

Das Geruchsausbreitungsmodell

MEPOD

und seine Implementierung in

IBJmepod

November 1999

L. Janicke

	Ingenieurbüro Janicke	Tel.:	(04947) 9120 35
	Gesellschaft für Umweltphysik	Fax:	(04947) 9120 34
	D-26427 Dunum	Email:	info@janicke.de
	Alter Postweg 21	Internet:	www.janicke.de



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Das Modellierungskonzept	2
3	Leistungsprofil	4
4	Modellbeschreibung	8
4.1	Das Mittelwertmodell	8
4.1.1	Konzentrationsverteilung in der x/z -Ebene	9
4.1.2	Die 3-dimensionale Fahnenstruktur	10
4.2	Das Fluktuationsmodell	12
4.3	Bestimmung der Geruchshäufigkeit	13
4.4	Das Grenzschichtmodell	14
4.4.1	Definition der Profile	15
4.4.2	Klasseneinteilung	17
4.4.3	Test des Grenzschichtmodells	18
5	Die Implementierung des Modells	23
5.1	Die Advektions-Diffusionsgleichung	23
5.2	Berechnung von Integralen	26
5.3	Flächenquellen	28
6	Verifikation des Mittelwertmodells	30
6.1	Homogene Atmosphäre	30
6.2	Homogene Atmosphäre mit Taylor-Korrektur	32
6.3	Berljand-Profil	33
7	Validierung	36
7.1	Beschreibung der Begehungen	36
7.2	Geruchshäufigkeiten für einzelne Probanden	37
7.3	Geruchshäufigkeiten für das Probandenkollektiv	38
8	Literatur	44
A	Sensitivitätsanalyse des Fluktuationsmodells	45
A.1	Theorie	45
A.2	Numerik	47
A.3	Programm	48
A.4	Ergebnisse	53
B	Parameterstudien	61
C	Vergleich mit der Abstandsregelung	73



1 Einleitung

Im folgenden wird das Ausbreitungsmodell MEPOD (Meandering Plume Model for Odor Dispersion) beschrieben, das im Sinne der Richtlinie VDI 3788/1 zur Prognose von Geruchshäufigkeiten verwendet werden kann. Es basiert auf dem Konzept einer mäandernden Fahne mit internen Konzentrationsfluktuationen, wie es von YEE ET AL. [1] beschrieben wurde.

Das Modell ist in ebenem, homogenem Gelände bis zu Quellentfernungen von etwa 1000 m einsetzbar und berücksichtigt unterschiedliche Bodenrauigkeiten. Es ist auch bei niedrigen Quellen, in deren Nahbereich, bei ausgedehnten Quellen und bei aus mehreren Einzelquellen bestehenden Quellsystemen verwendbar.

Es berechnet für Einzelsituationen Geruchshäufigkeiten und für längere Zeiträume kumulative Geruchshäufigkeiten und Häufigkeiten von Geruchsstunden. Es erfordert als Eingabeparameter die freigesetzten Geruchsstoffströme und meteorologische Daten, wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Stabilität der atmosphärischen Schichtung. Begehungen zur Bestimmung von Kalibrierungsparametern sind nicht erforderlich.

In dieser Dokumentation wird das Modell MEPOD und seine numerische Umsetzung (Implementierung) IBJmepod beschrieben. Die zugehörigen Computerprogramme *IBJmepod* (grafisches Benutzer-Interface) und *IBJXodor*¹ (das eigentliche Rechenprogramm) sind in der separaten Dokumentation *Benutzerhandbuch IBJmepod* beschrieben.

2 Das Modellierungskonzept

Ein wesentlicher Punkt in einem Geruchsausbreitungsmodell ist die Modellierung von Konzentrationsfluktuationen. Hierbei ist es zweckmäßig, zwischen der momentanen Fahne (Kernfahne) und der durch das Mäandern der Windrichtung entstehenden mittleren Fahne zu unterscheiden. Ein auf dieser Vorstellung beruhender Modellansatz wurde von YEE ET AL. [1] vorgestellt und bildet auch die Grundlage des hier beschriebenen Modells. Dabei wird angenommen, daß der zeitliche Mittelwert der Konzentration in der Kernfahne durch ein stationäres Ausbreitungsmodell beschrieben werden kann, und die Verteilungsfunktion der Einzelwerte über den Fahnenquerschnitt hinweg selbstähnlich ist.

Die Verteilung der Konzentrationswerte über einen Zeitraum von einer Stunde erhält man durch explizite Überlagerung der verschiedenen Kernfahnen, die innerhalb dieses Zeitraums durch die Mäanderbewegung der Windrichtung erzeugt werden. Aus der Verteilung der Konzentrationswerte wird dann die Wahrscheinlichkeit einer Geruchswahrnehmung berechnet.

¹Eine eingeschränkte Version von *IBJXodor* ist als *IBJodor* frei erhältlich, siehe www.janicke.de.



Für die Berechnung des Erwartungswertes der Konzentration in der Kernfahne wird eine Kombination aus Gauß-Modell und K-Modell verwendet. Die vertikale Struktur der von einer Punktquelle ausgehenden Abgasfahne wird durch explizite Lösung der Diffusionsgleichung berechnet, für die horizontale Struktur wird ein empirischer Gauß-ansatz verwendet. Ausgedehnte Quellen werden durch Überlagerung von Punktquellen modelliert.



3 Leistungsprofil

Die Richtlinie VDI 3788 Blatt 1 führt in Kapitel 4 eine Reihe von Prüfpunkten auf, zu denen im Rahmen der Dokumentation eines Geruchsausbreitungsmodells Stellung zu nehmen ist, damit der Benutzer erkennt, wo der Anwendungsbereich des Modells unter technisch-wissenschaftlichen Gesichtspunkten liegt. Diese Prüfpunkte werden im folgenden der Reihe nach aufgeführt und erläutert.²

1. Stoffe

(a) **Einfache gasförmige Stoffe?**

Es wird davon ausgegangen, daß nur ein einziger gasförmiger Geruchsstoff vorliegt oder als repräsentativ für ein Geruchsstoffgemisch angesehen werden kann.

(b) **Gemisch von gasförmigen Geruchsstoffen?**

Es werden keine Besonderheiten von Gemischen berücksichtigt.

(c) **An festes oder flüssiges Aerosol gebundene Geruchsstoffe?**

Es werden keine Besonderheiten im Zusammenhang mit Aerosolen berücksichtigt.

2. Quellen

(a) **Einzelne punktförmige Quelle?**

Es können einzelne punktförmige Quellen modelliert werden. Das Mittelwertmodell verwendet zwar ein Differenzenverfahren, die Maschenweite kann in der Umgebung der Quelle aber für alle praktischen Zwecke hinreichend klein gewählt werden.

(b) **Mehrere punktförmige Quellen?**

Der Geruchsstoff kann aus mehreren punktförmigen Quellen freigesetzt werden. Eine Korrelation zwischen den Immissionsbeiträgen der verschiedenen Quellen wird durch die explizite Modellierung des Mäanderns näherungsweise berücksichtigt.

(c) **Ausgedehnte Quellen?**

Eine räumliche Ausdehnung der Quelle (Linie, Fläche, Volumen) wird berücksichtigt. Der Grundriß der Quelle muß rechteckig sein. Dabei wird die horizontale Ausdehnung in ein System von Linienquelle aufgerastert, die quer zur aktuellen Windrichtung verlaufen. Es können beliebig viele ausgedehnte und punktförmige Quellen gleichzeitig behandelt werden.

(d) **Abluft mit Austrittsimpuls?**

Ein Austrittsimpuls wird in der aktuellen Version noch nicht berücksichtigt.

²Man muß noch unterscheiden zwischen dem, was das Modellkonzept prinzipiell leisten kann, und dem, was davon in einem konkreten Computerprogramm auch tatsächlich realisiert ist. Hier wird auf die Implementierung IBJmepod mit den Computerprogrammen *IBJmepod* und *IBJXodor* Bezug genommen, unabhängig davon, welcher Aufwand im konkreten Fall eventuell notwendig ist, um ein bestimmtes Modellierungsziel zu erreichen.



- (e) **Abgas mit erhöhter Temperatur?**
Eine thermische Überhöhung der Abgasfahne wird in der aktuellen Version noch nicht berücksichtigt.
- (f) **Windinduzierte Quellen?**
Besondere Modellierungsvorschriften zur Behandlung windinduzierter Quellen werden nicht gegeben. Bei einem Rechenlauf kann aber die Quellstärke zusammen mit der Windgeschwindigkeit variiert werden.
- (g) **Bodennahe Quellen?**
Das Mittelwertmodell mit seinem Grenzschichtmodell berücksichtigt die in Bodennähe veränderten Transporteigenschaften der Atmosphäre und modelliert daher auch die Dispersion aus bodennahen Quellen korrekt.
- (h) **Hohe Quellen?**
Das bei hohen Quellen und labiler Schichtung auftretende vertikale Mäandern der Fahne wird nicht explizit berücksichtigt.
- (i) **Zeitlich variabler Geruchsstoffstrom?**
Der Geruchsstoffstrom kann innerhalb einer Einzelsituation oder von Einzelsituation zu Einzelsituation zeitlich variieren.

3. Transmission

- (a) **Ebenes, homogenes Gelände?**
Die Art, wie der Geruchsstoff in der Atmosphäre transportiert wird, ist unabhängig davon, wo sich die Quelle befindet und in welcher Richtung der Transport stattfindet.
- (b) **Beliebige Windrichtung?**
Bei ausgedehnten Quellen ist eine beliebige Orientierung zur aktuellen Windrichtung zulässig, da die Art der Aufrasterung sich immer auf die aktuelle Windrichtung bezieht.
- (c) **Vertikale Windscherung?**
Eine Änderung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe wird vom Grenzschichtmodell berücksichtigt. Eine Änderung der Windrichtung mit der Höhe wird nicht modelliert.
- (d) **Beliebige Bodenrauigkeit?**
Die Bodenrauigkeit ist ein Parameter, der explizit vom Grenzschichtmodell verarbeitet wird.
- (e) **Umströmung von Hindernissen?**
Eine Umströmung von Hindernissen wird nicht modelliert.
- (f) **Topographisch gegliedertes Gelände?**
Besonderheiten beim Transport in topographisch oder orographisch gegliedertem Gelände werden nicht berücksichtigt.
- (g) **Indifferente (neutrale) Schichtung der Atmosphäre?**
Transport bei indifferenter Schichtung wird modelliert.
- (h) **Stabile Schichtung der Atmosphäre?**
Transport bei stabiler Schichtung wird modelliert.



- (i) **Labile Schichtung der Atmosphäre?**
Transport bei labiler Schichtung wird modelliert.
- (j) **Kaltluftströme?**
Kaltluftströme werden nicht modelliert.
- (k) **Mäandern der Windrichtung?**
Das Mäandern der Windrichtung wird explizit modelliert und kann der aktuellen Situation angepaßt werden.

4. Wirkung

- (a) **Wahrnehmungsfunktionen?**
Als Wahrnehmungsfunktionen $P_i(c)$ werden Log-Normalverteilungen angenommen mit vorgebbarem Auflösungsvermögen. Der Abstand der einzelnen Wahrnehmungsfunktionen voneinander wird aus dem Weber-Fechner-Koeffizienten abgeleitet.
- (b) **Wichtung der Einzelsituationen?**
Die Wichtung der Einzelsituationen bei einer Langfristaussage kann über eine Wetterstatistik oder eine Zeitreihe erfolgen.

5. Prognose von ...

- (a) **Häufigkeit von Geruchsintensitäten?**
Es wird angegeben, wie häufig innerhalb einer Einzelsituation die Wahrnehmung eines Geruches zu erwarten ist. Durch Vorgabe der Zählschwelle kann dabei auf unterschiedliche Intensitäten Bezug genommen werden.
- (b) **Kumulierte Geruchshäufigkeiten?**
Es wird angegeben, wie häufig im langfristigen Mittel die Wahrnehmung eines Geruches mit der durch die Zählschwelle vorgegebenen Intensität zu erwarten ist.
- (c) **Geruchsstunde?**
Es wird angegeben, ob in einer Einzelsituation an einem bestimmten Ort zu mehr als einem vorgebbaren Bruchteil der Zeit Geruchswahrnehmungen zu erwarten sind.
- (d) **Häufigkeit von Geruchsstunden?**
Es wird angegeben, wie häufig im langfristigen Mittel Geruchsstunden zu erwarten sind.
- (e) **Erwartungswert?**
Für die Einzelsituation oder im langfristigen Mittel wird der Erwartungswert der Geruchsstoffkonzentration angegeben.

6. Verwendbar für ...

- (a) **Berechnung von Kenngrößen?**
Es kann die Häufigkeit von Geruchsstunden und die kumulative Häufigkeit von Geruchswahrnehmungen berechnet werden.³

³im Augenblick nur punktbezogen und nicht flächenbezogen.



(b) **Vergleich mit Fahnenbegehungen?**

Es werden Geruchshäufigkeiten für Einzelsituationen ausgewiesen und dabei die besonderen Umstände der Fahnenbegehung, wie Begehungszeit, Position der Probanden und aktuelle meteorologische Parameter, berücksichtigt.

(c) **Vergleich mit Rasterbegehungen?**

Es werden langfristige Häufigkeitsaussagen für ein Aufpunktraster gemacht, wobei die aktuelle Wetterstatistik und die mögliche Variation anderer, für die Ausbreitung relevanter Parameter berücksichtigt wird.

(d) **Rückrechnung von Geruchsstoffströmen?**

Es werden keine Angaben gemacht, wie durch Vergleich mit Begehungsdaten und Rückrechnung unbekannte Geruchsstoffströme bestimmt werden können.



4 Modellbeschreibung

Die gesuchte Geruchshäufigkeit und die Häufigkeit von Geruchsstunden wird in mehreren Schritten berechnet. Dabei wird zunächst nur eine Wettersituation betrachtet, wie sie z.B. bei einer Fahnenbegehung vorliegt. Sie dauert typischerweise 10 bis 60 Minuten und wird durch mittlere Werte von Emissionsdaten und meteorologischen Daten beschrieben.

Innerhalb dieses Zeitraums ändert der Wind in der Regel merklich seine Richtung. Dadurch wird auch die von der Quelle ausgehende Geruchsstofffahne merklich hin- und hergeschoben (Mäandern). Da die Transportzeit von der Quelle zu den Aufpunkten meist deutlich kürzer ist als der betrachtete Mittelungszeitraum und die für das Mäandern charakteristische Zeitskala, kann die mittlere Fahne als eine Überlagerung vieler schmaler Fahnen (Kernfahnen) angesehen werden, die um unterschiedliche Beträge aus der mittleren Windrichtung heraus seitlich versetzt sind.

Ausgehend von dieser Vorstellung wird in folgenden Schritten vorgegangen:

- Mit einem Ausbreitungsmodell für stationäre Fahnen wird der Erwartungswert (Mittelwert) der Konzentration innerhalb der Kernfahne, $\bar{c}(x, y, z)$, berechnet.
- Es wird ein empirischer Ansatz für die Verteilungsfunktion $\hat{f}_c(c, x, y, z)$ der Konzentrationswerte der Kernfahne gemacht.
- Durch gewichtete Überlagerung der zu verschiedenen Kernfahnen gehörigen Verteilungsfunktionen \hat{f}_c wird das Mäandern modelliert und die Verteilung $f_c(c, x, y, z)$ der Konzentrationswerte an einem Punkt in der mittleren Fahne berechnet.
- Durch Faltung mit den Wahrnehmungsfunktionen des Probandenkollektivs werden Wahrnehmungshäufigkeiten für die verschiedenen Geruchsintensitäten prognostiziert.

4.1 Das Mittelwertmodell

Zur Berechnung des Erwartungswertes gibt es eine Reihe von Ausbreitungsmodellen (z.B. VDI 3782/1, TA-Luft). In der Regel handelt es sich hierbei aber um Modelle, deren Anwendungsschwerpunkt bei Industrie-Kaminen, mehr oder weniger dicht bebautem Gelände und Quellentfernungen von einigen Kilometern liegt, und die entsprechend kalibriert sind.

Bei der Geruchsausbreitung interessieren jedoch vorwiegend niedrige Quellen. Häufig liegen diese Quellen in ländlichem Gebiet mit geringer Bodenrauigkeit und die relevanten Quellentfernungen betragen einige 100 m. Da der Geruchsstoff sich hierbei



vorwiegend in der Prandtl-Schicht ausbreitet, wird hier ein Modell verwendet, das die vertikale Struktur der Prandtl-Schicht explizit berücksichtigt.

Zur Darstellung wird in diesem Abschnitt ein spezielles kartesisches Koordinatensystem (x, y, z) verwendet. Hierbei verläuft die x -Achse windabwärts (der Wind hat im gesamten Rechengebiet die gleiche Richtung), die y -Achse verläuft horizontal quer zur Windrichtung und die z -Achse vertikal mit dem Nullpunkt auf dem Erdboden. Es wird zunächst nur eine punktförmige Quelle betrachtet, die sich bei $x = 0$, $y = 0$ und $z = h_q$ befindet.

Das Meteorologiemodell (siehe Abschnitt 4.4) stellt zur Berechnung der Fahne folgende Größen zur Verfügung:

$u(z)$	Windgeschwindigkeit
$K_{zz}(z)$	Vertikaler Austauschkoeffizient
$\sigma_w(z)$	Vertikale Windgeschwindigkeitsfluktuation
σ_v	Horizontale Windgeschwindigkeitsfluktuation
L_v	Charakteristische Länge zur Berechnung der Lagrange-Korrelationszeit

4.1.1 Konzentrationsverteilung in der x/z -Ebene

Die Konzentrationsverteilung innerhalb der x/z -Ebene wird durch die Funktion $C_y(x, z)$ beschrieben. Man erhält sie durch Integration der tatsächlichen 3-dimensionalen Konzentrationsverteilung quer zur Windrichtung, also über die y -Koordinate. Da das Mäandern der Fahne in y -Richtung verläuft, ist $C_y(x, z)$ unabhängig vom Mäandern und davon, ob man die Kernfahne oder die über das Mäandern gemittelte mittlere Fahne betrachtet.

Ausgangspunkt für die Berechnung von $C_y(x, z)$ ist die 2-dimensionale stationäre Advektions-Diffusionsgleichung. Für eine Strömung in x -Richtung und einen Diffusionstensor \mathbf{K} in Diagonalf orm kann sie in folgender Form geschrieben werden:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \quad (1)$$

Die durch den ersten Term auf der rechten Seite beschriebene Diffusion in Transportrichtung ist nur bei windschwachen Wetterlagen von Bedeutung und wird im weiteren vernachlässigt. Windschwache Wetterlagen führen zu einer Akkumulation des emittierten Stoffes und sind daher ohnehin nur mit einem instationären Ausbreitungsmodell (Episodenmodell) behandelbar.



Lösungen der Diffusionsgleichung (1) für eine Punktquelle und konstantes K_{zz} haben die Eigenschaft, daß die vertikale Aufweitung der Fahne, $\sigma_z(x)$, mit zunehmender Quelldistanz x proportional zu \sqrt{x} verläuft. Dies wird in der Atmosphäre aber nicht beobachtet. Bei der dort wirksamen turbulenten Diffusion kann die Aufweitung nicht schneller als mit der turbulenten Geschwindigkeit der Luft, σ_w , erfolgen, es ist also in Quellnähe $\sigma_z \approx \sigma_w x/u$. Um dies zu erreichen und damit das Modell auch in Quellnähe anwendbar zu machen, wird dem vertikalen Diffusionskoeffizienten künstlich eine x -Abhängigkeit gegeben und die Funktion $C_y(x, z)$ aus der Differentialgleichung

$$u(z) \frac{\partial C_y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K^*(x, z) \frac{\partial C_y}{\partial z} \right] \quad (2)$$

$$K^*(x, z) = \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{x \sigma_w^2(z)}{u(z) K_{zz}(z)} \right] \right\} K_{zz}(z) \quad (3)$$

bestimmt. Die Struktur der Fahne ist der, die man mit Hilfe eines Lagrange-Modells erhalten würde, sehr ähnlich. Die Randbedingung am linken Rand (bei $x = 0$) für eine Punktquelle in der Höhe h_q mit der Quellstärke 1 lautet

$$C_y(0, z) = \frac{1}{u(h_q)} \delta(z - h_q) \quad (4)$$

Hierbei ist $\delta(z)$ die Dirac'sche Delta-Funktion. Bei einer vertikal ausgedehnten Quelle wird die Delta-Funktion durch eine vertikale Konzentrationsverteilung ersetzt.

