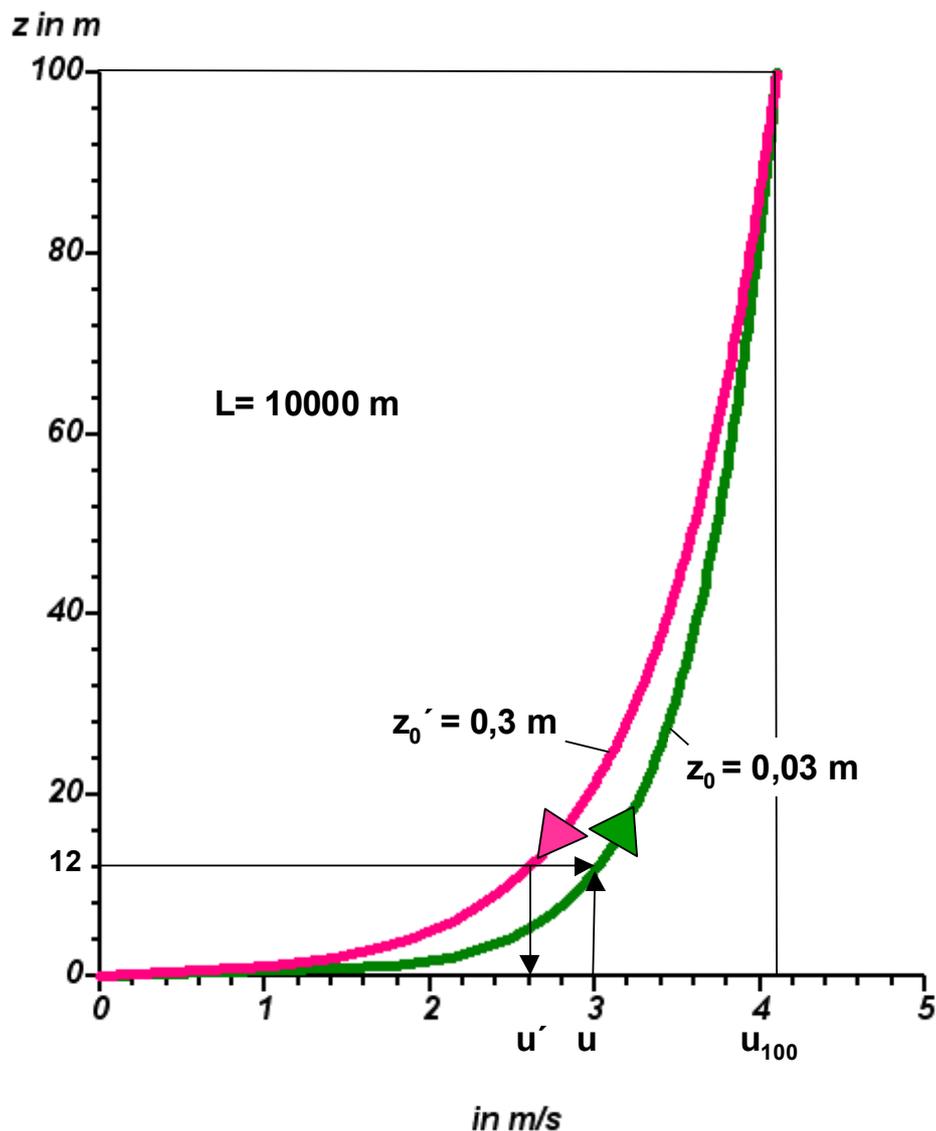
Die meteorologische Statistik der Station Gera-Leumnitz kann aufgrund der unterschiedlichen Standortcharakteristiken nicht ohne weiteres für den Standort Crossen angewendet werden. Da in der Umgebung der DWD-Station Gera-Leumnitz sehr ebenes und flaches Gelände vorherrscht (Flugplatz), wird eine geringe Rauigkeitslänge von etwa 0,03 m unterstellt. Für den Standort Crossen ist die Bodenrauigkeit deutlich höher und liegt im Bereich von 0,1 bis etwa 0,3 m.

Die Anpassung der für die Initialisierung der einzelnen Rechenläufe erforderlichen Windgeschwindigkeiten in 12 m Höhe über Grund erfolgt unter Zuhilfenahme der theoretischen Profilkfunktionen für die Windgeschwindigkeit (siehe Anhang D, Gleichung 2.4).

In der Abbildung 6.3 ist das Verfahren zu Anpassung der Windgeschwindigkeit beim Übergang zu einer anderen Rauigkeitslänge veranschaulicht:

- Mit einer am Standort mit der Rauigkeitslänge  $z_0$  (hier 0,03 m) vorgegebenen Windgeschwindigkeit  $u$  in einer festen Anemometerhöhe über Grund (hier 12 m) und der über Rauigkeitslänge und Ausbreitungsklasse zugeordneten Monin-Obukhov-Länge  $L$  (hier exemplarisch  $L = 10000$  m, entsprechend neutraler atmosphärischer Schichtungsverhältnisse) ist die grün dargestellte Windprofilfunktion festgelegt.
- Mit dieser Profilkfunktion bestimmt man sich den Wert für die Windgeschwindigkeit in einer von Bodeneinflüssen ungestörten Höhe (hier 100 m ü. G.).
- Mit der Rauigkeitslänge  $z_0$  (hier 0,3 m) für den zu betrachtenden Standort und der ggf. angepassten Monin-Obukhov-Länge /TAL 02a/ kann eine neue Profilkfunktion unter Beibehaltung der Windgeschwindigkeit in ungestörter Höhe ermittelt werden (rote Kurve).
- Mit dieser Profilkfunktion kann nun der angepasste Wert für die Windgeschwindigkeit  $u'$  in der Anemometerhöhe (12 m) bestimmt werden.

Die Umrechnung der Windgeschwindigkeitsverteilung auf größere Rauigkeitslängen führt zu niedrigeren Windgeschwindigkeiten in derselben Höhe und somit zu höheren Konzentrationen. Die übrigen Parameter der Ausbreitungsstatistik – insbesondere die Windrichtungsverteilung – wurden unverändert übernommen.



**Abb. 6.3** Anpassung der Windgeschwindigkeit beim Übergang zu einer anderen Rauigkeitslänge.

### 6.3 Statistik GERA-Leumnitz mit Punktquelle

Die Rechnungen mit der meteorologischen Statistik der Station Gera-Leumnitz für eine bodennahe Punktquelle erfolgten für homogenes Gelände mit einer Rauigkeitslänge von 0,3 m. Die Gitterauflösung betrug in der Horizontalen 50 m und das Rechengelände erstreckte sich über eine Fläche von 3 km x 3 km. Es wurden zwei unterschiedliche Quellstärken verwendet. Zum einen zur besseren Vergleichbarkeit mit den Rechnungen in Anhang B der von BS verwendete Wert von 100 kBq/s. Zum anderen ein Wert von 770 kBq/s, der einen Vergleich mit den Rechnungen für die reale Quellgeometrie

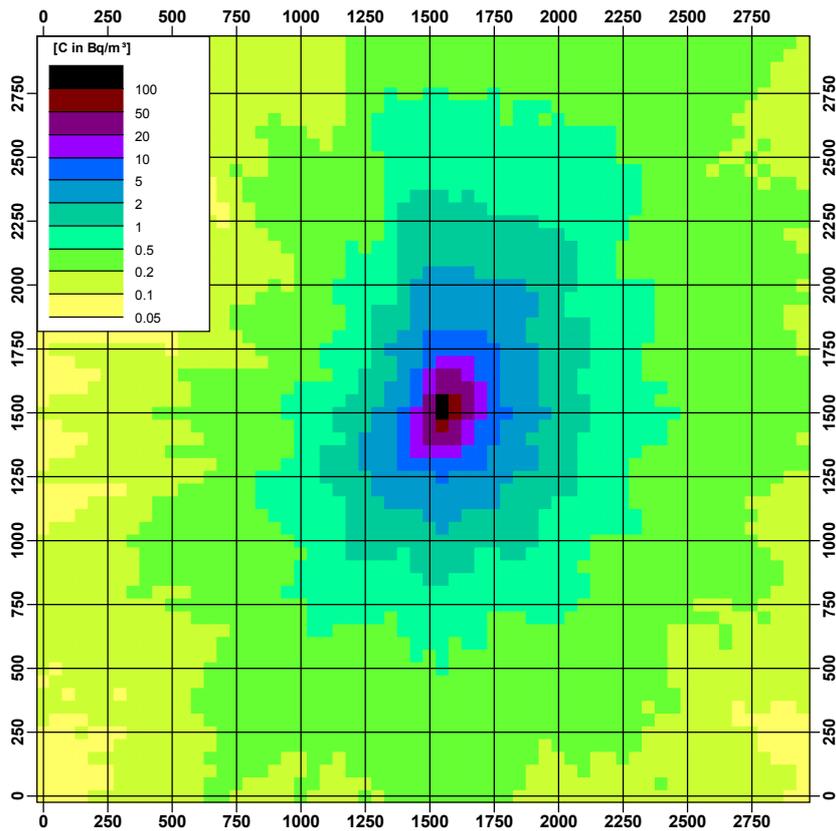
in Abschnitt 6.4 zulässt, d. h. es wurde bei diesem Rechenlauf pro Sekunde die gleiche Menge an Radon emittiert wie bei der realen Flächenquelle.

Die Abbildung 6.4 zeigt die Ergebnisse der Modellierung der langzeitgemittelten Rn-Konzentration für die bodennahe Punktquelle und der auf  $z_0 = 0,3$  m angepassten meteorologischen Statistik von Gera-Leumnitz für die Jahre 1979-1988 bei einer Quellstärke von 100 kBq/s. Die Abbildung 6.5 zeigt die Ergebnisse derselben Rechnung mit der Quellstärke von 770 kBq/s.

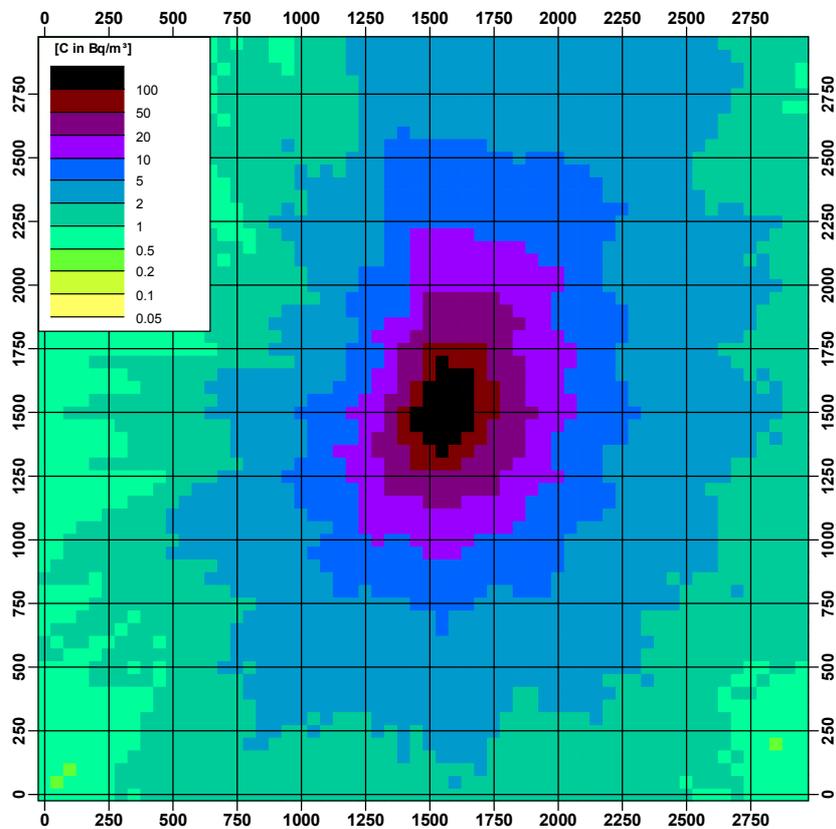
Der direkte Vergleich von Abbildung 6.4 mit Abbildung 38 (oben) aus Anhang B ergibt:

- Die Konturen der Isokonzentrationslinien sind in Abbildung 6.4 nicht so glatt, wie die im Anhang B dargestellten Isokonzentrationslinien. Ursachen dafür liegen zum einen darin, dass die Ergebnisse der GRS-Rechnung nicht interpoliert wurden und somit auch keine Mittelung über die Sektoren (wie bei BS) stattgefunden hat. Die erkennbaren „Strahlen“ in bestimmten Richtungen sind modellbedingt durch die schmalen lateralen Fahnen bei Verwendung der Turbulenzparameterisierung nach VDI (s. Abschnitt 4.4).
- Die Form der horizontalen Verteilung in Abbildung 6.4 ist konform mit der statistischen Verteilung der Windrichtungen nach Abbildung 6.1 (insbesondere für die stabilen Situationen und gleichzeitig geringen Windgeschwindigkeiten). Die Abbildung 38 aus Anhang B zeigt eine geringe azimutale Struktur der Rn-Konzentration. Ursache dafür kann die abweichende Behandlung der Kalmen und umlaufenden Winde sei, die bei den Rechnungen von BS auf alle Richtungen gleich verteilt und bei den Rechnungen der GRS häufigkeitsgewichtet verteilt wurden.
- Sowohl die Maximalkonzentrationen in unmittelbarer Quellnähe als auch der Konzentrationsabfall hin zu größeren Entfernungen werden in beiden Modellrechnungen in etwa gleich wiedergegeben.
- Die Durchmesser der Isokonzentrationslinien der GRS-Rechnung sind in der Regel etwas geringer als die der Rechnung von BS. Das heißt die von BS für einen Aufpunkt ermittelten Konzentrationen sind geringfügig höher.

Die Abbildung 6.5 zeigt qualitativ dieselbe Verteilung der langzeitgemittelten Rn-Konzentration jedoch hier berechnet mit einer um den Faktor 7,7 erhöhten Quellstärke. Bedingt durch die höhere Quellstärke liegen die Konzentrationen in jeder Gitterzelle um den Faktor 7,7 höher als in Abbildung 6.4.



**Abb. 6.4** Langzeitgemittelte Rn-Konzentration Punktquelle,  $Q=100$  kBq/s, 79-88.



**Abb. 6.5** Langzeitgemittelte Rn-Konzentration Punktquelle,  $Q=770$  kBq/s, 79-88.

#### 6.4 Statistik GERA-Leumnitz mit realer Flächenquelle

Die GRS-Rechnungen für die reale Flächenquelle unter Berücksichtigung der tatsächlichen Objektumrisse wurden mit zwei verschiedenen meteorologischen Statistiken (1979-1988 bzw. Winter 1992/Sommer 1993) und zwei verschiedene Rauigkeitslängen (0,1 m und 0,3 m) durchgeführt und mit parallel vorliegenden Messdaten der bodennahe langzeitgemittelten Rn-Konzentration verglichen.

Die Vorgaben für die Quellstärken und Objektumrisse wurden von BS bereitgestellt; sie sind analog zu den Werten im Anhang B, Abschnitt 4.3. Es wurde für zwei getrennte Quellen (Halde und Haldenumfeld) mit einer Gesamtquellstärke von 770 Bq/s gerechnet. Die Messwerte für die langzeitgemittelte Rn-Konzentration der Periode Winter 1992 bis Sommer 1993 sind ebenfalls den Angaben in Anhang B entnommen und beruhen auf Messungen im Rahmen des Basismonitorings der WISMUT GmbH /WIS 94/.

Die Abbildung 6.6 zeigt die mit den realen Objektumrissen und den Quellstärken nach Anhang B, (Halde mit 720 Bq/s, Haldenumfeld mit 50 Bq/s) ermittelte bodennahe Verteilung der langzeitgemittelten Rn-Konzentration. Grundlage war die mit einer Rauigkeitslänge von  $z_0=0,3$  m an den Standort Crossen angepasste Statistik der DWD-Station Gera-Leumnitz für den Zeitraum 1979 bis 1988 (s. Abschnitte 6.1 und 6.2).

Zusätzlich dargestellt ist in der Abbildung, die Lage der für die Untersuchungen herangezogenen Messstationen der Wismut und deren Bezeichnung im Basismonitoring.

Aus dem direkten Vergleich mit den Rechnungen für die Punktquelle und ansonsten gleichen Ausbreitungsbedingungen (s. Abbildung 6.5) ergibt sich, dass

- die Verteilung in Abbildung 6.6 aufgrund der räumlichen Erstreckung der Quelle(n) deutlich glatter ist,
- die Verteilungen in Quellnähe Unterschiede in der Maximalkonzentration (über 3000 Bq/m<sup>3</sup> in der Zelle in der die Punktquelle liegt und ca. 162 Bq/m<sup>3</sup> als Maximalwert auf der Flächenquelle) und in der flächenhaften Verteilung aufweisen und
- sich die Verteilungen in größerer Quellentfernung immer weiter angleichen und der Einfluss der Quellgeometrie zurückgeht.

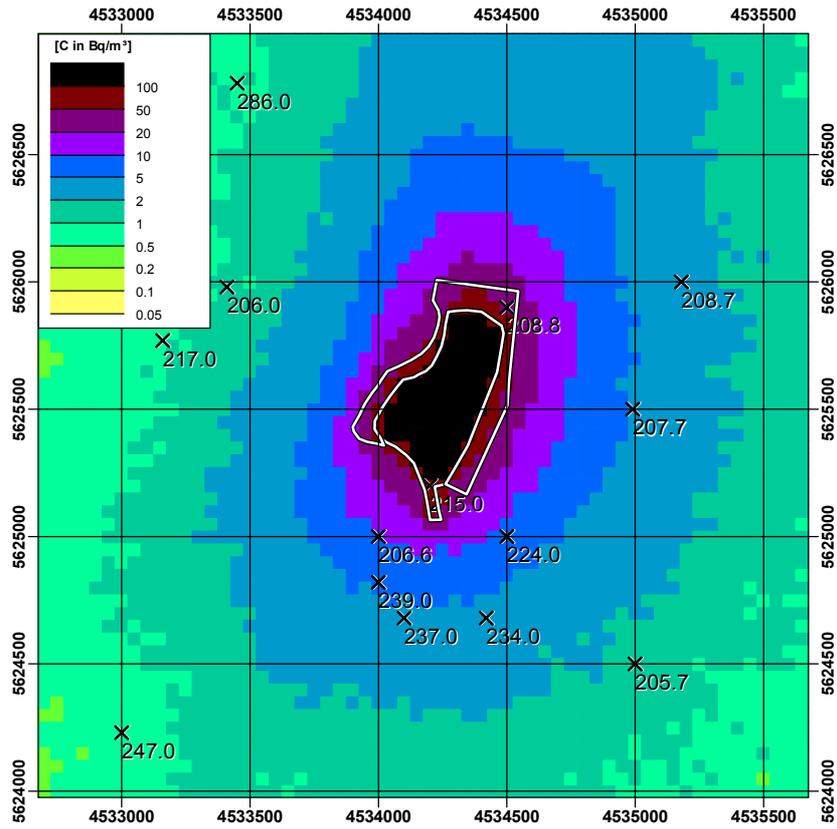


Abb. 6.6 Langzeitgemittelte Rn-Konzentration Flächenquelle,  $Q=770$  kBq/s, 79-88.

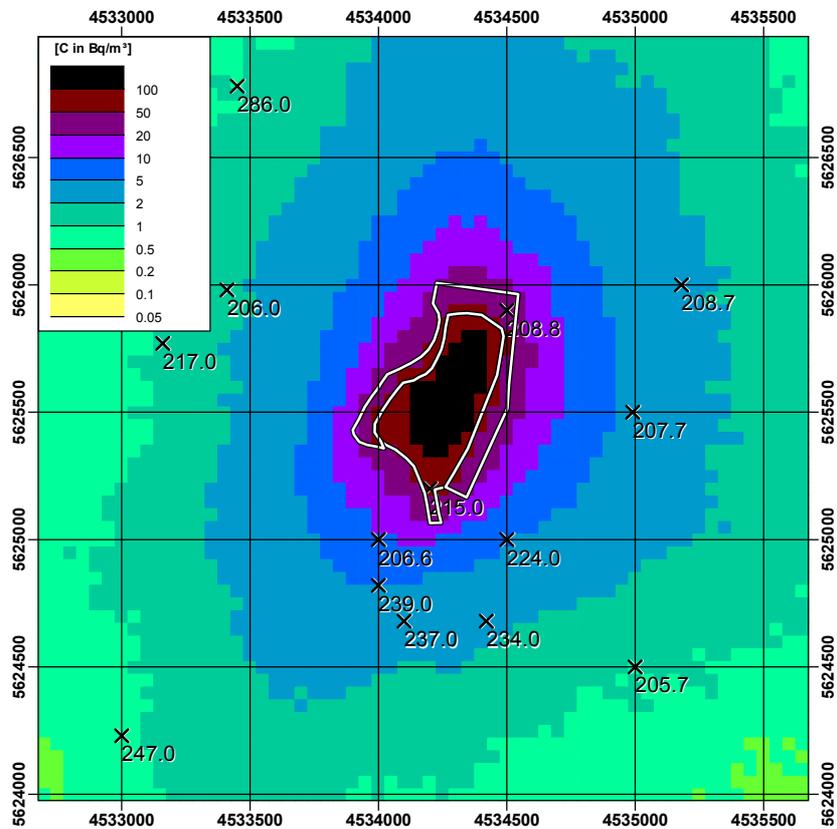


Abb. 6.7 Langzeitgemittelte Rn-Konzentration Flächenquelle,  $Q=770$  kBq/s, 92/93.

Abbildung 6.7 zeigt die Ergebnisse der Rechnungen mit der Verwendung der meteorologischen Statistik für den Zeitraum Winter 1992 bis Sommer 1993 und ansonsten gleichen Randbedingungen.

Die Isokonzentrationslinien in beiden Abbildungen haben aufgrund der unterschiedlichen meteorologischen Verhältnisse in den beiden Zeiträumen einen abweichenden Verlauf (s. auch Abbildungen 6.1 und 6.2). Die Maximalkonzentration auf der Halde ist im Zeitraum 1992/1993 mit ca. 120 Bq/m<sup>3</sup> deutlich geringer als bei der Verwendung der meteorologischen Daten von 1979 bis 1988. Ursache hierfür ist die geringere Häufigkeit stabiler Wettersituationen in im Zeitraum 1992/1993 verbunden mit einer geringen Häufigkeit für niedrige Windgeschwindigkeiten.

Neben der meteorologischen Datenbasis ist die Rauigkeitslänge, die zur Anpassung der meteorologischen Statistik und zur Bestimmung anderer Grenzschichtparameter benötigt wird, eine weitere wichtige Größe bei der Ausbreitungsmodellierung. Die Abbildung 6.8 zeigt einen Bildschirmausdruck des Programmes RL\_INTER zur interaktiven Bestimmung der Rauigkeitslänge nach dem Verfahren der neuen TA-Luft /TAL 02a/ und /TAL 02b/ im Umkreis von 3 km um die Halde Crossen. Das Verfahren gibt einen Wert von 0,23 m an, der etwas unterhalb des, in den bisherigen Rechnungen verwendeten Wert von 0,3 m liegt. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese Rauigkeitslänge maßgeblich durch den südöstlich der Halde gelegenen Ortsteil Crossen bestimmt wird. Nach den Abbildungen 6.1 und 6.2 kommt aus dieser Richtung (insbesondere bei den wichtigen stabilen und windschwachen Situationen) nur sehr selten der Wind. Das bedeutet, dass die für die Ausbreitungsrechnungen wirksame Rauigkeitslänge deutlich unterhalb des Wertes von 0,2 m liegt.

Die Abbildung 6.9 zeigt dementsprechend die Ergebnisse der Berechnung der langzeitgemittelten bodennahen Rn-Konzentration unter Verwendung der meteorologischen Statistik für den Zeitraum Winter 1992 bis Sommer 1993 und einer Rauigkeitslänge  $z_0 = 0,1$  m.

Im direkten Vergleich mit den Rechnungen für die größere Rauigkeitslänge von 0,3 m (s. Abbildung 6.7) ergeben sich deutlich höhere Werte für die Konzentrationen an den Messpunkten (siehe Tabelle 6.1). Die Maximalkonzentration über der Halde beträgt ca. 148 Bq/m<sup>3</sup>.

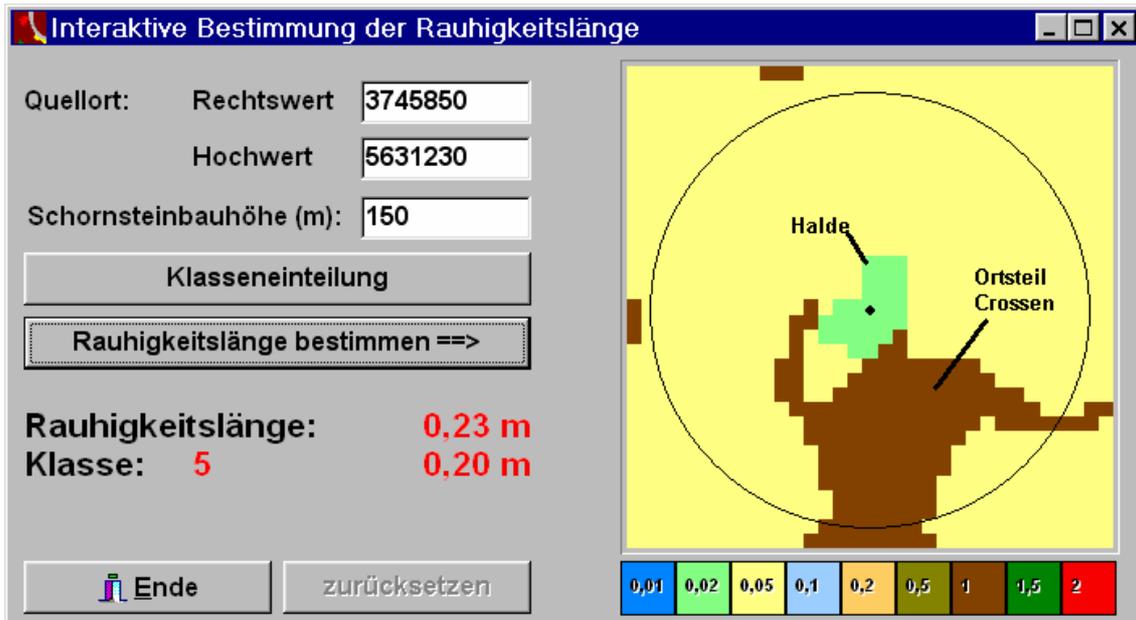


Abb. 6.8 Interaktive Bestimmung der Rauhigkeitslänge nach dem Verfahren der neuen TA-Luft /TAL 02b/.

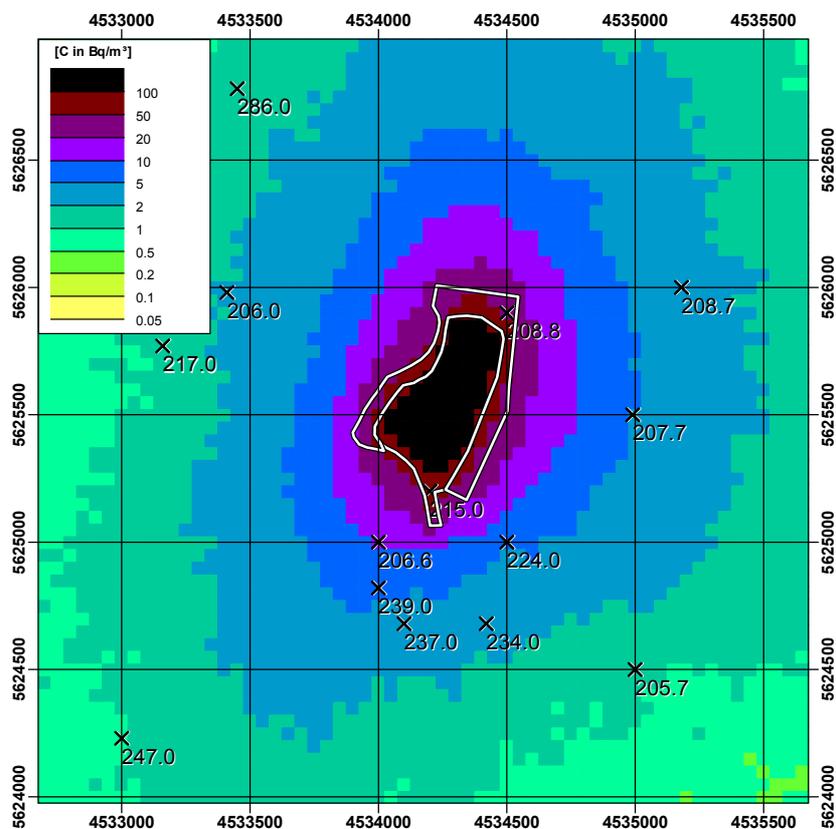


Abb. 6.9 Langzeitgemittelte Rn-Konzentration Flächenquelle,  $z_0=0,1$  m, 92/93.

## 6.5 Bewertung

In der Tabelle 6.1 sind die aus Anhang B entnommenen Mittelwerte für die langzeitgemittelten Konzentrationswerte für den Zeitraum Winter 1992 bis Sommer 1993 an den jeweiligen Messstationen angegeben. Zusätzlich sind die Ergebnisse der entsprechenden Modellierung von BS aus Anhang B und die Ergebnisse der Modellierung der GRS mit den in Abschnitt 6.4 beschriebenen Variationen der Eingabeparameter aufgeführt. Die Ergebnisse einer von BS zusätzlich durchgeführten Modellierung unter Berücksichtigung weiterer Quellen in der Umgebung der Halde Crossen sind in der Tabelle 6.1 nicht aufgeführt und können dem Anhang B entnommen werden. GRS-A, B und C bezeichnen die Ergebnisse der in Abschnitt 6.4 beschriebenen Modellierungen für eine Rauigkeitslänge von 0,3 m und die meteorologische Statistik für den Zeitraum 1979-1988 (A), eine Rauigkeitslänge von 0,3 m und die meteorologische Statistik Winter 1992/Sommer 1993 (B), sowie die Rauigkeitslänge von 0,1 m und die meteorologische Statistik Winter 1992/Sommer 1993 (C). Zusätzlich sind in der Tabelle die Mittelwerte für die aus der Differenz zu den Messwerten berechnete geogene Hintergrundkonzentration sowie deren Standardabweichung angegeben. Der Vergleich der Ergebnisse von Rechnung GRS-A mit den Messwerten ist nur bedingt möglich, da die Messungen in einem Zeitraum mit abweichenden meteorologischen Verhältnissen durchgeführt wurden.

Es zeigt sich, dass

- am Messpunkt 208.8 die hohe gemessene Konzentration aufgrund möglicher lokaler Inhomogenitäten der Rn-Exhalationsrate bzw. lokaler Besonderheiten des Windfeldes von keinem Modellierungsansatz (BS bzw. GRS) richtig beschrieben wird (s. dazu Anhang B),
- die GRS-Rechnungen mit geringerer Rauigkeit zu höheren Rn-Konzentrationen führen,
- bei den höheren Konzentrationswerten im Nahfeld um die Halde die berechneten Werte je nach Modell- und Parameterwahl um etwa 30 % schwanken,
- bei größeren Abständen von der Quelle die relativen Abweichungen zwischen GRS- und BS-Rechnungen (bei deutlich geringeren Konzentrationswerten) größer sind und

- die Differenzen zwischen Mess- und Rechenwerten mit ca. 20 bis 30 Bq/m<sup>3</sup> im Bereich der geogenen Hintergrundkonzentration zuzüglich ggf. nicht berücksichtigter schwächerer Quellen liegen. In Anhang B wurden für einen genaueren Vergleich von Rechen- und Meßwerten auch die Beiträge von anderen relevanten Rn-Quellen des Standortes Crossen zur Rn-Konzentration in der Umgebung der Bergehalde berechnet, die insbesondere im Süden der Bergehalde nicht zu vernachlässigen sind (siehe Abbildung 48 in Anhang B).
- die in Abschnitt 5.4 identifizierten zu schmalen Fahnen bei der Verwendung der Turbulenzparameterisierung nach /VDI 01/ bei der Berechnung einer langzeitgemittelten Konzentrationsverteilung nur eine untergeordnete Rolle spielen.

**Tab. 6.1** Messwerte und Rechenergebnisse an den Messstellen der Wismut GmbH für den Zeitraum Winter 1992 bis Sommer 1993

Mess-Punkt	RW in m	HW in m	C-Mess 92/93 in Bq/m <sup>3</sup>	BS 92/93, 0,3m in Bq/m <sup>3</sup>	GRS-C 92/93, 0,1m in Bq/m <sup>3</sup>	GRS-B 92/93, 0,3m in Bq/m <sup>3</sup>	GRS-A 79-88, 0,3m in Bq/m <sup>3</sup>
205.7	4535000	5624500	31,0	2,4	1,4	1,0	1,4
206.0	4533410	5625980	22,0	3,2	2,1	1,6	1,1
206.6	4534000	5625000	56,5	10,3	11,0	8,9	8,5
207.7	4534990	5625500	30,0	6,9	4,7	4,1	4,4
208.7	4535180	5626000	37,5	4,2	3,3	2,6	2,8
<b>208.8</b>	<b>4534500</b>	<b>5625900</b>	<b>106,5</b>	<b>48,3</b>	<b>42,4</b>	<b>36,7</b>	<b>49,3</b>
215.0	4534200	5625200	100,5	84,3	78,4	66,8	93,2
217.0	4533160	5625770	28,5	2,6	1,2	1,0	1,0
224.0	4534500	5625000	22,0	8,9	6,0	5,2	7,5
234.0	4534420	5624680	48,5	4,2	3,3	2,5	4,0
237.0	4534100	5624680	36,5	4,4	3,9	3,3	4,3
239.0	4534000	5624820	48,5	6,0	5,6	4,9	5,3
247.0	4533000	5624230	25,5	1,6	0,9	0,9	0,8
286.0	4533450	5626780	17,0	1,7	1,2	1,0	0,8
Differenz Mess/ Rechenwert	Mittelwert			27,9	29,3	30,8	28,4
	Standardabweichung			10,8	9,9	10,0	11,7

Eine weitergehende Bewertung der Rechnungen im Vergleich mit den Messwerten ist in Anbetracht der Unsicherheiten

- bei der Spezifikation der Quellstärke, z. B. hinsichtlich der Annahme horizontal homogener und stationärer (von den meteorologischen Bedingungen unabhängiger) Exhalationsraten,

- durch die Annahme horizontal homogener Ausbreitungsverhältnisse im gesamten Rechengebiet, das in der Realität durch die Talstruktur der Zwickauer Mulde geprägt ist,
- durch die nicht näher spezifizierte Ungenauigkeit der langzeitgemittelten Rn-Messwerte und
- bei der Bestimmung der tatsächlichen Bodenrauigkeit

nicht möglich. Die Übertragbarkeit beider Modellansätze auf reale meteorologische Situationen und Objektformen scheint im Rahmen der diskutierten Fehlerbandbreiten bei den Parametern gegeben.

## 7 Ergebnisse und Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit der Modellierung der Ausbreitung von Radon und Schwebstaub aus bodennahen Flächenquellen stellt sich die Frage, mit welcher Parameterisierung der atmosphärischen Turbulenz die bodennahe Schadstoffverteilung im Umfeld der Emissionsstelle realistisch ermittelt werden kann. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde dieser Fragestellung durch die Kombination von Windkanalexperimenten und begleitenden numerischen Ausbreitungsmodellierungen nachgegangen. Den Ausbreitungsrechnungen lagen gebräuchliche Modellansätze zugrunde (Euler-Modell mit vertikalem Diffusionskoeffizienten nach Mischungswegansatz (BS); LASAT Version 2.8, Standard-Grenzschichtmodell (Version 2.1) (IBL); GRS-Version von LASAT mit Turbulenzparameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8 (GRS)). Damit wurden dreidimensionale Konzentrationsverteilungen für unterschiedliche Randbedingungen berechnet und mit experimentellen Daten aus dem Windkanal verglichen.

Die Windkanalexperimente und die Modellierungen wurden für ebenes Gelände bei neutralen Schichtungsverhältnissen für unterschiedliche Quellkonfigurationen und verschiedene Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Dabei wurde eine für die Gebiete mit bergbaulichen Hinterlassenschaften in den Bundesländern Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt typische Bodenrauigkeit im Bereich von etwa 0,1 m festgelegt.

Die im Rahmen des Modellvergleichs erzielten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ausgangspunkt war, dass der Windkanal belastbare Referenzwerte für die untersuchte Ausbreitung bei neutraler Schichtung liefert. Die Ausbreitungsexperimente im Windkanal basieren – nach gängigen Vorstellungen über die turbulente Grenzschicht bei voll entwickelter turbulenter Strömung und einer gegenüber der Advektion vernachlässigbaren longitudinalen Diffusion – auf dem Ansatz, dass die Konzentration mit der reziproken Windgeschwindigkeit skaliert. Messungen mit geringer Windgeschwindigkeit, z. B.  $u_{10} = 1$  m/s, für die deutliche Abweichungen zwischen den Modellansätzen zur vertikalen Diffusion von BS auf der einen und GRS/IBL auf der anderen Seite bestehen, wurden nicht durchgeführt.
- Die  $1/u$ -Abhängigkeit in den Konzentrationsverteilungen wird nicht von allen Ausbreitungsmodellen in Kombination mit der Turbulenzparameterisierung wiedergegeben: Bei beiden Partikel-Modellen mit dem Standard-Grenzschichtmodell (Version 2.1 aus LASAT 2.8) bzw. nach VDI 3783, Blatt 8 skaliert die Konzentrationen mit

$1/u$ . Dagegen ergeben die Ausbreitungsrechnungen mit dem Euler-Modell und einem vertikalen Diffusionskoeffizienten nach dem Mischungswegansatz (BS) Konzentrationsverteilungen, die mit  $1/u^a$  skalieren, wobei  $a > 1$  ist. Dieses unterschiedliche Verhalten ergibt sich, weil sich mit dem Mischungswegansatz vertikale Diffusionskoeffizienten  $K_z$  ergeben, die stärker als proportional zur Schubspannungsgeschwindigkeit variieren, wohingegen bei den beiden anderen Parameterisierungen die Diffusionskoeffizienten eine strenge  $u_*$ -Proportionalität aufweisen.

- Die mit den drei Ausbreitungsmodellen in Kombination mit der jeweiligen Turbulenzparameterisierung berechneten Konzentrationsverteilungen zeigen insgesamt eine Spannweite, die im Wesentlichen die Bandbreite der eingesetzten Turbulenzparameterisierungen widerspiegelt.
- Der Typ des Ausbreitungsmodells (Partikel-Modell, Euler-Modell) spielt eine untergeordnete Rolle gegenüber der Turbulenzparameterisierung.
- Hinsichtlich der querwindintegrierten Konzentration, der lateralen Konzentrationsverteilung und der bodennahen Konzentrationsverteilung unter der Fahnenachse ergeben sich folgende Abweichungen und Übereinstimmungen bei den verwendeten Turbulenzparameterisierungen
  - Die Betrachtung der **querwindintegrierten Konzentration** bietet den Vorteil, dass hier nur die vertikale Diffusion wirksam ist; Effekte durch unterschiedliche Parameterisierungen der lateralen Diffusion, d. h. quer zur Ausbreitungsrichtung, werden vermieden. - Die Auswertung der im Windkanal gemessenen Konzentrationen in Bodennähe zeigt, dass die in VDI 3783, Blatt 8, formulierten Turbulenzparameter zur Beschreibung der vertikalen Diffusion die experimentell ermittelten Werte am besten treffen. Die Parameterisierung in LASAT 2.8 liefert, ähnlich wie die BS-Parameterisierung ( $u_{10} = 5$  m/s), eine im Vergleich dazu weniger gute Übereinstimmung, während die BS-Parameterisierung ( $u_{10} = 1$  m/s) die stärksten Abweichungen von den Messwerten aufweist, wenn man von der Richtigkeit der angenommenen Skalierbarkeit der Messwerte mit  $1/u$  ausgeht.
  - In die **laterale Konzentrationsverteilung** geht direkt die turbulente Diffusion quer zur Ausbreitungsrichtung ein. – Die im Windkanal gemessenen lateralen bodennahen Konzentrationsverteilungen werden von den Ausbreitungsrechnungen mit der Turbulenzparameterisierung in LASAT 2.8 am besten getroffen. Die in der VDI 3783, Blatt 8, formulierten Turbulenzparameter zur Be-

schreibung der turbulenten Diffusion quer zur Ausbreitungsrichtung liefern dagegen deutlich zu schmale Konzentrationsverteilungen. BS hat bei seinen Modellrechnungen die laterale Diffusion an die im Windkanal gemessenen Konzentrationsverteilungen angepasst; aus diesem Grunde kann diesbezüglich keine von den Experimenten unabhängige Bewertung vorgenommen werden. Es sei jedoch angemerkt, dass gemäß Anhang B auch die Parametrisierung nach Pasquill-Gifford sehr gut mit den Messergebnissen übereinstimmt, wogegen die Parametrisierung nach TA-Luft eine viel zu große horizontale Diffusion ergibt.

- In die **bodennahe Konzentrationsverteilung unter der Fahnenachse** gehen sowohl die laterale als auch die vertikale Diffusion ein. Dies spiegelt sich in den Modellrechnungen wider: Obgleich die Parameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8, die vertikale Diffusion am besten trifft, ergeben sich mit dem VDI-Ansatz insgesamt die höchsten Konzentrationen unter der Fahnenachse und damit die stärksten Abweichungen von den im Windkanal gemessenen Konzentrationen. D. h. die schwache laterale Diffusion verhindert die Ausbildung einer breiteren Fahne mit entsprechend geringeren Konzentrationen unter der Fahnenachse. Mit der Parameterisierung in LASAT 2.8 ergeben sich zwar Konzentrationsverläufe, die näher an den Messwerten liegen; allerdings ergibt sich hier ebenfalls eine deutliche Überschätzung. Die mit dem BS-Modell berechneten Konzentrationen unter der Fahnenachse überschätzen ebenfalls deutlich die Messwerte; dabei ist wieder zu berücksichtigen, dass in diese Rechnungen die aus den Windkanalexperimenten abgeleiteten lateralen Fahnenbreiten eingegangen sind, wodurch eine diesbezügliche Bewertung nur bedingt möglich ist.

In einem weiteren Teil des Forschungsvorhabens wurde die Anwendung der Ausbreitungsmodelle mit den entsprechenden Turbulenzparameterisierungen auf reale meteorologische Verhältnisse untersucht. Dafür wurden für die reale Situation am Standort der Halde Crossen unter Berücksichtigung einer 3-parametrischen Wetterstatistik und u. a. für konkrete Objektumrisse Ausbreitungsrechnungen mit den Modellansätzen der GRS und von BS vorgenommen. Die Modellergebnisse wurden – unter Beachtung der geogenen Hintergrundkonzentrationen – mit Feldmesswerten verglichen.

Dabei schwankten die höheren Konzentrationswerte im Nahfeld um die Halde je nach Modell- und Parameterwahl um etwa 30 %. Bei größeren Abständen von der Quelle waren die Abweichungen (bei deutlich geringeren Konzentrationswerten) größer.

Die Unterschiede in den Parameterisierungen für die laterale Diffusion (Abschnitt 5.4) spielten bei der Berechnung einer langzeitgemittelten Konzentrationsverteilung in der Umgebung einer großen Flächenquelle wegen der damit verbundenen Mittelungseffekte eine untergeordnete Rolle.

Eine weitergehende Bewertung der Rechnungen im Vergleich mit den Messwerten ist in Anbetracht der Unsicherheiten

- bei der Spezifikation der Quellstärke, z. B. hinsichtlich der Annahme horizontal homogener und stationärer (von den meteorologischen Bedingungen unabhängigen) Exhalationsraten,
- durch die Annahme horizontal homogener Verhältnisse im gesamten Rechengebiet, das in der Realität durch die Talstruktur der Zwickauer Mulde geprägt ist,
- durch die nicht näher spezifizierte Ungenauigkeit der langzeitgemittelten  $R_n$ -Messwerte und
- bei der Bestimmung der tatsächlichen Bodenrauigkeit

nicht möglich.

Die Übertragbarkeit beider Modellansätze (GRS und BS) auf reale meteorologische Situationen und Objektformen scheint im Rahmen der diskutierten Fehlerbandbreiten bei den Parametern gegeben.

Die Untersuchungen des Forschungsvorhabens beschränkten sich auf neutrale Schichtungsverhältnisse und horizontal homogene Bedingungen. Bei der Bestimmung von realen Ausbreitungsklimatologien spielen stabile Schichtungsverhältnisse in Verbindung mit orographischen Einflüssen eine große Rolle. Weiterführende Untersuchungen sollten deshalb speziell solche Situationen berücksichtigen

## **Empfehlung**

Unter Beachtung der vorgenannten Ergebnisse des Forschungsvorhabens und unter den Randbedingungen

- der Beschreibung der Verfahren zur Turbulenzparameterisierung in einer entsprechenden VDI-Richtlinie /VDI 01/ und begutachteten Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift /KER 00/,
- der Vorgaben der neuen TA-Luft (Anhang 3, Ausbreitungsrechnung) /TAL 02a/, die unter anderem den Einsatz der Turbulenzparameterisierung nach /VDI 01/ vorsieht,
- und einer anzustrebenden einheitlichen Vorgehensweise bei der Modellierung der Schadstoffausbreitung sowohl bei konventionellen als auch bei radioökologischen Anwendungen

empfeht sich grundsätzlich die Verwendung der Verfahren zur Turbulenzparameterisierung nach /VDI 01/. In diesem Zusammenhang ist zu erwägen, ob die während der Laufzeit des Forschungsvorhabens in Workshops des Umweltbundesamtes mit dem Länderausschuss für Immissionsschutz entwickelten, erprobten, verabschiedeten und veröffentlichten Modellansätze für Ausbreitungsrechnungen im Rahmen der TA-Luft /TAL 02b/ nicht sinngemäß für die hier in Frage stehende Modellierung der Radonfreisetzung aus bodennahen Flächenquellen Anwendung finden sollten. Diese Einschätzung wurde in Diskussionen mit den Unterauftragnehmern IBL und der Universität Hamburg entwickelt. Ggf. erforderliche Anpassungen lassen sich relativ einfach durchführen, da der Sourcecode von AUSTAL2000 allgemein verfügbar ist /TAL 02b/.

Davon abweichend hält der Unterauftragnehmer Brenk-Systemplanung GmbH (BS) diese Empfehlung zum gegenwärtigen Zeitpunkt für nicht gerechtfertigt:

Neben der erheblichen Abweichung des Ansatzes von /VDI 01/ für die horizontale Diffusion im Vergleich zu den Messergebnissen der Windkanalexperimente wird vermerkt, dass die  $1/u$ -Skalierung in den Windkanalexperimenten nur für Windgeschwindigkeiten  $\geq 2$  m/s gezeigt wurde, wogegen verschiedene empirische Modelle Abweichungen von diesem Verlauf bei geringen Windgeschwindigkeiten zeigen. Die aktuellen Windkanalexperimente beschränkten sich zudem auf den Fall der neutralen atmosphärischen Schichtung, der in der Realität zwar relativ häufig ist, jedoch nur einen geringen Anteil an den Langzeitmittelwerten der Rn-Konzentration in der Umgebung bodennaher Rn-Quellen bewirkt. Maßgeblich sind diesbezüglich die Situationen mit stabiler atmosphärischer Schichtung.



## 8 Literatur

- /AVV 90/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung:  
Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe  
aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen.  
Bundesanzeiger vom 31.03.1990
- /BLA 62/ Blackadar, A.:  
The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere.  
J. Geophys. Res., Vol. 67, pp. 3095 – 3102, 1962
- /CAR 92/ Carruthers, D.J. et al.:  
UK Atmospheric Dispersion Modelling System (UK-ADMS),  
Appendix A: Boundary Layer Structure  
in: Air Pollution Modelling and its Application IX. (Eds. H. van Dop, G. Kallos), Plenum Press, New York, p.15-28, 1992
- /CAR 93/ Carruthers, D.J.; W.S. Weng:  
UK Atmospheric Dispersion Modelling System (UK-ADMS).  
Boundary layer structure specification document UK ADMS 1.0;  
P09/01L/93; 30.12.1993, from UK-ADMS 1.3 Technical Specification
- /ETL 86/ Etling, D.; H.W. Detering, M. Wamser:  
Parameterisierung turbulenter Flüsse in mesoskaligen Simulationsmodellen: Eine Fallstudie mit Schließungsansätzen erster Ordnung.  
Meteorol. Rdsch., 39, pp. 178 – 188, 1986
- /FIE 72/ Fiedler, F.:  
The effect of baroclinicity on the resistance law in a diabatic Ekman layer.  
Beitr. Phys. Atmos., Vol. 45, pp. 164 – 173, 1972

- /FOK 90/ Foken, T.:  
Turbulenter Energieaustausch zwischen Atmosphäre und Unterlage – Methoden, messtechnische Realisierung sowie ihre Grenzen und Anwendungsmöglichkeiten.  
Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Band 180, Offenbach am Main, 1972
- /HAN 90/ Hanna, S.R.; D.G. Strimaitis:  
Rugged Terrain Effects on Diffusion.  
in: Atmospheric Processes over Complex Terrain (ed. W. Blumen), Meteorological Monographs, Vol. 23, No. 45, Boston: American Meteorological Society, 1990
- /JAN 98a/ Janicke, L.:  
LASAT 2.8 – Modellbeschreibung, Version 2.8  
Ingenieurbüro Janicke, Gesellschaft für Umweltphysik, Dunum, 1998
- /JAN 98b/ Janicke, L.:  
Ausbreitungsmodell LASAT – Arbeitsbuch.  
Ingenieurbüro Janicke, Gesellschaft für Umweltphysik, Dunum, 1998
- /JUN 99/ Jung, H.J.:  
AIRPOL/L – Modell zur Berechnung der Ausbreitung von Schadstoffen  
Handbuch, Version 3.1  
Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) mbh, Ottobrunn, 1999
- /KER 00/ Kerschgens, M.J.; Martens, R.; Nölle, C.:  
Comments on turbulence parameters for the calculation of dispersion in the atmospheric boundary layer.  
Meteorol. Zeitschrift., Vol. 9, pp. 155 – 163, 2000
- /MAS 93/ Maßmeyer, K. et al.:  
Untersuchungen zur Verifizierung von komplexen Modellen zur Beschreibung des Schadstofftransportes in der Atmosphäre – Abschlußbericht zum Vorhaben RS 816.  
GRS-A-1985, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, 1993

- /MIK 84/ Mikkelsen, T., S.E. Larsen, S. Thykier-Nielsen:  
Description of the Risø Puff Diffusion Model.  
Nucl. Techn. 67, pp. 56 – 65, 1984
- /OLE 98a/ Olesen, H.R.:  
Tools for model evaluation.  
in: S.-E. Gryning and N. Chaumerliac (eds.), Air pollution modeling and its application XII, Vol. 22, pp. 665-672, Plenum Press, New York, 1998
- /OLE 98b/ Olesen, H.R.:  
Model validation kit – Status and outlook.  
5. International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Rhodes, Greece, 18.-21. May 1998,  
pp. 63-70, National Centre for Scientific Research „Demokritos“, Athens, 1998
- /PAN 84/ Panofsky, H.A.; J.A. Dutton:  
Atmospheric turbulence – Models and methods for engineering applications.  
John Wiley and Sons, New York, 1984
- /PAS 71/ Pasquill, F.:  
Atmospheric dispersion of pollution.  
Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 97, pp. 369 – 395, 1971
- /PAS 83/ Pasquill, F.; F.B. Smith, F.B.:  
Atmospheric diffusion – Study of the dispersion of windborne material from industrial and other sources.  
Ellis Horwood Series in Environmental Science,  
John Wiley and Sons, New York, 1983
- /ROE 94/ Roedel, W.:  
Physik unserer Umwelt - Die Atmosphäre.  
Springer Verlag, Berlin, 1994

- /SCH 97/ Schlichting, H.; Gersten, K.:  
Grenzschicht-Theorie.  
Springer Verlag, Berlin, 1997
- /SNY 81/ Snyder; W.H.:  
Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion.  
Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 1981
- /SUT 49/ Sutton, O. G.:  
Atmospheric Turbulence.  
Methuen's Monographs on Physical Subjects, London, 1949
- /STU 88/ Stull, R.:  
An introduction to boundary layer meteorology.  
Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988
- /TAL 86/ Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA-Luft) vom 27.02.1986, GMBI. Ausg. A, Bonn, 28.02.1986, S. 93 – 144
- /TAL 02a/ Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002.  
Gemeinsames Ministerialblatt vom 30. Juli 2002 (GMBI. 2002, Heft 25 – 29, S. 511 – 605); <http://www.bmu.de/download/dateien/taluft.pdf>
- /TAL 02b/ AUSTAL2000, Ausbreitungsprogramm zum Anhang 3 „Ausbreitungsrechnung“ der neuen Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft.  
<http://www.austal2000.de/austal2000.htm>,  
<http://www.grs.de/austal/>
- /TOW 56/ Townsend, A. A.:  
The Structure of Turbulent Shear Flow. Cambridge.  
Univ. Press, Cambridge, England, 1956

- /VDI 00/ Verein Deutscher Ingenieure  
Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht.  
Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN,  
VDI-Richtlinie 3783, Blatt 12, 2000, Umweltmeteorologie im VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b.
- /VDI 01/ Verein Deutscher Ingenieure  
Umweltmeteorologie, Messwertgestützte Turbulenzparameterisierung für Ausbreitungsmodelle.  
Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN,  
VDI 3783, Blatt 8, Entwurf, Düsseldorf, Dezember 2001
- /WIS 94/ Wismut GmbH:  
Wismut Umweltatlas: Umgebungsüberwachung natürliche Radioaktivität der Standorte im Freistaat Sachsen 1993, Teil 1: Luftpfad/Bodenpfad, Immission, Emission, Wismut GmbH, Abt. Umweltmonitoring, 1994
- /ZAN 90/ Zannetti, P.:  
Air pollution modeling – Theories, computational methods and available software.  
Van Nostrand Reinhold, New York, 1990



## **Verteiler**

### **Bundesamt für Strahlenschutz**

Abteilung AS 1.2 5 x

### **Unterauftragnehmer**

Brenk Systemplanung GmbH, Aachen 2 x

Universität Hamburg, Meteorologisches Institut 2 x

Ingenieurbüro Lohmeyer, Karlsruhe 2 x

### **GRS**

Geschäftsführer (hah, ldr) je 1 x

Bereichsleiter (brw, erl, erv, rit, tes, tho) je 1 x

Projektbetreuung (luk) 1 x

Projektleitung (thi) 1 x

Abtlg. 504 (reh) 1 x

Abtlg. 601 (rop) 1 x

Abtlg. 702 (lag) 1 x

Autoren (mar, thi) je 2 x

**Gesamtauflage: 28 x**

**Erzeugung qualitativ abgesicherter Validierungsdatensätze für die Ausbreitung von Luftschadstoffen aus Bodenquellen in einer horizontal homogenen, neutral geschichteten Grenzschicht**

Auftraggeber:

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Schwertnergasse 1, 50667 Köln

Auftrags-Nummer: StSch 4270 – 801500 – UA 2100

Meteorologisches Institut der Universität Hamburg

Abt. Technische Meteorologie

Bundesstrasse 55, 20146 Hamburg

Tel.: 040 42838 5092 Fax 040 42838 5452

Prof. Dr. M. Schatzmann

Dr. B. Leitl

Hamburg, Mai 2002

# Inhalt

1 Zusammenfassung .....	1
1.1 Veranlassung und Vorgehensweise.....	1
1.2 Untersuchungsergebnisse.....	2
2. Modell- und Versuchstechnik.....	3
2.1 Der Grenzschichtwindkanal.....	3
2.2 Versuchsaufbau und Messtechnik .....	4
2.3 Modellierung der Emissionsquellen.....	6
3. Messkonzept und Versuchsdurchführung.....	7
3.1 Grenzschichtmodellierung und -dokumentation .....	7
3.2 Ausbreitungsmodellierung und Konzentrationsmessung.....	9
4. Ergebnisse.....	15
4.1 Modellgrenzschicht .....	15
4.2 Konzentrationsmessungen.....	21
5 Zusammenfassung .....	22
6 Literaturverzeichnis.....	31
Anhang 1 .....	32
Grenzschichtmessungen .....	34
Ausbreitungsmessungen .....	35

# **1 Zusammenfassung**

## **1.1 Veranlassung und Vorgehensweise**

Zur Simulation und Bewertung der Radonausbreitung im Umfeld bergbaulicher Hinterlassenschaften werden üblicherweise numerische Modelle verwendet. Die Anwendung verschiedener Modelle liefert selbst für den idealisierten Fall der Emission aus einer endlichen Flächenquelle in einer horizontal homogenen, neutral geschichteten atmosphärischen Grenzschichtströmung über ebenem Gelände signifikante Unterschiede in den Modellergebnissen. Da a priori nicht bekannt ist, welches Rechenverfahren für unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen die zuverlässigeren Modellergebnisse liefert bzw. wie die in den numerischen Modellen vorzugebenden Modellparameter im Sinne zuverlässiger Modellergebnisse einzustellen sind, müssen numerische Modelle im Rahmen systematischer Test- und Vergleichsrechnungen optimiert und validiert werden. Test- und Vergleichsrechnungen setzen jedoch qualitativ abgesicherte und vollständige Referenzdatensätze voraus, die insbesondere für den Fall der Ausbreitung passiver Luftschadstoffe aus Bodenquellen noch nicht zur Verfügung standen. Die bisher verwendeten Ergebnisse von Routinemessungen aus der Natur sind für systematische Testrechnungen und die Validierung numerischer Modelle nicht geeignet, da

- die Ergebnisse zeitlich begrenzter Feldmesskampagnen nicht über die für zuverlässige Modellvergleiche erforderliche Repräsentativität verfügen,
- Ergebnisse von Naturmessungen selbst bei mehrjährigen Beobachtungsperioden infolge der Variabilität der meteorologischen Randbedingungen stark streuen,
- die für Modellvergleiche verwendeten Langzeitmittelwerte das gesamte Spektrum möglicher Ausbreitungssituationen beinhalten und Modellabweichungen nicht mehr den tatsächlichen Ursachen zugeordnet werden können und
- die zur eindeutigen Festlegung einer Ausbreitungssituation erforderlichen Randbedingungen in der Regel nicht vollständig erfasst werden.

Eine sinnvolle und realistische Bewertung der Güte von Modellrechnungen ist auf der Grundlage von systematischen Vergleichsdatensätzen möglich, die in einem Grenzschichtwindkanal erzeugt werden können. Unter vollständig messtechnisch erfassbaren Versuchsrandbedingungen können Ausbreitungssituationen systematisch variiert und die sich einstellenden Konzentrationsfelder mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erfasst werden. Nur durch die im Windkanal mögliche, gezielte Variation der Ausbreitungsrandbedingungen, wie zum Beispiel Windrichtung, Windstärke, Quellstärke oder Quellgeometrie, können Vergleichsdatensätze erzeugt werden mit denen das Modellverhalten systematisch geprüft und die Modellparametrisierungen angepasst werden können. Die Modellierung bodennaher Schadstoffausbreitungsvorgänge in einem Grenzschichtwindkanal stellt ein anerkanntes Verfahren zur Erzeugung von qualitativ abgesicherten Vergleichsdatensätzen dar.

Da zuverlässige Referenzdatensätze für die Ausbreitung aus Flächenquellen am Boden bisher nicht zur Verfügung standen, wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH entsprechende Untersuchungen im Windkanallabor des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg in Auftrag gegeben. Ziel der Untersuchungen war die Bereitstellung von Referenzdatenmaterial für die Modellierung der Ausbreitung von Radongas aus bergbaulichen Hinterlassenschaften in einer genau definierten bzw. dokumentierten, horizontal homogenen Grenzschichtströmung. Es sollten 3 vereinfachte Ausbreitungssituationen im Windkanal modelliert und detailliert vermessen werden:

- Punktquelle mit möglichst kleiner Emissionsfläche
- Linienquelle mit 50 m Länge quer zum Wind
- Rechteckige Flächenquelle mit einer Kantenlänge von 50 m quer zum Wind und 100 m Kantenlänge in Windrichtung

Zunächst wurde in der Messstrecke Windkanals eine im Maßstab 1:450 verkleinerte Grenzschichtströmung entsprechend den Vorgaben durch den Auftraggeber erzeugt. Es wurden 3 geeignete Emissionsquellen entworfen und aufgebaut, mit dem das für Ausbreitungsexperimente im Windkanal erforderliche Tracergas in Analogie zu den Verhältnissen in der Natur mit vernachlässigbarem Impuls freigesetzt werden konnte. Für die 3 Quellformen wurden anschließend in einem dichten Messraster die sich einstellenden mittleren Bodenkonzentrationsverteilungen sowie die mittlere vertikale Verteilung der Konzentrationen in der Tracerfahne erfasst.

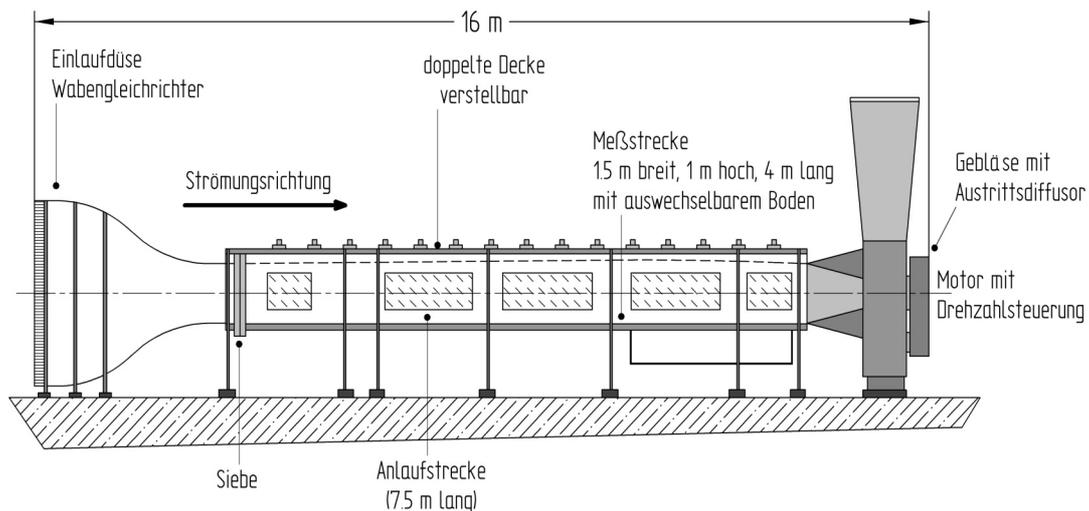
## **1.2 Untersuchungsergebnisse**

Mit den in Kapitel 4 vorgestellten Untersuchungsergebnissen stehen qualitativ abgesicherte Referenzdatensätze mit dokumentierter Genauigkeit für die numerische Modellierung der Ausbreitung von passiven Luftschadstoffen aus idealisierten Bodenquellen zur Verfügung. Die Modellergebnisse werden in normierter Form zur Verfügung gestellt und können so auf physikalisch ähnliche Verhältnisse in der Natur übertragen oder mit den in gleicher Weise normierten Ergebnissen einer Modellrechnung direkt verglichen werden.

## 2. Modell- und Versuchstechnik

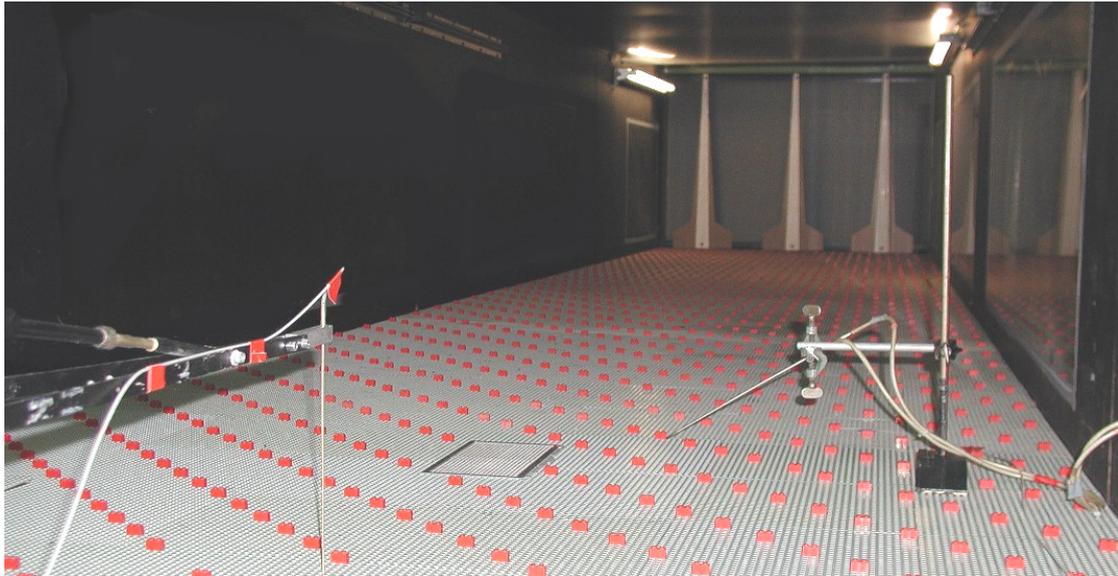
### 2.1 Der Grenzschichtwindkanal

Die Modellversuche wurden im kleinen Grenzschichtwindkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg durchgeführt. Eine Skizze des Windkanals zeigt Abbildung 1. Der Windkanal hat eine Gesamtlänge von 16 m und besteht aus einer Einlaufkontur, einer etwa 7 m langen Anlaufstrecke und der Messstrecke. Die Messstrecke ist 4 m lang, 1,5 m breit und 1,0 m hoch. Als Antrieb des Windkanals wird ein der Messstrecke über einen Diffusor nachgeschaltetes Radialgebläse verwendet. Durch den Saugbetrieb wird erreicht, dass die vom Gebläse ausgehenden Störungen sich nicht negativ auf die Strömungsverhältnisse in der Messstrecke auswirken. Um selbst umfangreiche systematische Modelluntersuchungen mit vertretbarem Zeitaufwand durchführen zu können, ist der Grenzschichtwindkanal mit einer schrittmotorgesteuerten Sondenpositioniereinrichtung ausgerüstet. Mit Hilfe der Positioniereinrichtung können alle im Windkanallabor verwendeten Messsonden und Sensoren computergesteuert mit einer Positioniergenauigkeit von mindestens 0,1 mm an jeden Ort der Messstrecke bewegt werden.



**Abbildung 1: Der kleine Grenzschichtwindkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg.**

Zur Erzeugung einer den Verhältnissen in der Natur ähnlichen, maßstäblich verkleinerten Grenzschichtströmung werden in den Windkanal am Beginn der Anlaufstrecke Turbulenzgeneratoren eingebaut und der Windkanalboden wird über die gesamte Länge der Anlauf- und Messstrecke mit künstlichen Rauigkeitselementen versehen. Die Turbulenzgeneratoren formen das zu erzeugende Windprofil vor und erzeugen die Grobstruktur der zu modellierenden atmosphärischen Turbulenz. Die Rauigkeitselemente simulieren die durch Bewuchs und Bebauung in der Natur erzeugte "Rauigkeit" der Erdoberflächen und prägen Windprofil und Turbulenzeigenschaften in Bodennähe. Abbildung 2 zeigt einen Blick in die Messstrecke des Windkanals. Im Hintergrund sind die speziell auf die gewünschte Modellgrenzschicht abgestimmten Turbulenzgeneratoren sowie die verwendeten Bodenrauigkeiten (LEGO<sup>®</sup>) zu erkennen.



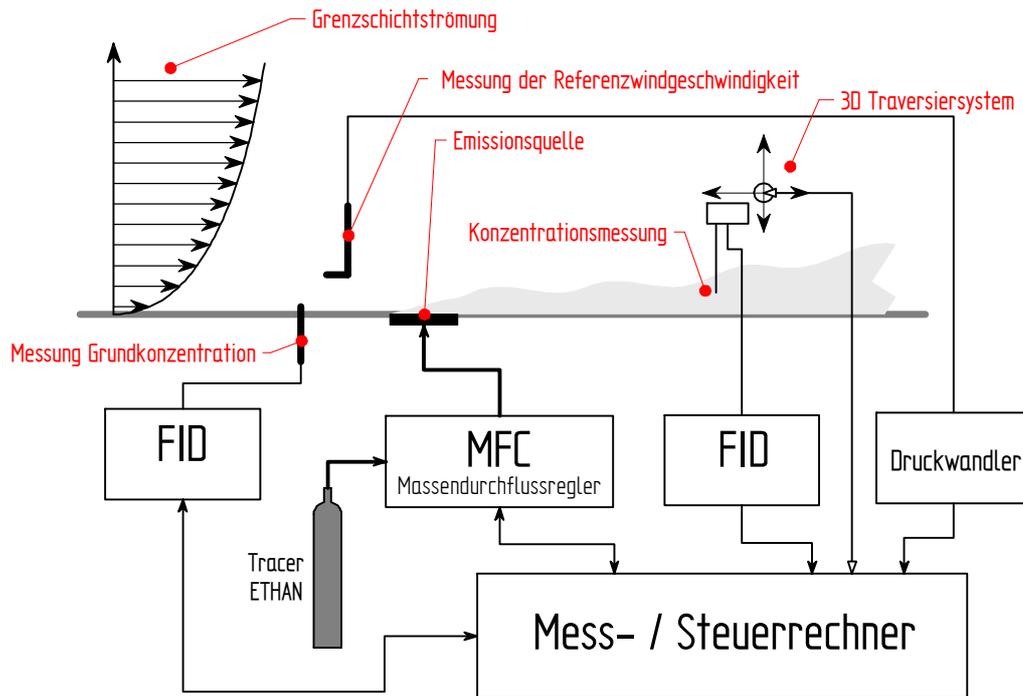
**Abbildung 2:** Anlauf- und Messstrecke des Windkanals mit Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten. Im Vordergrund ist die in die Messstrecke eingebaute Flächenquelle zu erkennen.

## 2.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Der im Rahmen der Untersuchungen verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Für Strömungs- und Konzentrationsmessungen wurden kommerziell verfügbare Standardmesstechniken und Messsysteme eingesetzt, so dass auf eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Messprinzipien an dieser Stelle verzichtet werden kann.

Die Strömungsmessungen in der Modellgrenzschicht wurde mit einem 2D Laser-Doppler-Anemometer (2D-LDA, Dantec-Invent/Erlangen) durchgeführt. Das verwendete LDA-System misst berührungs- bzw. störungsfrei und komponentenaufgelöst den lokalen Windvektor mit einer räumlichen Auflösung von weniger als 1 mm (ca. 0.4 m im Naturmaßstab) und mehreren hundert Hertz Abtastrate. Obwohl ein LDA-System prinzipiell nicht kalibriert werden muss, wurde die Messgenauigkeit des verwendeten Systems vor den Messungen mit Hilfe einer Streuscheibe geprüft.

Die Referenzströmungsgeschwindigkeit in der Messstrecke des Windkanals wurde mit einem aus einer pneumatischen Sonde (Prandtl-Rohr, Lambrecht/Göttingen) und einem Druckwandler (BARATRON Druckwandler, MKS/München) bestehenden Messsystem erfasst. Die Messung der Referenzwindgeschwindigkeit erfolgte in 22.2 mm Höhe über dem Windkanalboden bzw. umgerechnet auf die Verhältnisse in der Natur in 10 m Höhe über Grund. Der Druckwandler wurde vor jeder Messung mit Hilfe eines mechanischen Druck-Referenznormals (Feindruckwaage, Junkalor/Dessau) kalibriert.



**Abbildung 3: Versuchsaufbau im Grenzschichtwindkanal (schematisch).**

Die Radon-Freisetzung aus Bodenquellen wurde im Windkanalversuch durch die Freisetzung von Ethan als Tracergas simuliert. Obwohl Radon unter Normalbedingungen eine deutlich höhere Dichte als die Umgebungsluft aufweist, konnte auf die Modellierung von Dichteinflüssen im Windkanalversuch verzichtet werden. Die in der Natur freigesetzten Radonmengen werden als hinreichend klein angenommen, so dass diese bereits unmittelbar am Ort der Emissionsquelle durch Vermischung auf ein der Umgebungsluft ähnliches Dichtenniveau verdünnt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die sich einstellende Konzentrationsfahne in Lee einer Radon-Quelle ein passives Ausbreitungsverhalten zeigt. Für die Ausbreitungs- bzw. Konzentrationsmessungen wurden Flammenionisationsdetektoren (FIDs, auch als Gesamtkohlenwasserstoff-Analysatoren bezeichnet) verwendet. Die FID-Systeme detektieren den Kohlenwasserstoffgehalt des am Messort abgesaugten Tracer-Luft-Gemisches. Das stationäre, mittlere Konzentrationsfeld in der Tracerfahne kann durch zeitserielle Einzelpunktmessungen an einer Vielzahl von Messpunkten reproduzierbar erfasst werden. Da der Windkanal im Umluftbetrieb über die Laborräume Luft ansaugt bzw. ausbläst, steigt während eines Ausbreitungsexperiments die Tracergaskonzentration in der Laborluft. Aus diesem Grund wird die Tracer-Grundkonzentration in der Windkanalluft in Windrichtung vor der Emissionsquelle gemessen und der Messwert vom in der Tracerfahne gemessenen Konzentrationswert subtrahiert. Die Messung der Tracer-Grundkonzentration erfolgte mittels Standard-FID (Model 400A, Rosemount Analytical) mit einer zeitlichen Auflösung von etwa 0.5 Hz. Innerhalb der Tracerfahne wurde für die Konzentrationsmessungen ein weiteres Standard-FID bzw. in einigen Fällen auch zusätzlich ein schnelles FID (HFR 400, Cambustion Ltd.) eingesetzt, das in der verwendeten Konfiguration Konzentrationszeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von etwa 180 Hz de-

tektiert. Alle verwendeten FID-Systeme wurden mehrmals täglich, mindestens jedoch vor und nach jeder Messung eines einzelnen Konzentrationsprofils mit Hilfe von zertifizierten Eichgasen (Ethan in synthetischer Luft) an mindestens 3 Messpunkten über den gesamten Konzentrationsmessbereich kalibriert.

Von entscheidender Bedeutung für die Zuverlässigkeit der Ausbreitungsmessung ist die Konstanz und exakte Bestimmung der an der Quelle freigesetzten Tracermenge, da die Mess- bzw. Regelunsicherheit des Quellvolumenstroms direkt in die Messunsicherheit bzw. Zuverlässigkeit der Konzentrationsmessungen eingeht. Im Windkanallabor des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg werden zur Tracer-Dosierung elektronische Massendurchflussregler (MF5851, BROOKS Instruments, München) eingesetzt. Die Geräte wurden im Sinne maximaler Mess- und Regelgenauigkeit vor jeder Messkampagne mit unabhängigen volumetrischen Standards (Kolbenkalibratoren Vol-U-Meter, BROOKS Instruments, München) kalibriert.

Alle Mess- und Steuergrößen werden an einen Messrechner übergeben, digitalisiert und gespeichert. Es steht ein speziell für die Durchführung umfangreicher Windkanalexperimente entwickeltes Softwaresystem für die Versuchsplanung, die Kalibrierung der Mess- und Regeltechnik sowie die automatische Versuchsdurchführung und Datenanalyse zur Verfügung, das eine hohe Zuverlässigkeit, Qualität und Effektivität der Labormessungen ermöglicht.

### **2.3 Modellierung der Emissionsquellen**

Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse von Ausbreitungsversuchen hängt wesentlich von einer sorgfältigen Modellierung der Emissionsquellen im Windkanalversuch ab. Zunächst ist sicherzustellen, dass eine hinreichend große Tracergasmenge durch die Emissionsquelle geführt werden kann, damit auch an weit von der Emissionsquelle entfernten Messpunkten Konzentrationsmessungen mit ausreichender Genauigkeit oberhalb der Ansprechschwelle der Konzentrationsmessgeräte durchgeführt werden können. Im hier vorgestellten Projekt wurden die Emissionsquellen zur möglichst impulsarmen Tracerfreisetzung für den Betrieb mit reinem Tracergas (Ethan) ausgelegt. Die angestrebte Quellstärke durfte andererseits im Sinne der Modellähnlichkeit bei keiner Quellform zu einem signifikanten Austrittsimpuls und der damit verbundenen Bildung eines Austrittsstrahls führen. Die im Rahmen der Ausbreitungsexperimente realisierten maximalen Quellstärken sowie die entsprechenden Austrittsgeschwindigkeiten des Tracers am Quellort sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Sowohl durch die Visualisierung der Tracerfahne mit Rauch, als auch durch die für jede Quellform durch Messungen geprüfte, direkte Proportionalität von Quellstärke und Bodenkonzentration in Quellnähe konnte die Ausbildung einer Bodenfahne ohne signifikanten Austrittsimpuls nachgewiesen werden (siehe auch Kapitel 4, Ergebnisse).

Quellform	max. Quellstärke im Modell	max. Austrittsgeschwindigkeit
Punktquelle	10.04 l/h	0.14 m/s
Linienquelle	38.01 l/h	0.45 m/s
Flächenquelle	10.12 l/h	0.03 m/s

**Tabelle 1: Im Modellversuch realisierte maximale Quellstärken und Austrittsgeschwindigkeiten.**

Trotz der geringen Austrittsgeschwindigkeit des Tracers aus der Emissionsquelle muss für Quellgeometrien mit einer großen räumlichen Ausdehnung (besonders für Linienquelle, Flächenquelle) eine gleichmäßige Freisetzung des Tracers über dem gesamten Quellbereich realisiert werden. Lokale, durch die Turbulenz der Windströmung bzw. die im Modell verwendeten Bodenrauigkeiten verursachte Druckdifferenzen dürfen nicht zu einer zeitlich veränderlichen oder räumlich inhomogenen Tracerfreisetzung führen. Aus diesem Grund wurde in die verwendeten Quellelemente unmittelbar am Quellaustritt Kanülenmaterial mit einem freien Querschnitt von 0.2 mm (Punkt- und Linienquelle) bzw. 0.3 mm (Flächenquelle) und einer Kanülenlänge von mindestens 70 mm eingebaut. Selbst bei geringen Quellstärken und laminarer Durchströmung der Einzelröhrchen wird in jedem Quellröhrchen ein hinreichend großer Druckverlust erzeugt, der eine kontinuierliche Tracerfreisetzung unabhängig von den Wind- und Druckverhältnissen am Quellort ermöglicht. In den kreisförmigen Austrittsquerschnitt der Punktquelle wurden etwa 710 Kanülen in dichtester Packung eingebaut, die Linienquelle wurde aus 740 nahtlos aneinander gereihten Kanülen aufgebaut und in der Flächenquelle wurden 968 Kanülen in einem Raster von 5 mm x 5 mm verarbeitet.

### **3. Messkonzept und Versuchsdurchführung**

#### **3.1 Grenzschichtmodellierung und -dokumentation**

Den Ausgangspunkt der Untersuchungen im Grenzschichtwindkanal bildet die Bereitstellung einer naturähnlichen Grenzschichtströmung in der Messstrecke des Windkanals. Im Rahmen des Projektes wurde eine Modellgrenzschicht gemäß VDI-Richtlinie 3783/12 'Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht' realisiert. Zunächst wurde der in VDI 3783/12 vorgegebene Abgleich des longitudinalen Druckgradienten durch Einstellen der Windkanaldecke und gleichzeitiges Messen der statischen Druckverteilung im Kanal durchgeführt. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen war lediglich eine geringfügige Anpassung der Kanaldecke erforderlich, da keine Modellkörper in die Messstrecke eingebaut wurden und keine modellbedingte Versperrung des freien Strömungsquerschnittes eintrat. Den in der Messstrecke nach erfolgtem Abgleich gemessenen longitudinalen Druckgradienten zeigt Abbildung 4. Anschließend wurde iterativ die Form und Anordnung der Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten schrittweise optimiert und die sich einstellende Grenzschichtströmung vermessen, bis die vom Auftraggeber geforderten Profilparameter erreicht wurden. Für jeden Optimierungsschritt wurden an mehreren Stellen in der Messstrecke Vertikalprofile des Windvektors gemessen und aus-

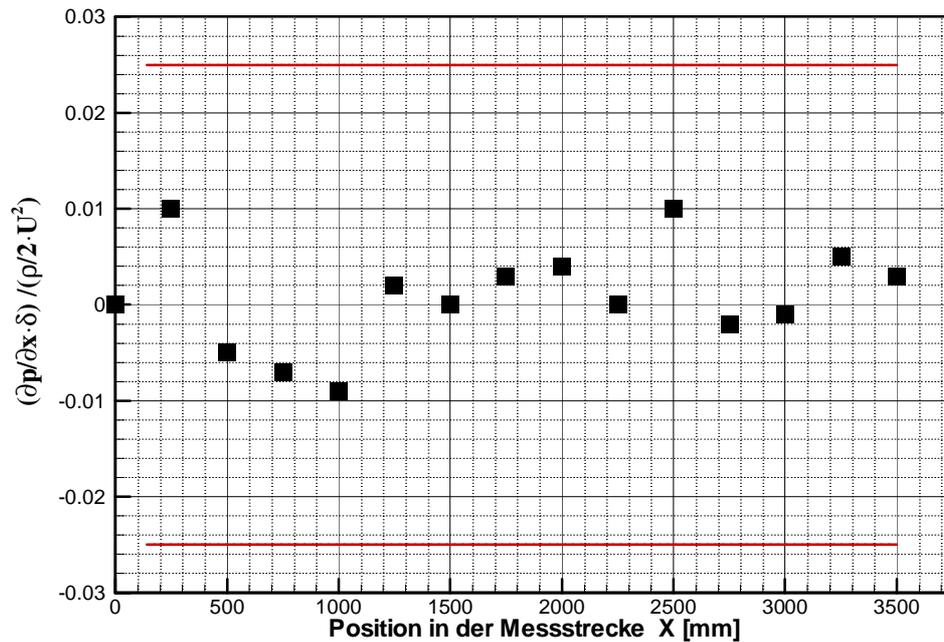


Abbildung 4: Normierter longitudinaler Druckgradient in der Messstrecke des Grenzschichtwindkanals nach erfolgtem Ableich der Windkanaldecke. Die roten Linien markieren den zulässigen Bereich des Druckgradienten gemäß VDI 3783/12.

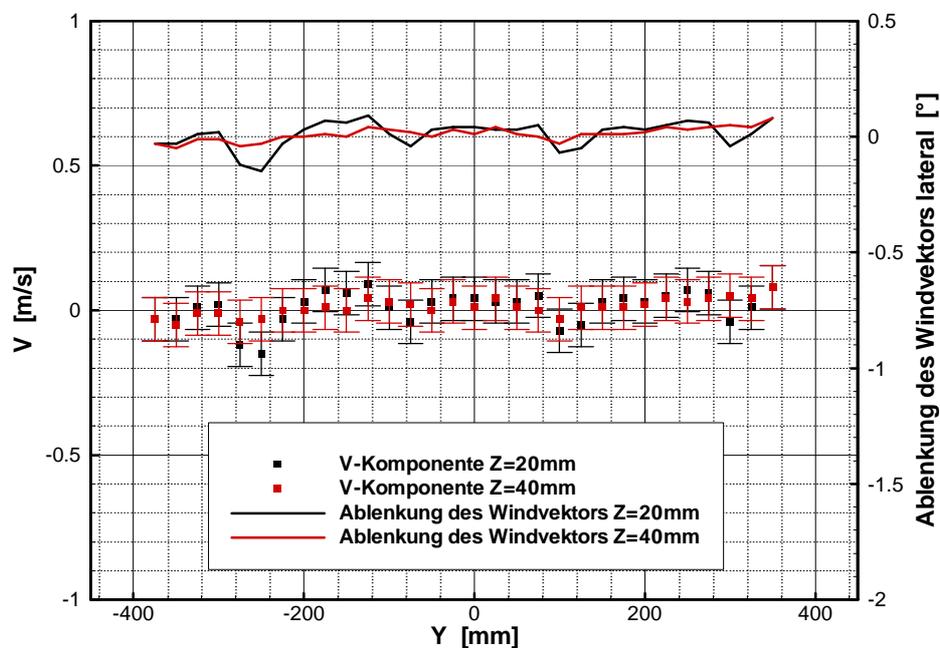


Abbildung 5 V-Komponente (Ordinate links) und horizontale Ablenkung (rechte Ordinate) des Windvektors in der Messstrecke für 2 repräsentative, bodennahe Messprofile.

gewertet. Zusätzlich wurde die Gleichförmigkeit bzw. Homogenität der modellierten Grenzschichtströmung in mehreren lateralen Geschwindigkeitsprofilen überprüft. In Abbildung 5 ist die abschließend gemessene laterale Gleichförmigkeit der Modellgrenzschicht durch 3 gemessene Lateralprofile der V-Komponente bzw. die laterale Ablenkung des Windvektors dokumentiert.

Eine abschließende Windprofilmessung mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung lieferte die zur vollständigen Dokumentation der Windkanalgrenzschicht erforderlichen Messdaten. Auf der Grundlage eines Vergleichs der Messergebnisse mit Vorgabewerten aus der Natur für Windprofil und Turbulenzeigenschaften konnte der tatsächliche "physikalische Maßstab" der modellierten Grenzschichtströmung bestimmt werden.

### **3.2 Ausbreitungsmodellierung und Konzentrationsmessung**

Für die Untersuchungen wurden 3 genau auf den Modellmaßstab abgestimmte Emissionsquellen aufgebaut. Im Sinne identischer Ausbreitungsbedingungen wurden die 3 Emissionsquellen jeweils am gleichen Ort in die Messtrecke des Windkanals eingebaut. Nach dem Einbau einer Quelle wurde zunächst deren Emissionsverhalten durch Vorversuche dokumentiert. Für jede Quellform wurde die Proportionalität von Quellstärke und Messkonzentration in der Tracerfahne experimentell überprüft. Auf diese Weise kann die mögliche Ausbildung von Austrittsstrahlen am Ort der Quelle und eine entsprechende grundsätzliche Veränderung im Ausbreitungsverhalten der untersuchten Abgasfahnen durch Messergebnisse belegt und die korrekte Quellmodellierung für die systematischen Messreihen sichergestellt werden. Die in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich für die Punktquelle selbst bei geringsten Quellstärken die erwartete Proportionalität von Quellstärke und Messkonzentration einstellt. Die Linien- und die Flächenquelle benötigen einen größeren Quellvolumenstrom zur Erzeugung homogener Emissionsverhältnisse und arbeiten ab etwa 2 l/h Quellstärke zuverlässig.

Für die in den Vorversuchen bestimmten, optimalen Emissionsverhältnisse wurde in einem weiteren Test für jede Quelle die Unabhängigkeit der mit der Anströmwindgeschwindigkeit normierten Ergebnisse der Konzentrationsmessungen von der Reynoldszahl der Anströmung geprüft (Abbildung 7). Im verwendeten Versuchsaufbau wird die gewünschte Reynoldszahl-Unabhängigkeit ab etwa 2 m/s Windgeschwindigkeit, gemessen in 22.2 mm Höhe über Grund, für alle 3 Quellformen erreicht. Die Reynoldszahl-Unabhängigkeit der im Windkanal gewonnenen Ergebnisse von Strömungs- und Konzentrationsmessungen basiert auf dem der physikalischen Modellierung zu Grunde liegenden Prinzip der Ähnlichkeit vollturbulenter Strömungs- und Transportvorgänge, das an dieser Stelle kurz erläutert werden soll.

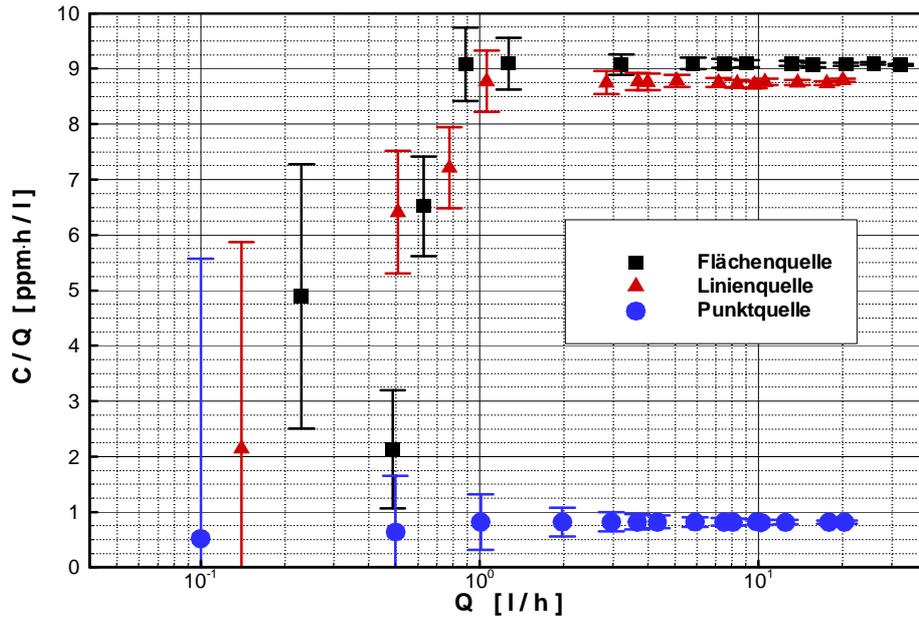


Abbildung 6: Abhängigkeit der normierten Messkonzentration von der Quellstärke für die 3 untersuchten Quellformen. Die an die Messpunkte angetragenen Streubalken kennzeichnen den Zuverlässigkeitsbereich der Messergebnisse.

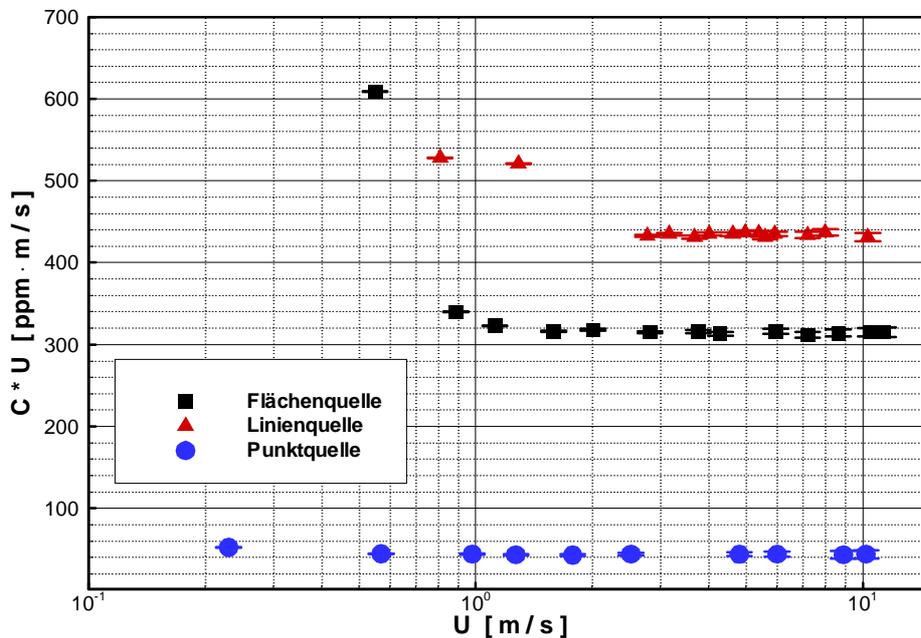
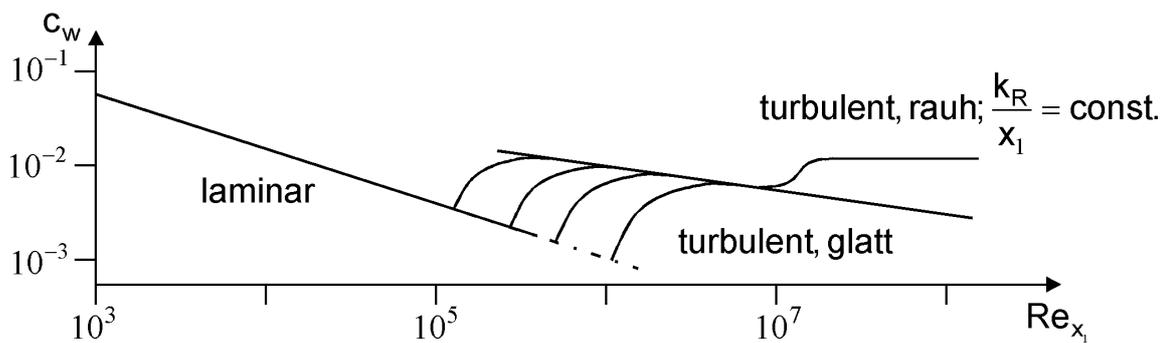


Abbildung 7: Abhängigkeit der Modellergebnisse von der Windgeschwindigkeit bzw. Reynoldszahl der Modellversuche (Windgeschwindigkeitsmessung in  $z=22$  mm Höhe über Grund). Die Streubalken markieren den Zuverlässigkeitsbereich der Messergebnisse

Nach Townsend (1956) ist für von thermischer Schichtung und Coriolis-Kraft unbeeinflusste Strömungs- und Transportvorgänge in den bodennahen Luftschichten der Atmosphäre, deren Randbedingungen durch Skalierung mit einer Referenzlänge  $L_{ref}$  und einer Referenzgeschwindigkeit  $U_{ref}$  dimensionslos gemacht werden können, die Struktur der turbulenten Strömung ähnlich für alle "ausreichend hohen" Reynoldszahlen. Bei ausreichend hoher Reynoldszahl, d.h. für eine voll entwickelte und turbulente Grenzschichtströmung, sind die zeitgemittelten dimensionslosen Terme der Erhaltungsgleichungen für Impuls und Masse nur von Zeit- und Längenmaßstäben und nicht von der Reynoldszahl abhängig (Snyder, 1981). Die einzigen Ausnahmen bilden Prozesse, die im kleinsten Skalenbereich der Turbulenz ablaufen und die Dissipation von Energie bzw. die Reibung in der viskosen Unterschicht über einer festen Wand bestimmen. Auf die Ausbildung der Turbulenz in einer freien, "vollrauen" Grenzschichtströmung haben die von der Viskosität bzw. der Reynoldszahl abhängigen Phänomene keinen signifikanten Einfluss. Im in Abbildung 8 dargestellten Diagramm befindet man sich dann in dem mit "turbulent, rau" gekennzeichneten Bereich.



**Abbildung 8:** Rauigkeitsbeiwert der ebenen Plattengrenzschicht als Funktion der Reynoldszahl der Anströmung und der Rauigkeit der Plattenoberfläche.

Charakteristisch für eine vollraue Grenzschichtströmung ist, dass das mittlere Windprofil und die Turbulenzeigenschaften der Grenzschicht unabhängig von der Reynoldszahl sind. Aus diesem Grund können zum Beispiel die bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten über einer bestimmten Bodenrauigkeit gemessenen Wind- und Turbulenzprofile durch Skalierung mit einer Referenzgeschwindigkeit (z.B. Wandschubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$ ) und Referenzlänge (z.B. Rauigkeitslänge  $z_0$ ) sowohl in der Natur, als auch im Windkanalversuch zur Deckung gebracht werden. Nur unter diesen Voraussetzungen sind  $u_*$  und  $z_0$  für eine gegebene Grenzschicht universelle, nicht von der Überstreichungslänge (und damit vom Ort) abhängige Größen. Nur unter diesen Voraussetzungen gelten auch alle anderen für die atmosphärische Prandtl-Schicht ebenso wie für die Plattengrenzschicht in technischen Strömungen typischen Zusammenhänge, wie zum Beispiel die Konstanz des Impulsflusses mit der Höhe oder das logarithmische Geschwindigkeitsgesetz.