4.1.2 Die 3-dimensionale Fahnenstruktur

Für die Abhängigkeit der Konzentration von der y -Koordinate wird eine Gauß-Glocke mit einer Breite σ_y angesetzt. Ist Q die Quellstärke, dann gilt für die Konzentrationsverteilung $\bar{c}(x, y, z)$ der Kernfahne:

$$\bar{c}(x, y, z) = Q C_y(x, z) \hat{g}_y(x, y) \quad (5)$$

$$\hat{g}_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \hat{\sigma}_y(x)} \exp \left[-\frac{y^2}{2 \hat{\sigma}_y^2(x)} \right] \quad (6)$$

Durch Mäandern kann die Kernfahne aus der Mittellage ausgelenkt sein. Dies wird durch einen Parameter η und die Amplitude $\tilde{\sigma}_y$ des Mäanderns beschrieben,

$$\bar{c}_\eta(x, y, z) = Q C_y(x, z) \hat{g}_y(x, y - \eta \tilde{\sigma}_y) \quad (7)$$



Die mittlere Konzentration der Gesamtfahne erhält man durch Integration über das Mäandern, wobei der Amplitudenverteilung des Mäanderns wieder eine Gaußverteilung zu Grunde gelegt wird:

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \bar{c}_\eta(x, y, z) d\eta \quad (8)$$

$$= QC_y(x, z) g_y(x, y) \quad (9)$$

$$g_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right] \quad (10)$$

$$\sigma_y^2 = \hat{\sigma}_y^2 + \tilde{\sigma}_y^2 \quad (11)$$

Die horizontale Aufweitung der Fahne σ_y verläuft anfangs linear mit der Quellentfernung x und geht erst später, wenn die Transportzeit $\bar{t}(x)$ die horizontale Lagrange-Korrelationszeit T_v überschreitet, in ein \sqrt{x} -Gesetz über:

$$\sigma_y(x)^2 = 2L_v \int_0^x \left[1 - \exp\left(-\frac{\bar{t}(x')}{T_v(x')}\right)\right] dx' \quad (12)$$

$$T_v(x) = L_v \frac{\bar{u}(x)}{\sigma_v^2} \quad (13)$$

$$\bar{t}(x) = \int_0^x \frac{dx'}{\bar{u}(x')} \quad (14)$$

$$\bar{u}(x) = \frac{\int_0^\infty u(z) C_y(x, z) dz}{\int_0^\infty C_y(x, z) dz} \quad (15)$$

Die mittlere Transportgeschwindigkeit $\bar{u}(x)$ erhält man durch Mittelung des vertikalen Windprofils $u(z)$ über die tatsächliche vertikale Konzentrationsverteilung in der Fahne (vgl. VDI 3782/1). Entsprechend wird auch die Aufweitung der Kernfahne $\hat{\sigma}_y$ angesetzt,

$$\hat{\sigma}_y(x)^2 = 2L_v \int_0^x \left[1 - \exp\left(-\frac{\hat{t}(x')}{\hat{T}_v(x')}\right)\right] dx' \quad (16)$$

$$\hat{T}_v(x) = L_v \frac{\bar{u}(x)}{\hat{\sigma}_v^2} \quad (17)$$

wobei als turbulente Geschwindigkeit $\hat{\sigma}_v$, die für die Aufweitung der Kernfahne maßgeblich ist, die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* gewählt wird,

$$\hat{\sigma}_v = u_* \quad (18)$$



Eine horizontal ausgedehnte Quelle wird als Summe von Punktquellen dargestellt. Liegen mehrere Quellen vor, werden die Konzentrationsfelder der einzelnen Quellen addiert. Eventuell vorhandene Unterschiede in der Qualität des Geruchs bleiben unberücksichtigt. Hat man also mehrere Punktquellen mit den Quellstärken $Q^{(k)}$ und den Quellorten $(x_q^{(k)}, y_q^{(k)}, h_q^{(k)})$, dann werden für jede der Quellen die Funktionen $C_y^{(k)}(x)$, $\hat{\sigma}_y^{(k)}(x)$ und $\tilde{\sigma}_y^{(k)}(x)$ und daraus die Gesamtkonzentration berechnet,

$$\bar{c}_\eta(x, y, z) = \sum_k Q^{(k)} C_y^{(k)}(x - x_q^{(k)}, z) \hat{g}_y(x - x_q^{(k)}, y - y_q^{(k)} - \eta \tilde{\sigma}_y^{(k)}) \quad (19)$$

4.2 Das Fluktuationsmodell

Die Verteilungsdichte \hat{f}_c der Konzentrationsfluktuationen innerhalb der Kernfahne ist direkt nicht meßbar. Sie kann experimentell nur indirekt bestimmt werden, indem das Mäandern z.B. über Lidar-Messungen der Konzentration längs eines Strahls quer zur Ausbreitungsrechnung mit erfaßt und die räumliche Zuordnung der Werte auf das momentane Schwerpunktsystem der Fahne bezogen wird [3, 4]. Analysen dieser Art legen nahe, \hat{f}_c als Weibull-Verteilung (vgl. Bild 1) mit einer Intermittenz $\hat{\mu}$, Formparameter $\hat{\nu}$ und Skalierungskonzentration \hat{c}_s anzusetzen:

$$\hat{f}_c(c) = (1 - \hat{\mu})\delta(c) + \hat{\mu} \frac{\hat{\nu}}{\hat{c}_s} \hat{\zeta}^{\hat{\nu}-1} \exp(-\hat{\zeta}^{\hat{\nu}}) \quad (20)$$

$$\hat{\zeta} = c/\hat{c}_s \quad (21)$$

Die Momente \hat{m}_n der Verteilung lassen sich explizit berechnen:

$$\hat{m}_n = \int_0^\infty c^n \hat{f}_c(c) dc = \hat{\mu} \hat{c}_s^n \Gamma(1 + n/\hat{\nu}) \quad (22)$$

Da das erste Moment \hat{m}_1 gleich dem Erwartungswert der Konzentration \bar{c} ist, der über das Mittelwertmodell berechnet ist, besteht folgende Beziehung zwischen den Parametern der Weibull-Verteilung:

$$\hat{c}_s = \frac{\bar{c}_\eta(x, y, z)}{\hat{\mu} \Gamma(1 + 1/\hat{\nu})} \quad (23)$$

Die Variation der Parameters $\hat{\nu}$ und $\hat{\mu}$ innerhalb der Kernfahne wird vernachlässigt und es wird ein fester, mittlerer Wert verwendet (vgl. [1]),

$$\hat{\nu} = 2 \quad (24)$$

$$\hat{\mu} = 1 \quad (25)$$

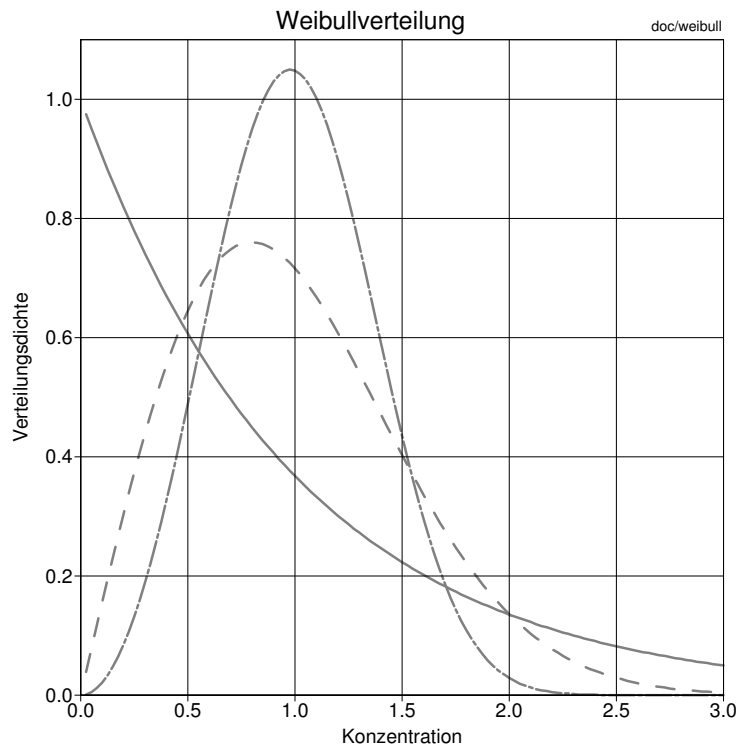


BILD 1: Verteilungsdichte der Weibullverteilung nach Gleichung (20) für die Parameterwerte $\hat{\mu} = 1$ und $\hat{\nu} = 1$ (durchgezogene Linie), $\hat{\nu} = 2$ (gestrichelte Linie) und $\hat{\nu} = 3$ (strichpunktuelle Linie). Der Mittelwert hat in allen Fällen den Wert 1.

Über die mittlere Konzentration $\bar{c}_\eta(x, y, z)$ wird \hat{f}_c implizit auch eine Funktion von x , y , z und η . Durch das Mäandern werden die Verteilungsdichten der Kernfahnen zur Gesamtverteilung f_c überlagert:

$$f_c(c; x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \hat{f}_c(c; x, y, z, \eta) d\eta \quad (26)$$

Bei ausgedehnten Quellen mit einer breiten Kernfahne variiert die Verteilungsdichte \hat{f}_c beim Mäandern der Windrichtung weniger als bei einer Punktquelle. Je ausgedehnter die Quelle quer zur Windrichtung ist, desto mehr nähert sich daher die Struktur von f_c der Struktur von \hat{f}_c an.

4.3 Bestimmung der Geruchshäufigkeit

Zur Berechnung der Wahrnehmungswahrscheinlichkeiten werden nicht nur die dargebotene Geruchsstoffkonzentration c bzw. deren Verteilungsdichte f_c benötigt sondern auch die Wahrnehmungsfunktionen $P_i(c)$, die die Wahrscheinlichkeit angeben, bei Darbietung der Konzentration c eine Geruchsintensität größer als Stufe i wahrzunehmen. Gemäß VDI 3882/1 wird hierfür eine logarithmische Normalverteilung angesetzt,

$$P_i(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda} \int_0^c \exp\left\{-\frac{[\log(c'/c_{F;i})]^2}{2\lambda^2}\right\} \frac{dc'}{c'} \quad (27)$$



Die Konzentration $c_{F,0}$ ist die effektive Geruchsschwelle für die Wahrnehmung im Freien und muß nicht mit der am Olfaktometer bestimmten Geruchsschwelle c_{GS} übereinstimmen.

Die Wahrscheinlichkeit κ_i , eine Geruchsintensität größer als Stufe i wahrzunehmen, erhält man durch Integration des Produktes der Wahrscheinlichkeiten,

$$\kappa_i = \int_0^\infty P_i(c) f_c(c) dc \quad (28)$$

4.4 Das Grenzschichtmodell

Das hier beschriebene Grenzschichtmodell stellt für ebenes Gelände folgende Größen zur Verfügung:

Windgeschwindigkeit	$u(z)$
Vertikale Fluktuation der Windgeschwindigkeit	$\sigma_w(z)$
Vertikaler Diffusionskoeffizient	$K_{zz}(z)$
Horizontale Fluktuation der Windgeschwindigkeit	σ_v
Charakteristische Länge	L_v

Aus σ_v und L_v kann die Lagrange-Korrelationszeit T_v berechnet werden. Von einer Drehung der Windrichtung mit der Höhe z wird hier abgesehen. Die aufgeführten Funktionen werden in Abhängigkeit von folgenden Parametern dargestellt:

Rauhigkeitslänge	z_0
Monin–Obukhov Länge	L_M
Schubspannungsgeschwindigkeit	u_*
Mischungsschichthöhe	h_m

Wird keine Mischungsschichthöhe h_m vorgegeben, dann wird für labile Schichtung der Wert für indifferente Schichtung verwendet. Für indifferente und stabile Schichtung ($L_M > 0$) wird entsprechend SEINFELD⁴ folgender Ansatz gemacht:

$$h_m = \begin{cases} \alpha \frac{u_*}{f} & \text{für } |L_M| > u_*/f \quad (\text{indifferent}) \\ \alpha \frac{u_*}{f} \left(\frac{u_*}{f L_M} \right)^{-1/2} & \text{für } 0 < L_M \leq u_*/f \quad (\text{stabil}) \end{cases} \quad (29)$$

⁴ J.H. SEINFELD: *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. Wiley & Sons, New York 1986.



mit dem Coriolis-Parameter $f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Für den Faktor α werden in der Literatur unterschiedliche Werte angegeben (typischerweise zwischen 0.2 und 0.7), hier wird $\alpha = 0.3$ gesetzt.

4.4.1 Definition der Profile

Das Profil der Windgeschwindigkeit wird entsprechend BUSINGER ET AL.⁵ und HICKS⁶ gewählt,

$$u(z) = \begin{cases} \frac{u_*}{\kappa} \Psi_0(\zeta) & \text{für } L_M > 0 \\ \frac{u_*}{\kappa} [\ln(\zeta/\zeta_0) - \Psi_1(\zeta)] & \text{für } L_M < 0 \end{cases} \quad (30)$$

$$\text{mit } \zeta(z) = (z + z_0)/L_M, \quad \zeta_0 = \zeta(0)$$

$$\Psi_0(\zeta) = \begin{cases} \ln(\zeta/\zeta_0) + 5\zeta + X_1 & \text{für } \zeta < 0.5 \\ 8 \ln \zeta + 4.25/\zeta - 0.5/\zeta^2 + X_2 & \text{für } 0.5 \leq \zeta \leq 10 \\ 0.7585\zeta + X_3 & \text{für } \zeta > 10 \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } X_1 &= -5\zeta_0 \\ X_2 &= -7 \ln 2 - \ln \zeta_0 - 5\zeta_0 - 4 \\ X_3 &= 8 \ln 20 - 11.165 - \ln 2 - \ln \zeta_0 - 5\zeta_0 \end{aligned}$$

$$\Psi_1(\zeta) = \ln \left[\left(\frac{1+X}{1+X_0} \right)^2 \frac{1+X^2}{1+X_0^2} \right] - 2 (\arctan X - \arctan X_0) \quad (32)$$

$$\text{mit } X = (1 - 15\zeta)^{1/4}, \quad X_0 = (1 - 15\zeta_0)^{1/4}$$

Hierbei ist $\kappa = 0.4$ die von Kármán Konstante.

Für die vertikale Geschwindigkeitsfluktuation und den vertikalen Diffusionskoeffizienten wurden Ansätze von HANNA⁷, GRYNING ET AL.⁸, HOLTSLAG ET AL.⁹, PAU-

⁵ J.A. BUSINGER, J.C. WYNGAARD, Y. IZUMI, E.F. BRADLEY (1971): Flux Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. *J. Atmos. Sci.* **28**, 181–189.

⁶ B.B. HICKS (1976): Wind Profile Relationships from the Wangara Experiment. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **102**, 535–551.

⁷ S.R. HANNA (1982): Applications in air pollution modelling. In: *Atmospheric turbulence and air pollution modelling* (Eds. F.T.M. Nieuwstadt and H. van Dop). Reidel, Boston.

⁸ S.-E. GRYNING, A.A.M. HOLTSLAG, J.S. IRWIN, B. SIVERTSEN (1987): Applied Dispersion Modelling Based on Meteorological Scaling Parameters. *Atmos. Environ.* **21**, 79–89.

⁹ A.A.M. HOLTSLAG, C.H. MOENG (1991): Eddy Diffusivity and Countergradient Transport in the Convective Atmospheric Boundary Layer. *J. Atmos. Sci.* **48**, 1690–1698.



MIER ET AL.¹⁰, PANOFKY ET AL.¹¹, PANOFKY AND DUTTON¹², LÜPKES UND SCHLÜNZEN¹³, MYRUP AND RANZIERI¹⁴, SHIR¹⁵, BUSINGER AND ARYA¹⁶ und BINKOWSKI¹⁷ ausgewertet und folgende Profile gewählt:

$$\sigma_w(z) = f_w u_* \begin{cases} \exp\left(\frac{-2\alpha z}{h_m}\right) & \text{für } L_M > 0 \\ \left[\exp\left(\frac{-6\alpha z}{h_m}\right) - 2.1 \frac{z}{L_M} \exp\left(\frac{-3z}{h_m}\right) \right]^{1/3} & \text{für } L_M < 0 \end{cases} \quad (33)$$

mit $f_w = 1.3$

$$K_{zz}(z) = \kappa u_* z \begin{cases} \frac{1}{1 + p_s z/L_M} \exp(-8\alpha z/h_m) & \text{für } L_M > 0 \\ \left[\exp\left(\frac{-18\alpha z}{h_m}\right) + (-3p_s \zeta + 120\zeta^2)\chi^6 \right]^{1/3} & \text{für } L_M < 0 \end{cases} \quad (34)$$

mit $p_s = 4.7$
 $\zeta = z/L_M$
 $\chi = 1 - z/h_m$

Die horizontale Windgeschwindigkeitsfluktuation und die charakteristische Länge zur Berechnung der Lagrange-Korrelationszeit werden im Hinblick auf die hier vorgesehene Anwendung als höhenunabhängig angesetzt. Sie sind abhängig von der Länge des Zeitintervalls \bar{t} , auf das sie sich beziehen,

$$\sigma_v = f_v A_v u_* \begin{cases} 1 & \text{für } L_M > 0 \\ \left(1 - 0.064 \frac{h_m}{L_M}\right)^{1/3} & \text{für } L_M < 0 \end{cases} \quad (35)$$

mit $f_v = 2.0$

¹⁰ J. PAUMIER, D. STINSON, T. KELLY, C. BOLLINGER, J.S. IRWIN (1986): MPDA-1.1: a meteorological processor for diffusion analysis. *EPA/600/8-86/011*. EPA, Research Triangle Park, NC.

¹¹ H.A. PANOFKY, H. TENNEKES, D.H. LENSCHOW, J.C. WYNGAARD (1977): The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions. *Boundary-Layer Meteorol.* **11**, 355-361.

¹² H.A. PANOFKY, J.A. DUTTON: *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications*. Wiley & Sons, New York 1984.

¹³ CH. LÜPKES, K.H. SCHLÜNZEN (1996): Modelling the Arctic Convective Boundary Layer with Different Turbulence Parametrizations. *Boundary Layer Meteorol.* **79**, 107-130.

¹⁴ L.O. MYRUP, A.J. RANZIERI (1976): A Consistent Scheme for Estimating Diffusivities to be used in Air Quality Models. *Rep. CA-DOT-TL-7169-3-76-32*, California Department of Transportation, Sacramento.

¹⁵ C.C. SHIR (1973): A Preliminary Numerical Study of Atmospheric Turbulent Flows in the Idealized Planetary Boundary Layer. *J. Atmos. Sci.* **30**, 1327-1339.

¹⁶ J.A. BUSINGER, S.P.S. ARYA (1974): Height of the Mixed Layer in the Stably Stratified Planetary Boundary Layer. *Adv. Geophys.* **18A**, 73-92.

¹⁷ F.S. BINKOWSKI (1979): A Simple Semi-Empirical Theory for the Turbulence in the Atmospheric Surface Layer. *Atmos. Environ.* **13**, 247-253.



$$A_v = \left(\frac{\bar{t}}{3600 \text{ s}} \right)^{0.2} \quad (36)$$

$$L_v = 0.1 F_v A_v^2 h_m \quad (37)$$

mit $F_v = 0.17$

4.4.2 Klasseneinteilung

Wenn die Monin-Obukhov-Länge L_M nicht bekannt ist, kann statt dessen auch eine Stabilitätsklasse nach Klug/Manier oder KTA angegeben werden. Umgekehrt wird einer vorgegebenen Monin-Obukhov-Länge L_M auch eine Stabilitätsklasse zugeordnet, die später zur Berechnung von Größen verwendet werden kann, die nach Stabilitätsklassen klassiert sind. Fehlt die Angabe einer Mischungsschichthöhe h_m , so wird sie entsprechend der vorgegebenen oder zugeordneten Stabilitätsklasse festgelegt. Die folgende Tabelle zeigt, wie die Monin-Obukhov-Längen bei einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 1.5 \text{ m}$ den einzelnen Stabilitätsklassen zugeordnet werden:

Stabilitätsklasse Klug/Manier	KTA	Monin-Obukhov-Länge (m)		Mischungsschichthöhe (m)
		Intervall	Standard	
I	F	$L_M^{(1.5)} < 100$	70	Gl. (29)
II	E	$100 \leq L_M^{(1.5)} < 500$	250	Gl. (29)
III/1	D	$500 \leq L_M^{(1.5)}$ oder $L_M^{(1.5)} < -700$	99999	Gl. (29)
III/2	C	$-700 \leq L_M^{(1.5)} < -200$	-300	800
IV	B	$-200 \leq L_M^{(1.5)} < -100$	-150	1100
V	A	$-100 \leq L_M^{(1.5)}$	-70	1100

Die Zuordnung der Mischungsschichthöhe für die Klassen A, B und C ist konsistent mit der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre; Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung).

Der Intervalleinteilung der Monin-Obukhov-Länge liegt eine Auswertung von meteorologischen Messungen am Kernforschungszentrum Karlsruhe zugrunde. Die angegebenen Werte sind daher nur für eine Bodenrauigkeit von etwa $z_0 = 1.5 \text{ m}$ repräsentativ. Die Standardwerte wurden den Arbeiten von GOLDER¹⁸ und MYRUP UND RANZIERI für eine Rauigkeitslänge von 1.5 m entnommen (siehe SEINFELD).

¹⁸ D. GOLDER(1972): Relations among Stability Parameters in the Surface Layer. *Boundary Layer Meteorol.* **42**, 47–58



Für andere Rauigkeitslängen wird folgender Ansatz verwendet:

$$L_M = L_M^{(1.5)} \sqrt{\frac{z_0}{1.5 \text{ m}}} \quad \text{für } 0.01 \text{ m} \leq z_0 \leq 1.5 \text{ m} . \quad (38)$$

Mit diesem Ansatz werden die Ergebnisse von GOLDER im angegebenen Parameterbereich näherungsweise reproduziert. Er ist allerdings nur eine Hilfslösung, zumal die dort verwendete Klasseneinteilung nach Pasquill im allgemeinen nicht mit der hier verwendeten übereinstimmt. Da weitere Informationen zur Zeit fehlen, wird dieser Ansatz auch außerhalb des angegebenen Parameterbereiches verwendet.

4.4.3 Test des Grenzschichtmodells

Das in Abschnitt 4.4.1 vorgestellte Grenzschichtmodell beschreibt die Transporteigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht, insbesondere im unteren Bereich. Mit Hilfe eines Ausbreitungsmodells, das diese Transporteigenschaften realisiert, und Ausbreitungsexperimenten kann daher die Gültigkeit des Ansatzes überprüft werden. Hier werden zur Überprüfung das zuvor vorgestellte Mittelwertmodell und die *Prairie Grass-Experimente*¹⁹ verwendet.

Bei diesen Experimenten, die im Sommer 1956 durchgeführt worden waren, wurde SO₂ in ebenem Gelände mit sehr geringer Bodenrauigkeit in niedriger Höhe freigesetzt und die Konzentration auf Kreisbögen im Abstand von 50, 100, 200, 400 und 800 m als 10-Minuten-Mittelwert gemessen. Zusammenfassende Auswertungen hierzu wurden von VAN ULDEN²⁰, NIEUWSTADT²¹ und NIEUWSTADT & VAN ULDEN²² angegeben. Die bei HANNA²³ aufgeführte Auflistung enthält eine Auswahl der von VAN ULDEN angegebenen Experimente und stimmt in ihren Angaben im Wesentlichen damit überein²⁴. Bei der Beurteilung veröffentlichter Resultate und dem Vergleich zwischen Rechenergebnissen und Meßergebnissen treten jedoch eine Reihe von Problemen auf:

- Für die von Kármán Konstante κ werden unterschiedliche Werte verwendet. Während früher (z.B. auch bei NIEUWSTADT) $\kappa = 0.35$ gebräuchlich war, setzt sich

¹⁹ M.L. BARAD (Editor) (1958): *Project Prairie Grass; A Field Program in Diffusion; Vol. 1*. Geophysics Research Paper No. 59, Geophysics Research Directorate, Air Force Cambridge Research Center, Bedford, Massachusetts.

²⁰ A.P. VAN ULDEN (1978): Simple estimates for vertical diffusion from sources near the ground. *Atmos. Environ.* **12**, 2125-2129.

²¹ F. NIEUWSTADT (1978): The computation of the friction velocity u_* and the temperature scale T_* from temperature and wind velocity profiles by least-square methods. *Boundary-Layer Meteorol.* **14**, 235-246.

²² F.T.M. NIEUWSTADT, A.P. VAN ULDEN (1978): A numerical study on the vertical dispersion of passive contaminants from a continuous source in the atmospheric surface layer. *Atmos. Environ.* **12**, 2119-2124.

²³ S.R. HANNA, J.S. CHANG, D.G. STRIMAITIS (1990): Uncertainties in source emission rate estimates using dispersion models. *Atmos. Environ.* **24A**, 2971-2980.

²⁴ Die Abweichungen beruhen möglicherweise auf Schreibfehlern.



heute mehr der Wert $\kappa = 0.40$ durch. Fast alle zur Beschreibung der Prandtl-Schicht verwendeten Parameter und numerischen Konstanten hängen von κ ab.

- Der für die theoretische Beschreibung der Prandtl-Schicht verwendete Austauschkoefizient für Wärme, K_h , der auch für die Diffusion skalarer Beimengungen verwendet wird, wird unterschiedlich angegeben.
- Die Rauigkeitslänge wird unterschiedlich angegeben. VAN ULDEN verwendet $z_0 = 0.008$ m, HANNA gibt $z_0 = 0.006$ m an.
- Die aufgeführten Meßwerte stellen nicht immer die bodennahe Konzentration dar. Modellrechnungen zeigen, daß bei $x = 50$ m und neutraler bis stabiler Schichtung die bodennahe Konzentration um mindestens einen Faktor 1.5 höher ist als der in 1.5 m Höhe gemessene Konzentrationswert. Bei stabiler Schichtung gilt dies auch in größerer Entfernung. Eine entsprechende Diskussion ist bereits bei NIEUWSTADT & VAN ULDEN zu finden. Eine direkte Anpassung einer empirischen Relation für bodennahe Konzentration an diese Meßwerte ist also gar nicht möglich, dies geht nur über Modellrechnungen.
- Die Quelle ist nicht ideal punktförmig und passiv, sondern nimmt mit einer Ausströmgeschwindigkeit von bis zu 25 m/s (bei 5 cm Durchmesser) im Nahbereich sicher deutlichen Einfluß auf die Ausbreitung des emittierten Stoffes. Es ist zu vermuten, daß diese Beeinflussung auch noch in 50 m Entfernung wirksam ist.
- Das emittierte SO_2 wird von der Vegetation am Erdboden absorbiert, es ist aber nicht klar, in welchem Maße. Dies wird auch von den Witterungsverhältnissen und der Tageszeit abhängen und davon, wie weit die Vegetation bereits durch hohe SO_2 -Konzentrationen geschädigt ist. NIEUWSTADT & VAN ULDEN argumentieren, daß bei einer Depositionsgeschwindigkeit von $v_d = 0.07u_*$ am Erdboden (dies entspricht 0.5 bis 2 cm/s bezogen auf 1 m Referenzhöhe) kaum eine Beeinflussung des vertikalen Konzentrationsprofils oberhalb von 0.5 m (niedrigste Meßhöhe) zu erwarten und in den Messungen auch nicht erkennbar sei. Andererseits zeigt eine Modellrechnung für das von ihnen ausführlich dargestellte Experiment 59 ($u = 2.6$ m/s, $\bar{z} = 1.6$ m in 100 m Quellentfernung), daß bei einer Depositionsgeschwindigkeit von 0.006 m/s (bezogen auf die bodennahe Konzentration, i.e. $z = 0.05$ m) innerhalb 100 m Quellentfernung bereits 15 % der emittierten Menge absorbiert werden. Dies sollte im vertikalen Konzentrationsprofil auch bei $z = 0.5$ m bemerkbare Änderungen hervorrufen. Um so stärker müßte der Effekt in größerer Quellentfernung sein.

Die von HANNA aufgeführte Tabelle mit 44 Experimenten wurde zur Grundlage eines Vergleichs von Modellrechnung und Messung gemacht. Für jedes Experiment ist dort u.a. aufgeführt:

u_2 Mittlere Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe.

σ_θ Horizontale Windrichtungsfluktuation.

ΔT Temperaturdifferenz zwischen $z = 16$ m und $z = 2$ m.



- u_* Schubspannungsgeschwindigkeit (wie von NIEUWSTADT berechnet).
- L_M Monin-Obukhov-Länge (wie von NIEUWSTADT berechnet).
- C Maximale Konzentration in 1.5 m Höhe für die Quellentfernungen $x = 50, 100, 200, 400, 800$ m.
- C_y Quer zur Windrichtung integrierte Konzentration in 1.5 m Höhe für die Quellentfernungen $x = 50, 200, 800$ m.

Die Konzentrationen sind dabei schon auf eine Quellstärke von 1 g/s normiert. Leider stehen keine der gemessenen Vertikalprofile (Konzentration und meteorologische Größen) zur Verfügung, aus denen man Rückschlüsse z.B. auf die Bedeutung der Deposition hätte ziehen können.

Für die Überprüfung des Grenzschichtmodells anhand dieser Experimente wurde die quer zur Windrichtung integrierte Konzentration C_y und die Fahnenaufweitung σ_y in den Quellentfernungen $x = 50, 200, 800$ m verglichen. Die Bilder 2 und 3 zeigen die Ergebnisse. Die verwendete Depositionsgeschwindigkeit ist jeweils $v_d = 0.02u_*$.

Die Werte von C_y werden gut getroffen, lediglich bei sehr labiler Schichtung ($1/L_M < -0.05 \text{ m}^{-1}$) und großer Quellentfernung überschätzt das Modell deutlich die Konzentrationswerte. Das liegt daran, daß in diesem Bereich das Bild der turbulenten Diffusion nicht mehr zutreffend ist, da der Transport vorwiegend in geordneten konvektiven Zellen erfolgt.

Die Werte für σ_y streuen etwas stärker, lassen aber bei labiler Schichtung keine systematischen Abweichungen erkennen. Bei schwach stabiler Schichtung wird die Fahnenbreite um etwa 50 % überschätzt.

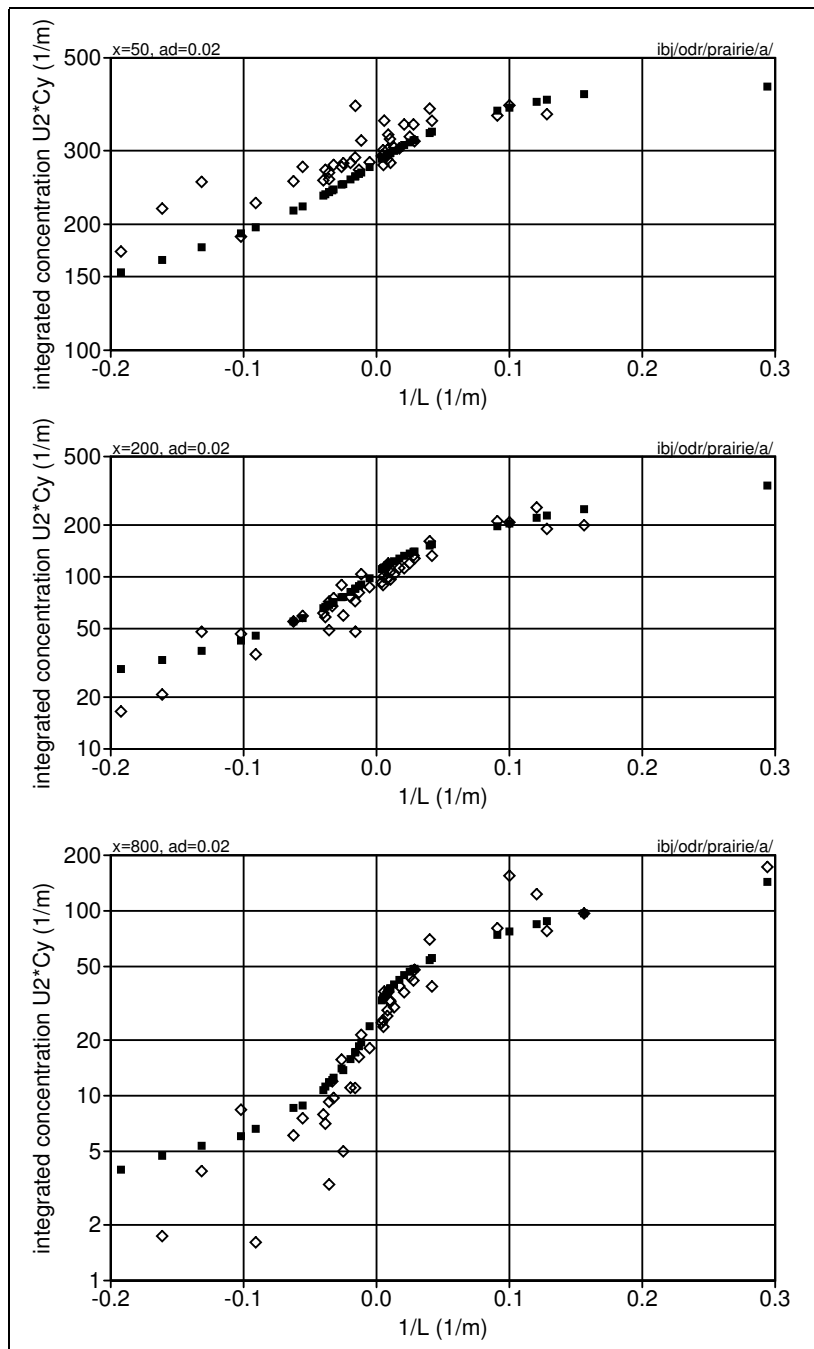


BILD 2: Normierte, quer zur Windrichtung integrierte Konzentration, $10^3 u_2 C_y$ in Abhängigkeit von der reziproken Monin-Obukhov-Länge für die Quellentfernungen 50 m (oben), 200 m (Mitte) und 800 m (unten). Die offenen Rauten sind Meßwerte, die schwarzen Quadrate Rechenwerte mit dem Modell MEPOD.

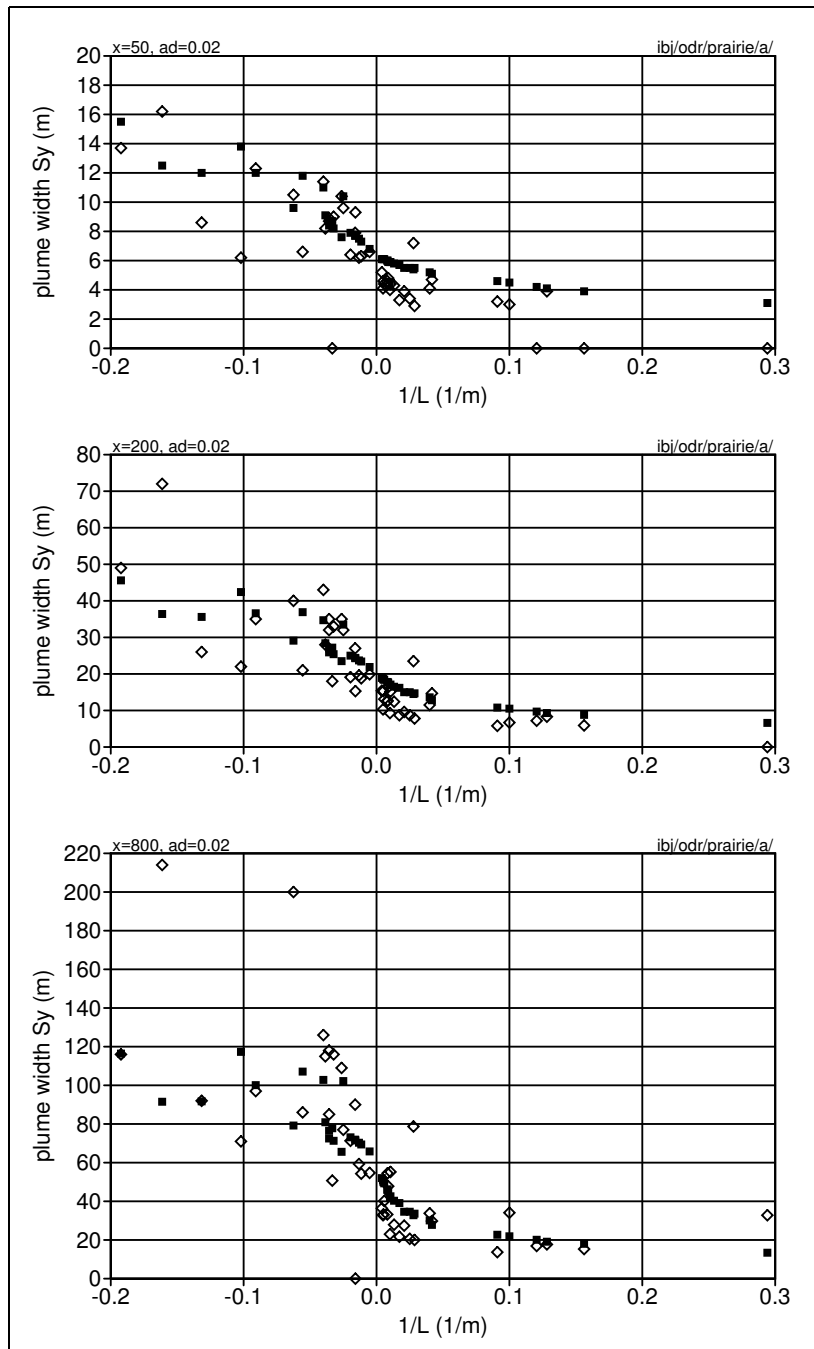


BILD 3: Horizontale Fahnenbreite σ_y in Abhängigkeit von der reziproken Monin-Obukhov-Länge für die Quellentfernungen 50 m (oben), 200 m (Mitte) und 800 m (unten). Die offenen Rauten sind Meßwerte, die schwarzen Quadrate Rechenwerte mit dem Modell MEPOD.



5 Die Implementierung des Modells

Die Anwendung des Modells MEPOD erfordert die Lösung einer Partiellen Differentialgleichung (Advektions-Diffusionsgleichung beim Mittelwertmodell) und die Bestimmung mehrerer Integrale bei der Behandlung des Mäanderns. In den folgenden Abschnitten sind die numerischen Verfahren beschrieben, die in IBJmepod zur Lösung dieser Aufgaben eingesetzt sind. Es gibt andere geeignete numerische Verfahren, von denen einige möglicherweise besser geeignet sind, aber die Auswahl ist nicht kritisch, da bei genügend feiner Diskretisierung die richtige Lösung durch alle Verfahren beliebig genau approximiert werden kann.

5.1 Die Advektions-Diffusionsgleichung

Zur Berechnung der mittleren, quer zur Windrichtung integrierten Konzentration $c(x, z)$ für eine bestimmte Wetterlage ist die Lösung der Advektions-Diffusionsgleichung

$$u(z) \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(x, z) \frac{\partial c}{\partial z} \right] \quad (39)$$

$$K(x, z) = \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{x \sigma_w^2(z)}{u(z) K_{zz}(z)} \right] \right\} K_{zz}(z) \quad (40)$$

erforderlich.²⁵ Hierbei ist u die Windgeschwindigkeit, K_{zz} der vertikale Austauschkoefizient für skalare Beimischungen und σ_w die vertikale Windfluktuation. Der Wind weht in die positive x -Richtung, die Quelle ist punktförmig (oder vertikal ausgedehnt) bei $x = 0$ und $y = 0$ und hat die Quellstärke 1.

Zur numerischen Darstellung der Größen dient ein kartesisches Netz mit den Gitterlinien

$$x = x_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N_x \quad (41)$$

$$z = z_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N_z \quad (42)$$

Dabei ist $x_0 = 0$ und $z_0 = 0$.²⁶ Die beiden Gitter brauchen nicht äquidistant zu sein. Zwischengitterpunkte werden durch halbzahlige Indizes gekennzeichnet, wobei

²⁵Gegenüber der Modellbeschreibung ist hier die Schreibweise vereinfacht: Statt C_y wird das Symbol c und statt K^* wird das Symbol K verwendet.

²⁶In Abschnitt 5 tritt die Rauigkeitslänge, die ebenfalls mit z_0 bezeichnet wird, nicht auf, daher sollten Verwechslungen ausgeschlossen sein.



Die Gleichung (39) kann in diskretisierter Form als Flußbilanz geschrieben werden. Hierzu werden die Flüsse in x -Richtung $F_{ik'}^{(x)}$ und in z -Richtung $F_{i'k}^{(z)}$ eingeführt:

$$F_{ik'}^{(x)} = \text{Fluß durch die Fläche } x = x_i, \quad z_{k-1} \leq z \leq z_k \quad (49)$$

$$F_{i'k}^{(z)} = \text{Fluß durch die Fläche } z = z_k, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i \quad (50)$$

Die Massenerhaltung für die Zelle $x_{i-1} \leq x \leq x_i$, $z_{k-1} \leq z \leq z_k$ bedeutet, daß die Summe der Flüsse durch die Randflächen null ist:

$$-F_{i-1,k'}^{(x)} + F_{i,k'}^{(x)} - F_{i',k-1}^{(z)} + F_{i',k}^{(z)} = 0 \quad (51)$$

Der horizontale Fluß kommt im Rahmen dieses Modells nur durch Advektion, der vertikale nur durch Diffusion zustande. Die Advektion ist proportional der Windgeschwindigkeit, die Diffusion proportional dem Gradienten der Konzentration:

$$F_{ik'}^{(x)} = (z_k - z_{k-1})u_{k'}c_{ik'} \quad (52)$$

$$F_{i'k}^{(z)} = -(x_i - x_{i-1})K_{i'k} \frac{c_{i',k'+1} - c_{i'k'}}{\frac{1}{2}(z_{k+1} - z_{k-1})} \quad \text{für } k = 1, 2, \dots, N_z - 1 \quad (53)$$

$$K_{i'k} = K(x_{i'}, z_k) \quad (54)$$

Der obere und der untere Rand des Rechengebietes werden als undurchlässig angenommen,

$$F_{i',0}^{(z)} = 0 \quad (55)$$

$$F_{i',N_z}^{(z)} = 0 \quad (56)$$

Die Konzentration an den Zwischengitterpunkten in x -Richtung wird als gewichtetes Mittel der Werte bei $x = x_{i-1}$ und bei $x = x_i$ angesetzt:

$$c_{i',k'} = \alpha c_{i-1,k'} + (1 - \alpha)c_{i,k'} \quad \text{mit } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (57)$$

In der bisher üblichen Vorgehensweise würde man α den Wert $\frac{1}{2}$ geben, es kann jedoch zweckmäßig sein, davon abzuweichen (s.u.).

Die Konzentrationswerte $c_{ik'}$ können jetzt folgendermaßen bestimmt werden: Angenommen, die Werte sind für $x = x_{i-1}$ bekannt. Dann liefert die Flußerhaltung, Gleichung (51), für $k = 1, \dots, N_z$ nach Einsetzen von (52), (53) und (57) ein Gleichungssystem von N_z Gleichungen für die N_z Unbekannten $c_{ik'}$, $k' = 1 - \frac{1}{2}, 2 - \frac{1}{2}, \dots, N_z - \frac{1}{2}$. Dieses Gleichungssystem hat Tridiagonalform und ist daher sehr effektiv lösbar.²⁷

²⁷PRESS W.H., B.P. FLANNERY, S.A. TEUKOLSKY, W.T. VETTERLING: *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press 1989.



Die Anfangswerte für $x = x_0$ erhält man aus der Quellgeometrie. Dabei wird einer Punktquelle eine Mindestausdehnung in der Vertikalen gegeben, die gleich der Länge des Intervalls ist, in der sich die Quelle befindet. Ist h die Höhe der Quelle und $z_{k_q-1} < h \leq z_{k_q}$, dann wird also ersatzweise eine Quelle gerechnet, die von $z = h_{\min} = h - \frac{1}{2}(z_{k_q} - z_{k_q-1})$ bis $z = h_{\max} = h + \frac{1}{2}(z_{k_q} - z_{k_q-1})$ reicht. Auf diese Weise wird erreicht, daß eine stetige Änderung der Quellhöhe auch eine stetige Änderung des Konzentrationsfeldes zur Folge hat. Der Fluß $F_{0,k'}^{(x)}$ wird gleich dem Anteil des Intervalls $h_{\min} \leq z \leq h_{\max}$ gesetzt, der im Intervall $z_{k-1} \leq z \leq z_k$ liegt. Sind die Flüsse $F_{0,k'}^{(x)}$ berechnet, ergeben sich die Anfangswerte $c_{0,k'}$ aus Gleichung (52). Nach Bestimmung der Anfangswerte können die anderen Werte von links nach rechts fortschreitend, wie zuvor beschrieben, berechnet werden.