Folglich führt im Strömungsregime turbulent-rau eine Verdoppelung der Windgeschwindigkeit (entspricht Verdoppelung der Reynoldszahl) zu einer Verdoppelung von  $u_*$  und damit aller turbulenter Geschwindigkeitsmaße. Die Längenmaße der Turbulenz ändern sich nicht, sie hängen in der Prandtl-Schicht nur vom Wandabstand, nicht aber von der Strömungsgeschwindigkeit ab. Genau dies erklärt den Erfolg des Prandtl'schen Mischungswegansatzes in Gleichgewichtsgrenzschichten.

Diffusionskoeffizienten wiederum sind Produkte aus Geschwindigkeiten und Längen. Da an einem festen Ort in der Prandtl-Schicht die turbulenten Längenmaße fixiert sind, sind die Diffusionskoeffizienten direkt proportional zur Geschwindigkeit. Somit muss bei Schadstoffeinleitungen in die Prandtl-Schicht die Verdoppelung der Strömungs- bzw. Windgeschwindigkeit genau eine Halbierung der örtlichen Konzentration zur Folge haben. Genau das wird in Windkanalversuchen, die unter streng kontrollierten Randbedingungen durchgeführt werden können, auch festgestellt. Die Prüfung, ob Messkonzentrationen mit  $u^{-1}$  abnehmen, kann damit als Test dafür dienen, ob in den Modellversuchen Reynoldszahl-Unabhängigkeit erreicht worden ist.

Die in physikalischen Modellversuchen ebenso wie bei der numerischen Modellierung angenommene neutrale Schichtung der Atmosphäre ist in der Realität nur bei Wind anzutreffen. Es stellt sich die Frage, welche Windgeschwindigkeit mindestens vorhanden sein muss, um von einer "ausreichend hohen" Reynoldszahl bzw. Windgeschwindigkeit und einer vollrauen Grenzschichtströmung ausgehen zu können. Eine feste Wand wird als aerodynamisch rau bezeichnet, wenn die Oberflächenrauigkeit größer als die sich ausbildende viskose Unterschicht einer turbulenten Grenzschicht ist. Nach Sutton (1949) bildet sich eine vollraue Grenzschichtströmung aus, wenn für die sogenannte Rauigkeits-Reynoldszahl gilt

$$\frac{u_* \cdot z_0}{\nu} \geq 2.5 \quad (1)$$

mit

$u_*$  Wandschubspannungsgeschwindigkeit in [m/s]

$z_0$  Rauigkeitslänge in [m]

$\nu$  kinematische Viskosität der Luft in [m<sup>2</sup>/s]

Für eine typische Windgrenzschicht über Gras- und Ackerland ergeben sich beispielsweise mit  $u_* \approx 0.2$  m/s,  $z_0 \approx 0.1$  m und der kinematischen Viskosität von Luft Rauigkeits-Reynoldszahlen größer 1300. Es kann damit als sicher gelten, dass sich neutral geschichtete Grenzschichtströmungen in der Natur stets im turbulent-rauen Bereich befinden. Im Windkanalversuch wird die Ausbildung einer vollrauen Grenzschichtströmung üblicherweise experimentell nachgewiesen, indem Strömungs- oder Ausbreitungsmessungen für einen weiten Bereich von Windgeschwindigkeiten wiederholt und die Ergebnisse mit einer charakteristischen Länge und einer Referenzwindgeschwindigkeit nor-

miert werden. Liegt eine vollraue Grenzschichtströmung vor, so zeigen die normierten Modellergebnisse die erwartete Unabhängigkeit von der Windgeschwindigkeit bzw. der Reynoldszahl der Anströmung.

Bei den im vorliegenden Projekt modellierten bodennahen Grenzschichtströmungen wird davon ausgegangen, dass thermische Effekte und die Coriolis-Kraft keinen wesentlichen Einfluss auf die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse ausüben. Es wurde die Ausbreitung von Luftschadstoffen in einer Grenzschichtströmung ohne einen vertikalen Temperaturgradienten (neutrale Schichtung) unter idealisierten Bedingungen untersucht. Der im Rahmen der Grenzschichtmodellierung abgebildete Höhenbereich umfasst die als Prandtl-Schicht bezeichneten, unteren 10% der atmosphärischen Grenzschicht. In diesem Höhenbereich werden die Wind- und Turbulenzeigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht im wesentlichen durch die "Rauigkeit" der Erdoberfläche geprägt und die Coriolis-Kraft wird als vernachlässigbar klein angenommen. Im Sinne naturähnlicher Ergebnisse sollten die Ausbreitungsuntersuchungen im Windkanal folglich Reynoldszahl-Unabhängig und mit der Anströmwindgeschwindigkeit normierbar sein. Die in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisse dokumentieren, dass für alle untersuchten Quellformen und Versuchsrandbedingungen Reynoldszahl-Unabhängigkeit erzielt werden konnte. Die in den Ausbreitungsversuchen realisierten Windgeschwindigkeiten lagen über der Grenzwindgeschwindigkeit von etwa 2.5 m/s für die Linienquelle, 2 m/s für die Flächenquelle und ca. 0.8 m/s für die Punktquelle.

Im Anschluss an den Nachweis bzw. die Dokumentation der physikalischen Ähnlichkeit der Ausbreitungsmodellierung durch Vorversuche, wurden die systematischen Ausbreitungsmessungen zur Erzeugung der Referenzdatensätze durchgeführt. Innerhalb der Tracerfahnen wurden die sich einstellenden Bodenkonzentrationen in 1.35 m Höhe über dem Boden (Naturmaßstab) in jeweils einem Longitudinalprofil sowie 5 Lateralprofilen und 5 Vertikalprofilen gemessen. Zusätzlich wurde für jede Quellform die Tracerkonzentrationen in einer quer zum Wind bzw. zur Fahnenachse ausgerichteten, vertikalen Messebene gemessen. Um den Messbereich der verwendeten Konzentrationsmesstechnik möglichst gut auszunutzen, wurden die Quellstärke und zum Teil die Windgeschwindigkeit während der Messungen dem Abstand des Messpunktes von der Quelle angepasst. Für quellnahe Messpunkte wurde eine hohe Windgeschwindigkeit im Modellversuch eingestellt und der freigesetzte Tracervolumenstrom minimiert, um ein Überschreiten des Konzentrationsmessbereiches bei hohen Tracerkonzentrationen zu verhindern. Für die in großem Abstand von der Quelle liegenden Messpunkte wurde der emittierte Tracervolumenstrom erhöht und die Windgeschwindigkeit im Modellversuch reduziert, um auch bei geringsten Konzentrationen im Fahnenquerschnitt noch deutlich oberhalb der Ansprechschwelle der verwendeten FID's zu messen. Die in den Vorversuchen ermittelten Grenzwerte wurden bei der Anpassung der Quellstärke und Windgeschwindigkeit in jedem Fall eingehalten. Im Rahmen der Auswertung der Messergebnisse wurden die Konzentrationsmesswerte mit der Windgeschwindigkeit und der Quellstärke normiert und in einheitliche Emissions- und Ausbreitungsverhältnisse umgerechnet. Es kann als ein Maß für die Güte der Ausbreitungsmodellierung gelten, dass nach der Umrechnung auf einheitliche Emissions- und Ausbreitungsverhält-

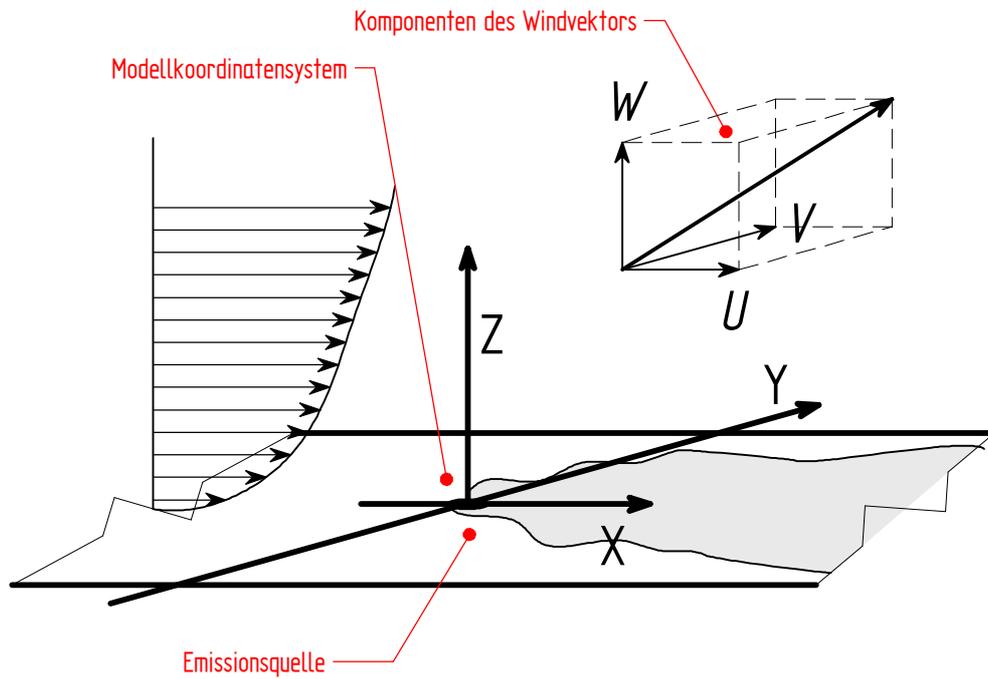


Abbildung 9: Definition des Modellkoordinatensystems und der Komponenten des Windvektors.

Draufsicht, alle Maßangaben im Naturmaßstab!

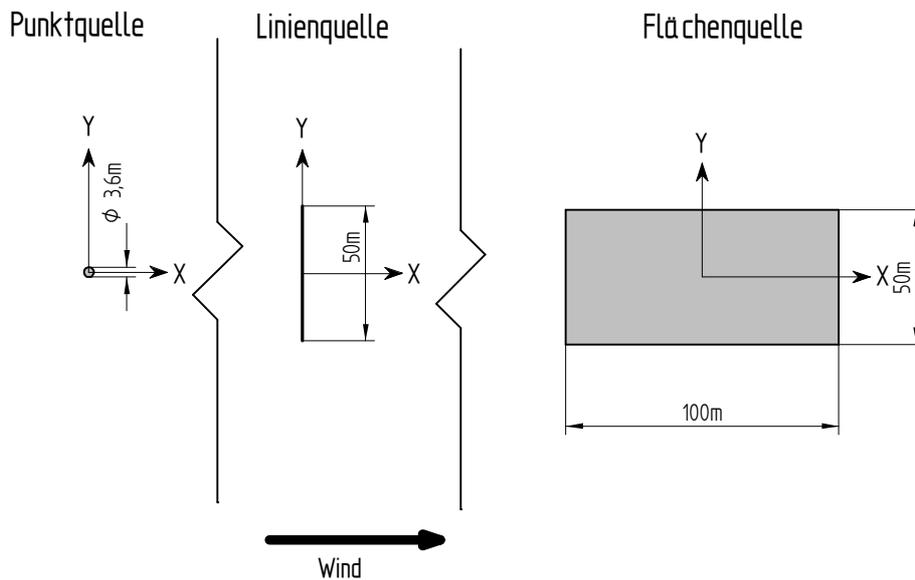


Abbildung 10: Form und Abmessung der Emissionsquellen im Naturmaßstab.

nisse die Zonen unterschiedlicher Ausbreitungsverhältnisse nicht mehr feststellbar sind.

Zur Dokumentation der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sowie zur Qualitätssicherung während der Messungen wurde in jedem Messprofil eine Reihe von Messpunkten mehrfach vermessen. Ferner sind komplette Profilmessungen wiederholt worden.

#### 4. Ergebnisse

Das bei den Untersuchungen verwendete Modellkoordinatensystem mit Ursprung auf dem Windkanalboden ist in Abbildung 9 dargestellt. Die X-Achse des Systems weist in Richtung der Längsachse des Windkanals und hat ihren Ursprung in der Mitte der untersuchten Emissionsquelle. Die Y-Koordinaten bezeichnen die laterale und die Z-Koordinaten die vertikale Lage der Messpunkte. Die Komponenten des Windvektors sind entsprechend üblicher Bezeichnungskonventionen so orientiert, dass die U-Komponente parallel zur X-Achse des Modellkoordinatensystems in Hauptwindrichtung zeigt. Entsprechend bezeichnen die V- und W-Komponente die Lateral- und Vertikalkomponente des Windvektors. Zur Bezeichnung der zeitgemittelten Messgrößen werden Großbuchstaben verwendet. Die Modellergebnisse sind entweder in dimensionsloser Form oder umgerechnet auf den Naturmaßstab dargestellt. Abbildung 10 zeigt die Emissionsquellen mit eingetragenen Abmessungen im Naturmaßstab.

##### 4.1 Modellgrenzschicht

Da im Projekt die Ausbreitung von Luftschadstoffen aus impulsfreien Bodenquellen untersucht werden sollte, wurde besonderes Augenmerk auf die möglichst gute Modellierung der bodennächsten Luftschichten gelegt. Über mäßig rauem Gelände mit Rauigkeitslängen von etwa 0.1 m werden bei neutraler Schichtung der Atmosphäre Grenzschichtdicken von etwa 300 m bis 500 m erreicht (vergl. Simiu/Scanlan 1986). Für die vertikale Ausdehnung der Prandtl-Schicht bzw. "constant-shear-layer" werden in der Regel 10% der Grenzschichtdicke angenommen. Zur Beschreibung des mittleren Windprofils über den gesamten Bereich der Modellgrenzschicht wird ein Potenzansatz der Form

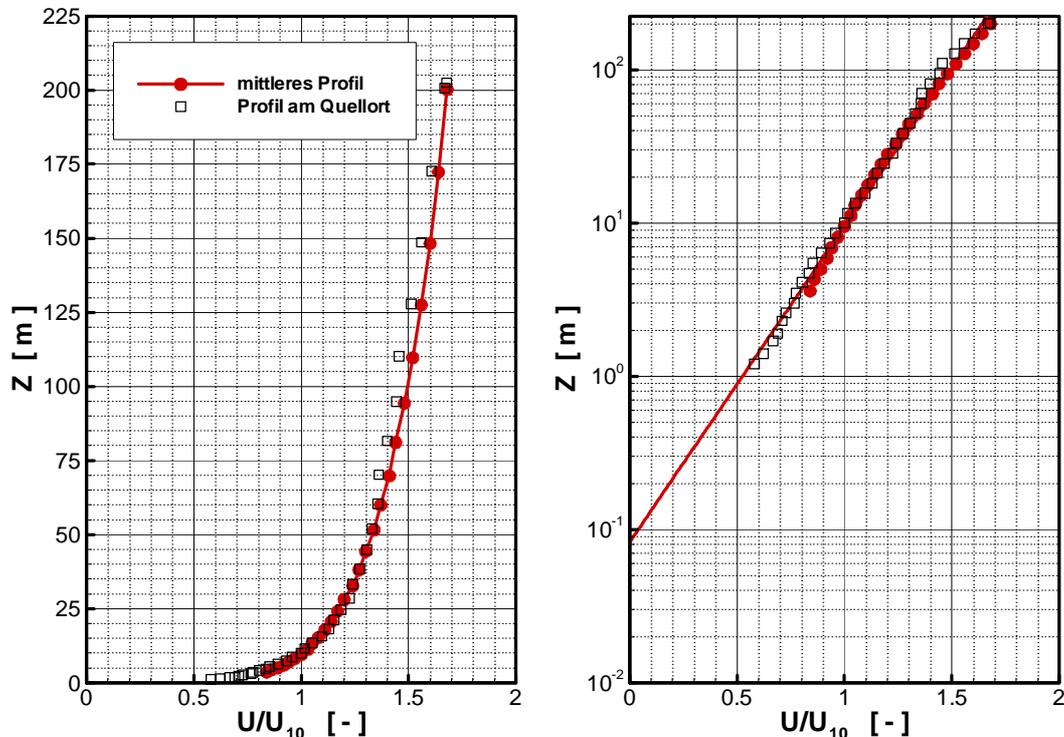
$$U\{z\} = U_{ref}\{z_{ref}\} \cdot \left[ \frac{z}{z_{ref}} \right]^a \quad (2)$$

mit  $U\{z\}$  mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe  $z$   
 $U_{ref}\{z_{ref}\}$  Referenzwindgeschwindigkeit in der Höhe  $z_{ref}$   
 $a$  Profilexponent

verwendet. Die charakteristische Rauigkeitslänge  $z_0$  der Modellgrenzschicht wird aus dem für die Prandtl-Schicht gültigen Ansatz für das logarithmische Windprofil

$$U\{z\} \propto \ln \left[ \frac{z}{z_0} \right] \quad (3)$$

abgeleitet. Ein vertikaler Versatz des Windprofils als Folge von Bodenrauigkeiten wurde in Anlehnung an VDI 3783/12 nicht modelliert.



**Abbildung 11: Normiertes mittleres Windprofil in der Messstrecke des Windkanals (U-Komponentes des Windvektors bezogen auf den Wert in Z=10m Höhe über Grund).**

Zur Dokumentation der im Windkanal realisierten Modellgrenzschicht wurden am Beginn und am Ende des für die Ausbreitungsuntersuchungen geplanten Messgebietes Windprofile gemessen und mit dem vom Auftraggeber gewünschten Windprofil verglichen. Die in Abbildung 11 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich das Windprofil entlang der Messstrecke nicht signifikant ändert und eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Vorgabeprofil erreicht wird. Im bodennahen Bereich bis etwa 50 m Höhe im Naturmaßstab sind die gemessenen Windprofile im Rahmen der Messgenauigkeit gleich. Abbildung 11 zeigt das gemessene Windprofil zusätzlich in halb-logarithmischer Darstellung. Entsprechend dem für die Prandtl-Schicht gültigen logarithmischen Windprofil-Ansatz liegen die Messpunkte bis etwa 50 m Höhe auf einer Geraden, für größere Höhen über Grund weicht das gemessene Windprofil erwartungsgemäß zunehmend vom logarithmischen Profilansatz ab.

Die aus den Messwerten berechneten Turbulenzintensitäten sind in Abbildungen 12 dargestellt. Die Turbulenzintensität der Komponenten des Windvektors wird definiert als

$$\begin{aligned}
I_U\{z\} &= \frac{s_U\{z\}}{U\{z\}} \\
I_V\{z\} &= \frac{s_V\{z\}}{U\{z\}} \\
I_W\{z\} &= \frac{s_W\{z\}}{U\{z\}}
\end{aligned}
\tag{4}$$

mit  $s_i$  Standardabweichung der Fluktuationen der Windgeschwindigkeitskomponente  $i = \langle U, V, W \rangle$

Zusätzlich sind in die Darstellung die in VDI 3783/12 für den entsprechenden Rauigkeitsbereich angegebenen Vergleichskurven eingezeichnet. Mit einer gewünschten Rauiglänge von  $z_0 \approx 0.1$  m liegt die zu realisierende Grenzschichtströmung im Bereich des Überganges von "mäßig rau" zu "rau". Eine sehr gute Übereinstimmung der Turbulenzintensitätsprofile mit den in der VDI-Richtlinie angegebenen Werten wird für den bodennahen Bereich bis etwa 30 m Höhe über Grund erzielt. Für den Höhenbereich von 30 m bis etwa 80 m ist die Übereinstimmung weniger gut, die Windkanalmesswerte liegen aber noch immer im vom angestrebten Rauigkeitsbereich bestimmten Band. Für Höhen von mehr als 80 m fällt die Übereinstimmung von Natur und Windkanal schlechter aus. Da jedoch im Projekt die Ausbreitung von Luftschadstoffen aus impulsfreien Bodenquellen untersucht werden sollte, konnte auf eine weitere, den Projektrahmen überschreitende Optimierung der Modellgrenzschicht außerhalb der Prandtl-Schicht verzichtet werden.

Aus den im Windkanal gemessenen Windprofilen und Zeitserien des Windgeschwindigkeitsvektors wurden weitere, zur Dokumentation der Modellgrenzschicht erforderliche Turbulenz- und Grenzschichtparameter berechnet und der "physikalische Maßstab" der Modellgrenzschicht bestimmt. In Tabelle 2 sind die Parameter des mittleren Windprofils und Turbulenzlängenmaße für zwei Messhöhen zusammengefasst. Der Wert der Wandschubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  kann unter der Annahme einer idealen "constant-shear-layer" aus dem logarithmischen Windprofil berechnet werden. Im vorliegenden Fall war es außerdem möglich, den Wert für  $u_*$  aus wandnahen Messungen des vertikalen turbulenten Impulsflusses

$$u_* = \sqrt{-u'w'} \tag{5}$$

mit  $u'w'$  turbulenter vertikaler Impulsfluss

abzuleiten. Es spricht für die Güte der modellierten Prandtl-Schicht, dass beide Werte im Rahmen der Messgenauigkeit identisch sind. Die aus Geschwindigkeitszeitreihen berechneten Turbulenzstrukturmaße

$$L_{UX} = \frac{U}{s_U^2} \int_0^{\infty} R_{UU} \{ \Delta t \} d(\Delta t) \quad (6)$$

mit  $R_{UU}$  Autokorrelationsfunktion der U-Komponente des Windvektors

beschreiben die Abmessung der energiereichsten turbulenten Wirbel der Modellgrenzschicht für zwei charakteristische Messhöhen in der Prandtl-Schicht. Rechnet man die im Modell gemessenen  $L_{UX}$  mit Hilfe des für die Modellgrenzschicht bestimmten geometrischen Maßstabs von 1:450 auf die Verhältnisse in der Natur um, so sind die Turbulenzstrukturmaße um bis zu 20% größer als die in Counihan (1975) angegebenen Werte. Unter Berücksichtigung der relativ großen Bandbreite der für den gewünschten Geländetyp vorgegebenen Rauigkeitslängen kann die Übereinstimmung der Turbulenzlängenmaße mit Naturwerte dennoch als gut bezeichnet werden.

Die Dokumentation der Modellgrenzschicht wird vervollständigt durch die in Abbildung 13 dargestellten Spektraldichteverteilungen der kinetischen Energie der Turbulenz  $S_{UU}$ . Die Verteilungsfunktionen wurden aus gemessenen Geschwindigkeitszeitreihen berechnet, frequenzbandgemittelt und zum Vergleich mit Vorgabewerten aus der Natur in normierter Form entsprechend Gleichung (7) dargestellt. Als Vergleichsspektren sind die Ansätze von v. Karman und Simiu/Scanlan (vergl. VDI 3783/12) in die Abbildung eingetragen.

$$\frac{f \cdot S_{UU} \{ f, z \}}{s_U^2 \{ z \}} = \frac{A \cdot f_{red}}{(E + B \cdot f_{red}^C)^D} \quad (7)$$

mit  $f$  Frequenz der turbulenten Schwankungsbewegung

$$f_{red} = \frac{f \cdot z}{U} \quad \text{mit der Messhöhe und der mittleren Windgeschwindigkeit gebildete, reduzierte Frequenz}$$

$A, B, C, D, E$  Koeffizienten Vergleichsansätze gemäß VDI 3783/12

Die in der Windkanalgrenzschicht gemessenen Spektraldichteverteilungen der kinetischen Energie der Turbulenz stimmen sehr gut mit dem für die neutrale Plattengrenzschicht entwickelten v. Karmanschen Ansatz überein. Die Übereinstimmung mit der auf einer Vielzahl von Naturdaten basierenden Verteilungsfunktion nach Simiu/Scanlan ist ebenfalls gut.

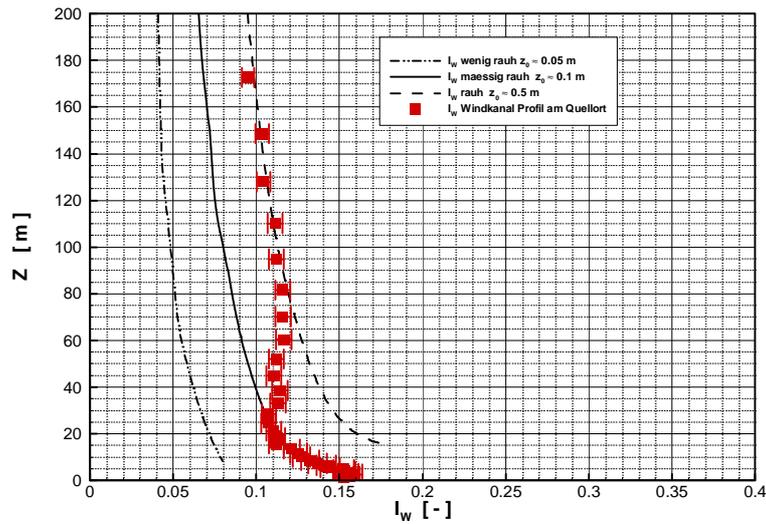
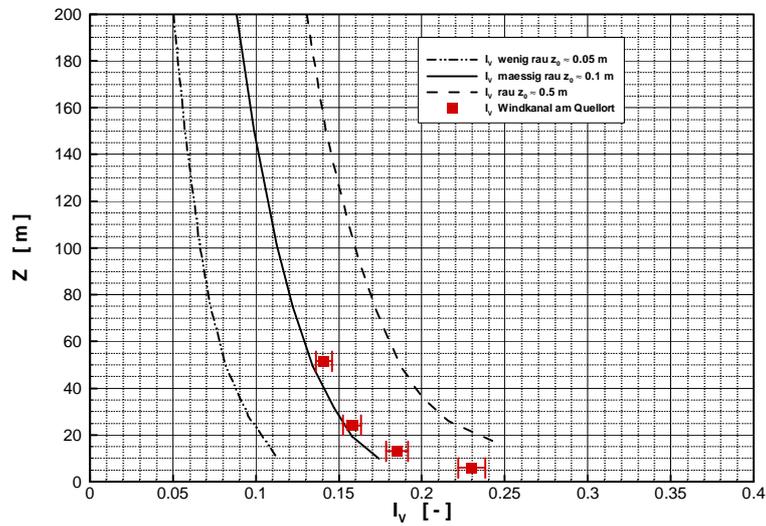
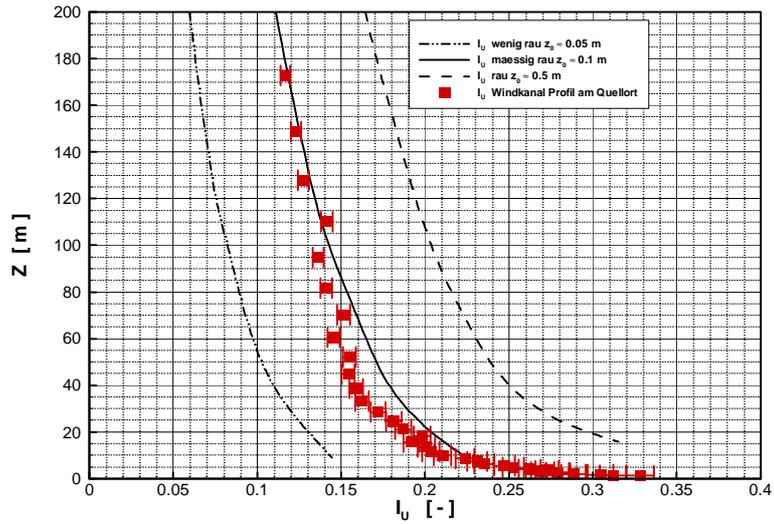


Abbildung 12: Gemessenen Vertikalprofile der Turbulenzintensität am Ort der Emissionsquellen im Vergleich zu VDI3783/12, die Streubalken markieren den Vertrauensbereich der Messergebnisse.

Parameter	Windkanal	Naturmaßstab 1:450
Profilexponent $a$	0.18	
Referenzhöhe $Z_{ref}$	450 mm	202.5 m
Rauhigkeitslänge $z_0$	0.2 ... 0.23 mm	0.09 ... 0.1 m
Schubspannungsgeschwindigkeit $u^*$		
direkte Messung	0.21 m/s $\pm$ 0.015 m/s	
aus log. Windprofil	0.2 m/s	
1. Turbulenzlängenmaß $L_{UX}$	350 $\pm$ 20 mm	157.5 $\pm$ 9 m
gemessen in einer Höhe von $Z_{LUX}$	28 mm	12.6 m
2. Turbulenzlängenmaß $L_{UX}$	370 $\pm$ 17 mm	166.5 $\pm$ 8 m
Gemessen in einer Höhe von $Z_{LUX}$	42 mm	18.9 m

Tabelle 2: Parameter und Kenngrößen der Modellgrenzschicht.

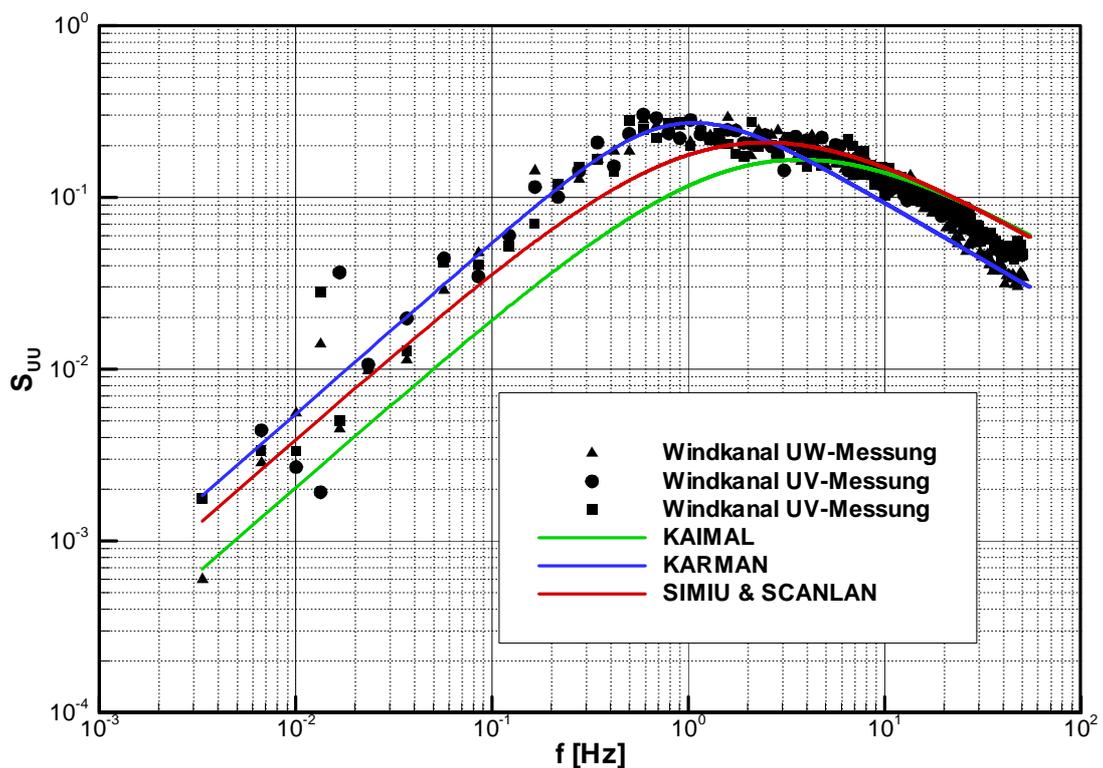


Abbildung 13: Spektraldichtevertelung der kinetischen Energie der Turbulenz in der modellierten Windgrenzschicht (Messhöhe  $Z = 20$  m Höhe über Grund im Naturmaßstab).

## 4.2 Konzentrationsmessungen

Nachfolgend sind die entsprechend Gleichung (8) mit der Windgeschwindigkeit und der Quellstärke normierten Ergebnisse der Ausbreitungsmessungen für die untersuchten Quellformen dargestellt. Bei der Übertragung der Modellergebnisse auf die Verhältnisse in der Natur werden die Modellergebnisse zunächst mit der Quellfläche bzw. dem Quadrat einer charakteristischen Länge normiert und auf die geometrischen Verhältnisse in der Natur umgerechnet, um den Modellmaßstab im Rahmen der Umrechnung zu berücksichtigen. Die Lateral- und Longitudinalprofile beschreiben die Bodenkonzentrationsverteilung in 1.35 m Höhe über Grund im Naturmaßstab. Die Vertikalprofile der Tracerkonzentration wurden über der Fahnenachse bei  $Y = 0$  m gemessen.

$$C^* = \frac{(C_{mess} - C_{grund}) \cdot U_{ref}}{C_Q \cdot Q_{tracer}} \quad (8)$$

- mit  $C_{mess}$  Tracerkonzentration am Messort in Vol.-%
- $C_{grund}$  Hintergrundkonzentration des Tracers in der Windkanalluft vor der Emissionsquelle in Vol.-%
- $C_Q$  Tracer-Quellkonzentration in Vol.-%
- $U_{ref}$  Referenzwindgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund (Naturmaßstab) in m/s
- $Q_{tracer}$  Quellstärke, freigesetzter Tracervolumenstrom in m<sup>3</sup>/s

In Abbildung 14 sind die für die Punktquelle gemessenen Konzentrationsverteilungen dargestellt. Die Lateralprofile zeigen erwartungsgemäß die Form einer Gaußverteilung deren Breite mit wachsendem Abstand zunimmt. Das Longitudinalprofil beschreibt eine exponentielle Abnahme der Konzentration bei Vergrößerung des Quellabstandes. Die Vertikalprofile bilden die Vergrößerung der Tracerfahne mit wachsendem Abstand vom Quellort ab. Unmittelbar am Boden wird der Tracer "reflektiert", es findet keine Deposition statt und es bildet sich keine vom Boden abgehobene Konzentrationsfahne aus. Folglich zeigen die vertikalen Konzentrationsprofile für große Quellabstände und eine hinreichend große vertikale Ausdehnung der Tracerfahne unmittelbar am Boden nur einen sehr geringen Konzentrationsgradienten.

Die Ergebnisse der Messungen mit der Linienquelle sind in Abbildung 15 zusammengefasst. Die quellnah gemessenen Lateralprofile der Bodenkonzentration zeigen eine "top hat"- bzw. Rechteck-Form. Mit wachsendem Quellabstand werden die Lateralprofile zunehmend Gaußförmiger. Das Longitudinalprofil zeigt wiederum eine exponentielle Abnahme der Bodenkonzentration mit wachsendem Abstand von der Quelle. Die longitudinalen Konzentrationsgradienten sind allerdings geringer als bei der Punktquelle. Im oberen Diagramm in Abbildung 15 sind 2 Messprofile eingetragen, wobei in einem Profil bei einer minimalen Quellstärke von 1.4 l/h gearbeitet wurde, um die Sensitivi-

tät der Messergebnisse für variierende Quellstärken zu dokumentieren. Wie für den Fall der Punktquelle bilden sich auch bei der Linienquelle die für eine passive Konzentrationsfahne am Boden typischen Vertikalprofile mit  $dC/dz|_{z=0} \rightarrow 0$  aus.

Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen für die untersuchte Flächenquelle zeigt die Abbildung 16. Erwartungsgemäß sind die Lateralprofile über einen im Vergleich zur Punkt- und Linienquelle größeren Entfernungsbereich rechteckig geformt. Das longitudinale Bodenkonzentrationsprofil zeigt einen im Vergleich zu Punkt- und Linienquelle ähnlichen Konzentrationsgradienten. Auch für den Fall der Flächenquelle belegen die gemessenen Vertikalprofile der Tracerkonzentration die Ausbildung einer passiven Ausbreitungsfahne am Boden mit  $dC/dz|_{z=0} \rightarrow 0$ . In den Abbildungen 17 bis 20 sind die für die Punkt-, Linien- und Flächenquelle gemessenen, normierten Konzentrationsprofile für jeweils gleiche Messpositionen in einer Darstellung zusammengefasst. Im direkten Vergleich der Ergebnisse für die 3 untersuchten Quellformen wird deutlich, dass die normierten Konzentrationen mit zunehmenden Abstand der Messprofile vom Quellort in identische Profile übergehen. Der Verlauf des für die Punktquelle gemessenen Longitudinalprofils stimmt sehr gut mit der aus der entsprechenden analytischen Lösung nach Berljand (1982) abgeleiteten Neigung überein. In den Vertikalprofilen der normierten Messkonzentration ist der Einfluss der ungenaueren Grenzschichtmodellierung für Höhen oberhalb 90 m nur im Fall der Punktquelle und lokal begrenzt erkennbar.

Die Verteilungen der normierten Konzentration in einer im gleichen Abstand hinter der Quelle gemessenen Lateralebene werden für die drei untersuchten Quellformen in Abbildung 21 miteinander verglichen. Die den Ergebnisdarstellungen zu Grunde liegenden Wertetabellen enthält der Anhang 1.

## **5 Zusammenfassung**

Im kleinen Grenzschichtwindkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg wurde die Ausbreitung passiver Luftschadstoffe aus bodengebundenen Quellen in einer horizontal homogenen, neutral geschichteten Grenzschichtströmung modelliert und mit hoher räumlicher Auflösung vermessen. Es wurden 3 vollständig dokumentierte Referenzdatensätze für die impulsfreie Ausbreitung von Luftschadstoffen aus einer Punkt-, einer endlichen Linien- und einer Flächenquelle erzeugt, die zur Validierung numerischer Ausbreitungsmodelle verwendet werden können. Alle in eine Ausbreitungsrechnung einfließenden Rand- und Anfangsbedingungen können aus den im Windkanalversuch gemessenen und dokumentierten Randbedingungen der Ausbreitungsexperimente abgeleitet werden, so dass ein direkter Vergleich von Modell- und Messergebnissen möglich wird. Durch sorgfältige und regelmäßige Kalibrierung der verwendeten Messgeräte wurde die für Referenz- und Validierungsdatensätze unabdingbare, durch die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse dokumentierte, hohe Zuverlässigkeit der Messergebnisse erzielt.

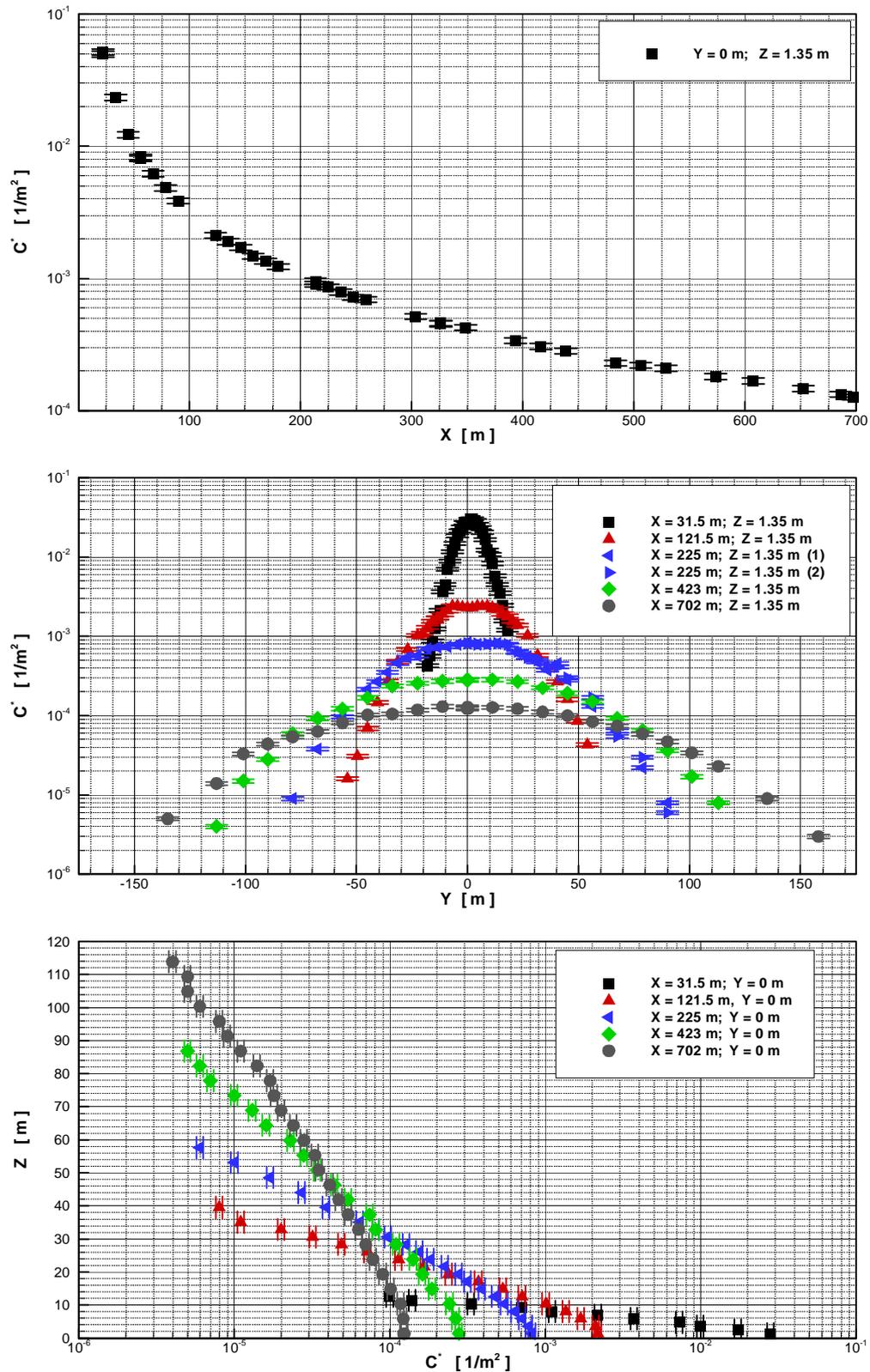


Abbildung 14: Profile der normierten Tracerkonzentration  $C^*$  für die Ausbreitung aus der Punktquelle. Die Streubalken geben den experimentell ermittelten Vertrauensbereich der Messergebnisse an.

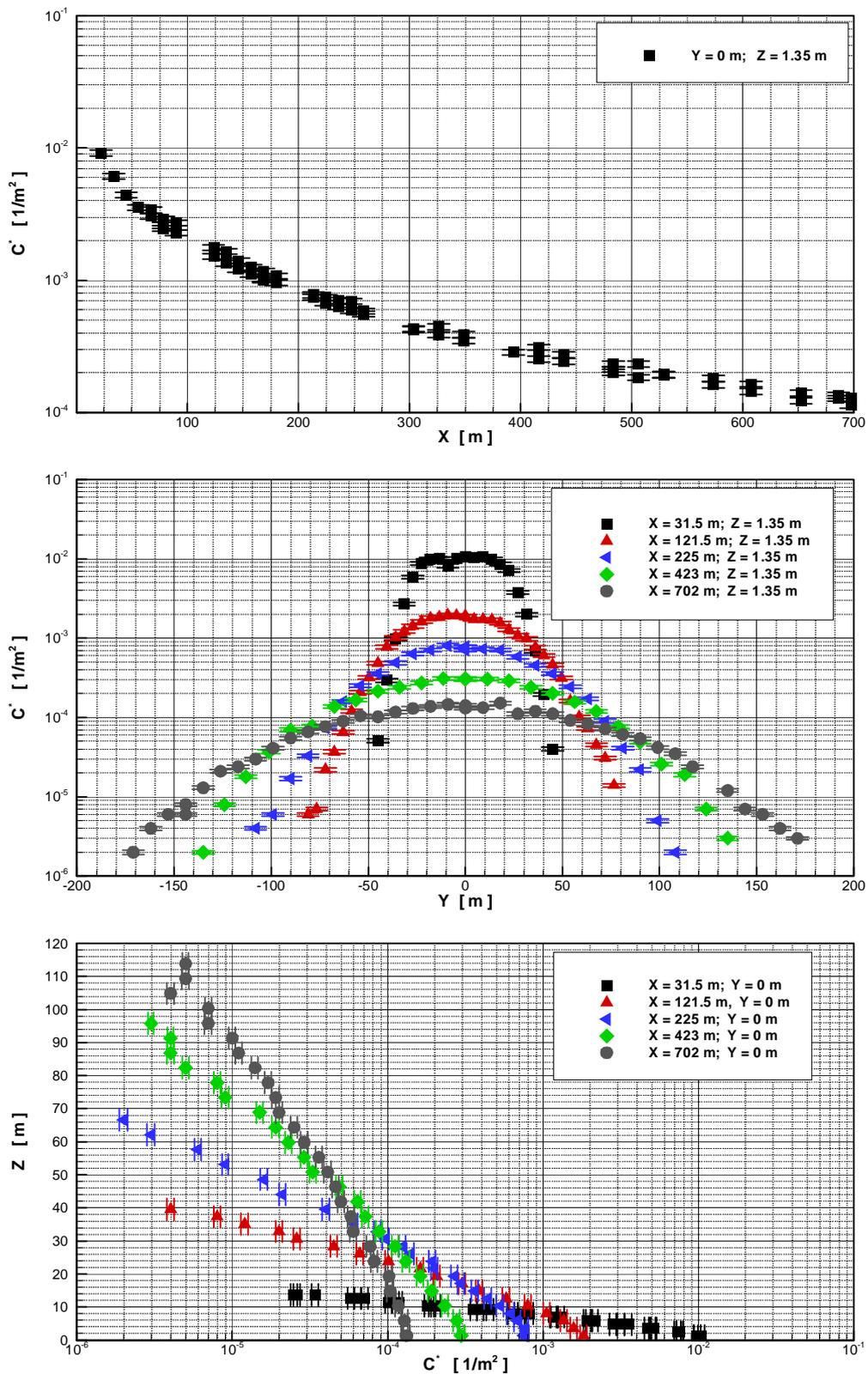


Abbildung 15: Profile der normierten Tracerkonzentration  $C^*$  für die Ausbreitung aus der untersuchten 50m-Linienquelle. Die Streubalken geben den experimentell ermittelten Vertrauensbereich der Messergebnisse an.

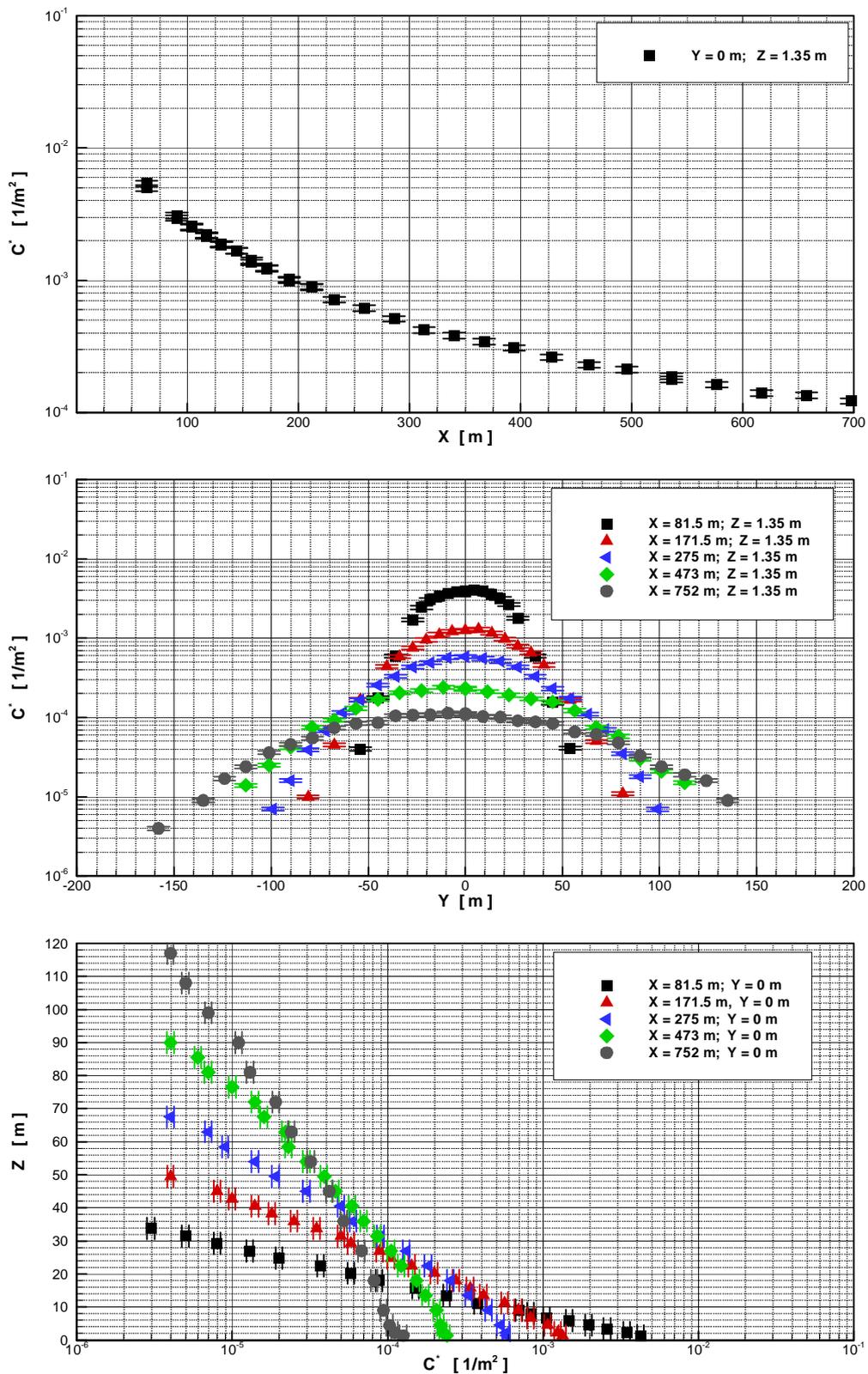


Abbildung 16: Profile der normierten Tracerkonzentration  $C^*$  für die Ausbreitung aus der modellierten Flächenquelle. Die Streubalken geben den experimentell ermittelten Vertrauensbereich der Messergebnisse an.

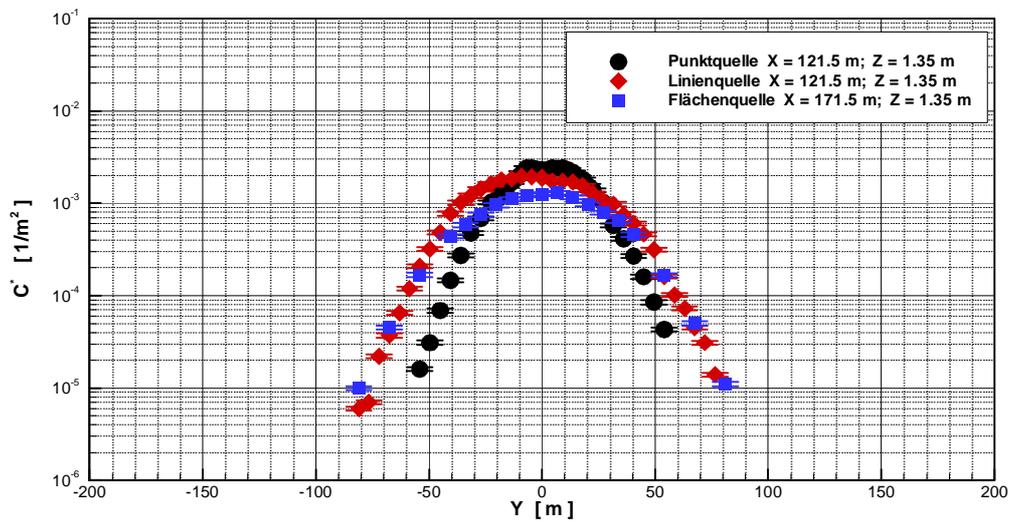
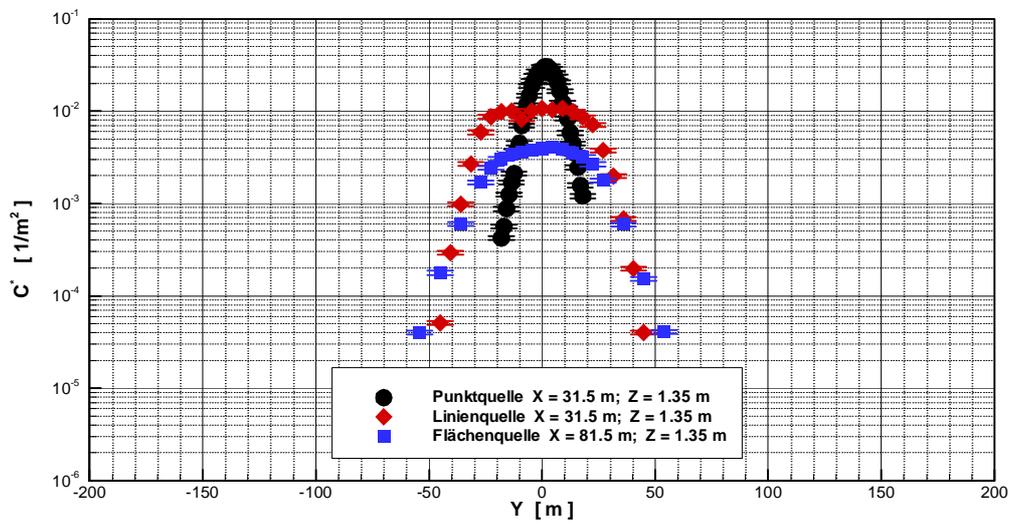
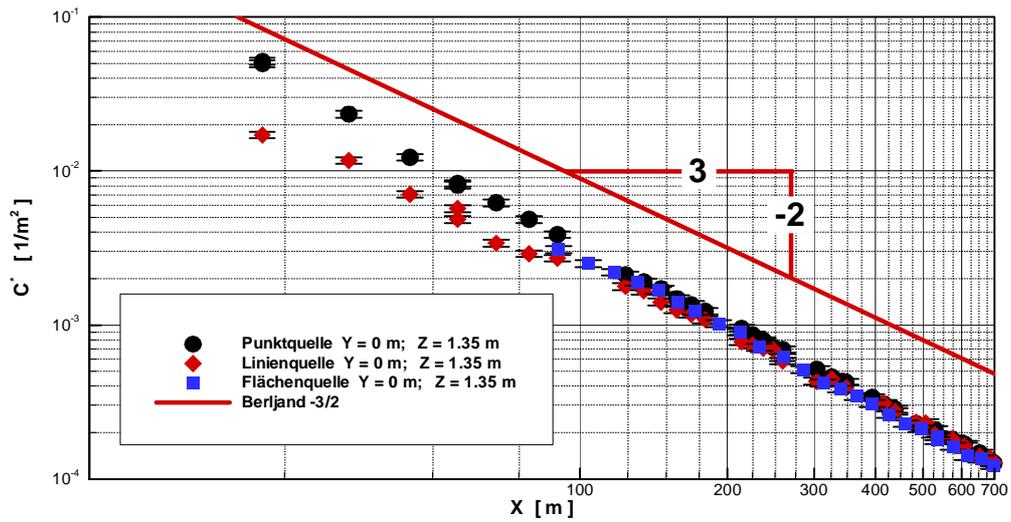


Abbildung 17: Vergleich der normierten Konzentrationsprofile für Punkt-, Linien- und Flächenquelle für jeweils gleiche Quellabstände – Teil 1.

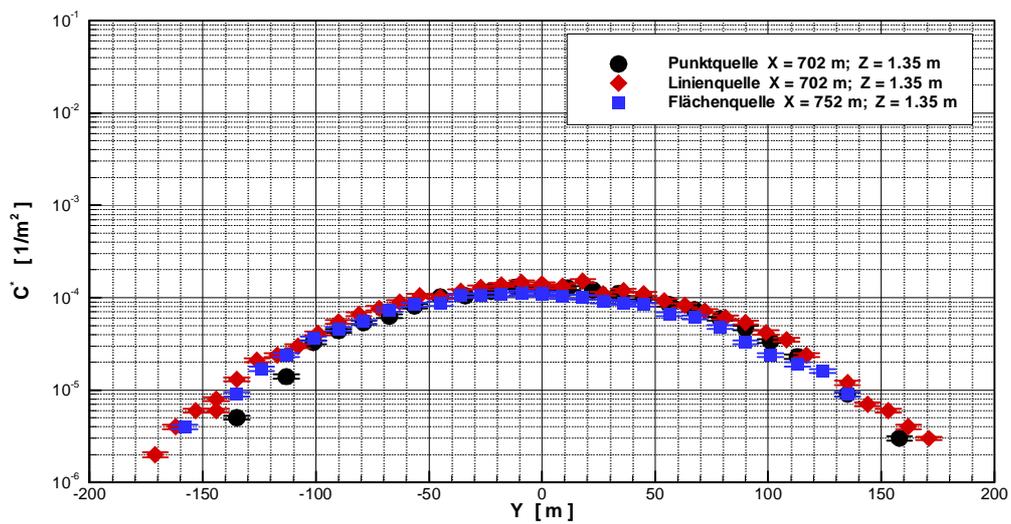
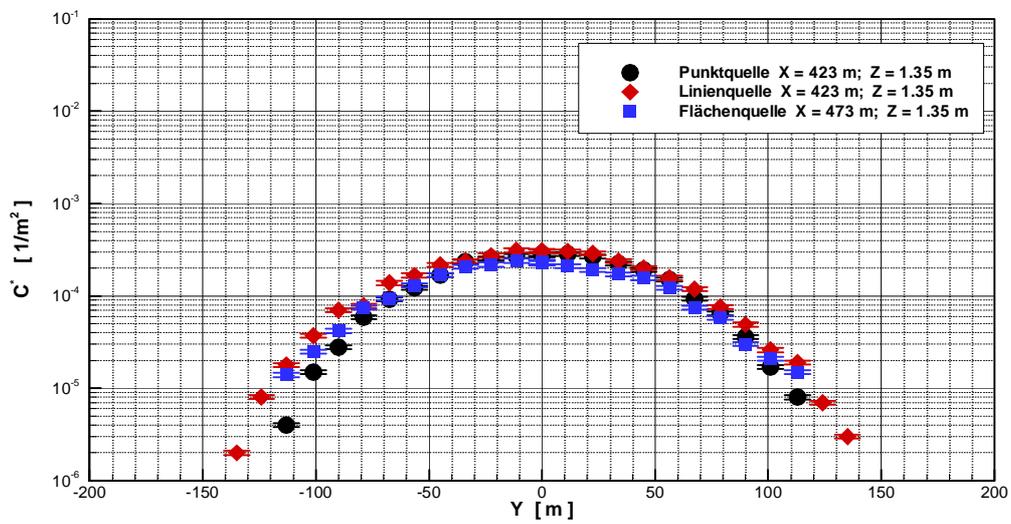
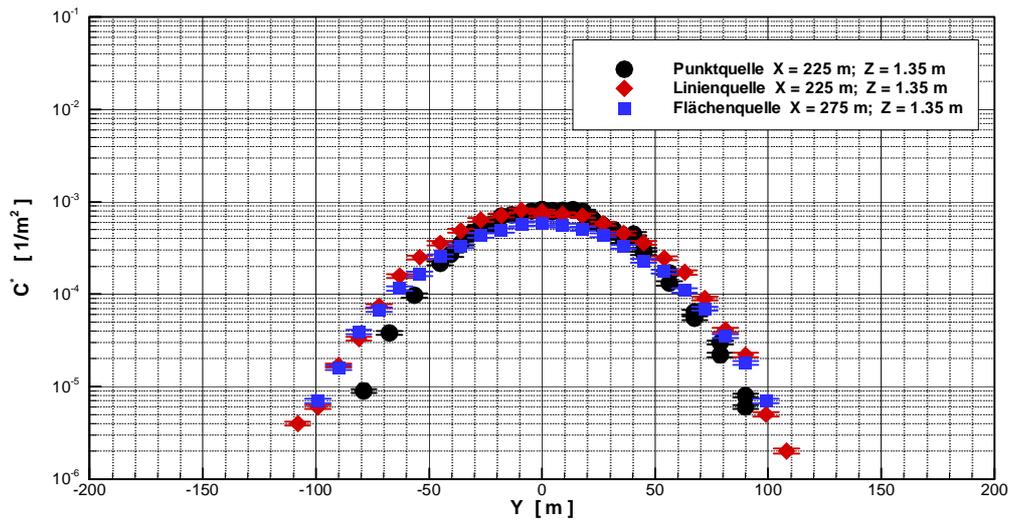


Abbildung 18: Vergleich der normierten Konzentrationsprofile für Punkt-, Linien- und Flächenquelle für jeweils gleiche Quellabstände – Teil 2.

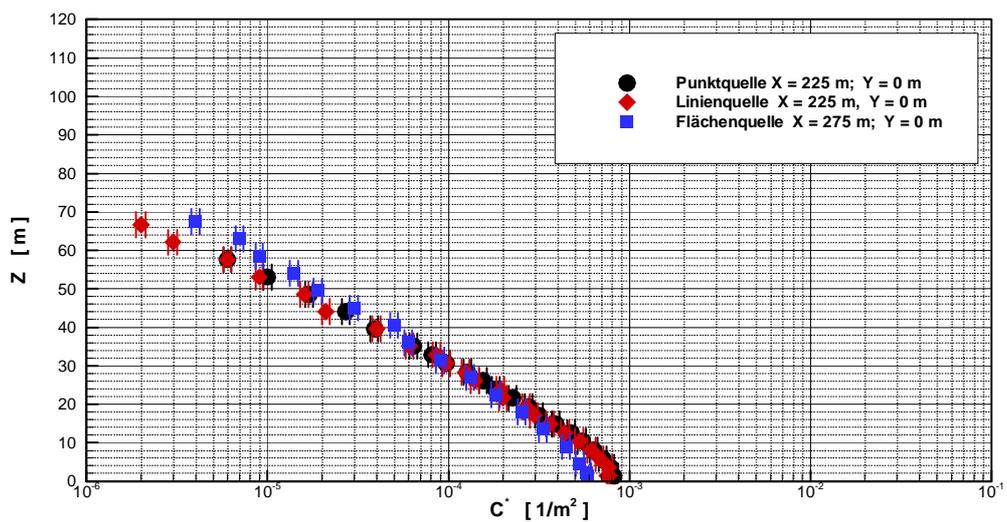
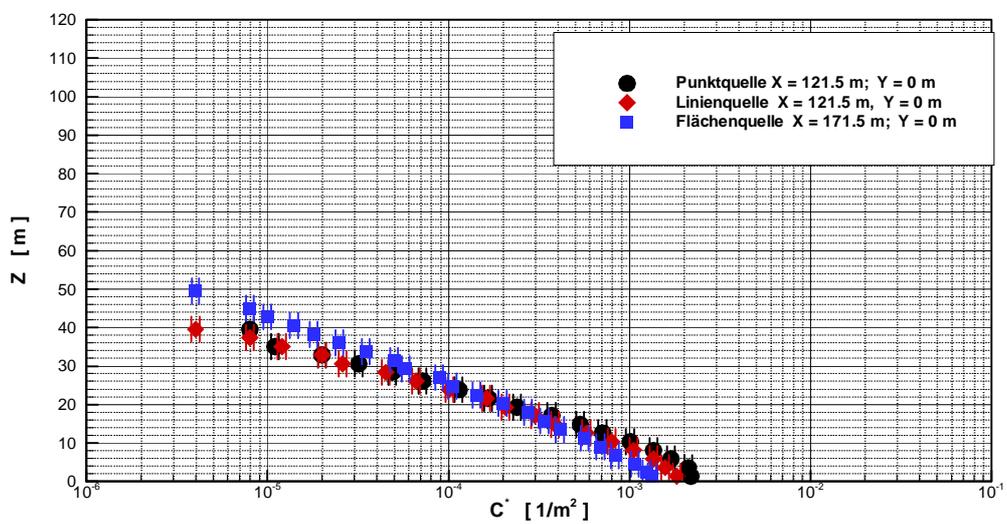
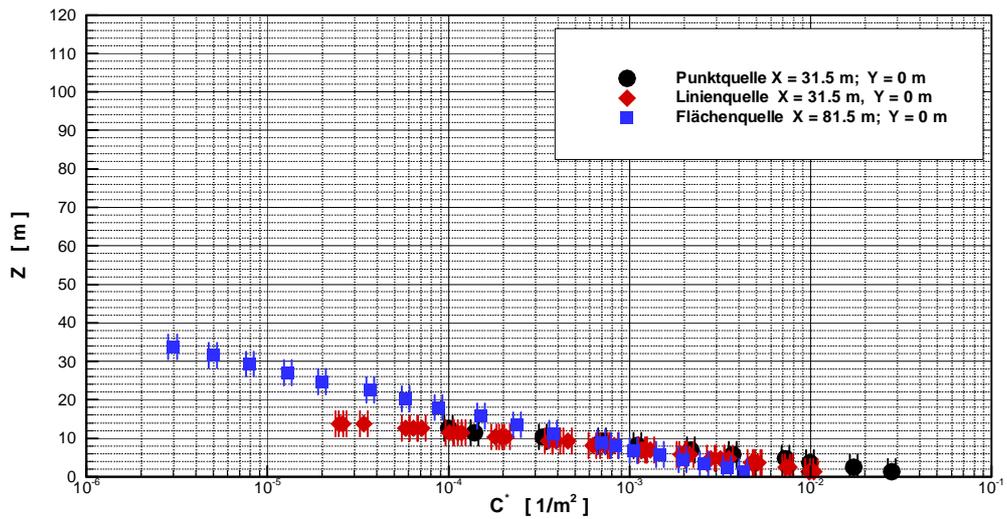


Abbildung 19: Vergleich der normierten Konzentrationsprofile für Punkt-, Linien- und Flächenquelle für jeweils gleiche Quellabstände – Teil 3.

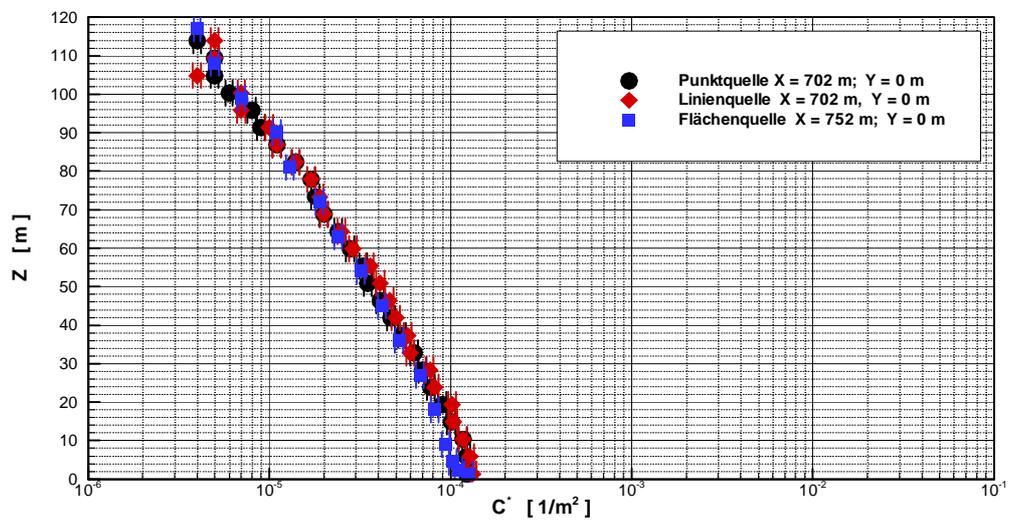
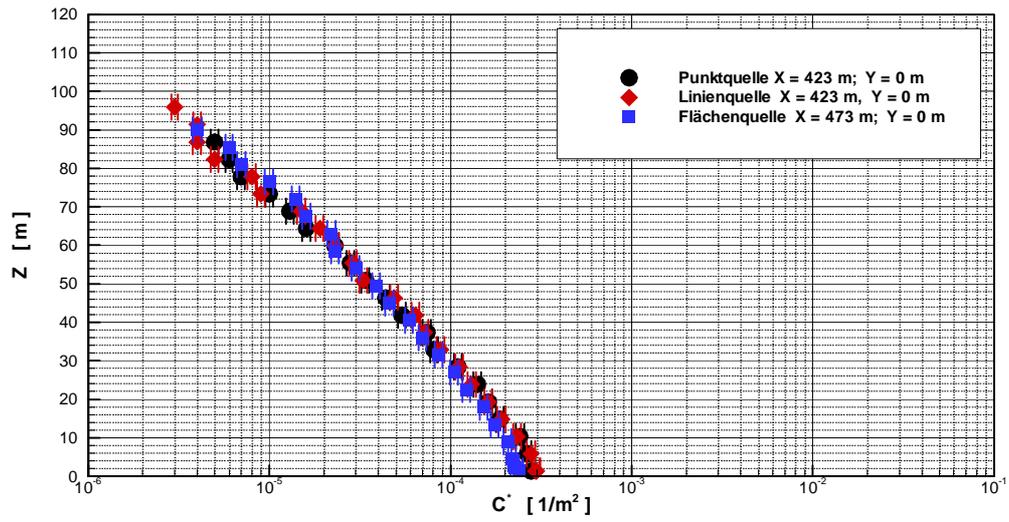


Abbildung 20: Vergleich der normierten Konzentrationsprofile für Punkt-, Linien- und Flächenquelle für jeweils gleiche Quellabstände – Teil 4.

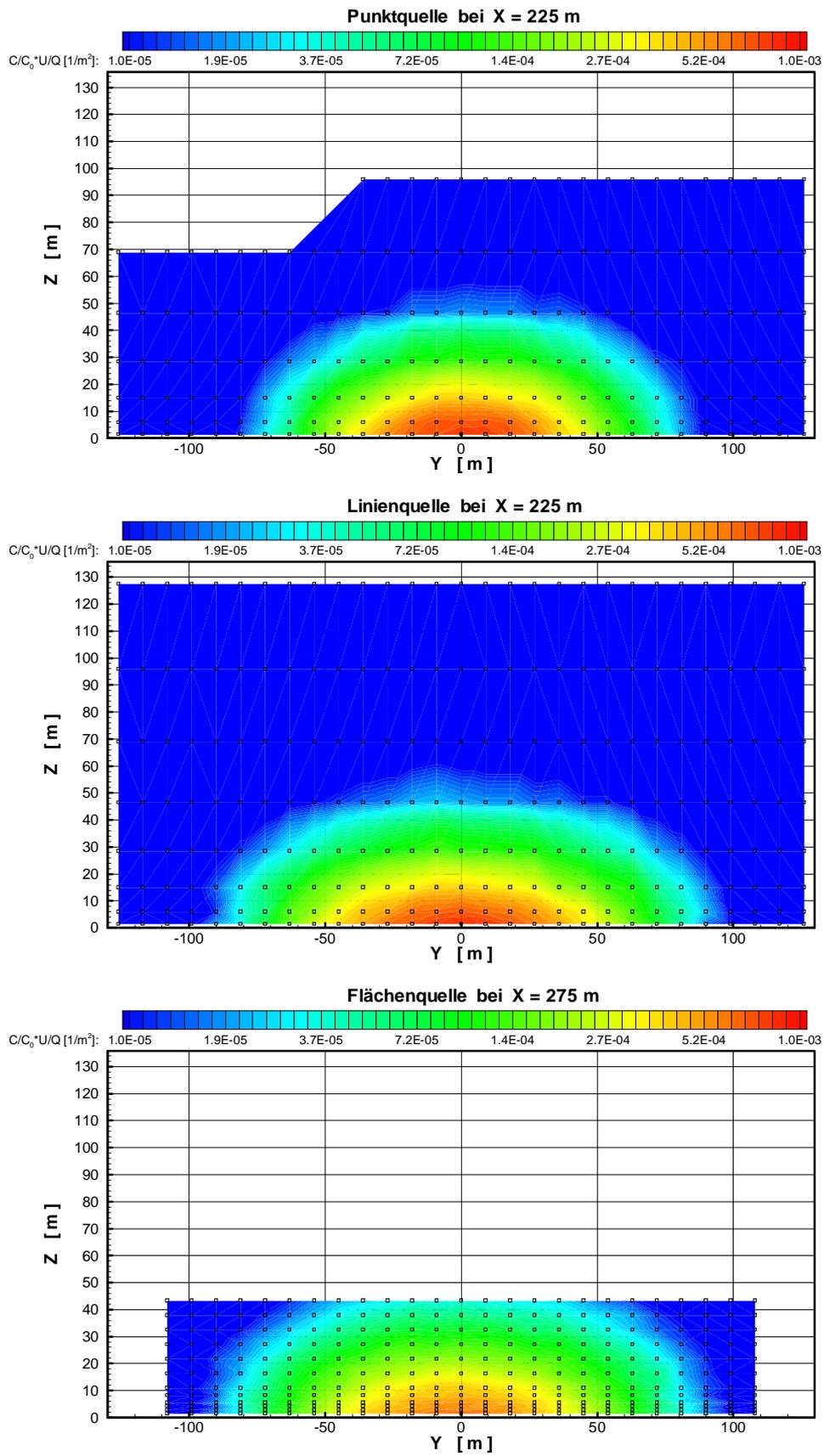


Abbildung 21: Verteilung der normierten Konzentration  $C^*$  in quer zur Winddrömung orientierten Messebenen.

## **6 Literaturverzeichnis**

VDI 3783/12 (2000): Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht, VDI-Richtlinie 3783, Blatt 12, Umweltmeteorologie im VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b.

Townsend, A. A. (1956): The Structure of Turbulent Shear Flow. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England

Snyder; W.H. (1981): Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion. Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC

Sutton, O. G. (1949): Atmospheric Turbulence. Methuen's Monographs on Physical Subjects, London

Simiu, E., Scanlan, R. H. (1986): Wind Effects on Structures – Part A: The Atmosphere. Wiley & Sons Inc.

Counihan, J. (1975): Adiabatic Atmospheric Boundary Layer: A Review and Analysis of Data from the Period 1880-1972. Atmos. Environ., Vol. 9, No. 10, p. 871 – 905

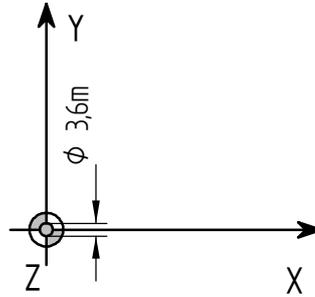
Berljand, M. E. (1982): Moderne Probleme der atmosphärischen Diffusion und der Verschmutzung der Atmosphäre. Hrsg. Dr.-Ing. H. Ihlenfeld, Akademie-Verlag, Berlin 1982

## **Anhang 1**

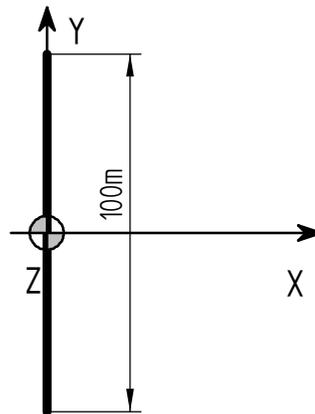
### **Wertetabellen**



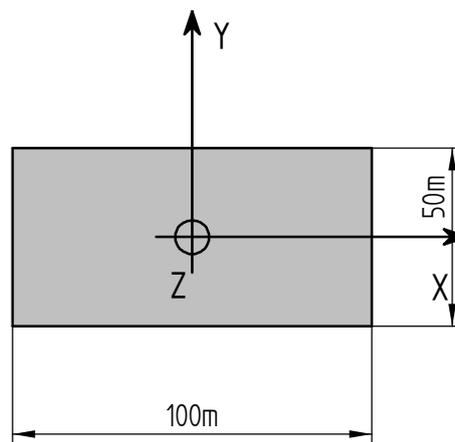
Punktquelle



Linienquelle



Flächenquelle



Definition der verwendeten Koordinatensysteme

# Grenzschichtmessungen

Windkanal - aus mehreren Einzelprofilen gemittelt Windprofil im Bereich des Untersuchungsgebietes in der Messstrecke

Z [ m ]	U [ m/s ]	Urms [ m/s ]	Wrms [ m/s ]	U/U10 [ - ]	Urms/U10 [ - ]	Wrms/U10 [ - ]	Iu [ - ]	Iw [ - ]	Vrms [ m/s ]
3.6	1.84	0.482	0.281	0.84	0.219	0.128	0.262	0.153	
4.3	1.90	0.480	0.290	0.86	0.218	0.132	0.253	0.153	
5.0	1.96	0.484	0.283	0.89	0.220	0.128	0.247	0.144	
5.9	2.02	0.475	0.287	0.92	0.216	0.130	0.235	0.142	0.464
6.9	2.07	0.480	0.284	0.94	0.218	0.129	0.231	0.137	
8.1	2.14	0.478	0.283	0.97	0.217	0.129	0.224	0.132	
9.5	2.20	0.462	0.279	1.00	0.210	0.127	0.211	0.127	
11.2	2.26	0.459	0.283	1.03	0.209	0.129	0.203	0.126	
13.1	2.32	0.466	0.282	1.05	0.212	0.128	0.201	0.121	0.429
15.2	2.38	0.458	0.267	1.08	0.208	0.121	0.192	0.112	
17.7	2.45	0.486	0.276	1.11	0.221	0.126	0.198	0.113	
20.7	2.51	0.470	0.278	1.14	0.214	0.127	0.187	0.111	
24.1	2.58	0.469	0.277	1.17	0.213	0.126	0.181	0.107	0.408
28.1	2.65	0.456	0.285	1.20	0.207	0.130	0.172	0.108	
32.7	2.72	0.442	0.308	1.24	0.201	0.140	0.163	0.113	
38.1	2.79	0.445	0.319	1.27	0.202	0.145	0.159	0.114	
44.3	2.87	0.442	0.317	1.30	0.201	0.144	0.154	0.111	
51.6	2.94	0.456	0.330	1.34	0.207	0.150	0.155	0.112	0.415
60.0	3.02	0.440	0.352	1.37	0.200	0.160	0.146	0.117	
69.8	3.10	0.470	0.360	1.41	0.213	0.163	0.152	0.116	
81.1	3.18	0.448	0.369	1.44	0.204	0.168	0.141	0.116	
94.3	3.26	0.445	0.366	1.48	0.202	0.166	0.136	0.112	
109.7	3.35	0.474	0.373	1.52	0.215	0.169	0.142	0.111	
127.5	3.43	0.438	0.358	1.56	0.199	0.163	0.128	0.104	
148.2	3.52	0.434	0.365	1.60	0.197	0.166	0.123	0.104	
172.3	3.61	0.422	0.344	1.64	0.192	0.156	0.117	0.095	
200.2	3.71	0.388	0.330	1.68	0.176	0.150	0.105	0.089	

## Windkanalmessung - repräsentatives Einzelprofil am Ort der Quelle (U/W-Komponente des Windvektors)

**BEACHTEN: Bodennahe Messpunkte innerhalb der Bodenrauigkeitselemente!**

Z [ m ]	U/U10 [ - ]	W/U10 [ - ]	Urms/U10 [ - ]	Wrms/U10 [ - ]
1.2	0.580	-0.058	0.190	0.088
1.4	0.622	-0.053	0.194	0.097
1.7	0.667	-0.049	0.203	0.102
1.9	0.690	-0.044	0.199	0.106
2.3	0.710	-0.040	0.199	0.110
2.6	0.728	-0.040	0.203	0.115
3.0	0.766	-0.040	0.207	0.119
3.5	0.774	-0.040	0.211	0.119
4.1	0.804	-0.040	0.211	0.123
4.7	0.836	-0.040	0.211	0.128
5.5	0.852	-0.022	0.211	0.123
6.4	0.893	-0.022	0.210	0.127
7.4	0.932	-0.026	0.215	0.127
8.6	0.959	-0.022	0.215	0.127
10.0	1.000	-0.026	0.211	0.127
11.6	1.016	-0.022	0.207	0.128
13.5	1.050	-0.026	0.211	0.127
15.7	1.097	-0.031	0.211	0.123
18.2	1.130	-0.026	0.224	0.127
21.2	1.154	-0.026	0.216	0.128
24.6	1.186	-0.026	0.215	0.127
28.5	1.225	-0.026	0.211	0.132
33.2	1.239	-0.031	0.201	0.140
38.5	1.274	-0.031	0.203	0.146
44.8	1.305	-0.035	0.201	0.144
52.0	1.329	-0.044	0.206	0.149
60.4	1.357	-0.048	0.198	0.158
70.2	1.361	-0.044	0.206	0.158
81.6	1.400	-0.053	0.197	0.162
94.8	1.443	-0.052	0.197	0.162
110.1	1.456	-0.048	0.206	0.162
127.9	1.512	-0.057	0.193	0.158
148.6	1.559	-0.057	0.192	0.162
172.7	1.607	-0.057	0.188	0.153
200.7	1.668	-0.052	0.175	0.148
202.5	1.677	-0.057	0.179	0.153

## Ausbreitungsmessungen

Beachte: In der Tabelle sind nur die normierten Konzentrationen dargestellt, der vollständige Datensatz liegt als Datei vor.

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m <sup>3</sup> ]
<b>Punktquelle Longitudinalprofil 1</b>			
22.5	0.0	1.4	0.0516
22.5	0.0	1.4	0.0498
33.8	0.0	1.4	0.0234
45.0	0.0	1.4	0.0122
56.3	0.0	1.4	0.0083
56.3	0.0	1.4	0.0081
67.5	0.0	1.4	0.0062
78.8	0.0	1.4	0.0048
90.0	0.0	1.4	0.0039
90.0	0.0	181.4	0.0000
90.0	0.0	181.4	0.0000
123.8	0.0	1.4	0.0021
135.0	0.0	1.4	0.0019
146.3	0.0	1.4	0.0017
157.5	0.0	1.4	0.0015
168.8	0.0	1.4	0.0014
180.0	0.0	1.4	0.0012
180.0	0.0	181.4	0.0000
213.8	0.0	1.4	0.0010
213.8	0.0	1.4	0.0009
225.0	0.0	1.4	0.0009
236.3	0.0	1.4	0.0008
247.5	0.0	1.4	0.0007
258.8	0.0	1.4	0.0007
258.8	0.0	181.4	0.0000
303.8	0.0	1.4	0.0005
326.3	0.0	1.4	0.0005
326.3	0.0	1.4	0.0005
348.8	0.0	1.4	0.0004
348.8	0.0	181.4	0.0000
393.8	0.0	1.4	0.0003
416.3	0.0	1.4	0.0003
438.8	0.0	1.4	0.0003
438.8	0.0	181.4	0.0000
483.8	0.0	1.4	0.0002
506.3	0.0	1.4	0.0002
528.8	0.0	1.4	0.0002
528.8	0.0	181.4	0.0000
573.8	0.0	1.4	0.0002
607.5	0.0	1.4	0.0002
607.5	0.0	181.4	0.0000
652.5	0.0	1.4	0.0001
686.3	0.0	1.4	0.0001
686.3	0.0	181.4	0.0000
697.5	0.0	1.4	0.0001
<b>Punktquelle Lateralprofil 1</b>			
31.5	1.1	1.4	0.0300
31.5	2.3	1.4	0.0303
31.5	3.4	1.4	0.0287
31.5	4.5	1.4	0.0257
31.5	5.6	1.4	0.0235
31.5	6.8	1.4	0.0205
31.5	7.9	1.4	0.0165
31.5	9.0	1.4	0.0123
31.5	10.1	1.4	0.0108
31.5	11.3	1.4	0.0083
31.5	12.4	1.4	0.0058
31.5	13.5	1.4	0.0045
31.5	14.6	1.4	0.0035
<b>Punktquelle Lateralprofil 2</b>			
121.5	2.3	1.4	0.0023
121.5	4.5	1.4	0.0024
121.5	6.8	1.4	0.0024
121.5	9.0	1.4	0.0024
121.5	11.3	1.4	0.0023
121.5	13.5	1.4	0.0022
121.5	15.8	1.4	0.0019
121.5	18.0	1.4	0.0018
121.5	20.3	1.4	0.0016
121.5	22.5	1.4	0.0014
121.5	27.0	1.4	0.0010
121.5	31.5	1.4	0.0006
121.5	36.0	1.4	0.0004
121.5	40.5	1.4	0.0003
121.5	45.0	1.4	0.0002
121.5	49.5	1.4	0.0001
121.5	54.0	1.4	0.0000
121.5	0.0	1.4	0.0023
121.5	-2.3	1.4	0.0023
121.5	-4.5	1.4	0.0024
121.5	-6.8	1.4	0.0024
121.5	-9.0	1.4	0.0021
121.5	-11.3	1.4	0.0019
121.5	-13.5	1.4	0.0017
121.5	-15.8	1.4	0.0016
121.5	-18.0	1.4	0.0013
121.5	-20.3	1.4	0.0011
121.5	-22.5	1.4	0.0010
121.5	-27.0	1.4	0.0007
121.5	-31.5	1.4	0.0005
121.5	-36.0	1.4	0.0003
121.5	-40.5	1.4	0.0001
121.5	-45.0	1.4	0.0001
121.5	-49.5	1.4	0.0000
121.5	-54.0	1.4	0.0000
<b>Punktquelle Lateralprofil 3a</b>			
225.0	0.0	1.4	0.0008
225.0	4.5	1.4	0.0008
225.0	9.0	1.4	0.0008

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
225.0	13.5	1.4	0.0008
225.0	18.0	1.4	0.0008
225.0	22.5	1.4	0.0006
225.0	27.0	1.4	0.0006
225.0	31.5	1.4	0.0005
225.0	36.0	1.4	0.0004
225.0	40.5	1.4	0.0005
225.0	45.0	1.4	0.0003
225.0	56.3	1.4	0.0001
225.0	67.5	1.4	0.0001
225.0	78.8	1.4	0.0000
225.0	90.0	1.4	0.0000
225.0	101.3	1.4	0.0000
225.0	112.5	1.4	0.0000
225.0	0.0	1.4	0.0008
225.0	-4.5	1.4	0.0008
225.0	-9.0	1.4	0.0007
225.0	-13.5	1.4	0.0007
225.0	-18.0	1.4	0.0007
225.0	-22.5	1.4	0.0006
225.0	-27.0	1.4	0.0005
225.0	-31.5	1.4	0.0005
225.0	-36.0	1.4	0.0004
225.0	-40.5	1.4	0.0003
225.0	-45.0	1.4	0.0002
225.0	-56.3	1.4	0.0001
225.0	-67.5	1.4	0.0000
225.0	-78.8	1.4	0.0000
225.0	-90.0	1.4	0.0000
225.0	-101.3	1.4	0.0000
225.0	-112.5	1.4	0.0000
225.0	0.0	1.4	0.0008
<b>Punktquelle Lateralprofil 3b</b>			
225.0	0.0	1.4	0.0008
225.0	4.5	1.4	0.0008
225.0	4.5	1.4	0.0008
225.0	9.0	1.4	0.0008
225.0	13.5	1.4	0.0008
225.0	18.0	1.4	0.0008
225.0	22.5	1.4	0.0006
225.0	27.0	1.4	0.0005
225.0	31.5	1.4	0.0005
225.0	36.0	1.4	0.0004
225.0	40.5	1.4	0.0004
225.0	45.0	1.4	0.0003
225.0	56.3	1.4	0.0002
225.0	67.5	1.4	0.0001
225.0	78.8	1.4	0.0000
225.0	90.0	1.4	0.0000
225.0	101.3	1.4	0.0000
<b>Punktquelle Lateralprofil 4</b>			
423.0	0.0	1.4	0.0003
423.0	11.3	1.4	0.0003
423.0	22.5	1.4	0.0003
423.0	33.8	1.4	0.0002
423.0	45.0	1.4	0.0002
423.0	56.3	1.4	0.0001
423.0	67.5	1.4	0.0001
423.0	78.8	1.4	0.0001
423.0	90.0	1.4	0.0000
423.0	101.3	1.4	0.0000
423.0	112.5	1.4	0.0000
423.0	135.0	1.4	0.0000
423.0	157.5	1.4	0.0000
423.0	0.0	1.4	0.0003
423.0	-11.3	1.4	0.0003
423.0	-22.5	1.4	0.0003
423.0	-33.8	1.4	0.0002
423.0	-45.0	1.4	0.0002

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
423.0	-56.3	1.4	0.0001
423.0	-67.5	1.4	0.0001
423.0	-78.8	1.4	0.0001
423.0	-90.0	1.4	0.0000
423.0	-101.3	1.4	0.0000
423.0	-112.5	1.4	0.0000
423.0	-135.0	1.4	0.0000
423.0	-157.5	1.4	0.0000
<b>Punktquelle Lateralprofil 5</b>			
702.0	0.0	0.0	0.0001
702.0	11.3	0.0	0.0001
702.0	22.5	0.0	0.0001
702.0	33.8	0.0	0.0001
702.0	45.0	0.0	0.0001
702.0	56.3	0.0	0.0001
702.0	67.5	0.0	0.0001
702.0	78.8	0.0	0.0001
702.0	90.0	0.0	0.0000
702.0	101.3	0.0	0.0000
702.0	112.5	0.0	0.0000
702.0	135.0	0.0	0.0000
702.0	157.5	0.0	0.0000
702.0	180.0	0.0	0.0000
702.0	202.5	0.0	0.0000
702.0	225.0	0.0	0.0000
702.0	0.0	0.0	0.0001
702.0	-11.3	0.0	0.0001
702.0	-22.5	0.0	0.0001
702.0	-33.8	0.0	0.0001
702.0	-45.0	0.0	0.0001
702.0	-56.3	0.0	0.0001
702.0	-67.5	0.0	0.0001
702.0	-78.8	0.0	0.0001
702.0	-90.0	0.0	0.0000
702.0	-101.3	0.0	0.0000
702.0	-112.5	0.0	0.0000
702.0	-135.0	0.0	0.0000
702.0	-157.5	0.0	0.0000
702.0	-180.0	0.0	0.0000
702.0	-202.5	0.0	0.0000
702.0	-225.0	0.0	0.0000
702.0	0.0	0.0	0.0001
<b>Punktquelle Vertikalprofil 1</b>			
31.5	0.0	1.4	0.0281
31.5	0.0	2.5	0.0174
31.5	0.0	3.6	0.0099
31.5	0.0	4.7	0.0073
31.5	0.0	5.9	0.0037
31.5	0.0	7.0	0.0022
31.5	0.0	8.1	0.0011
31.5	0.0	9.2	0.0007
31.5	0.0	10.4	0.0003
31.5	0.0	11.5	0.0001
31.5	0.0	12.6	0.0001
31.5	0.0	13.7	0.0000
31.5	0.0	14.9	0.0000
31.5	0.0	16.0	0.0000
31.5	0.0	17.1	0.0000
<b>Punktquelle Vertikalprofil 2</b>			
121.5	0.0	1.4	0.0022
121.5	0.0	3.6	0.0021
121.5	0.0	5.9	0.0017
121.5	0.0	8.1	0.0014
121.5	0.0	10.4	0.0010
121.5	0.0	12.6	0.0007
121.5	0.0	14.9	0.0005
121.5	0.0	17.1	0.0004
121.5	0.0	19.4	0.0002
121.5	0.0	21.6	0.0002

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
121.5	0.0	23.9	0.0001
121.5	0.0	26.1	0.0001
121.5	0.0	28.4	0.0000
121.5	0.0	30.6	0.0000
121.5	0.0	32.9	0.0000
121.5	0.0	35.1	0.0000
121.5	0.0	37.4	0.0000
121.5	0.0	39.6	0.0000
121.5	0.0	41.9	0.0000
121.5	0.0	44.1	0.0000
121.5	0.0	46.4	0.0000
<b>Punktquelle Vertikalprofil 3</b>			
225.0	0.0	1.4	0.0008
225.0	0.0	3.6	0.0008
225.0	0.0	5.9	0.0007
225.0	0.0	8.1	0.0006
225.0	0.0	10.4	0.0005
225.0	0.0	12.6	0.0005
225.0	0.0	14.9	0.0004
225.0	0.0	17.1	0.0003
225.0	0.0	19.4	0.0003
225.0	0.0	21.6	0.0002
225.0	0.0	23.9	0.0002
225.0	0.0	26.1	0.0002
225.0	0.0	28.4	0.0001
225.0	0.0	30.6	0.0001
225.0	0.0	32.9	0.0001
225.0	0.0	35.1	0.0001
225.0	0.0	39.6	0.0000
225.0	0.0	44.1	0.0000
225.0	0.0	48.6	0.0000
225.0	0.0	53.1	0.0000
225.0	0.0	57.6	0.0000
225.0	0.0	62.1	0.0000
225.0	0.0	66.6	0.0000
225.0	0.0	71.1	0.0000
<b>Punktquelle Vertikalprofil 4</b>			
423.0	0.0	1.4	0.0003
423.0	0.0	5.9	0.0003
423.0	0.0	10.4	0.0002
423.0	0.0	14.9	0.0002
423.0	0.0	19.4	0.0002
423.0	0.0	23.9	0.0001
423.0	0.0	28.4	0.0001
423.0	0.0	32.9	0.0001
423.0	0.0	37.4	0.0001
423.0	0.0	41.9	0.0001
423.0	0.0	46.4	0.0000
423.0	0.0	50.9	0.0000
423.0	0.0	55.4	0.0000
423.0	0.0	59.9	0.0000
423.0	0.0	64.4	0.0000
423.0	0.0	68.9	0.0000
423.0	0.0	73.4	0.0000
423.0	0.0	77.9	0.0000
423.0	0.0	82.4	0.0000
423.0	0.0	86.9	0.0000
423.0	0.0	91.4	0.0000
<b>Punktquelle Vertikalprofil 5</b>			
702.0	0.0	1.4	0.0001
702.0	0.0	5.9	0.0001
702.0	0.0	10.4	0.0001
702.0	0.0	14.9	0.0001
702.0	0.0	19.4	0.0001
702.0	0.0	23.9	0.0001
702.0	0.0	28.4	0.0001
702.0	0.0	32.9	0.0001
702.0	0.0	37.4	0.0001
702.0	0.0	41.9	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
702.0	0.0	46.4	0.0000
702.0	0.0	50.9	0.0000
702.0	0.0	55.4	0.0000
702.0	0.0	59.9	0.0000
702.0	0.0	64.4	0.0000
702.0	0.0	68.9	0.0000
702.0	0.0	73.4	0.0000
702.0	0.0	77.9	0.0000
702.0	0.0	82.4	0.0000
702.0	0.0	86.9	0.0000
702.0	0.0	91.4	0.0000
702.0	0.0	95.9	0.0000
702.0	0.0	100.4	0.0000
702.0	0.0	104.9	0.0000
702.0	0.0	109.4	0.0000
702.0	0.0	113.9	0.0000
702.0	0.0	1.4	0.0001
<b>Punktquelle Lateralebene 1</b>			
225.0	0.0	1.4	0.0008
225.0	9.0	1.4	0.0008
225.0	18.0	1.4	0.0007
225.0	27.0	1.4	0.0006
225.0	36.0	1.4	0.0004
225.0	45.0	1.4	0.0003
225.0	54.0	1.4	0.0002
225.0	63.0	1.4	0.0001
225.0	72.0	1.4	0.0001
225.0	81.0	1.4	0.0000
225.0	90.0	1.4	0.0000
225.0	99.0	1.4	0.0000
225.0	108.0	1.4	0.0000
225.0	117.0	1.4	0.0000
225.0	126.0	1.4	0.0000
225.0	0.0	1.4	0.0008
225.0	-9.0	1.4	0.0007
225.0	-18.0	1.4	0.0007
225.0	-27.0	1.4	0.0005
225.0	-36.0	1.4	0.0004
225.0	-45.0	1.4	0.0002
225.0	-54.0	1.4	0.0001
225.0	-63.0	1.4	0.0001
225.0	-72.0	1.4	0.0000
225.0	-81.0	1.4	0.0000
225.0	-90.0	1.4	0.0000
225.0	-99.0	1.4	0.0000
225.0	-108.0	1.4	0.0000
225.0	-117.0	1.4	0.0000
225.0	-126.0	1.4	0.0000
225.0	0.0	5.9	0.0007
225.0	9.0	5.9	0.0007
225.0	18.0	5.9	0.0007
225.0	27.0	5.9	0.0005
225.0	36.0	5.9	0.0004
225.0	45.0	5.9	0.0002
225.0	54.0	5.9	0.0002
225.0	63.0	5.9	0.0001
225.0	72.0	5.9	0.0000
225.0	81.0	5.9	0.0000
225.0	90.0	5.9	0.0000
225.0	99.0	5.9	0.0000
225.0	108.0	5.9	0.0000
225.0	117.0	5.9	0.0000
225.0	126.0	5.9	0.0000
225.0	0.0	5.9	0.0007
225.0	-9.0	5.9	0.0007
225.0	-18.0	5.9	0.0006
225.0	-27.0	5.9	0.0005
225.0	-36.0	5.9	0.0003
225.0	-45.0	5.9	0.0002

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
225.0	-54.0	5.9	0.0001
225.0	-63.0	5.9	0.0000
225.0	-72.0	5.9	0.0000
225.0	-81.0	5.9	0.0000
225.0	-90.0	5.9	0.0000
225.0	-99.0	5.9	0.0000
225.0	-108.0	5.9	0.0000
225.0	-117.0	5.9	0.0000
225.0	-126.0	5.9	0.0000
225.0	0.0	14.9	0.0004
225.0	9.0	14.9	0.0004
225.0	18.0	14.9	0.0003
225.0	27.0	14.9	0.0003
225.0	36.0	14.9	0.0002
225.0	45.0	14.9	0.0002
225.0	54.0	14.9	0.0001
225.0	63.0	14.9	0.0001
225.0	72.0	14.9	0.0000
225.0	81.0	14.9	0.0000
225.0	90.0	14.9	0.0000
225.0	99.0	14.9	0.0000
225.0	108.0	14.9	0.0000
225.0	117.0	14.9	0.0000
225.0	126.0	14.9	0.0000
225.0	0.0	14.9	0.0004
225.0	-9.0	14.9	0.0004
225.0	-18.0	14.9	0.0003
225.0	-27.0	14.9	0.0003
225.0	-36.0	14.9	0.0002
225.0	-45.0	14.9	0.0001
225.0	-54.0	14.9	0.0001
225.0	-63.0	14.9	0.0000
225.0	-72.0	14.9	0.0000
225.0	-81.0	14.9	0.0000
225.0	-90.0	14.9	0.0000
225.0	-99.0	14.9	0.0000
225.0	-108.0	14.9	0.0000
225.0	-117.0	14.9	0.0000
225.0	-126.0	14.9	0.0000
225.0	0.0	28.4	0.0001
225.0	9.0	28.4	0.0001
225.0	18.0	28.4	0.0001
225.0	27.0	28.4	0.0001
225.0	36.0	28.4	0.0001
225.0	36.0	28.4	0.0001
225.0	45.0	28.4	0.0001
225.0	54.0	28.4	0.0000
225.0	63.0	28.4	0.0000
225.0	72.0	28.4	0.0000
225.0	81.0	28.4	0.0000
225.0	90.0	28.4	0.0000
225.0	99.0	28.4	0.0000
225.0	108.0	28.4	0.0000
225.0	117.0	28.4	0.0000
225.0	126.0	28.4	0.0000
225.0	0.0	28.4	0.0001
225.0	-9.0	28.4	0.0001
225.0	-18.0	28.4	0.0001
225.0	-27.0	28.4	0.0001
225.0	-36.0	28.4	0.0001
225.0	-45.0	28.4	0.0000
225.0	-54.0	28.4	0.0000
225.0	-63.0	28.4	0.0000
225.0	-72.0	28.4	0.0000
225.0	-81.0	28.4	0.0000
225.0	-90.0	28.4	0.0000
225.0	-99.0	28.4	0.0000
225.0	-108.0	28.4	0.0000
225.0	-117.0	28.4	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
225.0	-126.0	28.4	0.0000
225.0	0.0	46.4	0.0000
225.0	9.0	46.4	0.0000
225.0	18.0	46.4	0.0000
225.0	27.0	46.4	0.0000
225.0	36.0	46.4	0.0000
225.0	45.0	46.4	0.0000
225.0	54.0	46.4	0.0000
225.0	63.0	46.4	0.0000
225.0	72.0	46.4	0.0000
225.0	81.0	46.4	0.0000
225.0	90.0	46.4	0.0000
225.0	99.0	46.4	0.0000
225.0	108.0	46.4	0.0000
225.0	117.0	46.4	0.0000
225.0	126.0	46.4	0.0000
225.0	0.0	46.4	0.0000
225.0	-9.0	46.4	0.0000
225.0	-18.0	46.4	0.0000
225.0	-27.0	46.4	0.0000
225.0	-36.0	46.4	0.0000
225.0	-45.0	46.4	0.0000
225.0	-54.0	46.4	0.0000
225.0	-63.0	46.4	0.0000
225.0	-72.0	46.4	0.0000
225.0	-81.0	46.4	0.0000
225.0	-90.0	46.4	0.0000
225.0	-99.0	46.4	0.0000
225.0	-108.0	46.4	0.0000
225.0	-117.0	46.4	0.0000
225.0	-126.0	46.4	0.0000
225.0	0.0	68.9	0.0000
225.0	9.0	68.9	0.0000
225.0	18.0	68.9	0.0000
225.0	27.0	68.9	0.0000
225.0	36.0	68.9	0.0000
225.0	45.0	68.9	0.0000
225.0	54.0	68.9	0.0000
225.0	63.0	68.9	0.0000
225.0	72.0	68.9	0.0000
225.0	81.0	68.9	0.0000
225.0	90.0	68.9	0.0000
225.0	99.0	68.9	0.0000
225.0	108.0	68.9	0.0000
225.0	117.0	68.9	0.0000
225.0	126.0	68.9	0.0000
225.0	0.0	68.9	0.0000
225.0	-9.0	68.9	0.0000
225.0	-18.0	68.9	0.0000
225.0	-27.0	68.9	0.0000
225.0	-36.0	68.9	0.0000
225.0	-45.0	68.9	0.0000
225.0	-54.0	68.9	0.0000
225.0	-63.0	68.9	0.0000
225.0	-72.0	68.9	0.0000
225.0	-81.0	68.9	0.0000
225.0	-90.0	68.9	0.0000
225.0	-99.0	68.9	0.0000
225.0	-108.0	68.9	0.0000
225.0	-117.0	68.9	0.0000
225.0	-126.0	68.9	0.0000
225.0	0.0	95.9	0.0000
225.0	9.0	95.9	0.0000
225.0	18.0	95.9	0.0000
225.0	27.0	95.9	0.0000
225.0	36.0	95.9	0.0000
225.0	45.0	95.9	0.0000
225.0	45.0	95.9	0.0000
225.0	54.0	95.9	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
225.0	63.0	95.9	0.0000
225.0	72.0	95.9	0.0000
225.0	81.0	95.9	0.0000
225.0	90.0	95.9	0.0000
225.0	99.0	95.9	0.0000
225.0	108.0	95.9	0.0000
225.0	117.0	95.9	0.0000
225.0	126.0	95.9	0.0000
225.0	0.0	95.9	0.0000
225.0	-9.0	95.9	0.0000
225.0	-18.0	95.9	0.0000
225.0	-27.0	95.9	0.0000
225.0	-36.0	95.9	0.0000
<b>Linienquelle Longitudinalprofil 1a</b>			
22.5	0.0	1.4	0.0092
33.8	0.0	1.4	0.0061
45.0	0.0	1.4	0.0044
56.3	0.0	1.4	0.0036
67.5	0.0	1.4	0.0031
78.8	0.0	1.4	0.0026
78.8	0.0	1.4	0.0025
90.0	0.0	1.4	0.0023
90.0	0.0	181.4	0.0000
123.8	0.0	1.4	0.0015
135.0	0.0	1.4	0.0013
146.3	0.0	1.4	0.0012
157.5	0.0	1.4	0.0011
168.8	0.0	1.4	0.0010
168.8	0.0	1.4	0.0010
180.0	0.0	1.4	0.0010
180.0	0.0	181.4	0.0000
213.8	0.0	1.4	0.0007
225.0	0.0	1.4	0.0007
236.3	0.0	1.4	0.0006
247.5	0.0	1.4	0.0006
258.8	0.0	1.4	0.0006
258.8	0.0	181.4	0.0000
303.8	0.0	1.4	0.0004
326.3	0.0	1.4	0.0004
348.8	0.0	1.4	0.0003
348.8	0.0	181.4	0.0000
393.8	0.0	1.4	0.0003
416.3	0.0	1.4	0.0003
438.8	0.0	1.4	0.0002
438.8	0.0	181.4	0.0000
483.8	0.0	1.4	0.0002
483.8	0.0	1.4	0.0002
506.3	0.0	1.4	0.0002
528.8	0.0	1.4	0.0002
528.8	0.0	181.4	0.0000
573.8	0.0	1.4	0.0002
607.5	0.0	1.4	0.0001
607.5	0.0	181.4	0.0000
652.5	0.0	1.4	0.0001
686.3	0.0	1.4	0.0001
686.3	0.0	181.4	0.0000
697.5	0.0	1.4	0.0001
<b>Linienquelle Longitudinalprofil 1b</b>			
22.5	0.0	1.4	0.0172
33.8	0.0	1.4	0.0117
45.0	0.0	1.4	0.0071
56.3	0.0	1.4	0.0057
56.3	0.0	1.4	0.0048
67.5	0.0	1.4	0.0034
78.8	0.0	1.4	0.0029
90.0	0.0	1.4	0.0027
90.0	0.0	181.4	0.0000
123.8	0.0	1.4	0.0018
135.0	0.0	1.4	0.0017

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
146.3	0.0	1.4	0.0014
157.5	0.0	1.4	0.0013
168.8	0.0	1.4	0.0012
180.0	0.0	1.4	0.0011
180.0	0.0	181.4	0.0000
213.8	0.0	1.4	0.0008
225.0	0.0	1.4	0.0007
236.3	0.0	1.4	0.0007
247.5	0.0	1.4	0.0007
258.8	0.0	1.4	0.0006
258.8	0.0	181.4	0.0000
303.8	0.0	1.4	0.0004
326.3	0.0	1.4	0.0004
348.8	0.0	1.4	0.0004
348.8	0.0	181.4	0.0000
416.3	0.0	1.4	0.0003
438.8	0.0	1.4	0.0003
438.8	0.0	181.4	0.0000
483.8	0.0	1.4	0.0002
506.3	0.0	1.4	0.0002
528.8	0.0	1.4	0.0002
573.8	0.0	1.4	0.0002
607.5	0.0	1.4	0.0002
652.5	0.0	1.4	0.0001
686.3	0.0	1.4	0.0001
686.3	0.0	181.4	0.0000
697.5	0.0	1.4	0.0001
<b>Linienquelle Lateralprofil 1</b>			
31.5	0.0	1.4	0.0107
31.5	4.5	1.4	0.0104
31.5	9.0	1.4	0.0107
31.5	13.5	1.4	0.0099
31.5	18.0	1.4	0.0086
31.5	22.5	1.4	0.0071
31.5	27.0	1.4	0.0038
31.5	31.5	1.4	0.0020
31.5	36.0	1.4	0.0007
31.5	40.5	1.4	0.0002
31.5	45.0	1.4	0.0000
31.5	49.5	1.4	0.0000
31.5	54.0	1.4	0.0000
31.5	58.5	1.4	0.0000
31.5	63.0	1.4	0.0000
31.5	67.5	1.4	0.0000
31.5	72.0	1.4	0.0000
31.5	76.5	1.4	0.0000
31.5	81.0	1.4	0.0000
31.5	85.5	1.4	0.0000
31.5	90.0	1.4	0.0000
31.5	0.0	1.4	0.0106
31.5	-4.5	1.4	0.0101
31.5	-9.0	1.4	0.0081
31.5	-13.5	1.4	0.0100
31.5	-18.0	1.4	0.0098
31.5	-22.5	1.4	0.0087
31.5	-27.0	1.4	0.0059
31.5	-31.5	1.4	0.0027
31.5	-36.0	1.4	0.0010
31.5	-40.5	1.4	0.0003
31.5	-45.0	1.4	0.0001
31.5	-49.5	1.4	0.0000
31.5	-54.0	1.4	0.0000
31.5	-58.5	1.4	0.0000
31.5	-63.0	1.4	0.0000
31.5	-67.5	1.4	0.0000
31.5	-72.0	1.4	0.0000
<b>Linienquelle Lateralprofil 2</b>			
121.5	0.0	1.4	0.0019
121.5	4.5	1.4	0.0017

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
121.5	9.0	1.4	0.0017
121.5	13.5	1.4	0.0017
121.5	18.0	1.4	0.0016
121.5	22.5	1.4	0.0013
121.5	27.0	1.4	0.0011
121.5	31.5	1.4	0.0010
121.5	36.0	1.4	0.0008
121.5	40.5	1.4	0.0006
121.5	45.0	1.4	0.0005
121.5	49.5	1.4	0.0003
121.5	54.0	1.4	0.0002
121.5	58.5	1.4	0.0001
121.5	63.0	1.4	0.0001
121.5	67.5	1.4	0.0000
121.5	72.0	1.4	0.0000
121.5	76.5	1.4	0.0000
121.5	81.0	1.4	0.0000
121.5	85.5	1.4	0.0000
121.5	90.0	1.4	0.0000
121.5	94.5	1.4	0.0000
121.5	99.0	1.4	0.0000
121.5	103.5	1.4	0.0000
121.5	108.0	1.4	0.0000
121.5	112.5	1.4	0.0000
121.5	0.0	1.4	0.0019
121.5	-4.5	1.4	0.0019
121.5	-9.0	1.4	0.0020
121.5	-13.5	1.4	0.0018
121.5	-18.0	1.4	0.0018
121.5	-22.5	1.4	0.0016
121.5	-27.0	1.4	0.0014
121.5	-31.5	1.4	0.0012
121.5	-36.0	1.4	0.0010
121.5	-40.5	1.4	0.0008
121.5	-45.0	1.4	0.0005
121.5	-49.5	1.4	0.0003
121.5	-54.0	1.4	0.0002
121.5	-58.5	1.4	0.0001
121.5	-63.0	1.4	0.0001
121.5	-67.5	1.4	0.0000
121.5	-72.0	1.4	0.0000
121.5	-76.5	1.4	0.0000
121.5	-81.0	1.4	0.0000
121.5	-85.5	1.4	0.0000
121.5	-90.0	1.4	0.0000
121.5	-94.5	1.4	0.0000
121.5	-99.0	1.4	0.0000
121.5	-103.5	1.4	0.0000
121.5	-108.0	1.4	0.0000
121.5	-112.5	1.4	0.0000
121.5	0.0	1.4	0.0019
<b>Linienquelle Lateralprofil 3</b>			
225.0	0.0	1.4	0.0008
225.0	9.0	1.4	0.0007
225.0	18.0	1.4	0.0007
225.0	27.0	1.4	0.0006
225.0	36.0	1.4	0.0005
225.0	45.0	1.4	0.0004
225.0	54.0	1.4	0.0002
225.0	63.0	1.4	0.0002
225.0	72.0	1.4	0.0001
225.0	81.0	1.4	0.0000
225.0	90.0	1.4	0.0000
225.0	99.0	1.4	0.0000
225.0	108.0	1.4	0.0000
225.0	117.0	1.4	0.0000
225.0	126.0	1.4	0.0000
225.0	135.0	1.4	0.0000
225.0	0.0	1.4	0.0007

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
225.0	-9.0	1.4	0.0008
225.0	-18.0	1.4	0.0007
225.0	-27.0	1.4	0.0006
225.0	-36.0	1.4	0.0005
225.0	-45.0	1.4	0.0004
225.0	-54.0	1.4	0.0003
225.0	-63.0	1.4	0.0002
225.0	-72.0	1.4	0.0001
225.0	-81.0	1.4	0.0000
225.0	-90.0	1.4	0.0000
225.0	-99.0	1.4	0.0000
225.0	-108.0	1.4	0.0000
225.0	-117.0	1.4	0.0000
225.0	-126.0	1.4	0.0000
225.0	-135.0	1.4	0.0000
225.0	0.0	1.4	0.0008
<b>Linienquelle Lateralprofil 4</b>			
423.0	0.0	1.4	0.0003
423.0	11.3	1.4	0.0003
423.0	22.5	1.4	0.0003
423.0	33.8	1.4	0.0002
423.0	45.0	1.4	0.0002
423.0	56.3	1.4	0.0002
423.0	67.5	1.4	0.0001
423.0	78.8	1.4	0.0001
423.0	90.0	1.4	0.0000
423.0	101.3	1.4	0.0000
423.0	112.5	1.4	0.0000
423.0	123.8	1.4	0.0000
423.0	135.0	1.4	0.0000
423.0	146.3	1.4	0.0000
423.0	157.5	1.4	0.0000
423.0	168.8	1.4	0.0000
423.0	180.0	1.4	0.0000
423.0	0.0	1.4	0.0003
423.0	-11.3	1.4	0.0003
423.0	-22.5	1.4	0.0003
423.0	-33.8	1.4	0.0002
423.0	-45.0	1.4	0.0002
423.0	-56.3	1.4	0.0002
423.0	-67.5	1.4	0.0001
423.0	-78.8	1.4	0.0001
423.0	-90.0	1.4	0.0001
423.0	-101.3	1.4	0.0000
423.0	-112.5	1.4	0.0000
423.0	-123.8	1.4	0.0000
423.0	-135.0	1.4	0.0000
423.0	-146.3	1.4	0.0000
423.0	-157.5	1.4	0.0000
423.0	-168.8	1.4	0.0000
423.0	-180.0	1.4	0.0000
423.0	0.0	1.4	0.0003
<b>Linienquelle Lateralprofil 5</b>			
702.0	0.0	1.4	0.0001
702.0	9.0	1.4	0.0001
702.0	18.0	1.4	0.0002
702.0	27.0	1.4	0.0001
702.0	36.0	1.4	0.0001
702.0	45.0	1.4	0.0001
702.0	54.0	1.4	0.0001
702.0	63.0	1.4	0.0001
702.0	72.0	1.4	0.0001
702.0	81.0	1.4	0.0001
702.0	90.0	1.4	0.0001
702.0	99.0	1.4	0.0000
702.0	108.0	1.4	0.0000
702.0	117.0	1.4	0.0000
702.0	135.0	1.4	0.0000
702.0	144.0	1.4	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
702.0	153.0	1.4	0.0000
702.0	162.0	1.4	0.0000
702.0	171.0	1.4	0.0000
702.0	180.0	1.4	0.0000
702.0	189.0	1.4	0.0000
702.0	198.0	1.4	0.0000
702.0	207.0	1.4	0.0000
702.0	0.0	1.4	0.0001
702.0	-9.0	1.4	0.0001
702.0	-18.0	1.4	0.0001
702.0	-27.0	1.4	0.0001
702.0	-36.0	1.4	0.0001
702.0	-45.0	1.4	0.0001
702.0	-54.0	1.4	0.0001
702.0	-63.0	1.4	0.0001
702.0	-72.0	1.4	0.0001
702.0	-81.0	1.4	0.0001
702.0	-90.0	1.4	0.0001
702.0	-99.0	1.4	0.0000
702.0	-108.0	1.4	0.0000
702.0	-117.0	1.4	0.0000
702.0	-126.0	1.4	0.0000
702.0	-135.0	1.4	0.0000
702.0	-144.0	1.4	0.0000
702.0	-144.0	1.4	0.0000
702.0	-153.0	1.4	0.0000
702.0	-162.0	1.4	0.0000
702.0	-171.0	1.4	0.0000
702.0	-180.0	1.4	0.0000
702.0	-189.0	1.4	0.0000
702.0	-198.0	1.4	0.0000
<b>Linienquelle Vertikalprofil 1a</b>			
31.5	0.0	1.4	0.0099
31.5	0.0	2.5	0.0073
31.5	0.0	3.6	0.0047
31.5	0.0	4.7	0.0028
31.5	0.0	5.9	0.0019
31.5	0.0	7.0	0.0012
31.5	0.0	8.1	0.0007
31.5	0.0	9.2	0.0004
31.5	0.0	10.4	0.0002
31.5	0.0	11.5	0.0001
31.5	0.0	12.6	0.0001
31.5	0.0	13.7	0.0000
31.5	0.0	14.9	0.0000
31.5	0.0	16.0	0.0000
31.5	0.0	17.1	0.0000
31.5	0.0	18.2	0.0000
31.5	0.0	19.4	0.0000
31.5	0.0	20.5	0.0000
31.5	0.0	21.6	0.0000
31.5	0.0	22.7	0.0000
31.5	0.0	23.9	0.0000
31.5	0.0	25.0	0.0000
31.5	0.0	26.1	0.0000
31.5	0.0	27.2	0.0000
31.5	0.0	28.4	0.0000
31.5	0.0	29.5	0.0000
31.5	0.0	30.6	0.0000
31.5	0.0	31.7	0.0000
31.5	0.0	32.9	0.0000
31.5	0.0	34.0	0.0000
31.5	0.0	35.1	0.0000
31.5	0.0	36.2	0.0000
31.5	0.0	37.4	0.0000
31.5	0.0	38.5	0.0000
31.5	0.0	39.6	0.0000
<b>Linienquelle Vertikalprofil 1b</b>			
31.5	0.0	1.4	0.0098
31.5	0.0	2.5	0.0076
31.5	0.0	3.6	0.0051
31.5	0.0	4.7	0.0035
31.5	0.0	5.9	0.0022
31.5	0.0	7.0	0.0013
31.5	0.0	8.1	0.0008
31.5	0.0	9.2	0.0005
31.5	0.0	10.4	0.0002
31.5	0.0	11.5	0.0001

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
31.5	0.0	12.6	0.0001
31.5	0.0	13.7	0.0000
31.5	0.0	14.9	0.0000
31.5	0.0	16.0	0.0000
31.5	0.0	17.1	0.0000
31.5	0.0	18.2	0.0000
31.5	0.0	19.4	0.0000
31.5	0.0	21.6	0.0000
31.5	0.0	23.9	0.0000
31.5	0.0	26.1	0.0000
31.5	0.0	28.4	0.0000
31.5	0.0	30.6	0.0000
31.5	0.0	32.9	0.0000
31.5	0.0	35.1	0.0000
31.5	0.0	37.4	0.0000
31.5	0.0	39.6	0.0000
<b>Linienquelle Vertikalprofil 1c</b>			
31.5	0.0	1.4	0.0104
31.5	0.0	2.5	0.0076
31.5	0.0	3.6	0.0050
31.5	0.0	4.7	0.0032
31.5	0.0	5.9	0.0020
31.5	0.0	7.0	0.0012
31.5	0.0	8.1	0.0006
31.5	0.0	9.2	0.0004
31.5	0.0	10.4	0.0002
31.5	0.0	11.5	0.0001
31.5	0.0	12.6	0.0001
31.5	0.0	13.7	0.0000
31.5	0.0	14.9	0.0000
31.5	0.0	16.0	0.0000
31.5	0.0	17.1	0.0000
31.5	0.0	18.2	0.0000
31.5	0.0	19.4	0.0000
31.5	0.0	21.6	0.0000
31.5	0.0	23.9	0.0000
31.5	0.0	26.1	0.0000
31.5	0.0	28.4	0.0000
31.5	0.0	30.6	0.0000
31.5	0.0	32.9	0.0000
31.5	0.0	35.1	0.0000
31.5	0.0	37.4	0.0000
31.5	0.0	39.6	0.0000
<b>Linienquelle Vertikalprofil 2</b>			
121.5	0.0	1.4	0.0018
121.5	0.0	3.6	0.0016
121.5	0.0	5.9	0.0014
121.5	0.0	8.1	0.0011
121.5	0.0	10.4	0.0008
121.5	0.0	12.6	0.0006
121.5	0.0	14.9	0.0004
121.5	0.0	17.1	0.0003
121.5	0.0	19.4	0.0002
121.5	0.0	21.6	0.0002
121.5	0.0	23.9	0.0001
121.5	0.0	26.1	0.0001
121.5	0.0	28.4	0.0000
121.5	0.0	30.6	0.0000
121.5	0.0	32.9	0.0000
121.5	0.0	35.1	0.0000
121.5	0.0	37.4	0.0000
121.5	0.0	39.6	0.0000
<b>Linienquelle Vertikalprofil 3</b>			
225.0	0.0	1.4	0.0008
225.0	0.0	3.6	0.0008

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
225.0	0.0	5.9	0.0007
225.0	0.0	8.1	0.0006
225.0	0.0	10.4	0.0005
225.0	0.0	12.6	0.0004
225.0	0.0	14.9	0.0004
225.0	0.0	17.1	0.0003
225.0	0.0	19.4	0.0003
225.0	0.0	21.6	0.0002
225.0	0.0	23.9	0.0002
225.0	0.0	26.1	0.0001
225.0	0.0	28.4	0.0001
225.0	0.0	30.6	0.0001
225.0	0.0	32.9	0.0001
225.0	0.0	35.1	0.0001
225.0	0.0	39.6	0.0000
225.0	0.0	44.1	0.0000
225.0	0.0	48.6	0.0000
225.0	0.0	53.1	0.0000
225.0	0.0	57.6	0.0000
225.0	0.0	62.1	0.0000
225.0	0.0	66.6	0.0000
225.0	0.0	71.1	0.0000
225.0	0.0	1.4	0.0008
<b>Linienquelle Vertikalprofil 4</b>			
423.0	0.0	1.4	0.0003
423.0	0.0	5.9	0.0003
423.0	0.0	10.4	0.0002
423.0	0.0	14.9	0.0002
423.0	0.0	19.4	0.0002
423.0	0.0	23.9	0.0001
423.0	0.0	28.4	0.0001
423.0	0.0	32.9	0.0001
423.0	0.0	37.4	0.0001
423.0	0.0	41.9	0.0001
423.0	0.0	46.4	0.0000
423.0	0.0	50.9	0.0000
423.0	0.0	55.4	0.0000
423.0	0.0	59.9	0.0000
423.0	0.0	64.4	0.0000
423.0	0.0	68.9	0.0000
423.0	0.0	73.4	0.0000
423.0	0.0	77.9	0.0000
423.0	0.0	82.4	0.0000
423.0	0.0	86.9	0.0000
423.0	0.0	91.4	0.0000
423.0	0.0	95.9	0.0000
423.0	0.0	1.4	0.0003
<b>Linienquelle Vertikalprofil 5</b>			
702.0	0.0	1.4	0.0001
702.0	0.0	5.9	0.0001
702.0	0.0	10.4	0.0001
702.0	0.0	14.9	0.0001
702.0	0.0	19.4	0.0001
702.0	0.0	23.9	0.0001
702.0	0.0	28.4	0.0001
702.0	0.0	32.9	0.0001
702.0	0.0	37.4	0.0001
702.0	0.0	41.9	0.0001
702.0	0.0	46.4	0.0000
702.0	0.0	50.9	0.0000
702.0	0.0	55.4	0.0000
702.0	0.0	59.9	0.0000
702.0	0.0	64.4	0.0000
702.0	0.0	68.9	0.0000
702.0	0.0	73.4	0.0000
702.0	0.0	77.9	0.0000
702.0	0.0	82.4	0.0000
702.0	0.0	86.9	0.0000
702.0	0.0	91.4	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
702.0	0.0	95.9	0.0000
702.0	0.0	100.4	0.0000
702.0	0.0	104.9	0.0000
702.0	0.0	109.4	0.0000
702.0	0.0	113.9	0.0000
702.0	0.0	1.4	0.0001
<b>Linienquelle Lateralebene 1</b>			
225.0	0.0	1.4	0.0008
225.0	9.0	1.4	0.0009
225.0	18.0	1.4	0.0007
225.0	27.0	1.4	0.0006
225.0	36.0	1.4	0.0005
225.0	45.0	1.4	0.0004
225.0	54.0	1.4	0.0002
225.0	63.0	1.4	0.0002
225.0	72.0	1.4	0.0001
225.0	81.0	1.4	0.0000
225.0	90.0	1.4	0.0000
225.0	99.0	1.4	0.0000
225.0	108.0	1.4	0.0000
225.0	117.0	1.4	0.0000
225.0	126.0	1.4	0.0000
225.0	0.0	1.4	0.0008
225.0	-9.0	1.4	0.0008
225.0	-18.0	1.4	0.0007
225.0	-27.0	1.4	0.0006
225.0	-36.0	1.4	0.0005
225.0	-45.0	1.4	0.0004
225.0	-54.0	1.4	0.0003
225.0	-63.0	1.4	0.0002
225.0	-72.0	1.4	0.0001
225.0	-81.0	1.4	0.0000
225.0	-90.0	1.4	0.0000
225.0	-99.0	1.4	0.0000
225.0	-108.0	1.4	0.0000
225.0	-117.0	1.4	0.0000
225.0	-126.0	1.4	0.0000
225.0	0.0	5.9	0.0007
225.0	9.0	5.9	0.0006
225.0	18.0	5.9	0.0006
225.0	27.0	5.9	0.0005
225.0	36.0	5.9	0.0004
225.0	45.0	5.9	0.0003
225.0	54.0	5.9	0.0002
225.0	63.0	5.9	0.0001
225.0	72.0	5.9	0.0001
225.0	81.0	5.9	0.0000
225.0	90.0	5.9	0.0000
225.0	99.0	5.9	0.0000
225.0	108.0	5.9	0.0000
225.0	117.0	5.9	0.0000
225.0	126.0	5.9	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
225.0	0.0	14.9	0.0004
225.0	9.0	14.9	0.0004
225.0	18.0	14.9	0.0003
225.0	27.0	14.9	0.0003
225.0	36.0	14.9	0.0002
225.0	45.0	14.9	0.0002
225.0	54.0	14.9	0.0001
225.0	63.0	14.9	0.0001
225.0	63.0	14.9	0.0001
225.0	72.0	14.9	0.0001
225.0	81.0	14.9	0.0000
225.0	90.0	14.9	0.0000
225.0	99.0	14.9	0.0000
225.0	108.0	14.9	0.0000
225.0	117.0	14.9	0.0000
225.0	126.0	14.9	0.0000
225.0	0.0	14.9	0.0004
225.0	-9.0	14.9	0.0004
225.0	-18.0	14.9	0.0003
225.0	-27.0	14.9	0.0003
225.0	-36.0	14.9	0.0003
225.0	-45.0	14.9	0.0002
225.0	-54.0	14.9	0.0001
225.0	-63.0	14.9	0.0001
225.0	-72.0	14.9	0.0001
225.0	-81.0	14.9	0.0000
225.0	-90.0	14.9	0.0000
225.0	-99.0	14.9	0.0000
225.0	-108.0	14.9	0.0000
225.0	-117.0	14.9	0.0000
225.0	-126.0	14.9	0.0000
225.0	0.0	28.4	0.0001
225.0	9.0	28.4	0.0001
225.0	18.0	28.4	0.0001
225.0	27.0	28.4	0.0001
225.0	36.0	28.4	0.0001
225.0	45.0	28.4	0.0001
225.0	54.0	28.4	0.0001
225.0	63.0	28.4	0.0000
225.0	72.0	28.4	0.0000
225.0	81.0	28.4	0.0000
225.0	90.0	28.4	0.0000
225.0	99.0	28.4	0.0000
225.0	108.0	28.4	0.0000
225.0	117.0	28.4	0.0000
225.0	126.0	28.4	0.0000
225.0	0.0	28.4	0.0001
225.0	-9.0	28.4	0.0001
225.0	-18.0	28.4	0.0001
225.0	-27.0	28.4	0.0001
225.0	-36.0	28.4	0.0001
225.0	-45.0	28.4	0.0001
225.0	-54.0	28.4	0.0000
225.0	-63.0	28.4	0.0000
225.0	-72.0	28.4	0.0000
225.0	-81.0	28.4	0.0000
225.0	-90.0	28.4	0.0000
225.0	-99.0	28.4	0.0000
225.0	-108.0	28.4	0.0000
225.0	-117.0	28.4	0.0000
225.0	-126.0	28.4	0.0000
225.0	0.0	46.4	0.0000
225.0	9.0	46.4	0.0000
225.0	18.0	46.4	0.0000
225.0	27.0	46.4	0.0000
225.0	36.0	46.4	0.0000
225.0	45.0	46.4	0.0000
225.0	54.0	46.4	0.0000
225.0	63.0	46.4	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
225.0	72.0	46.4	0.0000
225.0	81.0	46.4	0.0000
225.0	90.0	46.4	0.0000
225.0	99.0	46.4	0.0000
225.0	108.0	46.4	0.0000
225.0	117.0	46.4	0.0000
225.0	126.0	46.4	0.0000
225.0	0.0	46.4	0.0000
225.0	-9.0	46.4	0.0000
225.0	-18.0	46.4	0.0000
225.0	-27.0	46.4	0.0000
225.0	-36.0	46.4	0.0000
225.0	-45.0	46.4	0.0000
225.0	-54.0	46.4	0.0000
225.0	-63.0	46.4	0.0000
225.0	-72.0	46.4	0.0000
225.0	-81.0	46.4	0.0000
225.0	-90.0	46.4	0.0000
225.0	-99.0	46.4	0.0000
225.0	-108.0	46.4	0.0000
225.0	-117.0	46.4	0.0000
225.0	-126.0	46.4	0.0000
225.0	0.0	68.9	0.0000
225.0	9.0	68.9	0.0000
225.0	18.0	68.9	0.0000
225.0	27.0	68.9	0.0000
225.0	36.0	68.9	0.0000
225.0	45.0	68.9	0.0000
225.0	54.0	68.9	0.0000
225.0	63.0	68.9	0.0000
225.0	72.0	68.9	0.0000
225.0	81.0	68.9	0.0000
225.0	90.0	68.9	0.0000
225.0	99.0	68.9	0.0000
225.0	108.0	68.9	0.0000
225.0	117.0	68.9	0.0000
225.0	126.0	68.9	0.0000
225.0	0.0	68.9	0.0000
225.0	-9.0	68.9	0.0000
225.0	-18.0	68.9	0.0000
225.0	-27.0	68.9	0.0000
225.0	-36.0	68.9	0.0000
225.0	-45.0	68.9	0.0000
225.0	-54.0	68.9	0.0000
225.0	-63.0	68.9	0.0000
225.0	-72.0	68.9	0.0000
225.0	-81.0	68.9	0.0000
225.0	-90.0	68.9	0.0000
225.0	-99.0	68.9	0.0000
225.0	-108.0	68.9	0.0000
225.0	-117.0	68.9	0.0000
225.0	-126.0	68.9	0.0000
225.0	0.0	95.9	0.0000
225.0	9.0	95.9	0.0000
225.0	18.0	95.9	0.0000
225.0	27.0	95.9	0.0000
225.0	36.0	95.9	0.0000
225.0	45.0	95.9	0.0000
225.0	54.0	95.9	0.0000
225.0	63.0	95.9	0.0000
225.0	72.0	95.9	0.0000
225.0	81.0	95.9	0.0000
225.0	90.0	95.9	0.0000
225.0	99.0	95.9	0.0000
225.0	108.0	95.9	0.0000
225.0	117.0	95.9	0.0000
225.0	126.0	95.9	0.0000
225.0	0.0	95.9	0.0000
225.0	-9.0	95.9	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
225.0	-18.0	95.9	0.0000
225.0	-27.0	95.9	0.0000
225.0	-36.0	95.9	0.0000
225.0	-45.0	95.9	0.0000
225.0	-54.0	95.9	0.0000
225.0	-63.0	95.9	0.0000
225.0	-72.0	95.9	0.0000
225.0	-81.0	95.9	0.0000
225.0	-90.0	95.9	0.0000
225.0	-99.0	95.9	0.0000
225.0	-108.0	95.9	0.0000
225.0	-117.0	95.9	0.0000
225.0	-126.0	95.9	0.0000
225.0	0.0	127.4	0.0000
225.0	9.0	127.4	0.0000
225.0	18.0	127.4	0.0000
225.0	27.0	127.4	0.0000
225.0	36.0	127.4	0.0000
225.0	45.0	127.4	0.0000
225.0	54.0	127.4	0.0000
225.0	63.0	127.4	0.0000
225.0	72.0	127.4	0.0000
225.0	81.0	127.4	0.0000
225.0	90.0	127.4	0.0000
225.0	99.0	127.4	0.0000
225.0	108.0	127.4	0.0000
225.0	117.0	127.4	0.0000
225.0	126.0	127.4	0.0000
225.0	0.0	127.4	0.0000
225.0	-9.0	127.4	0.0000
225.0	-18.0	127.4	0.0000
225.0	-27.0	127.4	0.0000
225.0	-36.0	127.4	0.0000
225.0	-45.0	127.4	0.0000
225.0	-54.0	127.4	0.0000
225.0	-63.0	127.4	0.0000
225.0	-72.0	127.4	0.0000
225.0	-81.0	127.4	0.0000
225.0	-90.0	127.4	0.0000
225.0	-99.0	127.4	0.0000
225.0	-108.0	127.4	0.0000
225.0	-117.0	127.4	0.0000
225.0	-126.0	127.4	0.0000
<b>Flächenquelle Longitudinalprofil 1a</b>			
63.5	0.0	1.4	0.0050
63.5	0.0	136.4	0.0000
90.5	0.0	136.4	0.0000
90.5	0.0	1.4	0.0030
104.0	0.0	1.4	0.0026
117.5	0.0	1.4	0.0022
131.0	0.0	1.4	0.0019
144.5	0.0	1.4	0.0017
158.0	0.0	1.4	0.0014
158.0	0.0	136.4	0.0000
171.5	0.0	136.4	0.0000
171.5	0.0	1.4	0.0012
191.8	0.0	1.4	0.0010
212.0	0.0	1.4	0.0009
63.5	0.0	1.4	0.0054
<b>Flächenquelle Longitudinalprofil 1b</b>			
63.5	0.0	136.4	0.0000
90.5	0.0	136.4	0.0000
90.5	0.0	1.4	0.0031
104.0	0.0	1.4	0.0025
117.5	0.0	1.4	0.0022
131.0	0.0	1.4	0.0019
144.5	0.0	1.4	0.0017
158.0	0.0	1.4	0.0014
158.0	0.0	136.4	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
171.5	0.0	136.4	0.0000
171.5	0.0	1.4	0.0012
191.8	0.0	1.4	0.0010
212.0	0.0	1.4	0.0009
232.3	0.0	1.4	0.0007
232.3	0.0	136.4	0.0000
232.3	0.0	136.4	0.0000
259.3	0.0	136.4	0.0000
259.3	0.0	1.4	0.0006
286.3	0.0	1.4	0.0005
313.3	0.0	1.4	0.0004
313.3	0.0	136.4	0.0000
340.3	0.0	136.4	0.0000
340.3	0.0	1.4	0.0004
367.3	0.0	1.4	0.0003
394.3	0.0	1.4	0.0003
394.3	0.0	136.4	0.0000
428.0	0.0	136.4	0.0000
428.0	0.0	1.4	0.0003
461.8	0.0	1.4	0.0002
495.5	0.0	1.4	0.0002
495.5	0.0	136.4	0.0000
495.5	0.0	136.4	0.0000
536.0	0.0	136.4	0.0000
536.0	0.0	1.4	0.0002
536.0	0.0	1.4	0.0002
576.5	0.0	1.4	0.0002
576.5	0.0	136.4	0.0000
617.0	0.0	136.4	0.0000
617.0	0.0	1.4	0.0001
657.5	0.0	1.4	0.0001
657.5	0.0	136.4	0.0000
698.0	0.0	136.4	0.0000
698.0	0.0	1.4	0.0001
747.5	0.0	1.4	0.0001
747.5	0.0	136.4	0.0000
<b>Flächenquelle Lateralprofil 1</b>			
81.5	0.0	1.4	0.0040
81.5	-4.5	1.4	0.0038
81.5	-9.0	1.4	0.0036
81.5	-13.5	1.4	0.0034
81.5	-18.0	1.4	0.0030
81.5	-22.5	1.4	0.0024
81.5	-27.0	1.4	0.0017
81.5	-36.0	1.4	0.0006
81.5	-45.0	1.4	0.0002
81.5	-54.0	1.4	0.0000
81.5	0.0	1.4	0.0040
81.5	4.5	1.4	0.0040
81.5	9.0	1.4	0.0039
81.5	13.5	1.4	0.0035
81.5	18.0	1.4	0.0032
81.5	22.5	1.4	0.0027
81.5	27.0	1.4	0.0018
81.5	36.0	1.4	0.0006
81.5	45.0	1.4	0.0002
81.5	54.0	1.4	0.0000
81.5	0.0	1.4	0.0039
<b>Flächenquelle Lateralprofil 2</b>			
171.5	0.0	1.4	0.0013
171.5	-6.8	1.4	0.0012
171.5	-13.5	1.4	0.0011
171.5	-20.3	1.4	0.0010
171.5	-27.0	1.4	0.0008
171.5	-33.8	1.4	0.0006
171.5	-40.5	1.4	0.0004
171.5	-54.0	1.4	0.0002
171.5	-67.5	1.4	0.0000
171.5	-81.0	1.4	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
171.5	-94.5	1.4	0.0000
171.5	6.8	1.4	0.0013
171.5	13.5	1.4	0.0012
171.5	20.3	1.4	0.0010
171.5	27.0	1.4	0.0008
171.5	33.8	1.4	0.0007
171.5	40.5	1.4	0.0005
171.5	54.0	1.4	0.0002
171.5	67.5	1.4	0.0001
171.5	81.0	1.4	0.0000
171.5	94.5	1.4	0.0000
<b>Flächenquelle Lateralprofil 3</b>			
275.0	0.0	1.4	0.0006
275.0	-9.0	1.4	0.0006
275.0	-18.0	1.4	0.0005
275.0	-27.0	1.4	0.0004
275.0	-36.0	1.4	0.0003
275.0	-45.0	1.4	0.0003
275.0	-54.0	1.4	0.0002
275.0	-63.0	1.4	0.0001
275.0	-72.0	1.4	0.0001
275.0	-81.0	1.4	0.0000
275.0	-90.0	1.4	0.0000
275.0	-99.0	1.4	0.0000
275.0	-108.0	1.4	0.0000
275.0	9.0	1.4	0.0006
275.0	18.0	1.4	0.0005
275.0	27.0	1.4	0.0004
275.0	36.0	1.4	0.0003
275.0	45.0	1.4	0.0002
275.0	54.0	1.4	0.0002
275.0	63.0	1.4	0.0001
275.0	72.0	1.4	0.0001
275.0	81.0	1.4	0.0000
275.0	90.0	1.4	0.0000
275.0	99.0	1.4	0.0000
275.0	108.0	1.4	0.0000
<b>Flächenquelle Lateralprofil 4</b>			
473.0	0.0	1.4	0.0002
473.0	-11.3	1.4	0.0002
473.0	-22.5	1.4	0.0002
473.0	-33.8	1.4	0.0002
473.0	-45.0	1.4	0.0002
473.0	-56.3	1.4	0.0001
473.0	-67.5	1.4	0.0001
473.0	-78.8	1.4	0.0001
473.0	-90.0	1.4	0.0000
473.0	-101.3	1.4	0.0000
473.0	-112.5	1.4	0.0000
473.0	0.0	1.4	0.0002
473.0	11.3	1.4	0.0002
473.0	22.5	1.4	0.0002
473.0	33.8	1.4	0.0002
473.0	45.0	1.4	0.0002
473.0	56.3	1.4	0.0001
473.0	67.5	1.4	0.0001
473.0	78.8	1.4	0.0001
473.0	90.0	1.4	0.0000
473.0	101.3	1.4	0.0000
473.0	112.5	1.4	0.0000
473.0	0.0	1.4	0.0002
<b>Flächenquelle Lateralprofil 5</b>			
752.0	0.0	1.4	0.0001
752.0	-9.0	1.4	0.0001
752.0	-18.0	1.4	0.0001
752.0	-27.0	1.4	0.0001
752.0	-36.0	1.4	0.0001
752.0	-45.0	1.4	0.0001
752.0	-56.3	1.4	0.0001

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
752.0	-67.5	1.4	0.0001
752.0	-78.8	1.4	0.0001
752.0	-90.0	1.4	0.0000
752.0	-101.3	1.4	0.0000
752.0	-112.5	1.4	0.0000
752.0	-123.8	1.4	0.0000
752.0	-135.0	1.4	0.0000
752.0	-157.5	1.4	0.0000
752.0	0.0	1.4	0.0001
752.0	9.0	1.4	0.0001
752.0	18.0	1.4	0.0001
752.0	27.0	1.4	0.0001
752.0	36.0	1.4	0.0001
752.0	45.0	1.4	0.0001
752.0	56.3	1.4	0.0001
752.0	67.5	1.4	0.0001
752.0	78.8	1.4	0.0000
752.0	90.0	1.4	0.0000
752.0	101.3	1.4	0.0000
752.0	112.5	1.4	0.0000
752.0	123.8	1.4	0.0000
752.0	135.0	1.4	0.0000
752.0	157.5	1.4	0.0000
752.0	0.0	1.4	0.0001
<b>Flächenquelle Vertikalprofil 1</b>			
81.5	0.0	1.4	0.0042
81.5	0.0	2.3	0.0035
81.5	0.0	3.4	0.0026
81.5	0.0	4.5	0.0020
81.5	0.0	5.9	0.0015
81.5	0.0	6.8	0.0011
81.5	0.0	8.1	0.0008
81.5	0.0	9.0	0.0007
81.5	0.0	11.3	0.0004
81.5	0.0	13.5	0.0002
81.5	0.0	15.8	0.0002
81.5	0.0	18.0	0.0001
81.5	0.0	20.3	0.0001
81.5	0.0	22.5	0.0000
81.5	0.0	24.8	0.0000
81.5	0.0	27.0	0.0000
81.5	0.0	29.3	0.0000
81.5	0.0	31.5	0.0000
81.5	0.0	33.8	0.0000
81.5	0.0	36.0	0.0000
<b>Flächenquelle Vertikalprofil 2</b>			
171.5	0.0	1.4	0.0013
171.5	0.0	2.3	0.0012
171.5	0.0	4.5	0.0011
171.5	0.0	6.8	0.0008
171.5	0.0	9.0	0.0007
171.5	0.0	11.3	0.0006
171.5	0.0	13.5	0.0004
171.5	0.0	15.8	0.0003
171.5	0.0	18.0	0.0003
171.5	0.0	20.3	0.0002
171.5	0.0	22.5	0.0001
171.5	0.0	24.8	0.0001
171.5	0.0	27.0	0.0001
171.5	0.0	29.3	0.0001
171.5	0.0	31.5	0.0001
171.5	0.0	33.8	0.0000
171.5	0.0	36.0	0.0000
171.5	0.0	38.3	0.0000
171.5	0.0	40.5	0.0000
171.5	0.0	42.8	0.0000
171.5	0.0	45.0	0.0000
171.5	0.0	49.5	0.0000
171.5	0.0	54.0	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
<b>Flächenquelle Vertikalprofil 3</b>			
275.0	0.0	1.4	0.0006
275.0	0.0	2.3	0.0006
275.0	0.0	4.5	0.0005
275.0	0.0	9.0	0.0004
275.0	0.0	13.5	0.0003
275.0	0.0	18.0	0.0003
275.0	0.0	22.5	0.0002
275.0	0.0	27.0	0.0001
275.0	0.0	31.5	0.0001
275.0	0.0	36.0	0.0001
275.0	0.0	40.5	0.0000
275.0	0.0	45.0	0.0000
275.0	0.0	49.5	0.0000
275.0	0.0	54.0	0.0000
275.0	0.0	58.5	0.0000
275.0	0.0	63.0	0.0000
275.0	0.0	67.5	0.0000
275.0	0.0	72.0	0.0000
275.0	0.0	76.5	0.0000
275.0	0.0	81.0	0.0000
275.0	0.0	85.5	0.0000
275.0	0.0	90.0	0.0000
275.0	0.0	94.5	0.0000
275.0	0.0	99.0	0.0000
275.0	0.0	103.5	0.0000
275.0	0.0	108.0	0.0000
275.0	0.0	112.5	0.0000
275.0	0.0	117.0	0.0000
<b>Flächenquelle Vertikalprofil 4</b>			
473.0	0.0	1.4	0.0002
473.0	0.0	2.3	0.0002
473.0	0.0	4.5	0.0002
473.0	0.0	9.0	0.0002
473.0	0.0	13.5	0.0002
473.0	0.0	18.0	0.0002
473.0	0.0	22.5	0.0001
473.0	0.0	27.0	0.0001
473.0	0.0	31.5	0.0001
473.0	0.0	36.0	0.0001
473.0	0.0	40.5	0.0001
473.0	0.0	45.0	0.0000
473.0	0.0	49.5	0.0000
473.0	0.0	54.0	0.0000
473.0	0.0	58.5	0.0000
473.0	0.0	63.0	0.0000
473.0	0.0	67.5	0.0000
473.0	0.0	72.0	0.0000
473.0	0.0	76.5	0.0000
473.0	0.0	81.0	0.0000
473.0	0.0	85.5	0.0000
473.0	0.0	90.0	0.0000
473.0	0.0	94.5	0.0000
473.0	0.0	99.0	0.0000
<b>Flächenquelle Vertikalprofil 5</b>			
752.0	0.0	1.4	0.0001
752.0	0.0	2.3	0.0001
752.0	0.0	4.5	0.0001
752.0	0.0	9.0	0.0001
752.0	0.0	18.0	0.0001
752.0	0.0	27.0	0.0001
752.0	0.0	36.0	0.0001
752.0	0.0	45.0	0.0000
752.0	0.0	54.0	0.0000
752.0	0.0	63.0	0.0000
752.0	0.0	72.0	0.0000
752.0	0.0	81.0	0.0000
752.0	0.0	90.0	0.0000
752.0	0.0	99.0	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
752.0	0.0	108.0	0.0000
752.0	0.0	117.0	0.0000
752.0	0.0	126.0	0.0000
752.0	0.0	135.0	0.0000
752.0	0.0	144.0	0.0000
<b>Flächenquelle Lateralebene 1</b>			
275.0	0.0	1.4	0.0006
275.0	-9.0	1.4	0.0006
275.0	-18.0	1.4	0.0005
275.0	-27.0	1.4	0.0004
275.0	-36.0	1.4	0.0004
275.0	-45.0	1.4	0.0003
275.0	-54.0	1.4	0.0002
275.0	-63.0	1.4	0.0001
275.0	-72.0	1.4	0.0001
275.0	-81.0	1.4	0.0000
275.0	-90.0	1.4	0.0000
275.0	-99.0	1.4	0.0000
275.0	-108.0	1.4	0.0000
275.0	0.0	1.4	0.0006
275.0	9.0	1.4	0.0006
275.0	18.0	1.4	0.0005
275.0	27.0	1.4	0.0004
275.0	36.0	1.4	0.0003
275.0	45.0	1.4	0.0002
275.0	54.0	1.4	0.0002
275.0	63.0	1.4	0.0001
275.0	72.0	1.4	0.0001
275.0	81.0	1.4	0.0000
275.0	90.0	1.4	0.0000
275.0	99.0	1.4	0.0000
275.0	108.0	1.4	0.0000
275.0	0.0	2.7	0.0006
275.0	-9.0	2.7	0.0006
275.0	-18.0	2.7	0.0005
275.0	-27.0	2.7	0.0005
275.0	-36.0	2.7	0.0004
275.0	-45.0	2.7	0.0003
275.0	-54.0	2.7	0.0002
275.0	-63.0	2.7	0.0001
275.0	-72.0	2.7	0.0001
275.0	-81.0	2.7	0.0000
275.0	-90.0	2.7	0.0000
275.0	-99.0	2.7	0.0000
275.0	-108.0	2.7	0.0000
275.0	0.0	2.7	0.0006
275.0	9.0	2.7	0.0006
275.0	18.0	2.7	0.0005
275.0	27.0	2.7	0.0004
275.0	36.0	2.7	0.0003
275.0	45.0	2.7	0.0002
275.0	54.0	2.7	0.0002
275.0	63.0	2.7	0.0001
275.0	72.0	2.7	0.0001
275.0	81.0	2.7	0.0000
275.0	90.0	2.7	0.0000
275.0	99.0	2.7	0.0000
275.0	108.0	2.7	0.0000
275.0	0.0	5.4	0.0005
275.0	-9.0	5.4	0.0005
275.0	-18.0	5.4	0.0005
275.0	-27.0	5.4	0.0004
275.0	-36.0	5.4	0.0003
275.0	-45.0	5.4	0.0003
275.0	-54.0	5.4	0.0002
275.0	-63.0	5.4	0.0001
275.0	-72.0	5.4	0.0001
275.0	-81.0	5.4	0.0000
275.0	-90.0	5.4	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
275.0	-99.0	5.4	0.0000
275.0	-108.0	5.4	0.0000
275.0	0.0	5.4	0.0005
275.0	9.0	5.4	0.0005
275.0	18.0	5.4	0.0005
275.0	27.0	5.4	0.0004
275.0	36.0	5.4	0.0003
275.0	45.0	5.4	0.0002
275.0	54.0	5.4	0.0002
275.0	63.0	5.4	0.0001
275.0	72.0	5.4	0.0001
275.0	81.0	5.4	0.0000
275.0	90.0	5.4	0.0000
275.0	99.0	5.4	0.0000
275.0	108.0	5.4	0.0000
275.0	0.0	5.4	0.0005
275.0	9.0	5.4	0.0005
275.0	18.0	5.4	0.0005
275.0	27.0	5.4	0.0004
275.0	36.0	5.4	0.0003
275.0	45.0	5.4	0.0002
275.0	54.0	5.4	0.0002
275.0	63.0	5.4	0.0001
275.0	72.0	5.4	0.0001
275.0	81.0	5.4	0.0000
275.0	90.0	5.4	0.0000
275.0	99.0	5.4	0.0000
275.0	108.0	5.4	0.0000
275.0	0.0	10.8	0.0004
275.0	-9.0	10.8	0.0004
275.0	-18.0	10.8	0.0004
275.0	-27.0	10.8	0.0003
275.0	-36.0	10.8	0.0003
275.0	-45.0	10.8	0.0002
275.0	-54.0	10.8	0.0001
275.0	-63.0	10.8	0.0001
275.0	-72.0	10.8	0.0000
275.0	-81.0	10.8	0.0000
275.0	-90.0	10.8	0.0000
275.0	-99.0	10.8	0.0000
275.0	-108.0	10.8	0.0000
275.0	0.0	10.8	0.0004
275.0	9.0	10.8	0.0004
275.0	18.0	10.8	0.0004
275.0	27.0	10.8	0.0003
275.0	36.0	10.8	0.0002
275.0	45.0	10.8	0.0002
275.0	54.0	10.8	0.0001
275.0	63.0	10.8	0.0001
275.0	72.0	10.8	0.0001
275.0	81.0	10.8	0.0000
275.0	90.0	10.8	0.0000
275.0	99.0	10.8	0.0000
275.0	108.0	10.8	0.0000
275.0	0.0	21.6	0.0002
275.0	-9.0	21.6	0.0002
275.0	-18.0	21.6	0.0002
275.0	-27.0	21.6	0.0002
275.0	-36.0	21.6	0.0001
275.0	-45.0	21.6	0.0001
275.0	-54.0	21.6	0.0001
275.0	-63.0	21.6	0.0001
275.0	-72.0	21.6	0.0000
275.0	-81.0	21.6	0.0000
275.0	-90.0	21.6	0.0000
275.0	-99.0	21.6	0.0000
275.0	-108.0	21.6	0.0000
275.0	0.0	21.6	0.0002

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
275.0	9.0	21.6	0.0002
275.0	18.0	21.6	0.0002
275.0	27.0	21.6	0.0001
275.0	36.0	21.6	0.0001
275.0	45.0	21.6	0.0001
275.0	54.0	21.6	0.0001
275.0	63.0	21.6	0.0001
275.0	72.0	21.6	0.0000
275.0	81.0	21.6	0.0000
275.0	90.0	21.6	0.0000
275.0	99.0	21.6	0.0000
275.0	108.0	21.6	0.0000
275.0	0.0	32.4	0.0001
275.0	-9.0	32.4	0.0001
275.0	-18.0	32.4	0.0001
275.0	-27.0	32.4	0.0001
275.0	-36.0	32.4	0.0001
275.0	-45.0	32.4	0.0001
275.0	-54.0	32.4	0.0000
275.0	-63.0	32.4	0.0000
275.0	-72.0	32.4	0.0000
275.0	-81.0	32.4	0.0000
275.0	-90.0	32.4	0.0000
275.0	-99.0	32.4	0.0000
275.0	-108.0	32.4	0.0000
275.0	0.0	32.4	0.0001
275.0	9.0	32.4	0.0001
275.0	18.0	32.4	0.0001
275.0	27.0	32.4	0.0001
275.0	36.0	32.4	0.0001
275.0	45.0	32.4	0.0000
275.0	54.0	32.4	0.0000
275.0	63.0	32.4	0.0000
275.0	72.0	32.4	0.0000
275.0	81.0	32.4	0.0000
275.0	90.0	32.4	0.0000
275.0	99.0	32.4	0.0000
275.0	108.0	32.4	0.0000
275.0	0.0	1.4	0.0005
275.0	0.0	1.4	0.0006
275.0	0.0	4.1	0.0005
275.0	-9.0	4.1	0.0005
275.0	-18.0	4.1	0.0005
275.0	-27.0	4.1	0.0004
275.0	-36.0	4.1	0.0003
275.0	-45.0	4.1	0.0003
275.0	-54.0	4.1	0.0002
275.0	-63.0	4.1	0.0001
275.0	-72.0	4.1	0.0001
275.0	-81.0	4.1	0.0000
275.0	-90.0	4.1	0.0000
275.0	-99.0	4.1	0.0000
275.0	-108.0	4.1	0.0000
275.0	0.0	4.1	0.0005
275.0	9.0	4.1	0.0005
275.0	18.0	4.1	0.0005
275.0	27.0	4.1	0.0004
275.0	36.0	4.1	0.0003
275.0	45.0	4.1	0.0002
275.0	54.0	4.1	0.0002
275.0	63.0	4.1	0.0001
275.0	72.0	4.1	0.0001
275.0	81.0	4.1	0.0000
275.0	90.0	4.1	0.0000
275.0	99.0	4.1	0.0000
275.0	108.0	4.1	0.0000
275.0	0.0	8.1	0.0004
275.0	-9.0	8.1	0.0004

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
275.0	-18.0	8.1	0.0004
275.0	-27.0	8.1	0.0003
275.0	-36.0	8.1	0.0003
275.0	-45.0	8.1	0.0002
275.0	-54.0	8.1	0.0002
275.0	-63.0	8.1	0.0001
275.0	-72.0	8.1	0.0001
275.0	-81.0	8.1	0.0000
275.0	-90.0	8.1	0.0000
275.0	-99.0	8.1	0.0000
275.0	-108.0	8.1	0.0000
275.0	0.0	8.1	0.0004
275.0	9.0	8.1	0.0004
275.0	18.0	8.1	0.0004
275.0	27.0	8.1	0.0003
275.0	36.0	8.1	0.0003
275.0	45.0	8.1	0.0002
275.0	54.0	8.1	0.0001
275.0	63.0	8.1	0.0001
275.0	72.0	8.1	0.0000
275.0	81.0	8.1	0.0000
275.0	90.0	8.1	0.0000
275.0	99.0	8.1	0.0000
275.0	108.0	8.1	0.0000
275.0	0.0	16.2	0.0003
275.0	-9.0	16.2	0.0003
275.0	-18.0	16.2	0.0002
275.0	-27.0	16.2	0.0002
275.0	-36.0	16.2	0.0002
275.0	-45.0	16.2	0.0001
275.0	-54.0	16.2	0.0001
275.0	-63.0	16.2	0.0001
275.0	-72.0	16.2	0.0000
275.0	-81.0	16.2	0.0000
275.0	-90.0	16.2	0.0000
275.0	-99.0	16.2	0.0000
275.0	-108.0	16.2	0.0000
275.0	0.0	16.2	0.0003
275.0	9.0	16.2	0.0003
275.0	18.0	16.2	0.0002
275.0	27.0	16.2	0.0002
275.0	36.0	16.2	0.0002
275.0	45.0	16.2	0.0001
275.0	54.0	16.2	0.0001
275.0	63.0	16.2	0.0001
275.0	72.0	16.2	0.0001
275.0	81.0	16.2	0.0000
275.0	90.0	16.2	0.0000
275.0	99.0	16.2	0.0000
275.0	108.0	16.2	0.0000
275.0	0.0	1.4	0.0005
275.0	0.0	1.4	0.0006
275.0	0.0	27.0	0.0001
275.0	-9.0	27.0	0.0001
275.0	-18.0	27.0	0.0001
275.0	-27.0	27.0	0.0001
275.0	-36.0	27.0	0.0001
275.0	-45.0	27.0	0.0001
275.0	-54.0	27.0	0.0001
275.0	-63.0	27.0	0.0000
275.0	-72.0	27.0	0.0000
275.0	-81.0	27.0	0.0000
275.0	-90.0	27.0	0.0000
275.0	-99.0	27.0	0.0000
275.0	-108.0	27.0	0.0000
275.0	0.0	27.0	0.0001
275.0	9.0	27.0	0.0001
275.0	18.0	27.0	0.0001

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m²]
275.0	27.0	27.0	0.0001
275.0	36.0	27.0	0.0001
275.0	45.0	27.0	0.0001
275.0	54.0	27.0	0.0001
275.0	63.0	27.0	0.0000
275.0	72.0	27.0	0.0000
275.0	81.0	27.0	0.0000
275.0	90.0	27.0	0.0000
275.0	99.0	27.0	0.0000
275.0	108.0	27.0	0.0000
275.0	0.0	37.8	0.0001
275.0	-9.0	37.8	0.0001
275.0	-18.0	37.8	0.0001
275.0	-27.0	37.8	0.0000
275.0	-36.0	37.8	0.0000
275.0	-45.0	37.8	0.0000
275.0	-54.0	37.8	0.0000
275.0	-63.0	37.8	0.0000
275.0	-72.0	37.8	0.0000
275.0	-81.0	37.8	0.0000
275.0	-90.0	37.8	0.0000
275.0	-99.0	37.8	0.0000
275.0	-108.0	37.8	0.0000
275.0	0.0	37.8	0.0001
275.0	9.0	37.8	0.0001
275.0	18.0	37.8	0.0000
275.0	27.0	37.8	0.0000
275.0	36.0	37.8	0.0000
275.0	45.0	37.8	0.0000
275.0	0.0	37.8	0.0001
275.0	0.0	37.8	0.0001
275.0	-9.0	37.8	0.0001
275.0	-18.0	37.8	0.0001
275.0	-27.0	37.8	0.0000
275.0	-36.0	37.8	0.0000
275.0	-45.0	37.8	0.0000
275.0	-54.0	37.8	0.0000
275.0	-63.0	37.8	0.0000
275.0	-72.0	37.8	0.0000
275.0	-81.0	37.8	0.0000
275.0	-90.0	37.8	0.0000
275.0	-99.0	37.8	0.0000
275.0	-108.0	37.8	0.0000
275.0	0.0	37.8	0.0001
275.0	9.0	37.8	0.0001
275.0	18.0	37.8	0.0001
275.0	27.0	37.8	0.0000
275.0	36.0	37.8	0.0000
275.0	45.0	37.8	0.0000
275.0	54.0	37.8	0.0000
275.0	63.0	37.8	0.0000
275.0	72.0	37.8	0.0000
275.0	81.0	37.8	0.0000
275.0	90.0	37.8	0.0000
275.0	99.0	37.8	0.0000
275.0	108.0	37.8	0.0000
275.0	0.0	43.2	0.0000
275.0	-9.0	43.2	0.0000
275.0	-18.0	43.2	0.0000
275.0	-27.0	43.2	0.0000
275.0	-36.0	43.2	0.0000
275.0	-45.0	43.2	0.0000
275.0	-54.0	43.2	0.0000
275.0	-63.0	43.2	0.0000
275.0	-72.0	43.2	0.0000
275.0	-81.0	43.2	0.0000
275.0	-90.0	43.2	0.0000
275.0	-99.0	43.2	0.0000

X [m]	Y [m]	Z [m]	C* [1/m <sup>2</sup> ]
275.0	-108.0	43.2	0.0000
275.0	0.0	43.2	0.0000
275.0	9.0	43.2	0.0000
275.0	18.0	43.2	0.0000
275.0	27.0	43.2	0.0000
275.0	36.0	43.2	0.0000
275.0	45.0	43.2	0.0000
275.0	54.0	43.2	0.0000
275.0	63.0	43.2	0.0000
275.0	72.0	43.2	0.0000
275.0	81.0	43.2	0.0000
275.0	90.0	43.2	0.0000
275.0	99.0	43.2	0.0000
275.0	108.0	43.2	0.0000
275.0	0.0	1.4	0.0005

**Untersuchungen zur  
Festlegung von Parametern für die  
Modellierung der Radonausbreitung  
aus bodennahen Flächenquellen  
(K-Modell)**

Teilbericht zum BfS-Vorhaben StSch 4270

erstellt im Unterauftrag der  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
durch

Brenk Systemplanung GmbH  
R. Barthel

Aachen, 17.05.2002

**Anmerkung:**

Dieser Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muß nicht mit der Meinung des Auftraggebers, der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH übereinstimmen.

# INHALTSVERZEICHNIS

Seite

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>K-MODELL .....</b>	<b>3</b>
2.1	Diffusions-Advektions-Gleichung .....	3
2.2	Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit u.....	5
2.3	Vertikalprofil des Diffusionskoeffizienten $K_z$ .....	8
2.3.1	Parametrisierung auf Basis eines theoretischen Modells.....	8
2.3.2	Empirische Parametrisierung nach WIPPERMANN .....	9
2.3.3	Parametrisierung nach VDI-3783-8.....	10
2.3.4	Vergleich der verschiedenen $K_z$ -Parametrisierungen .....	10
2.4	Parametrisierung des horizontalen Ausbreitungsparameters $\sigma_y$ .....	13
2.4.1	Parametrisierung von $\sigma_y$ nach TA Luft, AVV zu § 45 StrlSchV(Alt) und VDI-3782-1 .....	13
2.4.2	Parametrisierung von $\sigma_y$ nach VDI-3783-8 .....	14
2.4.3	Parametrisierung von $\sigma_y$ anhand der Hamburger Windkanal-Experimente.....	16
2.4.4	Vergleich der untersuchten $\sigma_y$ -Parametrisierungen .....	20
<b>3</b>	<b>BERECHNUNGEN MIT DEM K-MODELL FÜR NEUTRALE SCHICHTUNG .....</b>	<b>22</b>
3.1	Anmerkungen zur numerischen Lösung der Diffusions-Advektions-Gleichung.....	22
3.2	Randbedingungen der Modellrechnungen und Vorgaben zur Ergebnisdarstellung.....	22
3.3	Darstellung der mit dem K-Modell berechneten Konzentrationsverteilungen .....	24
3.3.1	Punktquelle .....	25
3.3.2	Linienquelle .....	28
3.3.3	Flächenquelle .....	30
3.3.4	Diffusions-Advektions-Gleichung mit $K_z$ -Parametrisierung nach VDI-3783-8.....	33
<b>4</b>	<b>BERECHNUNGEN FÜR REALE METEOROLOGISCHE GEgebenHEITEN .....</b>	<b>34</b>
4.1	Meteorologische Daten .....	34
4.2	Ausbreitungsrechnungen für eine bodennahe Punktquelle .....	43
4.2.1	Vertikalprofil des Diffusionskoeffizienten $K_z$ für alle Ausbreitungsklassen.....	43
4.2.2	Parametrisierung des Ausbreitungsparameters $\sigma_y$ für alle Ausbreitungsklassen .....	44
4.2.3	Berücksichtigung realer meteorologischer Ausbreitungsbedingungen.....	48
4.2.4	Diskussion der über alle Windrichtungen gemittelten Radonkonzentration .....	51
4.2.5	Diskussion der räumlichen Verteilung der Radonkonzentration .....	53
4.3	Ausbreitungsrechnungen für die Umgebung der ehemaligen Bergehalde Crossen .....	57
4.3.1	Radonbelastung durch die ehemalige Bergehalde Crossen .....	57
4.3.2	Berücksichtigung der weiteren anthropogenen Radonquellen des Standortes Crossen .....	67
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>74</b>

## **1 EINLEITUNG**

Die flächenhafte Radonfreisetzung bergbaulicher Hinterlassenschaften, wie z.B. von Halden oder Absetzanlagen, kann einen erheblichen Beitrag zur Strahlenexposition der Bevölkerung liefern. Zur Ermittlung bergbaubedingter Erhöhungen der Radonkonzentration in der näheren Umgebung dieser Hinterlassenschaften sind neben Immissionsmessungen, die i.d.R. mit Festkörperspurdetektoren bei Expositionszeiten von einem halben Jahr erfolgen, auch Modellrechnungen zur Radonausbreitung in der Atmosphäre erforderlich. Durch die Modellierung der Radonausbreitung kann mit geringem Aufwand eine Abschätzung der räumlichen Verteilung der Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre für die Umgebung bergbaulicher Altlasten vorgenommen werden, die flächendeckend ist und somit die Ergebnisse von Immissionsmessungen ergänzt. Mit Hilfe von Modellrechnungen können Informationen gewonnen werden, die über die Möglichkeiten von Messungen hinausgehen. Hierzu gehören insbesondere die Separation der von verschiedenen nahegelegenen Radonquellen verursachten Beiträge zur Radonkonzentration an den Immissionspunkten sowie die Prognose von Restbelastungen nach Abschluß einer geplanten Sanierung.

Die Ergebnisse von Radon-Ausbreitungsrechnungen hängen naturgemäß sehr stark davon ab, wie genau die Radonemission der maßgeblichen Quellen bestimmt wurde. Neben Unsicherheiten zu den Quellstärken, die mehr oder wenig stark ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen aufweisen und in vielen Fällen auch vom Tagesgang meteorologischer Parameter (z.B. der Temperatur) beeinflusst werden, hängen die Ergebnisse von Modellrechnungen von den Ansätzen zur Beschreibung der Strömungs- und Turbulenzverhältnisse in der bodennahen Atmosphäre ab. Hierzu sind im Rahmen der theoretischen Modelle gewisse Unterschiede in der Wahl der Parametrisierung bekannt. In der Praxis kommen verschiedene Ansätze zur Anwendung, wobei z.T. erhebliche Unterschiede für die berechnete Radonkonzentration resultieren können.

Mit dem Forschungsvorhaben StSch 4270 wird das Ziel verfolgt, die Ursachen von Diskrepanzen zwischen verschiedenen Modellansätzen zu ermitteln und Kriterien zu entwickeln, mit deren Hilfe die Güte verschiedener Modellansätze zur Radonausbreitung beurteilt werden kann. Hierzu sollen u.a. Ergebnisse von Windkanalexperimenten mit denen von Modellrechnungen verglichen werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden im Unterauftrag der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) durch Brenk Systemplanung (BS) Berechnungen zur Radonausbreitung mit Hilfe eines sog. Euler-Modells durchgeführt, das in den vergangenen Jahren insbesondere zur Analyse, Bewertung und Prognose von Radonbelastungen an den großen Standorten der WISMUT GmbH eingesetzt wurde. Es wird auch als "K-Modell" bezeichnet (die Bezeichnung geht auf den üblicherweise mit "K" symbolisierten Koeffizienten der turbulenten Diffusion zurück). Für die Anwendung dieses Modells erfolgten vielfältige Validierungsrechnungen (siehe z.B. [1] bis [4]). Der wesentliche Aspekt ist jedoch nicht die Art der Lösung der mathematischen Gleichungen, welche die Radonausbreitung beschreiben (im K-Modell wird eine partielle Differentialgleichung mit Hilfe eines Differenzschemas gelöst), sondern die Parametrisierung der Strömungs- und Turbulenzverhältnisse. Mit dem K-Modell ist insbesondere für ebenes Gelände eine gegenüber den anderen Modellen (z.B. Gauß-Wolken-Modell oder Partikelmodell) relativ einfache und schnelle Berechnung der Radonausbreitung möglich, was für Standorte mit vielen Quellen vorteilhaft ist.

Die Parametrisierung des in [1] entwickelten K-Modells läßt sich natürlich auf andere Arten von Ausbreitungsmodellen übertragen. So wurde z.B. in [2] zur Beschreibung der Radonausbreitung am WISMUT-Standort Schlema-Alberoda, der durch eine gebirgige Orographie charakterisiert ist, ein Gauß-Wolken-Modell angewandt, mit dem auch von der Orographie bestimmte Windverhältnisse hinreichend genau erfaßt werden können. Die Ausbreitungsparameter für dieses Modell wurden an das in [1] für ebenes Gelände entwickelte K-Modell angepaßt. Auf dieser Basis konnte in [2] und [4] für den Standort Schlema-Alberoda eine ähnlich gute Übereinstimmung von Modelrechnungen und Immissionsmessungen zur Radonbelastung erreicht werden, wie z.B. in [1] und [3] auf Basis des K-Modells für ebenes Gelände.

Im vorliegenden Bericht wird zunächst in **Kapitel 2** das in [1] entwickelte K-Modell erläutert, das den weiteren Berechnungen zugrunde liegt. Zur Vereinfachung wird ein 2-dimensionales K-Modell betrachtet, mit dem der advektive Radontransport und die durch turbulente Diffusion verursachte vertikale Radonausbreitung erfaßt werden. Die horizontale Diffusion wird durch Multiplikation mit einer Gauß-Verteilung berücksichtigt. Hierzu werden die Ansätze nach TA-Luft-86, AVV zu § 45 StrlSchV (alt) bzw. VDI-Richtlinie 3782-1 (siehe [5] bis [7]), bzw. gemäß dem neuen Entwurf der VDI-Richtlinie VDI-3783-8 [8] mit der aus aktuellen Windkanalexperimenten [9] resultierenden Parametrisierung verglichen.

In **Kapitel 3** werden kurz die nach Aufgabenstellung der GRS [10] berechneten Fälle sowie die zur Darstellung der Ergebnisse festgelegten Parameter erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse der mit Hilfe des K-Modells durchgeführten Berechnungen dargestellt. Ein Vergleich der mit den verschiedenen Modellansätzen durchgeführten Berechnungen erfolgt durch die GRS im Hauptteil des Berichtes zum Projekt StSch 4270. Gemäß einer Festlegung der 3. Projektberatung [11] werden für diesen Vergleich in Kapitel 3 zusätzlich auch Berechnungen mit jener Parametrisierung für die vertikale Diffusion durchgeführt, die dem Ansatz von [8] entspricht, der dem Ausbreitungsmodell der GRS zugrunde liegt.

Die wesentliche Einschränkung der im Projekt StSch 4270 durchgeführten Modellrechnungen und experimentellen Untersuchungen besteht darin, daß i.w. nur der Fall der neutralen atmosphärischen Schichtung betrachtet wurde. Dies erlaubt zwar einen Vergleich von grundlegenden Aspekten der verschiedenen Modellansätze, ermöglicht aber noch keine Aussage zu Auswirkungen auf die reale Radonausbreitung, die maßgeblich von meteorologischen Situationen mit stabiler atmosphärischer Schichtung und sehr geringer Windgeschwindigkeit bestimmt wird. Um zu diesem Aspekt einen Vergleich der Modellansätze vornehmen zu können, wurde auf der 3. Projektberatung vereinbart, zusätzlich auch Rechnungen für reale meteorologische Bedingungen durchzuführen. Hierzu wird in **Kapitel 4** die den dbzgl. Rechnungen zugrunde gelegte Ausbreitungsklassenstatistik dargestellt, mit der Modellrechnungen für eine Punktquelle sowie eine reale Flächenquelle (ehemalige Bergehalde am WISMUT-Standort Crossen) durchgeführt wurden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden mit denen von Radon-Immissionsmessungen in der Umgebung der Bergehalde Crossen verglichen.

Das **Kapitel 5** enthält eine kurze Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der mit dem K-Modell durchgeführten Berechnungen zur Radonausbreitung. Weitere Schlußfolgerungen sind im Hauptteil des Berichtes zum Projekt StSch 4270 dargelegt. In **Kapitel 6** ist die zitierte Literatur aufgeführt.

## 2 K-MODELL

In diesem Kapitel wird das im vorliegenden Bericht verwendete K-Modell erläutert. Zunächst werden hierzu in **Abschnitt 2.1** einige Vereinfachungen des allgemeinen (zeitabhängigen) EULER-Modells vorgenommen. In Abschnitt 2.2 erfolgt die Parametrisierung der Windgeschwindigkeit. In **Abschnitt 2.3** gehen wir auf die Parametrisierung des Koeffizienten der vertikalen turbulenten Diffusion ein. In **Abschnitt 2.4** werden Ansätze zur Parametrisierung der horizontalen Diffusion gegenübergestellt, wobei neben aus der Literatur bekannten Parametrisierungen auch Ergebnisse der im Rahmen des Projektes StSch 4270 durchgeführten Windkanalexperimente betrachtet werden.

### 2.1 Diffusions-Advektions-Gleichung

Im EULER-Modell wird die Schadstoffausbreitung über den Luftpfad allgemein durch die folgende Diffusions-Advektions-Gleichung beschrieben:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Q - S, \quad (1)$$

wobei mit  $x$ ,  $y$  und  $z$  die kartesischen Ortskoordinaten und mit  $t$  die Zeit bezeichnet werden;  $u$ ,  $v$  und  $w$  sind die drei Komponenten der (i.a. orts- und zeitabhängigen) Windgeschwindigkeit;  $C = C(x, y, z, t)$  ist die Schadstoffkonzentration am Ort  $(x, y, z)$  zur Zeit  $t$ ; mit  $Q = Q(x, y, z, t)$  und  $S = S(x, y, z, t)$  werden Quellen bzw. Senken erfaßt;  $K_x$ ,  $K_y$  und  $K_z$  sind die (i.a. orts- und zeitabhängigen) Koeffizienten der turbulenten Diffusion. Die zeitliche Änderung der Schadstoffkonzentration wird gemäß (1) durch den advektiven Schadstofftransport entsprechend der Windgeschwindigkeit, durch die turbulente Diffusion sowie durch Quellen und Senken bestimmt.

Zur Lösung der Gleichung (1) werden neben Anfangsbedingungen (z.B. der Form  $C(x, y, z, t) = 0$  für  $t \leq t_0$ ) auch Randbedingungen benötigt. Letztere sind insbesondere für die Bodenoberfläche zu formulieren, für die i.d.R. eine Reflexion der Abwetterfahne angenommen wird. Es sei vermerkt, daß mit Hilfe von Randbedingungen auch Flächenquellen (z.B. Radonexhalation von bergbaulichen Hinterlassenschaften, wenn mit (1) die Radonkonzentration in der Umgebung berechnet wird) sowie Senken (z.B. Staubdeposition bei Berechnungen zur Staubbelastung) erfaßt werden können.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts zur Radonausbreitung aus Bodenquellen wird der stationäre Fall der Gleichung (1) betrachtet. Der radioaktive Zerfall von Rn-222 kann entsprechend der relativ großen Halbwertszeit dieses Radionuklids ( $T_{1/2;Rn-222} = 3,82$  d) vernachlässigt werden, so daß keine Senken zu berücksichtigen sind ( $S = 0$ ). Es wird angenommen, daß ein zeitlich konstanter Wind in  $x$ -Richtung weht. Mit dieser Annahme wird näherungsweise auch für reale meteorologische Bedingungen gerechnet, indem entsprechend der Ausbreitungsklassenstatistik die für verschiedene Windrichtungen resultierenden Abwetterfahnen nach ihrer Häufigkeit gemittelt werden (siehe dbzgl. Kapitel 4). Dementsprechend ist  $v = w = 0$ . Eine weitere Vereinfachung von (1) resultiert daraus, daß die Diffusion in Ausbreitungsrichtung  $x$  gegenüber dem advektiven Transport vernachlässigt werden kann ( $K_x \cong 0$ ). Insgesamt vereinfacht sich damit die Gleichung (1) zu:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Q, \quad (2)$$

wobei  $Q$  und  $C$  sowie die Windgeschwindigkeit  $u$  und die Diffusionskoeffizienten  $K_y$  und  $K_z$  nur noch Funktionen der Ortskoordinaten sind.

Die Lösung von (2) kann vereinfacht werden, wenn man davon ausgeht, daß der Koeffizient  $K_y$  für die horizontale turbulente Diffusion nicht von  $y$  und  $z$  abhängt. Mit dem Ansatz

$$C(x, y, z) = C_q(x, z) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right], \quad (3)$$

wobei  $C_q(x, z)$  als "querwindintegrierte" Konzentration bezeichnet wird,

$$C_q(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, y, z) dy, \quad (4)$$

und  $\sigma_y(x)$  der sogenannte horizontale Ausbreitungsparameter ist, folgt aus (2) mit der Beziehung

$$K_y = u \cdot \sigma_y \cdot \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \quad (5)$$

für  $C_q(x, z)$  die folgende 2-dimensionale Diffusions-Advektions-Gleichung:

$$u \frac{\partial C_q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C_q}{\partial z} \right) + Q. \quad (6)$$

Den Ausbreitungsrechnungen in Kapitel 3 wird der Ansatz (3) mit querwindintegrierter Schadstoffkonzentration  $C_q(x, z)$  nach Gleichung (6) zugrunde gelegt. Die Parametrisierung von  $u$  und  $K_z$  für verschiedene Ausbreitungsbedingungen wird nachfolgend in den Abschnitten 2.2 bzw. 2.3 erläutert. Die für den Vergleich verschiedener Ausbreitungsmodelle mit dem K-Modell in Kapitel 3 durchgeführten Berechnungen betreffen nur den Fall der neutralen atmosphärischen Schichtung.

Für die in Kapitel 4 für reale meteorologische Bedingungen durchgeführten Berechnungen ist das mit den Gleichungen (3) und (6) für eine bestimmte Windrichtung formulierte K-Modell noch zu erweitern; dies erfolgt in Abschnitt 4.2.3. Die Ausbreitungsklassenstatistik gibt Häufigkeiten  $p_{i,j,k}$  von Winden aus dem Sektor  $i$  ( $i = 1$  bis  $I$ ;  $I = 36$ ) mit der Windgeschwindigkeitsstufe  $j$  ( $j = 1$  bis  $J$ ;  $J = 31$ ) bei der Ausbreitungsklasse  $k$  ( $k = 1$  bis  $K$ ;  $K = 6$ ) an. Zur Berechnung des Beitrages zur Radonkonzentration in der Umgebung einer Quelle bei Winden aus einem bestimmten Sektor für den jeweils gegenüberliegenden ( $10^\circ$  großen Sektor) kann die horizontale Diffusion vereinfacht durch den Faktor  $1/(2\pi \cdot r)$  approximiert werden;  $r$  bezeichnet den Abstand des Aufpunktes vom Quellpunkt. Die Abwetterfahne liegt dann vollständig im jeweiligen Windrichtungssektor (vgl. [6]).

## 2.2 Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit u

Die theoretischen Ansätze zur Modellierung der luftgetragenen Schadstoffausbreitung gehen i.a. für die Windgeschwindigkeit  $u(z)$  von einem logarithmischen Windprofil mit Korrekturfunktionen für unterschiedliche Stabilitätsbedingungen der atmosphärischen Schichtung (Ausbreitungsklassen) aus. Gemäß [12] verwenden wir die folgende Parametrisierung:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left\{ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \Psi\left(\frac{z}{L}\right) \right\}, \quad (7)$$

in der  $u_*$  die Schubspannungsgeschwindigkeit,  $\kappa = 0,35$  die KARMAN-Konstante,  $z_0$  die aerodynamische Rauigkeitslänge und  $L$  die MONIN-OBUKHOV-Länge bezeichnen. Die Funktion  $\Psi(z/L)$  ergibt sich aus der Integration der Gleichung

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{\kappa \cdot z} \cdot \Phi\left(\frac{z}{L}\right). \quad (8)$$

Für die Funktion  $\Phi(z/L)$  wurde aus meteorologischen Messungen für eine Vielzahl verschiedener Ausbreitungssituationen folgende Approximation gewonnen (siehe [13], [14]):

$$\Phi\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} 1 + \frac{4,7 \cdot z}{L} & \text{für } L \geq 0 \text{ (stabile Schichtung)} \\ \left[ 1 - \frac{15 \cdot z}{L} \right]^{-1/4} & \text{für } L \leq 0 \text{ (labile Schichtung)} \end{cases} \quad (9)$$

Für die MONIN-OBUKHOV-Länge können für die verschiedenen Ausbreitungsklassen realistische Mittelwerte angenommen werden. Im Rahmen des vorliegenden Berichtes verwenden wir auf Basis der dbzgl. Angaben von [12] die in Tabelle 1 zusammengestellten Werte aus [1]. Die zur Kennzeichnung der Ausbreitungsklasse üblichen Bezeichnungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Mit den Beziehungen (7) bis (9) und den Angaben von Tabelle 1 lassen sich die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit  $u(z)$  für alle Ausbreitungsklassen ( $k$ ) und Windgeschwindigkeitsstufen ( $j$ ) berechnen, wobei die Anemometerhöhe  $z_a$  zu berücksichtigen ist, in der die Windgeschwindigkeit gemessen wurde. Außerdem muß die aerodynamische Bodenrauigkeit  $z_0$  bekannt sein. Tabelle 1 enthält für die 6 Ausbreitungsklassen die Ansätze zur Höhe  $H_m$  der Mischungsschicht (wird auch als "Grenzschichtobergrenze" bezeichnet; vgl. [7], [8]). Über diese Höhe hinaus erfolgt keine weitere vertikale Vergrößerung der Abwetterfahne.

Die für den Modellvergleich in Kapitel 3 durchgeführten Berechnungen beschränken sich auf den Fall der neutralen atmosphärischen Schichtung (Ausbreitungsklasse:  $k = 3$ , bzw. D, III<sub>1</sub>). Neben den dbzgl. Werten für  $L$  und  $H_m$  aus Tabelle 1 wird für  $z_0$  und  $z_a$  mit folgenden Werten gerechnet:

$$z_0 = 0,1 \text{ m}; \quad z_a = 10 \text{ m} \quad (\text{für Vergleichsrechnungen in Kapitel 3}).$$

**Tabelle 1:** Schätzwerte für die MONIN-OBUKHOV-Länge  $L$  und die Höhe  $H_m$  der Mischungsschicht sowie übliche Bezeichnungen für die sechs Ausbreitungsklassen (AK); aus [1]

atmosphärische Schichtung	AK			L in m	$H_m$ in m
	k	nach [6]	nach [7]		
sehr stabil	1	F	I	50	250
stabil	2	E	II	150	250
neutral	3	D	III <sub>1</sub>	5000	800
neutral	4	C	III <sub>2</sub>	-3000	800
labil	5	B	IV	-100	1100
sehr labil	6	A	V	-30	1100

Bei Ausbreitungsrechnungen für reale Situationen ist zu beachten, daß sich die Bodenrauigkeit im Bereich der meteorologischen Meßstation (z.B. des DWD) von der am untersuchten Standort u.U. erheblich unterscheiden kann. In diesem Fall ist eine entsprechende Transformation der vertikalen Windprofile für eine größere Realitätsnähe der Ausbreitungsrechnungen angebracht. In Kapitel 4 werden Daten der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz den Radon-Ausbreitungsrechnungen für den WISMUT-Standort Crossen zugrunde gelegt. Gemäß [1] kann für den Bereich der Wetterstation in etwa mit einer Rauigkeitslänge von  $z_{0,W} = 0,03$  m gerechnet werden. Die Anemometerhöhe liegt hier bei  $z_a = 12$  m. Ist für eine gegebene Ausbreitungssituation  $u_a$  die in Anemometerhöhe  $z_a$  von der Wetterstation gemessene Windgeschwindigkeit, so kann die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_{*,W}$  und damit auch das vertikale Windprofil im Bereich der Meßstation mit (7) berechnet werden.

Für den WISMUT-Standort Crossen wird eine Rauigkeitslänge von  $z_{0,S} = 0,3$  m angesetzt. Die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_{*,S}$  für den Standort ergibt sich dann unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung aus der folgenden Beziehung (siehe [1]):

$$u_{*,S} = u_{*,W} \cdot \frac{H_m \cdot \ln(H_m / z_{0,W}) - H_m + z_{0,W} + \int_{z_{0,W}}^{H_m} \Psi(z/L) dz}{H_m \cdot \ln(H_m / z_{0,S}) - H_m + z_{0,S} + \int_{z_{0,S}}^{H_m} \Psi(z/L) dz} \quad (10)$$

Das vertikale Windprofil am Standort wird dann mit der Schubspannungsgeschwindigkeit gemäß (10) wieder über die Gleichung (7) berechnet. Es sei vermerkt, daß sich beim Übergang von einem Gebiet mit kleiner Bodenrauigkeit zu einem Gebiet mit wesentlich größerer Bodenrauigkeit die Windgeschwindigkeit in Bodennähe verringert, wogegen sich entsprechend der Massenerhaltung in den höheren Luftschichten eine größere Windgeschwindigkeit einstellt. Insgesamt kann sich dabei eine für die Ausbreitungsrechnungen signifikante Veränderung des vertikalen Windprofils ergeben.

Zur Veranschaulichung betrachten wir den Fall der neutralen atmosphärischen Schichtung. Wegen des großen Wertes der MONIN-OBUKHOV-Länge (siehe Tabelle 1) kann für die mit (9) definierte Funktion vereinfachend mit  $\Phi(z/L) \cong 1$  gerechnet werden. Damit gilt für die Korrekturfunktion in (7):  $\Psi(z/L) \cong 0$ . Für neutrale atmosphärische Schichtung resultiert das logarithmische Windprofil

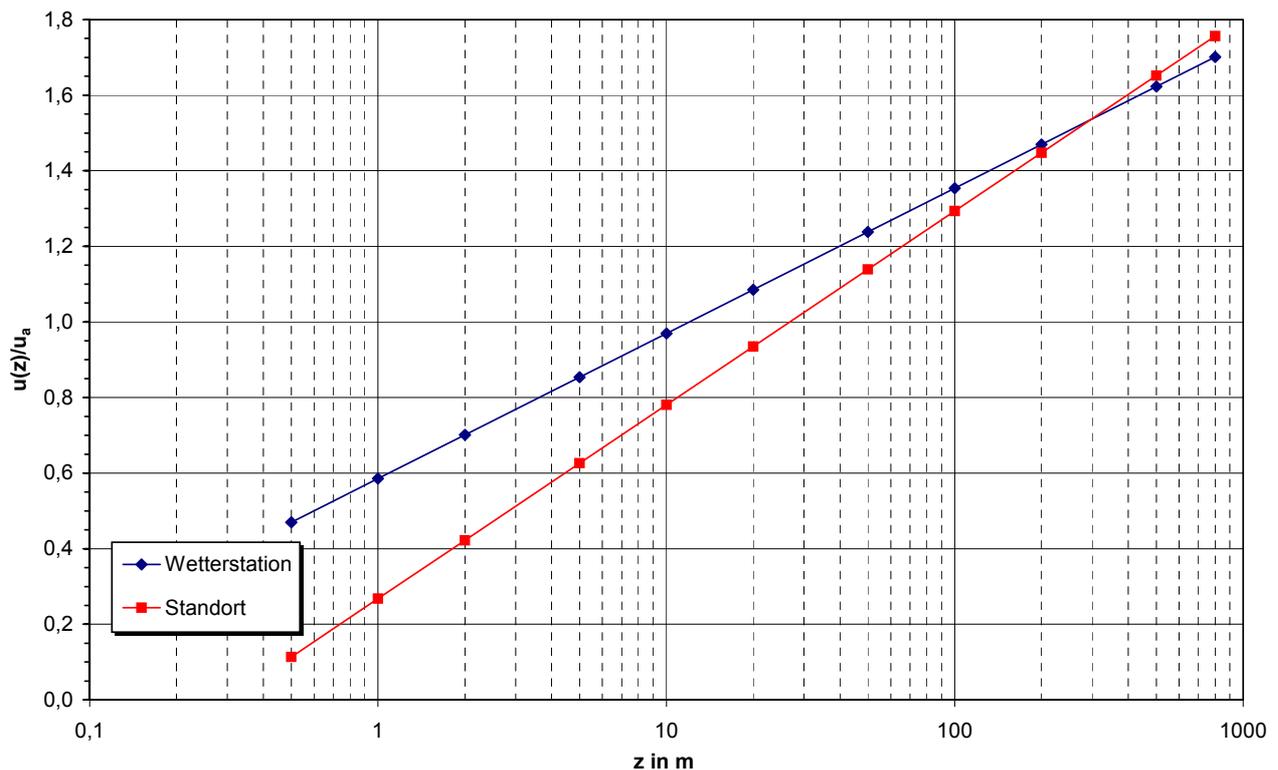
$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right). \quad (11)$$

Mit den o.g. Werten für die Anemometerhöhe von  $z_a = 12$  m und die Rauigkeitslängen im Bereich der Wetterstation von  $z_{0,W} = 0,03$  m bzw. am Standort von  $z_{0,S} = 0,3$  m ergeben sich aus (10) und (11) die folgenden Schubspannungsgeschwindigkeiten:

$$u_{*,W} = 0,058 \cdot u_a \quad \text{und} \quad u_{*,S} = 0,078 \cdot u_a .$$

Die Abbildung 1 zeigt die auf die Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe ( $u_a$ ) bezogenen Profile der Windgeschwindigkeit im Bereich der Wetterstation bzw. des Standortes. In Bodennähe ergibt sich am Standort wegen der größeren Rauigkeit eine wesentlich kleinere Windgeschwindigkeit. In einer Höhe von ca. 300 m stimmen beide Windgeschwindigkeiten überein. Erst in noch größerer Höhe wird die Windgeschwindigkeit am Standort größer als im Bereich der Wetterstation.

**Abbildung 1:** Vergleich der Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation (mit  $z_a = 12$  m;  $z_{0,W} = 0,03$  m) und am Standort ( $z_{0,S} = 0,3$  m) bei neutraler atmosphärischer Schichtung



## 2.3 Vertikalprofil des Diffusionskoeffizienten $K_z$

Für das Vertikalprofil des Diffusionskoeffizienten  $K_z$  findet man in der Fachliteratur verschiedene Parametrisierungen. Diese weichen nicht nur mehr oder weniger stark quantitativ voneinander ab, zu bestimmten Aspekten - wie bzgl. der Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit - weisen sie auch qualitative Unterschiede auf. Nachfolgend wird zunächst in **Abschnitt 2.3.1** unsere in [1] auf der Basis eines theoretischen Ansatzes für das K-Modell entwickelte Parametrisierung erläutert, die auch unseren Ausbreitungsrechnungen für den vorliegenden Bericht zugrunde liegt. Im Hinblick auf die Diskussion der Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten  $K_z$  (und der Ergebnisse von Radon-Ausbreitungsrechnungen) von der Windgeschwindigkeit wird in **Abschnitt 2.3.2** auf die empirische Parametrisierung nach WIPPERMANN eingegangen, die zu ähnlichen Ergebnissen führt. Das von der GRS verwendete Ausbreitungsmodell enthält einer Parametrisierung von  $K_z$  gemäß der im Entwurf vorliegenden VDI-Richtlinie [8]. Für eine Vergleichsrechnung zu dem im Vorhaben StSch 4270 hauptsächlich betrachteten Fall der neutralen atmosphärischen Schichtung wird in **Abschnitt 2.3.3** auf die für diesen Fall nach [8] resultierende  $K_z$ -Parametrisierung eingegangen. In **Abschnitt 2.3.4** sind die Ergebnisse dieser Vergleichsrechnung dargestellt.