Dieses Verfahren arbeitet stabil, solange der Schritt in x -Richtung nicht zu groß wird. Es muß die Bedingung

$$x_i - x_{i-1} \leq (z_k - z_{k-1})^2 \frac{u_k}{K_{zz,k}} \quad (58)$$

für alle i und k erfüllt sein oder es müssen genügend Zwischenschritte eingelegt werden, so daß die Bedingung für jeden Zwischenschritt erfüllt ist. Diese Bedingung ist oft sehr hinderlich, denn bei labiler Schichtung kann K_{zz} in großer Höhe sehr groß werden und dabei eine sehr kleine Schrittweite erzwingen, obwohl man sich vielleicht nur für die bodennahe Ausbreitung interessiert. Ein Ausweg besteht darin, durch Wahl von $\alpha = 0$ das Verfahren voll implizit zu machen. Das Ergebnis ist dann manchmal etwas ungenauer, aber es besteht keine Einschränkung an die Schrittweite.

Die Wahl der Gitterpunkte ist — bis auf die Stabilitätsüberlegung — bisher nicht eingeschränkt. Es hat sich aber hinsichtlich der Rechenökonomie als zweckmäßig erwiesen, das Gitter in Bodennähe und in Quellnähe fein zu wählen und in größerer Entfernung zu größeren Maschen überzugehen. Folgender Ansatz erzeugt ein solches Netz:

$$x_i = l_x \left\{ 10^{i/A_x} - 1 \right\}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N_x \quad (59)$$

$$z_k = l_z \left\{ 10^{k/A_z} - 1 \right\}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N_z \quad (60)$$

5.2 Berechnung von Integralen

Zur rechnerischen Durchführung des Mäanderns sind Verteilungsdichten der Konzentration zu überlagern. Hierfür ist es zweckmäßig, die Konzentrationsverteilung $f_c(c)$



auf einem Gitter darzustellen, bei der die logarithmische c -Achse äquidistant unterteilt ist:

$$c_l = c_{F;0} \exp(\gamma l) \quad \text{für } l_{\min} \leq l \leq l_{\max} \quad (61)$$

$$\gamma_l = \frac{l}{A_c} \log(10) \quad (62)$$

A_c ist die Anzahl der Intervalle pro Dekade. Ferner ist es oft günstiger, statt mit der Verteilungsdichte f_c mit der Verteilungsfunktion F_c zu arbeiten,

$$F_c(c) = \int_0^c f_c(c') dc' \quad (63)$$

Die Funktion $F_c(c)$ wird auf den Werten c_l tabelliert und bei Bedarf zwischen den Stützpunkten unter Verwendung der Variablen γ linear interpoliert,

$$F_c(c_l) = F_{c;l} \quad (64)$$

$$F_c(c) = F_{c;l} + \frac{\gamma - \gamma_l}{\gamma_{l+1} - \gamma_l} [F_{c;l+1} - F_{c;l}] \quad \text{für } c_l \leq c \leq c_{l+1} \quad (65)$$

$$\gamma = \log(c/c_{F;0}) \quad (66)$$

Durch partielle Integration kann das Integral zur Berechnung der Geruchshäufigkeit in folgende Form gebracht werden:

$$\kappa_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\lambda^2}\right) [1 - F_c(c)] d\gamma \quad (67)$$

Die numerische Auswertung verwendet die Trapezregel:

$$\kappa_0 = \frac{\log(10)}{N_c} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda} \sum_{l=l_{\min}}^{l_{\max}} \exp\left(-\frac{\gamma_l^2}{2\lambda^2}\right) [1 - F_{c;l}] \quad (68)$$

Zur Berechnung des Mäanderns ist ein Integral über den Parameter η zu bilden, der die Auslenkung aus der Mittellage charakterisiert:

$$F_c(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-\eta^2/2) \hat{F}_c(c; \eta) d\eta \quad (69)$$



Zur numerischen Berechnung wird für η im Bereich $|\eta| \leq \eta_{\max}$ ein äquidistantes Raster mit $2\tilde{N}$ Intervallen definiert und wieder die Trapezregel verwendet:

$$F_{c;l} = \sum_{i=-\tilde{N}}^{\tilde{N}} \tilde{w}_i \hat{F}_{c;l}(\eta_i) \quad (70)$$

$$\tilde{w}_i = \frac{\exp(-\eta_i^2/2)}{\sum_{i=-\tilde{N}}^{\tilde{N}} \exp(-\eta_i^2/2)} \quad (71)$$

$$\eta_i = i\eta_{\max}/\tilde{N} \quad (72)$$

5.3 Flächenquellen

Die einfachste Möglichkeit, eine rechteckige Flächenquelle durch Punktquellen darzustellen, besteht darin, sie durch viele kleine Rechtecke zu ersetzen, von denen keines eine Kantenlänge größer als eine vorgegebene Länge L_q besitzt, und die Mittelpunkte dieser Rechtecke als Ersatzpunktquellen zu verwenden.²⁸

Rechenökonomisch günstiger ist es, die Punkte in Reihen quer zur Windrichtung anzuordnen, also effektiv die Flächenquelle durch eine Folge von Linienquellen zu approximieren, denn die Summation über die Punkte der Linie (Linienintegral) kann analytisch durchgeführt werden. Hierzu wird das Rechteck zunächst in trapezförmige Streifen zerlegt, deren Grundlinie senkrecht zur Windrichtung (also in y -Richtung) verläuft (Bild 5). Die Breite der Streifen beträgt höchstens L_q . Ein Streifen mit den Eckpunkten $(x_{s;1}, y_{s;1,1})$, $(x_{s;1}, y_{s;1,2})$, $(x_{s;2}, y_{s;2,1})$ und $(x_{s;2}, y_{s;2,2})$ wird durch eine Linienquelle ersetzt, die ihren Mittelpunkt (x_1, y_1) bei

$$x_1 = (x_{s;1} + x_{s;2})/2 \quad (73)$$

$$y_1 = (y_{s;1,1} + y_{s;1,2} + y_{s;2,1} + y_{s;2,2})/4 \quad (74)$$

hat, ihre Ausdehnung in y -Richtung beträgt

$$l_1 = \frac{1}{2} \sqrt{(y_{s;1,2} - y_{s;1,1} + y_{s;2,2} - y_{s;2,1})^2 + (y_{s;1,2} + y_{s;1,1} - y_{s;2,2} - y_{s;2,1})^2} \quad (75)$$

Die Quellstärke einer Ersatz-Linienquelle ist gleich dem Flächenanteil des betr. Streifens an der Gesamtfläche der Quelle. Auf diese Weise lassen sich auch schräg zur Windrichtung verlaufende Linienquellen ersetzen.

²⁸So wird in *IBJodor* verfahren.

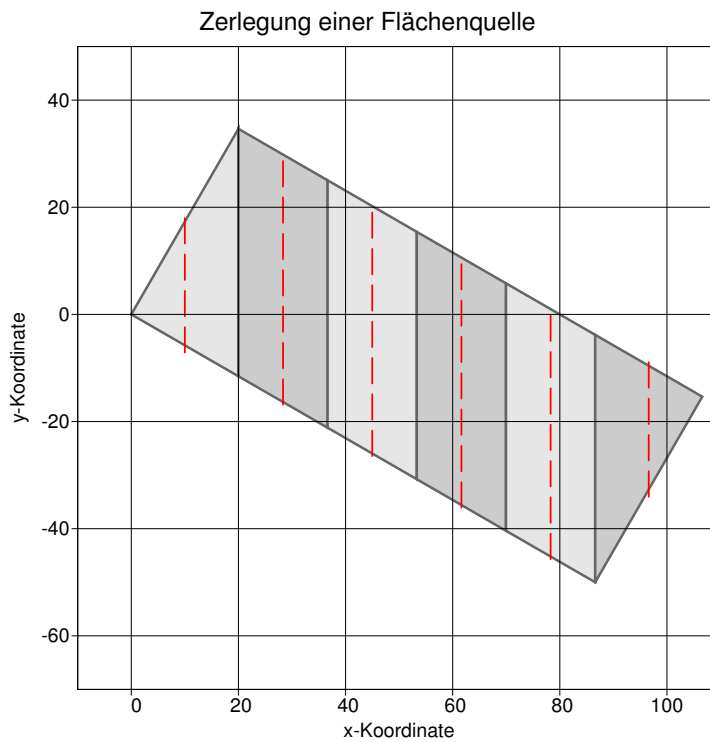


BILD 5: Zerlegung einer rechteckigen Flächenquelle in Streifen quer zur Windrichtung und Ersatz der Streifen durch Linienquellen (rote gestrichelte Linien).



6 Verifikation des Mittelwertmodells

Es wird der Teil von MEPOD, der für die Berechnung der mittleren Konzentration mit Hilfe eines Differenzenverfahrens zuständig ist (Modell HEGAU), überprüft. Es wird gezeigt, daß in Spezialfällen, für die analytische Lösungen existieren, bei genügend feiner Netzeinteilung das theoretische Konzentrationsprofil nahezu beliebig genau reproduziert werden kann. Die drei Spezialfälle sind:

1. Homogene Atmosphäre
2. Homogene Atmosphäre mit Taylor-Korrektur
3. Inhomogene Atmosphäre mit Berljand-Profil

In allen Fällen wird die quer zur Windrichtung integrierte, durch die Quellstärke dividierte Konzentration $C_y(x, z)$ im Bereich $0 \leq x \leq 1200$ m und $0 \leq z \leq 80$ m berechnet, und zwar für zwei unterschiedliche numerische Genauigkeiten:

A Feines Netz: Horizontale Maschenweite 0.25 m, vertikale Maschenweite 0.05 m

B Grobes Netz: Horizontale Maschenweite 1.00 m, vertikale Maschenweite 0.80 m

Das Differenzenverfahren wird in beiden Fällen voll implizit ($\alpha = 0$) betrieben. Weitere Parameter sind:²⁹

Anemometerhöhe h_a (ha)	10	m
Windgeschwindigkeit u_a (ua)	6	m/s
Schubspannungsgeschwindigkeit u_* (us)	0.25	m/s
Emissionshöhe h_q (hq)	10	m

6.1 Homogene Atmosphäre

Das Grenzschichtmodell in *IBJXodor* generiert ein homogenes Profil, falls $z_0 = 0$ gesetzt ist. Der vertikale Diffusionskoeffizient wird dabei auf den Wert $K_{zz} = 0.4u_*h_a$ gesetzt. Die analytische Lösung für diesen Fall ist die bekannte Gauß-Formel

$$C_y(x, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z(x)u_a} \left\{ \exp \left[-\frac{(z - h_q)^2}{2\sigma_z(x)^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z + h_q)^2}{2\sigma_z(x)^2} \right] \right\} \quad (76)$$

$$\sigma_z(x)^2 = \frac{2}{u_a} K_{zz} x \quad (77)$$

²⁹Die in Schreibmaschinenschrift angegebenen Namen bezeichnen die entsprechenden Eingabeparameter im Programm *IBJXodor*.

Bild 6 zeigt den horizontalen Konzentrationsverlauf für $z = 1.5$ m. Die numerischen Lösungen stimmen innerhalb zeichnerischer Genauigkeit mit der analytischen Lösung überein.

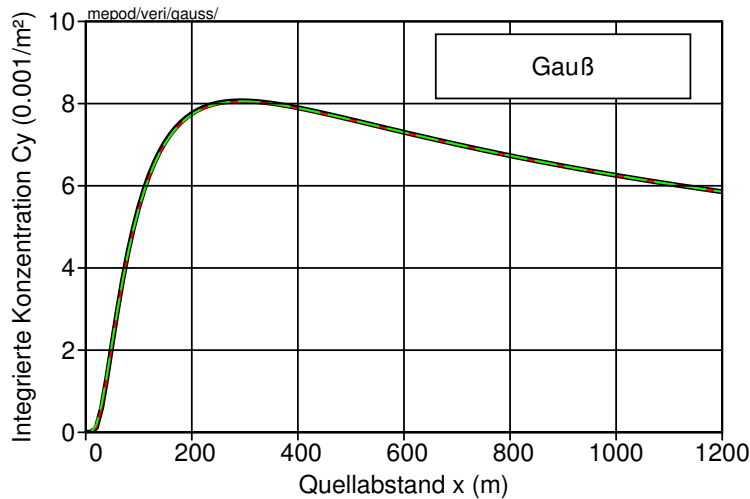


BILD 6: Konzentrationsverlauf $C_y(x, 1.5)$ für die analytische Lösung nach Gleichung (76) und (77) (dicke schwarze Linie), die feine numerische Lösung (rote durchgezogene Linie) und die grobe numerische Lösung (grüne gestrichelte Linie).

In Bild 7 sind Vertikalprofile für 4 verschiedene Quellentfernungen dargestellt, bei denen wieder die numerischen Lösungen mit der analytischen Lösung zusammenfallen.

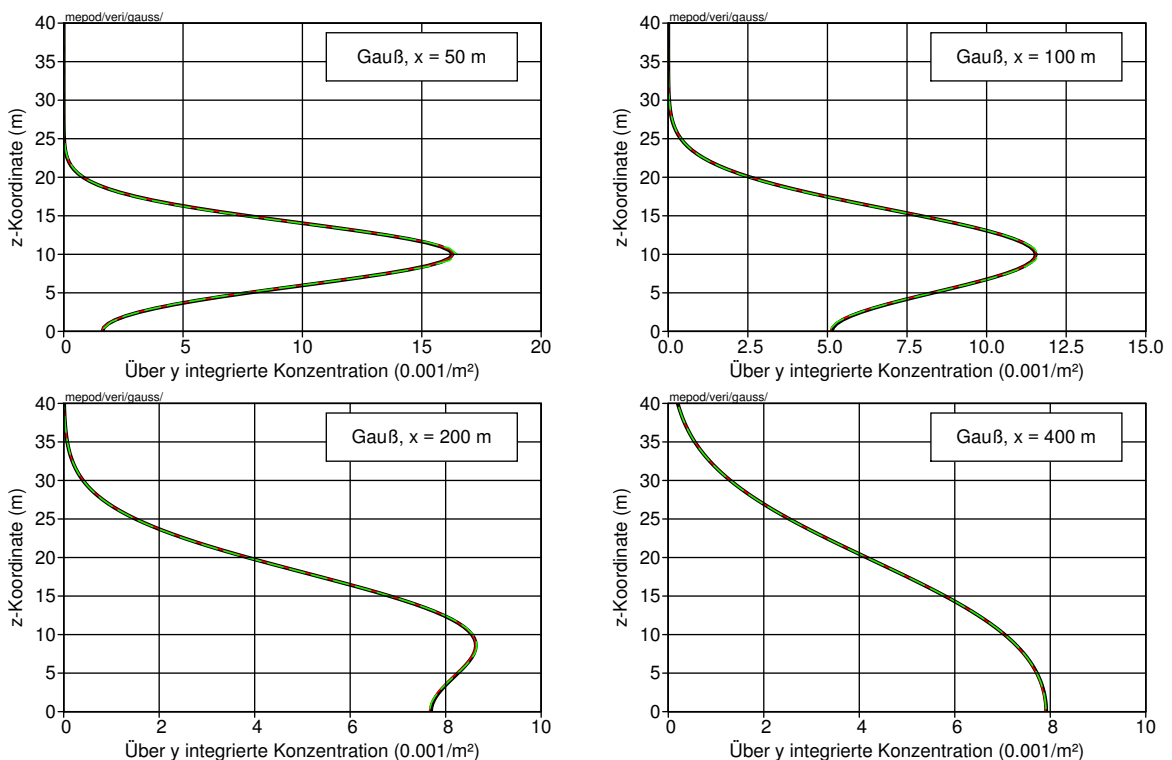


BILD 7: Konzentrationsverlauf $C_y(x, z)$ in 4 verschiedenen Quellentfernungen $x = 50, 100, 200, 400$ m für die analytische Lösung nach Gleichung (76) und (77) (dicke schwarze Linie), die feine numerische Lösung (rote durchgezogene Linie) und die grobe numerische Lösung (grüne gestrichelte Linie).

6.2 Homogene Atmosphäre mit Taylor-Korrektur

Im Modell HEGAU ist es möglich, einen von der Quellentfernung abhängigen Diffusionskoeffizienten zu verwenden, um in Quellnähe eine lineare Fahnenaufweitung entsprechend dem Taylor-Theorem zu erzielen. Dies wird über die vertikale Windfluktuation σ_w gesteuert:

$$K^*(x) = \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{L_x}\right) \right] K_{zz} \quad (78)$$

$$L_x = \frac{u_a K_{zz}}{\sigma_w^2} \quad (79)$$

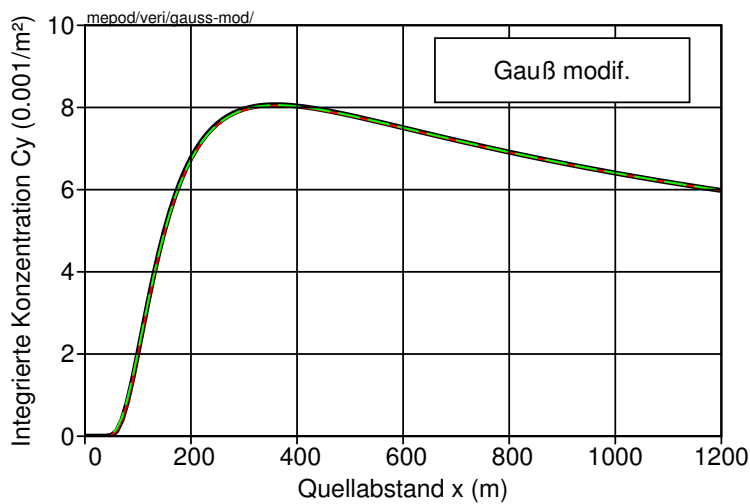


BILD 8: Konzentrationsverlauf $C_y(x, 1.5)$ für die analytische Lösung nach Gleichung (76) und (81) (dicke schwarze Linie), die feine numerische Lösung (rote durchgezogene Linie) und die grobe numerische Lösung (grüne gestrichelte Linie).

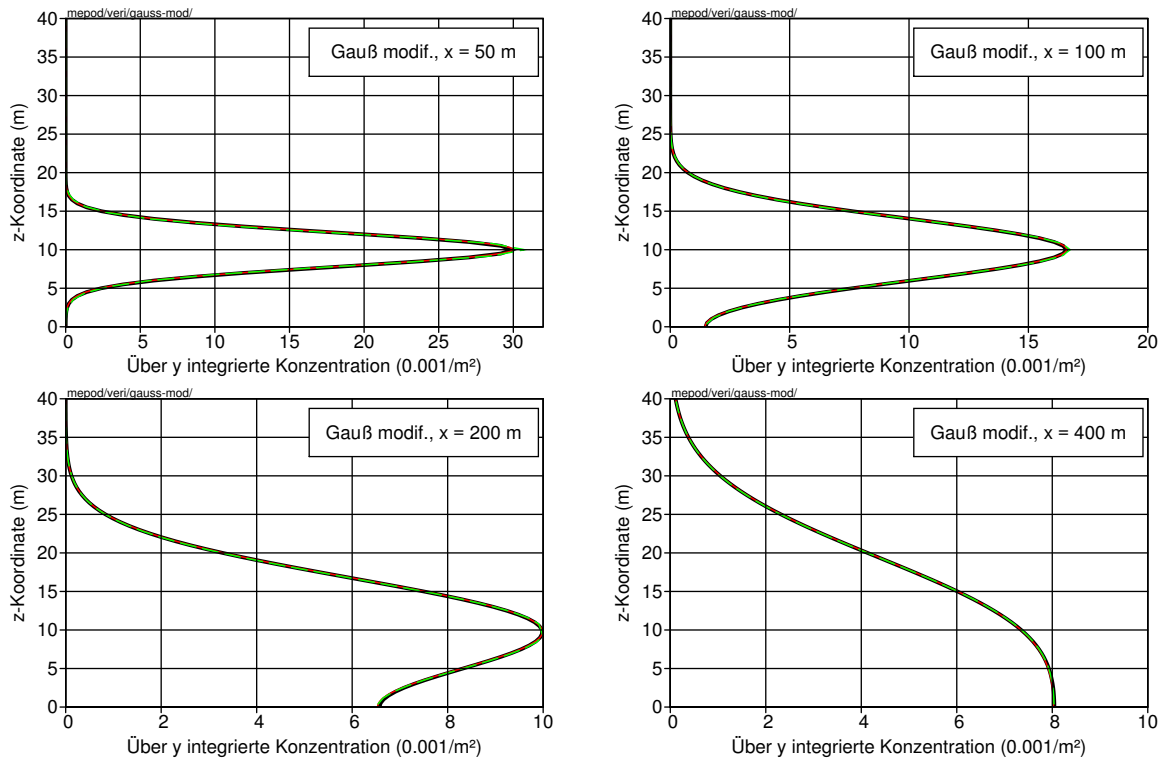


BILD 9: Konzentrationsverlauf $C_y(x, z)$ in 4 verschiedenen Quellentfernungen $x = 50, 100, 200, 400$ m für die analytische Lösung nach Gleichung (76) und (81) (dicke schwarze Linie), die feine numerische Lösung (rote durchgezogene Linie) und die grobe numerische Lösung (grüne gestrichelte Linie).

Der theoretische Konzentrationsverlauf ist wieder durch Gleichung (76) gegeben, jedoch wird σ_z jetzt folgendermaßen berechnet:

$$\sigma_z(x)^2 = \frac{2}{u_a} \int_0^x K^*(x') dx' \quad (80)$$

$$= 2 \frac{K_{zz}^2}{\sigma_w^2} \left[\frac{x}{L_x} - 1 + \exp\left(-\frac{x}{L_x}\right) \right] \quad (81)$$

Die Bilder 8 und 9 zeigen wieder den horizontalen und die 4 vertikalen Konzentrationsprofile, wobei $\sigma_w = 0.3$ m/s verwendet wurde. Die analytische und die numerischen Lösungen stimmen fast überall innerhalb der Zeichengenauigkeit überein.