### 2.3.1 Parametrisierung auf Basis eines theoretischen Modells

In [12] wird eine Übersicht über verschiedene theoretische Ansätze zur Parametrisierung des vertikalen Diffusionskoeffizienten gegeben. Eine relativ allgemeine Form ist die Beziehung

$$K_z = 1,35 \cdot l^2 \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \quad , \quad (12)$$

in der  $l$  als Mischungsweg bezeichnet wird. Durch den Faktor 1,35 wird der Unterschied zwischen den Diffusionskoeffizienten für vektorielle Größen (Wirbel-Diffusivität) bzw. für skalare Größen (Diffusion von Wärme oder luftgetragenen Schadstoffen) berücksichtigt. In Verallgemeinerung einer in [12] für stabile atmosphärische Schichtungen angegebenen Beziehung gehen wir nach [1] von der folgenden Darstellung für den Mischungsweg aus:

$$\frac{1}{l} = \left( \frac{1}{\kappa \cdot z} + \frac{1}{l_\infty} \right) \cdot \Phi \left( \frac{z}{L} \right) \quad \text{mit} \quad (13)$$

$$l_\infty = \frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot u(H_m)}{f_c} \cdot \frac{\ln(H_m / z)}{1 + \ln(H_m / z)} \quad (14)$$

In (14) bezeichnet  $f_c$  den CORIOLIS-Parameter, der in unseren Breitengraden etwa bei  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  liegt. Ohne die Multiplikation mit der Funktion  $\Phi(z/L)$  ist die Gleichung (13) eine bekannte Darstellung des Mischungsweges  $l$  für neutrale Schichtung nach [15], wobei mit  $l_\infty$  ein maximaler Wert des Mischungsweges (für  $z \Rightarrow \infty$ ) vorgegeben wird. Für stabile Schichtungen wurde in [12] gemäß [16]

eine dem Faktor  $\Phi(z/L)$  der Darstellung (13) entsprechende Erweiterung angegeben. Für neutrale Schichtungen ist  $\Phi(z/L)$  in etwa gleich 1 (vgl. (9) mit  $|L| \Rightarrow \infty$ ), so daß sich durch den Faktor  $\Phi(z/L)$  in (13) für stabile und neutrale atmosphärische Schichtungen keine Veränderung gegenüber den aus der Literatur bekannten Darstellungen ergibt. Mit dem Faktor  $\Phi(z/L)$  wird in (13) auch für instabile Schichtungen gewährleistet, daß der Diffusionskoeffizient für alle  $z$ -Werte mit abnehmender Stabilität der atmosphärischen Schichtung zunimmt. Dies ist eine allgemeine Forderung. Ohne diese gegenüber [12] verallgemeinerte Formel für den Mischungsweg würde sich ab einer bestimmten Höhe  $z$  für instabile atmosphärische Schichtungen ein geringerer Diffusionskoeffizient ergeben als für neutrale Bedingungen.

In der Formel (14) für den Grenzwert  $l_\infty$  des Mischungsweges entspricht der erste Faktor einer Darstellung gemäß [17]. Der zweite Faktor ist eine relativ willkürlich gewählte Abbruchfunktion. Sowohl in Gauß-Fahnen- als auch in K-Modellen kann die Undurchlässigkeit der oberen Grenze der Mischungsschicht durch eine zusätzliche Randbedingung (Reflexion der Abwetterfahne an der oberen Grenze  $z = H_m$  der Mischungsschicht) erreicht werden. Die Funktion  $\ln(H_m/z)/(1+\ln(H_m/z))$  führt gemäß (13) und (14) für  $z \Rightarrow H_m$  zu einem Abfall des Mischungsweges  $l$  auf den Wert Null. Gemäß (12) fällt damit auch der Diffusionskoeffizient in der Nähe von  $H_m$  auf den Wert Null ab, was - ohne zusätzliche Randbedingung - eine Reflexion der Abwetterfahne an der oberen Grenze der Mischungsschicht bewirkt. Im Rahmen unserer Approximation ergibt sich somit die Reflexion der Abwetterfahne an der oberen Grenze der Mischungsschicht durch den starken Abfall des Diffusionskoeffizienten  $K_z$  für  $z \Rightarrow H_m$  von allein. Für geringe  $z$ -Werte hat die Abbruchfunktion den Wert 1. Da für  $l_\infty$  in der Literatur unterschiedliche Werte angegeben werden, erscheint die mit der konkreten Form der Abbruchfunktion für mittlere  $z$ -Werte resultierende Unsicherheit akzeptabel.

### 2.3.2 Empirische Parametrisierung nach WIPPERMANN

Gemäß [18] und [19] kann  $K_z$  über die folgenden empirischen Beziehungen berechnet werden:

$$K_z = \kappa \cdot u_* \cdot z \cdot \exp\left(-c(\mu) \cdot \left(\frac{z \cdot f_c}{\kappa \cdot u_*}\right)^{0,764}\right), \quad (15)$$

$$c(\mu) = \exp(0,264 + 1,62 \cdot 10^{-2} \cdot \mu' + 3,96 \cdot 10^{-4} \cdot \mu'^2) \quad \text{mit} \quad (16)$$

$$\mu = \frac{\kappa \cdot u_*}{L \cdot f_c} \quad \text{und} \quad \mu' = \mu + 50. \quad (17)$$

Aus einer Gegenüberstellung des  $K_z$ -Profils nach WIPPERMANN mit unserem Ansatz ergibt sich, daß (mit  $\kappa = 0,4$  in (15) und (17)) in Bodennähe eine gute Übereinstimmung der Parametrisierungen vorliegt. Für große Höhen fällt der Diffusionskoeffizient von WIPPERMANN insbesondere bei hoher Windgeschwindigkeit langsamer ab, so daß bei diesem Ansatz die Reflexion der Abwetterfahne an der oberen Grenze der Mischungsschicht durch eine Randbedingung bei der Lösung der Diffusions-Advektions-Gleichung zu gewährleisten ist.

### 2.3.3 Parametrisierung nach VDI-3783-8

Nach [8] kann der Diffusionskoeffizient  $K_z$  über die Beziehung

$$K_z = \sigma_w^2 \cdot T_{Lw} \quad (18)$$

berechnet werden, in der  $\sigma_w$  die Standardabweichung der vertikalen Komponente  $w$  der Windgeschwindigkeit und  $T_{Lw}$  die LAGRANGE-Korrelationszeit in der  $z$ -Richtung bezeichnen. Diese beiden Parameter können für neutrale atmosphärische Schichtung mit Hilfe der Formeln

$$\sigma_w = 1,3 \cdot u_* \cdot \exp\left[-\frac{z}{H_m}\right], \quad (19)$$

$$T_{Lw} = \frac{2 \cdot \sigma_w^2}{C_0 \cdot \varepsilon} \quad (20)$$

abgeschätzt werden. Neben den bereits erläuterten Symbolen stehen im Nenner von (20) die sog. KOLMOGOROV-Konstante  $C_0 = 5,7$  sowie die Dissipation der turbulenten kinetischen Energie  $\varepsilon$ , die für neutrale atmosphärische Schichtung über die Beziehung

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa \cdot z} \quad (21)$$

abgeschätzt werden kann. Es sei angemerkt, daß für die KARMAN-Konstante in [8] der Wert  $\kappa = 0,4$  empfohlen wird, der geringfügig von dem in unserem Modell verwendeten Wert von 0,35 abweicht (vgl. Abschnitt 2.2). Aus den Gleichungen (18) bis (21) ergibt sich zusammenfassend die folgende Formel zur Berechnung von  $K_z$  für neutrale atmosphärische Schichtung:

$$K_z = u_* \cdot \kappa \cdot z \cdot \exp\left[-\frac{4 \cdot z}{H_m}\right]. \quad (22)$$

### 2.3.4 Vergleich der verschiedenen $K_z$ -Parametrisierungen

Die Auswertung der im Rahmen des Vorhabens StSch 4270 durchgeführten Modellrechnungen ergab, daß die von uns mit dem K-Modell berechneten Radonkonzentrationen - im Unterschied zu den Ergebnissen der GRS und des Ingenieurbüros Lohmeyer - nicht mit der Windgeschwindigkeit  $u_a$  skalieren. Im Unterschied zu den anderen Modellrechnungen liefert unser K-Modell für die mit der Windgeschwindigkeit  $u_a$  multiplizierte Konzentration  $C$  unterschiedliche Werte, wogegen die anderen Modelle gleiche Verteilungen für die Größe  $u_a \cdot C$  für verschiedene  $u_a$ -Werte ergeben [11].

Die Ursache dieser Diskrepanz liegt darin, daß die von der GRS und vom Ingenieurbüro Lohmeyer verwendete  $K_z$ -Parametrisierung proportional zu  $u_*$  ist (vgl. (22)) und damit gemäß

$$u_a \equiv u(z_a) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z_a}{z_0}\right). \quad (23)$$

(vgl. (11)) auch proportional zu  $u_a$ , was jedoch für die von uns verwendete Parametrisierung nicht zutrifft. Mit dem Ansatz (22) würde offensichtlich auch die Diffusions-Advektions-Gleichung (6) zu einer querwindintegrierten Konzentration  $C_q$  (und mit (3) zu einer Verteilung der Konzentration  $C$ ) führen, die umgekehrt proportional zu  $u_a$  (bzw.  $u_*$ ) ist. Dies wird in Kapitel 3 anhand einer dbzgl. Vergleichsrechnung veranschaulicht. Hier sei vermerkt, daß das Euler-Modell (K-Modell) und die Partikel-Modelle bis auf ggf. geringe numerisch bedingte Abweichungen gleiche Ergebnisse liefern müssen, wenn die Parametrisierungen zur Windgeschwindigkeit und zur turbulenten Diffusion übereinstimmen.

Die von uns verwendete  $K_z$ -Parametrisierung (siehe Abschnitt 2.3.1) weicht bzgl. der Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit jedoch qualitativ vom Ansatz (22) ab. Aus (11) bis (13) resultiert für die neutrale atmosphärische Schichtung (hierfür gilt:  $\Phi(z/L) \cong 1$ ) die Formel

$$K_z = 1,35 \cdot u_* \cdot \kappa \cdot z \cdot \frac{l_\infty^2}{(l_\infty + \kappa \cdot z)^2}. \quad (24)$$

Da  $l_\infty$  gemäß (14) über die Windgeschwindigkeit an der oberen Grenze der Mischungsschicht  $u(H_m)$  von der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  abhängt, ergibt (24) eine nichtlineare Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten  $K_z$  von der Windgeschwindigkeit  $u_a$  (bzw. von  $u_*$ ). Deshalb sind die mit (6) und (3) berechneten Konzentrationen  $C(x, y, z)$  nicht mehr exakt umgekehrt proportional zu  $u_a$ .

Ausgehend von den obigen Darlegungen kann bereits an dieser Stelle eingeschätzt werden, wie sich unsere Ergebnisse der Radon-Ausbreitungsrechnungen mit dem K-Modell von den Berechnungen der GRS (Partikel-Modell) qualitativ unterscheiden müssen. Mit den für die Vergleichsrechnungen in [10] festgelegten Fällen zur Windgeschwindigkeit in einer "Anemometerhöhe" von  $z_a = 10$  m von  $u_a \equiv u_{10} = \{1 \text{ m/s}, 2 \text{ m/s}, 5 \text{ m/s}\}$  bei einer Rauheitslänge von  $z_0 = 0,1$  m ergeben sich aus (24) mit  $l_\infty$  nach (14) für den auf den  $u_{10}$ -Wert bezogenen Diffusionskoeffizienten drei unterschiedliche vertikale Profile von  $K_z/u_{10}$ , wie in Abbildung 2 dargestellt. Zum Vergleich enthält Abbildung 2 auch den nach (22) berechneten Verlauf von  $K_z/u_{10}$ , der für alle drei  $u_{10}$ -Werte identisch ist.

Die Abbildung 2 zeigt, daß bei relativ hoher Windgeschwindigkeit (Fall  $u_{10} = 5$  m/s) insbesondere in Bodennähe die  $K_z$ -Parametrisierung unseres K-Modells und die Parametrisierung nach [8] in etwa übereinstimmen. Folglich sind für diesen Fall zur Radonkonzentration in der Bodennähe bei bodennahen Quellen ähnliche Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung von BS und GRS zu erwarten. Für kleine Windgeschwindigkeiten (z.B. im Fall  $u_{10} = 1$  m/s) resultiert jedoch nach unserem Ansatz eine geringere turbulente Diffusion, was höhere Rn-Konzentrationen in Bodennähe bewirkt.

Die Abbildung 3 zeigt zum Vergleich die nach dem empirischen Modell von WIPPERMANN (siehe Abschnitt 2.3.2) resultierenden  $K_z$ -Profile gegenüber dem nach [8] berechneten Profil. Qualitativ ergibt sich aus (15) bis (17) ein ähnlicher Einfluß der Windgeschwindigkeit auf den Koeffizienten der vertikalen Diffusion wie nach unserem Modellansatz ( $u$ -Abhängigkeit der Relation  $K_z/u_{10}$  mit kleineren Werten bei geringeren Windgeschwindigkeiten).

Abbildung 2: Gegenüberstellung der Profile von  $K_z/u_{10}$  gemäß (24) und (14) bzw. nach (22)

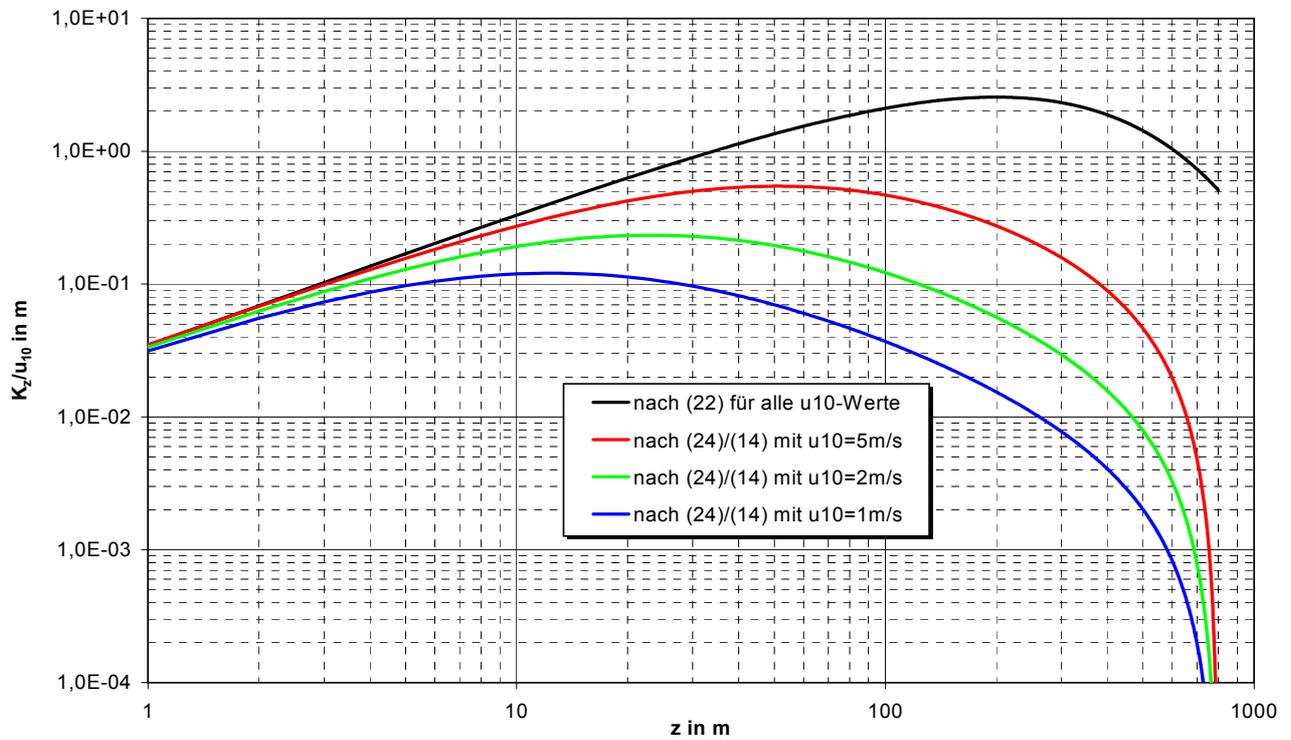
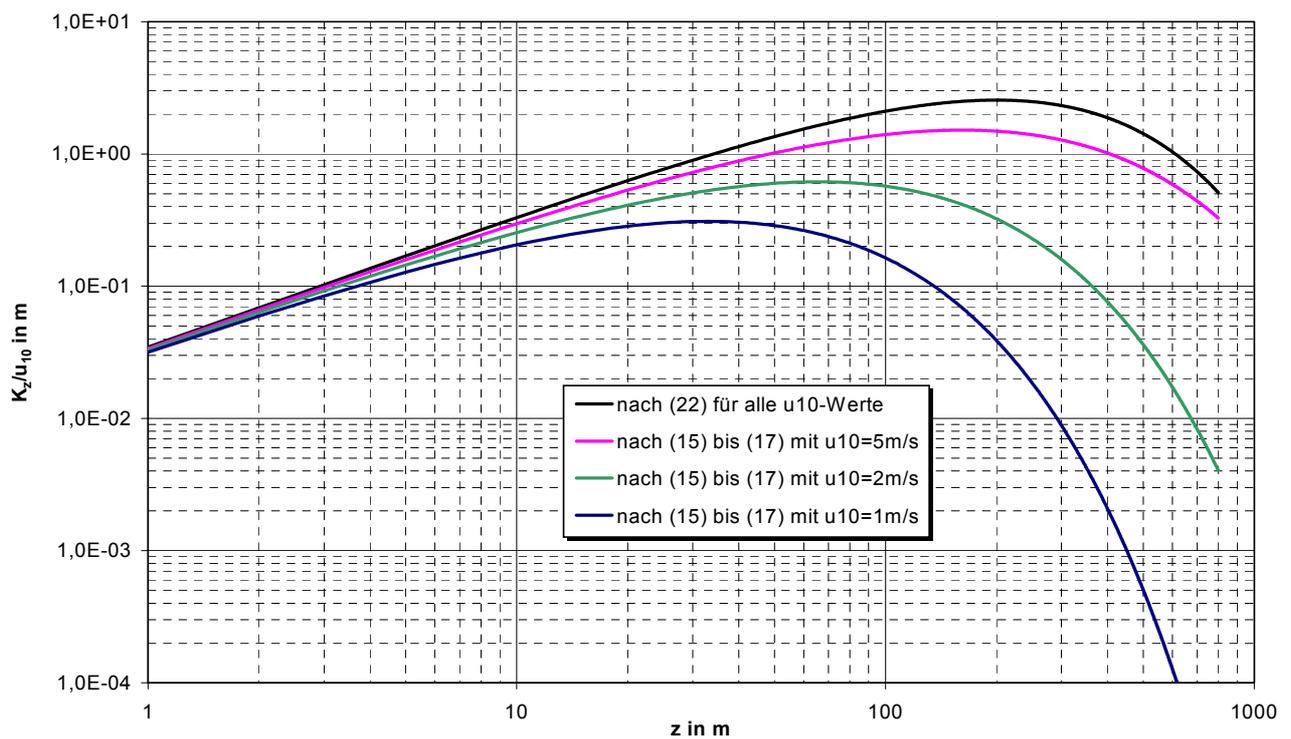


Abbildung 3: Gegenüberstellung der Profile von  $K_z/u_{10}$  gemäß (15) bis (17) bzw. nach (22)



## 2.4 Parametrisierung des horizontalen Ausbreitungsparameters $\sigma_y$

Im Rahmen des Projektes StSch 4270 wurden mit dem K-Modell Ausbreitungsrechnungen mit verschiedenen Parametrisierungen des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  durchgeführt. Bei den Ausbreitungsrechnungen für reale meteorologische Bedingungen (Ausbreitungsklassenstatistik) ist die Abhängigkeit dieses Parameters vom Abstand zur Quelle  $\sigma_y = \sigma_y(x)$  von untergeordneter Bedeutung, weil sich hier Ungenauigkeiten bzgl. der Erfassung der horizontalen Aufweitung der Abwetterfahne durch die Summation über alle Windrichtungen weitgehend herausmitteln. Für den Vergleich von Abwetterfahnen bzgl. einer vorgegebenen Windrichtung ist die Parametrisierung von  $\sigma_y(x)$  jedoch relevant.

In einem ersten Ansatz [20] wurden die Ausbreitungsrechnungen mit der in [5] bis [7] empfohlenen Parametrisierung durchgeführt (Fall a). Damit resultierte eine deutlich größere Aufweitung der Abwetterfahne als nach den mit den Partikel-Modellen der GRS und des Ingenieurbüros Lohmeyer durchgeführten Berechnungen. Im Ergebnis der 2. Projektberatung [21] wurde deshalb vereinbart, daß von uns Berechnungen mit der  $\sigma_y$ -Parametrisierung vorgenommen werden, die i.w. dem Ansatz der GRS entspricht, der auf [8] beruht. Die auf dieser Basis in [22] mit dem K-Modell realisierten Berechnungen ergaben erwartungsgemäß eine wesentlich geringere Aufweitung der Abwetterfahne (Fall b), die aus unserer Sicht jedoch zu gering ist. Eine Auswertung der mit [9] übergebenen ersten Ergebnisse der an der Universität Hamburg im Rahmen des Vorhabens StSch 4270 durchgeführten Windkanalexperimente ergab eine  $\sigma_y$ -Parametrisierung (Fall c), die zwischen den beiden anderen Varianten liegt [23].

Nachfolgend werden die betrachteten  $\sigma_y$ -Parametrisierungen kurz erläutert, wobei nur der Fall der neutralen atmosphärischen Schichtung betrachtet wird. Der **Abschnitt 2.4.1** enthält die übliche Parametrisierung nach [5] bis [7]. In **Abschnitt 2.4.2** wird auf den aus [8] resultierenden Verlauf von  $\sigma_y$  eingegangen. In **Abschnitt 2.4.3** wird unsere Auswertung der dbzgl. Meßergebnisse aus den aktuellen Hamburger Windkanalmessungen erläutert. In **Abschnitt 2.4.4** erfolgt ein Vergleich der drei untersuchten  $\sigma_y$ -Parametrisierungen.

### 2.4.1 **Parametrisierung von $\sigma_y$ nach TA Luft, AVV zu § 45 StrlSchV(Alt) und VDI-3782-1**

Die in [5] bis [7] für das Gauß-Fahnen-Modell empfohlenen Parametrisierungen des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  sind empirische Anpassungen an die Ergebnisse von Feldversuchen für unterschiedliche Emissionshöhen und Ausbreitungsbedingungen, die an der Kernforschungsanlage Jülich und am Kernforschungszentrum Karlsruhe durchgeführt wurden. Die Abhängigkeit von  $\sigma_y$  von der Entfernung  $x$  zur Quelle wird durch den Potenzansatz

$$\sigma_y(x) = p_y \cdot x^{q_y} \quad (x \text{ in m}) \quad (25)$$

approximiert. Für Emissionshöhen unter 50 m und neutrale atmosphärische Schichtung (AK:  $k = 3$  bzw. Bezeichnungen III<sub>1</sub> oder D) werden für die Parameter  $p_y$  und  $q_y$  folgende Werte empfohlen:

$$p_y = 0,640 \text{ m}, \quad q_y = 0,784. \quad (26)$$

### 2.4.2 Parametrisierung von $\sigma_y$ nach VDI-3783-8

Nach [8] kann der Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  mit folgender Formel berechnet werden:

$$\sigma_y(x) = \frac{\sigma_v \cdot x}{u} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{x}{2 \cdot u \cdot T_{Ly}}}}, \quad (27)$$

wobei  $\sigma_v$  die Standardabweichung der horizontalen Komponente  $v$  der Windgeschwindigkeit und  $T_{Lv}$  die LAGRANGE-Korrelationszeit in  $y$ -Richtung bezeichnen. Diese beiden Parameter können für neutrale atmosphärische Schichtung mit Hilfe der Formeln

$$\sigma_v = 1,8 \cdot u_* \cdot \exp\left[-\frac{z}{H_m}\right], \quad (28)$$

$$T_{Lv} = \frac{2 \cdot \sigma_v^2}{C_0 \cdot \varepsilon} \quad (29)$$

abgeschätzt werden, wobei  $C_0 = 5,7$  wieder die KOLMOGOROV-Konstante und  $\varepsilon$  die Dissipation der turbulenten kinetischen Energie (21) bezeichnen; siehe Abschnitt 2.3.3. Aus (27) bis (29) erhält man unter Beachtung von (11) und (21) zusammenfassend die folgende Parametrisierung für  $\sigma_y$ :

$$\sigma_y(x) = \frac{1,8 \cdot \kappa \cdot x \cdot \exp[-z/H_m]}{\ln(z/z_0) \cdot \sqrt{1 + 0,44 \cdot \frac{x \cdot \exp[2 \cdot z/H_m]}{z \cdot \ln(z/z_0)}}}. \quad (30)$$

Nach (30) hängt  $\sigma_y$  nicht nur vom Abstand  $x$  von der Quelle ab, sondern auch von der Höhe  $z$ . Zur Veranschaulichung dieser Beziehung ist in Abbildung 4 der aus (30) resultierende Verlauf von  $\sigma_y(x)$  für die Höhen  $z = \{1,5 \text{ m}; 5 \text{ m}; 10 \text{ m}; 20 \text{ m}\}$  dargestellt.

Für die im Hinblick auf Abschätzung der Radonkonzentration in Bodennähe maßgebliche Höhe von  $z = 1,5 \text{ m}$  enthält Abbildung 4 auch die Anpassung an den Potenzansatz (25). Bei einer sehr guten Korrelation (Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,998$ ) ergaben sich für  $p_y$  und  $q_y$  die Werte

$$p_y = 0,556 \text{ m}, \quad q_y = 0,536 \quad (\text{für } z = 1,5 \text{ m}). \quad (31)$$

Hierzu sei angemerkt, daß die in Abbildung 4 dargestellten Verläufe der Funktion (30) mit einem Wert der KARMAN-Konstante von  $\kappa = 0,35$  berechnet wurden. Verwendet man den aufgerundeten Wert von 0,4 (wie in [8]), so würde sich ein um 14 % größerer Wert für  $p_y$  ergeben.

Nach Abbildung 4 könnte man vermuten, daß  $\sigma_y(x)$  gleichmäßig mit der Höhe  $z$  anwächst. Wie aus Abbildung 5 ersichtlich, ist dies jedoch nicht der Fall. Ab einer gewissen Höhe fällt der nach (30) berechnete Ausbreitungsparameter  $\sigma_y(x)$  mit zunehmendem  $z$  wieder ab.

Abbildung 4: Abhängigkeit des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  von der Entfernung  $x$ ; nach (30); für verschiedene Höhen  $z$

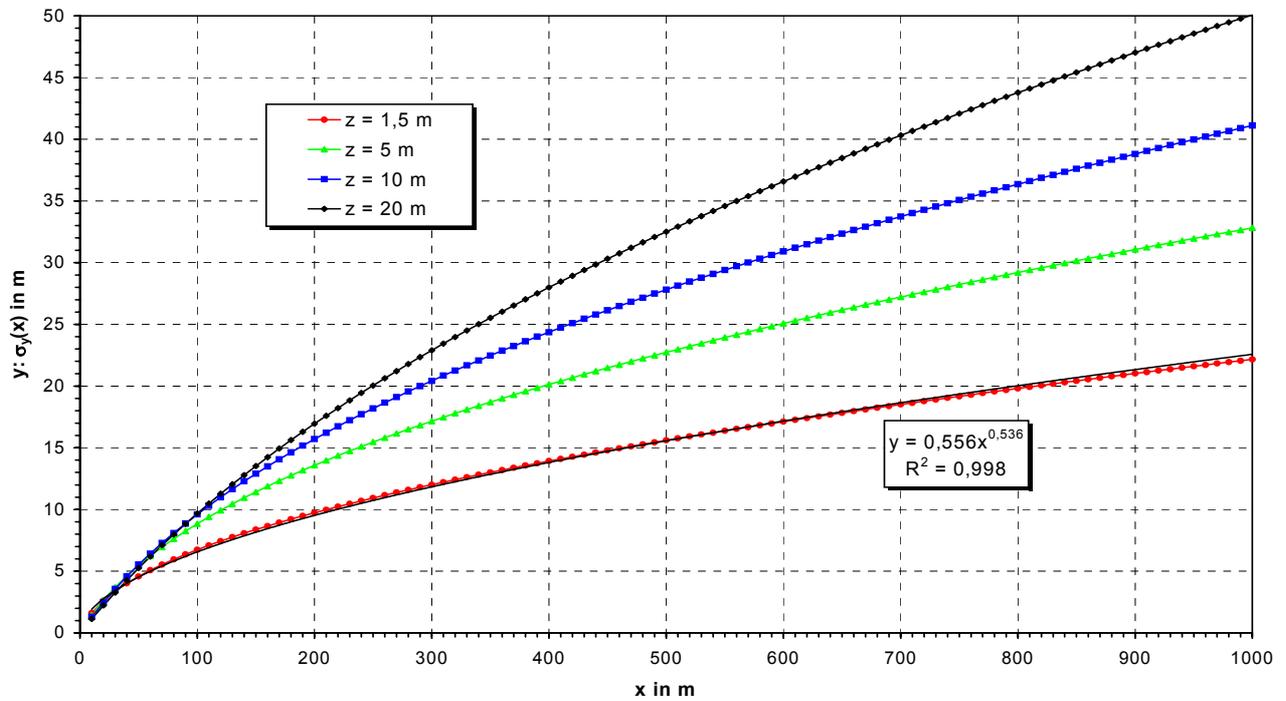
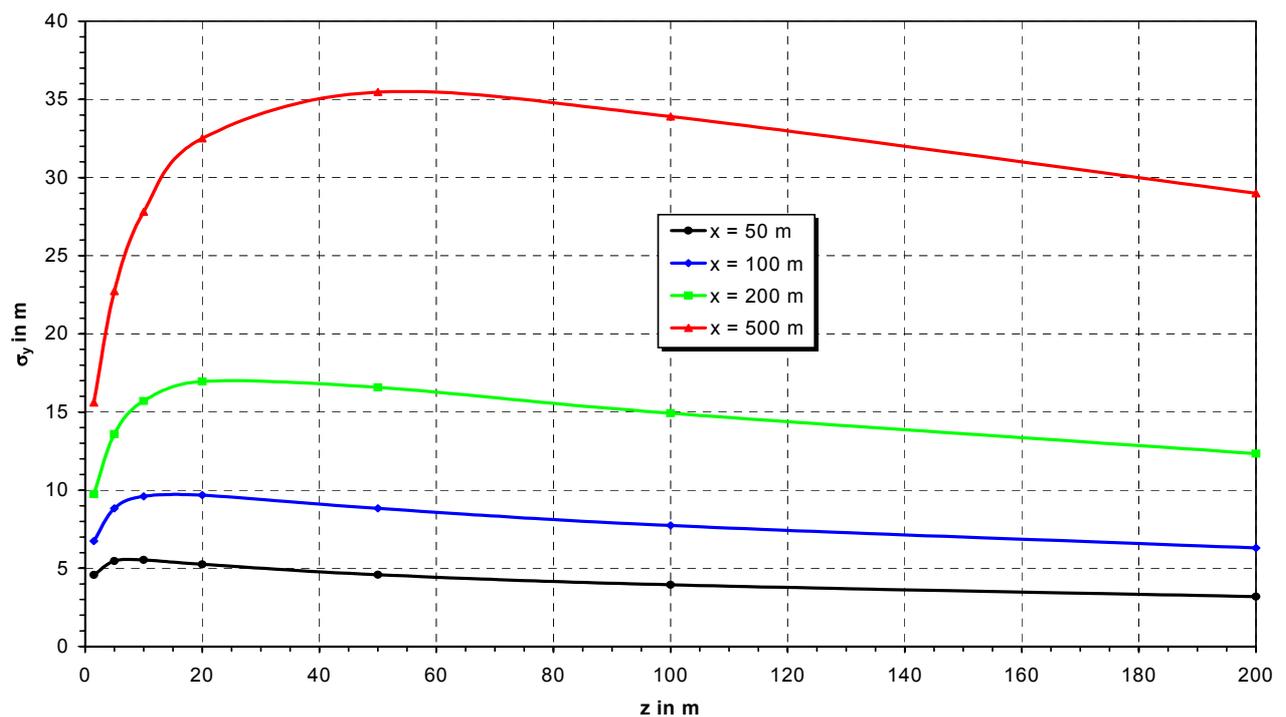


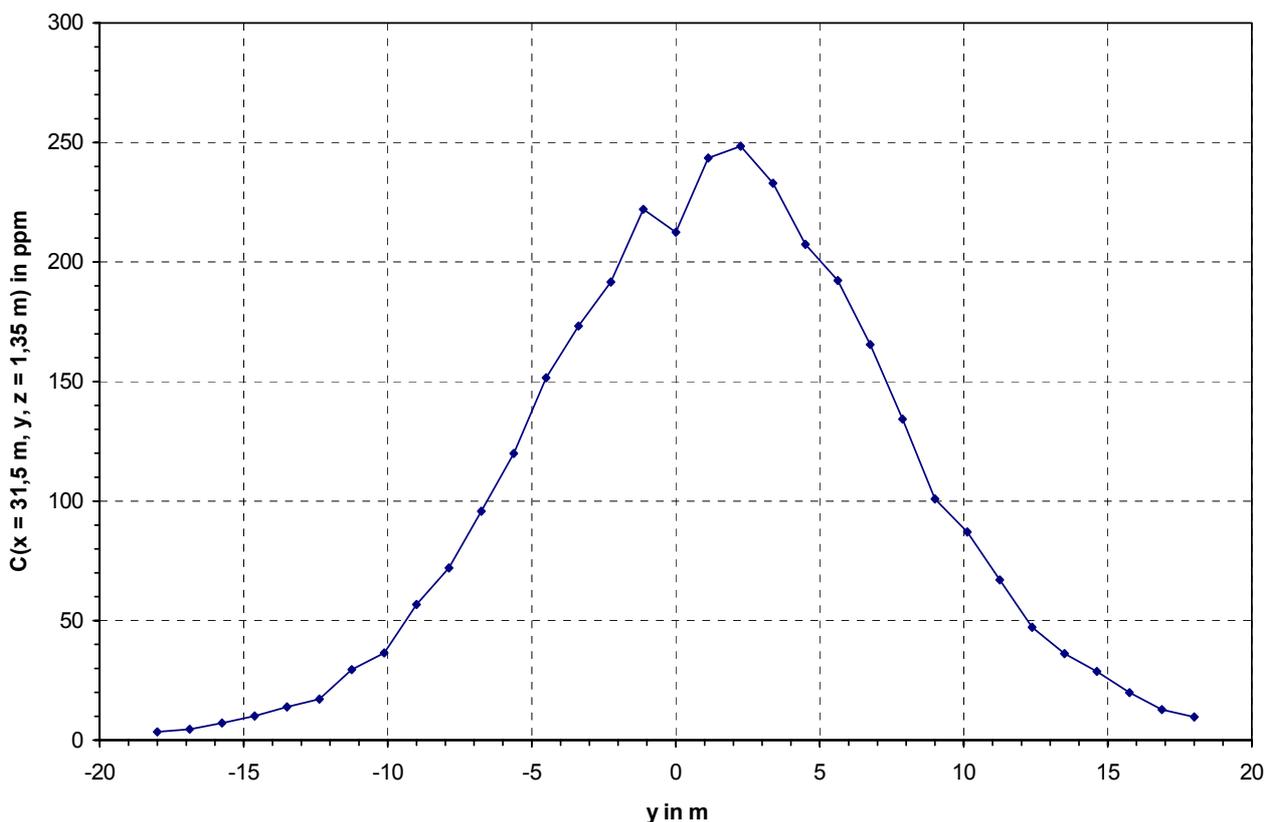
Abbildung 5: Abhängigkeit des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  von der Höhe  $z$ ; nach (30); für verschiedene Entfernungen  $x$  vom Quellpunkt



### 2.4.3 Parametrisierung von $\sigma_y$ anhand der Hamburger Windkanal-Experimente

Mit [9] wurden u.a. zum Fall der Punktquelle die in den Windkanal-Experimenten der Universität Hamburg gemessenen Schadstoffkonzentrationsverteilungen in Bodennähe ( $z = 1,35$  m) übermittelt. Für fünf Entfernungen vom Quellpunkt,  $x = \{31,5$  m;  $121,5$  m;  $225$  m;  $423$  m;  $702$  m $\}$  wurde die laterale Konzentrationsverteilung gemessen (Anmerkung: Die obigen Koordinaten beziehen sich auf die natürliche Skala.) In Abbildung 6 ist zur Veranschaulichung die für  $x = 31,5$  m gemessene Verteilung der Schadstoffkonzentration dargestellt (nach Abzug des Untergrundwertes).

Abbildung 6: Darstellung der lateralen Verteilung der Schadstoffkonzentration in Bodennähe ( $z = 1,35$  m) für die Entfernung  $x = 31,5$  m von der Punktquelle nach den Windkanal-Experimenten der Universität Hamburg (Daten aus [9])



Aus Abbildung 6 ist ersichtlich, daß die laterale Verteilung in etwa einer Gaußverteilung entspricht. Dies bestätigt den im Rahmen unseres K-Modells mit (3) vorgenommenen Ansatz.

Der horizontale Ausbreitungsparameter  $\sigma_y(x)$  kann nun auf einfache Weise aus den Meßwerten der Windkanal-Experimente bestimmt werden, indem die Abhängigkeit des natürlichen Logarithmus der Meßwerte von  $y$  ausgewertet wird. Durch Berechnung des Logarithmus der Gleichung (3) erhält man hierzu die folgende Beziehung:

$$\ln(C) = a + b \cdot y + c \cdot y^2 \quad (32)$$

mit

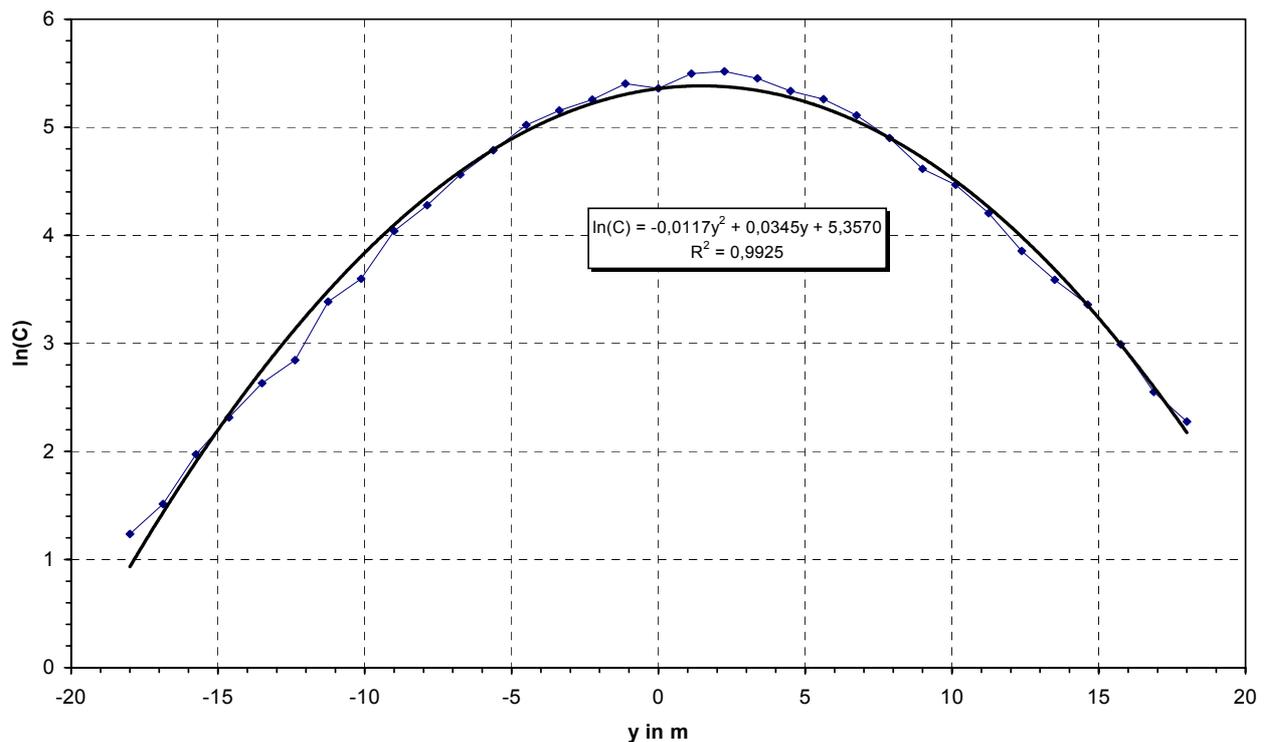
$$a = \ln\left(\frac{C_q(x,z)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y}\right) - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2}, \quad (32.a)$$

$$b = \frac{y_0}{\sigma_y^2}, \quad (32.b)$$

$$c = \frac{-1}{2\sigma_y^2}. \quad (32.c)$$

Die Konstanten  $a$ ,  $b$  und  $c$  aus (32) können aus den Logarithmen der Meßwerte mittels polynomialer Regression 2. Ordnung gewonnen werden. Aus den so für  $b$  und  $c$  ermittelten Werten ergeben sich für den betrachteten Abstand  $x$  vom Quellpunkt die Werte des Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  sowie der Ablenkung  $y_0$  der Abwetterfahne von der zentralen Achse. Die Ermittlung des Polynoms (32) ist für die in Abbildung 6 dargestellte laterale Verteilung aus Abbildung 7 ersichtlich.

Abbildung 7: Darstellung des Logarithmus der Verteilung der Schadstoffkonzentration aus Abbildung 6 und Berechnung der Parameter der Regressionsgleichung (32)



Der nahe bei 1 liegende Wert des Bestimmtheitsmaßes ( $R^2 = 0,9925$ ) bestätigt die gute Qualität der Anpassung an die Verteilung (3). Aus den in Abbildung 7 angegebenen Werten der Konstanten  $b$  und  $c$  erhält man für den Abstand  $x = 31,5$  m (zur Höhe  $z = 1,35$  m) gemäß (32.b) und (32.c):

$$\sigma_y = 1/\sqrt{-2c} = 1/\sqrt{0,234} \text{ m} = 6,5 \text{ m} \quad \text{sowie} \quad y_0 = b \cdot \sigma_y^2 = 0,0345 \cdot 6,5^2 \text{ m} = 1,5 \text{ m}.$$

In Tabelle 2 sind für die o.g. fünf Abstände  $x$  von der Punktquelle, für die nach [9] Messungen zur lateralen Verteilung der Abwetterfahne in Bodennähe erfolgten, die Ergebnisse der Berechnung des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y(x)$ , die oben am Beispiel  $x = 31,5$  m erläutert wurden, zusammengefaßt.

Tabelle 2: Berechnung von  $\sigma_y$  aus den Ergebnissen der Windkanalversuche (Punktquelle, Meßwerte aus [9] für "Lateralprofile";  $z = 1,35$  m) für verschiedene Abstände  $x$  von der Quelle

<b>x in m</b>	<b>31,5</b>	<b>121,5</b>	<b>225</b>	<b>423</b>	<b>702</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9925	0,9978	0,9946	0,9860	0,9862
<b>b in m<sup>-1</sup></b>	$3,445 \cdot 10^{-2}$	$8,043 \cdot 10^{-3}$	$3,964 \cdot 10^{-3}$	$1,428 \cdot 10^{-3}$	$1,309 \cdot 10^{-3}$
<b>c in m<sup>-2</sup></b>	$-1,174 \cdot 10^{-2}$	$-1,564 \cdot 10^{-3}$	$-6,382 \cdot 10^{-4}$	$-2,996 \cdot 10^{-4}$	$-1,573 \cdot 10^{-4}$
<b><math>\sigma_y</math> in m</b>	<b>6,5</b>	<b>17,9</b>	<b>28,0</b>	<b>40,9</b>	<b>56,4</b>
<b><math>y_0</math> in m</b>	1,5	2,6	3,1	2,4	4,2

Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, daß die gemäß (32) durchgeführte Anpassung der lateralen Verteilung aus (3) an die Messergebnisse der Hamburger Windkanal-Experimente eine hohe Qualität aufweist (durchgehend nahe bei 1 liegende Werte von  $R^2$ ). Die Abweichungen  $y_0$  der Abwetterfahne von der zentralen Achse sind als geringfügig anzusehen.

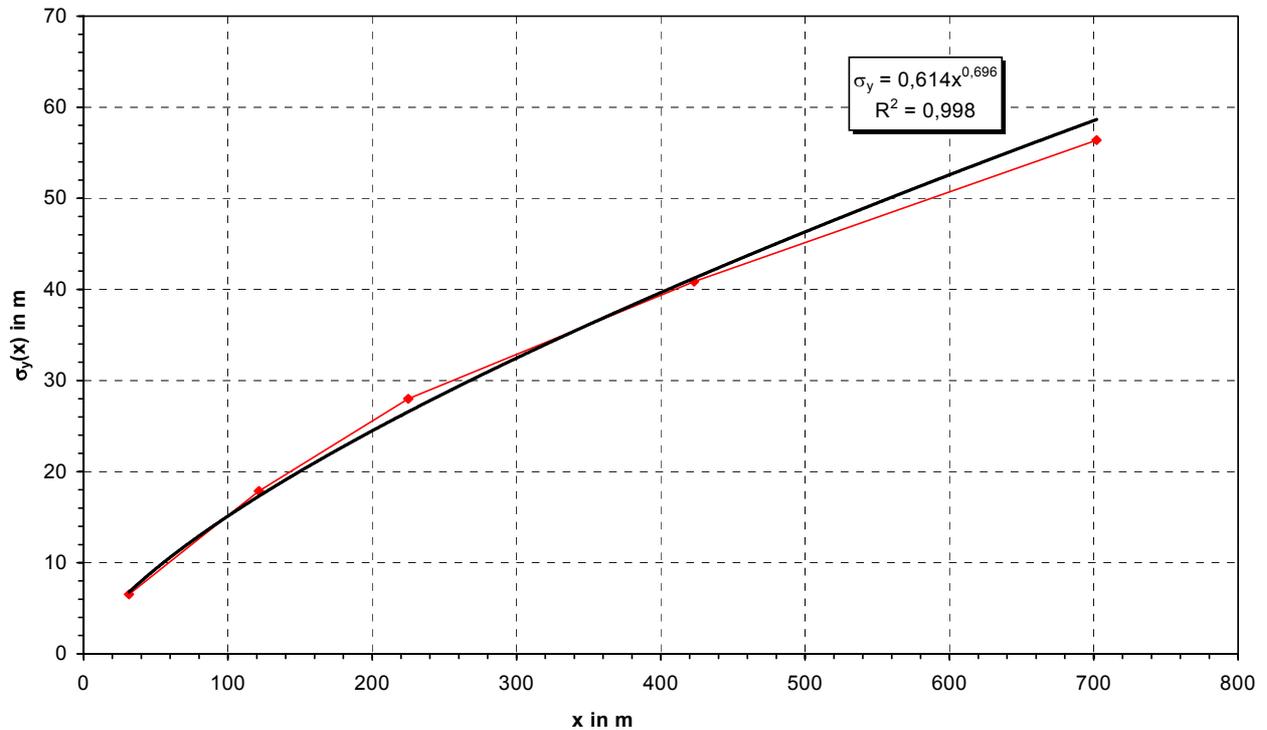
Aus den für fünf Abstände vom Quellpunkt ermittelten Werten für  $\sigma_y(x)$  können die Parameter  $p_y$  und  $q_y$  des Potenzansatzes (25) bestimmt werden (siehe Abbildung 8):

$$p_y = 0,614 \text{ m}, \quad q_y = 0,696 \quad (\text{für } z = 1,35 \text{ m}). \quad (33)$$

Wie aus Abbildung 8 ersichtlich, kann die Abhängigkeit des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  vom Abstand  $x$  zur Quelle für die aus den aktuellen Windkanal-Experimenten der Universität Hamburg für den bodennahen Bereich vorliegenden Meßergebnisse mit hoher Genauigkeit durch den Potenzansatz (25) approximiert werden; das Bestimmtheitsmaß liegt mit  $R^2 = 0,998$  sehr nahe beim idealen Wert 1.

Zur Entfernung  $x = 225$  m wurde bei den Hamburger Windkanal-Experimenten die laterale Verteilung der Konzentration für die Höhen  $z = \{1,35 \text{ m}; 5,85 \text{ m}; 14,85 \text{ m}; 28,35 \text{ m}; 46,35 \text{ m}\}$  gemessen. Mit diesen Ergebnissen kann beurteilt werden, ob der horizontale Ausbreitungsparameter  $\sigma_y(x)$  in einem erheblichem Maße von der Höhe  $z$  abhängt, wie nach Abbildung 5 anzunehmen wäre, was unsere dbzgl. Annahme in Abschnitt 2.1 in Frage stellen würde.

Abbildung 8: Abhängigkeit des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  vom Abstand  $x$  zur Punktquelle im bodennahen Bereich ( $z = 1,35$  m); gemäß Tabelle 2



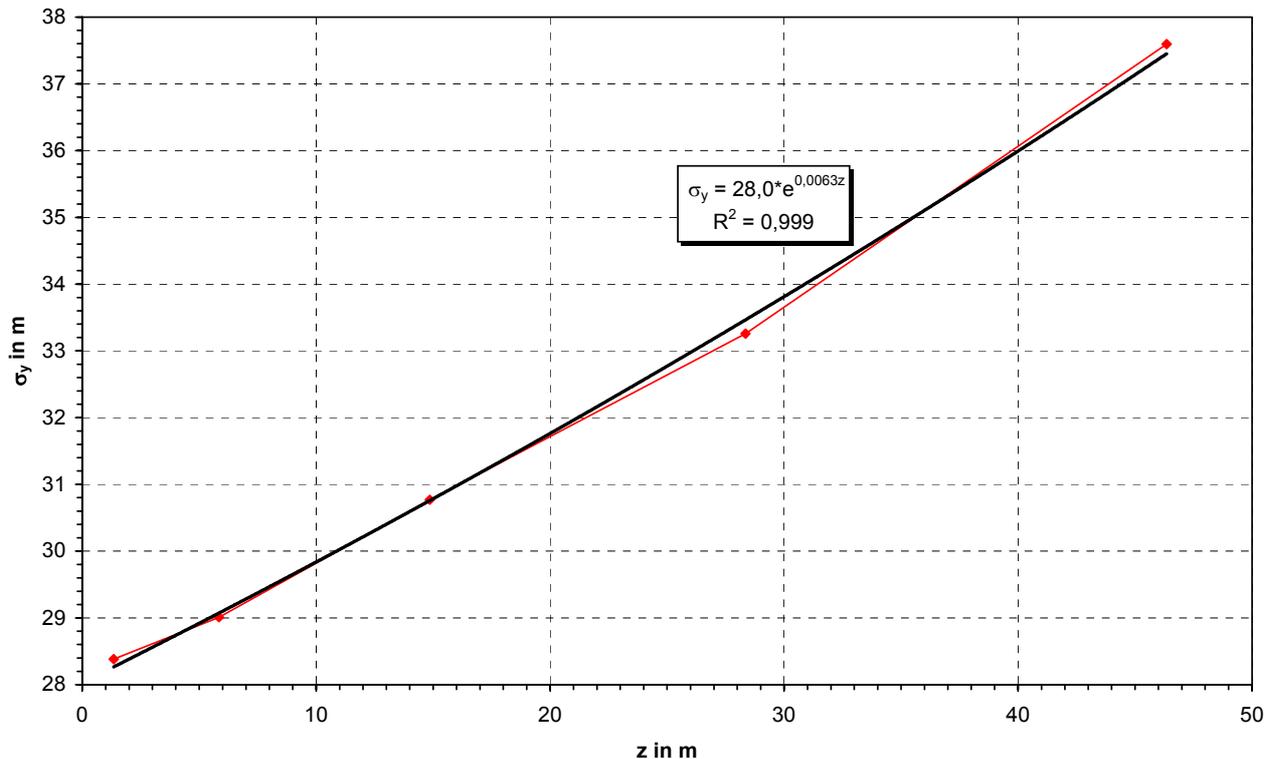
In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die für  $x = 225$  m aus den Meßergebnissen von [9] für den Fall der Punktquelle berechneten Werte des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  aufgeführt. Analog zur Tabelle 2 sind relevante Parameter der polynomialen Regression (Gleichung (32)) aufgeführt. In Abbildung 9 ist die resultierende  $z$ -Abhängigkeit von  $\sigma_y$  graphisch dargestellt. Sie kann z.B. durch die folgende Exponentialfunktion gut approximiert werden:

$$\sigma_y(x; z) = \sigma_y(x) \cdot \exp[0,0063 \cdot z] . \quad (34)$$

Tabelle 3: Berechnung von  $\sigma_y$  aus den Ergebnissen der Windkanalversuche (Punktquelle, Meßwerte aus [9] für "Lateralebene";  $x = 225$  m) für verschiedene Höhen  $z$

<b>z in m</b>	<b>1,35</b>	<b>5,85</b>	<b>14,85</b>	<b>28,35</b>	<b>46,35</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9963	0,9946	0,9918	0,9952	0,9476
<b>b in m<sup>-1</sup></b>	$2,568 \cdot 10^{-3}$	$3,724 \cdot 10^{-3}$	$3,787 \cdot 10^{-3}$	$3,440 \cdot 10^{-3}$	$3,979 \cdot 10^{-3}$
<b>c in m<sup>-2</sup></b>	$-6,206 \cdot 10^{-4}$	$-5,941 \cdot 10^{-4}$	$-5,281 \cdot 10^{-4}$	$-4,520 \cdot 10^{-4}$	$-3,538 \cdot 10^{-4}$
<b><math>\sigma_y</math> in m</b>	<b>28,4</b>	<b>29,0</b>	<b>30,8</b>	<b>33,3</b>	<b>37,6</b>
<b>y<sub>0</sub> in m</b>	2,1	3,1	3,6	3,8	5,6

Abbildung 9: Abhängigkeit des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  von der Höhe  $z$  bei einem Abstand von  $x = 225$  m zur Punktquelle; gemäß Tabelle 3



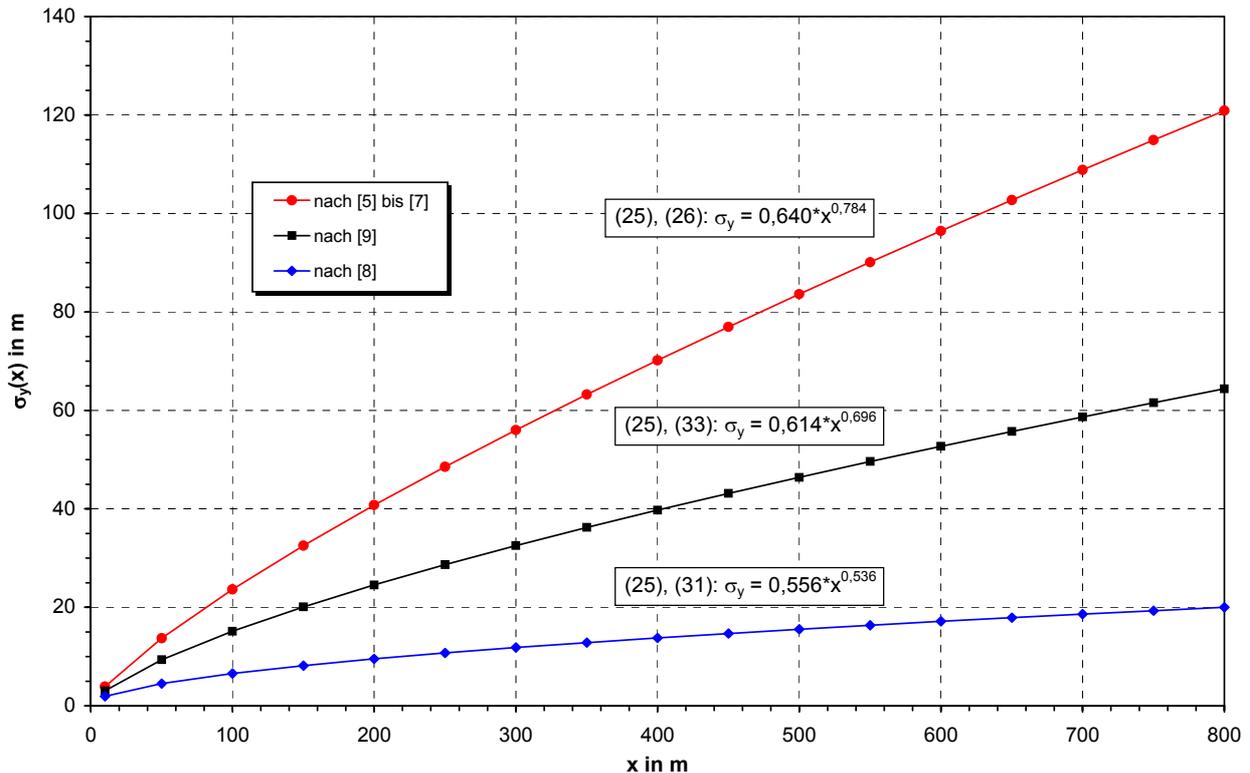
Aus Abbildung 9 ist ersichtlich, daß die Abhängigkeit des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  von der Höhe  $z$  nach den hierzu aus den Hamburger Windkanal-Experimenten vorliegenden Daten für den Höhenbereich, der die Schadstoffkonzentration in Bodennähe merklich beeinflusst, relativ schwach ist. Bis zur untersuchten Höhe von 50 m vergrößert sich  $\sigma_y$  um ca. 10 % pro 15 m.

#### 2.4.4 Vergleich der untersuchten $\sigma_y$ -Parametrisierungen

Die Abbildung 10 zeigt eine Gegenüberstellung der in den Abschnitten 2.4.1 bis 2.4.3 erläuterten Parametrisierungen des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y(x)$  in Bodennähe ( $z \cong 1,5$  m). Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, daß die der Literatur entnommenen Parametrisierungen für die horizontale turbulente Diffusion (obere Kurve nach [5] bis [7], untere Kurve nach [8]) erheblich voneinander abweichen. Aus unserer Sicht ist davon auszugehen, daß ähnliche Unsicherheiten auch zur vertikalen Diffusion bestehen, da empirische Anpassungen jeweils für konkrete Meßergebnisse vorgenommen werden, die natürlich von den spezifischen Versuchsbedingungen beeinflusst werden.

Die aus den Meßergebnissen der Hamburger Windkanal-Experimente abgeleitete Parametrisierung (33) liegt etwa in der Mitte zwischen den beiden "Literatur-Kurven" mit den Parametern (26) bzw. (31). Für die nachfolgenden Berechnungen in Kapitel 3 des vorliegenden Berichts wird die aus [9] abgeleitete Parametrisierung (33) genutzt.

Abbildung 10: Gegenüberstellung der in den Abschnitten 2.4.1 bis 2.4.3 erläuterten Parametrisierungen des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y(x)$  nach Gleichung (25); in Bodennähe ( $z \cong 1,5$  m)



Während nach [5] bis [7] für  $z \leq 50$  m keine Höhenabhängigkeit des Ausbreitungsparameters  $\sigma_y(x)$  zu berücksichtigen ist, resultiert nach [8] ein relativ starker Anstieg von  $\sigma_y$  in der bodennahen Schicht mit der Höhe  $z$  (siehe Abbildung 5). Für den in [9] untersuchten Abstand vom Quellpunkt von  $x = 225$  m ergibt sich z.B. nach [8] ein Anstieg von  $\sigma_y$  von ca. 10 m für  $z = 1,5$  m auf ca. 18 m für  $z = 15$ ; dies entspricht einer relativen Änderung von 80 %. Nach den Ergebnissen der aktuellen Hamburger Windkanal-Experimente ergibt sich für diese beiden Höhen dagegen nur eine relative Änderung von ca. 9 % (Anstieg von ca. 28,3 m für  $z = 1,5$  m auf ca. 30,8 m für  $z = 15$ ). Auch dies verdeutlicht u.E., daß die in [8] empfohlene Parametrisierung der turbulenten Diffusion erhebliche Unsicherheiten aufweisen dürfte.

Die schwache Abhängigkeit des gemäß [9] berechneten horizontalen Ausbreitungsparameters von der Höhe rechtfertigt aus unserer Sicht - im Rahmen der ohnehin bestehenden Unsicherheiten - die in Abschnitt 2.1 zur Vereinfachung der 3-dimensionalen Diffusions-Advektions-Gleichung (2) getroffene Annahme, daß der Diffusionskoeffizient  $K_y$  nicht nur unabhängig von  $y$  ist, sondern näherungsweise auch als unabhängig von der Höhe  $z$  betrachtet werden kann. Die nach diesem Ansatz resultierende Darstellung (3), wobei die querwindintegrierte Konzentration  $C_q(x,z)$  mit der 2-dimensionalen Diffusions-Advektions-Gleichung (6) berechnet werden kann, stellt somit eine sinnvolle Näherung dar.

### **3 BERECHNUNGEN MIT DEM K-MODELL FÜR NEUTRALE SCHICHTUNG**

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der im Rahmen des Vorhabens StSch 4270 zum Vergleich unterschiedlicher Ausbreitungsmodelle mit dem in Kapitel 2 erläuterten K-Modell durchgeführten Berechnungen dargestellt. In **Abschnitt 3.1** werden zunächst einige Anmerkungen zur Lösung der Diffusions-Advektions-Gleichung (6) gegeben. Der **Abschnitt 3.2** enthält eine kurze Darstellung der gemäß [10] und [11] untersuchten Quellen, weiterer Randbedingungen sowie Abstimmungen zur Darstellung der Ergebnisse. Der **Abschnitt 3.3** enthält die Ergebnisse der mit dem K-Modell berechneten Konzentrationsverteilungen. In **Abschnitt 3.4** werden entsprechend [11] mit Hilfe der Diffusions-Advektions-Gleichung (6) berechnete querwindintegrierte Konzentrationen dargestellt, die sich bei Ansatz der Parametrisierung (22) für den vertikalen Diffusionskoeffizienten  $K_z$  ergeben, die dem auf [8] basierenden Ausbreitungsmodell der GRS entspricht.

#### **3.1 Anmerkungen zur numerischen Lösung der Diffusions-Advektions-Gleichung**

Zur Lösung der Diffusions-Advektions-Gleichung (6) mit den höhenabhängigen Parametern  $K_z(z)$  und  $u(z)$  wurde ein implizites, massenkonsistentes Differenzschema verwendet. Das Schema ist unbedingt stabil und hält für jeden Rechenschritt in allen Gitterzellen die Schadstoffbilanz ein. Die Reflexion der Abwetterfahne am Boden wird durch eine dbzgl. Randbedingung beschrieben.

Die Schadstoffquelle kann durch eine Anfangsbedingung bei  $x = 0$  (für beliebige Höhen) oder durch eine Randbedingung bei  $z = 0$  (für Bodenemissionen) simuliert werden.

Für die Ausbreitungsrechnungen wurden Gitterschrittweiten in vertikaler Richtung von 1 bis 5 m und in der Windausbreitungsrichtung von 5 bis 50 m untersucht. Für Ausbreitungsrechnungen über große Entfernungen sind Gitterschrittweiten bis  $\Delta z = 3$  m und  $\Delta x = 50$  m geeignet, um eine hohe numerische Genauigkeit zu erreichen. Für das vorliegende Kapitel wurden kleinere Gitterschritte von  $\Delta z = 1$  m und  $\Delta x = 10$  m verwendet, um die Vorgaben von [10] und [11] zu erfüllen.

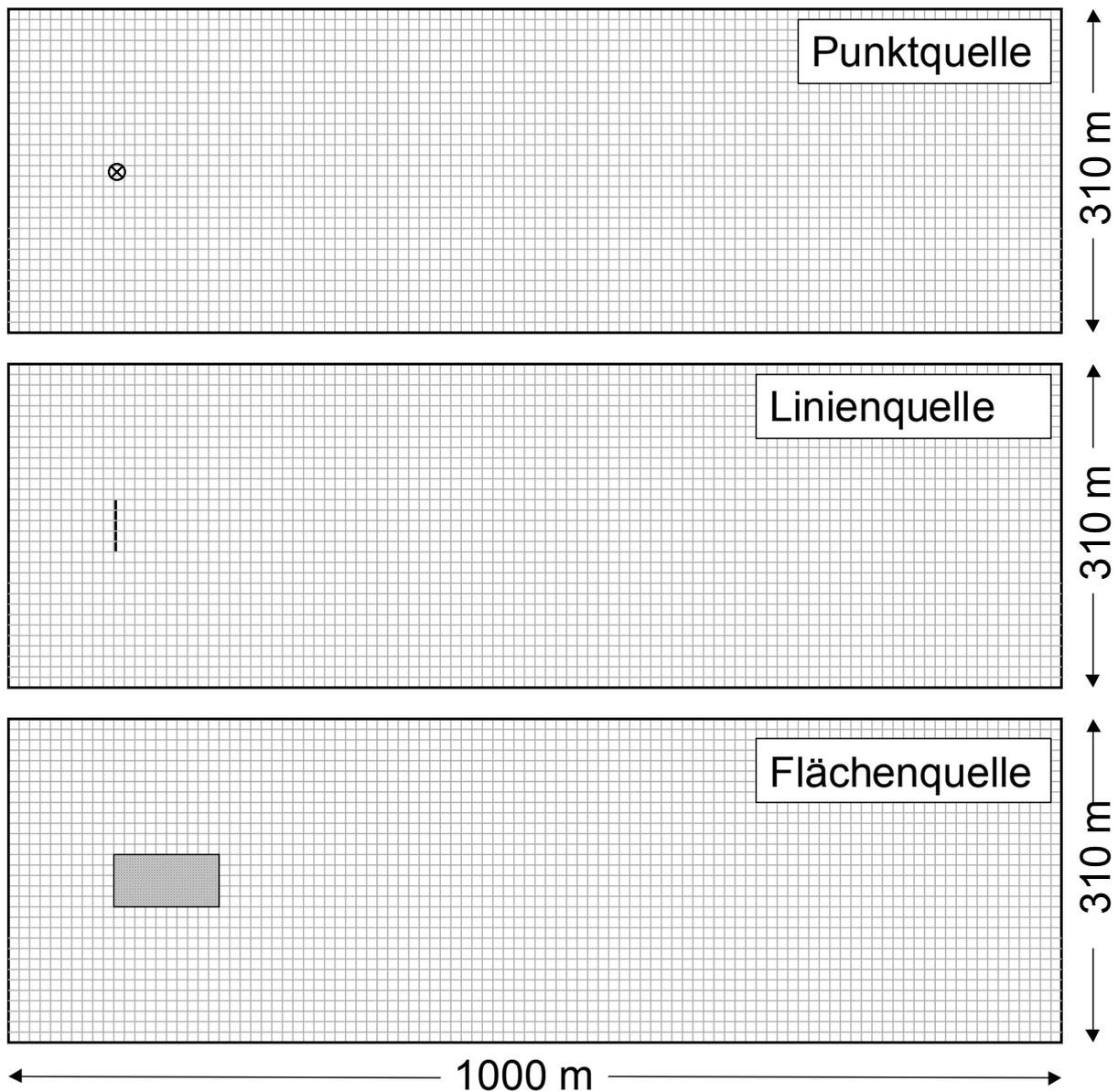
#### **3.2 Randbedingungen der Modellrechnungen und Vorgaben zur Ergebnisdarstellung**

Gemäß [10] erfolgten die Modellrechnungen für drei verschiedenartige bodennahe Radonquellen, für die jeweils eine Emissionsrate von  $Q = 10$  kBq/s angenommen wurde:

- Punktquelle;
- Linienquelle mit einer Länge von 50 m quer zur Windrichtung;
- Flächenquelle mit einer Breite von 50 m quer zur und einer Länge von 100 m in Windrichtung.

Das Rechengebiet und die Lage der Quellen ist in Abbildung 11 (aus [10] entnommen) dargestellt. Im Ergebnis der Projektgespräche (siehe [11]) wurden zur "Größe der Punktquelle" und zur "Breite der Linienquelle" noch genauere Festlegungen getroffen, die jedoch für unsere Berechnungen nicht maßgeblich sind, da diese beiden Quellen im Rahmen des Differenzschemas mit den festgelegten Gitterschritten von  $\Delta x = \Delta y = 10$  m einer Gitterzelle für die Punktquelle bzw. fünf Gitterzellen für die Linienquelle zugeordnet werden.

Abbildung 11: Rechengebiet und Lage der Quellen (aus [10])



Das Rechengebiet mit einer Breite von 310 m und einer Länge von 1000 m wurde entsprechend den Gegebenheiten der Hamburger Windkanal-Experimente festgelegt. Die Quellen wurden hier jeweils nach einer Einlaufstrecke von 100 m angeordnet, wie aus Abbildung 11 ersichtlich.

Die Rechnungen für den Modellvergleich betreffen nur eine neutrale atmosphärische Schichtung (AK:  $k = 3$  bzw. III<sub>1</sub> nach KLUG-MANIER oder Diffusionskategorie D nach PASQUILL-GIFFORD).

Den Ausbreitungsrechnungen für den Modellvergleich liegen folgende Parameter zur Berechnung des logarithmischen Profils der Windgeschwindigkeit nach den Gleichungen (7) bis (9) sowie des Vertikalprofils der Diffusionskonstante nach den Gleichungen (12) bis (14) zugrunde:

- aerodynamische Rauigkeitslänge:  $z_0 = 0,1 \text{ m}$ ;
- "Anemometerhöhe"  $z_a = 10 \text{ m}$ ;
- Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe:  $u_a \equiv u_{10} = \{1 \text{ m/s}; 2 \text{ m/s}; 5 \text{ m/s}\}$ ;
- KARMAN-Konstante:  $\kappa = 0,35$ ;
- MONIN-OBUKHOV-Länge:  $L = 5000 \text{ m}$ ;
- CORIOLIS-Parameter:  $f_c = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ;
- Höhe der Mischungsschicht:  $H_m = 800 \text{ m}$ ;

Für den nach Gleichung (3) zur Berechnung der lateralen Verteilung relevanten horizontalen Ausbreitungsparameter  $\sigma_y(x)$  verwenden wir den Potenzansatz (25) mit der Parametrisierung (33).

Die Ergebnisse der Modellrechnungen werden als normierte Konzentrationsverteilungen  $C \cdot u_{10}/Q$  dargestellt, so daß die Wahl der Emissionsrate  $Q$  unerheblich ist ( $C \sim Q$ ). Durch die Multiplikation mit  $u_{10}$  ist in den Modellen, die eine strenge Proportionalität bzgl.  $1/u_{10}$  aufweisen (vgl. Abschnitt 2.3.4), für die drei o.g. Fälle zur Windgeschwindigkeit  $u_{10}$  nur eine Darstellung erforderlich. Im Rahmen unseres K-Modells resultieren jedoch entsprechend der nicht-linearen Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten  $K_z$  von der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  (bzw. von  $u_{10}$ ) für die drei o.g.  $u_{10}$ -Werte unterschiedliche Konzentrationsverteilungen.

Die (normierten) Konzentrationsverteilungen werden entsprechend der zum 3. Projektgespräch getroffenen Vereinbarung (siehe [11]) in folgender Form dargestellt:

- Konzentration unter der Fahnenachse in Bodennähe:  $C(x, y = 0, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$ ;
- querwindintegrierte Konzentration in Bodennähe:  $C_q(x, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$ ;
- horizontale Konzentrationsverteilung in Bodennähe:  $C(x, y, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$ ;
- vertikale querwindintegrierte Konzentrationsverteilung:  $C_q(x, z) \cdot u_{10}/Q$ .

### **3.3 Darstellung der mit dem K-Modell berechneten Konzentrationsverteilungen**

Nachfolgend werden entsprechend den Erläuterungen von Abschnitt 3.2 die mit unserem K-Modell berechneten (normierten) Radonkonzentrationen dargestellt. Der **Abschnitt 3.3.1** enthält die Ergebnisse für die Punktquelle. Der **Abschnitt 3.3.2** enthält die Ergebnisse für die Linienquelle, für die jedoch eine Darstellung der querwindintegrierten Konzentrationen  $C_q(x, z)$  nicht erforderlich ist, weil diese mit den Ergebnissen für die Punktquelle übereinstimmen. Für die Flächenquelle sind die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen in **Abschnitt 3.3.3** dargestellt.

### 3.3.1 Punktquelle

Abbildung 12: Normierte Konzentration  $C(x, y = 0, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$  unter der Fahnenachse in Bodennähe

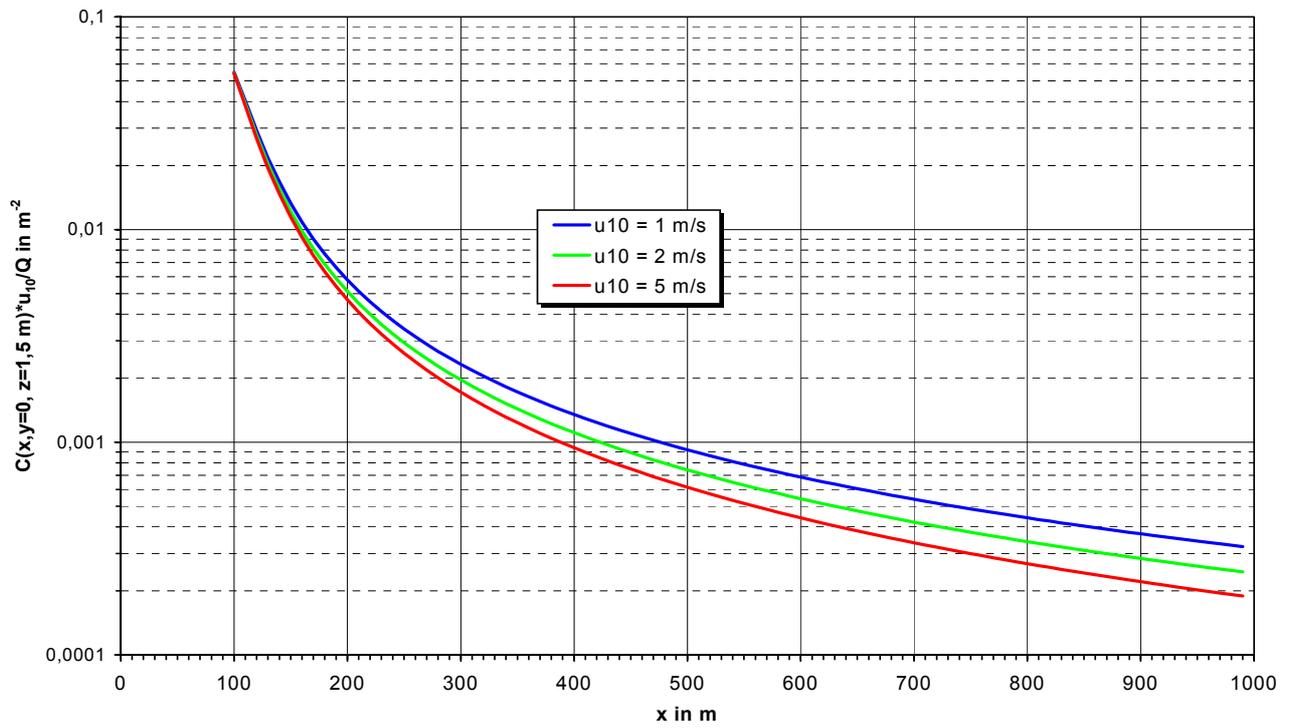


Abbildung 13: Normierte querwindintegrierte Konzentration  $C_q(x, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$  in Bodennähe

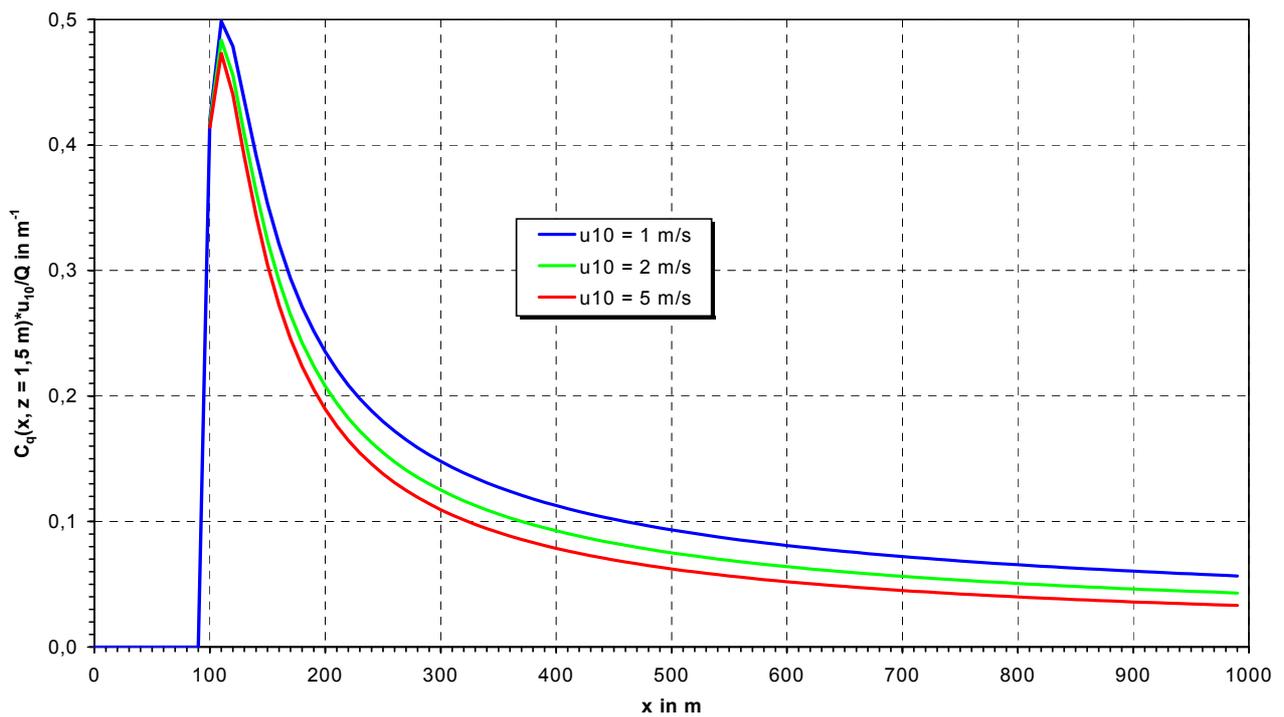


Abbildung 14: Normierte horizontale Konzentrationsverteilung in Bodennähe:  $C(x, y, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$

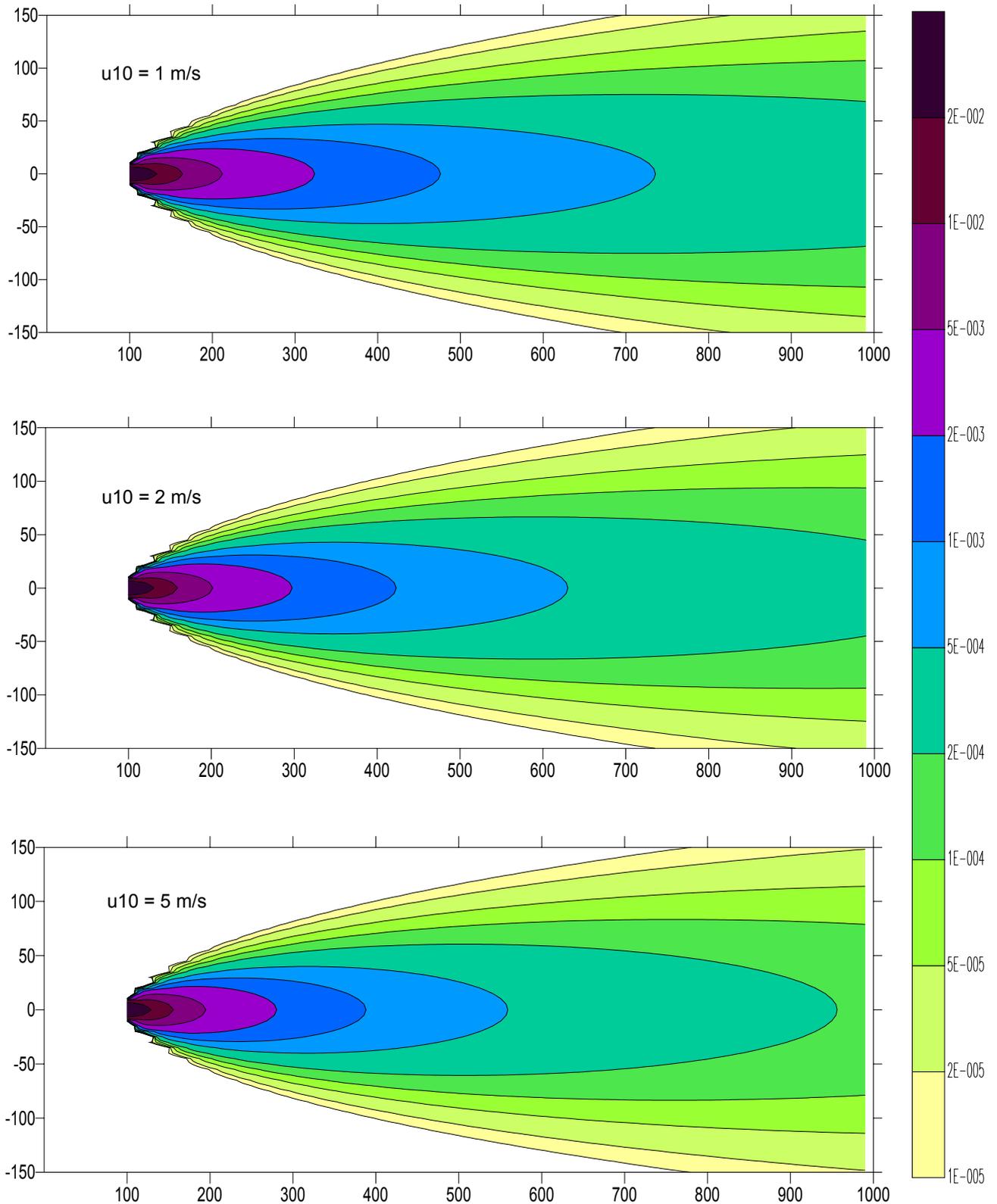
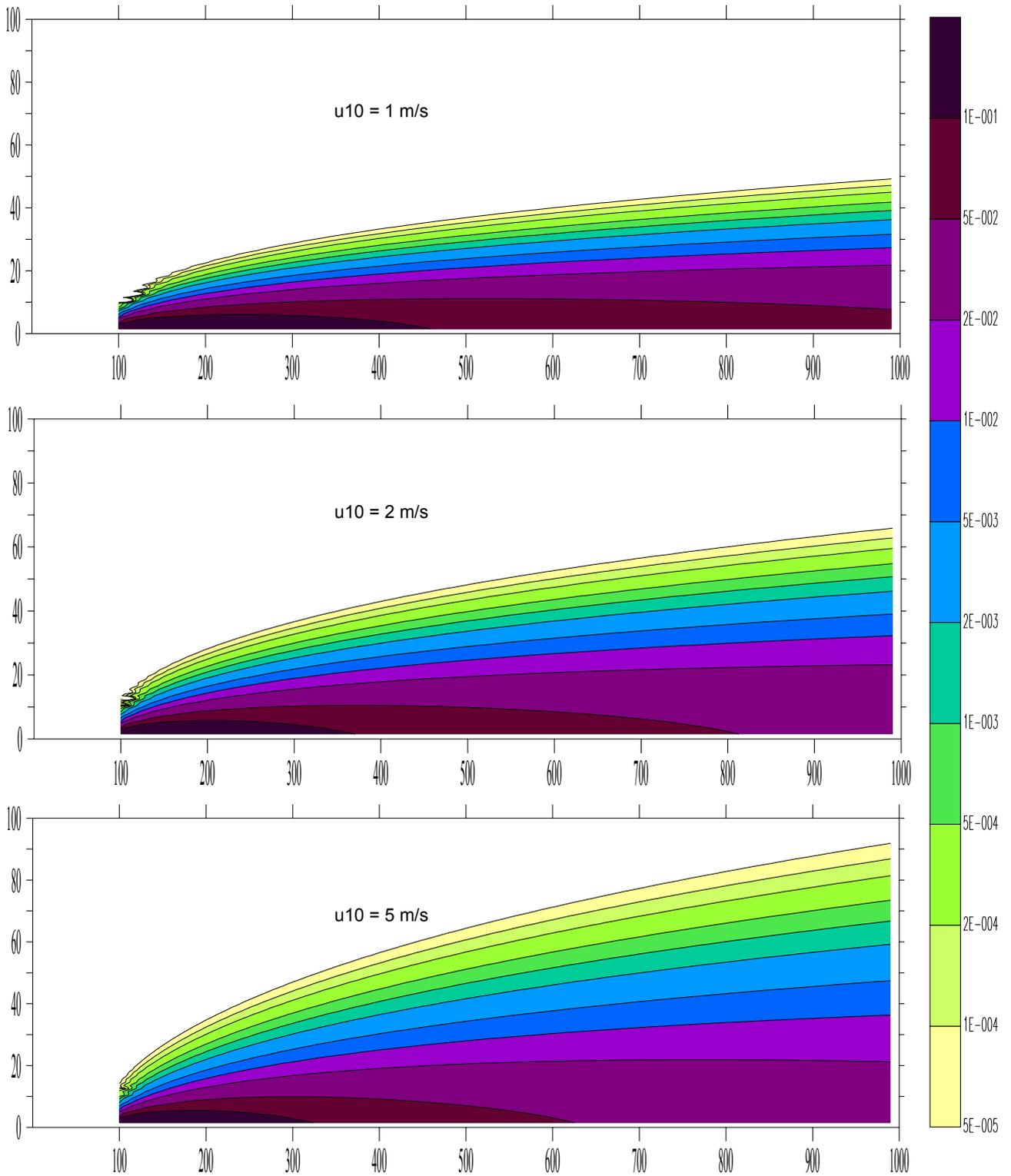


Abbildung 15: Normierte vertikale querwindintegrierte Konzentrationsverteilung:  $C_q(x, z) \cdot u_{10}/Q$



Aus den Abbildungen 12 bis 15 ist der im K-Modell bestehende Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die mit  $u_{10}$  multiplizierten Konzentrationen deutlich ersichtlich. Die Schadstoffkonzentration ist in Bodennähe stärker als nur umgekehrt proportional zur Windgeschwindigkeit  $u_{10}$ , d.h.  $C \sim 1/u_{10}^d$  mit  $d > 1$ . Die aus bodennahen Quellen resultierenden normierten Radon-Konzentrationen  $C \cdot u_{10}/Q$  werden in Bodennähe mit zunehmender Windgeschwindigkeit kleiner. Die Ursache dieses Effekts ist die aus Abbildung 2 ersichtliche überproportionale Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten  $K_z$  von der Windgeschwindigkeit. Für kleine Windgeschwindigkeiten ergeben sich damit in Bodennähe höhere Schadstoffkonzentrationen als nach anderen Modellen, die von einer linearen Abhängigkeit des vertikalen Diffusionskoeffizienten von der Windgeschwindigkeit ausgehen, zu erwarten wäre. Für große Höhen resultieren dagegen auf der Basis unseres Modells höhere Werte der normierten Konzentration bei größerer Windgeschwindigkeit (siehe Abbildung 15). Dies ist ebenfalls durch die in diesem Fall stärkere vertikale Diffusion bedingt. Diese hier für die Punktquelle diskutierten Effekte sind in analoger Weise auch aus Ergebnissen der Modellrechnungen für die Linien bzw. die Flächenquelle ersichtlich, die in den beiden nachfolgenden Abschnitten dargestellt sind.

### 3.3.2 Linienquelle

Für die Linienquelle werden keine querwindintegrierten Konzentrationen dargestellt, da diese exakt den in den Abbildungen 13 bzw. 15 für die Punktquelle dargestellten Ergebnissen entsprechen.

Abbildung 16: Normierte Konzentration  $C(x, y = 0, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$  unter der Fahnenachse in Bodennähe

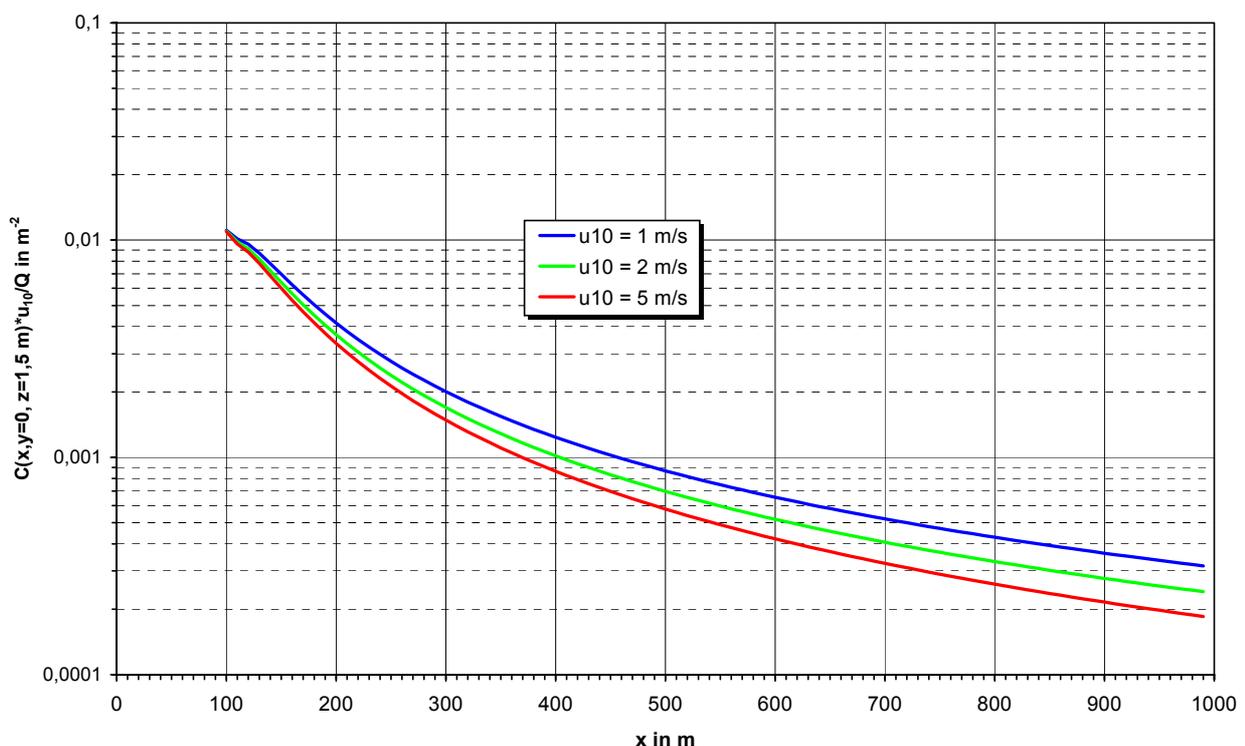
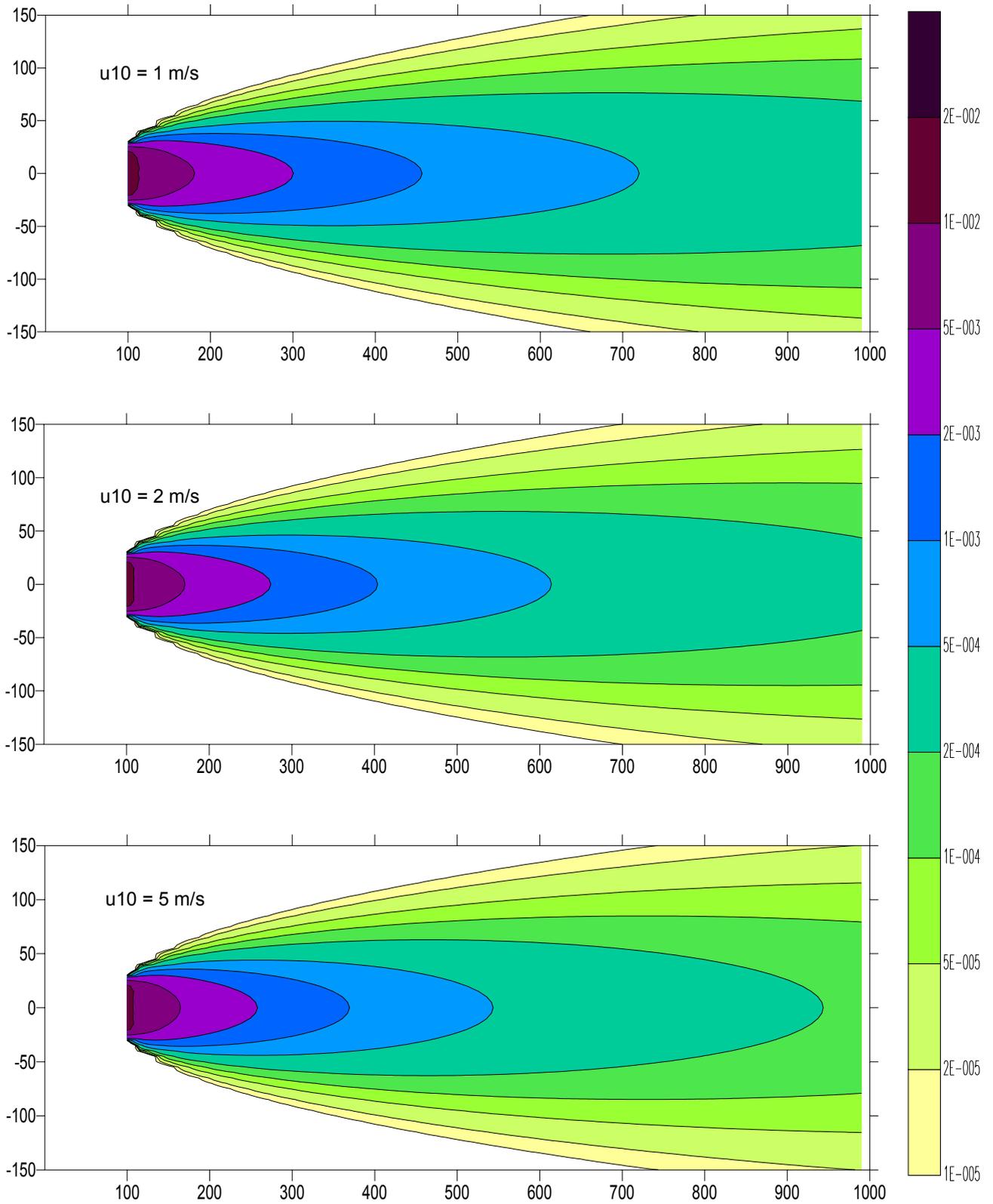


Abbildung 17: Normierte horizontale Konzentrationsverteilung in Bodennähe:  $C(x, y, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$



### 3.3.3 Flächenquelle

Abbildung 18: Normierte Konzentration  $C(x, y = 0, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$  unter der Fahnenachse in Bodennähe

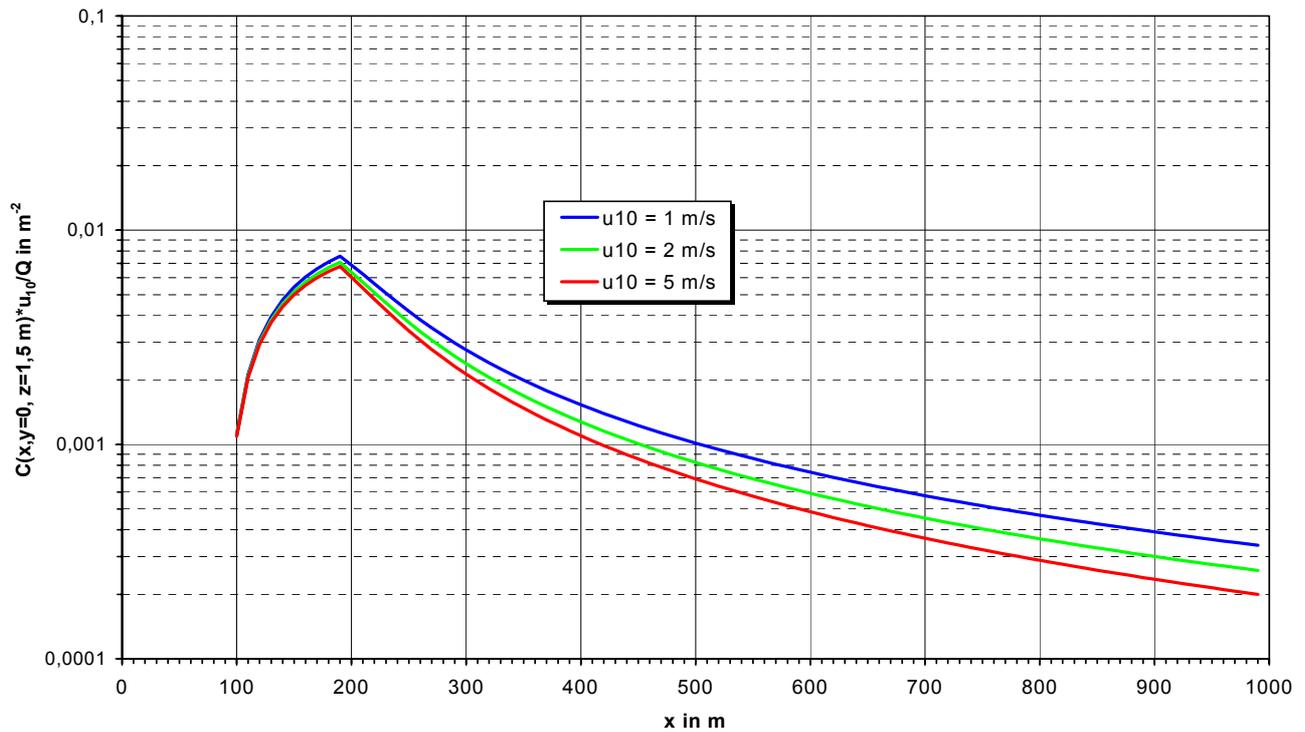


Abbildung 19: Normierte querwindintegrierte Konzentration  $C_q(x, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$  in Bodennähe

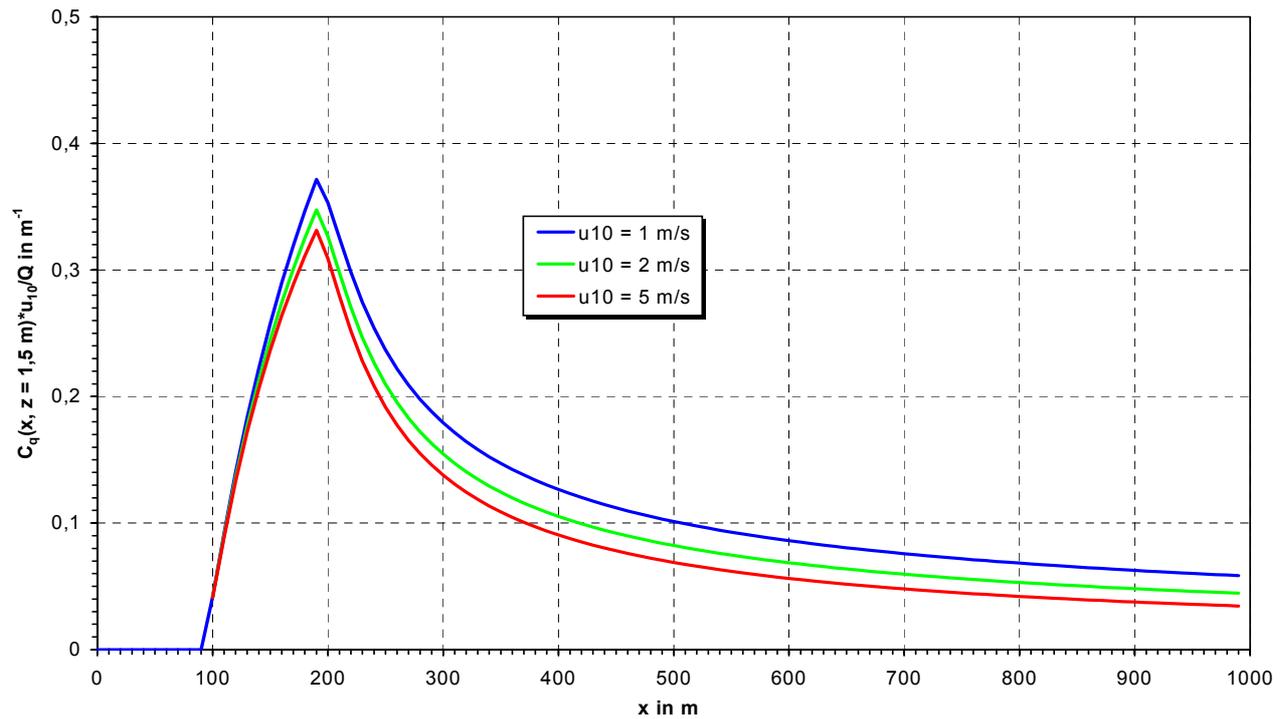


Abbildung 20: Normierte horizontale Konzentrationsverteilung in Bodennähe:  $C(x, y, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$

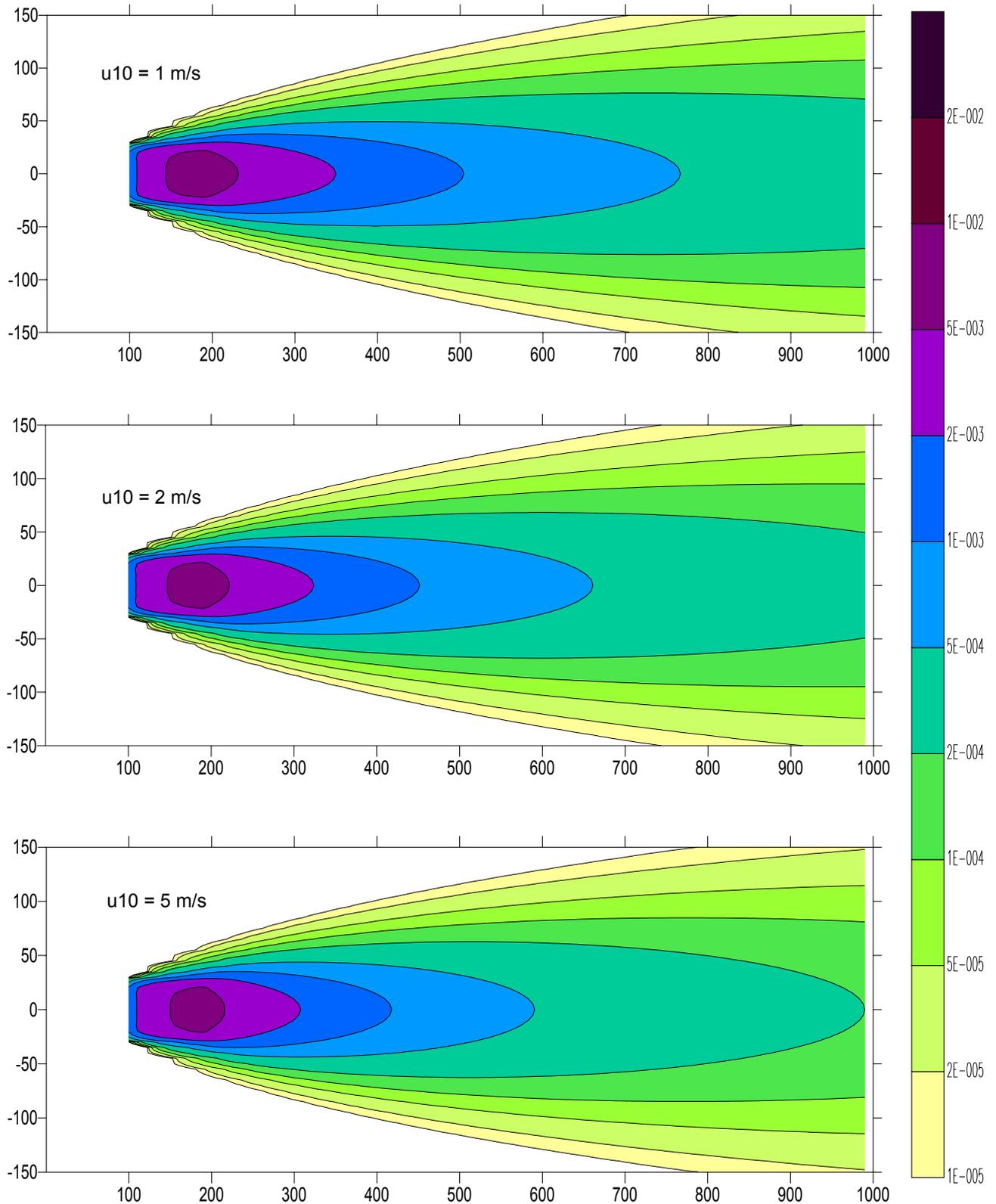
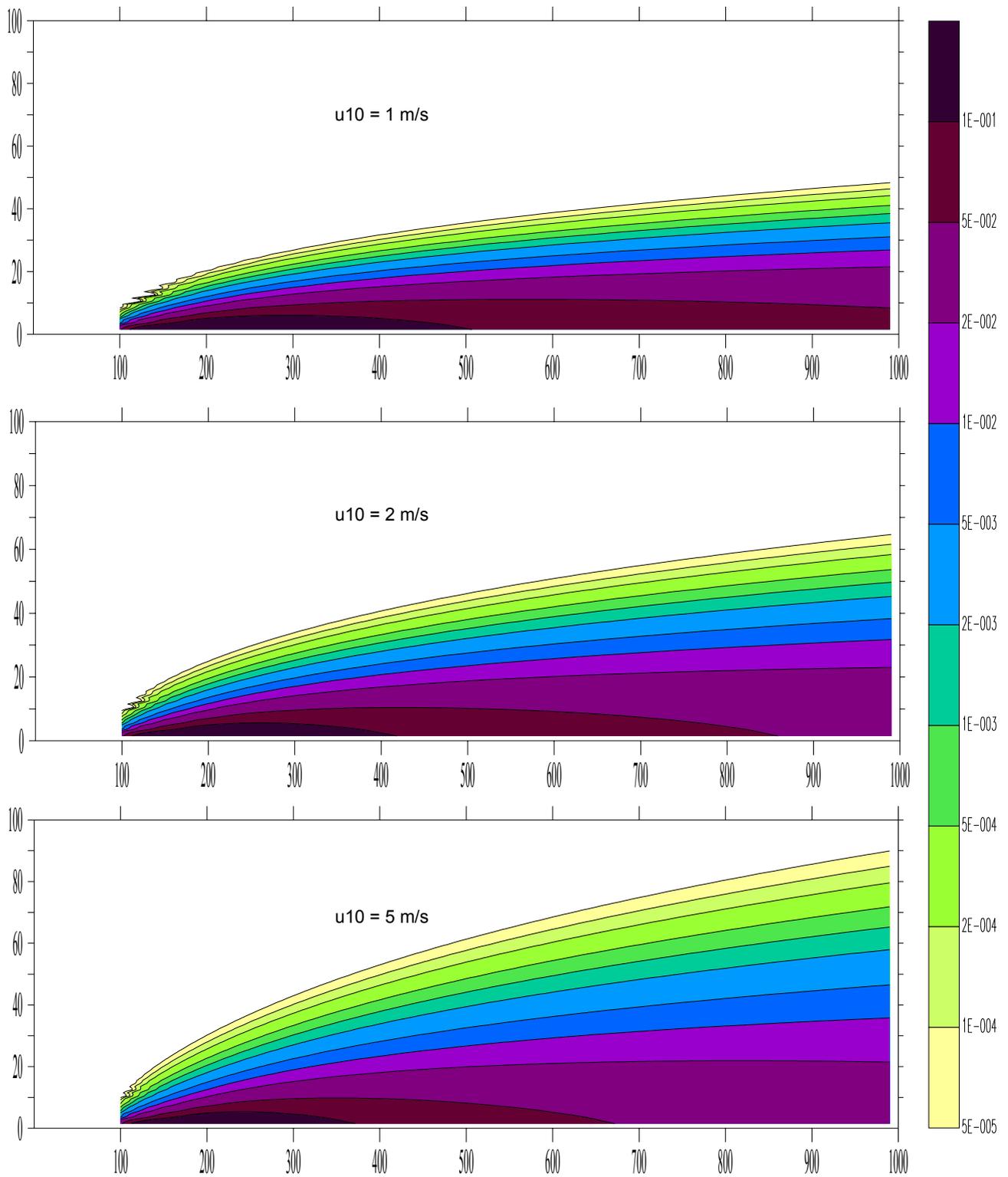


Abbildung 21: Normierte vertikale querwindintegrierte Konzentrationsverteilung:  $C_q(x, z) \cdot u_{10}/Q$

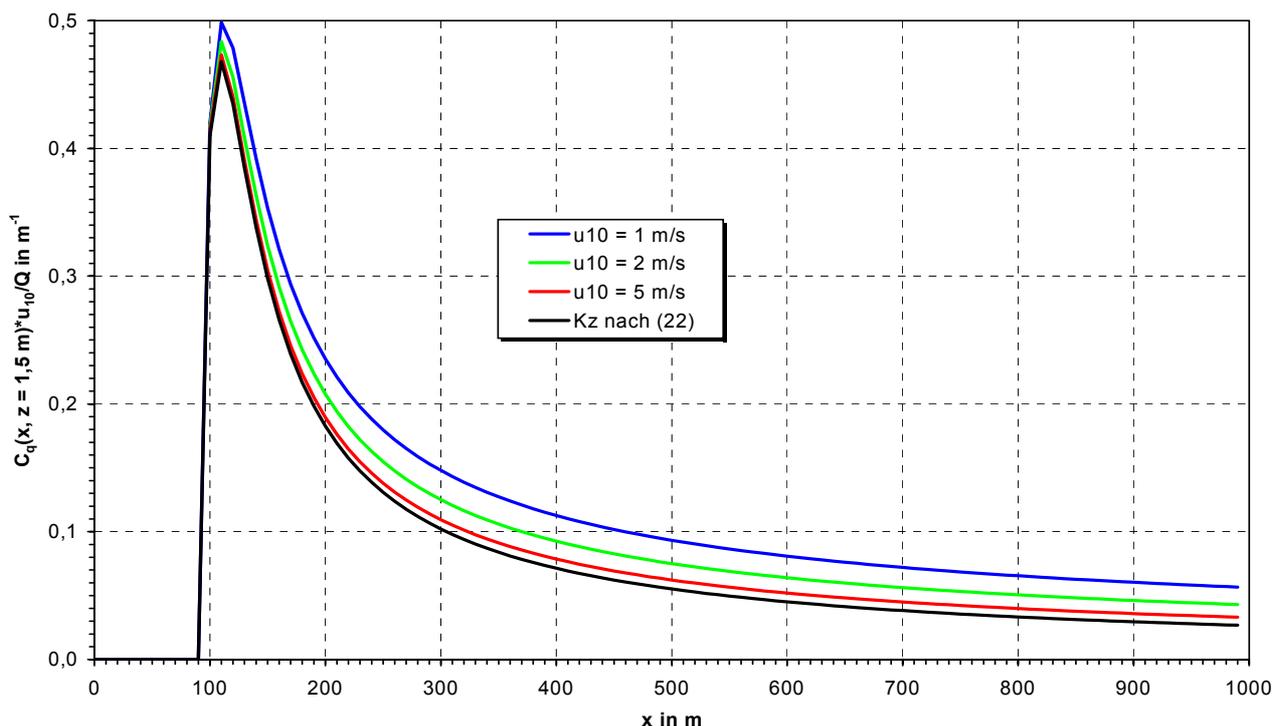


### 3.3.4 Diffusions-Advektions-Gleichung mit $K_z$ -Parametrisierung nach VDI-3783-8

Für einen quantitativen Vergleich der im Rahmen des Vorhabens StSch 4270 betrachteten Modelle zur Radonausbreitung wurde auf der 3. Projektberatung vereinbart [11], daß von uns die Lösung der Diffusions-Advektions-Gleichung (6) des EULER-Modells auch mit der von der GRS gemäß [8] verwendeten  $K_z$ -Parametrisierung untersucht wird. Für diesen Vergleich beschränken wir uns auf den Fall der Punktquelle und die Darstellung der normierten querwindintegrierten Konzentration in Bodennähe  $C_q(x, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$ .

Die Rechnungen ergaben erwartungsgemäß (vgl. Abschnitt 2.3.4), daß mit der  $K_z$ -Parametrisierung (22) gleiche normierte Konzentrationen für alle Windgeschwindigkeiten resultieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 22 den bereits in Abbildung 13 dargestellten - von  $u_{10}$  abhängigen - normierten Konzentrationen gegenübergestellt, die sich mit unserer  $K_z$ -Parametrisierung gemäß (12) bis (14) ergeben. Für die relativ große Windgeschwindigkeit von  $u_{10} = 5 \text{ m/s}$  stimmen die für die beiden  $K_z$ -Ansätze resultierenden Konzentrationen gut überein, was zur weitgehenden Übereinstimmung der Diffusionskoeffizienten im bodennahen Bereich korrespondiert (siehe Abbildung 2). Für die geringe Windgeschwindigkeit von  $u_{10} = 1 \text{ m/s}$  liefern die Berechnungen mit  $K_z$  nach [8] Konzentrationen, die mit zunehmender Entfernungen relativ deutlich unter den Werten liegen, die sich nach unserem K-Modell ergeben. Für Entfernungen von der Quelle von 50 m, 100 m, 200 m bzw. 500 m liegen mit  $u_{10} = 1 \text{ m/s}$  die entsprechenden Relationen bei 85 %, 78 %, 69 % bzw. 56 %.

Abbildung 22: Normierte querwindintegrierte Konzentration  $C_q(x, z = 1,5 \text{ m}) \cdot u_{10}/Q$  in Bodennähe für den Fall der Punktquelle; Gegenüberstellung der Lösung der Diffusions-Advektions-Gleichung (6) mit  $K_z$ -Parametrisierung nach (12) bis (14) - entspricht Abbildung 13 - mit der bei  $K_z$ -Parametrisierung nach Gleichung (22) gemäß VDI-3783-8 resultierenden Verteilung



## 4 BERECHNUNGEN FÜR REALE METEOROLOGISCHE GEGEBENHEITEN

Entsprechend einer Festlegung zum 3. Projektgespräch (siehe [11]) werden nachfolgend Ergebnisse von Radon-Ausbreitungsrechnungen für reale meteorologische Gegebenheiten dargestellt. Hierzu werden zunächst in **Abschnitt 4.1** die verwendeten meteorologischen Daten erläutert, die mit [24] an die GRS für den Modellvergleich übermittelt wurden. In **Abschnitt 4.2** werden Berechnungen für eine Punktquelle vorgenommen. Der **Abschnitt 4.3** enthält Radon-Ausbreitungsrechnungen für die ehemalige Bergehalde Crossen. Hierzu erfolgt ein Vergleich der Ausbreitungsrechnungen mit Ergebnissen von Radon-Immissionsmessungen der WISMUT GmbH in der Haldenumgebung.

### 4.1 Meteorologische Daten

Für die Rechnungen zur Radon-Ausbreitung werden 3-dimensionale Ausbreitungsklassenstatistiken der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz verwendet (altes Format nach KLUG/MANIER), welche für bestimmte Zeiträume die Häufigkeiten bzgl. der sechs Ausbreitungsklassen (vgl. Tabelle 1) sowie für unbekannte Ausbreitungsklasse, bzgl. der Windrichtung (36 Sektoren sowie umlaufende Winde) und bzgl. der Windgeschwindigkeit (31 Geschwindigkeitsstufen sowie Calmen) beinhalten.

Die in den AK-Statistiken enthaltenen Ereignisse "Calmen", "umlaufende Winde" und "unbekannte Ausbreitungsklasse" werden nach folgendem Schema berücksichtigt:

1. Calmen werden in allen AK bzgl. der Windrichtung gleichverteilt der Geschwindigkeitsstufe  $j = 1$  zugeordnet (Windgeschwindigkeit von 0,75 kn für den Bereich von 0 bis 1,5 kn).
2. Umlaufende Winde werden in allen AK für die jeweilige Geschwindigkeitsstufe gleichverteilt den Windrichtungssektoren ( $i = 1$  bis 36) zugeordnet.
3. Ereignisse mit unbekannter AK werden nach [7] unter Beibehaltung des Windrichtungssektors
  - für Geschwindigkeitsstufen 1 bis 4 der AK  $k = 1$  (I bzw. F; sehr stabile Schichtung),
  - für Geschwindigkeitsstufen 5 und 6 der AK  $k = 2$  (II bzw. E; stabile Schichtung),
  - für Geschwindigkeitsstufen  $\geq 7$  der AK  $k = 3$  (III<sub>1</sub> bzw. D; neutrale Schichtung) zugeordnet.

Die 3-dimensionalen AK-Statistiken beinhalten danach 36 Windrichtungen, 6 Ausbreitungsklassen und 31 Windgeschwindigkeitsstufen (0,75 kn sowie 2 bis 31 kn; Anmerkung: 1 kn = 0,5144 m/s). Die Windmessungen von Gera-Leumnitz beziehen sich auf eine Anemometerhöhe von  $z_a = 12$  m.

Die nachfolgend für Ausbreitungsrechnungen verwendeten meteorologischen Daten betreffen die Zeiträume 1979 bis 1988 sowie Winter 1992 bis Sommer 1993. Für den letztgenannten Zeitraum wurde die AK-Statistik aus den AK-Statistiken für die Zeiträume 9/1992 bis 1/1993 sowie 2/1993 bis 8/1993 (siehe [24]) berechnet. Die Daten sind in den Abbildungen 23 bis 26 dargestellt, wozu die je zwei AK für stabile, neutrale und labile atmosphärische Schichtung zusammengefaßt wurden und eine Komprimierung der Windrichtungen von 36 auf 12 Sektoren vorgenommen wurde. Die Abbildungen zeigen die Windrichtungshäufigkeiten und die mittleren Windgeschwindigkeiten in den 30° großen Sektoren jeweils für stabile, neutrale bzw. labile atmosphärische Schichtung.

Abbildung 23: Meteorologische Daten der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz 1979 - 1988

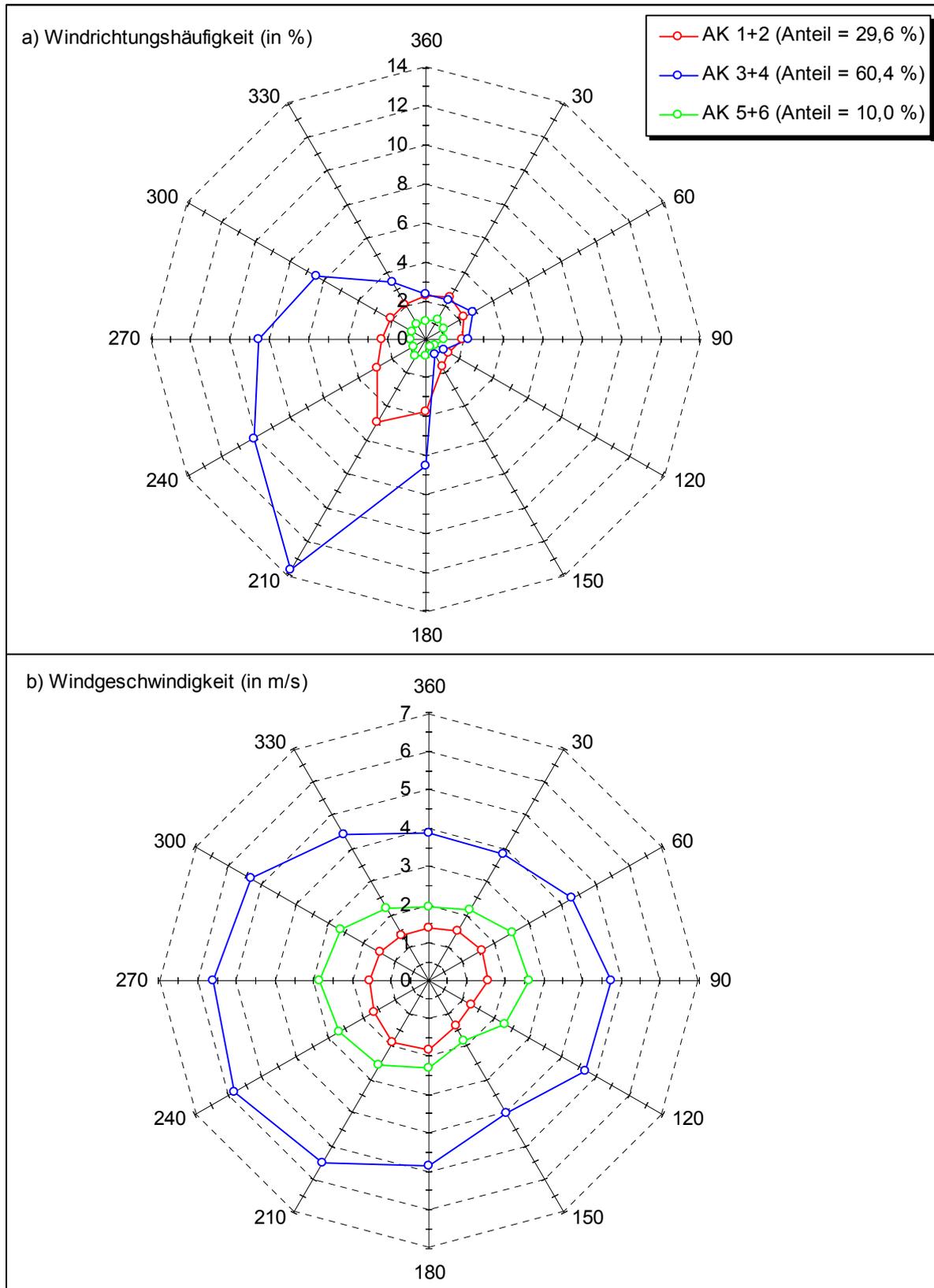


Abbildung 24: Meteorologische Daten der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz Wi92 bis So93

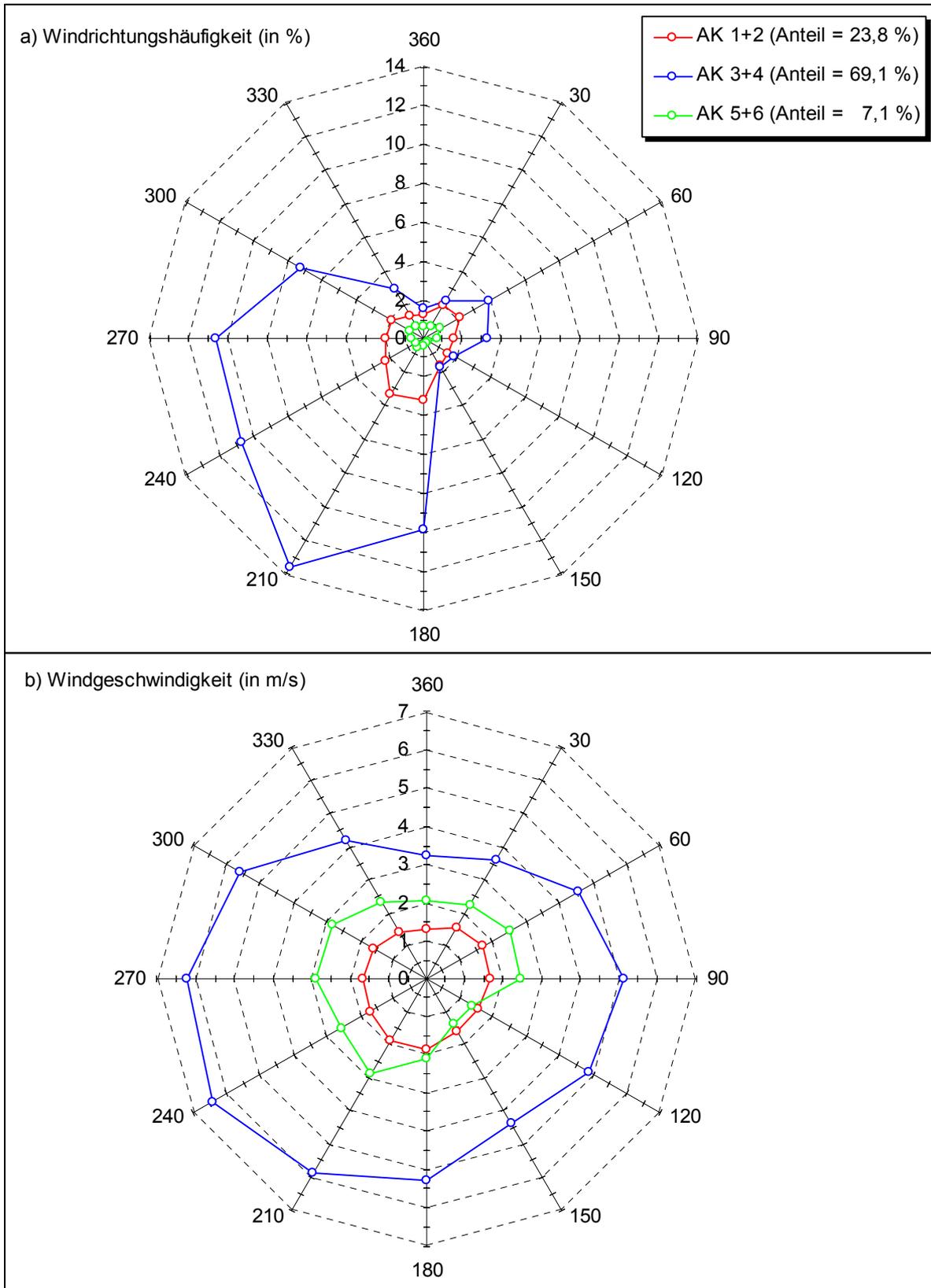


Abbildung 25: Meteorologische Daten der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz 09/1992 bis 01/1993

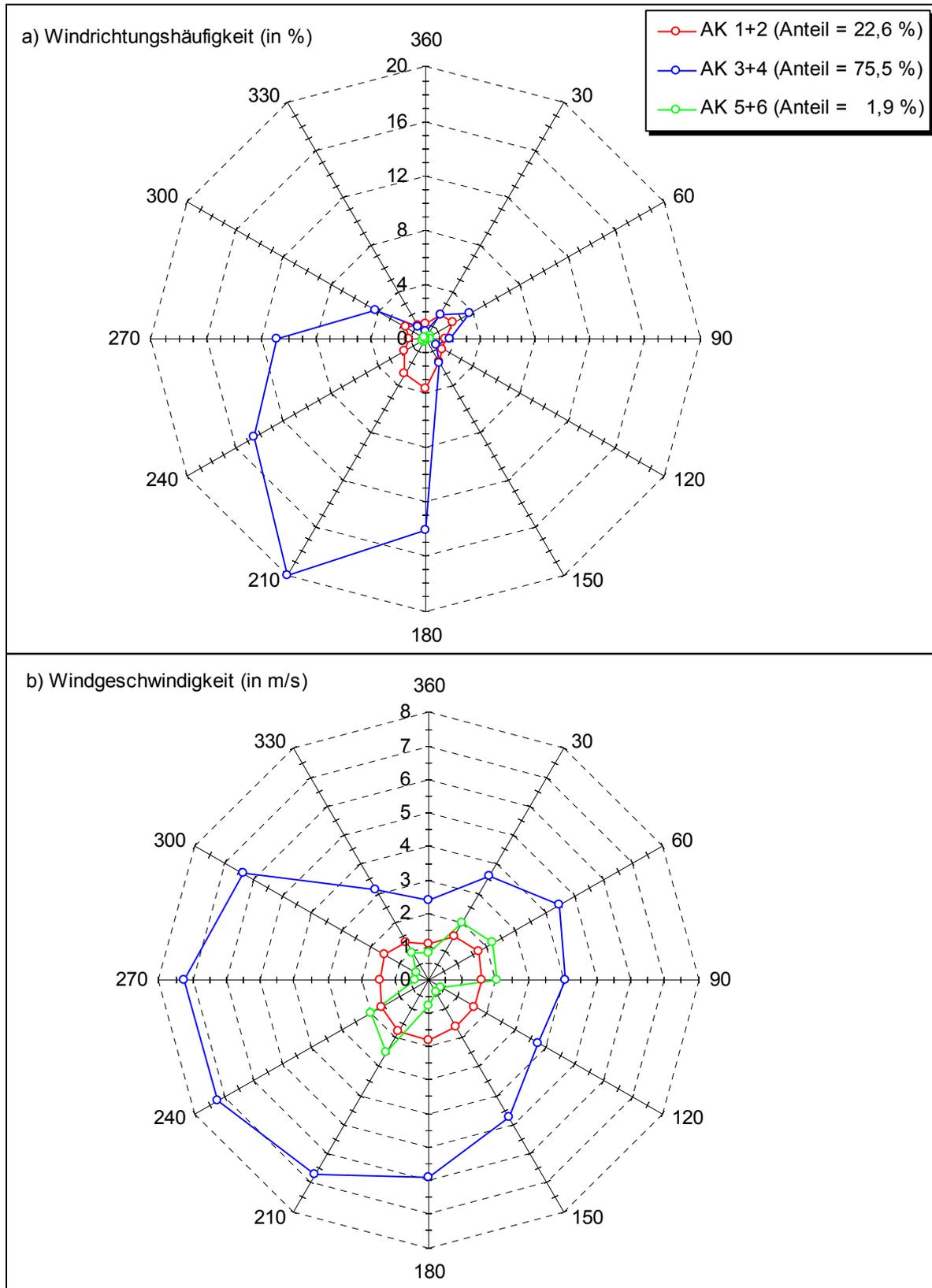
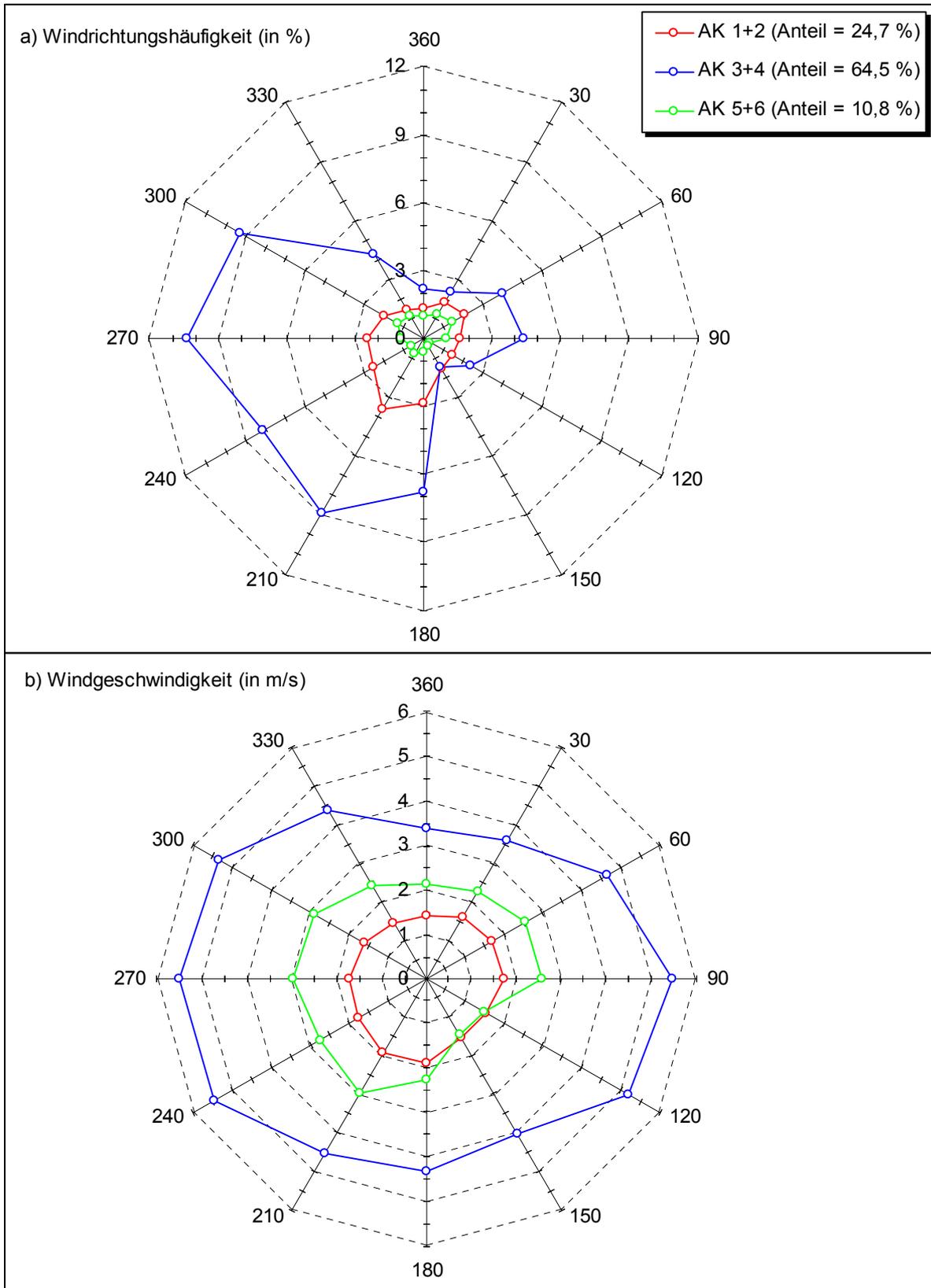


Abbildung 26: Meteorologische Daten der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz 02/1993 bis 08/1993



Vergleicht man zunächst die in Abbildung 24 dargestellten meteorologischen Daten des Zeitraums Winter 1992/93 bis Sommer 1993, die in Abschnitt 4.2 für Radon-Ausbreitungsrechnungen bzgl. der ehemaligen Bergehalte Crossen verwendet werden, mit den in Abbildung 23 für den 10-Jahres-Zeitraum 1979 bis 1988, so kann i.w. eine relativ gute Übereinstimmung festgestellt werden. Für den Zeitraum Wi92 bis So93 können also "repräsentative meteorologische Bedingungen" konstatiert werden. Die Hauptwindrichtung ist SSW (größte Häufigkeit von Winden aus dem 30°-Sektor um 210° bei neutraler atmosphärischer Schichtung). Im Detail sind natürlich auch einige Unterschiede dieser beiden AK-Statistiken festzustellen:

1. Im 10-Jahres-Zeitraum 1979 bis 1988 liegt der Anteil der stabilen Schichtungen um ca. 6 % und der Anteil der labilen Schichtungen um ca. 3 % über den entsprechenden Anteilen der Periode Wi92 bis So93; der Anteil mit neutraler Schichtung ist dementsprechend um ca. 9 % kleiner.
2. Die Vorzugswindrichtung (Winde aus S-SW) ist im 10-Jahres-Zeitraum 1979 bis 1988 sowohl für neutrale als auch für stabile atmosphärische Schichtung etwas stärker ausgeprägt als im Jahr Wi92/So93. Hier sind dagegen Winde aus E-NE (Sektor um 60°) etwas ausgeprägt.
3. Die Windgeschwindigkeiten liegen im Mittel des Jahres Wi92/So93 etwas über den Werten für den 10-Jahres-Zeitraum 1979 bis 1988.

Nach den unter Punkt 1 und Punkt 3 genannten Unterschieden ist zu erwarten, daß bei gleicher Emission einer bodennahen Radon-Quelle auf Basis der "AK-Statistik 1979 bis 1988" etwas höhere Radonkonzentrationen in der bodennahen Atmosphäre berechnet werden, als auf der Grundlage der "AK-Statistik Wi92/So93".

Ein Vergleich der Abbildungen 25 und 26 macht deutlich, daß sich die Ausbreitungsbedingungen im Winter relativ stark von denen im Sommer unterscheiden. Es sei darauf hingewiesen, daß in den Abbildungen 25 und 26 andere Skalierungen gewählt wurden, als in den Abbildungen 23 und 24. Wichtige Unterschiede sind:

4. Im Winterhalbjahr treten relativ selten labile atmosphärische Schichtungen auf (wegen der schwächeren Sonneneinstrahlung), der Anteil der neutralen Schichtung ist dementsprechend um ca. 10 % deutlich erhöht.
5. Im Sommerhalbjahr 1993 dominierten Winde aus westlicher Richtung, außerdem sind relativ viele Situationen mit Ostwind zu verzeichnen. Im Winterhalbjahr ist die Vorzugswindrichtung S-SW dagegen besonders stark ausgeprägt.
6. Bzgl. der Windgeschwindigkeit fällt auf, daß im Winterhalbjahr bei neutraler atmosphärischer Schichtung und im Sommerhalbjahr bei labiler Schichtung deutlich höhere Werte vorliegen.

Neben der in den Abbildungen 23 bis 26 dargestellten Richtungsabhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit sind zur Beurteilung meteorologischer Bedingungen bzgl. der Radonausbreitung die Verteilungen der Windgeschwindigkeit für die einzelnen Ausbreitungsklassen von besonderem Interesse, weil Situationen mit geringer Windgeschwindigkeit überproportional zur Radonbelastung beitragen. In den Abbildungen 27 bis 30 sind für die betrachteten AK-Statistiken Windgeschwindigkeitsverteilungen in "gestapelter" Form dargestellt. Die jeweils zwei Klassen der stabilen, neutralen und labilen Schichtung wurden wieder zusammengefaßt.

Abbildung 27: Windgeschwindigkeitsverteilung nach AK-Statistik Gera-Leumnitz 1979 bis 1988

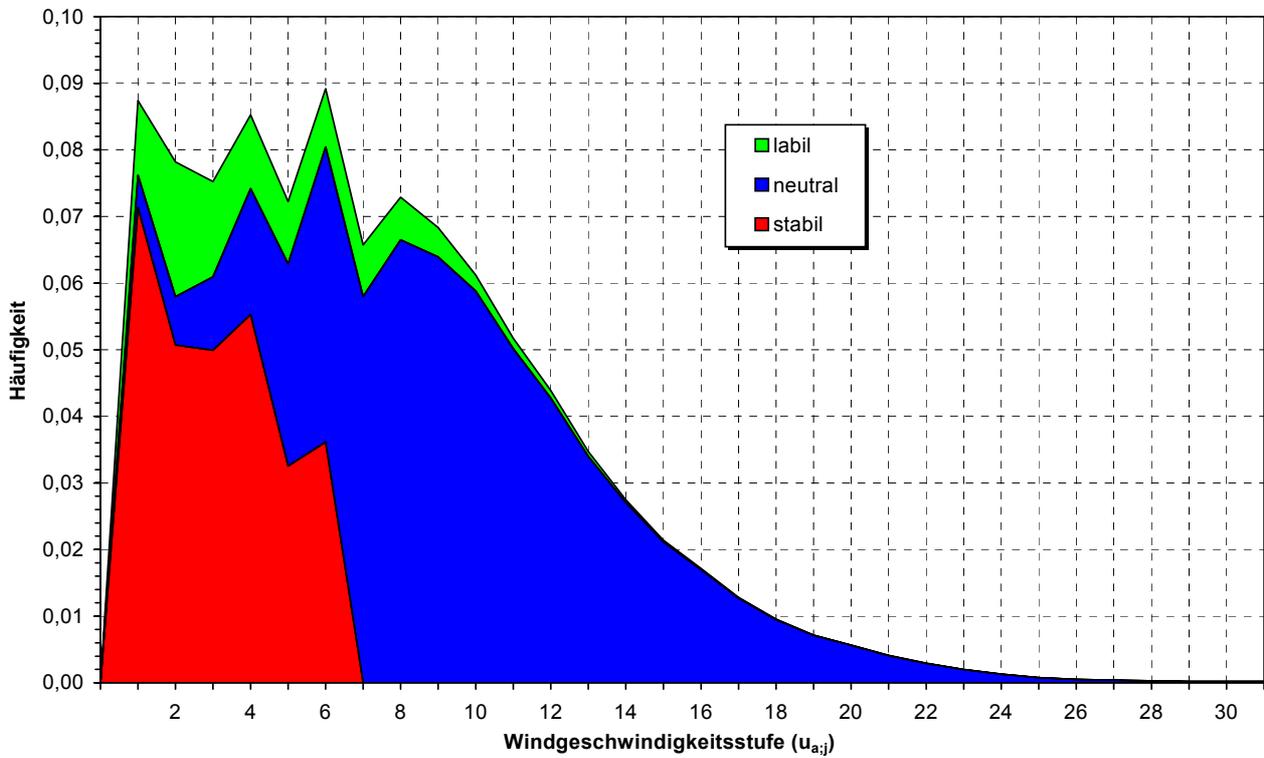


Abbildung 28: Windgeschwindigkeitsverteilung nach AK-Statistik Gera-Leumnitz Wi92 bis So93

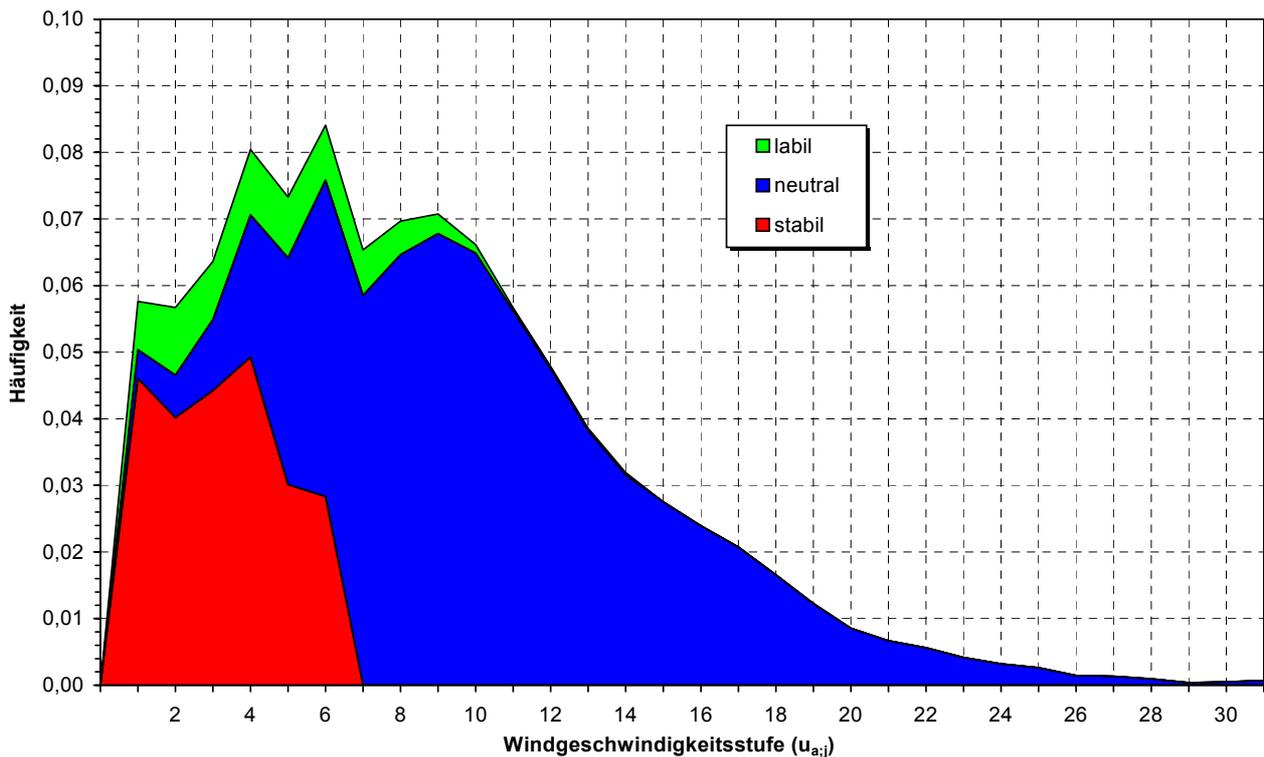


Abbildung 29: Windgeschwindigkeitsverteilung nach AK-Statistik Gera-Leumnitz 09/92 bis 01/93

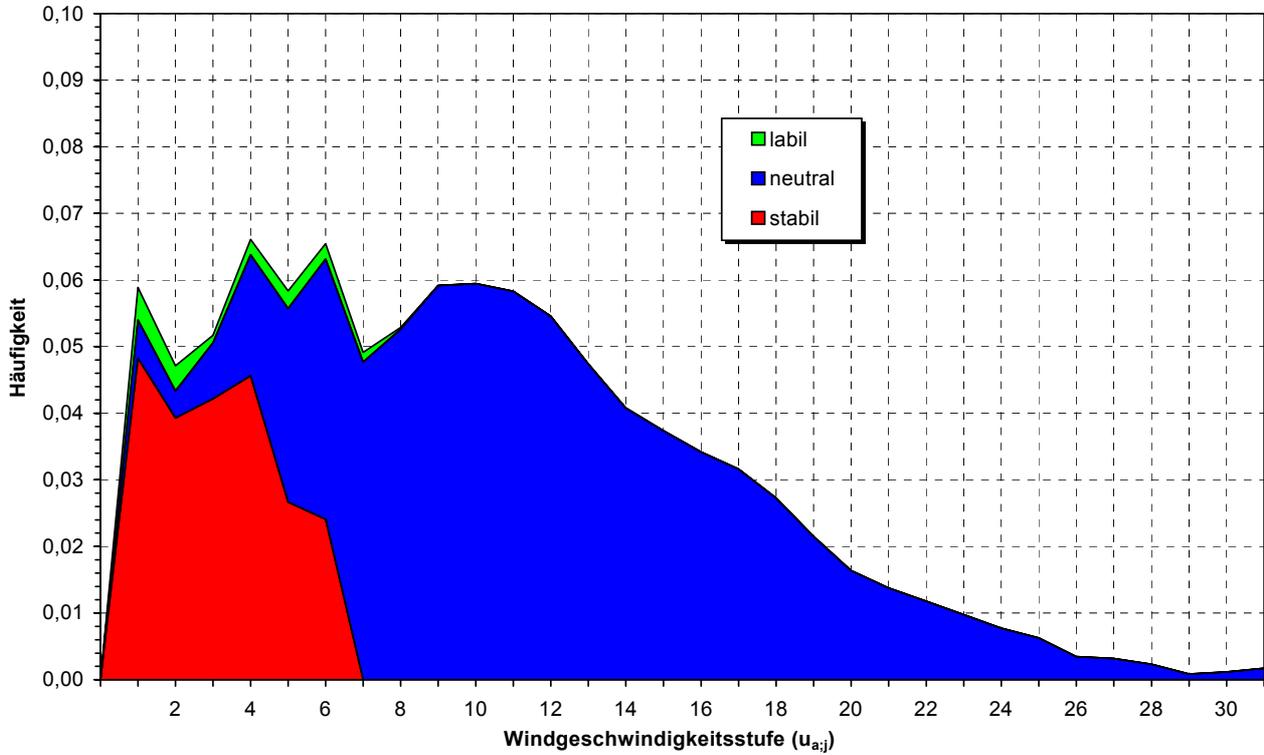
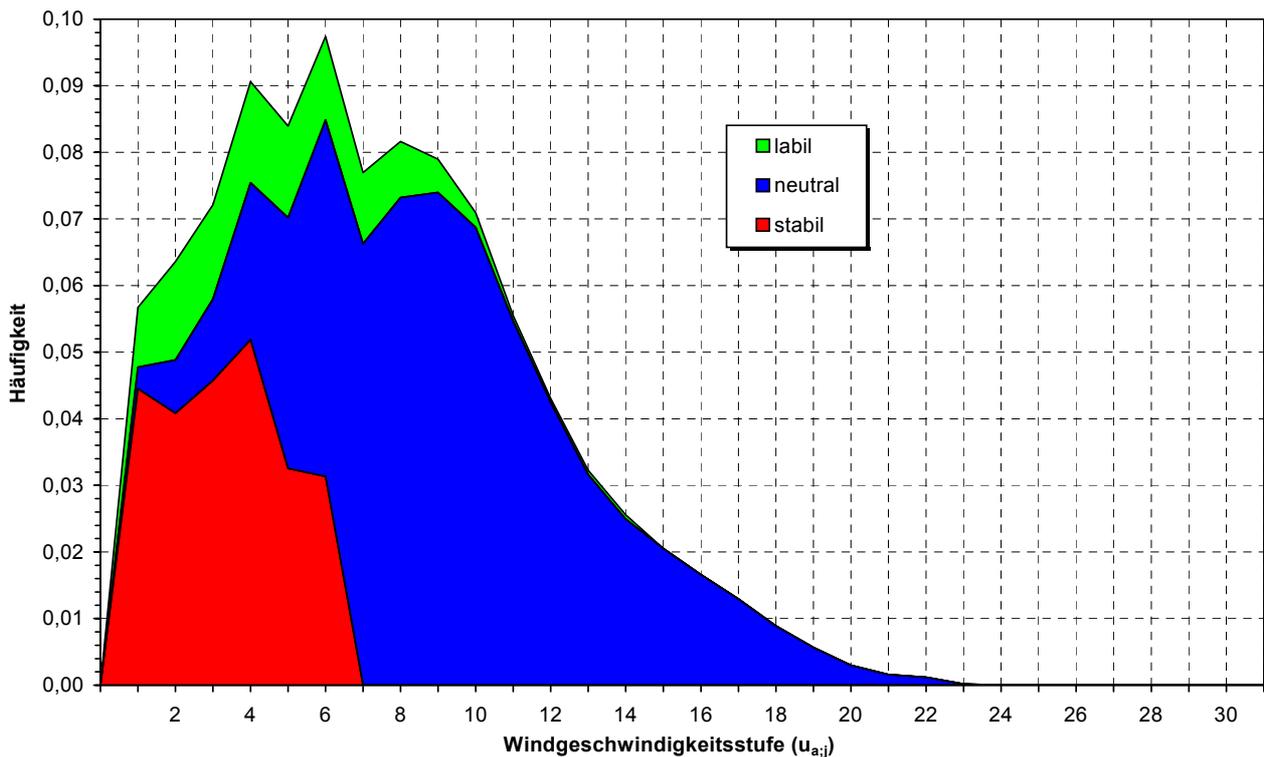


Abbildung 30: Windgeschwindigkeitsverteilung nach AK-Statistik Gera-Leumnitz 02/93 bis 08/93



Die in den Abbildungen 27 bis 30 auf der Abszisse angegebenen Windgeschwindigkeitsstufen  $u_{a,j}$  entsprechen folgenden Windgeschwindigkeiten in der Anemometerhöhe  $z_a = 12$  m:

$$u_{a,j} = \begin{cases} 0,75 \text{ kn} = 0,386 \text{ m/s} & \text{für } j = 1 \\ j \text{ kn} = j \cdot 0,5144 \text{ m/s} & \text{für } j \geq 2 \end{cases} \quad (35)$$

Aus den Abbildungen 27 bis 30 ist klar ersichtlich, daß der Bereich kleiner Windgeschwindigkeiten hauptsächlich durch Situationen mit stabiler atmosphärischer Schichtung bestimmt wird. Daneben sind hier auch relativ viele Situationen mit labiler Schichtung zu verzeichnen (abgesehen vom Winterhalbjahr, vgl. Abbildung 29). Die Situationen mit neutraler atmosphärischer Schichtung sind dagegen überwiegend mit hohen Windgeschwindigkeiten verbunden.

Dementsprechend ist zu erwarten, daß trotz hoher Anteile der neutralen Schichtung an der gesamten AK-Statistik diese Ausbreitungsklasse relativ wenig zur Radonbelastung in der Umgebung von Radon-Emittenten beiträgt. Eine quantitative Bewertung dieses Aspektes erfolgt in Abschnitt 4.2.

In der Tabelle 4 sind hierzu für die betrachteten vier AK-Statistiken noch einmal die Anteile der Situationen mit stabiler, neutraler bzw. labiler atmosphärischer Schichtung sowie die jeweiligen Werte der mittleren Windgeschwindigkeit (bezogen auf alle Windrichtungen; diese Größe auch für die Gesamtheit aller Ausbreitungsklassen) zusammengestellt. Diese Angaben untersetzen auch noch einmal die oben unter den Punkten 1, 3, 4 und 6 getroffenen Einschätzungen.

**Tabelle 4:** Angaben zur Häufigkeit stabiler, neutraler bzw. labiler atmosphärischer Schichtungen sowie zur jeweiligen mittleren Windgeschwindigkeit entsprechend den Ausbreitungsklassenstatistiken der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz für die Zeiträume 1979 bis 1988, Winter 1992/93 bis Sommer 1993, 09/1992 bis 01/1993 und 02/1993 bis 08/1993

AK-Statistik	stabil (AK 1+2)	neutral (AK 3+4)	labil (AK 5+6)	gesamt (AK 1 - 6)
<b>Anteil in %</b>				
1979 - 1988	29,6	60,4	10,0	100,0
Wi92 - So93	23,8	69,1	7,1	100,0
09/92 - 01/93	22,6	75,5	1,9	100,0
02/93 - 08/93	24,7	64,5	10,8	100,0
<b>Windgeschwindigkeit <math>u_a</math> in m/s</b>				
1979 - 1988	1,57	5,15	2,38	3,81
Wi92 - So93	1,65	5,51	2,41	4,37
09/92 - 01/93	1,60	6,27	1,73	5,13
02/93 - 08/93	1,69	4,88	2,49	3,84

## 4.2 Ausbreitungsrechnungen für eine bodennahe Punktquelle

Methodische Aspekte, die bei Ausbreitungsrechnungen für bodennahe Flächenquellen zu beachten sind, können i.w. bereits am Beispiel der Punktquelle diskutiert werden, da Flächenquellen letztlich nur als Überlagerung einer Vielzahl von Punktquellen betrachtet werden, die den einzelnen Zellen eines über die Flächenquelle gelegten Gitters zugeordnet werden. Die Betrachtung einer Punktquelle hat den Vorteil, daß der Einfluß meteorologischer Gegebenheiten auf die Verteilung der (Radon-) Konzentration in der Umgebung der Quelle in "reiner" Form dargestellt werden kann, wogegen sich bei Flächenquellen auch deren geometrische Form in der Konzentrationsverteilung abbildet.

In diesem Abschnitt wird nur die Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre betrachtet, wozu die Höhe  $z_b = 1,5$  m festgelegt wird. Für die nachfolgenden Ausbreitungsrechnungen wird in **Abschnitt 4.2.1** die Abhängigkeit des Vertikalprofils des Diffusionskoeffizienten  $K_z$  von der Ausbreitungsklasse dargestellt. Die Parametrisierung des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_y$  für die sechs Ausbreitungsklassen wird in **Abschnitt 4.2.2** diskutiert. In **Abschnitt 4.2.3** werden ausgehend von dem in Kapitel 2 für eine gegebene Windrichtung formulierten K-Modell die zur Berücksichtigung realer meteorologischer Gegebenheiten erforderlichen Beziehungen erläutert.

Die Ergebnisse der für eine bodennahe Punktquelle durchgeführten Ausbreitungsrechnungen werden in **Abschnitt 4.2.4** bzgl. der über alle Windrichtungen gemittelten Radonkonzentration  $C_w(t, z_b)$  sowie in **Abschnitt 4.2.5** zur räumlichen Verteilung der Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre  $C(x, y, z_b)$  dargestellt und diskutiert. Diesen Berechnungen wird gemäß [24] die 10-jährige Ausbreitungsklassenstatistik der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz von 1979 bis 1988 (siehe Abbildungen 23 und 27) zugrunde gelegt.

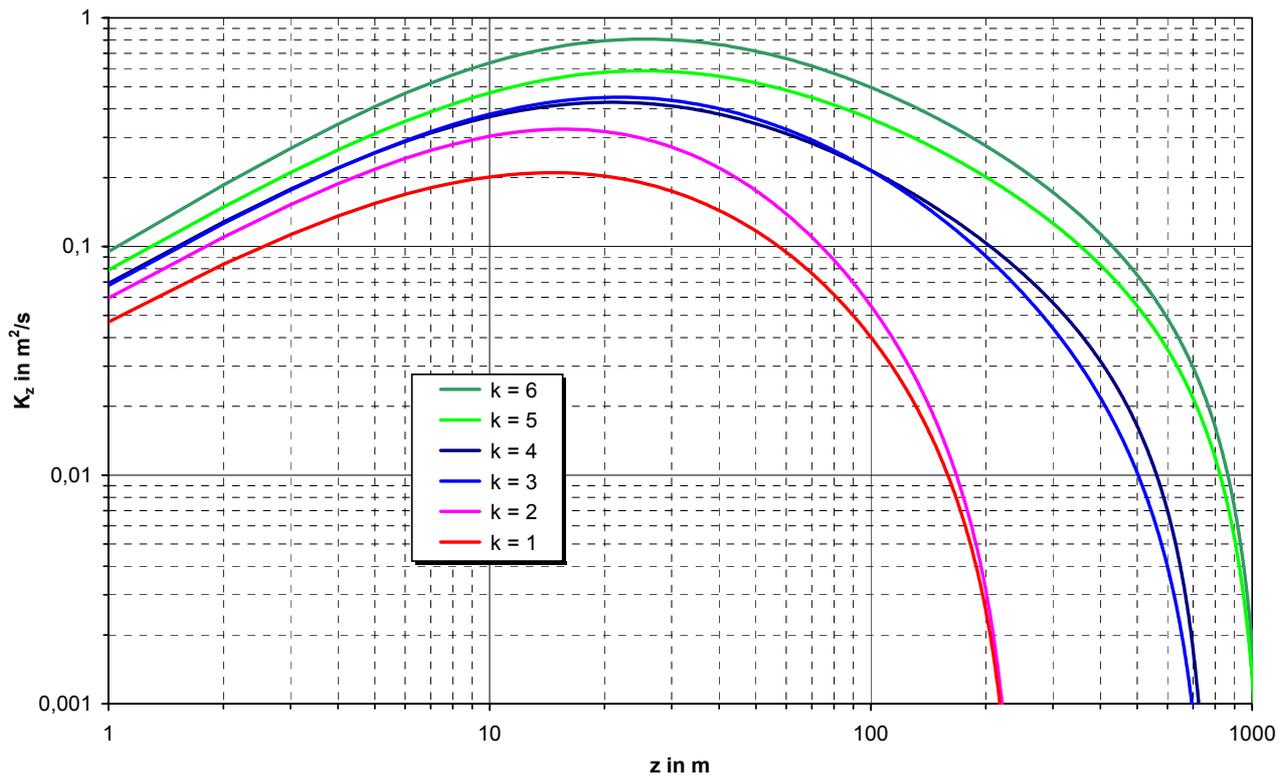
### 4.2.1 Vertikalprofil des Diffusionskoeffizienten $K_z$ für alle Ausbreitungsklassen

Für den Modellvergleich zur neutralen atmosphärischen Schichtung wurde das nach Abschnitt 2.3.1 resultierende Vertikalprofil des Diffusionskoeffizienten  $K_z$  bereits in Abbildung 2 dargestellt. Für die Berücksichtigung realer meteorologischer Gegebenheiten sind die Modellrechnungen für alle sechs Ausbreitungsklassen (vgl. Tabelle 1) durchzuführen. Im Rahmen unseres K-Modells wird  $K_z$  für die sechs Ausbreitungsklassen mit den Formeln (12) bis (14) berechnet, wobei die Abhängigkeit des Vertikalprofils der Windgeschwindigkeit  $u(z)$  von der Ausbreitungsklasse entsprechend den Beziehungen (7) bis (9) zu berücksichtigen ist.

In Abbildung 31 sind die resultierenden Vertikalprofile  $K_{z,k}(z)$  für eine Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe ( $z_a$ ) von  $u_a = 2$  m/s dargestellt, wobei mit  $k = 1$  bis 6 die Ausbreitungsklassen von "sehr stabil" ( $k = 1$ ) bis "sehr labil" ( $k = 6$ ) gekennzeichnet sind. Im Hinblick auf die weiteren Berechnungen mit AK-Statistiken der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz wurde mit  $z_a = 12$  m/s gerechnet. Außerdem wurde mit unterschiedlichen Bodenrauigkeiten im Bereich der Wetterstation (mit  $z_{0,w} = 0,03$  m) und in der Umgebung des Standortes der Radonquelle (mit  $z_{0,s} = 0,3$  m) gerechnet. Die für Ausbreitungsrechnungen benötigte Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_{*,s}$  wurde gemäß Gleichung (10) berechnet.

Aus Abbildung (31) ist gut zu erkennen, daß die vertikale turbulente Diffusion in der Richtung einer zunehmenden Stabilität der atmosphärischen Schichtung deutlich abnimmt.

**Abbildung 31:** Vertikalprofile des Diffusionskoeffizienten  $K_{z,k}(z)$  für alle 6 Ausbreitungsklassen (von  $k = 1$  für "sehr stabile" bis  $k = 6$  für "sehr labile" atmosphärische Schichtung) bei einer Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe  $z_a = 12$  m von  $u_a = 2$  m/s



#### 4.2.2 Parametrisierung des Ausbreitungsparameters $\sigma_y$ für alle Ausbreitungsklassen

Auf erhebliche Unsicherheiten der Parametrisierung des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_{y,k}(x)$  wurde bereits in Abschnitt 2.4 für den Fall der neutralen atmosphärischen Schichtung ( $k = 3$ ) eingegangen (vgl. Abbildung 10). Die Genauigkeit (bzw. die Realitätsnähe) der Parametrisierung von  $\sigma_y$  ist zwar für die Berechnung von Radonbelastungen in der Umgebung von Flächenquellen nicht entscheidend, weil sich dbzgl. Ungenauigkeiten durch die Überlagerung der Abwetterfahnen für verschiedene Windrichtungen, Ausbreitungsklassen und Windgeschwindigkeiten insbesondere für große Flächenquellen weitgehend herausmitteln, grundsätzlich ist eine den realen Gegebenheiten möglichst nahe kommende Parametrisierung von  $\sigma_y$  jedoch von Bedeutung. Insbesondere sollte sie physikalisch plausibel sein, wonach z.B. zu erwarten ist, daß  $\sigma_{y,k}(x)$  mit dem Index  $k$  größer wird.

In Tabelle 5 sind die Werte der Parameter  $p_y$  und  $q_y$  für den Potenzansatz (25) nach [5] - [7] bzw. nach KLUG [25] aufgeführt. Neben dem Ansatz (25) ist eine weitere Parametrisierung in der Form

$$\sigma_y(x) = (a_1 \cdot \ln(x) + a_2) \cdot x \quad (36)$$

nach PASQUILL-GIFFORD [26] gebräuchlich, deren Parameter  $a_1$  und  $a_2$  auch in Tabelle 5 aufgeführt sind. Der daraus resultierende Verlauf des horizontalen Ausbreitungsparameters in Abhängigkeit vom Abstand zur Quelle kann mit sehr hoher Genauigkeit ebenfalls durch den Potenzansatz (25) approximiert werden. Die beiden Parameter von (25) wurden durch potentielle Regression der bis zu einer Entfernung von 1000 m nach (36) berechneten Kurven bestimmt. Das Bestimmtheitsmaß dieser Regression von  $R^2 = 1,000$  für alle sechs Ausbreitungsklassen bestätigt eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Parametrisierungen.

**Tabelle 5:** Werte für  $p_y$  und  $q_y$  der Parametrisierung von  $\sigma_{y,k}(x)$  gemäß Potenzansatz (25) gemäß [5] bis [7] bzw. gemäß [25] sowie Werte für  $a_1$  und  $a_2$  für den Ansatz (36) gemäß [26] und daraus durch potentielle Regression (Bestimmtheitsmaß  $R^2$ ) berechnete Werte von  $p_y$  und  $q_y$

AK	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5	k = 6
	<b>nach [5]/[6]/[7]</b>					
$p_y$	1,294	0,801	0,640	0,659	0,876	1,503
$q_y$	0,718	0,754	0,784	0,807	0,823	0,833
	<b>nach [25]</b>					
$p_y$	0,273	0,237	0,219	0,230	0,306	0,469
$q_y$	0,594	0,691	0,764	0,855	0,885	0,903
	<b>nach [26]</b>					
$a_1$	-0,0029	-0,0059	-0,0059	-0,0117	-0,0147	-0,0234
$a_2$	0,054	0,088	0,108	0,175	0,248	0,35
$p_y$	0,057	0,098	0,115	0,195	0,268	0,389
$q_y$	0,925	0,896	0,923	0,896	0,913	0,896

Die Verläufe von  $\sigma_{y,k}(x)$  nach [5]/[6]/[7], nach [25] bzw. nach [26] sind in den Abbildungen 32 bis 34 dargestellt; auf die in Abbildung 32 um den Faktor 2 größere Ordinatenkala sei hingewiesen. Zu diesen drei Abbildungen ergeben sich folgende Anmerkungen:

- Die in [5] bis [7] empfohlenen Werten für  $p_y$  und  $q_y$  liefern für alle Ausbreitungsklassen sehr große horizontale Ausbreitungsparameter, wie bereits in Abschnitt 2.4.4 bzgl. der neutralen atmosphärischen Schichtung angesprochen.
- Die nach [5] bis [7] resultierenden Werte für  $\sigma_{y,k}(x)$  zeigen nicht durchgehend den zu erwartenden Anstieg bei zunehmender Instabilität der atmosphärischen Schichtung. Aus unserer Sicht ist nicht plausibel, daß die horizontale turbulente Diffusion bei stabiler Schichtung stärker sein soll als bei neutraler Schichtung.

- Die nach [25] bzw. [26] für den horizontalen Ausbreitungsparameter resultierenden Kurven weisen dagegen die erwartete Abhängigkeit von der atmosphärischen Stabilität auf. Dabei liefern die Parameter nach KLUG – mit Ausnahme von  $k = 6$  (sehr labile Schichtung) – kleinere Werte für  $\sigma_{y,k}(x)$  als die Parameter nach PASQUILL-GIFFORD. Die für stabile Schichtung nach KLUG resultierenden sehr kleinen  $\sigma_y$ -Werte erscheinen eher fragwürdig.
- Der in den Abbildungen 32 bis 34 zur neutralen atmosphärischen Schichtung gemäß (33) eingetragene Verlauf von  $\sigma_y(x)$  nach den Ergebnissen der aktuellen Windkanal-Experimente der Universität Hamburg stimmt sehr gut mit der Parametrisierung von PASQUILL-GIFFORD überein.

Zu den drei Parametrisierungen von  $\sigma_{y,k}(x)$  sei vermerkt, daß sich [25] und [26] hauptsächlich auf Feldversuche mit bodennahen Quellen in Gelände mit geringer Bodenrauigkeit stützen, wogegen die Werte von [5] bis [7] für  $p_{y,k}$  und  $q_{y,k}$  auf den Versuchen von Jülich und Karlsruhe basieren, die mit großer Emissionshöhe (50 m) im Gelände mit stärkerer Bodenrauigkeit durchgeführt wurden.

Die Parametrisierung von  $\sigma_{y,k}(x)$  nach PASQUILL-GIFFORD erscheint aus diesen Gründen für die weiteren Radon-Ausbreitungsrechnungen am besten geeignet. Sie ist u.E. auch deshalb plausibel, weil für alle Ausbreitungsklassen etwa die gleichen Potenzwerte (von  $q_{y,k} \cong 0,9$ ; siehe Tabelle 5) resultieren, wogegen die durch  $p_{y,k}$  charakterisierte Intensität der horizontalen turbulenten Diffusion mit zunehmender atmosphärischer Instabilität zunimmt. Nachfolgend wird deshalb die gemäß [26] resultierende Parametrisierung von  $\sigma_{y,k}(x)$  verwendet.

**Abbildung 32:** Verläufe des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_{y,k}(x)$  für die sechs Ausbreitungsklassen nach [5]/[6]/[7] sowie für neutrale atmosphärische Schichtung entsprechend (33)

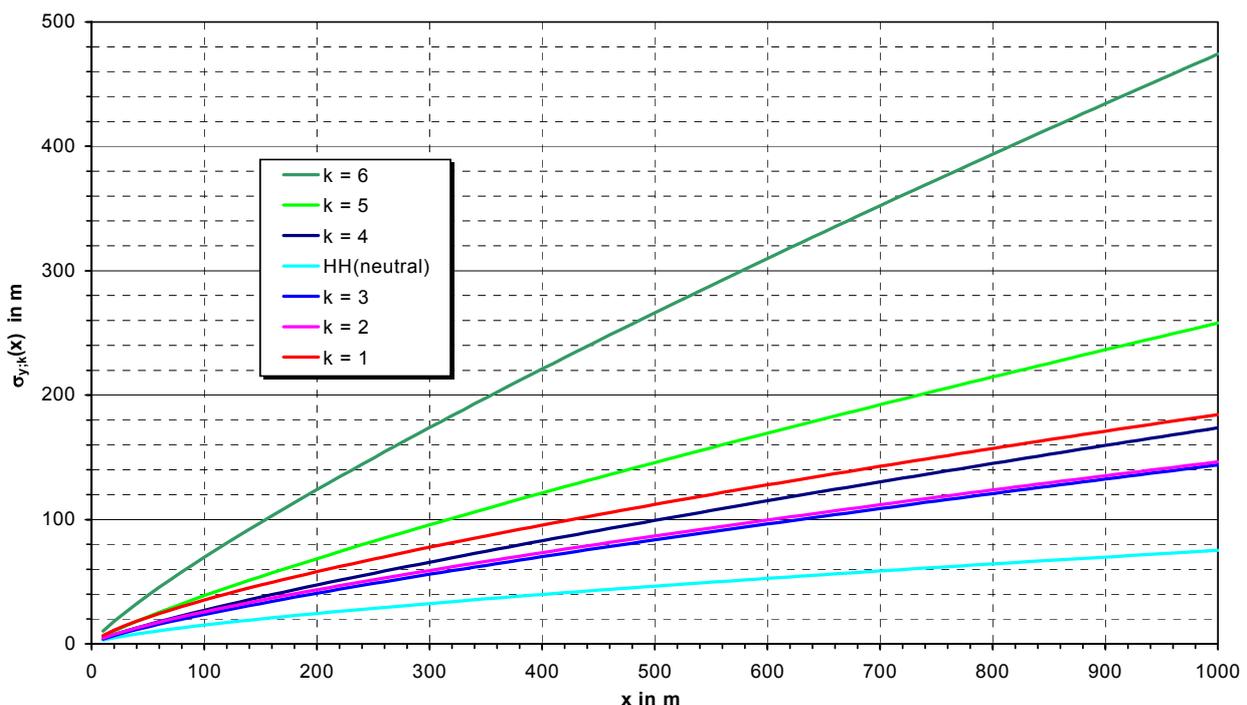


Abbildung 33: Verläufe des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_{y,k}(x)$  für die sechs Ausbreitungsklassen nach [25] sowie für neutrale atmosphärische Schichtung entsprechend (33)

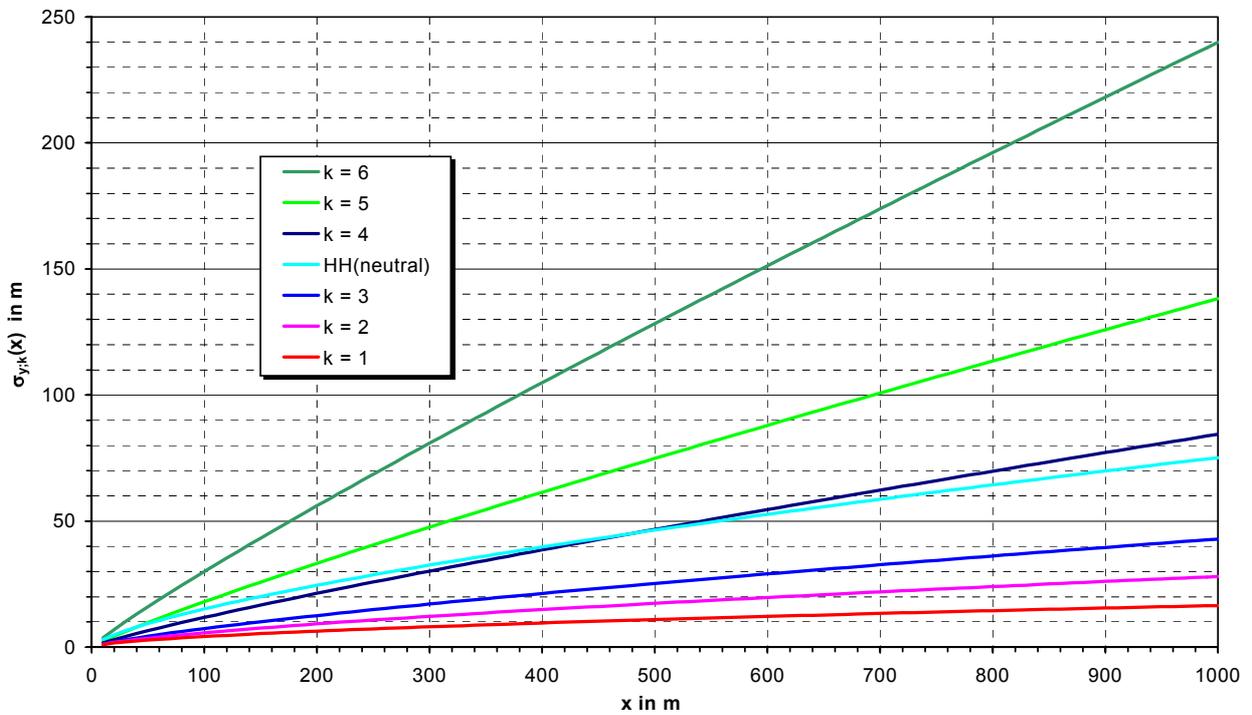
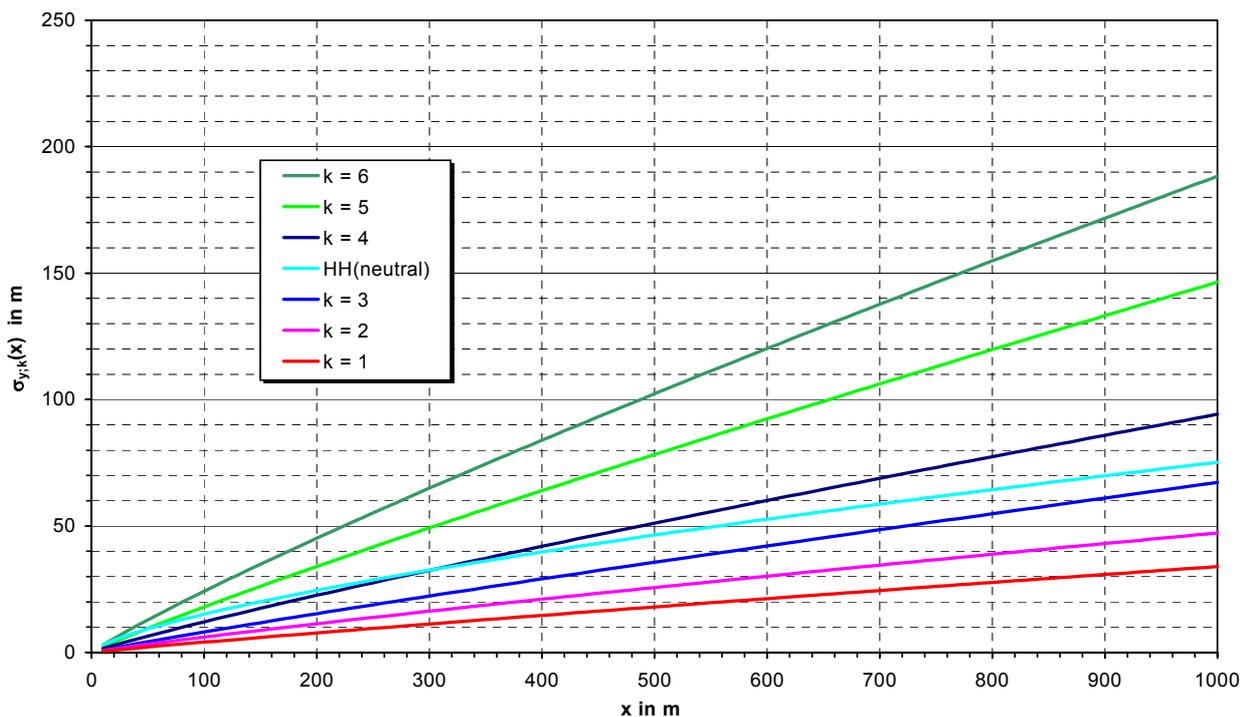


Abbildung 34: Verläufe des horizontalen Ausbreitungsparameters  $\sigma_{y,k}(x)$  für die sechs Ausbreitungsklassen nach [26] sowie für neutrale atmosphärische Schichtung entsprechend (33)



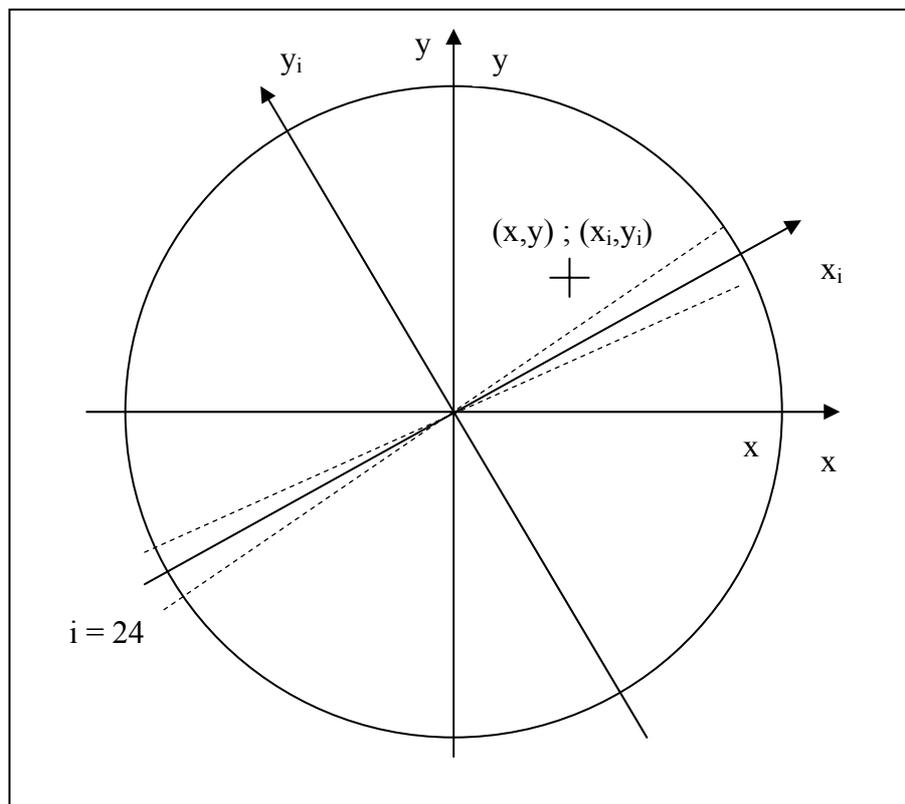
### 4.2.3 Berücksichtigung realer meteorologischer Ausbreitungsbedingungen

Zur Berechnung der räumlichen Verteilung der Radonkonzentration  $C(x, y, z_b)$  in der bodennahen Atmosphäre (die Höhe über dem Gelände sei  $z_b$ ) in der Umgebung einer bodennahen Punktquelle, die im Zentrum eines kartesischen Koordinatensystems  $(x, y)$  positioniert sei, ist für reale meteorologische Ausbreitungsbedingungen die jeweilige Ausbreitungsklassenstatistik zu berücksichtigen. Hierzu ist das in Abschnitt 2.1 für eine bestimmte Ausbreitungsrichtung  $(x)$  formulierte K-Modell zu erweitern.

Die Ausbreitungsklassenstatistik gibt Häufigkeiten  $p_{i,j,k}$  von Winden aus dem Sektor  $i$  ( $i = 1$  bis  $I$ ;  $I = 36$ ) mit der Windgeschwindigkeitsstufe  $j$  ( $j = 1$  bis  $J$ ;  $J = 31$ ) bei der Ausbreitungsklasse  $k$  ( $k = 1$  bis  $K$ ;  $K = 6$ ) an. Die Windgeschwindigkeitsstufen  $j$  entsprechen den in (35) angegebenen Windgeschwindigkeiten  $u_{a,j}$  in Anemometerhöhe  $z_a$ . Die 36 Windrichtungssektoren  $i$  entsprechen Winkeln von  $i \cdot 10^\circ$ , die von Norden ( $y$ -Achse) aus im Uhrzeigersinn gezählt werden, wie in den Abbildungen 23 bis 26 dargestellt. Für eine bestimmte "Windrichtung  $i$ " ist zweckmäßig ein bzgl.  $(x, y)$  gedrehtes Koordinatensystem  $(x_i, y_i)$  zu betrachten, wie in Abbildung 35 dargestellt. Dabei ist

$$x_i = x \cdot \cos \varphi_i + y \cdot \sin \varphi_i \quad \text{und} \quad y_i = -x \cdot \sin \varphi_i + y \cdot \cos \varphi_i \quad \text{mit} \quad \varphi_i = (27 - i) \cdot \pi / 18 . \quad (37)$$

Abbildung 35: Lage des Koordinatensystems  $(x_i, y_i)$  zur Berechnung des Beitrages zur Radonkonzentration  $C_i(x, y, z_b)$  in der Umgebung einer im Zentrum des Koordinatensystems  $(x, y)$  positionierten Punktquelle bei Winden aus dem Windrichtungssektor  $i$  (dargestellt für  $i = 24$ )



Nimmt man an, daß im Fall "Windrichtungssektor i" genau mit Winden in Richtung der  $x_i$ -Achse des Koordinatensystems  $(x_i, y_i)$  zu rechnen wäre, so resultiert nach (3) eine Radonkonzentration von

$$C(x, y, z_b) = \sum_{i=1}^I C_i(x, y, z_b) \quad (38)$$

$$\text{mit } C_i(x, y, z_b) = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{i,j,k} \cdot C_{q;j,k}(x_i, z_b) \cdot \Theta_k(x_i, y_i) \quad (39)$$

$$\text{mit } \Theta_k(x_i, y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{y;k}(x_i)}} \exp\left[\frac{-y_i^2}{2\sigma_{y;k}^2(x_i)}\right] \quad (40)$$

(I = 36; J = 31; K = 6). In den Formeln (38) bis (40) wurden folgende Bezeichnungen gewählt:

- $C_i(x, y, z_b)$  ist der Anteil zur Radonkonzentration  $C(x, y, z_b)$  bei Winden aus dem Sektor i;
- $C_{q;j,k}(x_i, z_b)$  ist die Lösung der Diffusions-Advektions-Gleichung (6) für die Höhe  $z_b$  bei einer Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe von  $u_{a;j}$  nach (35) und vertikalem Windprofil gemäß (7) bis (9) mit Diffusionskoeffizient  $K_{z;j,k}$  zur Ausbreitungsklasse k und Windgeschwindigkeitsstufe j gemäß (12) bis (17);
- $\Theta_k(x_i, y_i)$  ist die im Koordinatensystem  $(x_i, y_i)$  für Wind aus dem Sektor i bei Ausbreitungsklasse k durch horizontale turbulente Diffusion resultierende horizontale Verteilung der Abwetterfahne, für die eine Gaußverteilung mit dem vom Abstand  $x_i$  zur Quelle sowie von der Ausbreitungsklasse k abhängigen horizontalen Dispersionsparameter  $\sigma_{y;k}(x_i)$  angenommen wird.

Der Ansatz (40) ist aber nur dann sinnvoll, wenn feste Windrichtungen  $i_f$  betrachtet werden können, wie z.B. in Kapitel 3 des vorliegenden Berichtes. Dort wurde der Fall  $p_{i,j,k} = 0$  für  $i \neq 27$  betrachtet, also Wind in Richtung der x-Achse, wodurch  $x_i = x$  und  $y_i = y$  gilt und die Radonkonzentration nach Gleichung (39) zu berechnen ist.

Für die Berechnung der mittleren Radonkonzentrationsverteilung über reale Langzeit-Bedingungen muß beachtet werden, daß der Fall "Windrichtungssektor i" alle Situationen mit Winden aus dem entsprechenden Sektor erfaßt - also keine exakte Windrichtung. Der Ansatz (40) ist hierfür auch nicht als Näherung geeignet, weil der Dispersionsparameter  $\sigma_{y;k}(x_i)$  insbesondere bei der stabilen atmosphärischen Schichtung deutlich kleiner ist als die dem Sektor ( $\pm 5^\circ$  um die  $x_i$ -Achse) für den Abstand  $x_i$  zugeordnete halbe Bogenlänge von

$$s_h(x_i) = \frac{\pi \cdot x_i}{36} \quad (41)$$

Für  $x_i = 1000$  m resultiert z. B. für (41) ein Wert von ca. 87 m, wogegen in dieser Entfernung für die Ausbreitungsklassen 1, 2 und 3 mit kleineren Werten des Ausbreitungsparameters  $\sigma_{y;k}(1000$  m) von ca. 34 m, 47 m bzw. 67 m zu rechnen wäre (vgl. Abbildung 34). Damit würden für Aufpunkte mit Winkeln von  $i \cdot 10^\circ$  unrealistisch hohe und dazwischen zu niedrige Konzentrationen resultieren.

Real kann davon ausgegangen werden, daß der Fall "Windrichtungssektor i" einer Gleichverteilung von Windrichtungen im jeweiligen  $10^\circ$  großen Sektor ( $\pm 5^\circ$  um den Winkel  $i \cdot 10^\circ$  für  $I = 36$ ) entspricht. Mit der Näherung  $\tan(\alpha) \cong \alpha$  für  $\alpha \leq \pi/36$  ist dementsprechend die Gaußverteilung (40) zu ersetzen durch:

$$\bar{\Theta}_k(x_i, y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y;k}(x_i)} \cdot \frac{18}{\pi \cdot x_i} \cdot \int_{-\pi \cdot x_i/36}^{+\pi \cdot x_i/36} \exp\left[\frac{-(y_i - y_s)^2}{2\sigma_{y;k}^2(x_i)}\right] dy_s ;$$

$$\bar{\Theta}_k(x_i, y_i) = \frac{18}{\pi \cdot x_i} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \operatorname{erf}\left[\frac{y_i + \pi \cdot x_i/36}{\sqrt{2}\sigma_{y;k}(x_i)}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{y_i - \pi \cdot x_i/36}{\sqrt{2}\sigma_{y;k}(x_i)}\right] \right), \quad (42)$$

wobei in (42) - wie üblich -  $\operatorname{erf}(x)$  die sogenannte Fehlerfunktion bezeichnet,

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp[-t^2] dt .$$

Man kann sich leicht davon überzeugen, daß als Grenzwert von (42) für  $\sigma \rightarrow 0$  die gleichmäßige Verteilung

$$\bar{\Theta}_0(x_i, y_i) = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \{\bar{\Theta}_k(x_i, y_i)\} = \begin{cases} \frac{18}{\pi \cdot x_i} & \text{für } -\frac{\pi \cdot x_i}{36} < y_i < +\frac{\pi \cdot x_i}{36} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (43)$$

resultiert. Dies ist der bereits in Abschnitt 2.1 angesprochene Faktor  $1/(2\pi r)$ , der z.B. in [6] zur vereinfachten Berücksichtigung der horizontalen Diffusion für Langzeit-Ausbreitungsrechnungen empfohlen wird. Diese Approximation führt jedoch an den Sektorengrenzen bei der Berechnung der räumlichen Verteilung der Radonkonzentration zu Unstetigkeiten. Für nachfolgende Berechnungen der Radonkonzentration (38) in den Abschnitten 4.2.5 und 4.3 verwenden wir deshalb - statt (39) - die korrekte Formel

$$C_i(x, y, z_b) = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{i,j,k} \cdot C_{q;j,k}(x_i, z_b) \cdot \bar{\Theta}_k(x_i, y_i) \quad (44)$$

mit  $\bar{\Theta}_k(x_i, y_i)$  gemäß (42). Zur Diskussion der nur noch von der Entfernung  $r$  abhängigen über alle Windrichtungen gemittelten Radonkonzentration  $C_w(r, z_b)$ ,

$$C_w(r, z_b) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C(r \cdot \cos \varphi, r \cdot \sin \varphi, z_b) d\varphi \quad \text{mit } r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad , \quad (45)$$

in Abschnitt 4.2.4 ist jedoch die mit (43) resultierende Näherung sinnvoll. Hiermit erhält man für (45) (mit  $I = 36$ ;  $J = 31$ ;  $K = 6$ ) die Beziehung

$$C_w(r, z_b) = \frac{I}{2\pi r} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{i,j,k} \cdot C_{q;j,k}(r, z_b) . \quad (46)$$

#### 4.2.4 Diskussion der über alle Windrichtungen gemittelten Radonkonzentration

Die Berechnung und Diskussion der über alle Windrichtungen gemittelten Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre der Umgebung einer bodennahen Punktquelle soll in diesem Abschnitt für die Beantwortung von zwei Fragen herangezogen werden:

1. Kann  $C_w(r, z_b)$  für charakteristische meteorologische Bedingungen hinreichend genau durch eine einfache Funktion approximiert werden?
2. Welche Relevanz haben die meteorologischen Situationen mit stabiler, neutraler bzw. labiler atmosphärischer Schichtung für die Radonbelastung in der Umgebung bodennaher Quellen?

Die Beantwortung der ersten Frage ist für überschlägige Berechnungen zur Radonbelastungen in Gebieten mit einer Vielzahl bergbaulicher Hinterlassenschaften von Bedeutung. Die Beantwortung der zweiten Frage erlaubt u.E. eine sinnvolle Schwerpunktsetzung für weitere Untersuchungen zur Modellierung der Radonausbreitung (im aktuellen Vorhaben StSch 4270 lag der Schwerpunkt auf der Modellierung der turbulenten Diffusion für neutrale atmosphärische Schichtung).

Die für eine bodennahe Punktquelle der Stärke  $Q = 1$  kBq/s mit der 10-jährigen AK-Statistik der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz berechneten Verläufe von  $C_w(r, z_b)$  sowie der Anteile  $C_{w;s}(r, z_b)$  für stabile (AK 1+2),  $C_{w;n}(r, z_b)$  für neutrale (AK 3+4) und  $C_{w;l}(r, z_b)$  für labile (AK 5+6) Schichtung sind in Abbildung 36 dargestellt (es wurden Bodenrauigkeiten von  $z_{0,w} = 0,03$  m und  $z_{0,s} = 0,3$  m angesetzt; siehe Abschnitt 2.2).