6.3 Berljand-Profil

Für den Fall, daß Windgeschwindigkeit $u(z)$ und Diffusionskoeffizient $K_{zz}(z)$ einem Potenzgesetz genügen, sind von Berljand analytische Lösungen der Advektions-Diffusions-

gleichung angegeben. Hier wird nur eine lineare Zunahme von K_{zz} betrachtet,

$$K_{zz}(z) = K'z \quad (82)$$

$$u(z) = u_H \left(\frac{z}{H} \right)^n \quad (83)$$

Für eine punktförmige Quelle in der Höhe $z = H$ ist

$$C_y(x, z) = \frac{1+n}{\xi H u_H} \exp\left(-\frac{1+\zeta^{1+n}}{\xi}\right) I_0\left(2\frac{\zeta^{(1+n)/2}}{\xi}\right) \quad (84)$$

$$\text{mit } \xi = x \frac{(1+n)^2 K'}{H u_H}$$

$$\zeta = z/H$$

I_0 ist die modifizierte Bessel-Funktion 0-ter Ordnung.

Das Grenzschichtmodell von HEGAU erzeugt ein Berljand-Profil, wenn für die Rauheitslänge Z_0 ein negativer Wert angegeben wird. Der Betrag dieser Zahl wird als Windprofilexponent n verwendet und es wird $K' = 0.4u_*$ gesetzt. Der in den Bildern 10 und 11 gezeigte Vergleich wurde mit $n = 0.3$ durchgeführt.

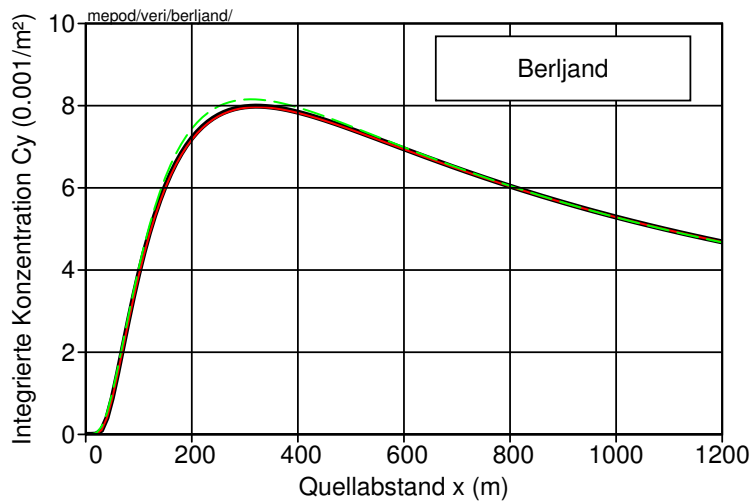


BILD 10: Konzentrationsverlauf $C_y(x, 1.5)$ für die analytische Lösung nach Gleichung (84) (dicke schwarze Linie), die feine numerische Lösung (rote durchgezogene Linie) und die grobe numerische Lösung (grüne gestrichelte Linie).

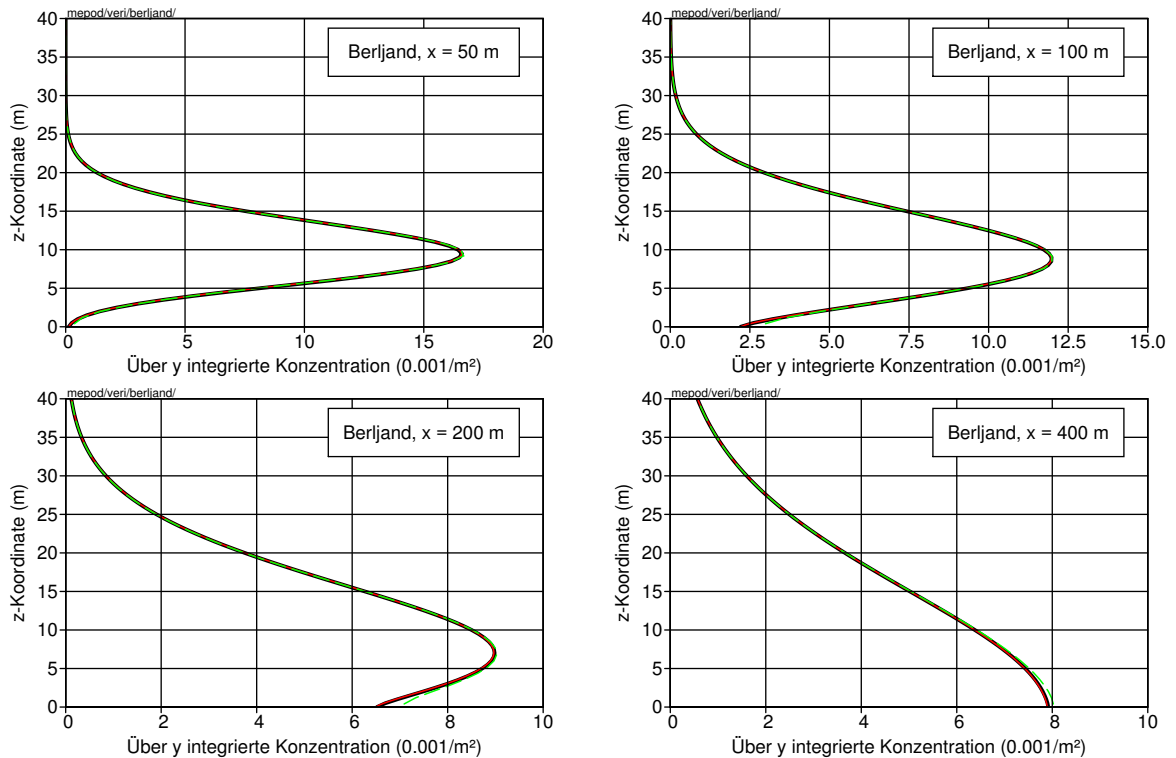


BILD 11: Konzentrationsverlauf $C_y(x, z)$ in 4 verschiedenen Quellentfernungen $x = 50, 100, 200, 400$ m für die analytische Lösung nach Gleichung (84) (dicke schwarze Linie), die feine numerische Lösung (rote durchgezogene Linie) und die grobe numerische Lösung (grüne gestrichelte Linie).

Die feine numerische Lösung stimmt wieder mit der analytischen Lösung innerhalb der Zeichengenauigkeit überein. Die grobe numerische Lösung zeigt geringfügige Abweichungen in Bodennähe. Das liegt vermutlich daran, daß das Windprofil hier sehr stark gekrümmt ist, die numerische Lösung aber zwischen den Gitterpunkten linear interpoliert und dort die Transportgeschwindigkeit systematisch unterschätzt, so daß die Konzentration überschätzt wird. Bei realen Anwendungen mit einem logarithmischen Windprofil in Bodennähe ist dieser Effekt nicht in dem Ausmaß zu erwarten.



7 Validierung

Die Validierung des Mittelwertmodells wurde bereits in Abschnitt 4.4.3 im Zusammenhang mit dem Grenzschnittmodell beschrieben. Zur Überprüfung der Voraussagegüte der Geruchshäufigkeit wurde auf Fahnenbegehungen zurückgegriffen, die vom LUA Essen in der Umgebung eines Schweinestalls im Jahre 1992 durchgeführt worden waren. Der gesamte emittierte Geruchsstoffstrom lag zwischen 300 und 500 MGE/h. Für einige Begehungen wurden die von einzelnen Probanden registrierten Geruchshäufigkeiten nachgerechnet und für alle Begehungen die jeweils im Mittel über das Probandenkollektiv erhaltenen Geruchshäufigkeiten verglichen.³⁰

7.1 Beschreibung der Begehungen

Vom Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen in Essen wurden im August und November 1992 Fahnenbegehungen durchgeführt.³¹ Im Dokument `luanrw-92dat.pdf` sind die Ergebnisse tabellarisch und grafisch dargestellt. Zwischen dem 24. und dem 28. August wurden 50 Fahnenbegehungen (Dauer jeweils 10 Minuten) mit im Schnitt mehr als 12 Probanden durchgeführt, zwischen dem 2. und dem 6. November 29 Fahnenbegehungen mit im Schnitt 9 bis 10 Probanden. 4 Begehungen (04.11.1992 nach 10 Uhr) sind nicht verwertbar, da zu ihnen die meteorologischen Daten fehlen. Damit stehen 75 Fahnenbegehungen mit im Schnitt 11 Meßpunkten pro Begehung für einen Vergleich zur Verfügung.

Darstellung der Quelle

Die Quelle besteht aus zwei baugleichen Ställen von jeweils 58 m Länge und 38 m Breite, die mit einem Abstand von 24 m nebeneinander liegen. Die Richtung der Längsseite ist 15 Grad gegen Nord im Uhrzeigersinn. Der Mittelpunkt der Anlage hat den Rechtswert 47575 und den Hochwert 30075. Er wird bei den Ausbreitungsrechnungen als neuer Nullpunkt des Koordinatensystems verwendet.

Da die Abluft über viele Dachreiter (24 pro Stall, Freisetzungshöhe 7 bis 8 m über Grund) abgeführt wird, die auf dem relativ flachen Satteldach verstreut angebracht sind, kann nicht von einer freien Abströmung der Abluft ausgegangen werden. Um die Vermischung mit dem Nachlauf der Gebäudeumströmung und die Verringerung der effektiven Quellhöhe durch die Abwärtsbewegung der Strömung im Lee (*downwash*) zu modellieren, wird jeder Stall als Volumenquelle angesetzt, die gleichmäßig zwischen 0 und 5 m Höhe emittiert.

³⁰Die Rechnungen wurden mit *IBJXodor* Version 1.6.d durchgeführt.

³¹Dr. Ralf Both, Karl-Heinz Essers, Horst Gliwa und Siegfried Külske: *Untersuchungen zur Geruchsausbreitung und Geruchserhebung an einem großen Schweinemastbetrieb*. Jahresbericht 1995 des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, Seite 77-82.



Meteorologische Daten

Meteorologische Parameter wurden mit einem Ultraschall-Anemometer (USAT3) als 10-Minuten-Mittelwerte gemessen. Aus den Turbulenzdaten wurde mit Hilfe des Grenzschichtmodells in MEPOD auf eine Rauigkeitslänge $z_0 = 0.033$ m geschlossen. Dieser Wert wurde für alle Rechnungen verwendet. Für die Ausbreitungsrechnung wurden folgende Meßgrößen verwendet:

- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit u
- Monin-Obukhov-Länge L_M
- Windfluktuation σ_v
- Windfluktuation σ_w

Falls das Zeitintervall der Begehung Daten aus zwei Mittelungsintervallen des USAT enthält, wurden die Daten aus beiden Intervallen anteilmäßig verwendet.

Die Monin-Obukhov-Länge L_M ist der Reziprokwert des Meßwertes **MOs**. Gelegentlich fehlt dieser Wert jedoch im Meßprotokoll. In diesen Fällen wurde ein per Hand interpolierter Wert eingesetzt und eine entsprechende Anmerkung im Protokoll-File eingefügt. Als Mischungsschichthöhe wurde bei labiler Schichtung der Wert 800 m verwendet, bei stabiler Schichtung wurde sie vom Grenzschichtmodell berechnet.

Festlegung der Feldgeruchsschwelle

Das LUA weist darauf hin, daß für die Emissionsbestimmung ein anderes Probandenkollektiv verwendet wurde als für die Fahnenbegehungen, bei dem man auch von einer anderen mittleren Geruchsempfindlichkeit ausgehen muß. Dies wurde durch eine empirische Anpassung der Feldgeruchsschwelle $c_{F;0}$ (Parameter **Gs**) berücksichtigt. Hierzu wurde durch Testrechnungen für beide Begehungszeiträume separat derjenige Wert von **Gs** bestimmt, der im Mittel bei den Rechnungen zur gleichen mittleren Geruchshäufigkeit führt, wie sie bei den Begehungen beobachtet wurde. Dies nimmt der Validierungsrechnung zwar einen Teil ihrer Aussagekraft, aber es bleiben noch die Korrelationen zwischen beobachteten und berechneten Häufigkeiten als Basis für eine Beurteilung.

7.2 Geruchshäufigkeiten für einzelne Probanden

Für einen Detailvergleich wurden drei Begehungen vom 27. August 1992 ausgewählt mit 11 Probanden in einem Quellabstand zwischen 600 m und 1 500 m. Die Probanden

standen äquidistant in einer Linie annähernd quer zur mittleren Windrichtung und registrierten Geruchswahrnehmungen im Takt von 10 Sekunden über einen Zeitraum von 10 Minuten.

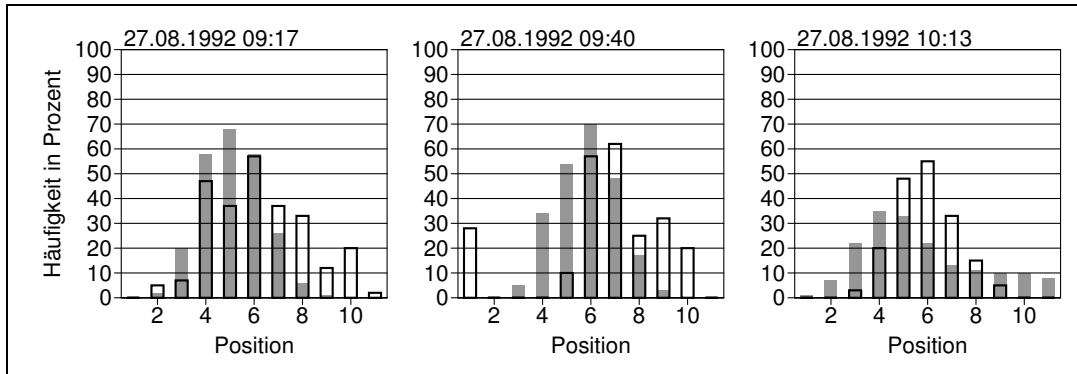


BILD 12: Beobachtete Geruchshäufigkeiten (umrahmte Balken) und mit MEPOD berechnete Geruchshäufigkeiten (graue Balken) für drei verschiedene Fahnenbegehungen, bei denen jeweils 11 Probanden äquidistant auf einer Geraden standen.

Bild 12 zeigt die Ergebnisse von drei Begehungen im Vergleich mit der entsprechenden Modellrechnung mit *IBJmepod*. Im Mittel über alle Probanden einer Begehung unterscheiden sich die prognostizierten und die beobachteten Häufigkeiten relativ jeweils um weniger als 5%, im Detail gibt es jedoch Unterschiede. So sind in der ersten und zweiten Begehung Differenzen in der gemessenen (also bei der Modellrechnung verwendeten) Windrichtung und der effektiven Windrichtung erkennbar. Der räumliche Verlauf der beobachteten Geruchshäufigkeiten zeigt auch nur wenig Ähnlichkeit mit einer Gauß-Glocke.

7.3 Geruchshäufigkeiten für das Probandenkollektiv

Bei den beobachteten Geruchshäufigkeiten fällt auf, daß benachbart stehende Probanden oft sehr unterschiedliche Geruchshäufigkeiten protokollieren. Auch wenn alle Probanden in einer Reihe quer zur Fahne stehen, ist ein glatter Verlauf der Häufigkeit über die einzelnen Positionen hinweg nach Art einer Gaußschen Glockenkurve in der Regel nicht zu erkennen. Das liegt einmal an den Unterschieden zwischen den Probanden. Zum anderen bewirkt die Grobstruktur der Luftturbulenz, daß der Geruchsstoff ungleichmäßig verteilt wird, und bei einer Mittelungszeit von nur 10 Minuten ist mit relativ großen Abweichungen vom Erwartungswert zu rechnen.

Eine bessere Basis für einen Vergleich bietet die quer zur Fahne gemittelte Geruchshäufigkeit. Sie ist näherungsweise durch den Mittelwert über alle Probanden gegeben, aber nur, wenn die Positionen der Probanden die Fahne auch einigermaßen überdecken. Dies wurde bei denjenigen Begehungen als gegeben angenommen, bei denen links und rechts von der gemessenen Windrichtung mindestens drei Probanden standen (Auswahl A). Bei den anderen Begehungen (Auswahl B) wurde die Gruppe der Probanden von



der Fahne nur gestreift, so daß ein Mittelwert nicht zuverlässig bestimmbar ist. Zur Bestimmung der Feldgeruchsschwelle wurde nur die Auswahl A verwendet.

Bei der beschriebenen Mittelung geht auch Information verloren, beispielsweise über die Fahnenbreite. Es kann passieren, daß eine schmale Fahne mit entsprechend höherer Geruchshäufigkeit in der Fahnenmitte zum gleichen Mittelwert führt wie eine breite, flache Fahne. Um die Fahnenbreite zu kontrollieren, wurde untersucht, wieviele Probanden eine Geruchshäufigkeit größer oder gleich 0.1, also Geruchsbelästigung nach der Definition der Geruchsstunde, festgestellt haben, und diese Anzahl mit dem von MEPOD prognostizierten Wert verglichen.

Ergebnisse

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse dargestellt. Es bedeuten:

- Fr Berechnete mittlere Geruchshäufigkeit (%)
- Fb Beobachtete mittlere Geruchshäufigkeit (%)
- Nr Berechnete Anzahl von Positionen mit Geruchsbelästigung
- Nb Beobachtete Anzahl von Positionen mit Geruchsbelästigung



Auswahl A:

Datum	Zeit	Fr	Fb	Nr	Nb
24.08.92	10:00	22	33	7	6
24.08.92	12:27	15	18	8	8
24.08.92	16:00	24	30	7	9
24.08.92	16:20	27	32	7	7
25.08.92	11:20	35	38	8	7
25.08.92	14:15	13	18	6	9
25.08.92	15:53	22	22	6	8
25.08.92	16:10	32	31	7	9
26.08.92	10:30	10	14	3	6
26.08.92	10:47	10	8	3	5
26.08.92	11:16	6	8	5	7
26.08.92	13:53	5	8	3	4
26.08.92	14:24	6	10	3	6
26.08.92	14:47	9	12	5	4
26.08.92	15:28	24	29	8	9
27.08.92	09:17	22	23	5	7
27.08.92	09:40	21	21	5	7
27.08.92	10:13	16	16	7	5
27.08.92	10:37	19	13	7	6
27.08.92	11:50	7	10	3	4
27.08.92	14:18	33	34	8	10
27.08.92	14:37	31	25	8	8
27.08.92	15:05	15	8	5	6
27.08.92	15:28	29	18	10	7
28.08.92	09:05	26	21	8	5
28.08.92	10:06	18	19	6	6
28.08.92	10:42	15	4	7	2
28.08.92	14:07	36	22	9	8

Auswahl B:

Datum	Zeit	Fr	Fb	Nr	Nb
24.08.92	10:40	2	9	1	3
24.08.92	11:10	1	6	0	4
24.08.92	11:45	8	15	5	7
24.08.92	14:36	10	10	6	3
24.08.92	14:57	11	9	6	6
24.08.92	15:28	14	18	6	9
25.08.92	09:10	0	1	0	1
25.08.92	09:38	23	25	7	7
25.08.92	10:10	1	12	0	5
25.08.92	11:00	21	28	5	9
25.08.92	11:47	0	1	0	0
25.08.92	13:50	5	4	3	2
25.08.92	14:45	5	4	2	1
25.08.92	15:15	10	9	4	3
26.08.92	09:30	11	13	3	7
26.08.92	09:55	2	10	1	4
26.08.92	11:40	4	10	2	7
27.08.92	11:26	7	9	3	4
28.08.92	09:32	11	15	3	5
28.08.92	11:34	20	5	7	3
28.08.92	14:28	29	9	7	4
28.08.92	14:52	21	15	5	5



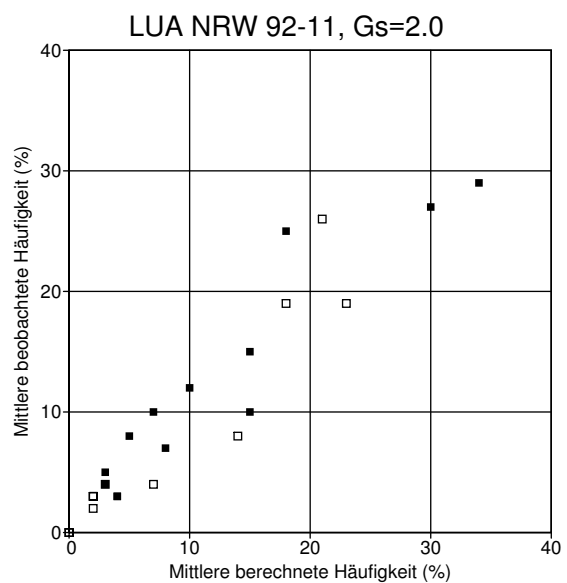
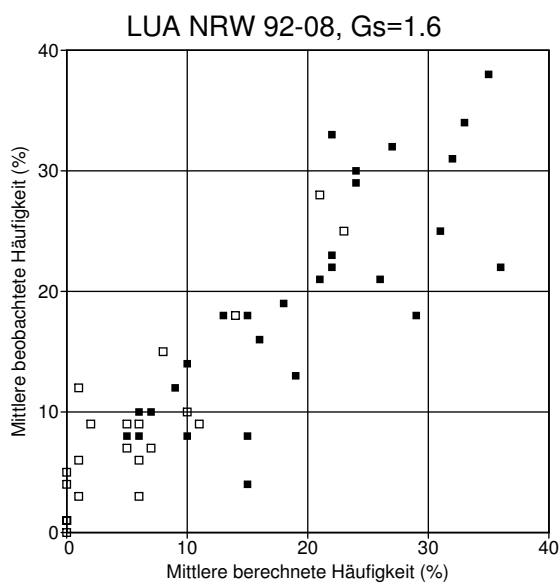
Auswahl A:

Datum	Zeit	Fr	Fb	Nr	Nb
02.11.92	08:18	34	29	5	8
02.11.92	08:38	30	27	7	10
02.11.92	09:45	15	15	4	3
03.11.92	08:46	18	25	3	5
03.11.92	09:46	15	10	4	3
03.11.92	10:47	8	7	3	4
03.11.92	11:15	10	12	4	3
03.11.92	11:42	23	23	6	6
03.11.92	12:05	11	11	4	4
04.11.92	08:16	25	25	5	5
04.11.92	08:43	15	12	3	2
04.11.92	09:03	14	20	3	3
04.11.92	09:37	14	15	4	4

Auswahl B:

Datum	Zeit	Fr	Fb	Nr	Nb
02.11.92	09:08	14	8	2	2
03.11.92	08:24	21	26	2	3
03.11.92	09:15	18	19	3	4
06.11.92	08:00	58	19	7	4
06.11.92	08:14	0	0	0	0
06.11.92	08:42	23	19	2	3
06.11.92	09:10	0	0	0	0
06.11.92	09:27	2	0	1	0
06.11.92	10:30	2	10	1	2
06.11.92	10:50	7	9	2	1
06.11.92	11:10	11	15	2	4
06.11.92	11:30	11	7	3	1

Der Korrelation von berechneten und beobachteten mittleren Geruchshäufigkeiten ist in den folgenden Bildern noch einmal dargestellt:





Die ausgefüllten Quadrate gehören zur Auswahl A, die offenen zur Auswahl B. Die Werte der August-Begehungen (linkes Bild) streuen deutlich stärker als die vom November. Das liegt sicher an den meteorologischen Bedingungen, denn bei labiler Schichtung im Sommer sind die Ausbreitungsbedingungen sehr viel unsicherer als bei neutraler bis stabiler Schichtung im Herbst. Insbesondere ist bei konvektiven Ablösungen zu erwarten, daß in Bodennähe nur noch geringe Geruchsstoffmengen verbleiben. Da das Modell diesen Effekt höchstens im statistischen Mittel wiedergeben kann, kommt es öfter vor, daß Geruchshäufigkeiten deutlich überschätzt werden. Kommt es zu keiner Ablösung, dann ist die modellierte Dispersion zu hoch und die Geruchshäufigkeit wird unterschätzt. Daher sind im linken Bild die Abweichungen von der Diagonalen nach unten zwar weniger zahlreich als nach oben, aber dafür umso stärker.