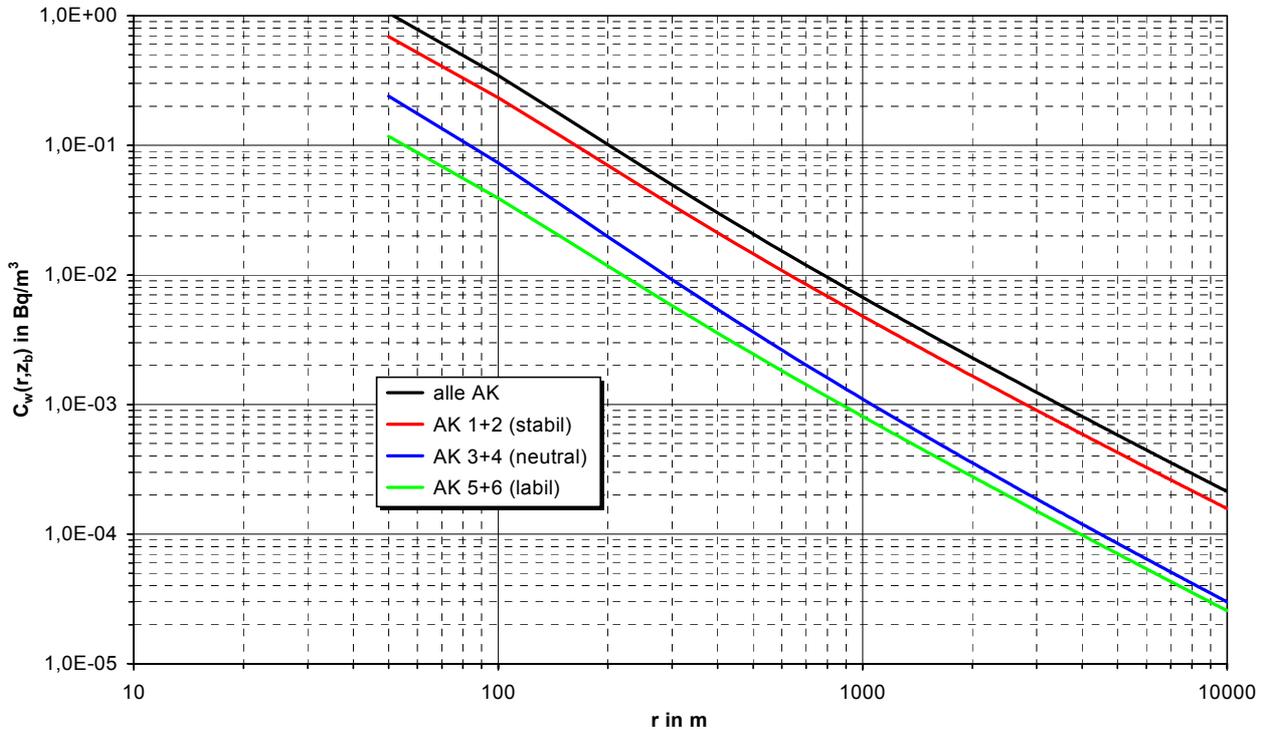
Aus den im doppelt-logarithmischen Maßstab in Abbildung 36 dargestellten Kurven ist ersichtlich, daß die Abhängigkeit der über alle Windrichtungen gemittelten Radonkonzentration vom Abstand  $r$  zur Quelle recht genau durch einen Potenzansatz approximiert werden kann. In der unmittelbaren Nähe des Quellpunktes ( $r < 100$  m) sind zwar Abweichungen von einem Potenzansatz zu sehen, auch diese sind jedoch relativ klein. Zieht man zur Bestimmung der Parameter der Potenzfunktion den Bereich von 100 m bis 5000 m heran, so ergibt sich die Approximation

$$C_w(r, z_b) \cong Q \cdot 400 \cdot r^{-1,6} \quad (Q \text{ in kBq/s, } r \text{ in m, } C_w \text{ in Bq/m}^3), \quad (47)$$

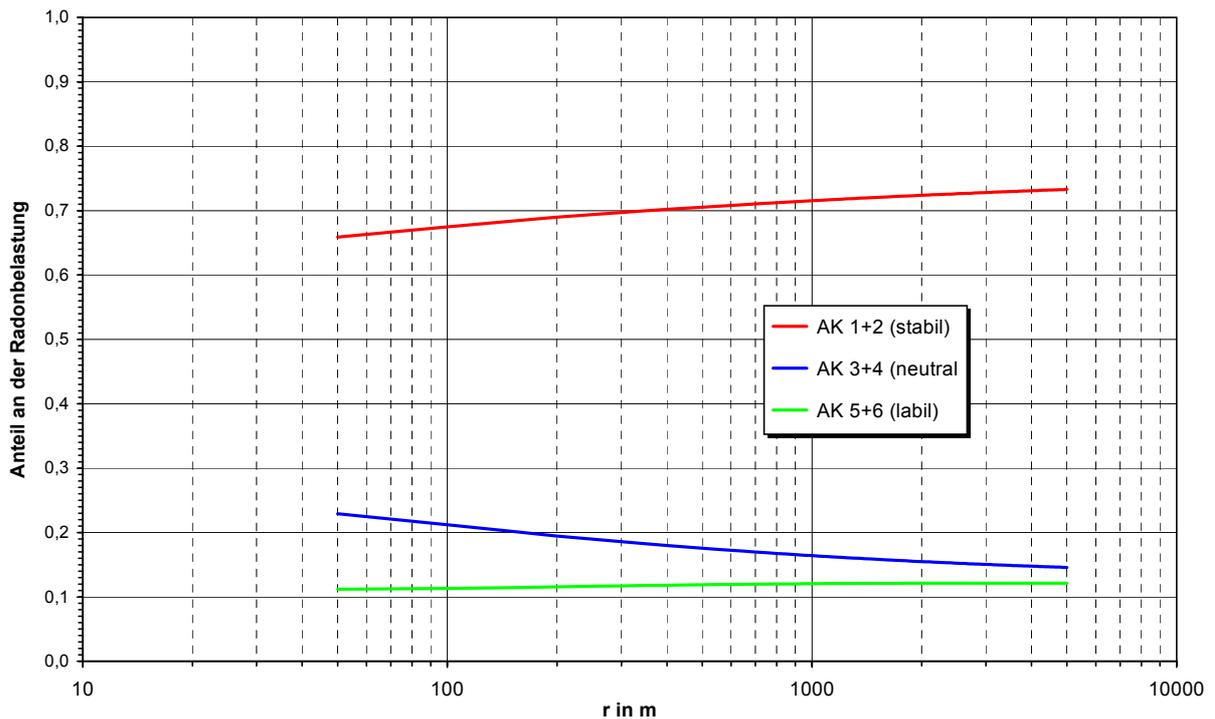
wie sie auf Basis von [27] in den Berechnungsgrundlagen Bergbau (Teil Radon) [28] verwendet wird. Anmerkung: In [27] erfolgte eine Anpassung für den Bereich von 300 m bis 3.000 m, woraus der Potenzansatz  $Q \cdot 377 r^{-1,58}$  resultierte. Die in (47) angegebenen gerundeten Werte der Parameter von 400 und 1,6 sind unter Beachtung der Modellunsicherheit angemessen.

Aus Abbildung 36 ist die Relevanz der Situationen mit stabiler atmosphärischer Schichtung für die Radonkonzentration ersichtlich. Dies ist in Abbildung 37 noch deutlicher dargestellt.

**Abbildung 36:** Abhängigkeit der über alle Windrichtungen gemittelten Radonkonzentration vom Abstand  $r$  zur Quelle (gesamt und durch Situationen mit stabiler, neutraler bzw. labiler Schichtung)



**Abbildung 37:** Anteile der Situationen mit stabiler, neutraler bzw. labiler atmosphärischer Schichtung zur insgesamt resultierenden, über alle Windrichtungen gemittelten Radonkonzentration



Gemäß Abbildung 37 ist davon auszugehen, daß die Radonkonzentration in der Umgebung von bodennahen Quellen zu ca. 70 % durch die stabilen Wetterlagen sowie zu ca. 20 % bzw. 10 % durch Situationen mit neutraler bzw. labiler atmosphärischer Schichtung bestimmt wird. Vergleicht man hierzu die in Tabelle 4 angegebenen Anteile dieser drei Wetterlagen von ca. 30 %, 60 % bzw. 10 %, an der Ausbreitungsklassenstatistik so ist klar, welche Bedeutung der kleinen Windgeschwindigkeit und der relativ geringeren vertikalen Diffusion bei stabiler atmosphärischer Schichtung zukommt. Aus unserer Sicht sollte deshalb bei weiteren Untersuchungen die Modellierung der turbulenten Diffusion und der Advektion bei stabiler atmosphärischer Schichtung die höchste Priorität erhalten.

Bezogen auf den Anteil an der AK-Statistik bewirken sogar die Wetterlagen mit labiler Schichtung größere Radonbelastungen in der Umgebung bodennaher Quellen als die am häufigsten auftretenden Situationen mit neutraler Schichtung. Dies gilt ungeachtet der (bei gleicher Windgeschwindigkeit) stärkeren vertikalen Diffusion für die labilen Ausbreitungsklassen ( $k = 5, 6$ ) gegenüber den beiden neutralen Ausbreitungsklassen ( $k = 3, 4$ ) wegen der im Mittel geringeren Windgeschwindigkeit bei labiler atmosphärischer Schichtung (vgl. Tabelle 4), die sich sowohl auf die Advektion als auch auf die Diffusion auswirkt. Eine experimentelle Überprüfung der für die labile Schichtung getroffenen Modellannahmen wäre deshalb aus unserer Sicht wissenschaftlich interessant. Wegen der relativ geringen praktischen Relevanz (Auswirkungen auf Ergebnisse von Radon-Ausbreitungsrechnungen) kann dieser Problematik u.E. jedoch eine geringe Priorität beigemessen werden.

#### 4.2.5 Diskussion der räumlichen Verteilung der Radonkonzentration

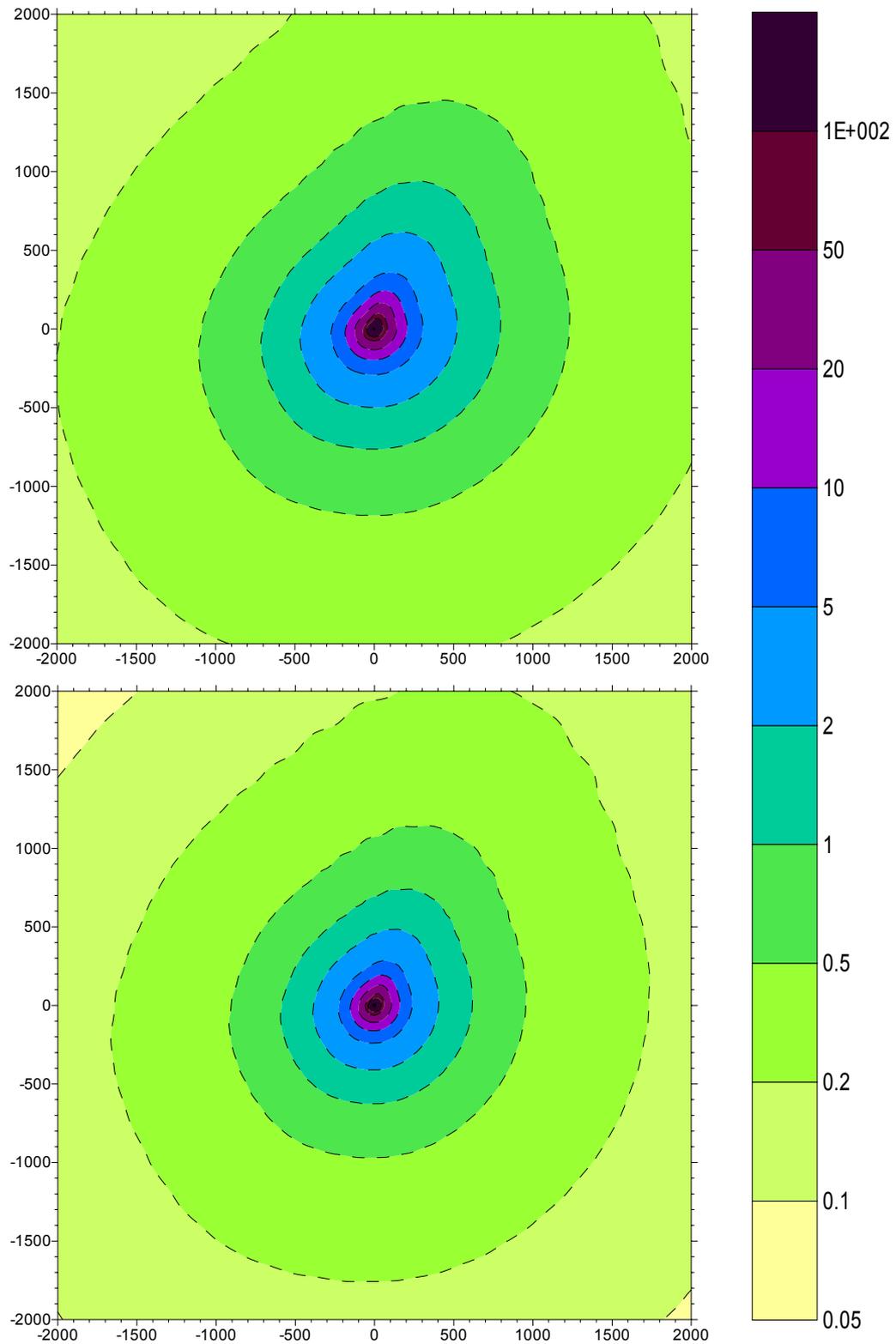
Für dieses Beispiel zur bodennahen Radonkonzentration in der Umgebung einer Boden-Punktquelle wurde eine Quellstärke von  $Q = 100 \text{ kBq/s}$  angesetzt. Für alle anderen Parameter wurden die in Abschnitt 4.2.4 genannten Werte verwendet. Ebenso wurde für die meteorologischen Bedingungen die 10-jährige AK-Statistik (1979 bis 1988) der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz verwendet.

Die in Abschnitt 4.2.4 diskutierte Relevanz stabiler Wetterlagen für die über alle Windrichtungen gemittelte Radonkonzentration  $C_w(r, z_b)$  zeigt sich ähnlich in der räumlichen Verteilung  $C(x, y, z_b)$  der Radonkonzentration in Bodennähe ( $z_b = 1,5 \text{ m}$ ).

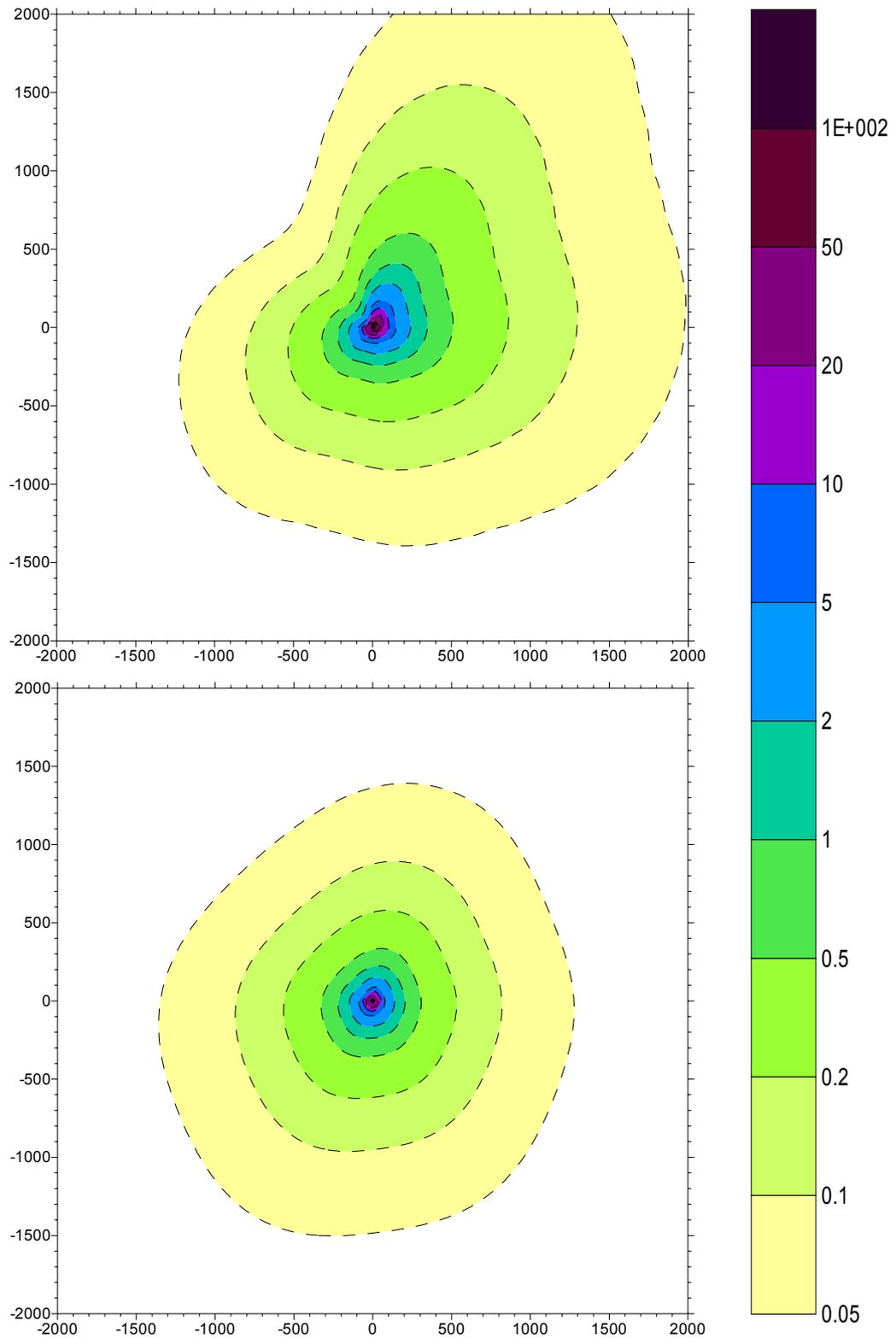
Da die azimutale Verteilung der Windrichtungshäufigkeit für stabile Schichtung schwächer strukturiert ist als bei neutraler Schichtung (vgl. Abbildungen 23), ist zu erwarten, daß auch die azimutale Verteilung der Radonkonzentration entsprechend der hohen Relevanz der stabilen Wetterlagen eine relativ schwache Struktur aufweist. Dies zeigen die Abbildungen 38 und 39, in denen die nach (38), (44) und (42) berechnete Radon-Konzentrationsverteilung  $C(x, y, z_b)$  und die durch stabile, neutrale bzw. labile Wetterlagen verursachten Beiträge  $C_s(x, y, z_b)$ ,  $C_n(x, y, z_b)$  und  $C_l(x, y, z_b)$  dargestellt sind. Im oberen Bild von Abbildung 39 ist in  $C_n(x, y, z_b)$  die Windrichtungsverteilung für AK 3+4 klar zu erkennen. Die Konzentrationsverteilung  $C(x, y, z_b)$  wird i.w. durch  $C_s(x, y, z_b)$  bestimmt.

Die räumliche Verteilung der Anteile der stabilen bzw. neutralen Wetterlagen an der gesamten Radonkonzentration ist in Abbildung 40 dargestellt. Sie liegen in den Bereichen  $70 \% \pm 10 \%$  für die stabile und  $20 \% \pm 10 \%$  für die neutrale atmosphärische Schichtung.

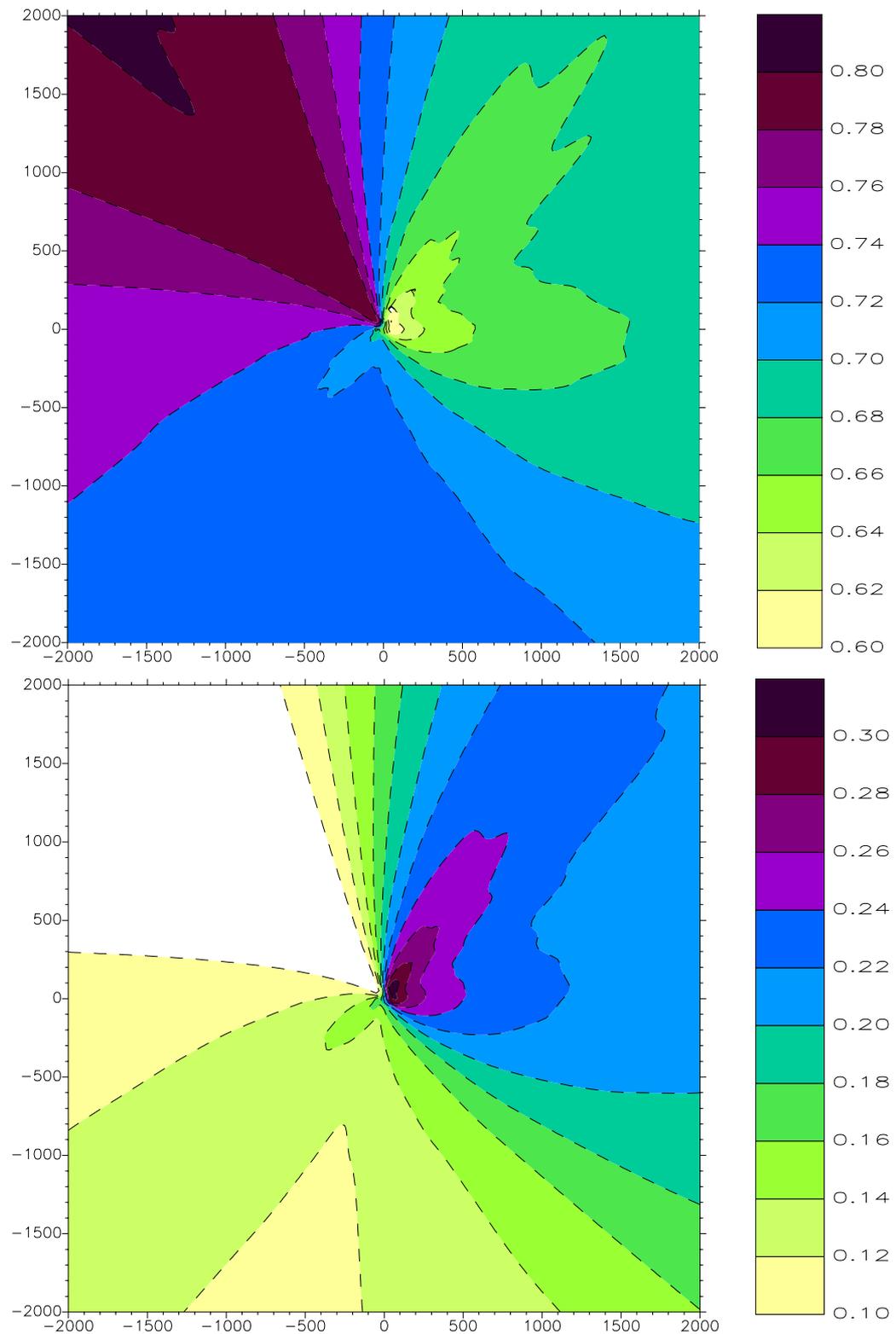
**Abbildung 38:** Radonkonzentration in  $\text{Bq/m}^3$  in der Umgebung der bodennahen Punktquelle  $Q = 100 \text{ kBq/s}$ ;  $C(x, y, z_b)$  für alle AK (oben);  $C_s(x, y, z_b)$  für AK 1+2 (unten); AK-Statistik 1979-1988



**Abbildung 39:** Radonkonzentration in  $\text{Bq/m}^3$  in der Umgebung der bodennahen Punktquelle  $Q = 100 \text{ kBq/s}$ ;  $C_n(x, y, z_b)$  für AK 3+4 (oben);  $C_l(x, y, z_b)$  für AK 5+6 (unten); AK-Statistik 1979-1988



**Abbildung 40:** Anteile stabiler und neutraler Wetterlagen (AK-Statistik 1979-1988) zur Radonbelastung in der Umgebung der Punktquelle; oben:  $C_s(x, y, z_b)/C(x, y, z_b)$ ; unten:  $C_n(x, y, z_b)/C(x, y, z_b)$



### **4.3 Ausbreitungsrechnungen für die Umgebung der ehemaligen Bergehalde Crossen**

Zum 3. Projektgespräch wurde vereinbart [11], daß von GRS und BS die Radonausbreitung für eine reale Flächenquelle berechnet wird, für die der Ansatz "ebenes Gelände" gerechtfertigt ist. Neben dem Vergleich der Modellergebnisse sollte eine Gegenüberstellung mit Immissionsdaten erfolgen. Das Objekt sollte von anderen anthropogenen Radonquellen möglichst entfernt sein, damit für den Vergleich von Rechen- und Meßwerten nicht zu viele Quellen zu berücksichtigen sind.

Die Forderungen bzgl. einer hinreichend starken Radonquelle und ausreichend vieler Meßpunkte in der Umgebung des Objektes legten die Auswahl einer Halde der WISMUT GmbH nahe. Es wurde die ehemalige Bergehalde Crossen ausgewählt. Für dieses Objekt sind bei BS aus früheren Arbeiten zur Prüfung des Sanierungskonzeptes zum Standort Crossen [1] die erforderlichen Daten verfügbar. Gemäß [11] wurden mit [24] an die GRS folgende Daten zur Bergehalde Crossen übergeben:

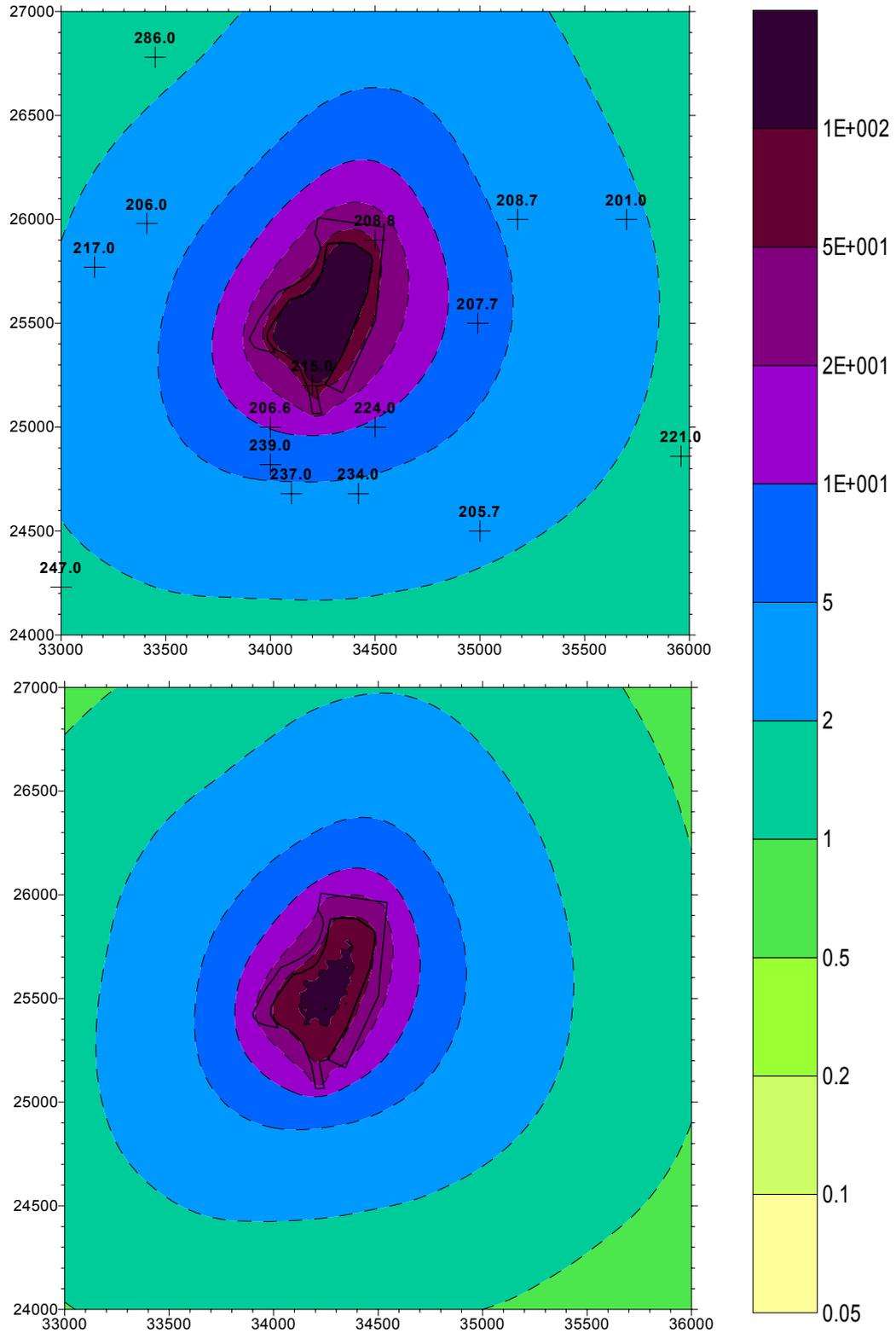
- für die ehemalige Bergehalde und ihr unmittelbares Umfeld auf der Basis von Messungen der WISMUT GmbH vorliegende Abschätzungen zur mittleren Radon-Exhalationsrate  $J_{Rn}$ ;
- Daten zu den Konturen der Halde und der Fläche der kontaminierten Haldenumgebung;
- AK-Statistiken der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz für den Zeitraum 09/1992 bis 08/1993 (siehe Abschnitt 4.1 des vorliegenden Berichtes);
- für diesen Zeitraum zur Umgebung der Bergehalde Crossen aus Meßkampagnen der WISMUT GmbH (Winter 1992/93 und Sommer 1993) vorliegende Meßwerte zur Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre.

Nachfolgend werden in **Abschnitt 4.3.1** die Quelldaten zur ehemalige Bergehalde Crossen und zur kontaminierten Fläche ihrer unmittelbaren Umgebung sowie Ergebnisse der mit dem K-Modell durchgeführten Modelrechnungen vorgestellt und ein Vergleich mit den Rn-Immissionsmessungen vorgenommen. Dieser Vergleich zeigt, daß an Meßpunkten südlich der Bergehalde der Einfluß von weiteren kontaminierten Betriebsflächen erheblich ist. Für eine aussagekräftigere Gegenüberstellung von Rechen- und Meßwerten werden deshalb gemäß einer dbzgl. Abstimmung mit der GRS in **Abschnitt 4.3.2** die anderen Radonquellen des Standortes Crossen (zur damaligen Zeit - vor Beginn der Sanierung) charakterisiert und die Ergebnisse ergänzender Ausbreitungsrechnungen erläutert. Auf dieser Basis erlaubt die Gegenüberstellung von Rechen- und Meßwerten Aussagen zur Eignung unseres K-Modells für die Berechnung von Radonbelastungen in der Umgebung von bergbaulichen bzw. industriellen Hinterlassenschaften mit erhöhter Radonemission.

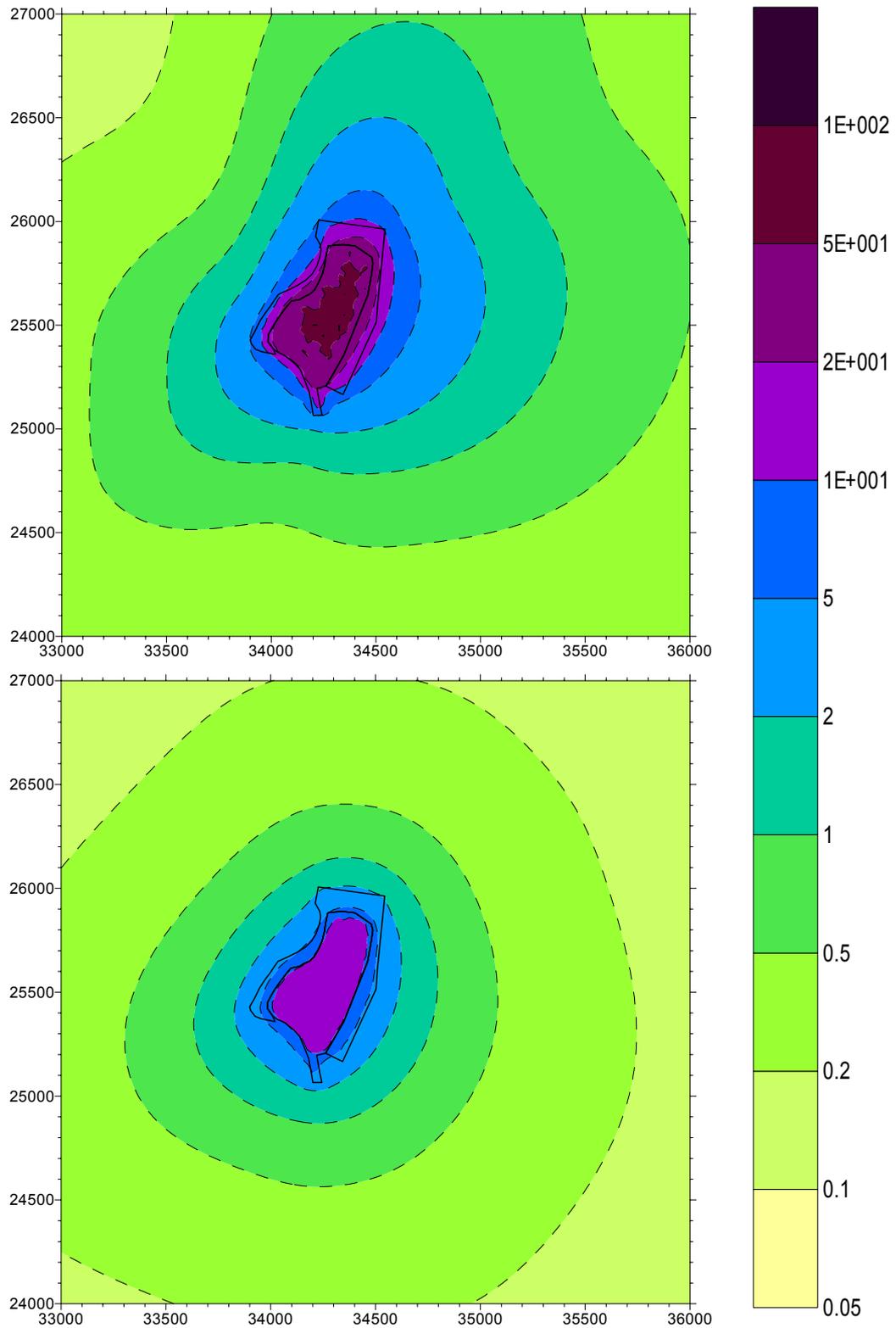
#### **4.3.1 Radonbelastung durch die ehemalige Bergehalde Crossen**

Die Aufstandsflächen der ehemaligen Bergehalde und ihrer Umgebungsfläche (siehe nachfolgende Abbildungen) liegen bei 19,3 ha bzw. 12,2 ha. Für die Bergehalde rechnen wir gemäß [1] mit einer Mantelfläche von 24 ha, was bei einer Radonexhalationsrate von ca.  $3 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  eine Emissionsrate von 720 kBq/s ergibt. Für die Umgebungsfläche resultiert bei einer Radonexhalationsrate von ca.  $0,4 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  eine Emissionsrate von 50 kBq/s. In den Abbildungen 41 bis 46 sind die Ergebnisse der Modellrechnungen für verschiedene Ausbreitungsbedingungen und Zeiträume dargestellt.

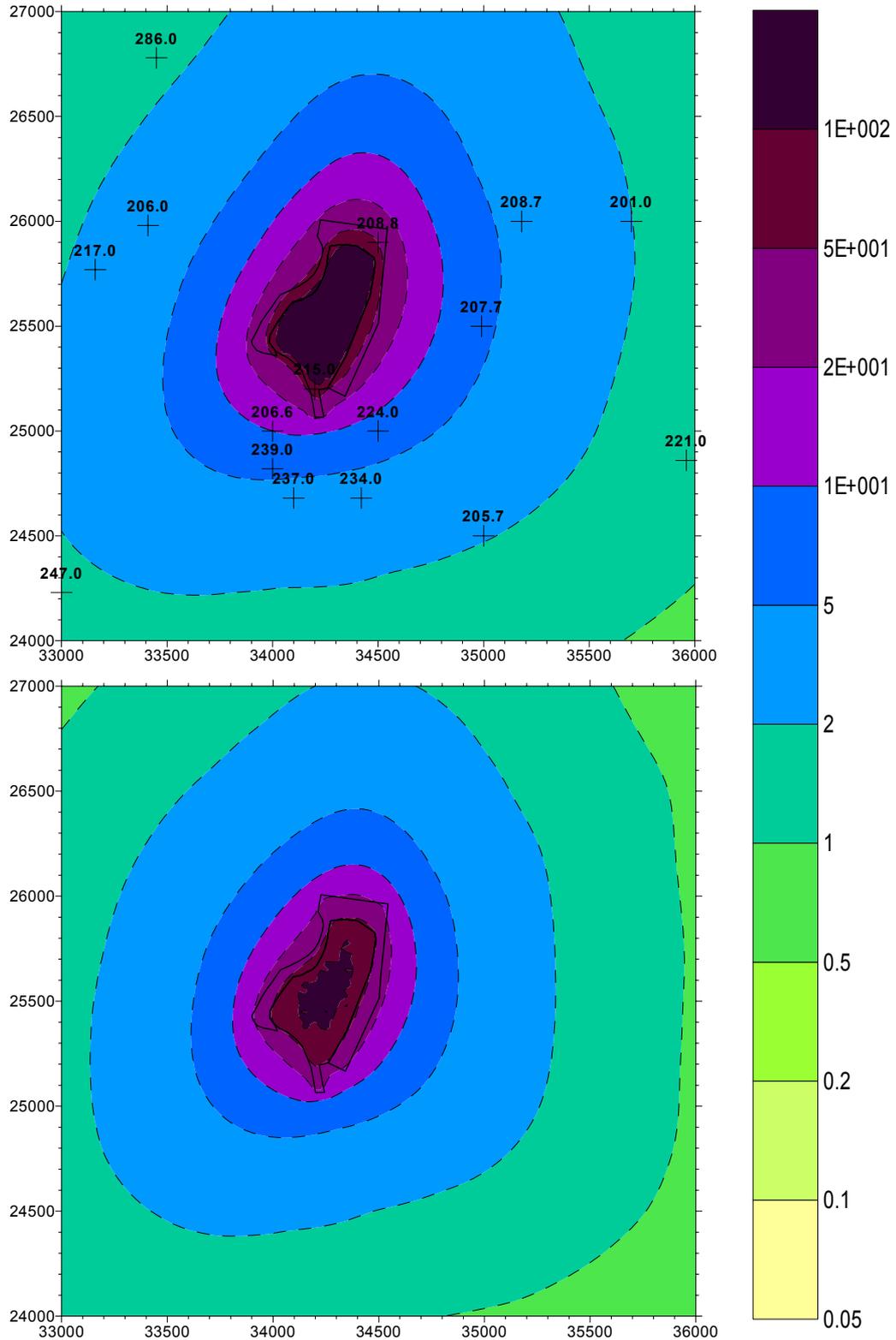
**Abbildung 41:** Radonkonzentration in  $\text{Bq/m}^3$  in der Umgebung der Bergehalde Crossen (oben) und Beitrag durch Situationen mit stabiler atmosphärischer Schichtung (unten); Wi92 bis So93



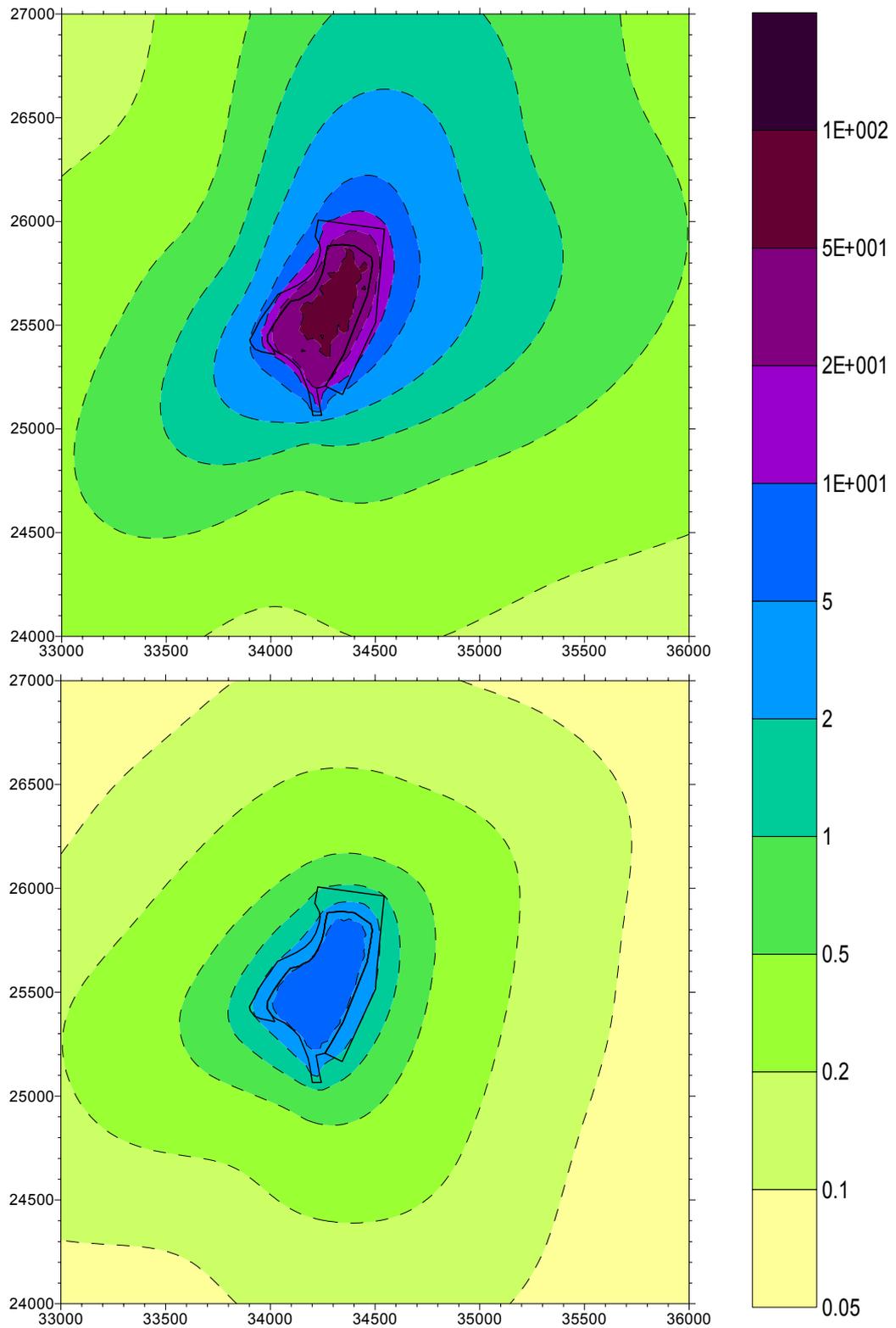
**Abbildung 42:** Beiträge zur Radonkonzentration in  $\text{Bq/m}^3$  in der Umgebung der Bergehalde Crossen durch Situationen mit neutraler (oben) bzw. labiler (unten) atmosph. Schichtung; Wi92 bis So93



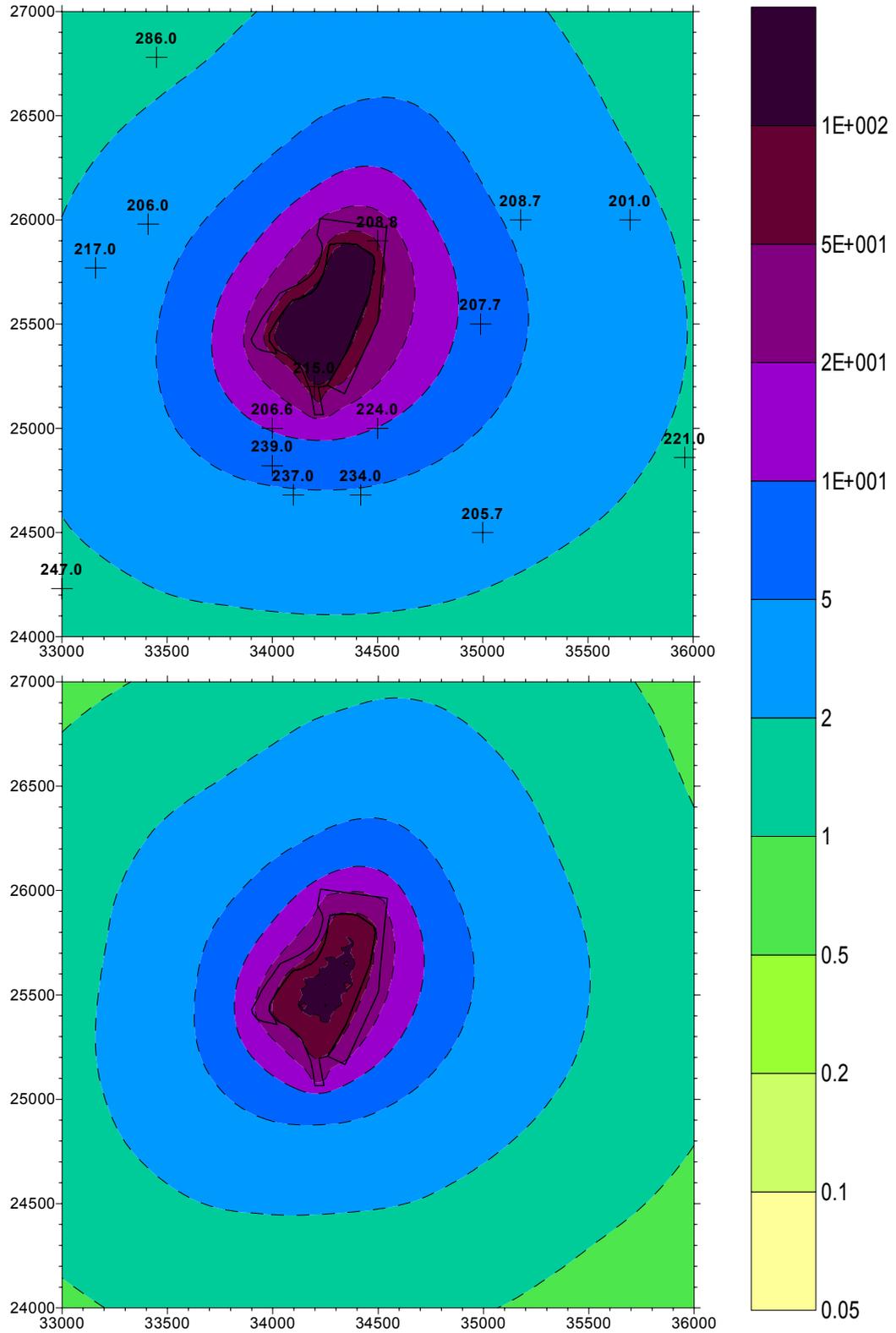
**Abbildung 43:** Radonkonzentration in  $\text{Bq/m}^3$  in der Umgebung der Bergehalde Crossen (oben) und Beitrag durch Situationen mit stabiler atmosphärischer Schichtung (unten); 9/92 bis 1/93



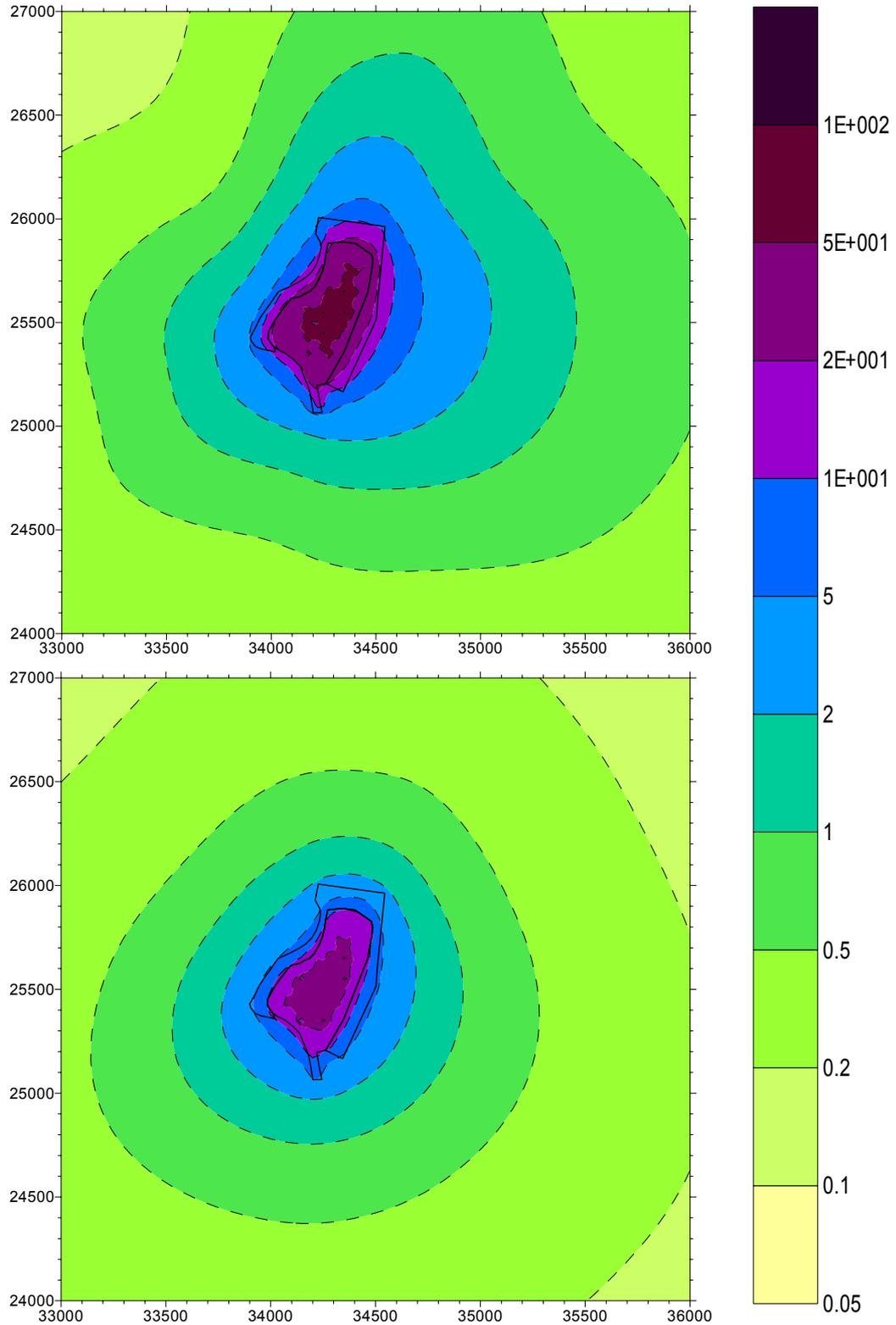
**Abbildung 44:** Beiträge zur Radonkonzentration in  $\text{Bq/m}^3$  in der Umgebung der Bergehalde Crossen durch Situationen mit neutraler (oben) bzw. labiler (unten) atmosph. Schichtung; 9/92 bis 1/93



**Abbildung 45:** Radonkonzentration in  $\text{Bq/m}^3$  in der Umgebung der Bergehalde Crossen (oben) und Beitrag durch Situationen mit stabiler atmosphärischer Schichtung (unten); 2/93 bis 8/93



**Abbildung 46:** Beiträge zur Radonkonzentration in  $\text{Bq/m}^3$  in der Umgebung der Bergehalde Crossen durch Situationen mit neutraler (oben) bzw. labiler (unten) atmosph. Schichtung; 2/93 bis 8/93



Aus den Abbildungen 41, 43 und 45, die für den Gesamtzeitraum Winter 92 bis Sommer 93 bzw. separat für die beiden Halbjahre jeweils im oberen Bild die berechnete Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre und im unteren Bild den Beitrag durch Situationen mit stabiler Wetterlage darstellen, ist der hohe Anteil der Ausbreitungsklassen AK 1 und 2 an der insgesamt resultierenden Radonkonzentration ersichtlich. Für neutrale atmosphärische Schichtung zeigt sich auch bei diesen Rechnungen eine stärker ausgeprägte azimutale Struktur (siehe obere Bilder in den Abbildungen 42, 44 und 46). Der relativ geringe Beitrag von Wetterlagen mit labiler atmosphärischer Schichtung zur Radonbelastung - insbesondere Winterhalbjahr - ist aus den unteren Bildern der Abbildungen 42, 44 und 46 ersichtlich.

Ein Vergleich der insgesamt (über alle AK) unter winterlichen bzw. sommerlichen Bedingungen berechneten Radonkonzentration in der Umgebung der ehemaligen Bergehalde (siehe obere Bilder der Abbildungen 43 und 45) läßt erwarten, daß im Sommer etwas höhere Belastungen auftreten als im Winter. Die jahreszeitlichen Unterschiede sind allerdings nicht gravierend. Durch jahreszeitliche Schwankungen der räumlichen Verteilung der Radonexhalationsrate von Halden infolge advektiver Bodenluftströmungen (siehe z.B. [29]), durch veränderte Wassergehalte des Haldenmaterials u.ä. können die aus der AK-Statistik resultierenden Unterschiede modifiziert werden.

Nachfolgend wird deshalb der Vergleich von Rechen- und Meßwerten zur Radonkonzentration in der Umgebung der ehemaligen Bergehalde Crossen nur für die Jahresmittelwerte (Zeitraum Winter 1992/93 bis Sommer 1993) vorgenommen. Für die im oberen Bild von Abbildung 41 dargestellten 16 Meßpunkte (MP) enthält Tabelle 6 die Meßwerte und die Rechenergebnisse. Es sei vermerkt, daß sowohl in den Abbildungen 41 bis 46 als auch in Tabelle 6 bei den Koordinaten die beiden führenden Ziffern (45 bzw. 56) im Rechts- und Hochwert (RW = 45zzzzz, HW = 56zzzzz) weggelassen wurden. Beim Vergleich der Meß- und Rechenwerte ist zu berücksichtigen, daß die Meßwerte auch den geogenen Untergrund  $C_{\text{geo}}$  enthalten, für den am Standort Crossen mit einem Mittelwert von etwa  $20 \text{ Bq/m}^3$  gerechnet werden kann [1].

**Tabelle 6:** Koordinaten (RW bzw. HW in m) von 16 Meßpunkten (MP) zur Radonkonzentration in der Umgebung der Bergehalde Crossen; Meßwerte ( $C_{\text{Meß}}$ ) und Rechenwerte ( $C_{\text{Rech}}$ ) in  $\text{Bq/m}^3$ ; Differenz  $\Delta = C_{\text{Meß}} - C_{\text{Rech}}$  (starke Abweichungen von  $C_{\text{geo}} \cong 20 \text{ Bq/m}^3$  fett markiert)

MP	RW	HW	$C_{\text{Meß}}$	$C_{\text{Rech}}$	$\Delta$	MP	RW	HW	$C_{\text{Meß}}$	$C_{\text{Rech}}$	$\Delta$
201.0	35700	26000	22,5	2,2	20,3	217.0	33160	25770	28,5	2,6	25,9
205.7	35000	24500	31,0	2,4	28,6	221.0	35960	24860	26,5	1,6	24,9
206.0	33410	25980	22,0	3,2	18,8	224.0	34500	25000	22,0	8,9	13,1
206.6	34000	25000	56,5	10,3	<b>46,2</b>	234.0	34420	24680	48,5	4,2	<b>44,3</b>
207.7	34990	25500	30,0	6,9	23,1	237.0	34100	24680	36,5	4,4	32,1
208.7	35180	26000	37,5	4,2	33,3	239.0	34000	24820	48,5	6,0	<b>42,5</b>
208.8	34500	25900	106,5	48,3	<b>58,2</b>	247.0	33000	24230	25,5	1,6	23,9
215.0	34200	25200	100,5	84,4	16,1	286.0	33450	26780	17,0	1,7	15,3

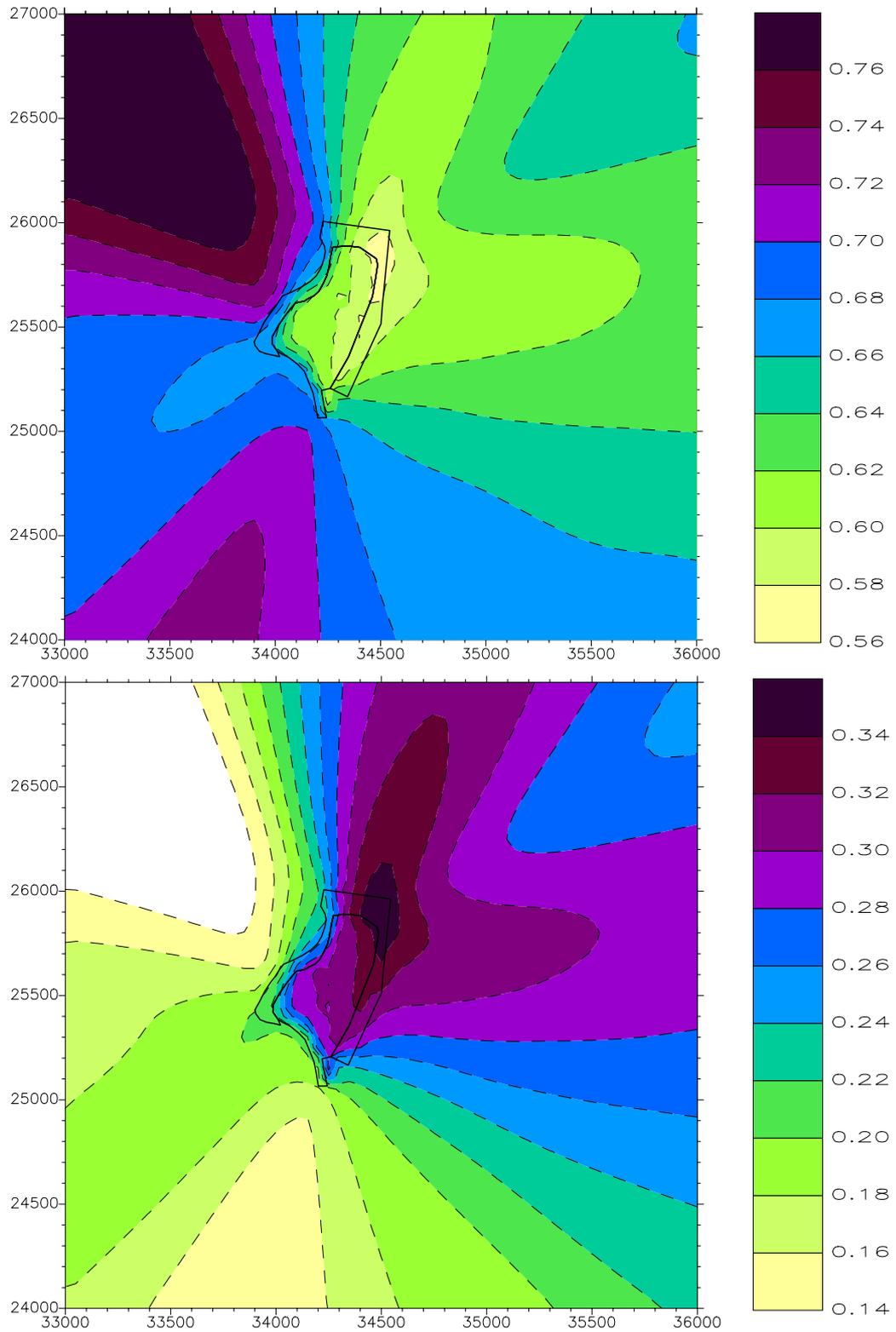
Gemäß Tabelle 6 ergibt sich die größte Abweichung zwischen der Differenz  $\Delta$  und dem mittleren geogenen Untergrundwert  $C_{\text{geo}}$  für den nördlich der Bergehalde im Bereich der kontaminierten Umgebung gelegenen Meßpunkt MP 208.8. Da sich nun nördlich der Bergehalde keine weiteren Quellen befinden, muß davon ausgegangen werden, daß für den MP 208.8 eine lokale Besonderheit vorliegt, die mit dem hier verwendeten Modell nicht erfaßt wird.

Eine mögliche Ursache für die relativ starke Diskrepanz von Meßwert (plus Untergrundwert) und Rechenwert am MP 208.8 könnten lokal erhöhte Werte der spezifischen Aktivität (und demgemäß auch der Radonexhalationsrate) im nördlichen Teil der Bergehalde bzw. der kontaminierten Fläche sein. Eine andere denkbare Ursache für die festgestellte Abweichung könnte darin bestehen, daß in diesem bzgl. der Hauptwindrichtung (bei neutraler atmosphärischer Schichtung) im Windschatten der Halde gelegenen Meßpunkt (vgl. Abbildung 24) Luftströmungen vorliegen, die auch bei den größeren Windgeschwindigkeiten in Anemometerhöhe der beiden Ausbreitungsklassen AK 3 und 4 einen maßgeblichen Beitrag zur Radonkonzentration verursachen. Solche, von der Topographie der Halde erzeugten Besonderheiten der Luftströmung in Bodennähe werden im hier verwendeten Modell (für ebenes Gelände) nicht erfaßt. Für eine genauere Berechnung der Radonbelastung am Meßpunkt 208.8 wäre vmtl. das in [2] für Gelände mit komplexer Topographie entwickelte Modell besser geeignet.

Die Vermutung, daß die starke Abweichung der mit dem K-Modell für den MP 208.8 berechneten Radonkonzentration vom Meßergebnis durch spezielle Strömungsverhältnisse in der bodennahen Atmosphäre nördlich der Bergehalde bedingt ist, wird durch Abbildung 47 untermauert, in der in Analogie zur Abbildung 40 die räumliche Verteilung der Anteile stabiler und neutraler Wetterlagen an der gesamten berechneten Radonkonzentration in der Umgebung der Bergehalde dargestellt ist. Die Anteile liegen in den Bereichen  $67 \% \pm 12 \%$  für die stabile und  $24 \% \pm 14 \%$  für die neutrale atmosphärische Schichtung. Die räumliche Verteilung der beiden Anteile korreliert sehr gut mit der in Abbildung 24 für den Zeitraum Winter 1992/93 bis Sommer 1993 dargestellten azimutalen Verteilung der Windrichtungshäufigkeit. Aus Abbildung 47 ist erkennbar, daß der am nordöstlichen Haldenrand positionierte MP 208.8 in dem Bereich liegt, für den meteorologische Situationen mit neutraler atmosphärischer Schichtung mit ca. 35 % nach unseren Berechnungen einen relativ hohen Anteil an der gesamten Radonbelastung liefern. Der Anteil von stabilen Wetterlagen ist für diesen Meßpunkt dagegen mit ca. 58 % relativ klein. Folglich ist zu erwarten, daß auf Basis einer genaueren Modellierung der bodennahen Luftströmung im Bereich der Bergehalde Crossen für den MP 208.8 eine bessere Übereinstimmung von Meß- und Rechenwert erreichbar ist.

Die anderen Meßpunkte, für die gemäß Tabelle 6 erhebliche Unterschiede zwischen  $\Delta$  und  $C_{\text{geo}}$  zu konstatieren sind (MP 206.6, MP 234.0 und MP 239.0), liegen südlich der Bergehalde Crossen in einem Gebiet, in dem sich westlich bzw. östlich der Zwickauer Mulde kontaminierte Flächen des ehemaligen Erzaufbereitungsbetriebes befinden. Es ist zu vermuten, daß die Beachtung der Beiträge der anderen anthropogenen Radonquellen des Standorts Crossen für die südliche Umgebung der Bergehalde zur besseren Übereinstimmung von Meß- und Rechenwerten zur Radonkonzentration führt. Deshalb werden im nächsten Abschnitt entsprechende Berechnungen durchgeführt. Für den gemäß [11] für eine reale Flächenquelle vorgesehenen Vergleich der Modellrechnungen von GRS bzw. BS kann aber von den in Tabelle 6 angegebenen Rechenwerten bzw. von den in den Abbildungen 41 bis 46 dargestellten Konzentrationsverteilungen ausgegangen werden.

**Abbildung 47:** Anteile stabiler und neutraler Wetterlagen (AK-Statistik Winter 92/93 bis Sommer 93) zur Rn-Belastung der Bergehalde; oben:  $C_s(x, y, z_b)/C(x, y, z_b)$ ; unten:  $C_n(x, y, z_b)/C(x, y, z_b)$



#### 4.3.2 Berücksichtigung der weiteren anthropogenen Radonquellen des Standortes Crossen

Zur detaillierten Darstellung der weiteren anthropogenen Radonquellen am Standort Crossen und zu Abschätzungen ihrer Radonemission auf der Basis von Messungen der WISMUT GmbH zur Radonexhalationsrate dieser Objekte sei auf [1] verwiesen. Dabei handelt es sich um die im Westen des Standortes gelegenen Industriellen Absetzanlagen (IAA) Helmsdorf, Dänkritz I und Dänkritz II sowie einige südlich der Bergehalde Crossen gelegene kontaminierten Betriebsflächen und die ehemalige Mülldeponie im Osten der Bergehalde.

Die drei Absetzanlagen mit ihren Spülstränden und Dämmen als wesentliche Radonquellen sind so weit von der Bergehalde entfernt, daß sie für die Berechnung von Beiträgen zur Radonkonzentration in der Umgebung der Bergehalde als Punktquellen modelliert werden können. Die Tabelle 7 enthält die Koordinaten dieser bodennahen "Punktquellen" und die nach [1] angesetzten Quellstärken, die aus den Flächen und Radonexhalationsraten resultieren. Die Radonemission der drei Absetzanlagen liegt insgesamt bei 1060 kBq/s; die Emission der IAA Helmsdorf von 950 kBq/s ist maßgeblich.

Tabelle 7: Koordinaten (RW und HW) und Quellstärken (Q) der als "Punktquellen" betrachteten Flächen der IAA Helmsdorf, Dänkritz I und Dänkritz II, die aus Flächen (F) und Radonexhalationsraten (J) nach den Abschätzungen von [1] resultieren

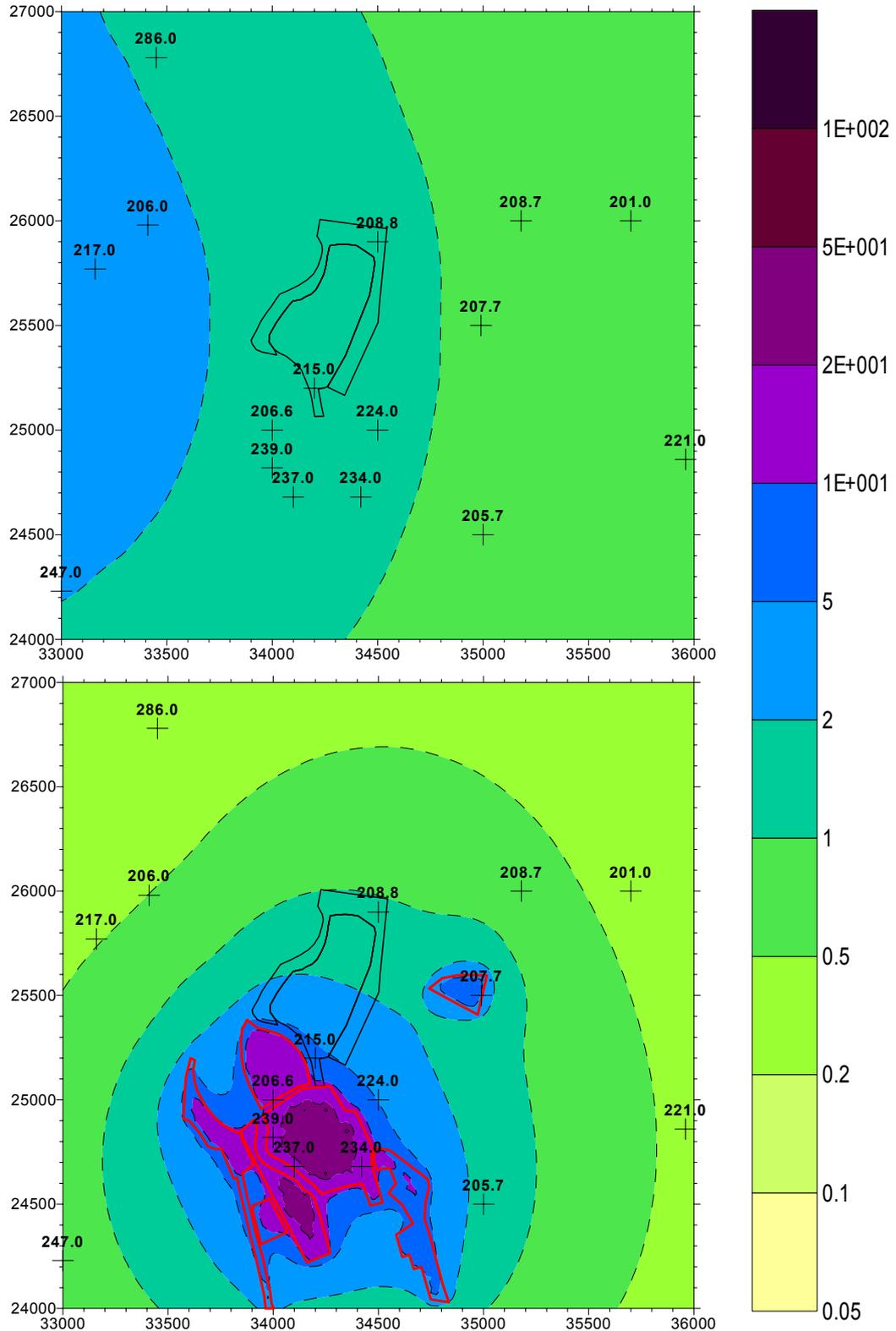
Objekt	RW in m	HW in m	F in ha	J in Bq/(m <sup>2</sup> ·s)	Q in kBq/s
Spülstrand IAA Helmsdorf	31700	25500	72	0,8	580
Westdamm IAA Helmsdorf	31000	25300	4	2	80
Hauptdamm IAA Helmsdorf	32100	25500	13	2	260
Wüstergrunddamm IAA H.	32300	24700	2	1	20
Freiwasserfläche IAA H.	31700	25000	130	0,01	10
Damm/Spülstrand IAA D. I	31000	26000	7	1	70
Damm/Spülstrand IAA D. II	30300	26200	4	1	40

Die südlich der Bergehalde gelegenen kontaminierten Betriebsflächen sind als Flächenquellen zu behandeln. Ihre Umrise sind im unteren Bild von Abbildung 48 dargestellt. Die für die Radon-Ausbreitungsrechnungen verwendeten Quellstärken ergeben sich aus den in [1] für diese Objekte abgeschätzten mittleren Radonexhalationsraten und ihren Flächen. Diese Daten sind in Tabelle 8 zusammengefaßt. Die Radonemission dieser 7 Flächenquellen liegt insgesamt bei ca. 200 kBq/s.

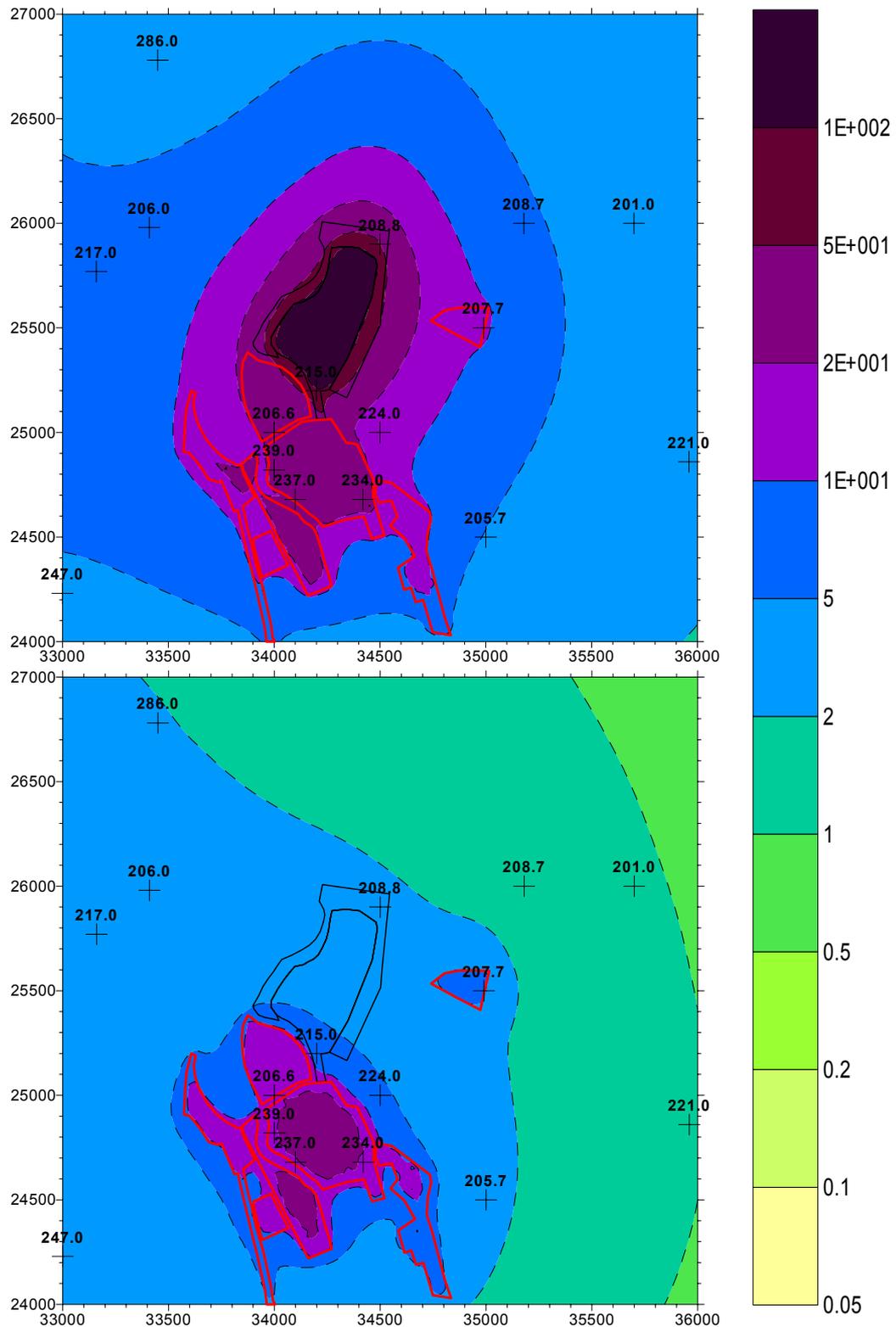
Abbildung 48 zeigt die mit dem K-Modell nach den Angaben der Tabellen 7 und 8 zur AK-Statistik des Zeitraumes Winter 1992/93 bis Sommer 1993 berechneten Radonkonzentration. In der Summe resultiert die im unteren Bild von Abbildung 49 gezeigte Verteilung der Radonbelastung durch die

weiteren Standortquelle. Das obere Bild von Abbildung 49 zeigt die Überlagerung dieser Verteilung mit der von der Bergehalde verursachten Radonbelastung (vgl. oberes Bild von Abbildung 41).

**Abbildung 48:** Radonkonzentration in  $\text{Bq/m}^3$  in der Umgebung der Bergehalde Crossen, verursacht durch Absetzanlagen (oben) und weitere kontaminierte Betriebsflächen (unten); Wi92 bis So93



**Abbildung 49:** Radonkonzentration in  $\text{Bq/m}^3$  in der Umgebung der ehemaligen Bergehalde Crossen (oben) unter Beachtung der Beiträge durch andere Standort-Quellen (unten); Wi92 bis So93



**Tabelle 8:** Abschätzung der Radonemission kontaminierter Betriebsflächen im Süden der Bergehalde und der östlich der Bergehalde gelegenen Mülldeponie; Lage (RW und HW etwa in Flächenmitte), Flächen (F) und Radonexhalationsraten (J) sowie resultierende Quellstärken (Q); nach [1]

Objekt	RW in m	HW in m	F in ha	J in Bq/(m <sup>2</sup> ·s)	Q in kBq/s
Erzaufbereitungsbetrieb	34200	24800	20	0,4	80
nordwestliches Vorfeld	34000	25200	9	0,3	27
Erzlagerfläche	34100	24500	8	0,5	40
DFA-Betriebgelände	34000	24400	2	0,2	4
Betriebsbahnhof, Gleise	33700	24800	8	0,3	24
Sport- und ZV-Gelände	34700	24500	9	0,2	18
Mülldeponie	34900	25500	3	0,2	6

Aus den Abbildungen 48 und 49 ist im Vergleich zum oberen Bild von Abbildung 41 ersichtlich, daß die weiteren anthropogenen Radonquellen des Standortes Crossen in der Umgebung der Bergehalde Beiträge zur Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre verursachen, die für den Vergleich von Meß- und Rechenwerten berücksichtigt werden sollten.

In Tabelle 9 sind – analog zur Tabelle 6 für die allein durch die Bergehalde und ihre kontaminierte Umgebung verursachte Radonbelastung - die insgesamt nach Beachtung aller Quellen berechneten Radonkonzentrationen an den 16 Meßpunkten den jeweiligen Meßwerten gegenübergestellt.

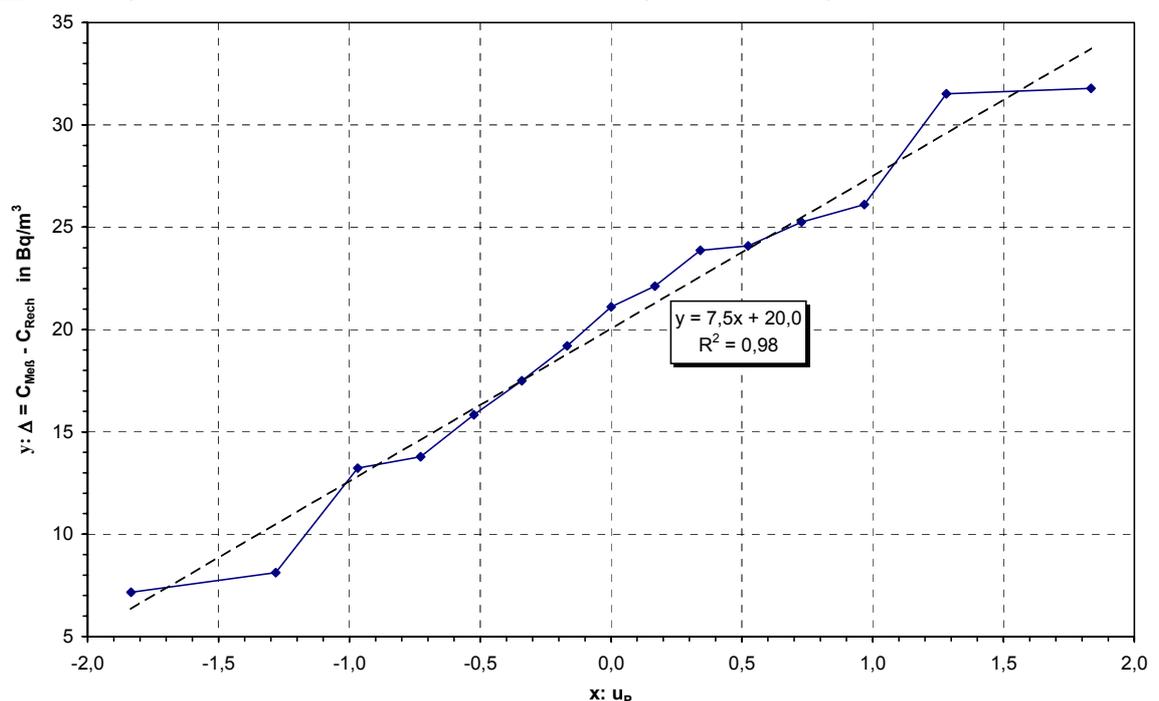
**Tabelle 9:** Koordinaten (RW bzw. HW in m) von 16 Meßpunkten (MP) zur Radonkonzentration in der Umgebung der ehemaligen Bergehalde Crossen; Meßwerte ( $C_{\text{Meß}}$ ) und Rechenwerte ( $C_{\text{Rech}}$ ) in Bq/m<sup>3</sup> bei Beachtung aller Radonquellen des Standortes Crossen gemäß Abbildung 49 (oberes Bild); Differenz  $\Delta = C_{\text{Meß}} - C_{\text{Rech}}$  (starke Abweichungen von  $C_{\text{geo}} \cong 20$  Bq/m<sup>3</sup> fett markiert)

MP	RW	HW	$C_{\text{Meß}}$	$C_{\text{Rech}}$	$\Delta$	MP	RW	HW	$C_{\text{Meß}}$	$C_{\text{Rech}}$	$\Delta$
201.0	35700	26000	22,5	3,3	19,2	217.0	33160	25770	28,5	6,4	22,1
205.7	35000	24500	31,0	4,9	26,1	221.0	35960	24860	26,5	2,6	23,9
206.0	33410	25980	22,0	6,2	15,8	224.0	34500	25000	22,0	14,8	7,2
206.6	34000	25000	56,5	25,0	31,5	234.0	34420	24680	48,5	23,2	25,3
207.7	34990	25500	30,0	12,5	17,5	237.0	34100	24680	36,5	22,7	13,8
208.7	35180	26000	37,5	5,7	31,8	239.0	34000	24820	48,5	24,4	24,1
208.8	34500	25900	106,5	50,5	<b>56,0</b>	247.0	33000	24230	25,5	4,4	21,1
215.0	34200	25200	100,5	92,4	8,1	286.0	33450	26780	17,0	3,8	13,2

Aus Tabelle 9 folgt, daß durch die Berücksichtigung der weiteren anthropogenen Radonquellen des Standortes Crossen für die Umgebung der Bergehalde eine deutlich bessere Übereinstimmung der Meß- und Rechenwerte erreicht wurde. Dies betrifft besonders den Bereich südlich der Bergehalde. Die vorher für die Meßpunkte 206.6, 234.0 und 239.0 festgestellten relativ starken Abweichungen der Differenz  $\Delta = C_{\text{Meß}} - C_{\text{Rech}}$  vom erwarteten mittleren geogenen Untergrundwert  $C_{\text{geo}} \cong 20 \text{ Bq/m}^3$  bestehen nun nicht mehr. Lediglich am Meßpunkt MP 208.8 am Nordrand der Bergehalde verbleibt die oben diskutierte starke Abweichung zwischen Meß- und Rechenwert.

Die Differenz  $\Delta$  enthält unterschiedliche Beiträge, wozu neben Meßunsicherheiten verschiedene Ungenauigkeiten der Modellierung gehören (z.B. Ansatz von ebenem Gelände und einheitlicher Bodenrauigkeit). Neben Unsicherheiten und Vereinfachungen des Ausbreitungsmodells kommen Unsicherheiten zu meteorologischen Daten bzw. ihrer Übertragung von der DWD-Wetterstation Gera-Leumnitz auf den untersuchten Standort, Unsicherheiten bzgl. der Radonemissionsraten der Quellen sowie die real vorhandene Heterogenität der Radonexhalationsraten in den Werten von  $\Delta$  zum Ausdruck. Ein einheitlicher  $\Delta$ -Wert für alle Meßpunkte wäre aber auch deshalb nicht zu erwarten, weil der geogene Untergrund  $C_{\text{geo}}$  keine konstante Größe ist. Wegen der vielen möglichen Einflüsse auf die Differenz von Meß- und Rechenwerten, die sich i.w. additiv überlagern, sollte  $\Delta$  näherungsweise normalverteilt sein. Die Überprüfung dieser Hypothese zeigt Abbildung 50, in der für 15 Meßpunkte (ohne MP 208.8) die der Größe nach geordneten  $\Delta$ -Werte den Perzentilen  $u_p$  der Standardnormalverteilung (mit den Wahrscheinlichkeiten  $P_i = (2i-1)/2n$  für  $i = 1$  bis  $n = 15$ ) den  $\Delta$ -Werten gegenübergestellt sind. Das hohe Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,98$  bestätigt die "Normalität" der Verteilung von  $\Delta$ . Die resultierenden Schätzungen für den Mittelwert von  $\Delta$  (bzw.  $C_{\text{geo}}$ ) von  $20,0 \text{ Bq/m}^3$  bei einer Standardabweichung von  $7,5 \text{ Bq/m}^3$  stellen u.E. plausible Werte dar.

Abbildung 50: Prüfung von  $\Delta = C_{\text{Meß}} - C_{\text{Rech}}$  auf Normalverteilung und Schätzung statistischer Kennwerte



## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende (Teil-) Bericht zum BfS-Vorhaben StSch 4270 umfaßt die Darstellung des für die Vergleichsrechnungen von BS verwendeten K-Modells (Kapitel 2), die Ergebnisse der mit diesem Modell für den Fall einer festen Windrichtung und neutraler atmosphärischer Schichtung für drei Quellentypen (Punkt-, Linien-, Flächenquelle) durchgeführten Ausbreitungsrechnungen (Kapitel 3) sowie die Ergebnisse von Radonausbreitungsrechnungen für reale meteorologische Gegebenheiten, die für eine bodennahe Punktquelle sowie für die Umgebung der ehemaligen Bergehalde Crossen durchgeführt wurden (Kapitel 4), wozu auch ein Vergleich von Meß- und Rechenwerten erfolgte.

Die aus unserer Sicht wesentlichen Ergebnisse lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

1. Der Koeffizient  $K_z$  der vertikalen turbulenten Diffusion für neutrale atmosphärische Schichtung stimmt nach unserem Modell nur für relativ hohe Windgeschwindigkeiten (in Anemometerhöhe; hier:  $u_{10}$ ) mit dem dbzgl. Ansatz der GRS überein. Die Relation  $K_z/u_{10}$  wird in unserem Modell mit der Windgeschwindigkeit kleiner, was höhere Radonkonzentrationen in Bodennähe bei den meteorologischen Situationen mit geringer Windgeschwindigkeit bewirkt, als sie nach der von der GRS gemäß VDI-3783-8 verwendeten Parametrisierung von  $K_z$  resultieren. Für stabile und labile atmosphärische Schichtung erfolgte im aktuellen Vorhaben kein Vergleich verschiedener gebräuchlicher  $K_z$ -Parametrisierungen. Die dbzgl. Modellunterschiede dürften aber ähnlich sein.
2. Der Vergleich bekannter Parametrisierungen für den horizontalen Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  läßt ebenso auf erhebliche Unsicherheiten bei der Modellierung der turbulenten Diffusion schließen. Für eine neutrale atmosphärische Schichtung stimmt die aus den Ergebnissen der aktuellen Windkanal-Experimente der Universität Hamburg abgeleitete Parametrisierung gut mit der für bodennahe Quellen bekannten Parametrisierung nach PASQUILL-GIFFORD überein. Nach unserer Einschätzung liefert diese Parametrisierung auch für stabile bzw. labile Schichtung plausible Ergebnisse, weshalb sie den Ausbreitungsrechnungen von Kapitel 4 zugrunde gelegt wurde.
3. Die für eine Punkt-, Linien- bzw. Flächenquelle berechneten Radonkonzentrationen zeigen in der Nähe der Quelle die erwarteten Unterschiede in den Verteilungen, wogegen sie sich bei größerer Entfernung angleichen. Weiterführende Untersuchungen können u.E. auf den Fall "Punktquelle" beschränkt werden, da alle wesentlichen Ansätze bereits hier wirksam werden.
4. Aus den zum Modellvergleich durchgeführten Ausbreitungsrechnungen mit dem K-Modell bei Ansatz der  $K_z$ -Parametrisierung nach VDI-3783-8 kann u.E. der Schluß gezogen werden, daß die mathematische Form des Ausbreitungsmodells (EULER- bzw. LAGRANGE-Modell) nebensächlich ist. Entscheidend ist die zugrunde gelegte Parametrisierung der turbulenten Diffusion.
5. Die Ausbreitungsrechnungen für eine Punktquelle für reale meteorologische Gegebenheiten untermauern die (bekannte) Relevanz einer korrekten Modellierung der turbulenten Diffusion bei geringer Windgeschwindigkeit, insbesondere für stabile atmosphärische Schichtung. Solche Bedingungen wurden im aktuellen Vorhaben nicht experimentell untersucht. Da nach unseren Berechnungen die stabilen Wetterlagen ca. 70 % der Radonbelastung bewirken, sollte hier der Schwerpunkt für weiterführende Untersuchungen gesetzt werden.
6. Die K-Modell-Berechnungen zur Radonkonzentration in der Umgebung der früheren Bergehalde Crossen stimmen bei Beachtung aller relevanten Quellen gut mit den Meßergebnissen überein.

## 6 LITERATUR

- [1] BRENK SYSTEMPLANUNG  
Grundsatzentscheidung über die Sanierung der IAA Helmsdorf am Standort Crossen; Aachen, Oktober 1995
- [2] BRENK SYSTEMPLANUNG  
Grundsatzentscheidung über die Sanierung der Absetzanlage Borbachtal und der Halden im Gebiet von Schlema-Alberoda; Aachen, März 1996
- [3] BRENK SYSTEMPLANUNG  
Gutachterliche Stellungnahme zur Verfüllung des Tagebaurestloches Lichtenberg am Standort Ronneburg; Aachen, 15.07.1998
- [4] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH  
Aspekte zur Planung des Langzeitmonitorings der Radonbelastungen im Gebiet von Schlema-Alberoda; Aachen, Oktober 1999
- [5] Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 27.02.1986; GmBl., Ausg. A, Bonn, 28.02.1986
- [6] DER BUNDESMINISTER FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (HRSG.)  
Modelle, Annahmen und Daten mit Erläuterungen zur Berechnung der Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser zum Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte nach § 45 StrlSchV; Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 17, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, New York 1992
- [7] VDI-3782-1, Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre - Gaußsches Ausbreitungsmodell für Luftreinhaltungspläne; Beuth Verlag, Berlin, Oktober 1992
- [8] VDI-3783-8 (Entwurf), Umweltmeteorologie - Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle; Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2001
- [9] THIELEN, H.  
Übermittlung von Meßdaten aus dem Windkanal (Uni Hamburg) für Punkt- und Linienquelle (Datei: GRS E1.xls); Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 14.02.2002
- [10] THIELEN, H.  
Randbedingungen für die numerischen Modellierungen im Rahmen des Forschungsvorhabens StSch 4270 (Datei: Randbedingungen für die numerischen Modellierungen.doc); Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 22.08.2001

- [11] THIELEN, H.  
Protokoll zum 3. Projektgespräch zum Vorhaben StSch 4270 am 19./20.02.2002 in Berlin  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 04.03.2002
- [12] STULL, R.B.  
An Introduction to Boundary Layer Meteorology; Dordrecht/Boston/London, 1988
- [13] BUSINGER, J.A.; WYNGARD, J.C.; IZUMI, Y.; BRADLEY, E.F.  
Flux Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer  
J. Atmos. Sci., **28** (1971), 181-189
- [14] DYER, A.J.  
A Review of Flux-Profile Relations  
Bound. Layer Meteor., **1** (1974), 363-372
- [15] BLACKADAR, A.K.,  
The Vertical Distribution of Wind and Turbulent Exchange in a Neutral Atmosphere  
J. Geophys. Res. **67** (1962), 3095-3102
- [16] DELAGE, Y.  
A numerical study of the nocturnal atmospheric boundary layer  
Quart. J. Roy. Meteor. Soc. **100** (1974), 351-364
- [17] ETLING, D.; DETERING, H.W.; WAMSER, M.  
Parametrisierung turbulenter Flüsse in mesoskaligen Simulationsmodellen: Eine Fallstudie mit  
Schließungsansätzen erster Ordnung  
Meteorol. Rdsch. **39** (1986), 178-188
- [18] WIPPERMAN, F.  
Properties of the thermal boundary layer of the atmosphere obtained with a PBL model  
Beitr. Phys. Atmos. **48** (1975), 30-45
- [19] RODRIGUEZ, D.; WALKER, H.; KLEPIKOVA, N.; KOSTRIKOV, A.; ZHUK, Y.  
Evaluation of Two Pollutant Dispersion Models over Continental Scales  
Atmospheric Environment **79** (1995), 799-812
- [20] BARTHEL, R.  
Modellrechnungen Euler-Modell (Datei Euler-Modell.doc);  
Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 26.10.2001
- [21] THIELEN, H.  
Protokoll zum 2. Projektgespräch zum Vorhaben StSch 4270 am 29./30.10.2001 in Hamburg;  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 27.11.2001

- [22] BARTHEL, R.  
Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen mit  $\sigma_y(x)$  nach "VDI 3783 Blatt 8 (Entwurf)";  
Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 14.02.2002
- [23] BARTHEL, R.  
Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen mit  $\sigma_y(x)$  nach Windkanal-Ergebnissen;  
Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 21.02.2002
- [24] BARTHEL, R.  
Übermittlung von Daten zur Bergehalde Crossen und von Ausbreitungsklassenstatistiken der DWD-  
Wetterstation Gera-Leumnitz an die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
(Dateien: Halde-Crossen.xls, Gaklwi92.dat, Gaklso93.dat, Gakl-10a.dat)  
Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 22.02.2002
- [25] KLUG, W.  
Ein Verfahren zur Bestimmung der Ausbreitungsbedingungen aus synoptischen Beobachtungen;  
*Staub*. **29** (1969), S. 143
- [26] GIFFORD, F. A.  
Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion;  
*Nuclear Safety* 2 (1961), pp. 44 - 77
- [27] BARTHEL, R.; GOLDAMMER, W..  
Methodik zur Eingrenzung der Umgebung von bergbaulichen Altlasten mit potentiell radiologisch  
relevanter Erhöhung der Radonkonzentration  
Brenk Systemplanung, Aachen, 02.09.1998
- [28] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT UND BUNDESAMT  
FÜR STRAHLENSCHUTZ  
Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon und  
seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungs-  
grundlagen - Bergbau: Teil Radon); Entwurf, Stand 30.07.1999  
Bonn, 30.07.1999
- [29] BARTHEL, R.  
Bewertung der kurz- und langfristigen Wirksamkeit von Haldenabdeckungen zur Reduzierung der  
Radonemission;  
12. Statusgespräch Forschung zum Problemkreis "Radon", Berlin, 26./27. Oktober 1999,  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, Dezember 1999



**Ingenieurbüro  
Dr.-Ing. Achim Lohmeyer  
Karlsruhe und Dresden**  
Strömungsmechanik  
Immissionsschutz  
Windkanaluntersuchungen

Mohrenstraße 14 Telefon: 0351 / 83 914 - 0  
01445 Radebeul Telefax: 0351 / 83 914 59  
email: info.dd@lohmeyer.de  
USt-IdNr.: DE 143545044

**UNTERSUCHUNGEN ZUR FESTLEGUNG VON  
PARAMETERN FÜR DIE MODELLIERUNG DER  
RADONAUSSBREITUNG AUS BODENNAHEN  
FLÄCHENQUELLEN – MODELLIERUNG MIT  
LASAT 2.8**

Auftraggeber: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Schwertnergasse 1  
50667 Köln

Dr. rer. nat. M. Stockhause

Dr.-Ing. A. Lohmeyer

Juni 2002  
Projekt 1611/2352

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MODELLBESCHREIBUNG .....</b>	<b>2</b>
	2.1 Prinzipielles.....	2
	2.2 Grenzschichtmodell (Version 2.1).....	4
<b>3</b>	<b>DURCHGEFÜHRTE AUSBREITUNGSRECHNUNGEN .....</b>	<b>9</b>
	3.1 Gitterdefinition.....	9
	3.2 Quellkonfiguration.....	9
	3.3 Weitere Vorgabeparameter.....	12
	3.4 Auswerteparameter .....	12
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>13</b>
	4.1 Nachweis der Geschwindigkeitsunabhängigkeit der Ergebnisse .....	13
	4.2 Ergebnisse für die drei untersuchten Quellgeometrien .....	20
<b>5</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>24</b>
<b>A1</b>	<b>LASAT-EINGABEDATEIEN FÜR DIE PUNKTQUELLE UND <math>U_{10} = 1</math> M/S.....</b>	<b>25</b>
<b>A2</b>	<b>VERTIKALPROFILE DER VERWENDETEN GRENZSCHICHTPARAMETER.</b>	<b>27</b>

Hinweise:

Die Tabellen und Abbildungen sind kapitelweise durchnummeriert.

Literaturstellen sind im Text durch Name und Jahreszahl zitiert. Im Kapitel Literatur findet sich dann die genaue Angabe der Literaturstelle.

Es werden Dezimalpunkte (= wissenschaftliche Darstellung) verwendet, keine Dezimalkommas. Eine Abtrennung von Tausendern erfolgt durch Leerzeichen.

## 1 AUFGABENSTELLUNG

Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) erstellt im Auftrag der Bundesanstalt für Strahlenschutz (BfS) einen Leitfaden zur Bewertung von Altstandorten bzw. Altlasten. In der Vergangenheit ist es bei Ausbreitungsrechnungen für Radon in Abhängigkeit vom verwendeten Ausbreitungsmodell zu unterschiedlichen Ergebnissen gekommen. Diese Unterschiede wurden auf unterschiedliche Grenzschichtmodelle bzw. unterschiedliche verwendete Turbulenzparametrisierungen und hier im wesentlichen auf Unterschiede in der vertikalen Diffusion zurückgeführt. Ziel eines Forschungsvorhabens ist es, die Unterschiede in den Rechenergebnissen für die verschiedenen Ausbreitungsmodelle und ihre unterschiedlichen Turbulenzparametrisierungen aufzuzeigen, zu analysieren und zu einer gemeinsamen Empfehlung für die Turbulenzparametrisierung für den Leitfaden zu kommen.

Dazu wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes von drei Modellierergruppen (Brenk Systemplanung, GRS und Lohmeyer) Modellrechnungen durchgeführt. Der vorliegende Bericht enthält die Beschreibung der Vorgehensweise und der Ergebnisse von Lohmeyer. Er ist ein Anhang zum Hauptbericht über die Ergebnisse des gemeinsamen Forschungsprojektes.

## 2 MODELLBESCHREIBUNG

Für die durchgeführten Ausbreitungsrechnungen wurde das Partikelmodell LASAT Version 2.8 mit dem Grenzschichtmodell Version 2.1 verwendet. Zur Modellbeschreibung wurden das LASAT-Handbuch (Janicke, 1998) und für das Grenzschichtmodell 2.1 zusätzlich Janicke et al. (2000) herangezogen. LASAT berechnet angetrieben von dreidimensionalen Wind- und Turbulenzfeldern dreidimensionale Stoffkonzentrationsverteilungen  $C(x,y,z)$  in Masseinheit/m<sup>3</sup> (in diesem Fall Bq/m<sup>3</sup>) als Folge der Emissionen einer beliebigen Anzahl von Quellen beliebiger Quellgeometrien (Punkt-, Linien-, Flächen-, Volumenquellen).

### 2.1 Prinzipielles

Das Ausbreitungsmodell LASAT ist vom Lagrange-Typ, das heißt es stellt die Konzentrationen des sich ausbreitenden Stoffes als Wolke diskreter Partikel dar. Diese Partikel erhalten an den Quellen den Emissionsraten dieser Quellen äquivalente Anfangsmassen  $m_n$  ( $n$  = Nummer des freigesetzten Partikels). Dann werden diese Partikel bei der Ausbreitungsrechnung durch ein vorgegebenes mittleres Windfeld unter der Annahme der Masselosigkeit transportiert. Gleichzeitig führen sie eine halbzufällige Schwankungsbewegung aus (Markov-Prozess), die zu einer Aufweitung der Partikelwolke führt (Dispersion). Die Stoffkonzentration  $C$  am Punkt  $(x, y, z)$  ergibt sich durch Addition der Partikelmassen in einer Gitterzelle für jeden Simulationszeitschritt  $t$  im angegebenen Mittelungszeitraum  $\Delta t$  und Division durch das Gittervolumen  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  sowie den Mittelungszeitraum  $\Delta t$ .

$$C(x, y, z) = \frac{1}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta t} \sum_{t=0}^{\Delta t} \sum_n m_{n,t} \quad (2.1)$$

Der Ort  $\mathbf{x}_n = (x_n, y_n, z_n)$  eines Partikels  $n$  zur Zeit  $t + \Delta t$  ergibt sich aus dem Ort des Partikels  $n$  zum Zeitpunkt  $t$  und seinem Transport mit dem regionalen  $\mathbf{V}$  und turbulenten  $\mathbf{v}_{n,t}$  Wind sowie eventuell besonderen Zusatzwinden  $\mathbf{v}_{n,z}$  zu:

$$\mathbf{x}_n(t + \Delta t) = \mathbf{x}_n(t) + [\mathbf{V}(t) + \mathbf{v}_{n,t}(t + \Delta t) + \mathbf{v}_{n,z}(t + \Delta t)] \Delta t \quad (2.2)$$

Der Zusatzwind  $\mathbf{v}_{n,z}$  beinhaltet Windgeschwindigkeiten aufgrund von Deposition oder Interzeption oder Fahnenüberhöhung und ist daher für die beschriebene Anwendung nicht relevant.

Der regionale Wind  $\mathbf{V}$  am Partikelort  $\mathbf{x}_n$  wird mit einem diagnostischen Windfeldmodell (meteorologischer Präprozessor von LASAT) ermittelt, das aus dem vorgegebenen Windprofil oder Wind in einer bestimmten Höhe  $z$  sowie der Topographie ein divergenzfreies dreidimensionales Windfeld bestimmt. Im hier vorliegenden Fall horizontaler Homogenität wird das logarithmische Windprofil auf dem gesamten Modellgebiet angesetzt. Im zweiten Teil des meteorologischen Präprozessors wird die Grenzschicht modelliert, wozu das Grenzschichtmodell der Version 2.1 (StandardEinstellung in LASAT 2.8) verwendet wird (siehe Abschnitt 2.2).

Der turbulente Windanteil  $\mathbf{v}_{n,t}$  der Partikelbewegung aus Gleichung (2.2) lässt sich für ein Partikel  $n$  zur Zeit  $t + \mathbf{t}$  mit Hilfe der Markov-Hypothese, die die aus dem Grenzschichtmodell berechneten Turbulenzparameter verwendet, folgendermaßen ausdrücken:

$$\mathbf{v}_{n,t}(t + \mathbf{t}) = \mathbf{\Theta}(t) \mathbf{v}_{n,t}(t) + \mathbf{w}(t + \mathbf{t}) \quad (2.3)$$

Der erste Term der Gleichung beschreibt zur Zeit  $t + \mathbf{t}$  die Abhängigkeit von  $\mathbf{v}_{n,t}$  von seinem Wert zur Zeit  $t$ ;  $\mathbf{\Theta}$  ist hierbei die dimensionslose Autokorrelationskoeffizienten-Matrix des einfachen Markov-Prozesses:

$$\mathbf{\Theta} = (\mathbf{I} - 0.5 \mathbf{t} \mathbf{\acute{O}} \mathbf{K}^{-1}) (\mathbf{I} + 0.5 \mathbf{t} \mathbf{\acute{O}} \mathbf{K}^{-1})^{-1} \quad (2.4)$$

mit der Einheitsmatrix  $\mathbf{I}$ , der Matrix der Varianzen der Windgeschwindigkeitsfluktuationen  $\mathbf{s}_i$ :  $\mathbf{\acute{O}}$  und der Diagonalmatrix der turbulenten Diffusionskoeffizienten  $K_{u,v,w}$ :  $\mathbf{K}$

$$\mathbf{\acute{O}} = \begin{pmatrix} \mathbf{s}_u^2 & 0 & -u_*^2 \\ 0 & \mathbf{s}_w^2 & 0 \\ -u_*^2 & 0 & \mathbf{s}_w^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_u & 0 & 0 \\ 0 & K_v & 0 \\ 0 & 0 & K_w \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

mit der Reibungsgeschwindigkeit  $u_*^2 = -\overline{u'w'}$ . Die weiteren anisotropen Turbulenzterme in  $\mathbf{\acute{O}}$ ,  $\overline{v'w'}$  und  $\overline{u'v'}$  werden vernachlässigt.

Das Gedächtnis der Strömung für den turbulenten Wind  $\mathbf{v}_{n,t}$  wird somit vom Turbulenzzustand der Umgebung bestimmt. In diesem Zusammenhang werden auch die Lagrange-Zeitskalen  $T_{u,v,w}$  definiert.

$$T_{u,v,w} = \frac{K_{u,v,w}}{S^2_{u,v,w}} \quad (2.6)$$

In Gleichung (2.3) wird  $\mathbf{w}$  als zufälliges oder stochastisches Geschwindigkeitsinkrement bezeichnet.  $\mathbf{w}$  ist normal-verteilt um den Mittelwert  $\overline{\mathbf{w}}$  und mit der Varianz  $\hat{\mathbf{U}} = \overline{(\mathbf{w} - \overline{\mathbf{w}})(\mathbf{w} - \overline{\mathbf{w}})^T}$ . Es gilt

$$\mathbf{w}(t + \mathbf{t}) = \overline{\mathbf{w}}(t) + \hat{\mathbf{E}}(\mathbf{t}) \hat{\mathbf{i}} \quad (2.7)$$

$\hat{\mathbf{i}}$  : Vektor von Zufallszahlen zwischen 0 und 1 mit dem Mittelwert 0 und der Varianz 1;  $\hat{\mathbf{E}}$  : Tensor der Standardabweichungen von  $\mathbf{w}$ , aus  $\hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{E}} \cdot \hat{\mathbf{E}}^T$  mittels Cholesky-Zerlegung.

Die für die Lösung von Gleichung (2.7) und damit für die Bestimmung von  $\mathbf{v}_{n,t}$  (Gleichung 2.3) notwendigen Felder von  $\mathbf{W}$  und  $\overline{\mathbf{w}}$  werden aus  $\mathbf{S}$  und  $\mathbf{K}$  bestimmt

$$\hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{O}} - \hat{\mathbf{O}} \hat{\mathbf{O}} \hat{\mathbf{O}}^T \quad (2.8)$$

$$\overline{\mathbf{w}} = 0.5 \hat{\delta} (\mathbf{I} + \hat{\mathbf{O}}) \cdot (\nabla \cdot \hat{\mathbf{O}}) \quad (2.9)$$

$\overline{\mathbf{w}}$  heißt Driftgeschwindigkeit und beschreibt die zusätzliche Geschwindigkeit, die aus inhomogener Turbulenz resultiert. Für homogene Turbulenz, also räumlich konstantes  $u_*$  in  $\mathbf{S}$ , verschwindet die Driftgeschwindigkeit:  $\overline{\mathbf{w}} = 0$ .

## 2.2 Grenzschichtmodell (Version 2.1)

Die Bestimmung der Stoffkonzentrationen und damit der Partikelorte im Ausbreitungsmodell zu einem Zeitpunkt benötigt neben dem regionalen Windfeld  $\mathbf{V}(\mathbf{x})$  (Gleichung 2.2), die Streuung der Geschwindigkeitsfluktuationen  $\hat{\sigma}_{u,v,w}(\mathbf{x})$  und die turbulenten Diffusionskoeffizienten  $K_{u,v,w}(\mathbf{x})$ . Die Indizes  $u$ ,  $v$  und  $w$  bedeuten, dass diese Größen im Windsystem definiert werden. Das Koordinatensystem ist dabei so orientiert, dass der regionale Wind in Richtung der positiven  $x$ -Achse weht. Mit  $u$ ,  $v$  und  $w$  werden die Komponenten des regionalen mittleren Windes  $\mathbf{V}$  bezeichnet. Bei einer Anströmung in  $x$ -Richtung ist somit  $\mathbf{V} = u$ .

Aus dem Taylor-Theorem (frozen turbulence hypothesis) folgt, dass sich eine Teilchenwolke in einem Feld homogener Turbulenz auf einer Zeitskala, die groß ist gegenüber der

Lagrange-Korrelationszeit  $T_{u,v,w}$  so aufweitet, wie es die klassische Diffusionsgleichung mit einem Diffusionskoeffizienten

$$K_{u,v,w} = s_{u,v,w}^2 \cdot T_{u,v,w} \quad (2.10)$$

beschreibt. Aus der Vorgabe des Diffusionskoeffizienten und der Geschwindigkeitsfluktuationen kann somit die Lagrange-Korrelationszeit bestimmt werden.

Das Standard-Grenzschichtmodell (Version 2.1) wurde im Jahr 1998 anhand einer umfassenden Literatur-Recherche neu konzipiert und mittels verschiedener Ausbreitungsexperimente in Natur und in einem physikalischen Modell (Windkanalexperiment) validiert. Die Mischungsschichthöhe  $h_m$  ist dort in Abhängigkeit von der Monin-Obhukov-Länge  $L_M^1$  und der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  definiert als

$$h_m = \begin{cases} \alpha \frac{u_*}{f_c} & \text{für } L_M > \frac{u_*}{f_c} \\ \alpha \frac{u_*}{f_c} \left( \frac{f_c L_M}{u_*} \right)^{1/2} & \text{für } 0 < L_M < \frac{u_*}{f_c} \end{cases} \quad (2.11)$$

mit  $\alpha = 0.3$  und dem Coriolis-Parameter  $f_c = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

Das Windgeschwindigkeitsprofil  $u(z)$  wird angesetzt als

$$u(z) = \begin{cases} \frac{u_*}{\hat{e}} \Psi_0(z) & \text{für } L_M > 0 \\ \frac{u_*}{\hat{e}} [\ln(z/z_0) - \Psi_1(z)] & \text{für } L_M < 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

mit

$$z(z) = \frac{(z + z_0)}{L_M} \quad (2.13)$$

---

<sup>1</sup> Für neutrale Schichtung wird die Monin-Obhukov-Länge  $L_M$ , die dort je nach Annäherungsrichtung gegen + oder - geht, auf +99999 gesetzt.

$$z_0 = \frac{z_0}{L_M} \quad (2.14)$$

$$\Psi_0(z) = \begin{cases} \ln(z/z_0) + 5z + X_1 & \text{für } z < 0.5 \\ 8 \ln z + 4.25/z - 0.5/z^2 + X_2 & \text{für } 0.5 \leq z \leq 10 \\ 0.7585z + X_3 & \text{für } z > 10 \end{cases} \quad (2.15)$$

$$X_1 = -5z_0 \quad (2.16)$$

$$X_2 = 7 \ln 2 - \ln z_0 - 5z_0 - 4 \quad (2.17)$$

$$X_3 = 8 \ln 20 - 11.165 - \ln 2 - \ln z_0 - 5z_0 \quad (2.18)$$

$$\Psi_1(z) = \ln \left[ \left( \frac{1+X}{1+X_0} \right)^2 \frac{1+X^2}{1+X_0^2} \right] - 2 (\arctan X - \arctan X_0) \quad (2.19)$$

$$X = (1 - 15z)^{1/4} \quad (2.20)$$

$$X_0 = (1 - 15z_0)^{1/4} \quad (2.21)$$

und der von-Kármán-Konstanten  $\hat{e} = 0.4$ .

Die Geschwindigkeitsfluktuationen setzen sich aus einem mechanischen und (bei labiler Schichtung) aus einem konvektiven Anteil zusammen, wobei jeweils die dritten Potenzen addiert werden,

$$\mathbf{s}_w(z) = f_w u_* \begin{cases} \exp\left(\frac{-0.6z}{h_m}\right) & \text{für } L_M > 0 \\ \left[ \exp\left(\frac{-1.8z}{h_m}\right) + 2.1 \left(\frac{-z}{L_M}\right) \exp\left(\frac{-3z}{h_m}\right) \right]^{1/3} & \text{für } L_M < 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

$$s_{u,v}(z) = f_{u,v} A_v u_* \begin{cases} 1 & \text{für } L_M > 0 \\ \left[ 1 + 0.064 \left( \frac{h_m}{L_M} \right) \right]^{1/3} & \text{für } L_M < 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

mit

$$A_v = \left( \frac{\Delta t}{3600 \text{ s}} \right)^{0.2}, \Delta t \in [600 \text{ s}, 3600 \text{ s}] \quad (2.24)$$

mit  $f_u = 2.5$ ,  $f_v = 2.0$ ,  $f_w = 1.3$ . Bei den horizontalen Fluktuationen wird explizit der Mittelungszeitraum  $\Delta t$  berücksichtigt. Bei Mittelungszeiten  $10 \text{ min} \leq \Delta t < 1 \text{ h}$  werden die horizontalen Fluktuationen um max. 30 % reduziert, d. h.  $A_{v,\min} = 0.7$ . In der vorliegenden stationären Untersuchung wurde der Mittelungszeitraum  $\Delta t \geq 1 \text{ h}$  gewählt, so dass  $A_v = 1$ , d.h. die Abhängigkeit der horizontalen Geschwindigkeitsfluktuationen vom Mittelungszeitraum entfällt. Die horizontalen Fluktuationen für stabile und neutrale Schichtung sind im Gegensatz zu zahlreichen Literaturansätzen höhenunabhängig, da die zur Validierung verwendeten meteorologischen Daten der KfK-Experimente ein solches Verhalten zeigen. Hiermit wird ansatzweise berücksichtigt, dass bei stabiler Schichtung häufig Windscherungen in großer Höhe zu einer zusätzlichen Aufweitung der Fahne führen.

Der vertikale und die horizontalen Diffusionskoeffizienten  $K_{u,v,w}$  sind in Abhängigkeit von der Stabilität definiert als:

$$K_w(z) = k u_* z \begin{cases} \frac{1}{1 + 4.7 z / L_M} \exp\left(\frac{-1.8 z}{h_m}\right) & \text{für } L_M > 0 \\ \left\{ \exp\left(\frac{-5.4 z}{h_m}\right) + \left[ 14.1 \left(\frac{-z}{L_M}\right) + 120 \left(\frac{-z}{L_M}\right)^2 \right] \left(1 - \frac{z}{h_m}\right)^6 \right\}^{1/3} & \text{für } L_M < 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

$$K_{u,v}(z) = 0.17 A_v \frac{u(z)}{10 f_{u,v} u_*} h_m s_{u,v} \quad (2.26)$$

Bei einem Vergleich von LASAT mit den Prairie-Grass-Experimenten ergaben sich für stark labile Schichtung ( $L_M < -50$  m) mit den in der Literatur veröffentlichten Ansätzen in großer Quellentfernung zu hohe Konzentrationen. Daher wurde der Term  $\sim (-z / L_M)$  beim Vergleich zu den Prairie-Grass-Experimenten eingeführt. Er bewirkt bei sehr labilen Schichtungen eine Erhöhung der vertikalen Diffusion  $K_w$ .

$K_v$  wurde als proportional zu  $u(z)$  angesetzt, was aus Windkanalversuchen für eine Punktquelle abgeleitet wurde.

Mit der Definition der Diffusionskoeffizienten  $K_{u,v,w}$  und der Windfluktuationen  $T_{u,v,w}$  ergeben sich die Lagrange-Korrelationszeiten  $T_{u,v,w}$  gemäß Gleichung (2.6). Der Wertebereich von  $T_{u,v,w}$  wird auf  $\frac{z_0}{u_*} \leq T_{u,v,w} \leq 1.2005$  eingeschränkt.

Ist die für die Bestimmung der Turbulenzparameter erforderliche Monin-Obukhov-Länge  $L_M$  nicht bekannt, wird sie aus einer nach Klug/Manier angegebenen Stabilitätsklasse bestimmt. Die Zuordnung der Mischungsschichthöhe  $h_m$  für labile Klassen wird gemäß VDI 3782/3 (1985) festgelegt, für neutrale und stabile Klassen über Gleichung (2.11).

### 3 DURCHGEFÜHRTE AUSBREITUNGSRECHNUNGEN

Die Rechnungen wurden in Anlehnung an die im Windkanal eingestellten Grenzschichtparameter vorgenommen:

- Neutrale Schichtung
- Rauigkeitslänge  $z_0 = 0.1$  m.

Es erfolgten mit immer demselben Gitter Ausbreitungsrechnungen für eine Punktquelle, eine Linienquelle und eine Flächenquelle (vgl. Abschnitt 3.2). Für die einzelnen Quellen wurden jeweils drei Anströmgeschwindigkeiten (gemessen in 10 m Höhe) untersucht: 1 m/s, 2 m/s und 5 m/s.

#### 3.1 Gitterdefinition

Die Ausbreitungsrechnungen wurden in einem Simulationsgebiet von 1 000 m in x-Richtung (parallel zur Ausbreitungsrichtung) und 310 m in y-Richtung (quer zur Anströmungsrichtung) und bis in eine Höhe von  $z = 800$  m vorgenommen (**Tab. 3.1**). Die horizontale Gitterauflösung betrug  $\Delta x = \Delta y = 10$  m und das vertikale Gitter war vertikal gespreizt, um eine gute Auflösung am Boden und gleichzeitig eine Berücksichtigung bis in eine Höhe von 800 m zu ermöglichen, ohne die Anzahl der Gitterzellen und damit auch der Simulationszeit unnötig zu erhöhen. Die Anzahl der verwendeten Gitterzellen betrug somit  $100 \times 31 \times 46$ . Der Gittersprung wurde auf  $x, y, z = 0, -155, 0$  gelegt, so dass die Fahnenachse der Punktquelle bei  $y = 0$  lag (**Abb. 3.1**).

#### 3.2 Quellkonfiguration

Die bodennahen Quellen wurden im Rechengitter jeweils so gelegt, dass die luvseitigen Ränder der Quellen jeweils am luvseitigen Rand der Gitterzelle liegt, deren Zentrum sich bei  $x = 100$  m befindet. Des Weiteren wurde der laterale Nullpunkt ( $y = 0$ ) auf den Quellschwerpunkt bzw. die Fahnenachse gelegt (vgl. **Abb. 3.1**).

Level	Unterkante(m)	Oberkante(m)	Level	Unterkante(m)	Oberkante(m)
1	0,0	0,75	25	52,0	56,0
2	0,75	2,0	26	56,0	60,0
3	2,0	4,0	27	60,0	64,0
4	4,0	6,0	28	64,0	68,0
5	6,0	8,0	29	68,0	72,0
6	8,0	10,0	30	72,0	76,0
7	10,0	12,0	31	76,0	80,0
8	12,0	14,0	32	80,0	84,0
9	14,0	16,0	33	84,0	88,0
10	16,0	18,0	34	88,0	92,0
11	18,0	20,0	35	92,0	96,0
12	20,0	22,0	36	96,0	100,0
13	22,0	24,0	37	100,0	108,0
14	24,0	26,0	38	108,0	116,0
15	26,0	28,0	39	116,0	132,0
16	28,0	30,0	40	132,0	164,0
17	30,0	32,0	41	164,0	228,0
18	32,0	34,0	42	228,0	342,0
19	34,0	36,0	43	342,0	456,0
20	36,0	38,0	44	456,0	570,0
21	38,0	40,0	45	570,0	685,0
22	40,0	44,0	46	685,0	800,0
23	44,0	48,0			
24	48,0	52,0			

**Tab. 3.1:** Vertikale Gittereinteilung.

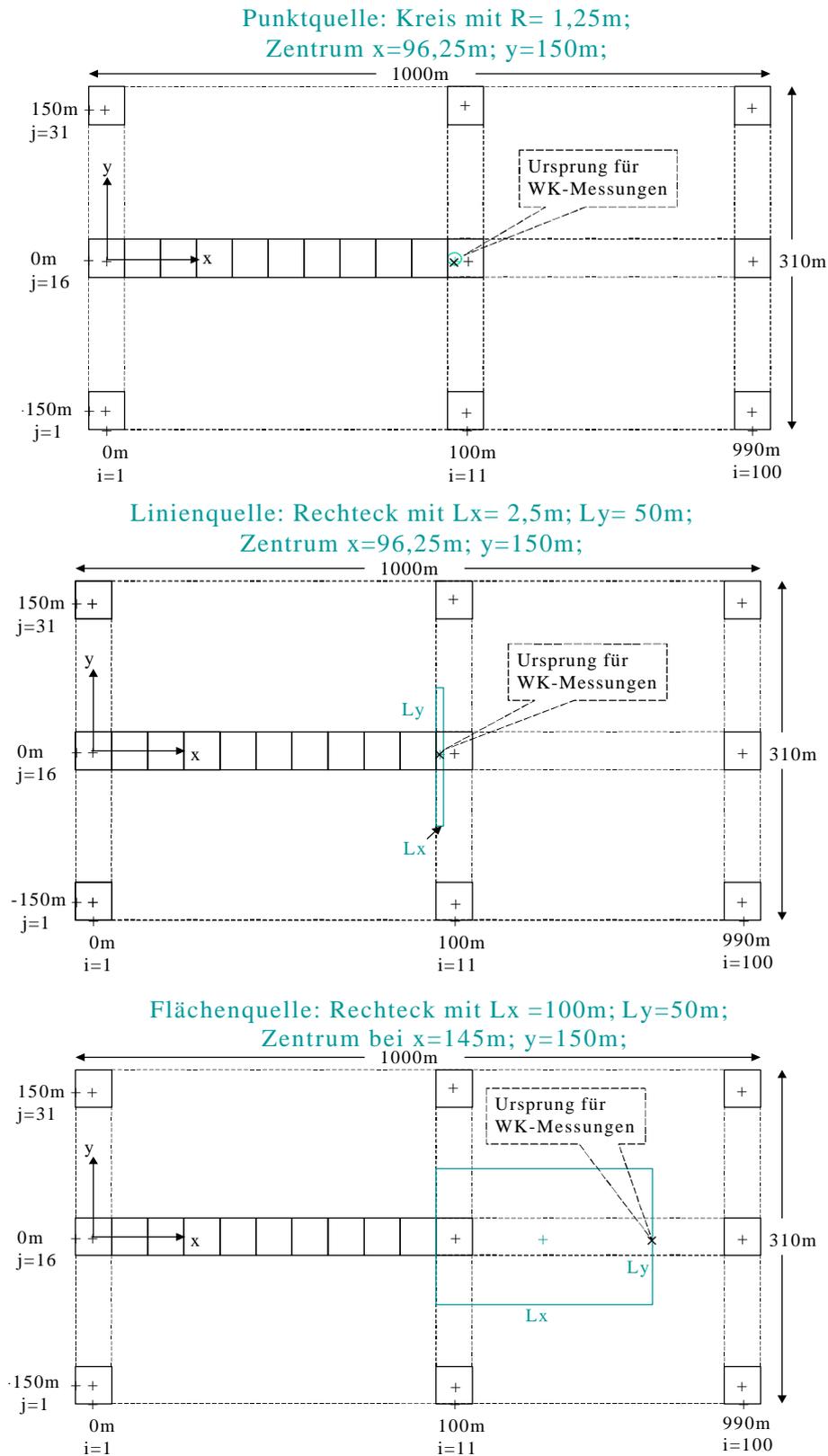


Abb. 3.1: Konfiguration für die Ausbreitungsrechnungen getrennt nach Punkt-, Linien- und Flächenquelle.

### 3.3 Weitere Vorgabeparameter

Die Simulationen wurden mit Freisetzungsraten von  $Q = 10\,000$  Bq/s durchgeführt, wobei 100 Partikel/s freigesetzt wurden. Bei einer Gesamtsimulationszeit von einer Stunde wurden somit pro Simulationslauf 360 000 Partikel freigesetzt. Für die Auswertung wurden die Konzentrationsfelder im Zeitraum zwischen 1 800 s und 3 600 s herangezogen. Mit der halb-stündlichen Vorrechnung wurde eine stationäre Konzentrationsverteilung vor Beginn des Mittelungsintervalls sichergestellt.

Mit der Rauigkeitslänge von  $z_0 = 0.1$  m und den jeweiligen Anströmgeschwindigkeiten  $u_{10}$  in 10 m Höhe von 1 m/s, 2 m/s und 5 m/s in positiver x-Richtung wurden unter Beachtung der neutralen Ausbreitungsbedingungen die dreidimensionalen Felder der Turbulenzparameter  $K_{u,v,w}$  und  $s_{u,v,w}$  sowie die Lagrange-Zeitskales  $T_{u,v,w}$  vom Grenzschichtmodell 2.1 von LASAT berechnet. Mit diesen errechneten Turbulenzparametern wurden dann die Ausbreitungsrechnungen vorgenommen. In Anhang A1 sind als Beispiel die verwendeten LASAT-Eingabedateien exemplarisch für die mit  $u_{10} = 1$  m/s angeströmte Punktquelle zu finden. In **Tab. A2.1** und **Abb. A2.1** in Anhang A2 sind die vom Grenzschichtmodell berechneten Turbulenzparameter aufgeführt.

### 3.4 Auswerteparameter

Aufgrund der bei den Windkanalversuchen eingestellten Messhöhe der bodennahen Konzentration von 1.375 m wird bei den numerischen Rechnungen die Schicht Nummer 2 für die bodennahen Radonkonzentrationen ausgewertet (vgl. **Tab. 3.1**).

Als Auswerteparameter wurden die normierten Konzentrationen  $C^*$  bzw. die normierten querwindintegrierten Konzentrationen  $C_{QWI}^*$  herangezogen:

$$C^* = \frac{C \cdot u_{10}}{Q} \text{ bzw. } C_{QWI}^* = \frac{C_{QWI} \cdot u_{10}}{Q}. \quad (3.1)$$

Dabei ist die querwindintegrierte Konzentration  $C_{QWI}$  definiert als:

$$C_{QWI}(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, y, z) dy \cong \sum_{j=1}^{31} C_{i,j,k} \cdot \Delta y \cdot \quad (3.2)$$

## 4 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse werden in folgender Form präsentiert: Zunächst wird anhand der Ergebnisse der Punktquelle die Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Anströmgeschwindigkeit nachgewiesen (Abschnitt 4.1) und anschließend werden stellvertretend die Ergebnisse für die Anströmgeschwindigkeit von  $u_{10} = 2 \text{ m/s}$  vorgestellt (Abschnitt 4.2).

### 4.1 Nachweis der Geschwindigkeitsunabhängigkeit der Ergebnisse

Die normierten Konzentrationen entlang der Fahnenachse zeigen (**Abb. 4.1** und **4.3**), dass die Konzentrationsverläufe für die drei Anströmgeschwindigkeiten für jede Quellgeometrie jeweils übereinanderfallen. Auch in der logarithmischen Darstellung (**Abb. 4.2**) sind Unterschiede in den normierten Konzentrationen  $C^*$  erst in 500 bis 600 m Entfernung zu erkennen. Es zeigt sich, dass höhere Anströmgeschwindigkeiten zu etwas niedrigeren normierten Konzentrationen in größeren Quellentfernungen führen.

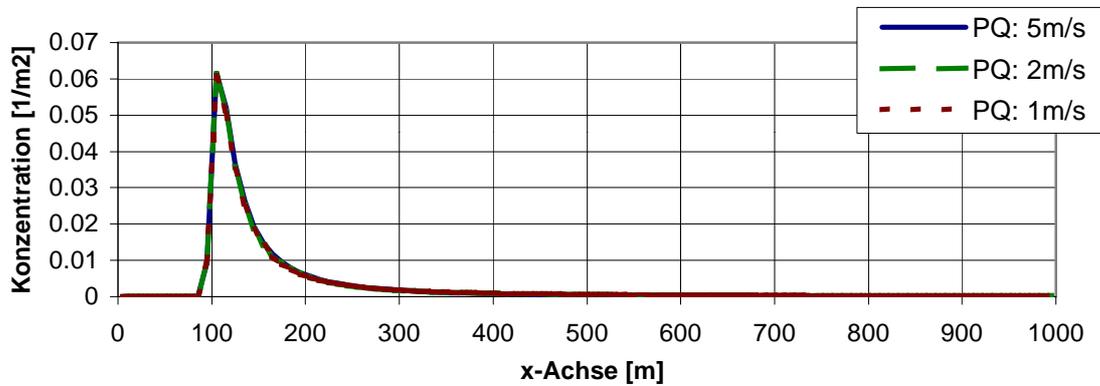
In **Tab. 4.1** sind für die Punktquelle die  $C^*$  für  $u_{10} = 1 \text{ m/s}$  und die relativen Abweichungen von  $C^*$  für  $u_{10} = 5 \text{ m/s}$  von diesen Werten bodennah auf der Fahnenachse für verschiedene Quellentfernungen aufgeführt. Die relativen Abweichungen liegen zwischen  $-20 \%$  und  $+5 \%$ , wobei die höchsten Unterschiede 700 m in Lee der Quelle ( $x = 800 \text{ m}$ ) bei sehr geringen absoluten Konzentrationen von  $2.2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/m}^2$  auftreten. Die Konzentrationsmaxima für die verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten wird in derselben Gitterzelle bodennah erreicht. Die relative Abweichung der  $C^*$  für  $u_{10} = 5 \text{ m/s}$  im Vergleich zu  $u_{10} = 1 \text{ m/s}$  liegt bei ca.  $1 \%$  (**Tab. 4.1**).

	$x = 100 \text{ m}$	$x = 200 \text{ m}$	$x = 400 \text{ m}$	$x = 800 \text{ m}$	Konzentrations- maximum
$C_{1\text{m/s}}^* \text{ [1/m}^2\text{]}$	0.035	0.0058	0.00087	0.00022	0.061
$(C_{5\text{m/s}}^* - C_{1\text{m/s}}^*)/C_{1\text{m/s}}^* \text{ [%]}$	-1.3	+5.0	-2.5	-20	+1.0

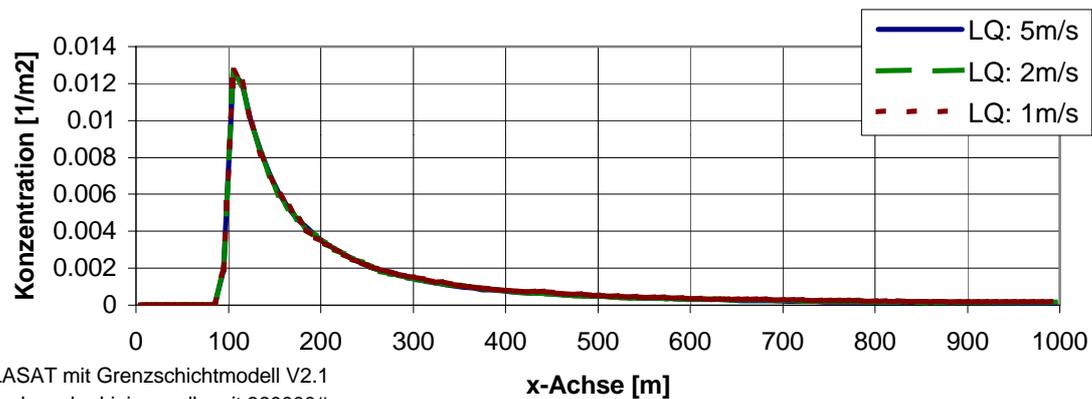
Tab. 4.1: Normierte Konzentrationen für die Punktquelle bei Anströmgeschwindigkeit  $u_{10} = 1 \text{ m/s}$  ( $C_{1\text{m/s}}^*$ ) in verschiedenen Quellentfernungen (Quelle bei  $x = 96.25 \text{ m}$ ) auf der Fahnenachse sowie die prozentualen Abweichungen der entsprechenden normierten Konzentrationen bei  $u_{10} = 5 \text{ m/s}$ .

Aufgrund der verschiedenen Quellkonfigurationen ist das Maximum von  $C^*$  für Punktquellen höher als für Linienquellen und das für Linienquellen wiederum höher als für Flächenquellen. Bei den normierten querwindintegrierten Konzentrationen  $C_{\text{QWI}}^*$  sollten die Konzentrationsverläufe für Punkt- und Linienquellen aufgrund der Unabhängigkeit von  $y$  ähnlich aussehen.

**Normierte Konz. für die Punktquelle entlang Fahnenachse  
in 0.75..2m Höhe ( $C \cdot u_{10}/Q$ )**

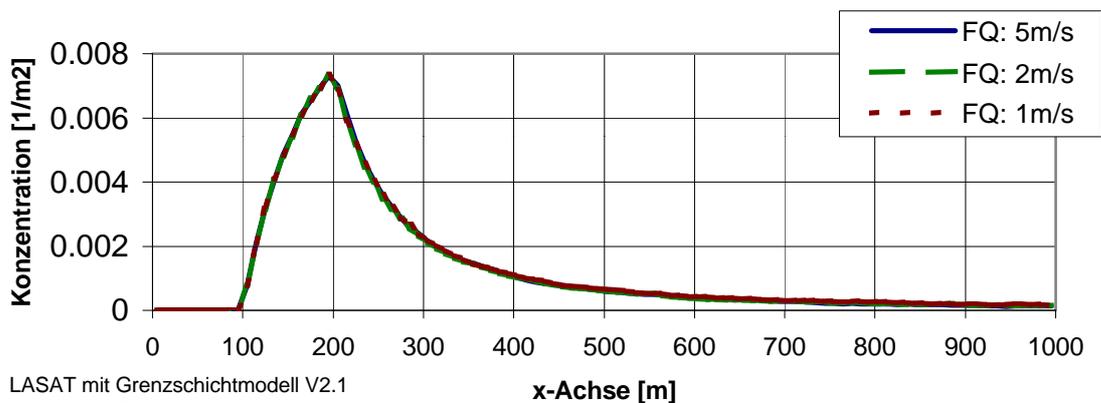


**Normierte Konz. für die Linienquelle entlang Fahnenachse  
in 0.75..2m Höhe ( $C \cdot u_{10}/Q$ )**



LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
bodennahe Linienquelle mit 360000#

**Normierte Konz. für die Flächenquelle entlang Fahnenachse  
in 0.75..2m Höhe ( $C \cdot u_{10}/Q$ )**

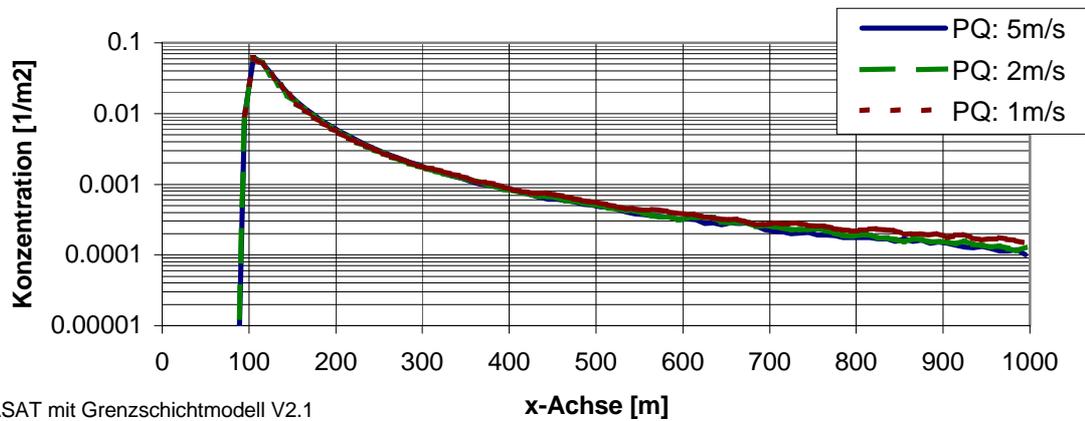


LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
bodennahe Flächenquelle mit 360000#

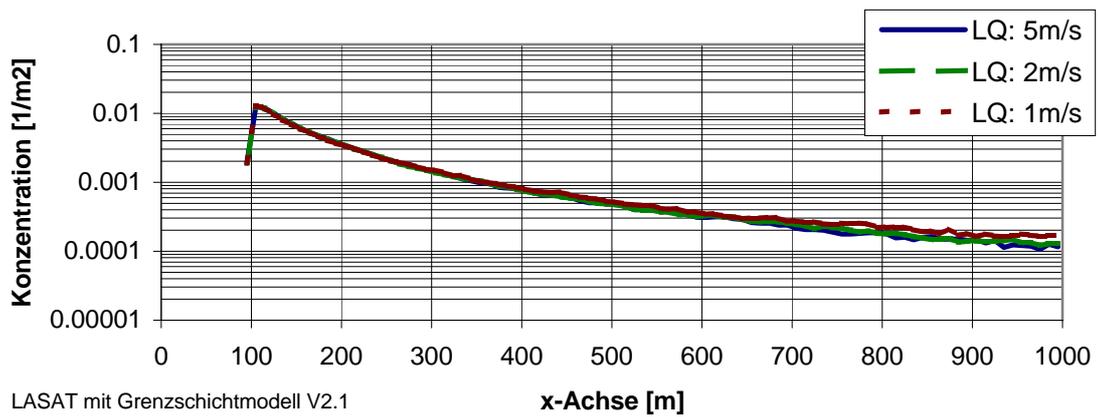


Abb. 4.1: Normierte Konzentration entlang der Fahnenachse ( $y=0$ ) für die drei Anströmgeschwindigkeiten getrennt für die drei Quellgeometrien.

**Normierte Konz. für die Punktquelle entlang Fahnenachse  
in 0.75..2m Höhe ( $C \cdot u_{10}/Q$ )**



**Normierte Konz. für die Linienquelle entlang Fahnenachse  
in 0.75..2m Höhe ( $C \cdot u_{10}/Q$ )**



**Normierte Konz. für die Flächenquelle entlang Fahnenachse  
in 0.75..2m Höhe ( $C \cdot u_{10}/Q$ )**

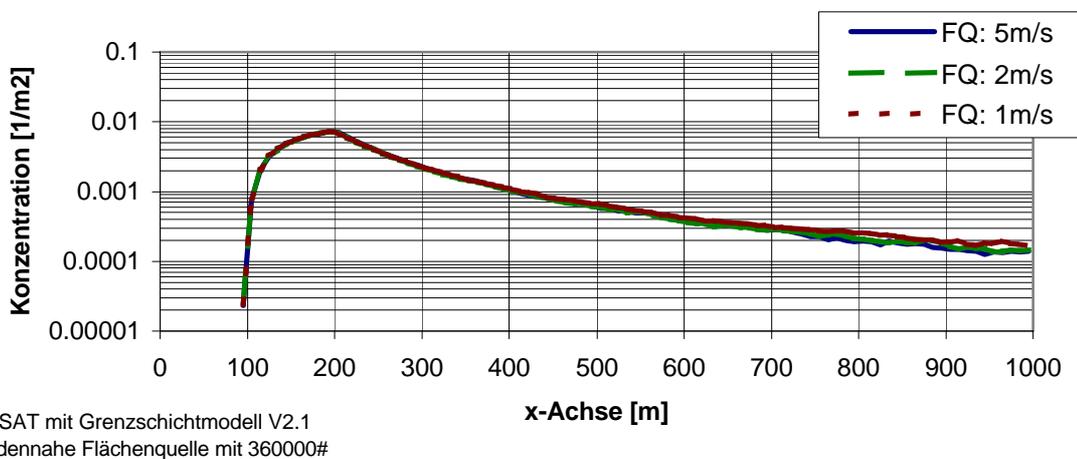
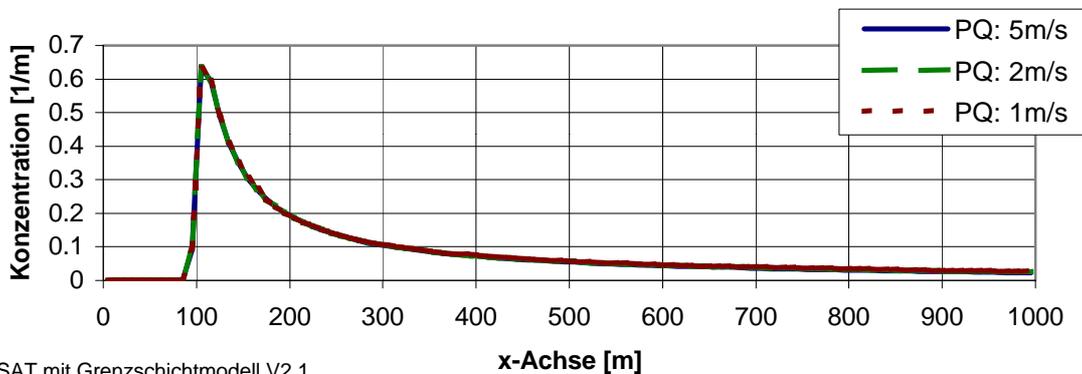


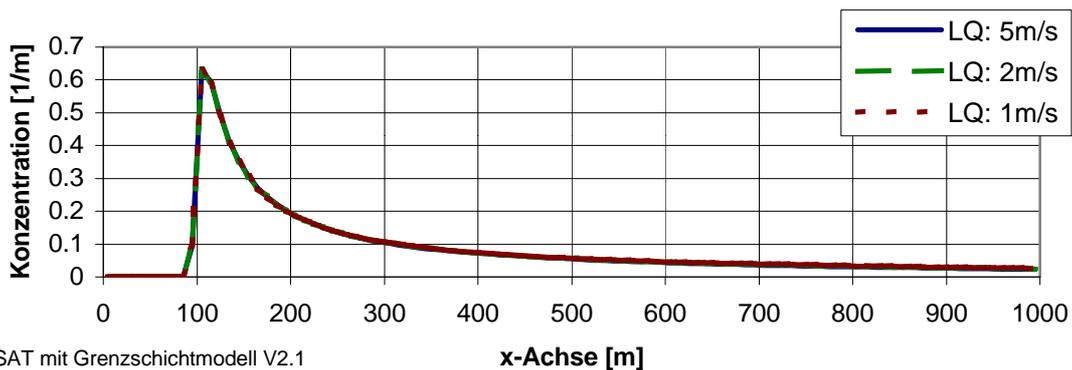
Abb. 4.2: Logarithmische Darstellung der normierten Konzentrationen entlang der Fahnenachse (vgl. Abb. 4.1).

**Normierte QWI-Konz. für die Punktquelle in 0.75..2m Höhe ( $C^*u_{10}/Q$ )**



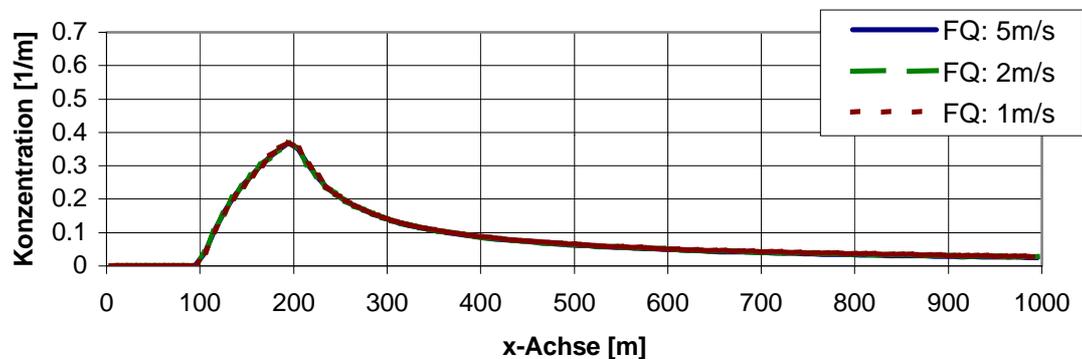
LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
bodennahe Punktquelle mit 360000#

**Normierte QWI-Konz. für die Linienquelle in 0.75..2m Höhe ( $C^*u_{10}/Q$ )**



LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
bodennahe Linienquelle mit 360000#

**Normierte QWI-Konz. für die Flächenquelle in 0.75..2m Höhe ( $C^*u_{10}/Q$ )**



LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
bodennahe Flächenquelle mit 360000#



Abb. 4.3: Normierte querwindintegrierte Konzentration entlang der Fahnenachse ( $y=0$ ) für die drei Anströmgeschwindigkeiten getrennt für die drei Quellgeometrien.

Dies ist wie **Abb. 4.3** zeigt auch der Fall. Für die Flächenquelle wird das Maximum in den Konzentrationen erst am leeseitigen Ende der Flächenquelle bei  $x = 200$  m erreicht. Das Maximum ist um ca. 40 % niedriger als für Punkt- und Linienquellen. Die Gesamtkonzentration (Fläche unter den Kurven) muss allerdings gleich sein aufgrund der gleichen freigesetzten Massen. Deshalb wurden die jeweiligen Gesamtkonzentrationen ermittelt. Es ergaben sich Abweichungen zu der Gesamtkonzentration der Punktquelle bei einer Anströmgeschwindigkeit von 1 m/s von maximal ca. 0.2 %.

Neben diesen normierten Konzentrationen auf der Fahnenachse wurden weiterhin für die Punktquelle die bodennahen flächigen normierten Konzentrationen  $C^*$  in einem Horizontalschnitt (**Abb. 4.5**) sowie die normierten querwindintegrierten Konzentrationen  $C_{QWI}^*$  in einem Vertikalschnitt entlang der Fahnenachse (**Abb. 4.4**) bei den verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten verglichen.

Die normierten querwindintegrierten Konzentrationen zeigen für die Punktquelle eine sehr ähnliche Struktur der Abgasfahne (**Abb. 4.4**): Die vertikale Erstreckung der Fahne bzw. die  $2 \cdot 10^{-5}$  1/m-Konzentration (gelb) liegt für alle drei Anströmgeschwindigkeiten 100 m hinter der Quelle in ca. 40 m Höhe und am leeseitigen Rand des Untersuchungsgebiets (900 m hinter der Punktquelle) für 1 m/s sowie 2 m/s Anströmgeschwindigkeit bei ca. 125 m Höhe und für 5 m/s Anströmgeschwindigkeit eine Gitterzelle höher, d.h. in ca. 150 m Höhe. Auch bei den übrigen Isolinien ist die Tendenz festzustellen, dass bei höherer Anströmgeschwindigkeit diese streckenweise für  $u_{10} = 5$  m/s eine Gitterzelle nach oben verschoben sind im Vergleich zu  $u_{10} = 1$  m/s. Die bodennahen  $C_{QWI}^*$  überschreiten für  $u_{10} = 1$  m/s  $5 \cdot 10^{-2}$  1/m (schwarz) bis in 485 m (bei  $x = 585$  m) Quellentfernung, für  $u_{10} = 2$  m/s bis in ca. 475 m Quellentfernung und für  $u_{10} = 5$  m/s bis in ca. 455 m Quellentfernung.

Diese Tendenz einer schnelleren Abnahme der bodennahen Konzentrationen hinter der Quelle für höhere Anströmgeschwindigkeiten zeigt sich auch in den bodennahen Horizontalschnitten der normierten Konzentrationen  $C^*$  (**Abb. 4.5**). Die  $2 \cdot 10^{-4}$ -Isoline beispielsweise befindet sich für  $u_{10} = 1$  m/s in ca. 750 m Quellentfernung, bei  $u_{10} = 2$  m/s in ca. 680 m Quellentfernung und bei  $u_{10} = 5$  m/s in ca. 650 m Quellentfernung. Die bodennahen Konzentrationen am leeseitigen Rand des Untersuchungsgebiets liegen auf der Fahnenachse ( $y = 0$ ) für alle drei Anströmgeschwindigkeiten im Bereich zwischen  $1 \cdot 10^{-4}$  und  $2 \cdot 10^{-4}$  1/m<sup>2</sup>. Zusätzlich ist für höhere Anströmgeschwindigkeiten eine leichte Tendenz zu breiteren Abgasfahnen zu verzeichnen.

### Normierte QWI Konzentrationen in 1/m für die Punktquelle

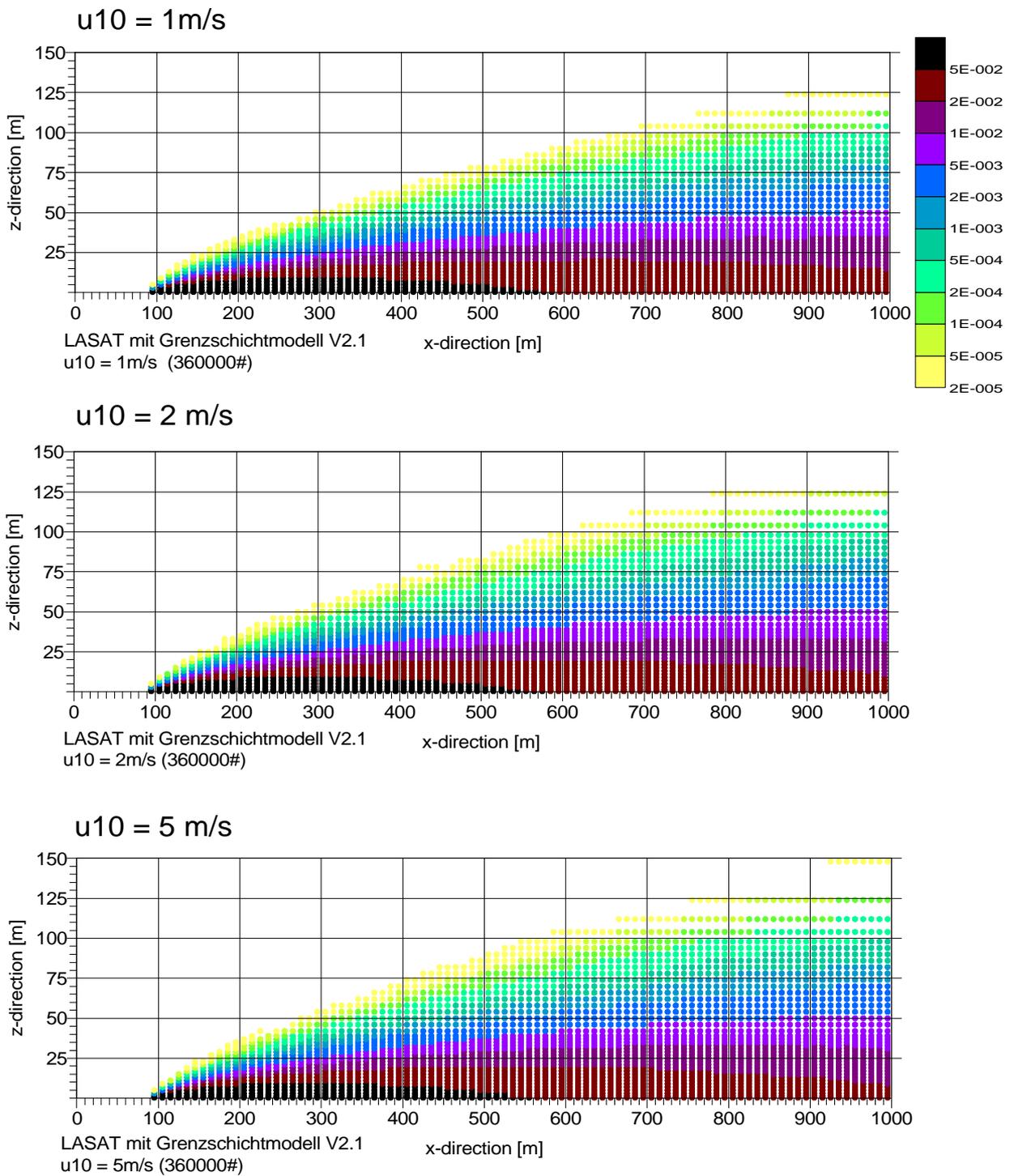
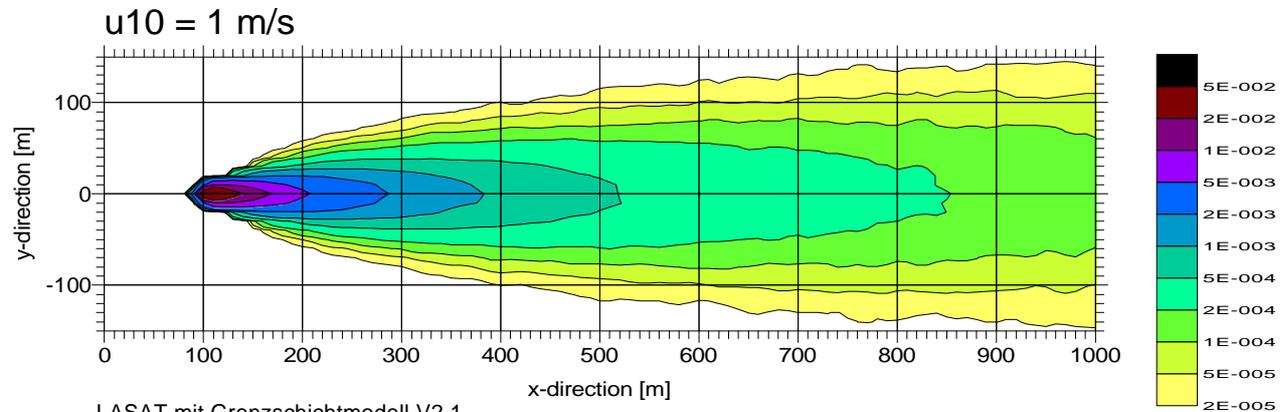
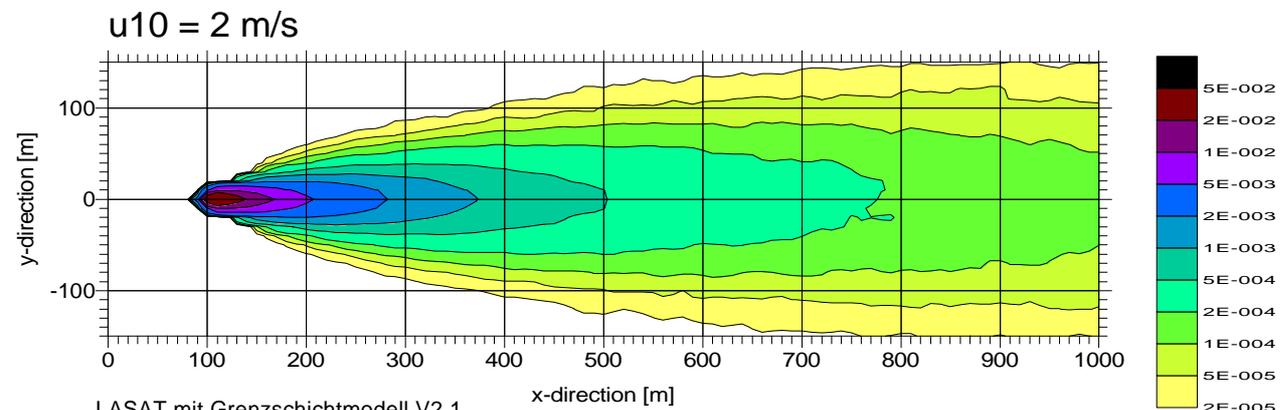


Abb. 4.4: Normierte querwindintegrierte Konzentrationen für die Punktquelle und die drei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten

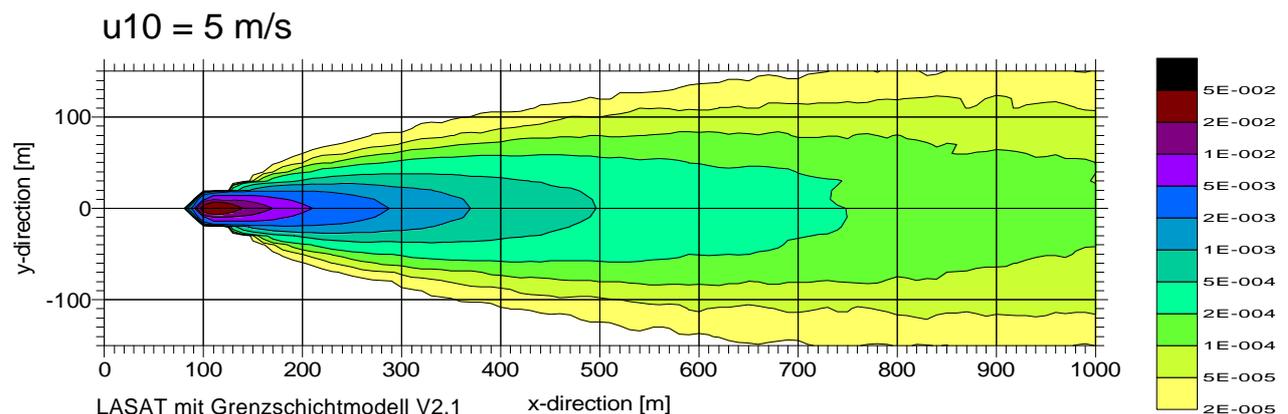
### Normierte Konz. $c \cdot u_{10}/Q$ in $1/m^2$ für die Punktquelle



LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
 bodennahe Punktquelle mit 360000#  
 in 0.75...2m Höhe über Grund



LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
 bodennahe Linienquelle mit 360000#  
 in 0.75...2m Höhe über Grund



LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
 bodennahe Flächenquelle mit 360000#  
 in 0.75...2m Höhe über Grund



Abb. 4.5: xy-Schnitte der normierten Konzentrationen für die Punktquelle und die drei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten.

Insgesamt können die ermittelten normierten Konzentrationen als nahezu unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit angesehen werden ( $1/u$ -Abhängigkeit der berechneten Konzentrationen), so dass eine Betrachtung der Ergebnisse für die verschiedenen Quellgeometrien Punkt-, Linien- und Flächenquelle anhand der Ergebnisse bei einer Anströmgeschwindigkeit ausreichend ist für die weitere Bewertung.

## 4.2 Ergebnisse für die drei untersuchten Quellgeometrien

Nachdem eine für die Praxis ausreichende Unabhängigkeit der normierten Konzentrationen von der Anströmgeschwindigkeit nachgewiesen wurde (Abschnitt 4.1) werden im folgenden die Ergebnisse für die Quellgeometrien (Punkt-, Linien- und Flächenquelle) nur noch für eine Anströmgeschwindigkeit analysiert. Es werden die Ergebnisse von  $u_{10} = 2$  m/s exemplarisch ausgewählt.

Der Vertikalschnitt entlang der Fahnenachse (**Abb. 4.6**) für die normierten querwindintegrierten Konzentrationen und der bodennahe Horizontalschnitt der normierten Konzentrationen (**Abb. 4.7**) zeigen, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Quelltypen mit ihren verschiedenen Quellgeometrien ab ca. 500 m Entfernung zum luvseitigen Rand der Quellen gering sind. Dies trifft sowohl auf die Fahnenbreiten bzw. die Konzentrationsverteilung quer zur Anströmungsrichtung (**Abb. 4.7**) als auch näherungsweise auf die Fahnenhöhen und die Vertikalverteilung der querwindintegrierten Konzentrationen (**Abb. 4.6**) zu.

In Entfernungen bis zu 500 m vom luvseitigen Rand der jeweiligen Quelle hat die Quellgeometrie einen entscheidenden Einfluss auf die Konzentrationsverteilung. Das Maximum in den normierten bodennahen Konzentrationen ist bei der Flächenquelle um ca. 90 m weiter in Lee verschoben als bei Punkt- und Linienquelle, da die Flächenquelle über eine Länge von 100 m in Ausbreitungsrichtung emittiert (**Abb. 4.7**). Gleichzeitig bedingt die größere Ausdehnung des emittierenden Gebiets bei der Flächenquelle ein niedrigeres Maximum verglichen mit der Punktquelle (um ca. 88 % niedriger) bei gleichzeitig größerer Ausdehnung des Gebiets mit Konzentrationen im Bereich dieses Maximums. Bei der Linienquelle ist ebenfalls ein höheres Maximum verglichen mit der Punktquelle zu verzeichnen, welches bei ca. 80 % liegt. In den querwindintegrierten Konzentrationen (**Abb. 4.6**) verschwindet der Unterschied zwischen Punkt- und Linienquelle aufgrund der Ausdehnung der Linienquelle nur in  $y$ -Richtung. Die Unterschiede in  $C_{QWI}^*$  liegen bei ca. 0.5 %.

**C<sub>QWI</sub>\*u<sub>10</sub>/Q in 1/m für u<sub>10</sub> = 2m/s**

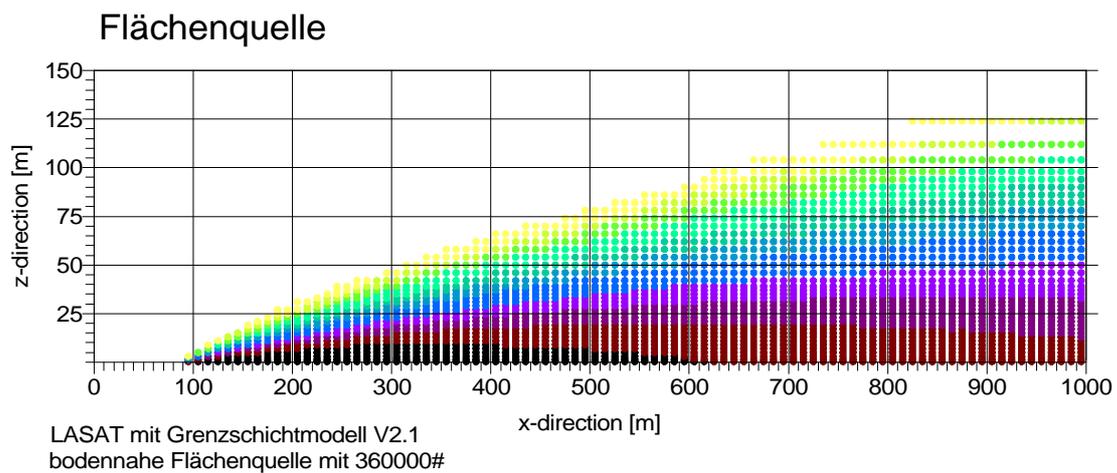
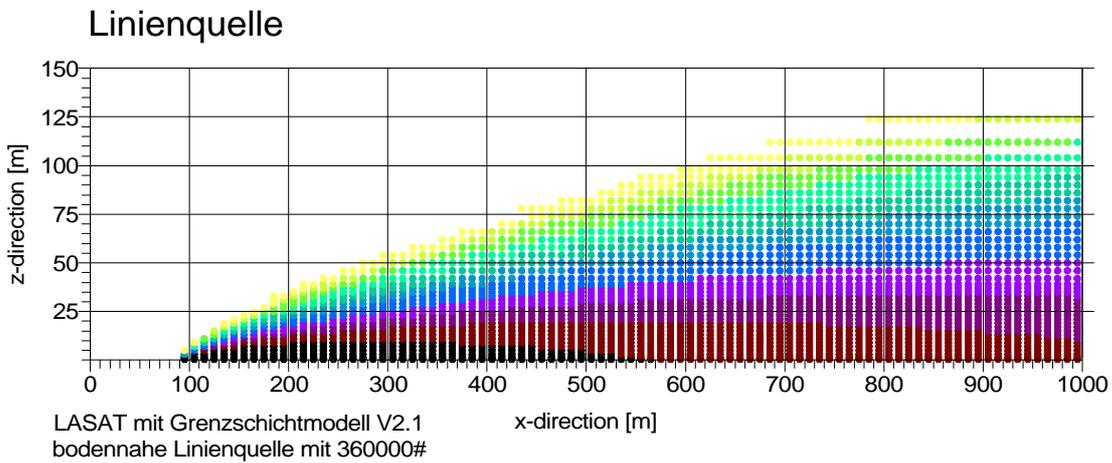
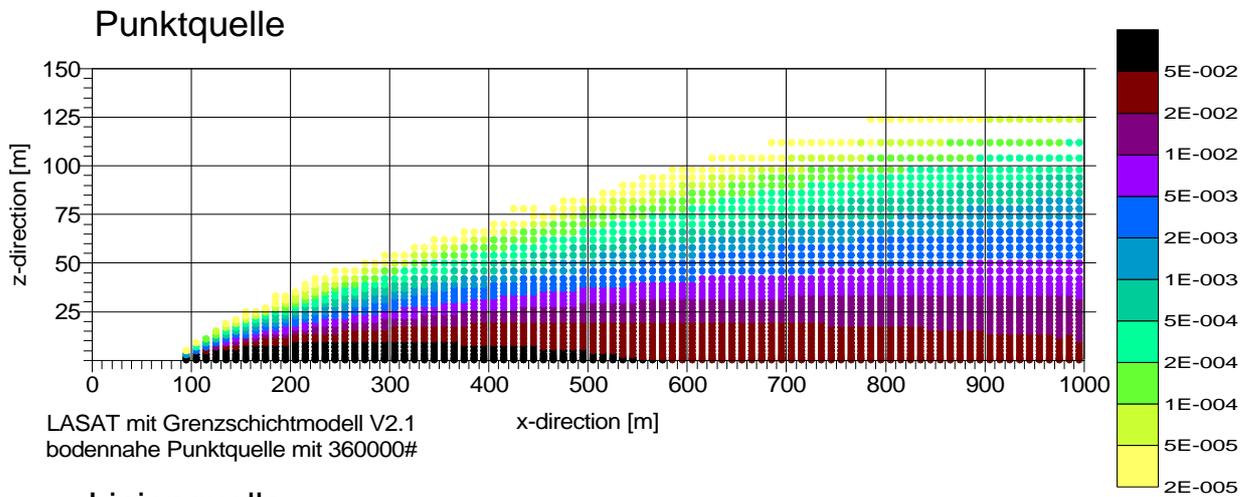
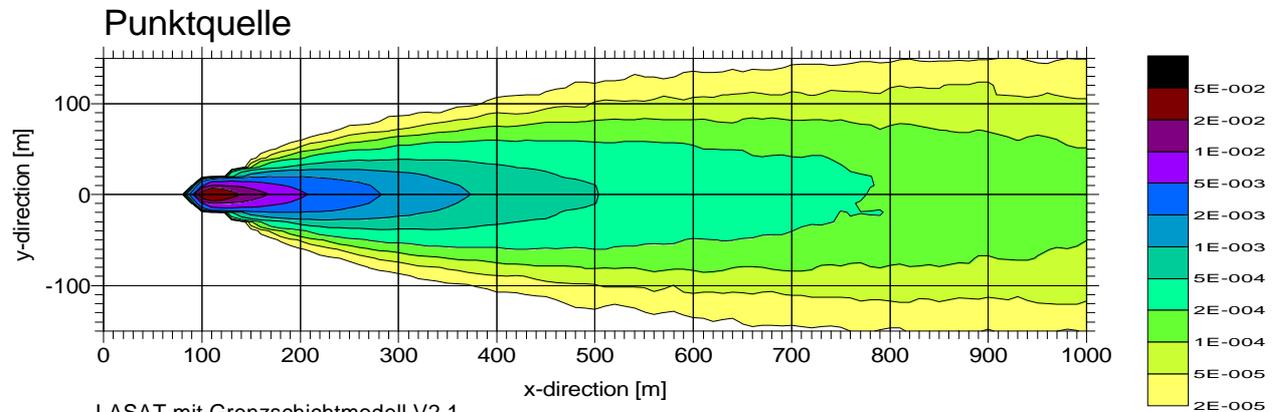
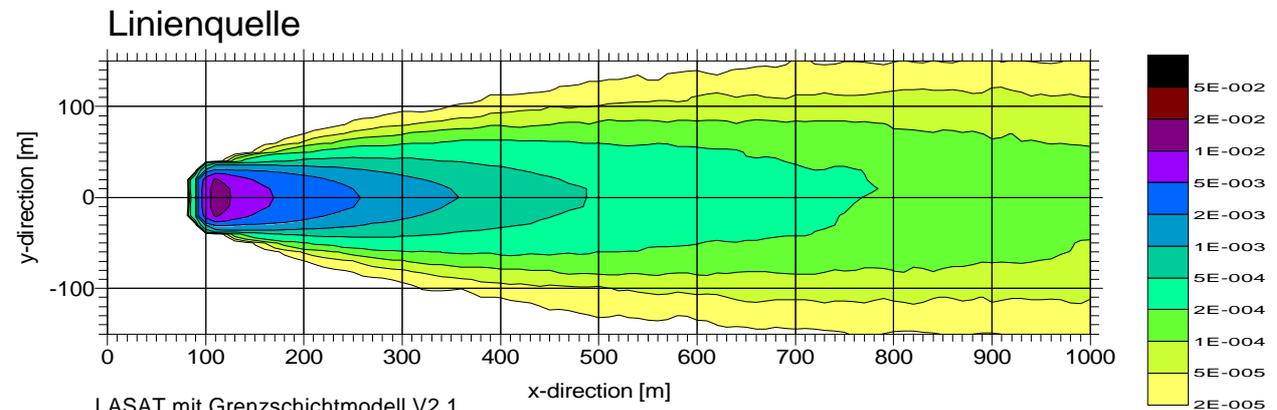


Abb. 4.6: xz-Schnitte der normierten querwindintegrierten Konzentrationen für eine Anströmgeschwindigkeit von  $u_{10} = 2 \text{ m/s}$  und alle drei Quellgeometrien.

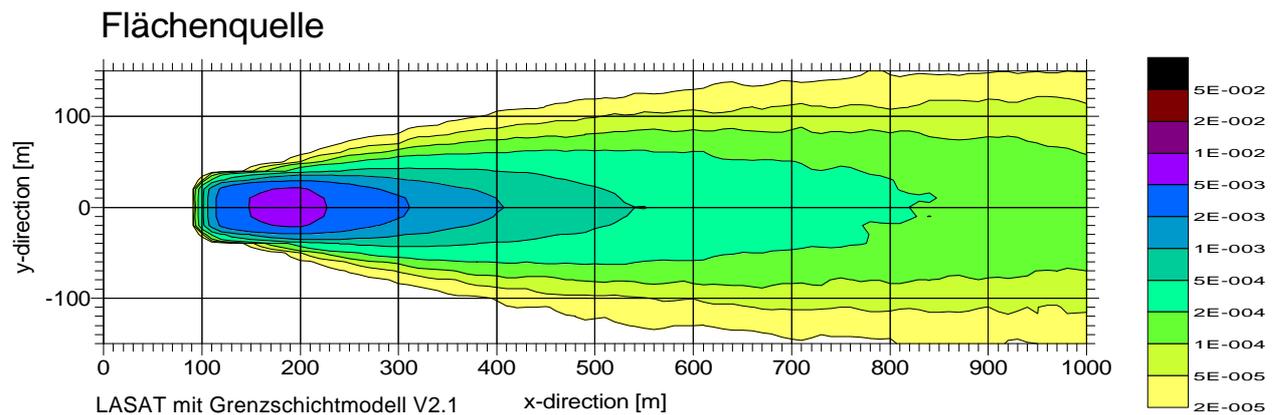
**Bodennahe Konz.  $c \cdot u_{10}/Q$  in  $1/m^2$  für  $u_{10} = 2m/s$**



LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
bodennahe Punktquelle mit 360000#  
in 0.75...2m Höhe über Grund



LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
bodennahe Linienquelle mit 360000#  
in 0.75...2m Höhe über Grund



LASAT mit Grenzschichtmodell V2.1  
bodennahe Flächenquelle mit 360000#  
in 0.75...2m Höhe über Grund



Abb. 4.7: xy-Schnitte der normierten Konzentrationen für eine Anströmgeschwindigkeit von  $u_{10} = 2 m/s$  und alle drei Quellgeometrien.

Die bodennahen querwindintegrierten Konzentrationen am leeseitigen Modellrand liegen für Punkt-, Linien- und Flächenquelle zwischen  $2 \cdot 10^{-2}$  und  $5 \cdot 10^{-2}$  1/m (**Abb. 4.6**). Auf der Fahnenachse betragen die normierten Konzentrationen für alle Quellgeometrien  $1 \cdot 10^{-4}$  bis  $2 \cdot 10^{-4}$  1/m<sup>2</sup> bei Fahnenbreiten ( $2 \cdot 10^{-5}$  1/m<sup>2</sup>-Isolinie) von ca. 300 m (**Abb. 4.7**).

**Fazit:**

Die errechneten Radonkonzentrationsverteilungen zeigen in guter Näherung eine  $1/u$ -Abhängigkeit, so dass die Verwendbarkeit normierter Konzentrationen gewährleistet ist. Die Ergebnisse aller hier durchgeführten Berechnungen sind in sich schlüssig und massenerhaltend.

Der Vergleich der Ergebnisse wird im Hauptteil des Forschungsberichts mit den Ergebnissen der anderen beiden Modelliergruppen (Brenk Systemplanung, GRS) sowie der Windkanalmessungen durchgeführt.

## 5 LITERATUR

Janicke, L. (1998): Ausbreitungsmodell LASAT. Handbuch zu Version 2.8. Ingenieurbüro Dr. Lutz Janicke, Dunum, September 1998.

Janicke, L., Janicke, U. (2000): Vorschlag eines meteorologischen Grenzschichtmodells für Lagrangesche Ausbreitungsmodelle. Berichte für Umweltphysik Band 2, Nummer 2, Ausgabe 1, Ingenieurbüro Dr. Lutz Janicke, Dunum, September 2000 (erhältlich unter: [www.janicke.de](http://www.janicke.de)).

VDI 3782/3 (1985): Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre. Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung. Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure.

## A1 LASAT-EINGABEDATEIEN FÜR DIE PUNKTQUELLE UND U10 = 1 M/S

```

----- PARAM.DEF
- Test LASAT
. Titel = "Punktquelle bei Anstroemgeschwindigkeit u10 = 1 m/s"
  Kennung = Punktquelle1
  Flags = VERB+WRTMOD      ' Verbose
  Tau = 9                  ' Maximaler Zeitschritt
  Intervall = 0:30:00      ' Mittelungszeit
  Start = 0                ' Beginn mit Zeitpunkt 0
  Ende = 1:00:00
  Gruppen = 10
-----
- Definition des Rechnetzes ----- GRID.DEF
.
  Nx = 100
  Ny = 31
  Sk = { 0.0 0.75 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0 32.0 34.0 36.0 38.0 40.0
44.0 48.0 52.0 56.0 60.0 64.0 68.0 72.0 76.0 80.0 84.0 88.0 92.0 96.0 100.0 108.0 116.0 132.0 164.0 228.0
342.0 456.0 570.0 685.0 800.0 }
  Xmin = 0
  Ymin = 0
  Delta = 10
  Ntyp = 2
  Ptyp = 3
  lm = 160
-----
- Definition der Emissions-Quellen ----- QUELLEN.DEF
.
- Längenangaben in Meter ( Xq, Yq, Hq, Lq, Bq )
- Winkel in Grad gegen Nord ( Wq )
- Wärmestrom in MW ( Qq )
-
! Bezeichnung   Xq  Yq  Hq  Tq  Dq  Wq  Qq
Q PQ:          96.25 155  0  0  2.5  0  0.0
-----
- Definition der gasförmigen Komponenten ----- STOFFE.DEF
.
.
  Einheit = Bq      ' Mass-Einheit
  Vsed = 0.0       ' Sedimentations-Geschwindigkeit [m/s]
  Rate = 100      ' Emissionsrate der Teilchen [1/s]
-
- Auflistung der Komponenten
-
! Bezeichnung   Vdep   RefC   RefD
K Rn:          0.000   0.1   0.1
-----
- Definition der Quell-Stärken ----- STAERKE.DEF
.
  EmisFac = ?
-
  Tabelle der Anteile der einzelnen Komponenten
-
! QUELLE      Rn
E PQ:        10000.0  ' Quellstärke in [Bq/s]
-----
- Zeitreihe ----- VARIABEL.ZTR
.
!   T1      T2  Emisfac
Z 0:00:00  0:30:00   1
Z 0:30:00  1:00:00   1
-----

```

```
- Definition der Meteorologischen Parameter ----- WETTER.DEF
-
.Z0 = 0.1           ' Rauigkeitslänge (m)
Ha = 10.0          ' Anemometerhöhe (m)
Xa = 500
Ya = 160
Ua = 1.000         ' Gemessene Windgeschwindigkeit (m/s)
Ra = 270           ' Gemessene Windrichtung (Grad gegen Nord)
Turb = 0
Diff = 0
Kl = 3.1           ' Ausbreitungsklasse [Klug-Manier]
Ni = 0             ' Niederschlagsintensität [mm/h]
Intervall = 1:00:00 ' Mittelungsintervall [h:min:s]
```

**A2 VERTIKALPROFILE DER VERWENDETEN GRENZSCHICHTPARAMETER**

Nummer der verti- kalen Gitterzelle	Höhe [m]	Wind-geschw. [m/s]	$K_v$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_w$ [m <sup>2</sup> /s]	$\delta_v$ [m/s]	$\delta_w$ [m/s]	$K_u$ [m <sup>2</sup> /s]	$\delta_u$ [m/s]
0	0	0	0.035	0.015	0.173	0.113	0.054	0.217
1	0.75	0.337	2.048	0.026	0.173	0.112	2.048	0.217
2	2	0.583	2.914	0.068	0.173	0.112	2.914	0.217
3	4	0.744	3.555	0.135	0.173	0.112	3.555	0.217
4	6	0.852	3.935	0.199	0.173	0.111	3.935	0.217
5	8	0.924	4.207	0.262	0.173	0.111	4.207	0.217
6	10	0.977	4.418	0.323	0.173	0.11	4.418	0.217
7	12	1.02	4.592	0.382	0.173	0.11	4.592	0.217
8	14	1.056	4.738	0.439	0.173	0.109	4.738	0.217
9	16	1.087	4.866	0.495	0.173	0.109	4.866	0.217
10	18	1.114	4.978	0.549	0.173	0.108	4.978	0.217
11	20	1.138	5.079	0.601	0.173	0.108	5.079	0.217
12	22	1.16	5.17	0.652	0.173	0.107	5.17	0.217
13	24	1.18	5.253	0.701	0.173	0.107	5.253	0.217
14	26	1.198	5.33	0.749	0.173	0.106	5.33	0.217
15	28	1.214	5.401	0.795	0.173	0.106	5.401	0.217
16	30	1.23	5.467	0.84	0.173	0.105	5.467	0.217
17	32	1.244	5.529	0.883	0.173	0.105	5.529	0.217
18	34	1.258	5.587	0.925	0.173	0.104	5.587	0.217
19	36	1.271	5.642	0.966	0.173	0.104	5.642	0.217
20	38	1.283	5.694	1.005	0.173	0.103	5.694	0.217
21	40	1.294	5.743	1.043	0.173	0.103	5.743	0.217
22	44	1.311	5.835	1.115	0.173	0.102	5.835	0.217
23	48	1.33	5.919	1.183	0.173	0.101	5.919	0.217
24	52	1.349	5.996	1.245	0.173	0.1	5.996	0.217
25	56	1.365	6.068	1.303	0.173	0.099	6.068	0.217
26	60	1.381	6.134	1.357	0.173	0.098	6.134	0.217
27	64	1.396	6.197	1.407	0.173	0.097	6.197	0.217
28	68	1.409	6.255	1.453	0.173	0.096	6.255	0.217
29	72	1.422	6.311	1.496	0.173	0.095	6.311	0.217
30	76	1.434	6.363	1.535	0.173	0.095	6.363	0.217
31	80	1.446	6.413	1.57	0.173	0.094	6.413	0.217
32	84	1.457	6.46	1.602	0.173	0.093	6.46	0.217
33	88	1.467	6.506	1.632	0.173	0.092	6.506	0.217
34	92	1.477	6.549	1.658	0.173	0.091	6.549	0.217
35	96	1.487	6.59	1.682	0.173	0.09	6.59	0.217
36	100	1.496	6.63	1.703	0.173	0.089	6.63	0.217
37	108	1.509	6.705	1.737	0.173	0.088	6.705	0.217
38	116	1.526	6.775	1.763	0.173	0.086	6.775	0.217
39	132	1.548	6.901	1.791	0.173	0.083	6.901	0.217
40	164	1.587	7.115	1.772	0.173	0.077	7.115	0.217
41	228	1.664	7.442	1.564	0.173	0.067	7.442	0.217

42	342	1.731	7.851	1.044	0.173	0.051	7.851	0.217
43	456	1.81	8.147	0.62	0.173	0.039	8.147	0.217
44	570	1.87	8.382	0.345	0.173	0.03	8.382	0.217
45	685	1.919	8.579	0.184	0.173	0.023	8.579	0.217
46	800	1.961	8.749	0.095	0.173	0.018	8.749	0.217

Tab. A2.1: Vertikalprofile der verwendeten Turbulenzparameter für die Anströmgeschwindigkeit  $u_{10} = 1$  m/s (vgl. **Abb. A2.1**).

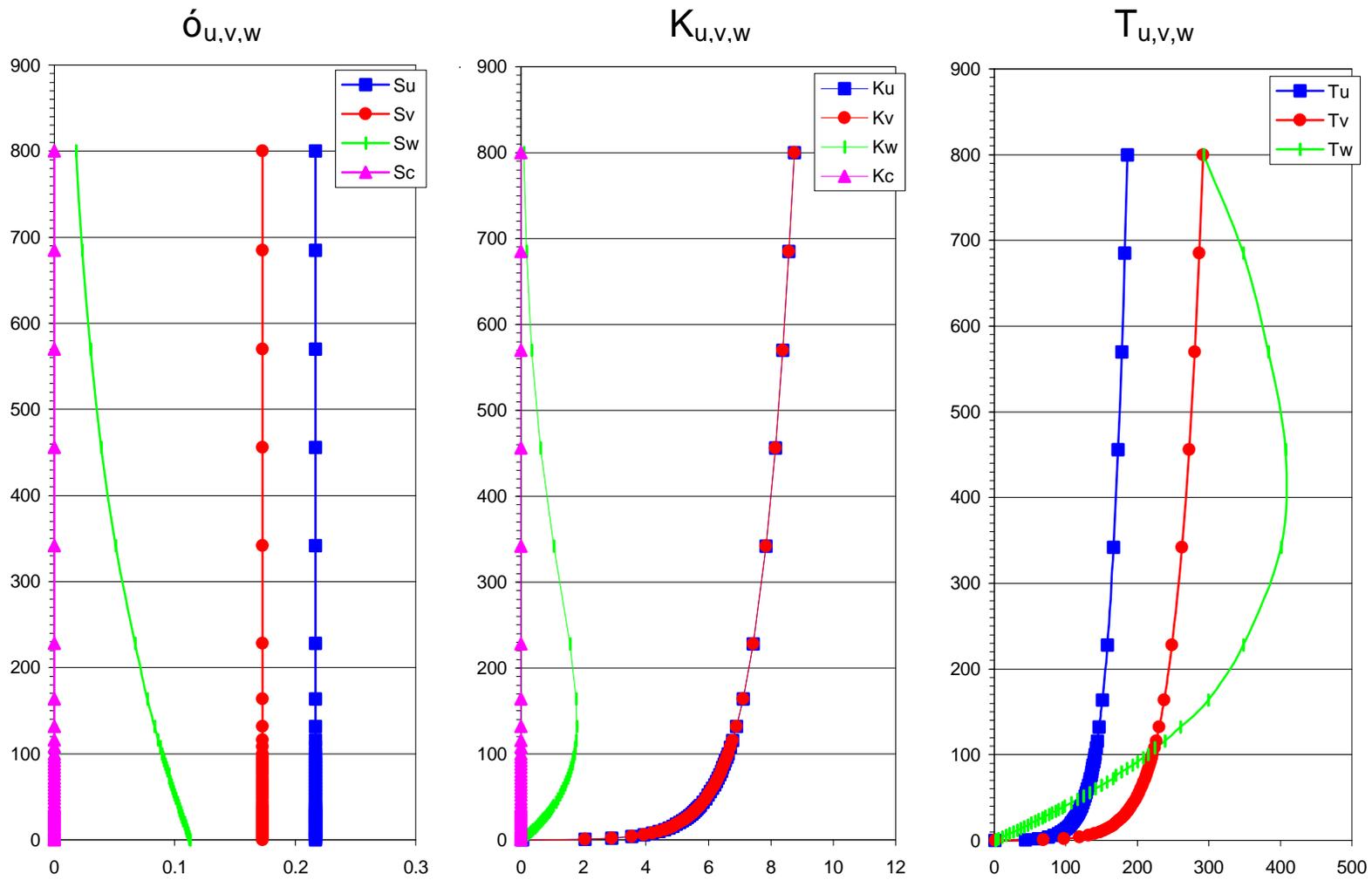


Abb. A2.1: Profile der verwendeten Turbulenzparameter  $\hat{\sigma}_{u,v,w}$ ,  $K_{u,v,w}$  und  $T_{u,v,w}$  (vgl. Tab. A2.1).

**Untersuchungen zur Festlegung von Parametern für die  
Modellierung der Radonausbreitung  
aus bodennahen Flächenquellen**

**Ausbreitungsrechnungen mit der GRS-Version von LASAT**

**Reinhard Martens, Harald Thielen**

**Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)**

**Köln, 22.5.2002**

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modellbeschreibung</b>	<b>1</b>
2.1	Lagrange-Partikelmodelle	1
2.2	Grenzschichtmodell	4
<b>3</b>	<b>Durchgeführte Ausbreitungsrechnungen</b>	<b>7</b>
3.1	Festlegung des Rechengebietes, Gitterdefinition	7
3.2	Quellkonfiguration	7
3.3	Weitere Vorgabeparameter	8
3.4	Zielgrößen der Modellierung (Auswerteparameter)	11
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>12</b>
4.1	Nachweis der Geschwindigkeitsunabhängigkeit der Ergebnisse	12
4.2	Ergebnisse für die drei untersuchten Quellgeometrien	21
4.3	Gegenüberstellung querwindintegrierter Konzentrationen für die Turbulenzparameterisierungen nach VDI 3783/Bl.8 und Brenk- Systemplanung	24
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>30</b>

## **1 Aufgabenstellung**

Im Rahmen des Vorhabens St. Sch. 4270 „Untersuchungen zur Festlegung von Parametern für die Modellierung der Radonausbreitung aus bodennahen Flächenquellen“ werden unterschiedliche Methoden der gutachterlichen Praxis hinsichtlich der Parameterisierung der atmosphärischen Turbulenz verglichen. Hierzu wurden im so genannten „Kleinen Windkanal“ der Universität Hamburg verschiedene Konfigurationen bodennaher, kontinuierlich emittierender Quellen (Punkt-, Linien- und Flächenquelle) bei neutralen Schichtungsverhältnissen und in ebenem Gelände in Bezug auf die resultierenden Schadstoffverteilungen im Lee der Quellen untersucht. Die dabei experimentell ermittelten Konzentrationsverteilungen wurden mit den Ergebnissen von Ausbreitungsrechnungen mit gebräuchlichen Modellansätzen verglichen:

- Euler-Modell mit Diffusionskoeffizienten nach /BS 95/, Brenk-Systemplanung,
- Lagrange-Partikelmodell LASAT, Version 2.8 mit Meteorologie-Modell Version 2.1 /JAN 98/, Ingenieurbüro Lohmeyer,
- GRS-Version des Lagrange-Partikelmodells LASAT /MAS 93/ mit Turbulenzparameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8 /VDI 01/.

Der vorliegende Anhang enthält die Beschreibung der Vorgehensweise und der resultierenden Ergebnisse der entsprechenden Ausbreitungsrechnungen mit der GRS-Version von LASAT /MAS 93/ auf der Basis der Turbulenzparameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8 /VDI 01/.

## **2 Modellbeschreibung**

### **2.1 Lagrange-Partikelmodelle**

Den Lagrange-Partikelmodellen liegt folgendes Gedankenexperiment zugrunde: Von einem festen Ort im Raum (Emissionsort) werden markierte Simulationsteilchen (Partikel) als Repräsentanten für einen Luftschadstoff in die Atmosphäre abgegeben und deren Wege (Trajektorien) nachvollzogen. Die Teilchen mögen so klein sein, dass sie

den turbulenten Luftbewegungen exakt folgen. Wenn man die Rechnungen für eine große Anzahl von Partikeln durchführt, kann aus der räumlichen Verteilung der Partikel nach einer vorgegebenen Ausbreitungszeit ortsabhängig die Schadstoffkonzentration ermittelt werden. Typischerweise wird bei Partikelmodellen das Ausbreitungsverhalten einiger 100 000 Simulationsteilchen auf dem Computer simuliert. Der Ortsvektor  $X$  eines Partikels zur Zeit  $t + \Delta t$  ergibt sich nach folgender Gleichung

$$X(t + \Delta t) = X(t) + U(x,t) \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

aus dem Ortsvektor  $X(t)$  dieses Partikels und seiner momentanen Geschwindigkeit  $U(X, t)$  zur Zeit  $t$ . Die momentane Geschwindigkeit des Partikels setzt sich zusammen aus einem mittleren Anteil  $\bar{U}(X, t)$ , der dem Betrag des führenden (advektiven) Windes entspricht, sowie dem fluktuierenden Anteil  $U'(X, t)$ , der die Turbulenzstruktur am Ort  $X$  zur Zeit  $t$  widerspiegelt:

$$U(X, t) = \bar{U}(X, t) + U'(X, t) \quad (2.2)$$

Atmosphärische Bewegungsvorgänge weisen ein trägheitsbedingtes „Gedächtnis“ auf: Zwischen den Bewegungsformen (Geschwindigkeit und Richtung) eines Partikels zu den Zeiten  $t$  und  $t + \Delta t$  besteht ein Zusammenhang (Korrelation). Die Stärke dieser Korrelation ist abhängig von der thermischen Schichtung der Atmosphäre bzw. der Größe der am atmosphärischen Transport beteiligten turbulenten Wirbel. Ein Maß für das „Gedächtnis“ atmosphärischer Bewegungszustände ist die so genannte Lagrange-sche Korrelationszeit (Zeitskala der Turbulenz)  $T_L$ , die bei labiler Schichtung groß ist und von labiler zu stabiler Schichtung abnimmt.

Lagrange-Partikelmodellen liegt die Annahme zugrunde, dass der Weg von Partikeln mit Hilfe eines Markov-Prozesses simuliert werden kann, d.h. der Zustand eines Partikels zur Zeit  $t + \Delta t$  hängt nur von seinem Zustand zur Zeit  $t$  ab. Diese Annahme bedeutet, dass sich der fluktuierende Anteil der Windgeschwindigkeitskomponente  $U'(X, t)$  aufteilen lässt

- in einen korrelierten Anteil, der das Erinnerungsvermögen repräsentiert, und der der alten fluktuierenden Geschwindigkeitskomponente  $U'(t - \Delta t)$  proportional ist, und
- in eine Zufallskomponente, die aus einer geeigneten, die Turbulenzstruktur widerspiegelnden Zufallsverteilung gezogen wird.

Der advective Anteil des Windes  $\bar{U}(X,t)$  kann von einem Windfeld bereitgestellt werden, das durch ein Strömungsmodell berechnet wurde. Zur Bestimmung des fluktuierenden Anteils  $U'(X,t)$  sind Turbulenzfelder – charakterisiert durch die Streuungen der turbulenten Windgeschwindigkeitskomponenten  $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$  und die Zeitskalen der Turbulenz  $T_{Lu}, T_{Lv}, T_{Lw}$  – erforderlich. Bei prognostischen Strömungsmodellen lassen sich diese Turbulenzfelder im Prinzip direkt aus den Ergebnisfeldern (auch für topographisch gegliedertes Gelände und komplexe meteorologische Bedingungen) ableiten. Bei Verwendung von Windfeldern aus einem massenkonsistenten Windfeldmodell, das gegenüber einem prognostischen Modell auf einer vereinfachten Modellphysik beruht und nur den mittleren advectiven Wind in topographisch gegliedertem Gelände als Ergebnis liefert, müssen die Turbulenzfelder mit Hilfe eines geeigneten zusätzlichen Präprozessors abgeleitet werden. Im einfachen Fall horizontal homogener Bedingungen, bei denen sich der mittlere advective Wind  $\bar{U}(x,y,z)$  sowie die Turbulenzparameter  $\sigma_{u,v,w}(x,y,z)$  und  $T_{Lu,v,w}(x,y,z)$  nur mit der Höhe  $z$  ändern, kann auf ein einfaches Grenzschichtmodell zurückgegriffen werden. Weitergehende Informationen über Lagrange-Partikelmodelle können z.B. /HEL 99/ oder /ZEN 98/ entnommen werden.

Den Partikeln eines Lagrange-Partikelmodells lassen sich zusätzlich bestimmte Eigenschaften zuordnen, z.B. die Halbwertszeit oder die Depositionsgeschwindigkeit. Der Simulationsalgorithmus erfordert die Verwendung einer großen Anzahl von Partikeln und benötigt deshalb i. a. mehr Rechenzeit als Gaußartige-Modelle oder Eulersche Modelle. Lagrange-Partikelmodelle besitzen ein hohes Potenzial zur realistischen Simulation von Ausbreitungsvorgängen, auch bei inhomogenen Wind- und Turbulenzfeldern. Dies zeigt sich besonders bei der Simulation von starken Windscherungen, komplizierten vertikalen Temperaturschichtungen oder komplexen, orographisch beeinflussten Windfeldern. Die erzielbare Qualität der Rechenergebnisse hängt jedoch entscheidend davon ab, mit welcher Genauigkeit die benötigten Wind- und Turbulenzfelder (dreidimensionales Windfeld, die Standardabweichungen der turbulenten Windgeschwindigkeitskomponenten  $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$  und die entsprechenden Zeitskalen der Turbulenz  $T_{Lu}, T_{Lv}, T_{Lw}$ ) dem Ausbreitungsmodell zur Verfügung gestellt werden können. Damit verschiebt sich das Problem der Ausbreitungsberechnung unter komplizierten meteorologischen und orographischen Bedingungen auf die Berechnung der Strömungsfelder und die Beschaffung der dafür benötigten Eingabedaten. Beinhaltend diese Felder z.B. eine vertikale Windscherung oder die Ausbildung eines Gegenstroms in einem Tal, so kann ein Lagrange-Partikelmodell diese Phänomene explizit berücksichtigen.

Mit der GRS-Version von LASAT /MAS 93/ können – angetrieben von dreidimensionalen Wind- und Turbulenzfeldern – dreidimensionale Stoffkonzentrationsverteilungen  $C(x, y, z)$  in Masseinheit/m<sup>3</sup> (in diesem Fall Bq/m<sup>3</sup>) als Folge der Emissionen einer beliebigen Anzahl von Quellen beliebiger Quellgeometrien (Punkt-, Linien-, Flächen-, Volumenquellen) berechnet werden.