Validierungsrechnungen dienen nicht dazu, die Korrektheit eines Modells nachzuweisen. Sie sollen vielmehr zeigen, in welchem Maße das Modellierungsziel erreicht wird, also wie groß die Unsicherheit der Aussage ist. Dies ist durch Vergleich mit Begehungen nur bedingt feststellbar, denn Begehungen bringen ihre eigenen Unsicherheiten mit sich und stellen auch nur eine Momentaufnahme, eine von vielen möglichen Realisierungen eines Situationstyps dar.

Es soll hier keine quantitative Ermittlung des Modellierungsfehlers versucht werden. Dazu fehlen auch die Kriterien. Die gute Übereinstimmung mit den Begehungsergebnissen in weiten Bereichen deutet aber darauf hin, daß in dem Modellansatz keine schwerwiegenden systematischen Fehler existieren und die Modellierungsqualität vergleichbar mit der von aufwendigen Fahnenbegehungen ist.

Zugehörige Dateien

Die für die Validierungsrechnungen verwendeten Dateien stehen in den Verzeichnissen

`valid/luanrw-9208` Begehungen August 1992

`valid/luanrw-9211` Begehungen November 1992

Jedes dieser Verzeichnisse enthält die Dateien



begehung.txt	Beobachtete Geruchshäufigkeiten mit Kategorisierung nach Auswahl A oder B
usat.txt	Meteorologische Daten des USAT3
odrcmd.txt	Eingabe-File für <i>IBJmepod</i>
odrlog.txt	Ausgabe-File von <i>IBJmepod</i>
ananoer_a01.txt	Vergleich zwischen beobachteten und berechneten Geruchshäufigkeiten, Auswahl A
ananoer_b01.txt	Vergleich zwischen beobachteten und berechneten Geruchshäufigkeiten, Auswahl B

Zur besseren Handhabung sind alle Dateien auch im Archiv `valid.zip` zusammengefaßt.



8 Literatur

- [1] YEE E., R. CHAN, P.R. KOSTENIUK, G.M. CHANDLER, C.A. BILTOFT, J.F. BOWERS, 1994: Incorporation of internal fluctuations in a meandering plume model of concentration fluctuations. *Boundary-Layer Meteorol.* **67**, 11-39.
- [2] JANICKE L., 1999: Benutzerhandbuch IBJmepod.
- [3] WEBER H., W. AUFM KAMPE, T. MIKKELSEN, 1988: Concentration Fluctuation Measurements in the Atmospheric Surface Layer. In: *Proceedings of the Eight Symposium on Turbulence and Diffusion*, 160-163 (Am.Met.Soc., Boston, Mass.)
- [4] MIKKELSEN T., H.E. JØRGENSEN, W. AUFM KAMPE, H. WEBER, 1990: Lidar Measurements of Plume Statistics. In: *Application of Sodar and Lidar Techniques in Air Pollution Monitoring (EURASAP)*, Karakow, Poland 26-28 Sep. 1990.



A Sensitivitätsanalyse des Fluktuationsmodells

Für eine grundlegende Sensitivitätsanalyse des Fluktuationsmodells von MEPOD wurde das Programm *MeGaWe* entwickelt. Es geht von einer mittleren Gaußfahne vorgegebener Breite σ_y und Konzentration c_{\max} aus, berücksichtigt also nicht den Einfluß beispielsweise meteorologischer Größen auf die mittlere Fahne.

MeGaWe enthält den Algorithmus für die Überlagerung mäandernder Kernfahnen und erlaubt es, die Parameter des Algorithmus und der verwendeten numerischen Verfahren zu variieren, um den Einfluß auf die prognostizierte Geruchshäufigkeit festzustellen.

A.1 Theorie

Die Kernfahne (gekennzeichnet durch das Symbol $\hat{\cdot}$) wird in einer bestimmten Quellentfernung x in Bodennähe ($z = 0$) betrachtet. Sie besitzt quer zur Windrichtung (in y -Richtung) ein Profil für die mittlere Konzentration $\bar{\hat{c}}(y)$, das durch eine Gaußsche Glockenkurve gegeben ist,

$$\bar{\hat{c}}(y) = c_{\max} \frac{\sigma_y}{\hat{\sigma}_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\hat{\sigma}_y^2}\right) \quad (\text{A.1})$$

Die Normierung wurde so gewählt, daß die mittlere Konzentration in der Fahnenmitte gleich c_{\max} wird, wenn kein Mäandern auftritt, also die Breite der Kernfahne $\hat{\sigma}_y$ gleich der Breite der Gesamtfahne σ_y ist. Die statistische Verteilungsdichte der Konzentrationswerte $\hat{f}_c(c, y)$ wird als Weibull-Verteilung mit Intermittenz $\hat{\mu}(y)$ und Formparameter $\hat{\nu}(y)$ angesetzt,

$$\hat{f}_c(c, y) = [1 - \hat{\mu}(y)]\delta(c) + \hat{\mu}(y) \frac{\hat{\nu}(y)}{\hat{c}_s(y)} \hat{\zeta}^{\hat{\nu}(y)-1} \exp(-\hat{\zeta}^{\hat{\nu}(y)}) \quad (\text{A.2})$$

$$\hat{\zeta} = c/\hat{c}_s(y) \quad (\text{A.3})$$

$$\hat{c}_s(y) = \frac{\bar{\hat{c}}(y)}{\hat{\mu}(y)\Gamma(1 + 1/\hat{\nu}(y))} \quad (\text{A.4})$$

$$\hat{F}_c(c, y) = \int_0^c \hat{f}_c(c', y) dc' \quad (\text{A.5})$$

$$= 1 - \hat{\mu}(y) \exp(-\hat{\zeta}^{\hat{\nu}(y)}) \quad (\text{A.6})$$

In früheren Untersuchungen waren Ansätze der Form

$$\hat{\nu}(y) = \hat{\nu}_0 \exp\left(-\hat{\alpha} \frac{y^2}{2\hat{\sigma}_y^2}\right) \quad (\text{A.7})$$



$$\hat{\mu}(y) = \hat{\mu}_0 \exp\left(-\hat{\beta} \frac{y^2}{2\hat{\sigma}_y^2}\right) \quad (\text{A.8})$$

getestet worden, wobei folgende Parameter gute Übereinstimmung mit Lidar-Messungen und Simulationen erbrachten:

Ansatz	$\hat{\alpha}$	$\hat{\mu}_0$	$\hat{\beta}$
A	0.5	1.0	0.00
B	0.0	1.0	0.25

Der Wert von $\hat{\nu}_0$ variierte typischerweise zwischen 1.5 und 3.0.

Die Verteilungsfunktion der Konzentrationswerte in der Gesamtfahne erhält man durch Überlagerung der mäandrierenden Kernfahnen,

$$f_c(c, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-\eta^2/2) \hat{f}_c(c, y - \tilde{\sigma}_y \eta) d\eta \quad (\text{A.9})$$

$$F_c(c, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-\eta^2/2) \hat{F}_c(c, y - \tilde{\sigma}_y \eta) d\eta \quad (\text{A.10})$$

$$\text{mit } \hat{\sigma}_y^2 + \tilde{\sigma}_y^2 = \sigma_y^2 \quad (\text{A.11})$$

Experimentell liegt $\hat{\sigma}_y/\sigma_y$ im Bereich 0.3 bis 0.7. Den Mittelwert der Konzentration erhält man durch Integration,

$$\bar{c}(y) = \int_0^{\infty} c f_c(c, y) dc \quad (\text{A.12})$$

$$= \int_0^{\infty} [1 - F_c(c, y)] dc \quad (\text{A.13})$$

$$= c_{\max} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (\text{A.14})$$

Die Wahrscheinlichkeit, einen Geruch wahrzunehmen, erhält man aus

$$\kappa_0(y) = \int_0^{\infty} P_0(c) f_c(c, y) dc \quad (\text{A.15})$$

Hier wird für die Wahrnehmungsfunktion $P_0(c)$ eine logarithmische Normalverteilung angesetzt:

$$P_0(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda} \int_0^c \exp\left\{-\frac{[\log(c'/c_{\text{GS}})]^2}{2\lambda^2}\right\} \frac{dc'}{c'} \quad (\text{A.16})$$



Durch partielle Integration erhält man

$$\kappa_0(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\lambda^2}\right) [1 - F_c(c, y)] d\gamma \quad (\text{A.17})$$

$$\text{mit } \gamma = \log(c/c_{\text{GS}}) \quad (\text{A.18})$$

Für sehr kleine Werte von λ liefert der Integrand nur einen Beitrag im Bereich $\gamma \approx 0$, man erhält also

$$\kappa_0(y) \approx 1 - F_c(c_{\text{GS}}, y) \quad (\text{A.19})$$

A.2 Numerik

Zur Berechnung von κ_0 sind zwei Integrale numerisch zu berechnen: Das Integral in Gleichung (A.10), welches das Mäandern beschreibt, und die Integration über die Wahrnehmungsfunktion in Gleichung (A.17). Beide Integrationen können mit Standardverfahren der numerischen Mathematik mit beliebiger Genauigkeit durchgeführt werden. Die im folgenden vorgestellten Verfahren legen mehr Wert auf Einfachheit als auf Rechenökonomie und können ohne weiteres durch andere Verfahren ersetzt werden.

Das Mäandern wird durch Überlagerung einer endlichen Anzahl von Kernfahnen berechnet, wobei das Integral in Gleichung (A.10) durch eine Summe ersetzt wird:

$$F_c(c, y) = \sum_{i=-\tilde{N}}^{\tilde{N}} \tilde{w}_i \hat{F}_c(c, y - \tilde{\sigma}_y \eta_i) \quad (\text{A.20})$$

$$\tilde{w}_i = \frac{\exp(-\eta_i^2/2)}{\sum_{i=-\tilde{N}}^{\tilde{N}} \exp(-\eta_i^2/2)} \quad (\text{A.21})$$

$$\eta_i = i\eta_{\text{max}}/\tilde{N} \quad (\text{A.22})$$

Entsprechend erhält man für die mittlere Konzentration

$$\bar{c}(y) = \sum_{i=-\tilde{N}}^{\tilde{N}} \tilde{w}_i \bar{c}(y - \tilde{\sigma}_y \eta_i) \quad (\text{A.23})$$

Zur Durchführung der Überlagerung wird eine numerische Darstellung der Verteilungsfunktion benötigt. Gleichung (A.17) legt nahe, hierzu die logarithmische c -Achse



äquidistant zu unterteilen:

$$c_l = c_{\text{GS}} 10^{l/N_c} \quad \text{für } l_{\text{min}} \leq l \leq l_{\text{max}} \quad (\text{A.24})$$

$$\gamma_l = \frac{l}{N_c} \log(10) \quad (\text{A.25})$$

N_c ist die Anzahl der Intervalle pro Dekade. Die Funktion $F_c(c, y)$ wird auf diesen Werten von c tabelliert und bei Bedarf zwischen den Stützpunkten in γ linear interpoliert,

$$F_c(c_l, y) = F_{c;l}(y) \quad (\text{A.26})$$

$$F_c(c, y) = F_{c;l}(y) + \frac{\gamma - \gamma_l}{\gamma_{l+1} - \gamma_l} [F_{c;l+1}(y) - F_{c;l}(y)] \quad \text{für } c_l \leq c \leq c_{l+1} \quad (\text{A.27})$$

Das Integral in Gleichung (A.17) wird nach der Trapezregel berechnet:

$$\kappa_0(y) = \frac{\log(10)}{N_c} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda} \sum_{l=l_{\text{min}}}^{l_{\text{max}}} \exp\left(-\frac{\gamma_l^2}{2\lambda^2}\right) [1 - F_{c;l}(y)] \quad (\text{A.28})$$

A.3 Programm

Das Programm *MeGaWe* läuft in einem DOS-Fenster. Es benutzt keinen Eingabe-File und listet seine Ausgabe als Tabelle auf dem Bildschirm auf. Es wird folgendermaßen aufgerufen:

```
megawe Option1 Option2 ...
```

oder

```
megawe Option1 _Option2 _...
```

Jede Option hat die Form *Name=Wert* oder *Name!Wert*. Die zulässigen Zeichenketten für *Name*, die zugehörige Größe und der Standardwert sind in folgender Tabelle aufgelistet:



Symbol	Name	Wert	Bedeutung
c_{GS}		1	Geruchsschwelle
σ_y		1	Fahnenbreite
l_{\min}, l_{\max}, N_c	ll	-40'40'10	Stützpunkte zur Tabellierung der Verteilungsfunktion F_c
η_{\max}	ex	4	Abschneidegrenze für das Mäandern
\tilde{N}	nm	40	Halbe Anzahl von Kernfahnen
c_{\max}	cx	2	Mittlere Konzentration in der Fahnenmitte
$\hat{\alpha}$	af	0	Variabilität des Formparameters $\hat{\nu}$
$\hat{\beta}$	bt	0	Variabilität des Intermittenz $\hat{\mu}$
λ	ld	0.5	Breite der Geruchsschwelle
$\hat{\mu}_0$	mu	1	Maximale Intermittenz der Kernfahne
$\hat{\nu}_0$	nu	2	Maximaler Wert des Formparameters $\hat{\nu}$
$\hat{\sigma}_y/\sigma_y$	sd	0.5	Relative Breite der Kernfahne
	md	2	Arbeitsmodus des Programms
δ_y	dy	0.1	Schrittweite bei der Tabellenausgabe
y_{\max}/σ_y	yx	3.0	Maximaler y -Wert bei der Tabellenausgabe

Das Programm *MeGaWe* berechnet im Arbeitsmodus 2 für die y -Werte

$$y_k = k\delta_y\sigma_y \text{ für } k \geq 0, y_k \leq y_{\max} \quad (\text{A.29})$$

folgende Größen:

$\bar{c}^{(0)}(y_k)/c_{\max}$: Mittlere Konzentration gemäß Gleichung (A.14) (Spalte **cm0/cx**).

$\bar{c}^{(1)}(y_k)/c_{\max}$: Mittlere Konzentration gemäß Gleichung (A.23). Hier wirken sich Fehler durch zu grobes Diskretisieren beim Mäandern aus (Spalte **cm1/cx**).

$\bar{c}^{(2)}(y_k)/c_{\max}$: Mittlere Konzentration gemäß Gleichung (A.13) und (A.27). Hier wirken sich auch Fehler durch die Diskretisierung der Verteilungsfunktion aus (Spalte **cm2/cx**).

$c_{0.9}(y_k)/\bar{c}^{(1)}(y_k)$: Verhältnis von 90-Perzentil zu Mittelwert (Spalte **c90/cm1**).

$1 - F_c(c_{GS}, y_k)$: Häufigkeit für das Auftreten von Konzentrationswerten oberhalb der Geruchsschwelle (Spalte **p(c>cg)**).



$\kappa_0(y_k)$: Geruchshäufigkeit (Spalte p(odor)).

Ein Aufruf von *MeGaWe* ohne Argumente ist also identisch mit dem Aufruf

```
megawe ll=-40'40'10 ex=4 nm=40 cx=2 af=0 bt=0 ld=0.5 mu=1 nu=2 sd=0.5
```

und führt zu folgender Ausgabe auf dem Bildschirm:

```
megawe: Ueberlagerung von Verteilungsfunktionen
nm=40 ll=-40,40,10 sd=0.5 ex=4.0 cx=2.0 mu=1.0 nu=2.0 af=0.0 bt=0.0 ld=0.5
```

y/sy	cm0/cx	cm1/cx	cm2/cx	cm1	c90/cm1	p(c>cg)	p(odor)
0.00	1.00000	1.00005	1.00005	2.000	2.395	0.59644	0.57923
0.10	0.99501	0.99506	0.99506	1.990	2.402	0.59355	0.57648
0.20	0.98020	0.98024	0.98024	1.960	2.424	0.58494	0.56828
0.30	0.95600	0.95604	0.95604	1.912	2.460	0.57088	0.55488
0.40	0.92312	0.92316	0.92316	1.846	2.510	0.55172	0.53661
0.50	0.88250	0.88254	0.88254	1.765	2.574	0.52801	0.51398
0.60	0.83527	0.83531	0.83531	1.671	2.650	0.50035	0.48757
0.70	0.78270	0.78274	0.78274	1.565	2.737	0.46946	0.45803
0.80	0.72615	0.72617	0.72617	1.452	2.833	0.43610	0.42610
0.90	0.66698	0.66699	0.66700	1.334	2.940	0.40106	0.39250
1.00	0.60653	0.60655	0.60655	1.213	3.068	0.36511	0.35797
1.10	0.54607	0.54609	0.54609	1.092	3.195	0.32901	0.32323
1.20	0.48675	0.48676	0.48676	0.974	3.311	0.29343	0.28893
1.30	0.42956	0.42956	0.42957	0.859	3.422	0.25899	0.25565
1.40	0.37531	0.37529	0.37530	0.751	3.505	0.22621	0.22388
1.50	0.32465	0.32463	0.32464	0.649	3.545	0.19549	0.19404
1.60	0.27804	0.27802	0.27803	0.556	3.522	0.16715	0.16643
1.70	0.23575	0.23573	0.23574	0.471	3.420	0.14139	0.14124
1.80	0.19790	0.19788	0.19789	0.396	3.226	0.11830	0.11859
1.90	0.16447	0.16446	0.16447	0.329	2.944	0.09790	0.09851
2.00	0.13534	0.13529	0.13530	0.271	2.595	0.08012	0.08095
2.10	0.11025	0.11021	0.11022	0.220	2.206	0.06485	0.06579
2.20	0.08892	0.08888	0.08890	0.178	1.814	0.05190	0.05289
2.30	0.07101	0.07097	0.07099	0.142	1.443	0.04107	0.04204
2.40	0.05613	0.05610	0.05612	0.112	1.112	0.03213	0.03305
2.50	0.04394	0.04391	0.04393	0.088	0.832	0.02485	0.02569
2.60	0.03405	0.03402	0.03404	0.068	0.603	0.01899	0.01974
2.70	0.02612	0.02608	0.02610	0.052	0.425	0.01435	0.01500
2.80	0.01984	0.01980	0.01982	0.040	0.290	0.01071	0.01126
2.90	0.01492	0.01488	0.01490	0.030	0.192	0.00790	0.00835
3.00	0.01111	0.01107	0.01109	0.022	0.124	0.00575	0.00613

finished

Diese Tabelle ist im folgenden Bild grafisch dargestellt:

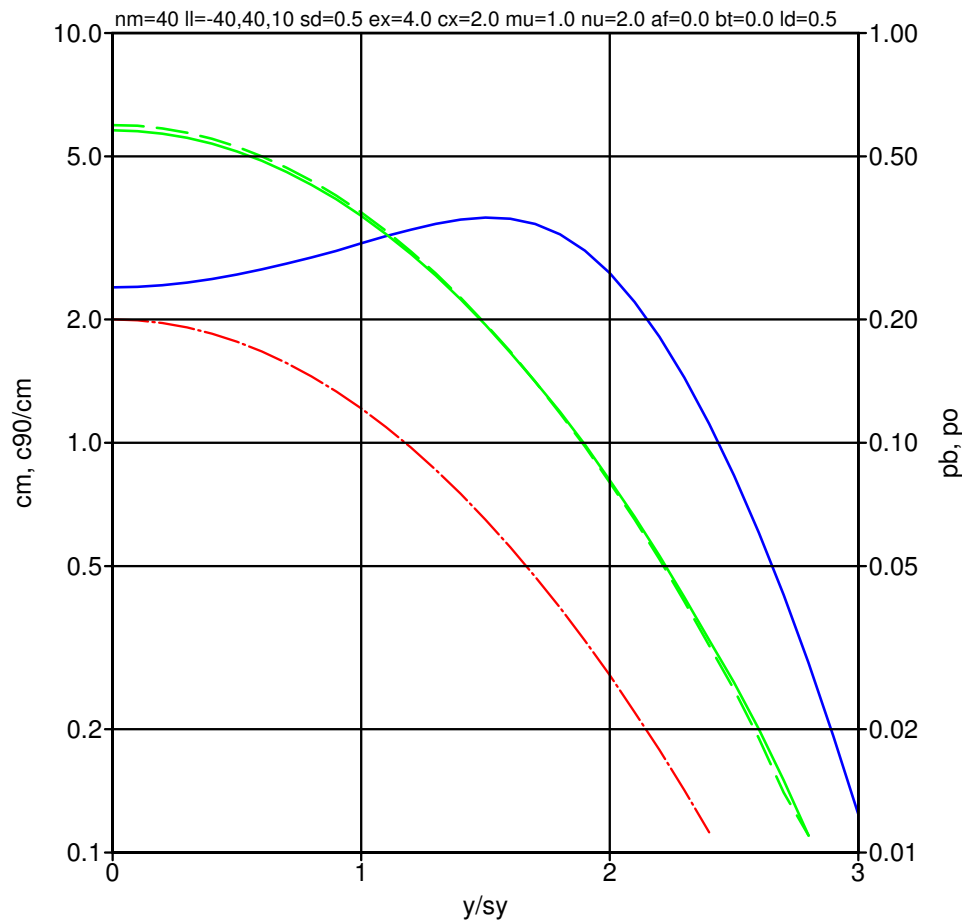


BILD 13: Für die Standardwerte der Parameter sind als Funktion von y/σ_y aufgetragen: $cm1$ = mittlere Konzentration $\bar{c}^{(1)}$ (linke Achse, rot strichpunktiert), $c90/cm1$ = Verhältnis von 90-Perzentil zu Mittelwert (linke Achse, blau durchgezogen), $p(c > cg)$ = Häufigkeit für das Auftreten von Konzentrationswerten oberhalb der Geruchsschwelle (rechte Achse, grün gestrichelt), $p(\text{odor})$ = Geruchshäufigkeit κ_0 (rechte Achse, grün durchgezogen).