## 2.2 Grenzschichtmodell

Zur Bestimmung der Stoffkonzentrationen und damit der Partikelorte im Ausbreitungsmodell zu einem Zeitpunkt werden neben dem mittleren advektiven Windfeld  $\bar{U}(x, y, z)$  (Gleichung 2.2), die Streuung der Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_{u,v,w}(x, y, z)$  und die turbulenten Zeitskalen  $T_{Lu,v,w}(x, y, z)$  benötigt. Die Indizes  $u$ ,  $v$  und  $w$  bedeuten, dass diese Größen im Windsystem definiert werden. Das Koordinatensystem ist dabei so orientiert, dass der mittlere Wind in Richtung der positiven  $x$ -Achse weht. Mit  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  und  $\bar{w}$  werden die Komponenten des mittleren Windes  $\bar{U} = (\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$  bezeichnet. Bei einer Anströmung in  $x$ -Richtung ist somit  $\bar{U} \equiv \bar{u}$ .

Aus dem Taylor-Theorem /PAS 83/ folgt, dass sich eine Teilchenwolke in einem Feld homogener Turbulenz auf einer Zeitskala, die groß ist gegenüber der turbulenten Zeitskalen (Lagrange-Korrelationszeit)  $T_{u,v,w}$  so aufweitet, wie es die klassische Diffusionsgleichung mit einem Diffusionskoeffizienten

$$K_{u,v,w} = \sigma_{u,v,w}^2 \cdot T_{u,v,w} \quad (2.3)$$

beschreibt. Aus der Vorgabe der turbulenten Zeitskalen und der Geschwindigkeitsfluktuationen können somit die Diffusionskoeffizienten bestimmt werden.

Für die Nachrechnung der im „Kleinen Windkanal“ der Universität Hamburg durchgeführten Ausbreitungsexperimente mit verschiedenen bodennah kontinuierlich emittierenden Quellen (Punkt-, Linien- und Flächenquelle) bei neutralen Schichtungsverhältnissen und ebenem Gelände wird die GRS-Version des Partikelmodells LASAT /MAS 93/ mit dem in der Richtlinie VDI 3783, Blatt 8 /VDI 01/ beschriebenen Grenzschichtmodell eingesetzt. In dieser VDI-Richtlinie wird das vertikale Windgeschwindigkeitsprofil  $\bar{u}(z)$  stabilitätsabhängig beschrieben durch:

$$\bar{u}(z) = \begin{cases} \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left[ \ln \frac{z}{z_0} - 2 \cdot \ln \frac{1+X}{1+X_0} - \ln \frac{1+X^2}{1+X_0^2} + 2 \cdot \arctan X - 2 \cdot \arctan X_0 \right] & \text{für } \frac{z}{L} \leq 0 \\ \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left[ \ln \frac{z}{z_0} + 5 \cdot \left( \frac{z-z_0}{L} \right) \right] & \text{für } 0 \leq \frac{z}{L} < 0,5 \\ \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left[ 8 \ln \left( 2 \frac{z}{L} \right) + 4,25 \left( \frac{z}{L} \right)^{-1} - 0,5 \left( \frac{z}{L} \right)^{-2} \right. \\ \quad \left. - \ln \left( 2 \frac{z_0}{L} \right) - 5 \frac{z_0}{L} - 4 \right] & \text{für } 0,5 \leq \frac{z}{L} < 10 \\ \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left[ 0,7585 \frac{z}{L} + 8 \ln 20 - 11,165 - \ln \left( 2 \frac{z_0}{L} \right) - 5 \frac{z_0}{L} \right] & \text{für } 10 \leq \frac{z}{L} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\text{mit: } X = \left( 1 - 15 \cdot \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad X_0 = \left( 1 - 15 \cdot \frac{z_0}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{und } z \geq z_0. \quad (2.5)$$

Dabei bedeuten:

- $u_*$  Schubspannungsgeschwindigkeit,
- $z_0$  Rauigkeitslänge,
- $L$  Monin-Obukhov-Länge,
- $\kappa = 0.4$  von-Kármán-Konstante.

Die turbulenten Geschwindigkeitskomponenten setzen sich aus einem mechanischen Anteil, der durch die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  beschrieben wird, und – bei labiler Schichtung – aus einem konvektiven Anteil, der durch die konvektive Skalierungsgeschwindigkeit  $w_*$  dargestellt wird, zusammen:

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \left[ (2.4u_*)^3 + (0.59w_*)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right) \\ \sigma_v &= \left[ (1.8u_*)^3 + (0.59w_*)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right) \\ \sigma_w &= \left( \left( 1.3u_* \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right) \right)^3 + \left( 1.3 \left( \frac{z}{z_i} \right)^{\frac{1}{3}} \left( 1 - 0.8 \frac{z}{z_i} \right) w_* \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\text{mit } w_* = u_* \left( -\frac{z_i}{\kappa \cdot L} \right)^{1/3} \quad \text{konvektive Skalierungsgeschwindigkeit}$$

$z_i$  Mischungsschichthöhe

Die Parameterisierung der turbulenten Zeitskalen erfolgt ausgehend von der Kolmogorov-Theorie in Abhängigkeit von der Varianz der turbulenten Geschwindigkeitskomponenten  $\sigma_{u,v,w}(z)$ , der Dissipationsrate der turbulenten kinetischen Energie  $\varepsilon$  und der Kolmogorov-Konstanten  $C_0$  /KER 00/:

$$T_{Lu,v,w} = \frac{2\sigma_{u,v,w}^2}{C_0\varepsilon} \quad (2.7)$$

mit  $C_0$  Kolmogorov Konstante,  $C_0 = 5,7$

$\varepsilon$  Dissipationsrate für turbulente kinetische Energie

Für neutral bis labil geschichtete Atmosphären mit  $L < 0$  m wird die Dissipationsrate der turbulenten kinetischen Energie als Funktion der Höhe über Grund und der Stabilität wie folgt berechnet:

$$\varepsilon = \max \left[ \frac{u_*^3}{k \cdot z} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{z}{z_i} \right)^2 + 2.5 \cdot k \cdot \frac{z}{z_i} \right] + \frac{w_*^3}{z_i} \cdot \left[ 1.5 - 1.3 \left( \frac{z}{z_i} \right)^{\frac{1}{3}} \right], \frac{u_*^3}{kz} \right] \quad (2.8)$$

Für stabile Schichtung der Atmosphäre ( $L > 0$  m) ist folgender Ansatz zu verwenden:

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{k \cdot z} \cdot \phi_\varepsilon \quad (2.9)$$

$$\text{mit } \phi_\varepsilon = \phi_m - \frac{z}{L} \quad (2.10)$$

$$\text{und } \phi_m = 1 + 5 \cdot \frac{z}{L} \quad (2.11)$$

Die angegebenen Formeln können zur Modellierung der turbulenten Diffusion herangezogen werden, wenn sich die Freisetzungen über den Zeitraum von etwa einer halben Stunde erstrecken.

### 3 Durchgeführte Ausbreitungsrechnungen

Die Rechnungen wurden für die im Windkanal durch neutrale Schichtung und eine Rauigkeitslänge von  $z_0 = 0.1$  m charakterisierten Grenzschichtparameter vorgenommen. Für alle drei Quellformen (Punkt-, Linien- und Flächenquelle) wurde das gleiche Rechengitter verwendet (vgl. Abschnitt 3.2). Dies erleichtert eine einheitliche Auswertung der Modellergebnisse. Die Rechnungen wurden jeweils mit drei Anströmgeschwindigkeiten in 10 m Bezugshöhe durchgeführt (d.h. 1 m/s, 2 m/s und 5 m/s).

#### 3.1 Festlegung des Rechengebietes, Gitterdefinition

Die Ausbreitungsrechnungen wurden in einem Simulationsgebiet mit Abmessungen von 1 000 m in x-Richtung (in Ausbreitungsrichtung), 310 m in y-Richtung (quer zur Anströmungsrichtung) und bis in eine Höhe von  $z = 800$  m über Grund vorgenommen (Tab. 3.1). Die vertikale Erstreckung des Rechengebiets wird durch die Mischungsschichthöhe bestimmt, die auf  $z_i = 800$  m festgelegt war. Die horizontale Gitterauflösung betrug in x- und y-Richtung jeweils:  $\Delta x = \Delta y = 10$  m. Das vertikale Gitter war gespreizt, um eine gute Auflösung am Boden und gleichzeitig eine Berücksichtigung bis in eine Höhe von 800 m zu ermöglichen, ohne die Anzahl der Gitterzellen und damit auch der Simulationszeit unnötig zu erhöhen. Die Anzahl der verwendeten Gitterzellen betrug  $100 \times 31 \times 46$ . Das Zentrum der Südwestecke des Rechengitters hat die Koordinaten  $(x, y, z) = (0\text{m}, -155\text{m}, 0\text{m})$ . Alle drei Quellformen (Punkt-, Linien- und Flächenquelle) wurden so platziert, dass die Fahnenachse der Punktquelle bei  $y = 0$  liegt (Abb. 3.1).

#### 3.2 Quellkonfiguration

Die bodennahen Quellen wurden im Rechengitter jeweils so positioniert, dass die luvseitigen Ränder der Quellen jeweils am luvseitigen Rand derjenigen Gitterzellen lagen, deren Zentren sich bei  $x = 100$  m befanden. Des Weiteren wurde der laterale Nullpunkt ( $y = 0$ ) auf den Quellschwerpunkt bzw. die Fahnenachse gelegt (vgl. Abb. 3.1).

Tab. 3.1: Vertikale Gittereinteilung

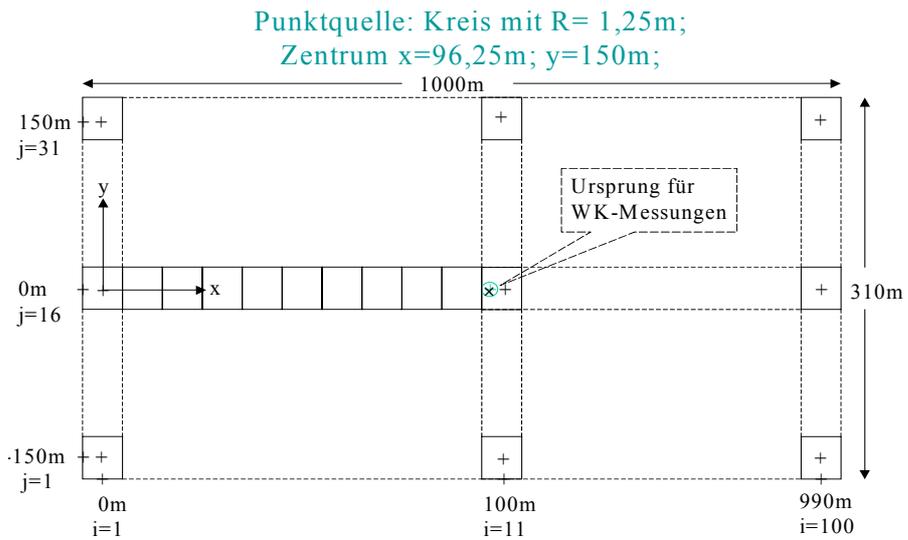
Level	Unter- kante (m)	Ober- kante (m)	Level	Unter- kante (m)	Ober- kante (m)	Level	Unter- kante (m)	Ober- kante (m)
1	0,0	0,75	17	30,0	32,0	33	84,0	88,0
2	0,75	2,0	18	32,0	34,0	34	88,0	92,0
3	2,0	4,0	19	34,0	36,0	35	92,0	96,0
4	4,0	6,0	20	36,0	38,0	36	96,0	100,0
5	6,0	8,0	21	38,0	40,0	37	100,0	108,0
6	8,0	10,0	22	40,0	44,0	38	108,0	116,0
7	10,0	12,0	23	44,0	48,0	39	116,0	132,0
8	12,0	14,0	24	48,0	52,0	40	132,0	164,0
9	14,0	16,0	25	52,0	56,0	41	164,0	228,0
10	16,0	18,0	26	56,0	60,0	42	228,0	342,0
11	18,0	20,0	27	60,0	64,0	43	342,0	456,0
12	20,0	22,0	28	64,0	68,0	44	456,0	570,0
13	22,0	24,0	29	68,0	72,0	45	570,0	685,0
14	24,0	26,0	30	72,0	76,0	46	685,0	800,0
15	26,0	28,0	31	76,0	80,0			
16	28,0	30,0	32	80,0	84,0			

### 3.3 Weitere Vorgabeparameter

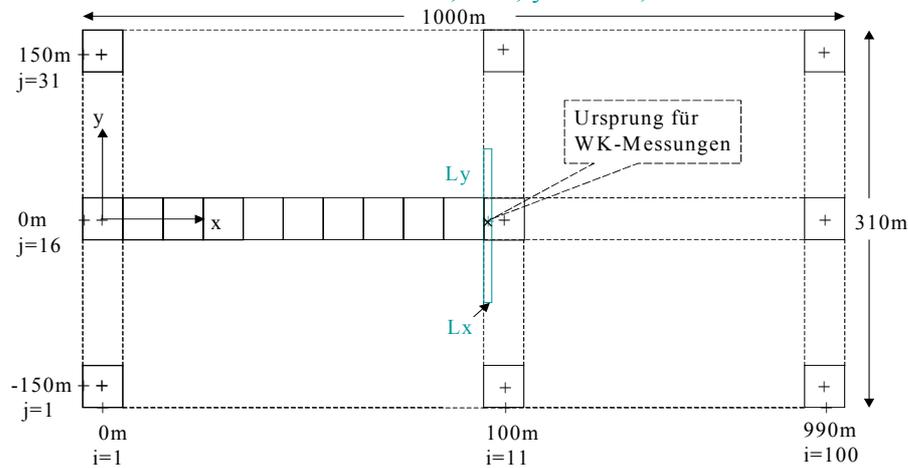
Die Simulationen mit dem Partikelmodell wurden für alle drei Quellkonfigurationen mit der einheitlichen Freisetzungsrate von  $Q = 10\,000$  Bq/s durchgeführt, wobei 100 Partikel/s freigesetzt wurden. Bei einer Gesamtsimulationszeit von einer Stunde wurden somit pro Simulationslauf 360 000 Partikel freigesetzt. Für die Auswertung wurden die Konzentrationsfelder im Zeitraum zwischen 1 800 s und 3 600 s herangezogen. Mit der halbstündlichen Vorrechnung wurde eine stationäre Konzentrationsverteilung vor Beginn des Mittelungsintervalls sichergestellt.

Für die Rauigkeitslänge von  $z_0 = 0.1$  m, die Mischungsschichtobergrenze  $z_i = 800$  m und die jeweiligen Anströmgeschwindigkeiten  $u_{10}$  in 10 m Höhe über Grund von 1 m/s, 2 m/s und 5 m/s in positiver  $x$ -Richtung wurden für neutrale Schichtungsverhältnisse ( $L = 100\,000$  m) mit den in Abschnitt 2 dargestellten Gleichungen aus /VDI 01/ die Vertikalprofile für die mittlere Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$ , die turbulenten Windgeschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_{u,v,w}$ , und die turbulenten Zeitskalen  $T_{Lu,v,w}$  berechnet. Mit diesen Windgeschwindigkeits- und Turbulenzprofilen wurden dann die Ausbreitungsrechnungen vorgenommen.

Die Abbildungen 3.2 bis 3.4 zeigen exemplarisch für  $u_{10} = 1$  m/s im Höhenbereich  $z \leq 600$  m die Vertikalprofile für die Parameter  $\bar{u}(z)$ ,  $\sigma_{u,v,w}(z)$  und  $T_{Lu,v,w}(z)$  und  $K_{u,v,w}(z)$ .



Linienquelle: Rechteck mit  $L_x=2,5\text{m}$ ;  $L_y=50\text{m}$ ;  
Zentrum  $x=96,25\text{m}$ ;  $y=150\text{m}$ ;



Flächenquelle: Rechteck mit  $L_x=100\text{m}$ ;  $L_y=50\text{m}$ ;  
Zentrum bei  $x=145\text{m}$ ;  $y=150\text{m}$ ;

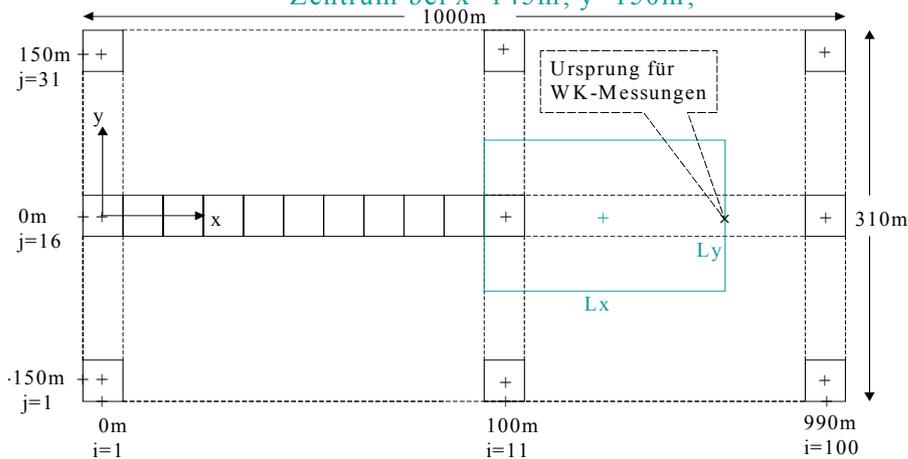


Abb. 3.1: Gitter- und Quellkonfigurationen für die Ausbreitungsrechnungen getrennt nach Punkt-, Linien- und Flächenquelle

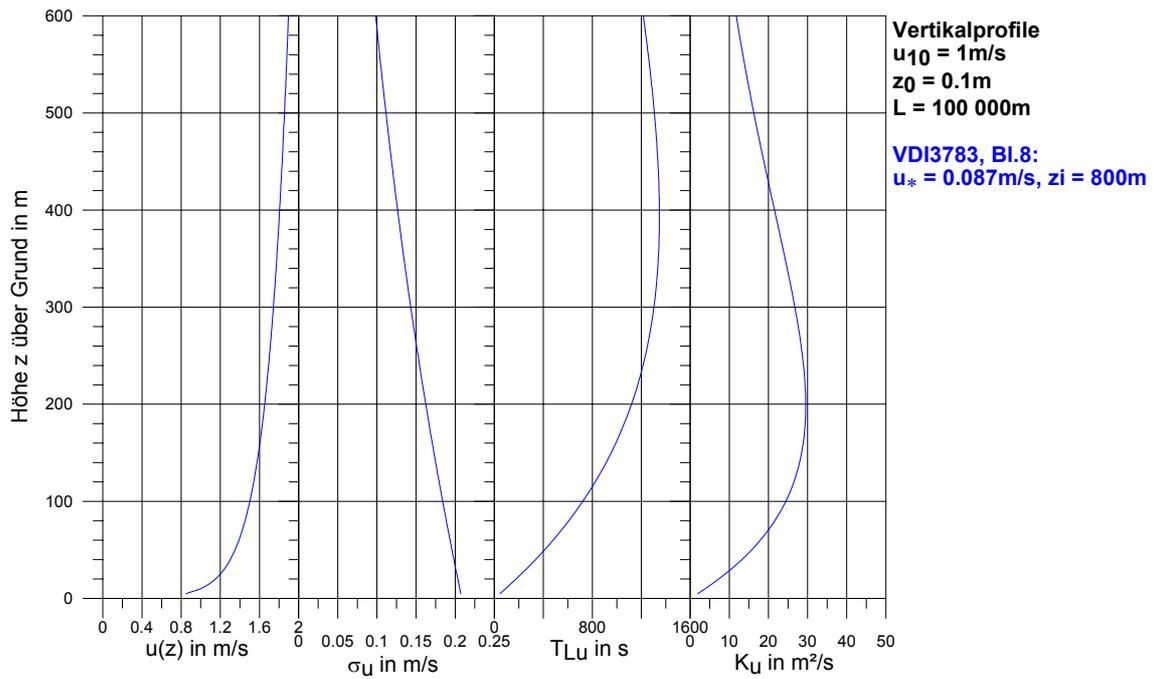


Abb. 3.2: Vertikalprofile nach VDI 3783, Bl. 8:  
 Betrag der Windgeschwindigkeit  $\bar{u}(z)$ ,  $\sigma_u(z)$ ,  $T_{Lu}(z)$  und  $K_u(z)$

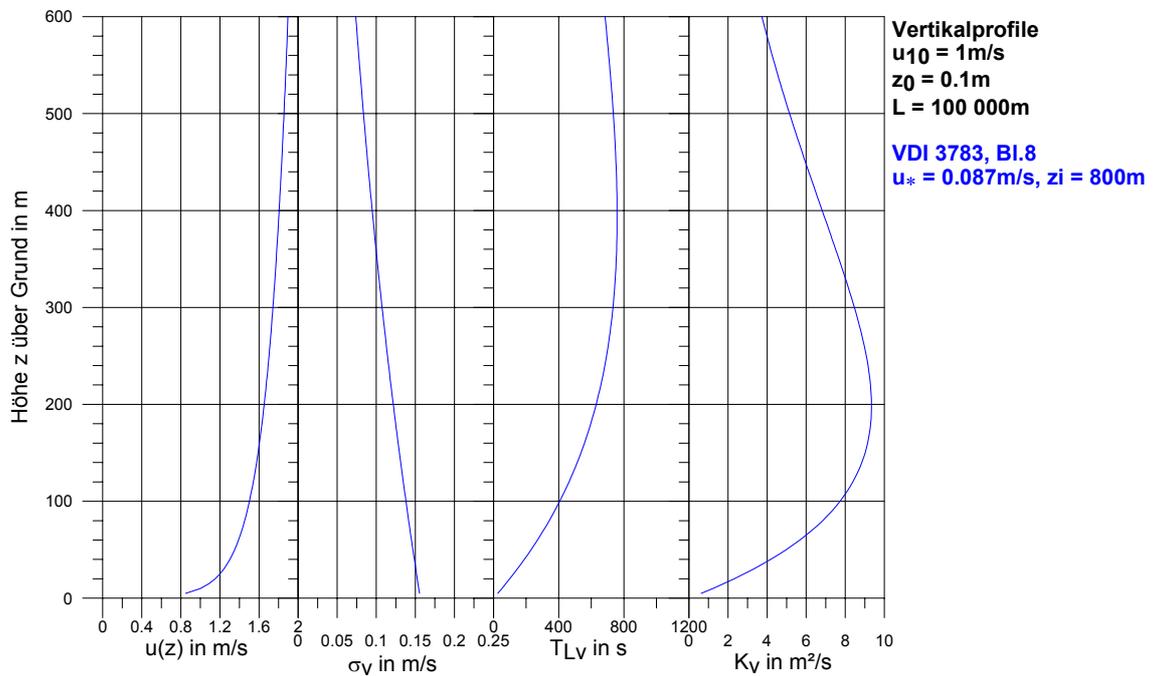


Abb. 3.3: Vertikalprofile nach VDI 3783, Bl. 8:  
 Betrag der Windgeschwindigkeit  $\bar{u}(z)$ ,  $\sigma_v(z)$ ,  $T_{Lv}(z)$  und  $K_v(z)$

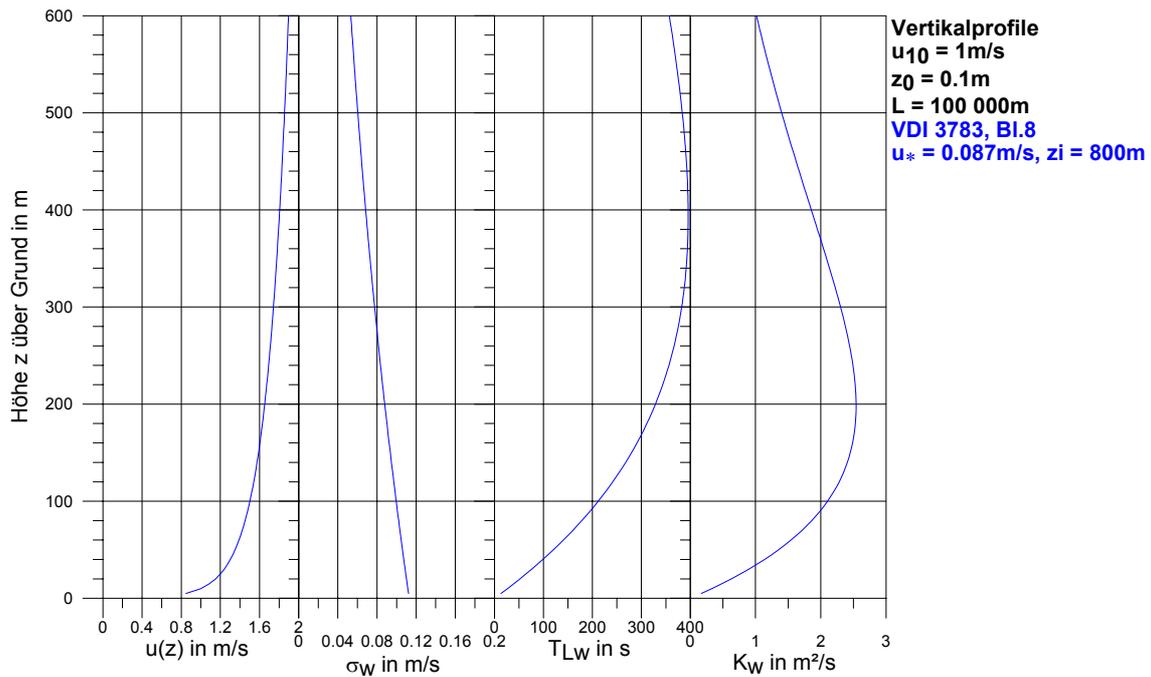


Abb. 3.4: Vertikalprofile nach VDI 3783, Bl. 8:  
Betrag der Windgeschwindigkeit  $\bar{u}(z)$ ,  $\sigma_w(z)$ ,  $T_{Lw}(z)$  und  $K_w(z)$

### 3.4 Zielgrößen der Modellierung (Auswerteparameter)

Als Ergebnis der numerischen Rechnungen liegen zunächst Konzentrationen in  $100 \times 31 \times 46$  Gitterzellen vor. Aufgrund der bei den Windkanalexperimenten eingestellten Messhöhe für die bodennahe Konzentration von 1,375 m wird von den Modellrechnungen die Schicht „Level“ 2 (unterer Abstand zum Erdboden: 0,75 m, oberer Abstand zum Erdboden: 2,0 m) für die bodennahen Radonkonzentrationen ausgewertet (vgl. Tab. 3.1) und mit den Messungen im Windkanal verglichen.

Als Auswerteparameter wurden die normierten Konzentrationen  $C^*$  bzw. die normierten querwindintegrierten Konzentrationen  $C_{QWI}^*$  herangezogen:

$$C^* = \frac{C \cdot u_{10}}{Q} \quad \text{bzw.} \quad C_{QWI}^* = \frac{C_{QWI} \cdot u_{10}}{Q} \quad (3.1)$$

Dabei ist die querwindintegrierte Konzentration  $C_{QWI}$  definiert als:

$$C_{QWI}(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, y, z) dy \cong \sum_{j=1}^{31} C_{i,j,k} \cdot \Delta y \quad (3.2)$$

## 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Rechnungen mit der GRS-Version des Modells LASAT werden in folgender Form präsentiert: Zunächst wird anhand der Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen für die Punktquelle die Unabhängigkeit der berechneten und mit der Geschwindigkeit  $v$  normierten Konzentrationen von der Anströmgeschwindigkeit nachgewiesen (Abschnitt 4.1). Anschließend werden exemplarisch die Ergebnisse für die Anströmgeschwindigkeit von  $u_{10} = 2$  m/s vorgestellt (Abschnitt 4.2).

Zu Testzwecken wurden mit der GRS-Version des Partikelmodells LASAT zusätzlich Ausbreitungsrechnungen mit der von der Fa. Brenk-Systemplanung (BS) verwendeten Turbulenzparameterisierung durchgeführt und mit entsprechenden Ergebnissen der Turbulenzparameterisierung nach VDI 3783, Bl.8 verglichen (Abschnitt 4.3).

### 4.1 Nachweis der Geschwindigkeitsunabhängigkeit der Ergebnisse

Die mit der Windgeschwindigkeit in Freisetzungshöhe normierten Konzentrationen entlang der Fahnenachse zeigen (Abb. 4.1 und 4.3), dass die Konzentrationsverläufe für die drei Anströmgeschwindigkeiten für jede Quellgeometrie jeweils übereinander liegen. Auch in den logarithmischen Darstellungen (Abb. 4.2 und 4.4) sind – abgesehen von Schwankungen, die durch das Monte-Carlo-Verfahren des Partikelmodells bedingt sind - praktisch keine Unterschiede in den normierten Konzentrationen  $C^*$  zu erkennen. Dies zeigt, dass die Ausbreitungsrechnungen mit dem Partikel-Modell (GRS-Version von LASAT) und Turbulenzparametern nach VDI 3783, Blatt 8, mit der reziproken Windgeschwindigkeit skalieren.

In Tab. 4.1 sind für die Punktquelle für verschiedene Quellentfernungen entlang der Fahnenachse die bodennahen normierten Konzentrationen  $C^*$  für eine Windgeschwindigkeit von  $u_{10} = 1$  m/s sowie die relativen Abweichungen von diesen normierten Konzentrationen, so wie sie sich für eine Windgeschwindigkeit von  $u_{10} = 5$  m/s ergeben angegeben. Die relativen Abweichungen liegen zwischen  $-8\%$  und  $+3\%$ , wobei die höchsten Unterschiede in derjenigen horizontalen Masche auftreten, in der sich die Punktquelle selbst befindet. Die Konzentrationsmaxima für die verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten werden in derselben Gitterzelle erreicht. Die relative Abweichung der normierten Konzentration für  $u_{10} = 5$  m/s liegt im Vergleich zu  $u_{10} = 1$  m/s bei ca.  $3\%$ .

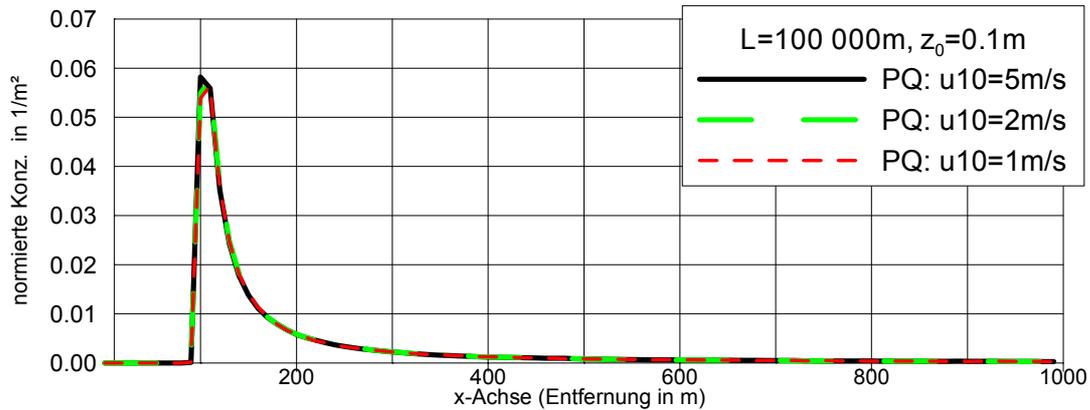
Tab. 4.1: Normierte Konzentrationen  $C_{u_{10}}^*$  für die Punktquelle bei der Anströmgeschwindigkeit  $u_{10} = 1 \text{ m/s}$  ( $C_{1\text{m/s}}^*$ ) in verschiedenen Quellentfernungen (Quelle liegt bei  $x = 96.25 \text{ m}$ ) auf der Fahnenachse sowie die prozentualen Abweichungen der entsprechenden normierten Konzentrationen bei  $u_{10} = 5 \text{ m/s}$ .

	$x = 100 \text{ m}$	$x = 200 \text{ m}$	$x = 400 \text{ m}$	$x = 800 \text{ m}$	Konzentrationsmaximum
$C_{1\text{m/s}}^* [1/\text{m}^2]$	0.054	0.0059	0.0013	0.00039	0.056
$(C_{5\text{m/s}}^* - C_{1\text{m/s}}^*) / C_{1\text{m/s}}^* [\%]$	-8.0	-0.68	-4.0	-4.4	+3.1

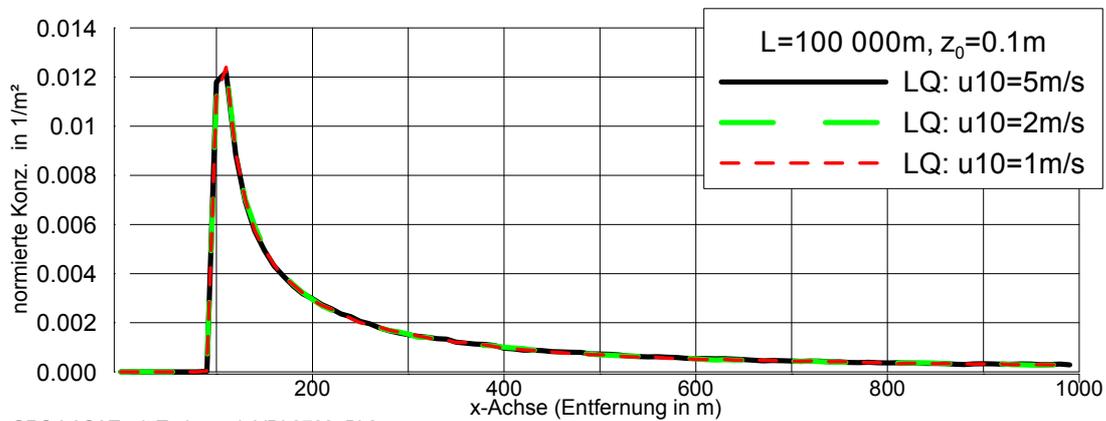
Aufgrund der verschiedenen Quellkonfigurationen und der Tatsache, dass alle drei Quellen mit der gleichen Quellstärke emittieren, ist das Maximum der normierten Konzentration  $C^*$  unter der Fahnenachse für Punktquellen höher als für Linienquellen und das für Linienquellen wiederum höher als für Flächenquellen. Bei den normierten querwindintegrierten Konzentrationen  $C_{QWI}^*$  ergeben sich aufgrund der Integration quer zur Ausbreitungsrichtung (siehe Gleichung (3.2)) für Punkt- und Linienquelle ähnliche Konzentrationsverläufe.

Die in Abb. 4.3 gezeigten Ergebnisse der Modellrechnungen bestätigen dieses Verhalten. Für die Flächenquelle wird das Maximum in den Konzentrationen erst am leeseitigen Ende der Flächenquelle bei  $x = 200 \text{ m}$  erreicht. Das Maximum ist um ca. 48 % niedriger als für die Punkt- und Linienquelle. Die Fläche unter den Kurven (Gesamtkonzentration) muss aufgrund der gleichen freigesetzten Massen jeweils gleich sein. Für die untersuchten Anströmgeschwindigkeiten ergeben sich bei der Flächenquelle gegenüber der Punktquelle um etwa 2 % geringere Gesamtkonzentrationen.

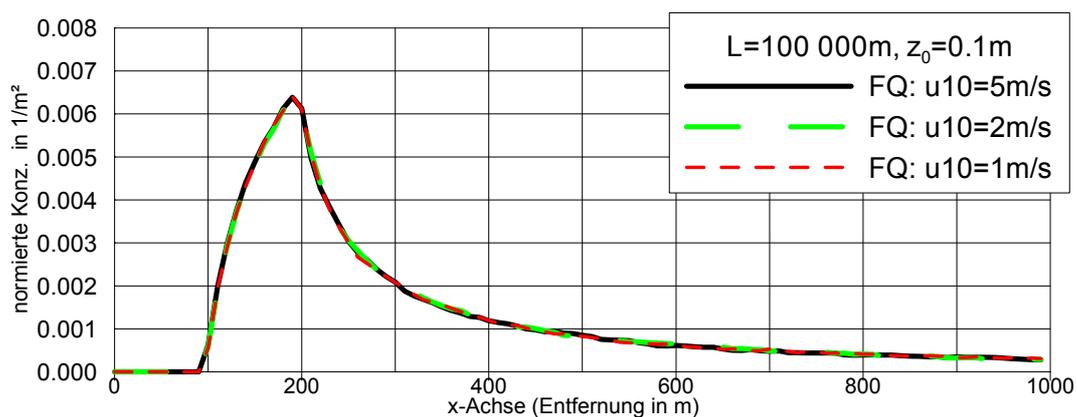
normierte Konzentration unter der Fahnenachse  
in 0.75 ... 2m Höhe ( $C \cdot u_{10}/Q$ )



GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Punktquelle mit 360 000# in 3 600s



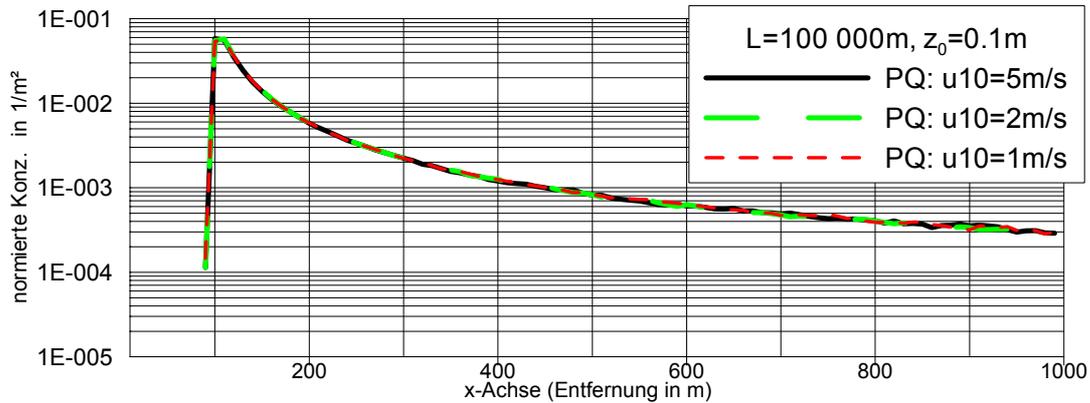
GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Linienquelle mit 360 000# in 3 600s



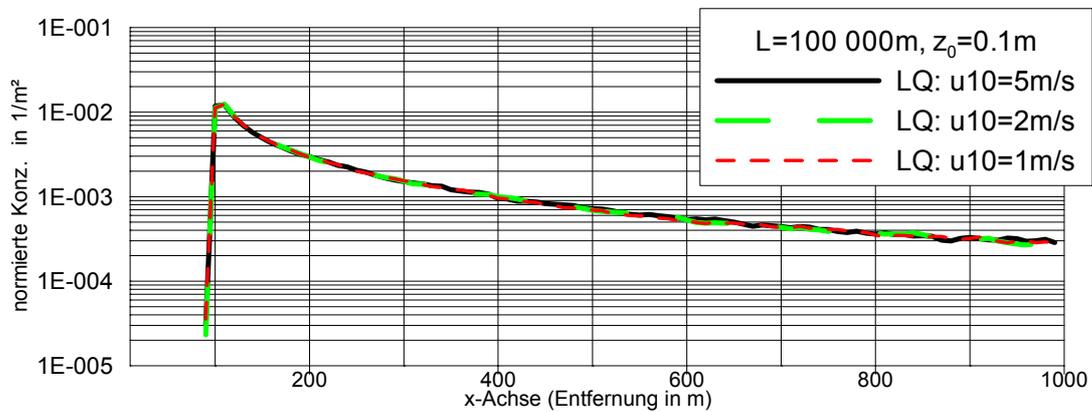
GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Flächenquelle mit 360 000# in 3 600s

Abb.4.1: Normierte Konzentration entlang der Fahnenachse ( $y=0$ ) für die drei Anströmgeschwindigkeiten getrennt für die drei Quellgeometrien.

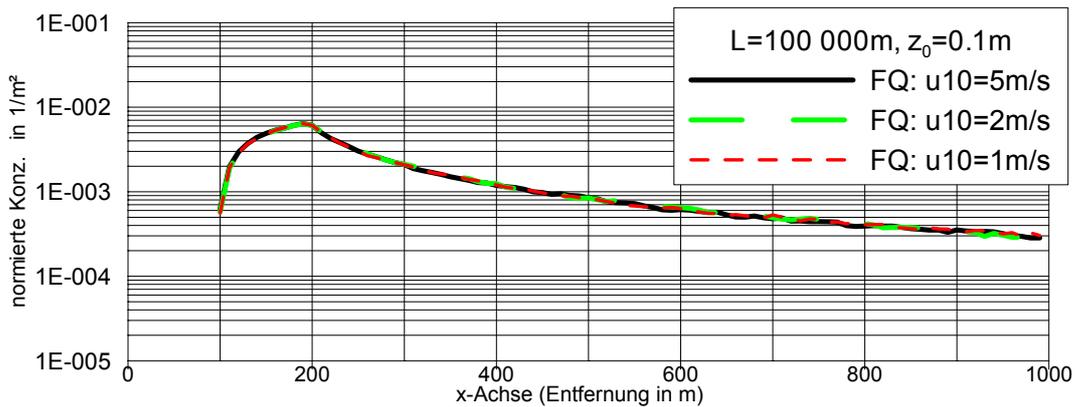
normierte Konzentration unter der Fahnenachse  
in 0.75 ... 2m Höhe ( $C \cdot u_{10}/Q$ )



GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Punktquelle mit 360 000# in 3 600s



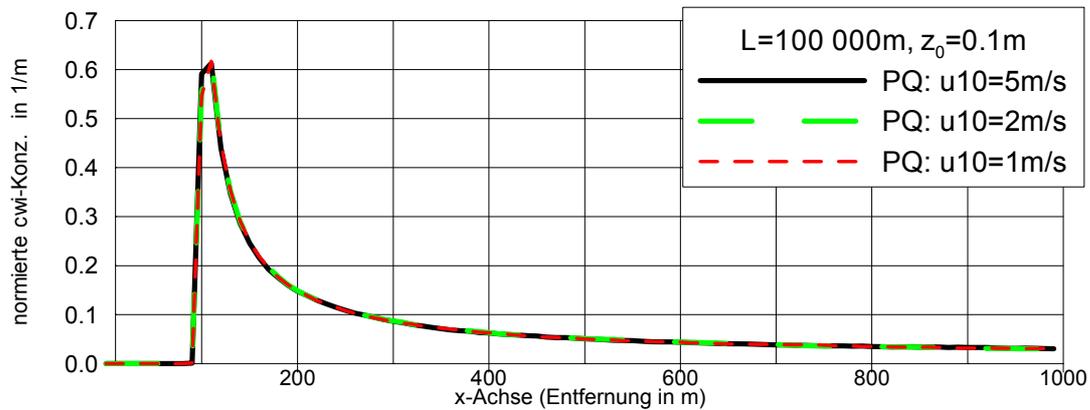
GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Linienquelle mit 360 000# in 3 600s



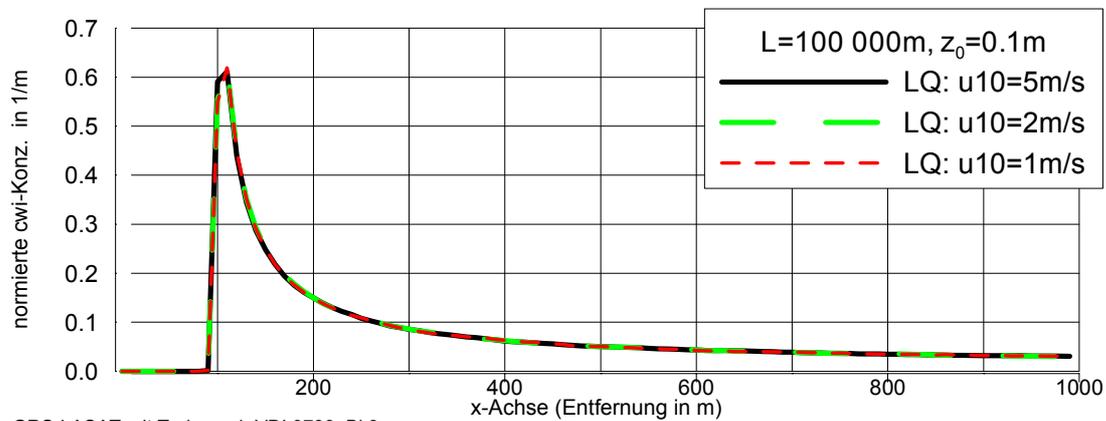
GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Flächenquelle mit 360 000# in 3 600s

Abb.4.2: Logarithmische Darstellung der normierten Konzentration entlang der Fahnenachse ( $y=0$ ) für die drei Anströmgeschwindigkeiten getrennt für die drei Quellgeometrien (vgl. Abb. 4.1).

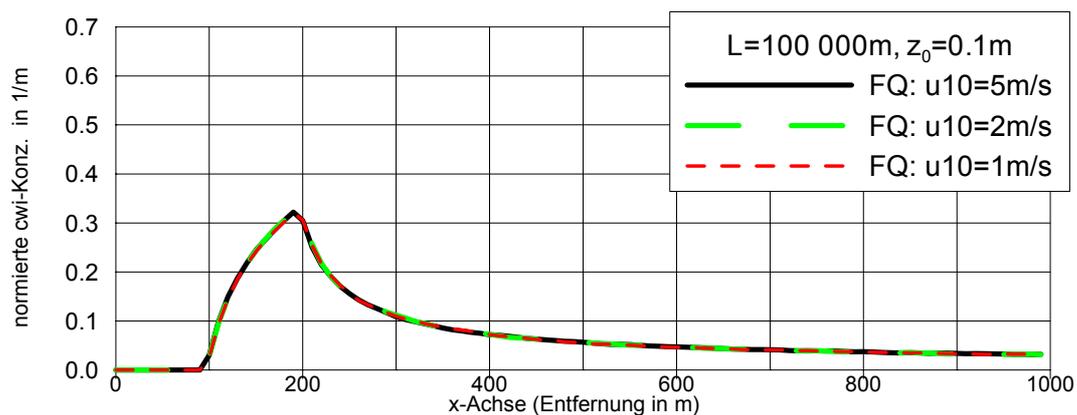
normierte querwindintegrierte Konzentration  
in 0.75 ... 2m Höhe ( $C_{QWI} \cdot u_{10}/Q$ )



GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Punktquelle mit 360 000# in 3 600s



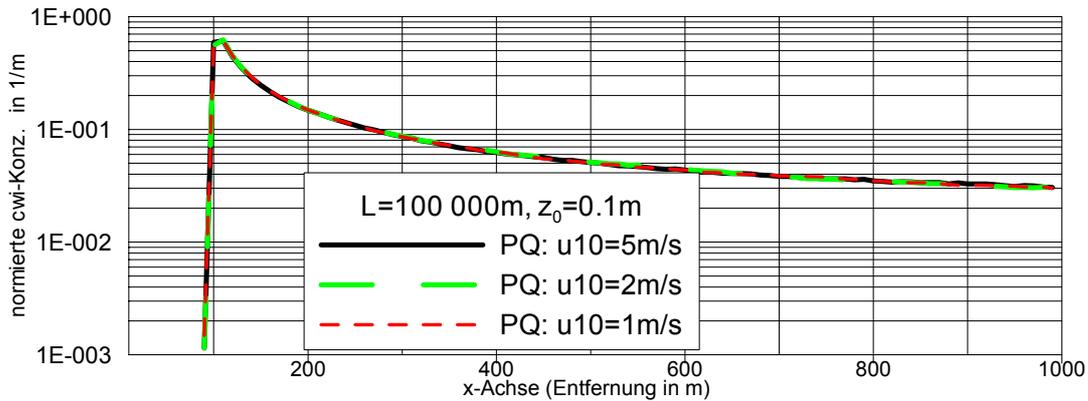
GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Linienquelle mit 360 000# in 3 600s



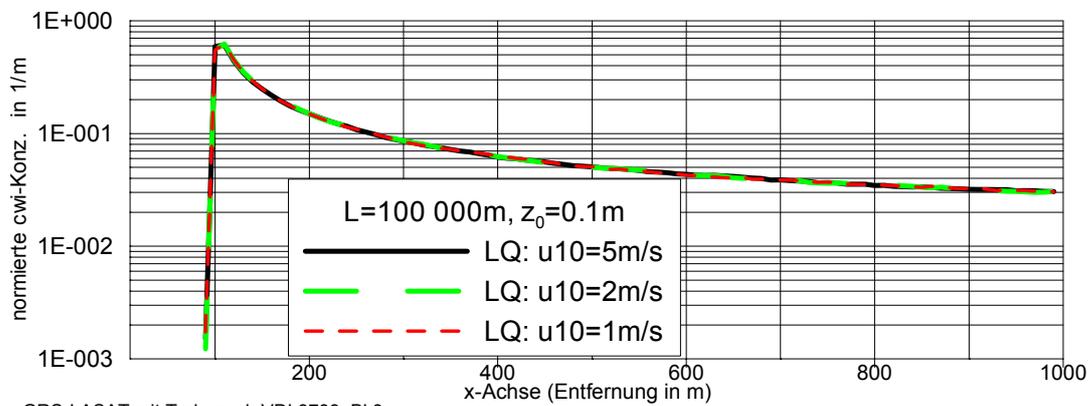
GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Flächenquelle mit 360 000# in 3 600s

Abb.4.3: Normierte querwindintegrierte Konzentration entlang der Fahnenachse ( $y=0$ ) für die drei Anströmgeschwindigkeiten getrennt für die drei Quellgeometrien.

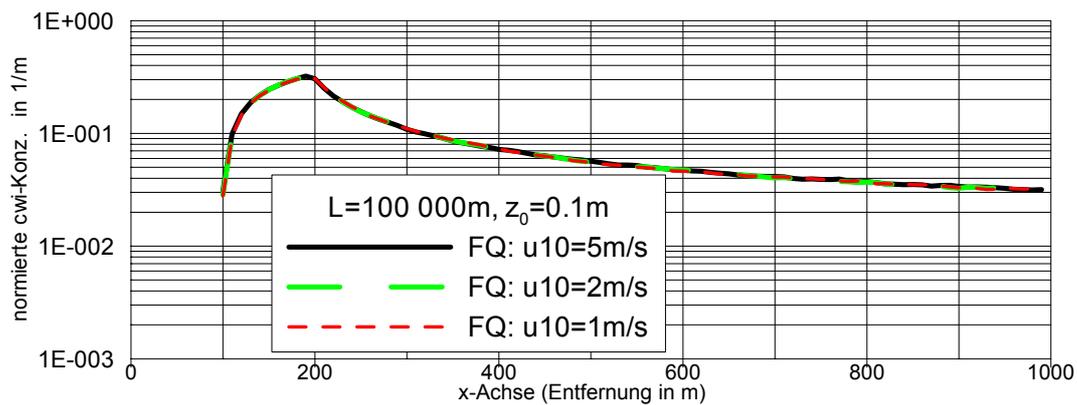
normierte querwindintegrierte Konzentration  
in 0.75 ... 2m Höhe ( $C_{QWI} \cdot u_{10}/Q$ )



GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Punktquelle mit 360 000# in 3 600s



GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Linienquelle mit 360 000# in 3 600s



GRS-LASAT mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8  
bodennahe Flächenquelle mit 360 000# in 3 600s

Abb.4.4: Logarithmische Darstellung der normierten querwindintegrierten Konzentration entlang der Fahnenachse ( $y=0$ ) für die drei Anströmgeschwindigkeiten getrennt für die drei Quellgeometrien.

Neben den normierten Konzentrationen unter der Fahnenachse wurden weiterhin für die Punktquelle die normierten querwindintegrierten Konzentrationen  $C_{QWI}^*$  in einem Vertikalschnitt entlang der Fahnenachse (Abb. 4.5) sowie die bodennahen flächigen normierten Konzentrationen in einem Horizontalschnitt (Abb. 4.6) bei den verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten verglichen.

Die normierten querwindintegrierten Konzentrationen  $C_{QWI}^*$  zeigen für die Punktquelle eine sehr ähnliche Vertikalstruktur (Abb. 4.5): Die vertikale Erstreckung der Fahne bzw. die  $2 \cdot 10^{-5}$  1/m-Konzentration (gelb) liegt für alle drei Anströmgeschwindigkeiten in einer Entfernung von 100 m hinter der Quelle und in 36 m Höhe über Grund sowie am leeseitigen Rand des Untersuchungsgebiets (900 m hinter der Punktquelle) in 80 m Höhe. Auch die übrigen Isolinien zeigen dieses geschwindigkeitsunabhängige Verhalten. Die bodennahen  $C_{QWI}^*$ -Konzentrationen überschreiten für  $u_{10} = 1$  m/s den Wert  $5 \cdot 10^{-2}$  1/m (schwarz) bis zu einer Quellentfernung von etwa 400m (entsprechend  $x = 500$ m), für  $u_{10} = 2$  m/s und 5 m/s bis in etwa 415m Quellentfernung.

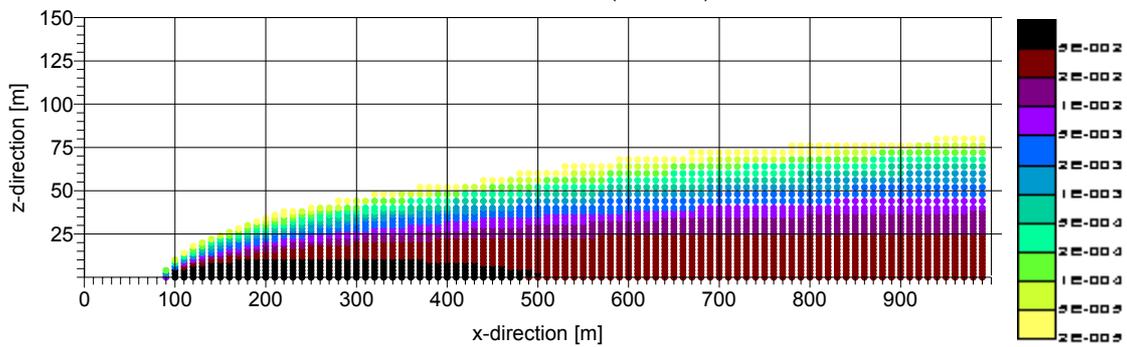
Dieses geschwindigkeitsunabhängige Verhalten zeigt sich auch in den Horizontalschnitten der bodennahen normierten Konzentration  $C^*$  (Abb. 4.6): Für alle Anströmgeschwindigkeiten ergeben sich praktisch kongruente Isokonzentrationsverteilungen. Dies trifft sowohl auf die Fahnenbreiten (d.h. die Konzentrationsverteilung quer zur Anströmungsrichtung) als auch auf die Konzentrationsverteilung in axialer (x-Richtung) zu.

Mit der Turbulenzparameterisierung entsprechend der VDI-Richtlinie VDI 3783, Bl.8 /VDI 01/ ergeben sich also von der Anströmgeschwindigkeit unabhängige normierte Konzentrationen; dies entspricht einer  $1/u$ -Abhängigkeit der berechneten Konzentrationen. Vor diesem Hintergrund reicht die Betrachtung der Ergebnisse für die verschiedenen Quellgeometrien (Punkt-, Linien- und Flächenquelle) anhand der Ergebnisse bei einer Anströmgeschwindigkeit für die weitere Bewertung aus.

## Normierte QWI-Konzentration $C_{qwi} \times u_{10}/Q$ in 1/m für Punktquelle

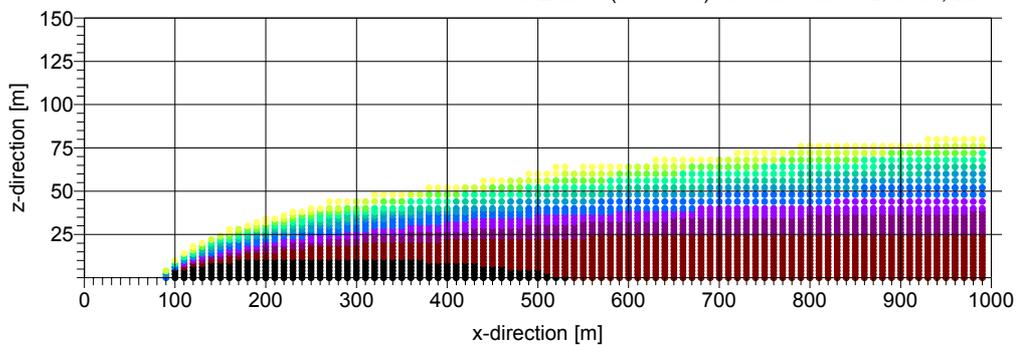
$u_{10} = 1 \text{ m/s}$

GRS-LASAT (360 000#) mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8



$u_{10} = 2 \text{ m/s}$

GRS-LASAT (360 000#) mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8



$u_{10} = 5 \text{ m/s}$

GRS-LASAT (360 000#) mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8

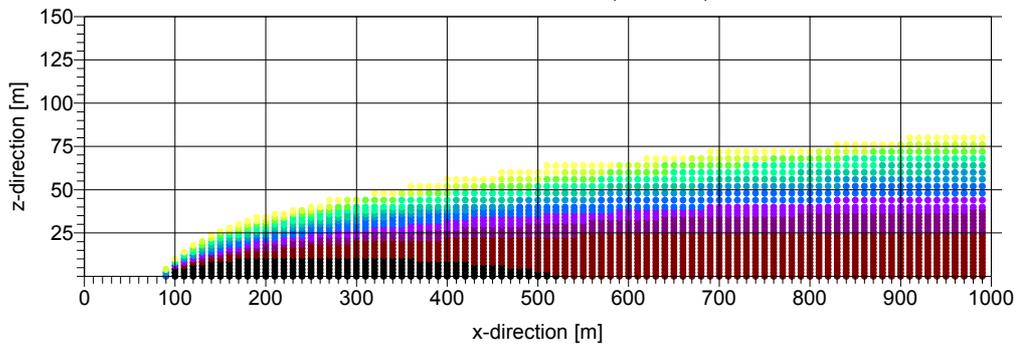
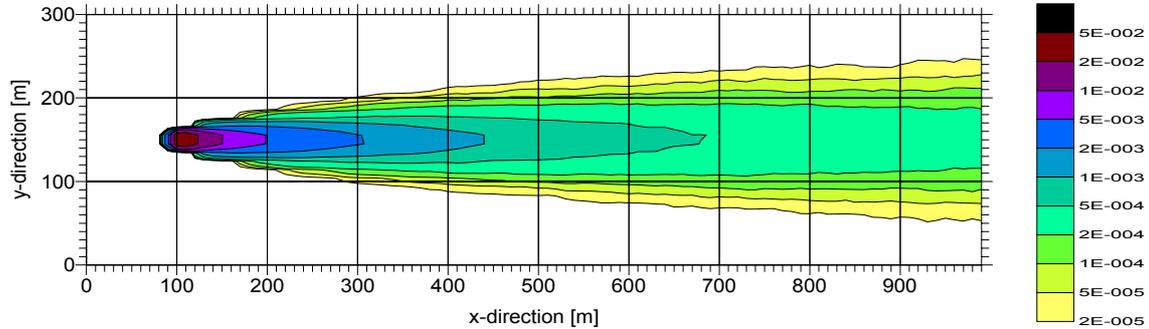


Abb.4.5: xz-Schnitte der normierten querwindintegrierten Konzentration für die Punktquelle und die drei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten

### Bodennahe Konz. $C \times u_{10}/Q$ in $1/m^2$ für Punktquelle

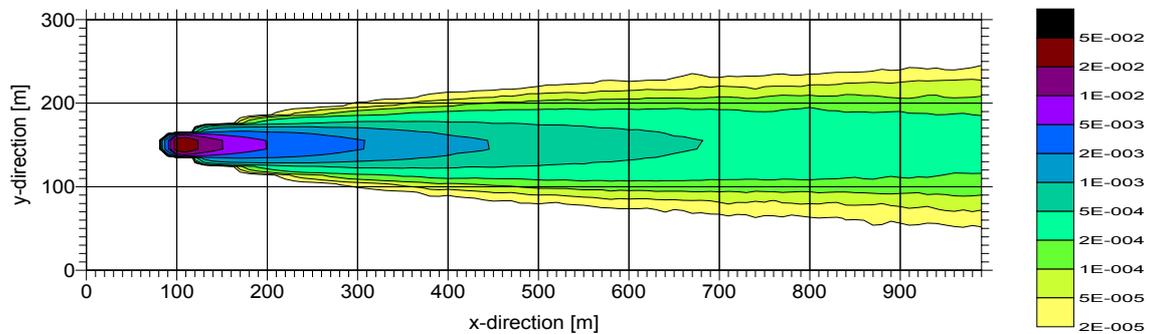
$u_{10} = 1 \text{ m/s}$

GRS-LASAT (360 000#) mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8



$u_{10} = 2 \text{ m/s}$

GRS-LASAT (360 000#) mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8



$u_{10} = 5 \text{ m/s}$

GRS-LASAT (360 000#) mit Turb. nach VDI 3783, Bl.8

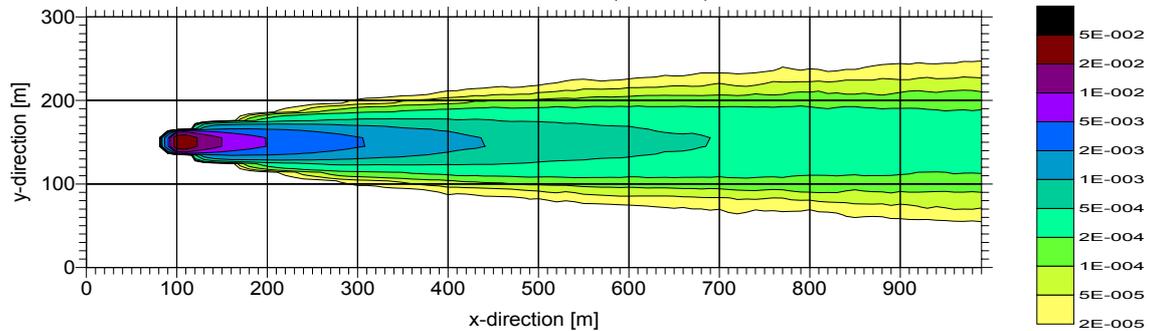


Abb.4.6: xy-Schnitte der normierten Konzentration für die Punktquelle und die drei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten

## 4.2 Ergebnisse für die drei untersuchten Quellgeometrien

Nachdem eine für die Praxis ausreichende Unabhängigkeit der normierten Konzentrationen von der Anströmgeschwindigkeit nachgewiesen wurde (Abschnitt 4.1) werden im folgenden die Ergebnisse für die Quellgeometrien (Punkt-, Linien- und Flächenquelle) nur noch für eine Anströmgeschwindigkeit analysiert. Es werden die Ergebnisse von  $u_{10} = 2 \text{ m/s}$  exemplarisch ausgewählt.

Der Vertikalschnitt entlang der Fahnenachse (Abb. 4.7) für die normierten querwindintegrierten Konzentrationen und der bodennahe Horizontalschnitt der normierten Konzentrationen (Abb. 4.8) zeigen, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Quelltypen mit ihren verschiedenen Quellgeometrien ab ca. 500 m Entfernung zum luvseitigen Rand der Quellen gering sind. Dies trifft sowohl auf die Fahnenbreiten (d.h. die Konzentrationsverteilung quer zur Anströmungsrichtung, Abb. 4.8) als auch auf die Fahnenhöhen und die Vertikalverteilung der querwindintegrierten Konzentrationen (Abb. 4.7) zu.

In Entfernungen bis zu 500 m vom luvseitigen Rand der jeweiligen Quelle beeinflusst die Quellgeometrie erkennbar die Konzentrationsverteilung. Das Maximum der normierten bodennahen Konzentrationen ist bei der Flächenquelle um ca. 90 m weiter in Leerichtung verschoben als bei Punkt- und Linienquelle, weil die Flächenquelle über eine Länge von 100 m in Ausbreitungsrichtung emittiert (Abb. 4.8, vgl. auch Abb. 4.1). Gleichzeitig bedingt die größere Ausdehnung des emittierenden Gebietes bei der Flächenquelle ein niedrigeres Konzentrationsmaximum im Vergleich zu der Punktquelle (um ca. 89 % niedriger) bei gleichzeitig größerer Ausdehnung des Gebietes mit Konzentrationen im Wertebereich dieses Maximums. Bei der Linienquelle ist im Vergleich zur Punktquelle die Maximalkonzentration um ca. 79 % niedriger. Bei der Darstellung der querwindintegrierten Konzentrationen (Abb. 4.7) verschwindet der Unterschied zwischen Punkt- und Linienquelle. Die Unterschiede in  $C_{QWI}^*$  liegen bei ca. 0.5 %.

**Normierte QWI-Konzentration  $C_{qwi} \cdot u_{10}/Q$  in 1/m  
für  $u_{10} = 2\text{m/s}$**

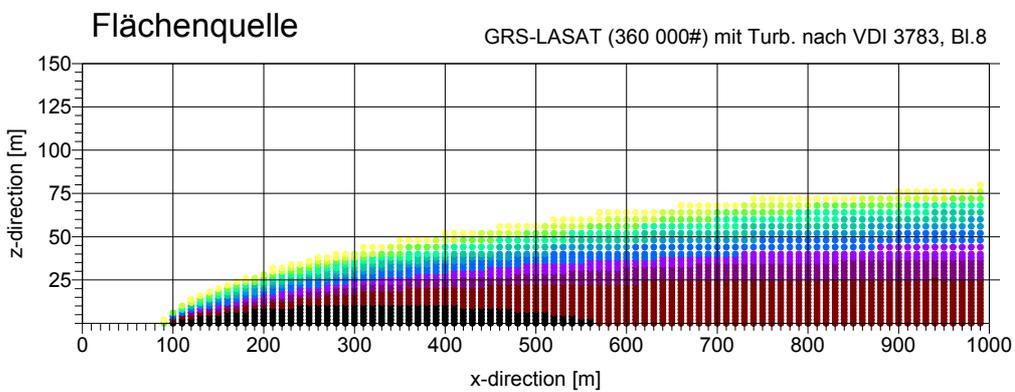
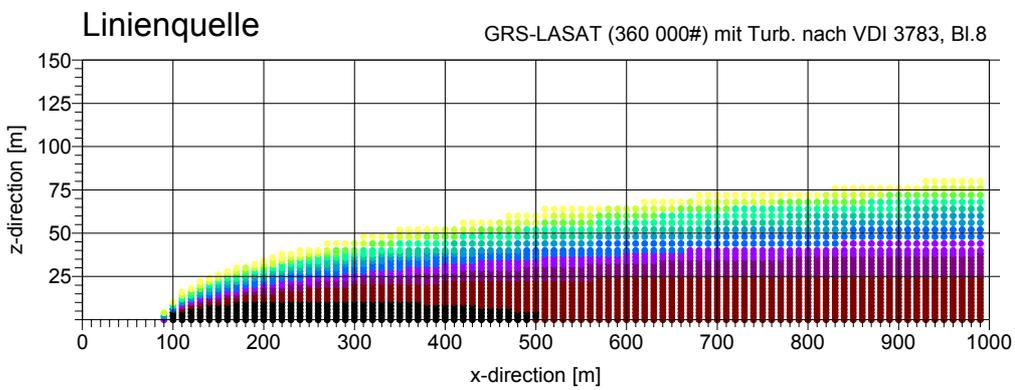
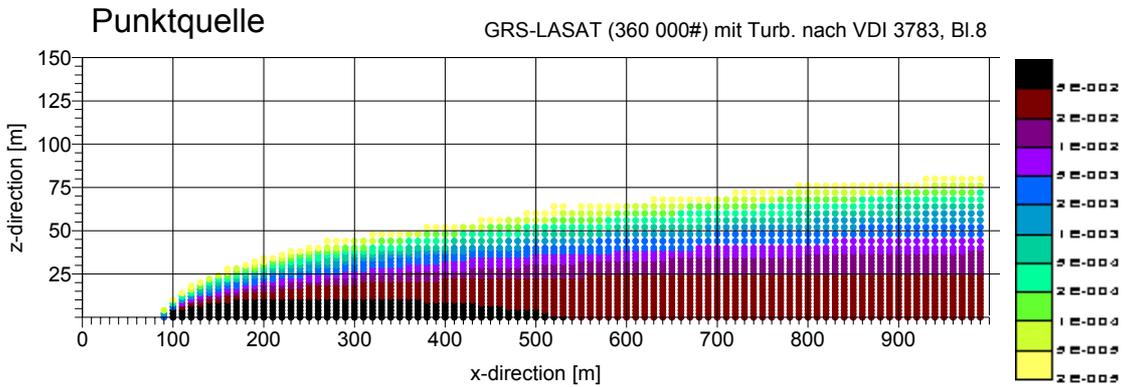
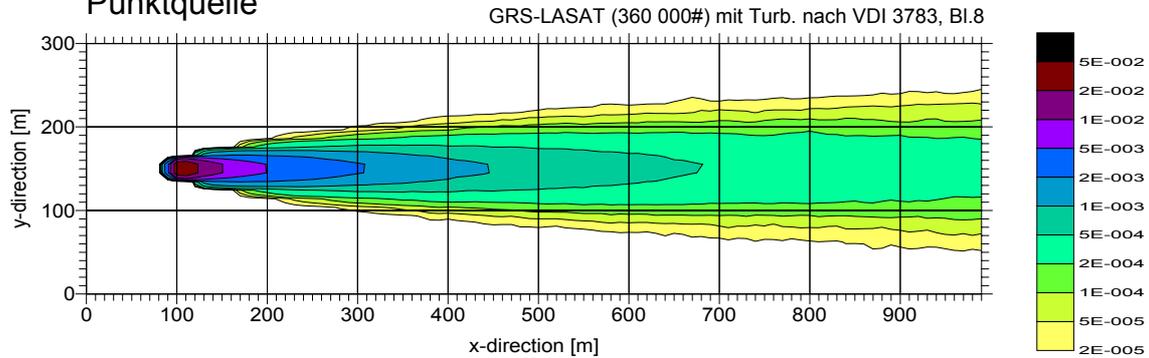


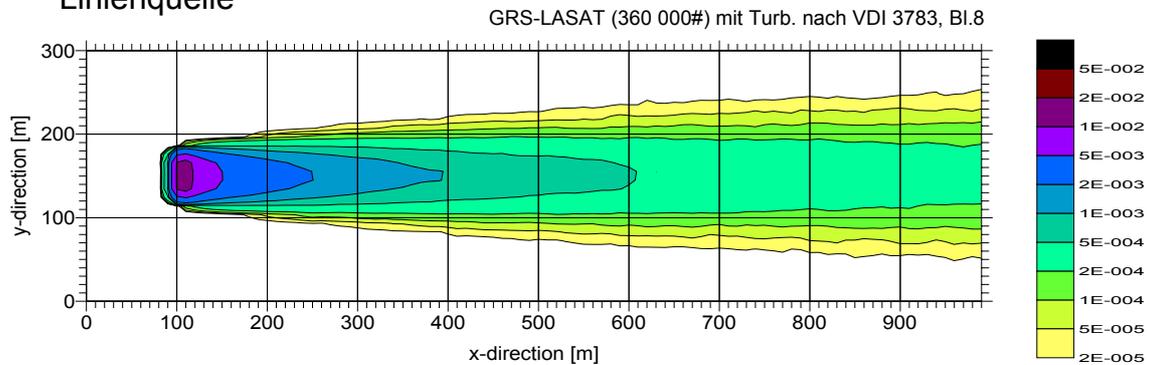
Abb.4.7: xz-Schnitte der normierten Konzentration für die Anströmgeschwindigkeit für die Anströmgeschwindigkeit  $u_{10} = 2\text{m/s}$  und alle drei Quellgeometrien

## Bodennahe Konz. $C \cdot u_{10}/q$ in $1/m^2$ für $u_{10} = 2m/s$

### Punktquelle



### Linienquelle



### Flächenquelle

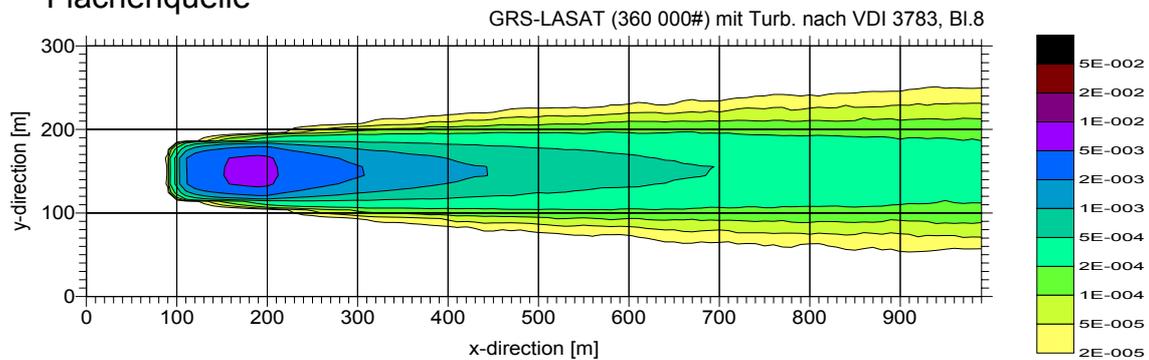


Abb.4.8: xy-Schnitte der normierten Konzentration für die Anströmgeschwindigkeit  $u_{10} = 2m/s$  und alle drei Quellgeometrien

Am leeseitigen Rand des Rechengebietes ergeben sich für Punkt-, Linien- und Flächenquelle:

- bodennahe querwindintegrierte Konzentrationen zwischen  $2 \cdot 10^{-2}$  und  $5 \cdot 10^{-2}$  1/m (Abb. 4.7),
- unter der Fahnenachse liegen die normierten Konzentrationen für alle Quellgeometrien im Bereich zwischen  $2 \cdot 10^{-4}$  bis  $5 \cdot 10^{-4}$  1/m<sup>2</sup> bei Fahnenbreiten ( $2 \cdot 10^{-5}$  1/m<sup>2</sup>-Isolinie) von ca. 200 m (Abb. 4.8).

### **Fazit:**

Die mit der GRS-Version des Partikelmodells LASAT und Turbulenzparametern entsprechend VDI 3783, Bl.8 für verschiedene bodennahe Quellgeometrien (Punkt-, Linien- und Flächenquelle) berechneten Konzentrationsverteilungen zeigen in sehr guter Näherung eine reziproke Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (1/u-Abhängigkeit); damit können unter diesen Voraussetzungen für die Ergebnisdarstellung normierte Konzentrationen verwendet werden. Die Ergebnisse aller hier durchgeführten Berechnungen sind in sich schlüssig und massenerhaltend.

Der Vergleich der Ergebnisse wird im Hauptteil des Forschungsberichtes mit den Ergebnissen der anderen beiden Modelliergruppen (Brenk Systemplanung, Ingenieurbüro Lohmeyer) sowie der Windkanalmessungen durchgeführt.

### **4.3 Gegenüberstellung querwindintegrierter Konzentrationen für die Turbulenzparameterisierungen nach VDI 3783/Bl.8 und Brenk-Systemplanung**

Zu Testzwecken wurden mit der GRS-Version des Partikelmodells LASAT zusätzlich Ausbreitungsrechnungen mit der von der Fa. Brenk-Systemplanung (BS) verwendeten Turbulenzparameterisierung /BS 95/ durchgeführt und mit entsprechenden Ergebnissen der Turbulenzparameterisierung nach VDI 3783, Bl.8 (VDI) /VDI 01/ verglichen. In Anhang B dieses Berichtes werden die Ergebnisse vergleichbarer Ausbreitungsrechnungen mit denselben Turbulenzparameterisierungen dargestellt, wobei als Ausbreitungsmodell anstelle des Lagrange-Partikelmodells das von BS eingesetzte Euler-Modell verwendet wurde.

Zur Untersuchung der vertikalen Diffusion bei den Turbulenzparameterisierungen nach VDI und dem Ansatz von BS wurden für alle drei Quellgeometrien und die Anströmgeschwindigkeiten  $u_{10} = 1\text{m/s}$ ,  $2\text{m/s}$  und  $5\text{m/s}$  entsprechende Ausbreitungsrechnungen durchgeführt und die bodennahen querwindintegrierten Konzentrationen miteinander verglichen. Die Betrachtung der querwindintegrierten Konzentration bietet den Vorteil, dass hier im wesentlichen nur die vertikale Diffusion wirksam ist; Effekte durch unterschiedliche Parameterisierungen der lateralen Diffusion, d.h. quer zur Ausbreitungsrichtung, werden vermieden.

Die Turbulenzparameterisierung von BS /BS 95/ liefert primär ein Vertikalprofil des vertikalen Diffusionskoeffizienten  $K_z(z)$ . Die für die GRS-LASAT-Rechnungen erforderliche Standardabweichung der turbulenten vertikale Geschwindigkeitsfluktuation  $\sigma_w(z)$  und die entsprechende turbulente Zeitskala  $T_{Lw}(z)$  wurden wie folgt berechnet:

- $\sigma_w(z)$  wurde entsprechend den Ansätzen in VDI 3783, Blatt 8, gewählt.  
Dabei wurde davon ausgegangen, dass diese Parameterisierungen vergleichsweise unstrittig sind (vgl. /KER 00/ und /VDI 01/).
- $T_{Lw}(z)$  wurde mit  $K_z = \sigma_w^2 \cdot T_{Lw}$  berechnet,  
wobei  $K_z(z)$  nach /BS 95/ und  $\sigma_w(z)$  entsprechend /VDI 01/ berechnet wurde.

In Abbildung 4.9 sind die Vertikalprofile von Windgeschwindigkeit  $\bar{u}(z)$ ,  $\sigma_w(z)$ ,  $T_{Lw}(z)$  und  $K_z(z)$  für beide Parameterisierungen dargestellt.

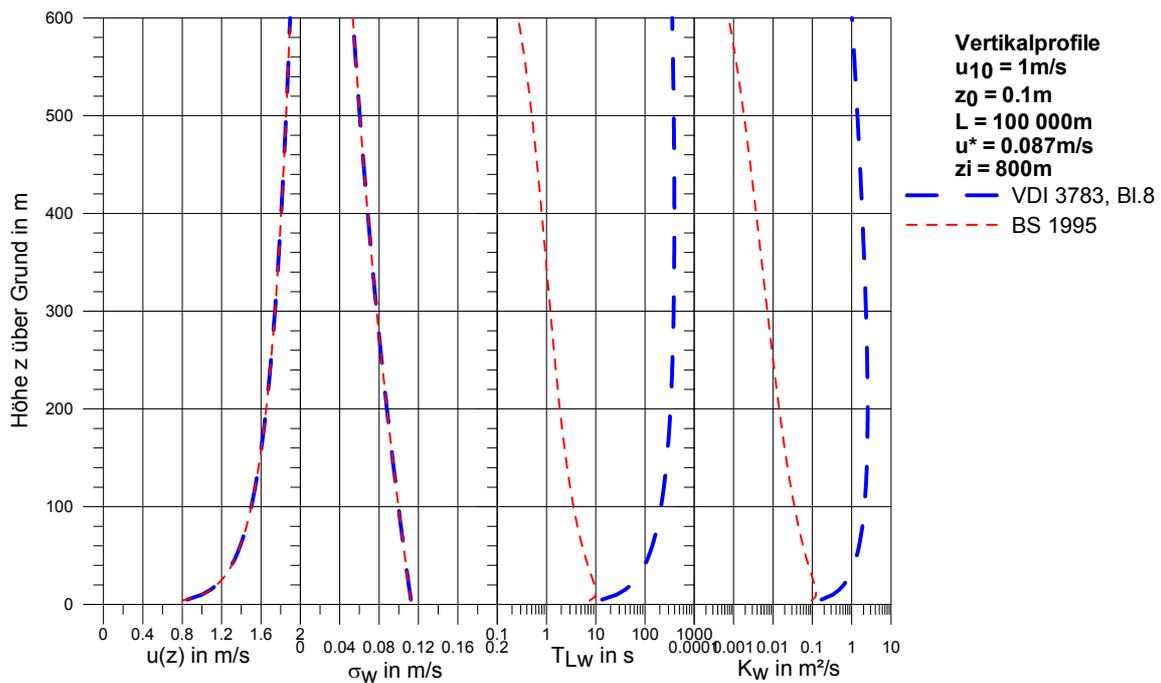


Abb. 4.9: Vertikalprofile nach VDI 3783, Bl. 8 und Brenk-Systemplanung:

- Betrag der Windgeschwindigkeit  $\bar{u}(z)$ ,
- vertikale Geschwindigkeitsfluktuation  $\sigma_w(z)$ ,
- turbulente Zeitskala  $T_{Lw}(z)$ ,
- vertikaler Diffusionskoeffizient  $K_w(z)$

Die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der Standardabweichung der turbulenten Geschwindigkeitsfluktuation  $\sigma_w(z)$  sind definitionsgemäß identisch. Dagegen fällt auf, dass sich mit der BS-Parameterisierung gegenüber der VDI-Parameterisierung deutlich kleinere turbulente Zeitskalen  $T_{Lw}(z)$  und kleinere vertikale Diffusionskoeffizienten  $K_w(z)$  ergeben: Bei BS liegen die Maxima von  $T_{Lw}$  und  $K_w$  in Bodennähe und fallen dann mit zunehmender Höhe stark ab. Für  $z = 100 \text{ m}$  sind  $T_{Lw}$  und  $K_w$  um fast den Faktor 100 kleiner als bei der entsprechenden Turbulenzparameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8. – Aufgrund dieses Sachverhaltes ist zu erwarten, dass bei bodennahen Freisetzungen die mit der Turbulenzparameterisierung von BS im Lee der Quelle berechneten Konzentrationen deutlich langsamer abnehmen als mit der VDI-Parameterisierung.

In Abbildung 4.10 sind für die beiden Parameterisierungen nach BS und VDI die normierten querwindintegrierten Konzentrationen  $C_{QWT} u_{10}/Q$  abhängig von der Quellentfer-

nung für Punkt-, Linien- und Flächenquelle und für die Windgeschwindigkeiten  $u_{10} = 1 \text{ m/s}$ ,  $2 \text{ m/s}$  und  $5 \text{ m/s}$  dargestellt:

- Die fetten Linien beziehen sich auf BS
- Die dünnen Linien mit Symbolen beziehen sich auf die VDI-Richtlinie.

Mit dieser entfernungsabhängigen Darstellung der querwindintegrierten Konzentrationen kann unabhängig von der Lateraldiffusion die Vertikaldiffusion bewertet werden.

Abbildung 4.11 zeigt ebenfalls die querwindintegrierten Konzentrationen abhängig von der Quellentfernung; jetzt ist aber die Konzentration in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Diese Darstellung erlaubt eine genauere Differenzierung der Unterschiede in den Konzentrationsverteilungen bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten:

- Die mit der BS-Parameterisierung berechneten Konzentrationen skalieren im Gegensatz zu den mit der VDI-Parameterisierung berechneten Konzentrationen nicht exakt mit  $1/u$ .
- Die mit der BS-Parameterisierung für  $u_{10} = 5 \text{ m/s}$  berechnete Konzentrationsverteilung kommt der mit der VDI-Parameterisierung berechneten Verteilung am nächsten.
- Bei Anströmgeschwindigkeiten  $u_{10} < 5 \text{ m/s}$  sind die mit der Turbulenzparameterisierung nach BS berechneten Konzentrationen gegenüber den mit der Parameterisierung nach VDI 3783, Blatt 8, berechneten Konzentrationen größer. Der Unterschied ist umso größer, je kleiner die Anströmgeschwindigkeit ist. Der Unterschied beträgt bei  $u_{10} = 1 \text{ m/s}$  bis zu einem Faktor 2.

normierte querwindintegrierte Konzentration ( $C_{QWI} \cdot u_{10}/Q$ )  
in 0.75...2m Höhe

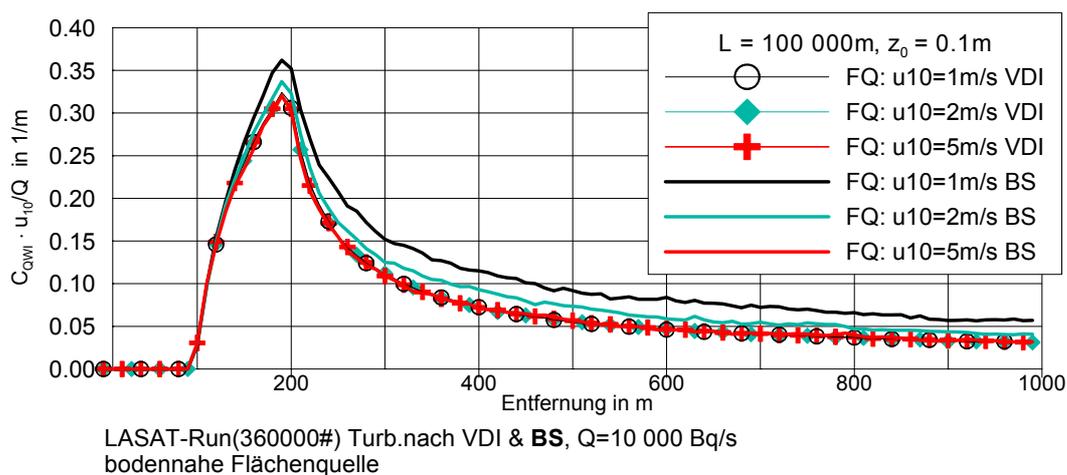
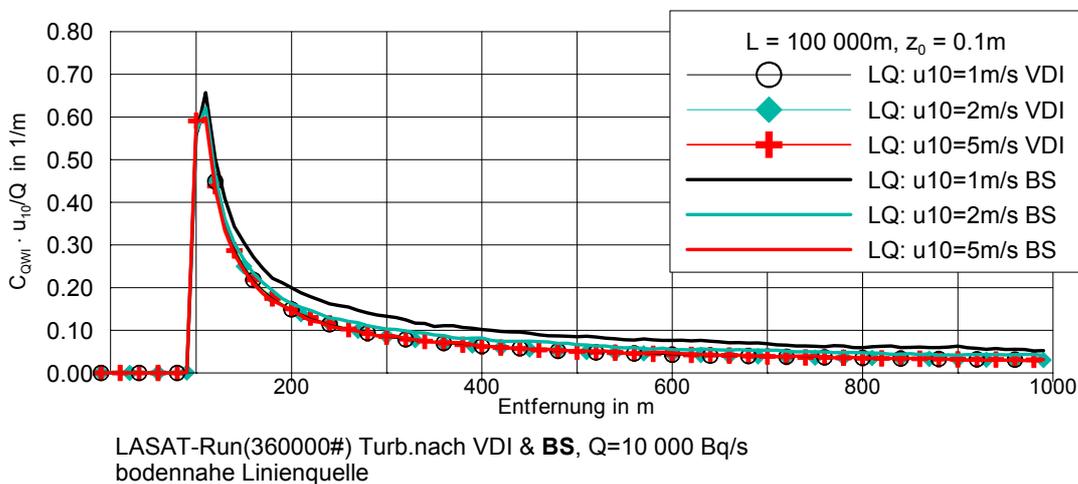
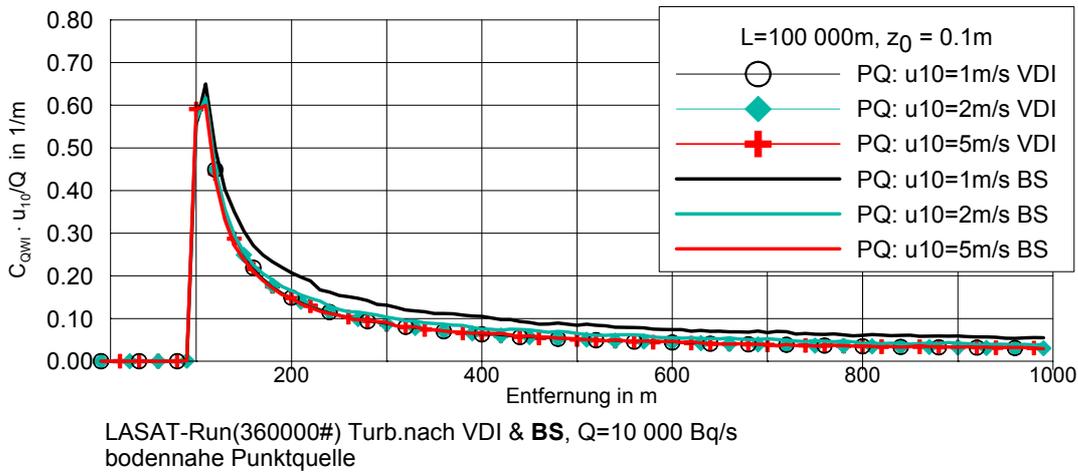
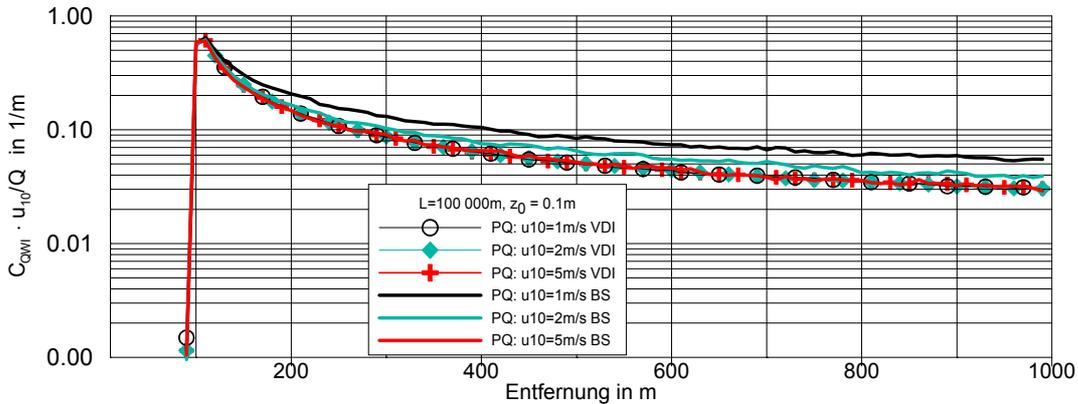
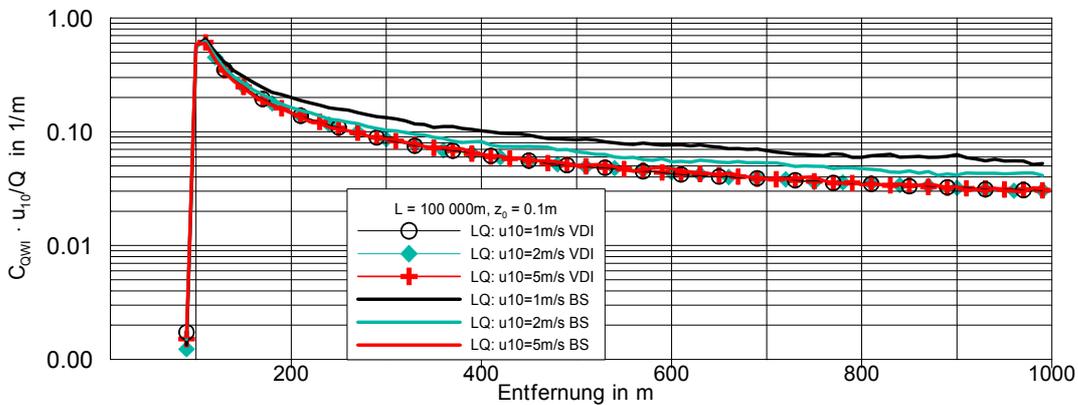


Abb.4.10: Normierte querwindintegrierte Konzentration entlang der Fahnenachse ( $\gamma=0$ ) für die drei Anströmgeschwindigkeiten getrennt für die drei Quellgeometrien und Turbulenzparameterisierung nach VDI und BS.

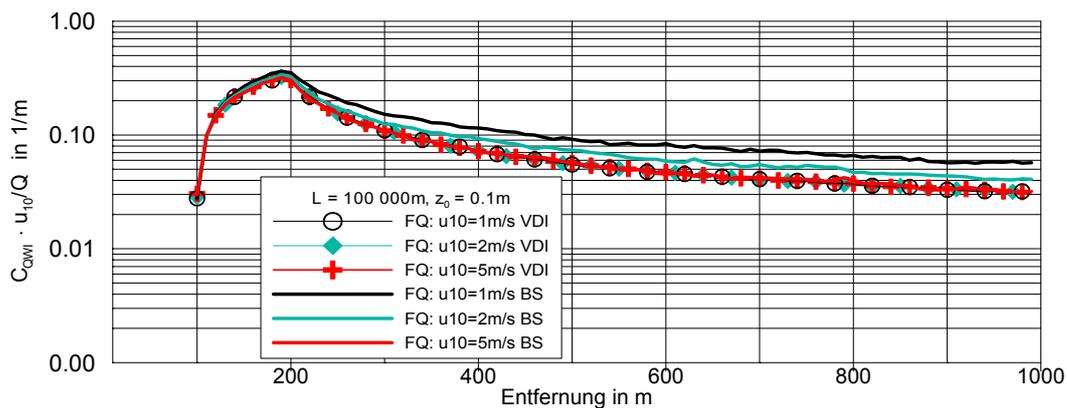
normierte querwindintegrierte Konzentration ( $C_{QWI} \cdot u_{10}/Q$ )  
in 0.75...2m Höhe



LASAT-Run(360000#) Turb.nach VDI & BS, Q=10 000 Bq/s  
bodennahe Punktquelle



LASAT-Run(360000#) Turb.nach VDI & BS, Q=10 000 Bq/s  
bodennahe Linienquelle



LASAT-Run(360000#) Turb.nach VDI & BS, Q=10 000 Bq/s  
bodennahe Flächenquelle

Abb.4.11: Logarithmische Darstellung der normierten querwindintegrierten Konzentration entlang der Fahnenachse für die Turbulenzparameterisierung nach VDI und BS (vgl. Abb. 4.10).

## 5 Literatur

- /BS 95/ Brenk Systemplanung:  
Grundsatzentscheidung über die Sanierung der IAA Helmsdorf am Standort Crossen,  
Bericht zum Teilvorhaben 9205-5/R2 im Rahmen des Vertrages  
„Bewertungskriterien und Vorgaben für die Sanierung bergbaulicher Altlasten in den Ländern Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt“ (BMU-Vorhaben: St.Sch. 4012/1), Aachen, 1995
- /HEL 99/ Helbig, A.; Baumüller, J.; Kerschgens, M.J. (Hrsg):  
Stadtklima und Luftreinhaltung.  
Springer-Verlag, Berlin, 1999
- /JAN 98/ Janicke, L.: Ausbreitungsmodell LASAT. Handbuch zu Version 2.8.  
Ingenieurbüro Dr. Lutz Janicke, Dunum, September 1998
- /MAS 93/ Maßmeyer, K.; Martens, R.; Hofer, E., Krzykacz, B.:  
Untersuchungen zur Verifizierung von komplexen Modellen zur Beschreibung des Schadstofftransportes in der Atmosphäre –  
Abschlussbericht,GRS-A-1984,  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, 1993
- /PAS 83/ Pasquill, F.; Smith, F.B.:  
Atmospheric diffusion – Study of the dispersion of windborne material from industrial and other sources.  
Ellis Horwood Series in Environmental Science,  
John Wiley and Sons, New York, 1983
- /VDI 01/ Verein Deutscher Ingenieure  
Umweltmeteorologie, Messwertgestützte Turbulenzparameterisierung für Ausbreitungsmodelle.  
Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN,  
VDI 3783, Blatt 8, Entwurf, Düsseldorf, Dezember 2001

/ZEN 98/ Zenger, A.:

Atmosphärische Ausbreitungsmodellierung – Grundlagen und Praxis.

Springer-Verlag, Berlin, 1998