Die Variation von \bar{c} , $c_{0,9}/\bar{c}$, $1 - F_c(c_{GS})$ und κ_0 über den Fahnenquerschnitt gibt zwar Einsicht in die Wirkungsweise des Modells, bei Variation aller Modellparameter c_{max}/c_{GS} , $\hat{\sigma}_y/\sigma_y$, λ , $\hat{\mu}_0$, $\hat{\nu}_0$, $\hat{\alpha}$ und $\hat{\beta}$ entsteht aber schnell eine unübersichtliche Fülle von Diagrammen. Die wichtigste Größe für die Anwendung von MEPOD ist in der Regel nur die Breite der Geruchsfahne, also der y -Bereich, in dem eine Bewertung als Geruchsstunde erfolgt,

$$\kappa_0(y) \geq 0.1 \text{ für } 0 \leq y \leq y_b \quad (\text{A.30})$$

Die für die Praxis wichtigsten Informationen erhält man also bereits, wenn man y_b/σ_y als Funktion der Modellparameter darstellt. Hierzu gibt es bei *MeGaWe* den Arbeitsmodus 3. Er wird verwendet, wenn beim Programmaufruf für cx und einen weiteren Parameter ein Wertebereich spezifiziert wird. Hierzu hat *Option* die Form

$$\text{Name! Anfangswert' Endwert' Intervalle}$$



Die Werte von c_x werden dabei so gebildet, daß der Logarithmus äquidistant unterteilt wird, bei den anderen Parametern wird direkt linear unterteilt. Beispielsweise der Aufruf

```
megawe cx!0.5'8'4 sd!0.2'1'8
```

führt zur Ausgabe folgender Tabelle:

```
megawe: Ueberlagerung von Verteilungsfunktionen
nm=40 ll=-40,40,10 ex=4.0 cx=0.5,8.0,4 sd=0.2,1.0,8 mu=1.0 nu=2.0 af=0.0 bt=0.0
ld=0.5
cm\sd 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600 0.700 0.800 0.900 1.000
0.500 1.081 1.140 1.099 1.017 0.899 0.776 0.653 0.542 0.478
1.000 1.380 1.526 1.585 1.597 1.573 1.526 1.462 1.374 1.269
2.000 1.538 1.726 1.831 1.890 1.919 1.925 1.896 1.837 1.731
4.000 1.644 1.854 1.995 2.095 2.165 2.212 2.224 2.194 2.095
8.000 1.726 1.960 2.124 2.259 2.370 2.446 2.493 2.493 2.405
finished
```

Eine grafische Darstellung dieser Tabelle als Höhenlinien zeigt das folgende Bild.

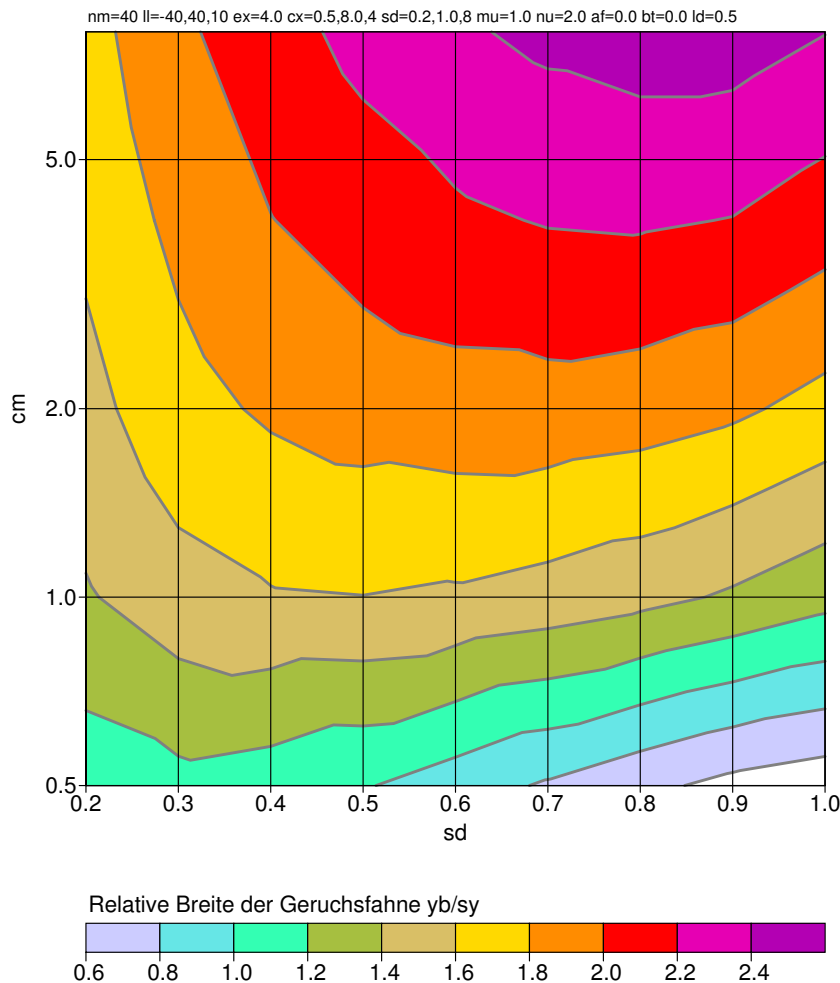


BILD 14: Darstellung der Breite der Geruchsfahne, y_b/σ_y , als Funktion von c_{\max}/c_{GS} und $\hat{\sigma}_y/\sigma_y$.

A.4 Ergebnisse

In den folgenden Diagramm-Zusammenstellungen gemäß Arbeitsmodus 2 ist jeweils einer der Modell-Parameter variiert worden, die anderen haben ihre Standardwerte beibehalten. Die Parameter, welche die numerische Genauigkeit beeinflussen (11, nm, ex) wurden nicht variiert. Bei den verwendeten Werten sollte die Berechnung aller Größen auf mindestens 3 Stellen genau sein.

In Bild 15 ist die Stärke der Gaußfahne variiert worden, also c_{\max}/c_{GS} . Da 90-Perzentil $c_{0.9}$ und Mittelwert \bar{c} dadurch gleichermaßen skaliert werden, bleibt das Verhältnis $c_{0.9}/\bar{c}$ unverändert. Die Breite der Geruchsfahne, also der y -Bereich mit $\kappa_0(y) \geq 0.1$, nimmt von $1 \sigma_y$ bis auf über $2 \sigma_y$ zu.

Als nächstes ist die Stärke des Mäanderns variiert worden (Bild 16). Bei kleinem Wert von $\hat{\sigma}_y/\sigma_y$ (linkes Diagramm) hat man eine Fahne, die durch starkes Mäandern einer schmalen Kernfahne gebildet wird. Hat das Verhältnis den Wert 1, dann findet gar kein Mäandern statt, die Gesamtfahne ist identisch mit der Kernfahne und das Verhältnis $c_{0.9}/\bar{c}$ ist über den gesamten Fahnenquerschnitt konstant.

Die Schärfe der Erkennung der Geruchsschwelle ist in Bild 17 variiert worden. Für H_2S hat man etwa $\lambda = 0.5$ (linkes Diagramm), das rechte Diagramm bezieht sich auf einen Stoff, der innerhalb eines Probandenkollektivs sehr unterschiedliche Geruchsschwellen aufweist. Die gestrichelte grüne Kurve (Häufigkeit von $c \geq c_{GS}$) wird dadurch nicht beeinflusst.

Für den Formparameter $\hat{\nu}$ der Weibull-Verteilung für die Kernfahne werden experimentell sehr unterschiedliche Werte gefunden. In Quellnähe (niedrige Punktquelle) liegt er etwas über 1, so daß man nahezu eine Exponential-Verteilung erhält. In großer Entfernung scheint er auf über 3 anzuwachsen und die Verteilungsdichte nähert sich mehr einer δ -Funktion an. Bild 18 zeigt, daß sein Wert kaum Einfluß auf die Geruchshäufigkeit besitzt, wobei allerdings ein gewisses Maß an Mäandern ($\hat{\sigma}_y/\sigma_y = 0.5$) vorausgesetzt ist.

In den Bildern 19 und 20 sind die Parameter $\hat{\alpha}$ und $\hat{\beta}$ variiert. Sind sie ungleich Null, dann hat die Kernfahne an ihrer Flanke eine andere Form der Verteilungsfunktion als in der Mitte. Dies wird experimentell beobachtet, es hat aber offensichtlich keinen großen Einfluß auf die Geruchshäufigkeit in der Gesamtfahne. Die in MEPOD für die Behandlung von Mehrquellensystemen notwendige Vereinfachung $\hat{\alpha} = 0$ und $\hat{\beta} = 0$ ist also tolerierbar.

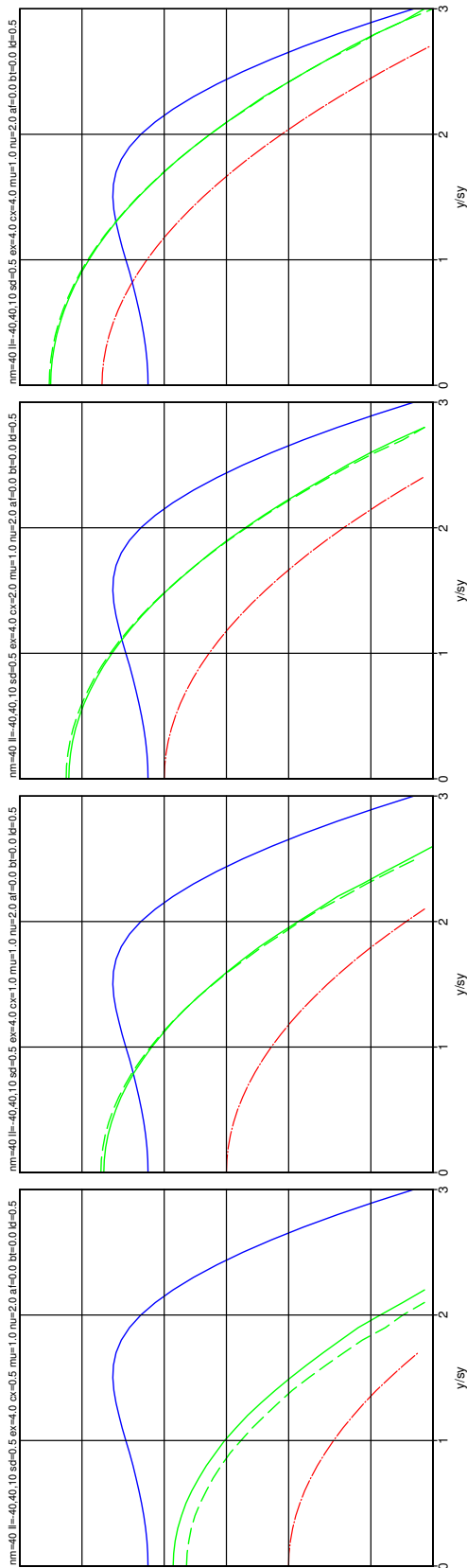


BILD 15: Variation: cx = 0.5, 1, 2, 4

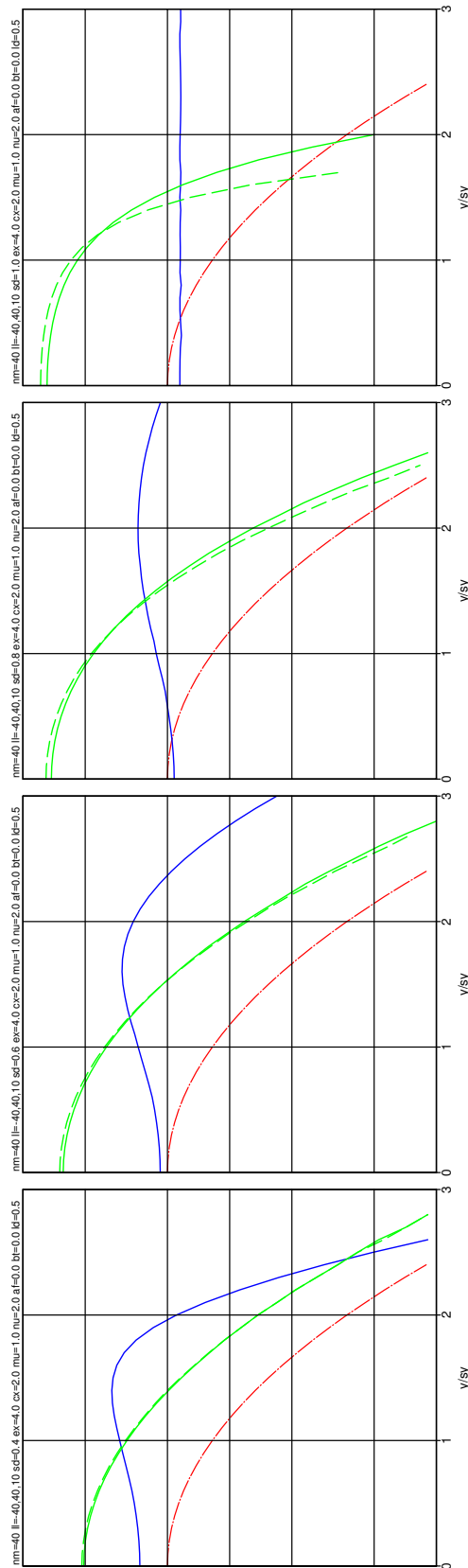


BILD 16: Variation: sd = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0

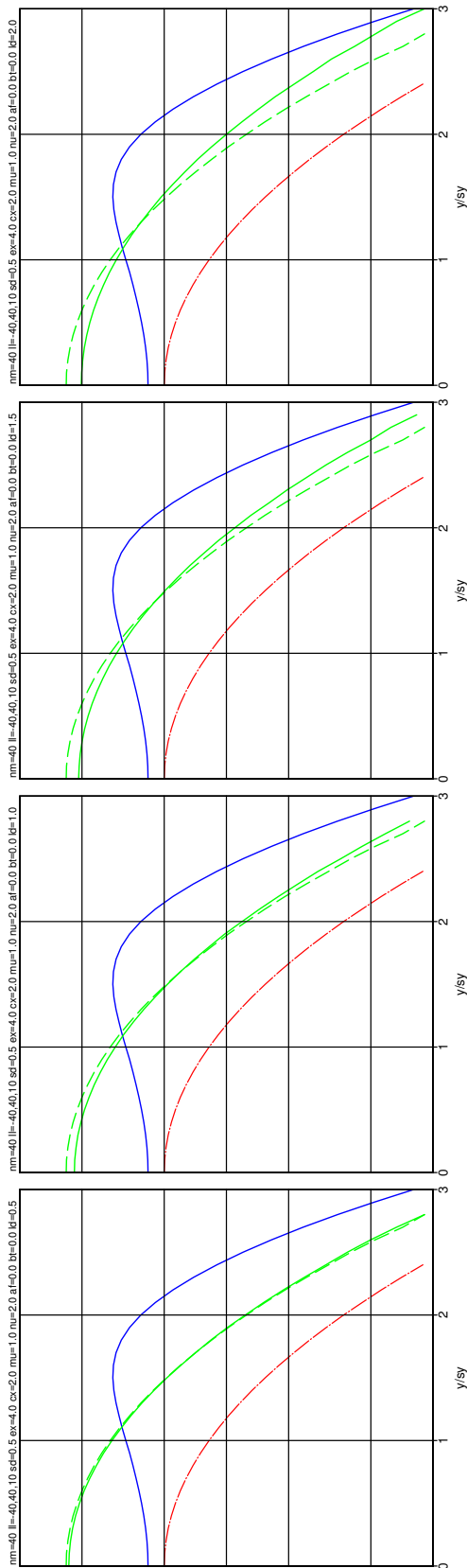


BILD 17: Variation: ld = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0

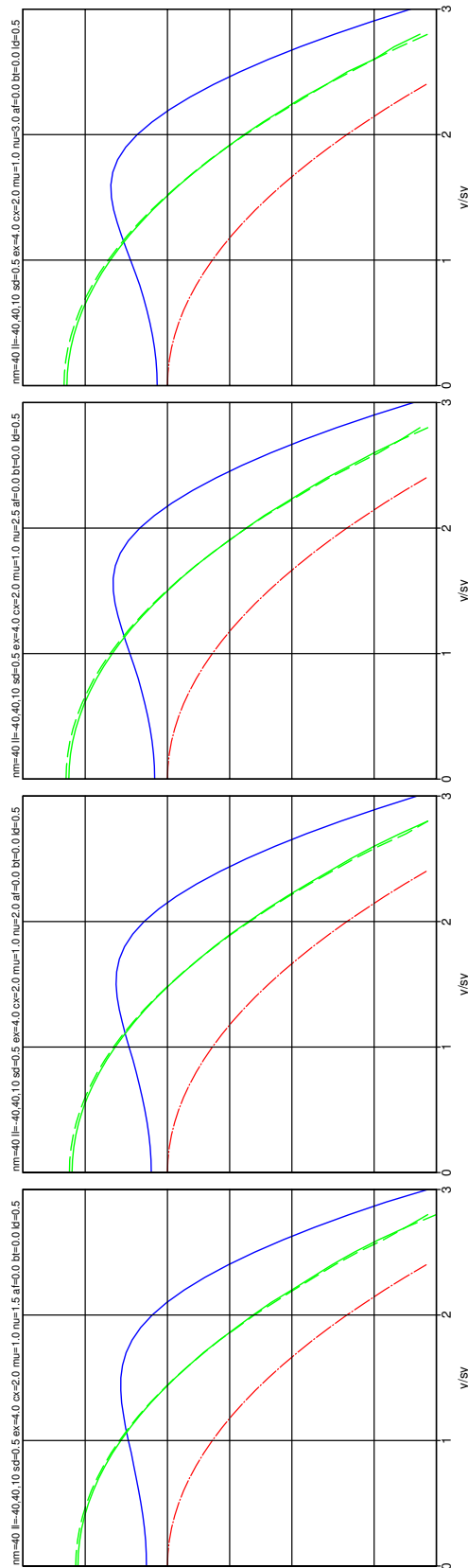


BILD 18: Variation: nu = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0

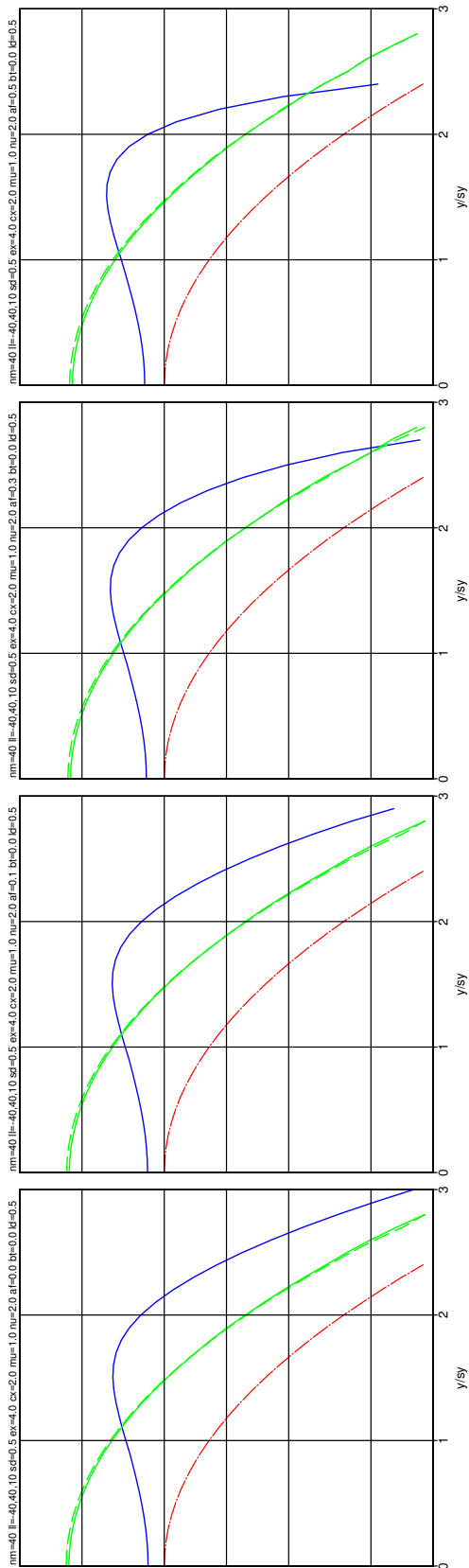


BILD 19: Variation: $af = 0.0, 0.1, 0.3, 0.5$

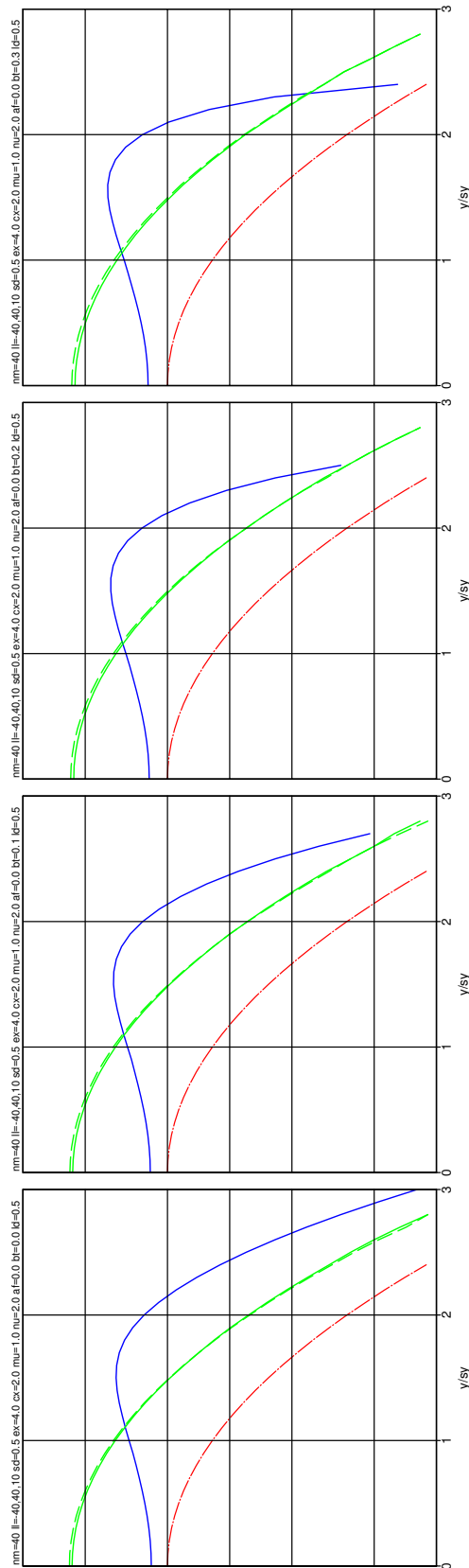
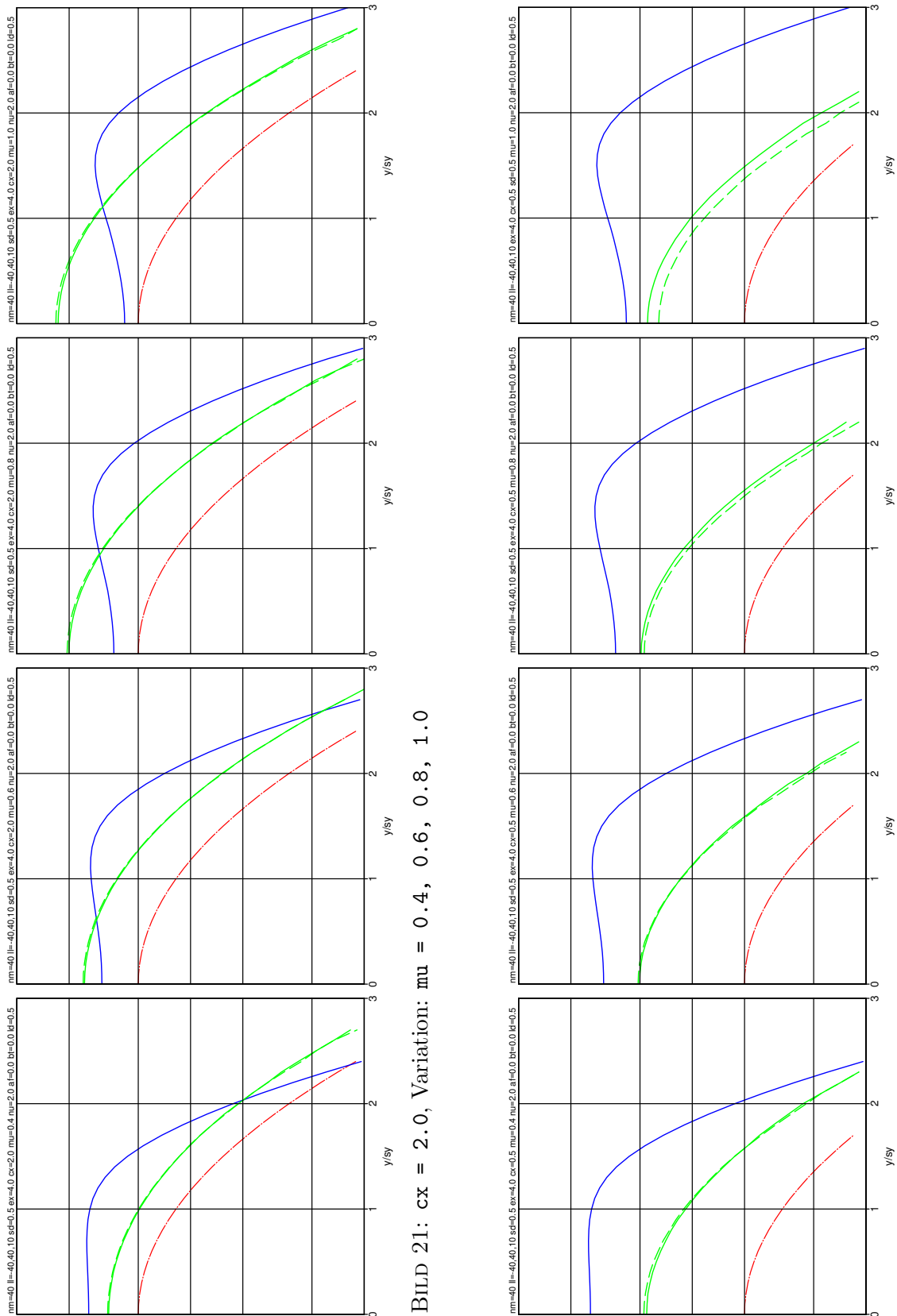


BILD 20: Variation: $bt = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3$



Schließlich wurde noch $\hat{\mu}_0$, die maximale Intermittenz der Kernfahne, variiert, und zwar einmal für eine Fahne mittlerer Stärke ($c_{\max}/c_{GS} = 2$, Bild 21) und für eine



schwache Fahne ($c_{\max}/c_{\text{GS}} = 0.5$, Bild 22). MEPOD modelliert hierüber das vertikale Mäandern einer abgehobenen Quelle im Nahbereich. Während bei der mittelstarken Fahne verringerte Intermittenz (bei gleicher mittlerer Konzentration!) auch Verringerung der Geruchshäufigkeit bedeutet, ist bei der schwachen Fahne kaum eine Änderung festzustellen.

Um eine kompaktere Übersicht über den Einfluß der 7 Modellparameter zu erhalten, sind in Bild 23 die im Arbeitsmodus 3 erhaltenen Tabellen grafisch dargestellt. In jedem Teilbild ist c_{\max}/c_{GS} zwischen 0.2 und 10 und ein weiterer der Modellparameter variiert. Die weißen Bereiche sind praktisch identisch mit denen, in denen keine Geruchsfahne auftritt, also über den gesamten Querschnitt hinweg $\kappa_0 < 0.1$ ist.

Aus den beiden unteren Teilbildern ist wieder zu entnehmen, daß $\hat{\alpha}$ und $\hat{\beta}$ kaum Einfluß besitzen, also die in MEPOD inhärente Setzung $\hat{\alpha} = 0$ und $\hat{\beta} = 0$ ohne merkliche Bedeutung für das Ergebnis ist.

Gering ist auch der Einfluß von $\hat{\nu}_0$, dem Formparameter für die Weibull-Verteilung in der Kernfahne (Teilbild Mitte links). Der Standardwert $\hat{\nu}_0 = 2$ führt zu einer Breite der Geruchsfahne, die für höhere Werte von $\hat{\nu}_0$ nur noch minimal zunimmt.

Bei MEPOD ist $\hat{\mu}_0 = 1$ gesetzt. Dies führt (Teilbild Mitte rechts) fast immer zu einer maximalen Breite der Geruchsfahne.

Stärkeren Einfluß hat das Mäandern der Kernfahne (Teilbild oben links). Der Standardwert $\hat{\sigma}_y/\sigma_y = 0.5$, den man auch als mittleren Wert in Experimenten beobachtet, führt bei einer mittelstarken Fahne zu einer maximalen Breite der Geruchsfahne. Bei einer starken Fahne führt geringeres Mäandern (breitere Kernfahne), bei einer schwachen Fahne stärkeres Mäandern (schmalere Kernfahne) zu einer bis zu 10% größeren Verbreiterung der Geruchsfahne.

Es bleibt noch der Einfluß von λ , der Breite der Geruchsschwelle (Teilbild oben rechts) zu untersuchen. λ wird in der Regel automatisch bei der Quellstärkebestimmung am Olfaktometer ermittelt, und zwar aus den Konzentrationswerten, die bei 16% bzw. bei 84% der Darbietungen zu einer Geruchswahrnehmung führen. Das Bild zeigt, daß eine Berücksichtigung dieser Schwellenbreite immer zu einer Verbreiterung der Geruchsfahne führt. Modelle, welche die Geruchswahrnehmung nicht explizit modellieren sondern das Vorliegen einer Geruchsstunde aus der Bedingung $1 - F_c(c_{\text{GS}}) > 0.1$ prognostizieren, unterschätzen also systematisch die Geruchswahrnehmung. Der Wert $\lambda = 0.5$, der für H_2S ermittelt und in MEPOD als Standardwert verwendet wird, führt noch zu keiner merklichen Verbreiterung der Geruchsfahne.

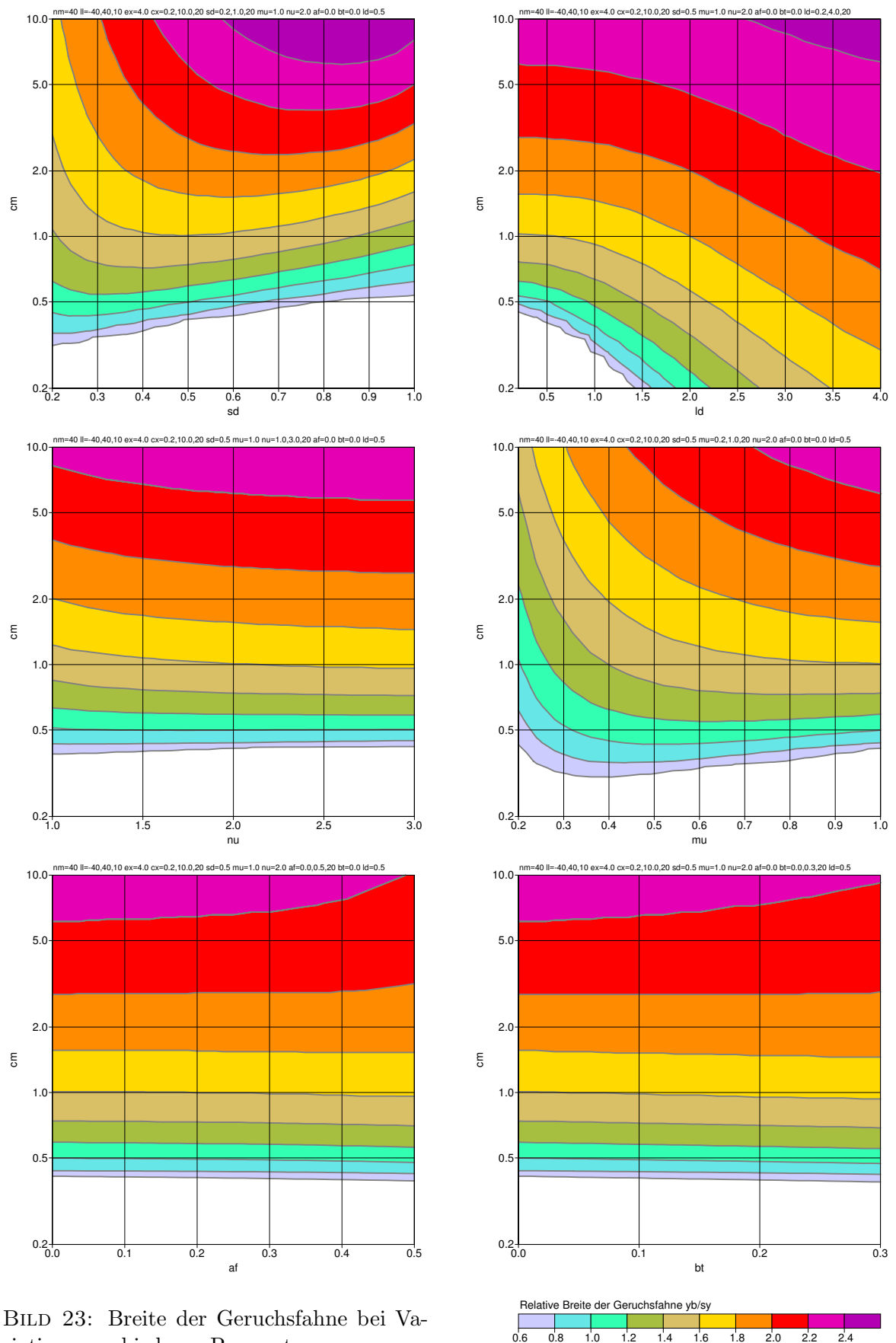


BILD 23: Breite der Geruchsfahne bei Variation verschiedener Parameter



Aus den bisher durchgeführten Analysen kann geschlossen werden, daß die bei der Geruchsmodellierung auftretenden Modellparameter von MEPOD entweder nur geringen Einfluß haben oder standardmäßig so gewählt sind, daß keine deutliche Unterschätzung des Bereiches, in dem eine Geruchsstunde vorliegt, zu befürchten ist.



B Parameterstudien

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Parameterstudien sollen den Einfluß verschiedener externer Parameter demonstrieren. Es werden Jahreswerte betrachtet, die mit der Wetterstatistik von Bocholt berechnet sind. Diese Statistik wurde schon häufig für Vergleichsrechnungen verwendet und steht allgemein zur Verfügung. Weitere Rechenparameter sind:

- Aufpunktraster mit 10 m Maschenweite, 51×51 Punkte, Quelle in der Mitte
- $Mf=1.732$, $Ld=0.5$, $Gs=1$, $Pd=2$, $Tm=3600$
- Exponentielle Rechennetze gemäß der Standardeinstellung (400 Intervalle in x -Richtung, 200 Intervalle in z -Richtung)

Parametersatz sens-z0

Die Quelle ist eine Punktquelle mit Emissionshöhe 10 m und Quellstärke 2778 GE/s (=10 MGE/h). Die Rauigkeitslänge z_0 wird zwischen den Werten 0.04 m und 1.28 m um jeweils einen Faktor 2 variiert. Es wurde die Geruchsstoffkonzentration (Bild 24), die kumulative Geruchshäufigkeit (Bild 25 und 26) und die Häufigkeit von Geruchsstunden (Bild 27) berechnet.

Die Rechnungen wurden einmal mit 1 Fahne pro 10-Grad-Sektor (Nu ist 1) und einmal mit 5 Fahnen pro 10-Grad-Sektor (Nu ist 5) durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß die Geruchsstundenhäufigkeit wegen der größeren Diskretisierung nur mit 5 Untersektoren zuverlässig berechnet werden kann. Die anderen Größen werden auch mit 1 Untersektor hinreichend genau berechnet und zeigen lediglich in großer Quellentfernung eine leichte Sternstruktur. Zusätzlich wurde das Verhältnis von Geruchsstundenhäufigkeit zu Geruchshäufigkeit gebildet, um die unterschiedlichen Bewertungskriterien vergleichen zu können (Bild 28).

Parametersatz sens-hq

Da bei praktischen Anwendungen oft nicht ganz klar ist, welche Höhe als Quellhöhe einzusetzen ist, wurde für eine mittlere Rauigkeit ($z_0 = 0.32$ m) die Quellhöhe zwischen 2 m und 12 m variiert. Da die Rechnungen nur mit einem Untersektor durchgeführt wurden, sind nur Konzentration (Bild 29) und Geruchshäufigkeit (Bild 30) dargestellt.

Parametersatz sens-z1

Es wurde wieder die Rauigkeitslänge z_0 zwischen den Werten 0.04 m und 1.28 m um jeweils einen Faktor 2 variiert, aber diesmal für eine vertikal ausgedehnte Quelle mit $h_q = 0$ m und $c_q = 5$ m. Es wurden mit 5 Untersektoren Konzentration (Bild 31), Geruchshäufigkeit (Bild 32), Geruchsstundenhäufigkeit (Bild 33) und das Verhältnis von Geruchsstundenhäufigkeit zu Geruchshäufigkeit (Bild 34) berechnet.

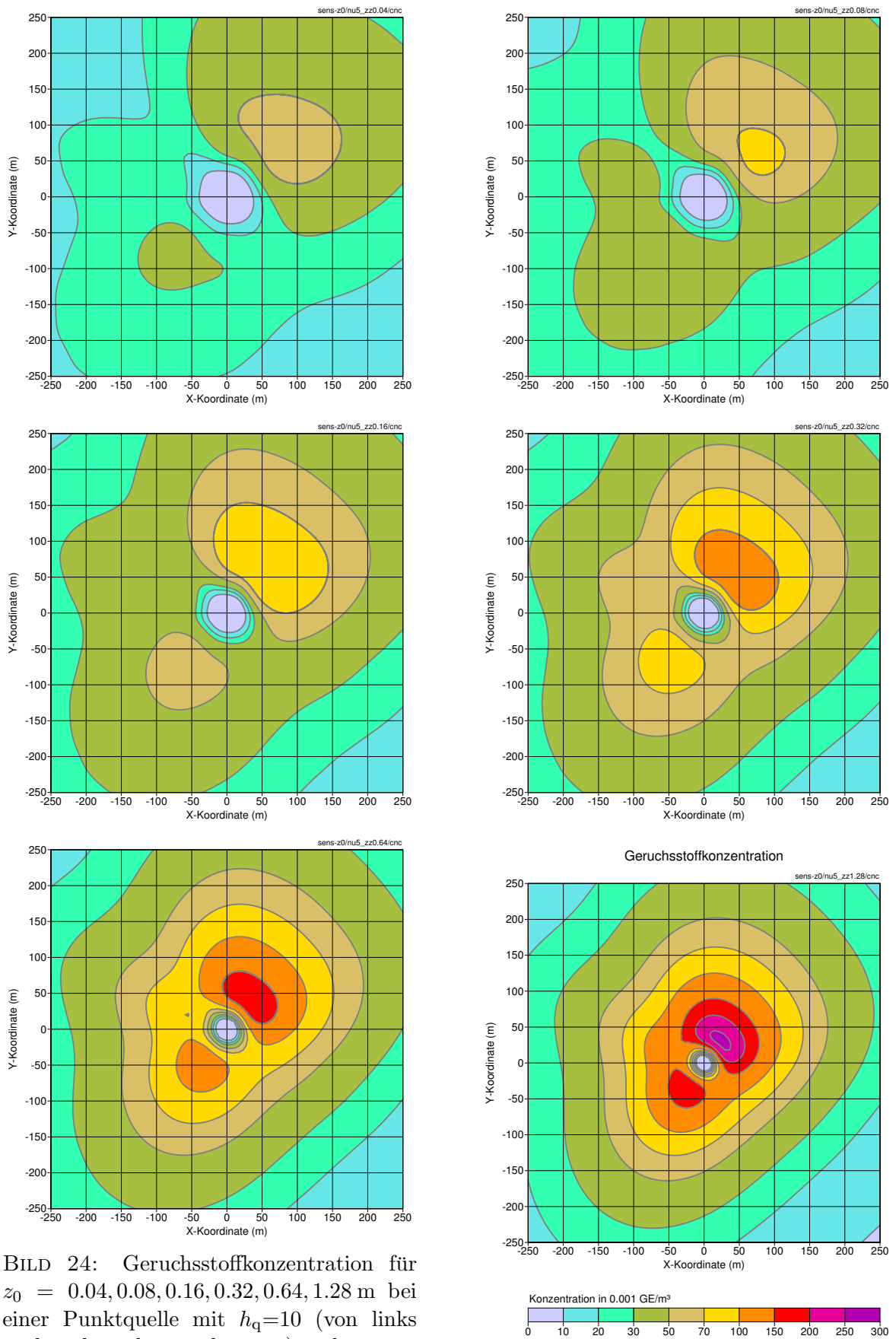


BILD 24: Geruchsstoffkonzentration für $z_0 = 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28 \text{ m}$ bei einer Punktquelle mit $h_q=10$ (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=5$.

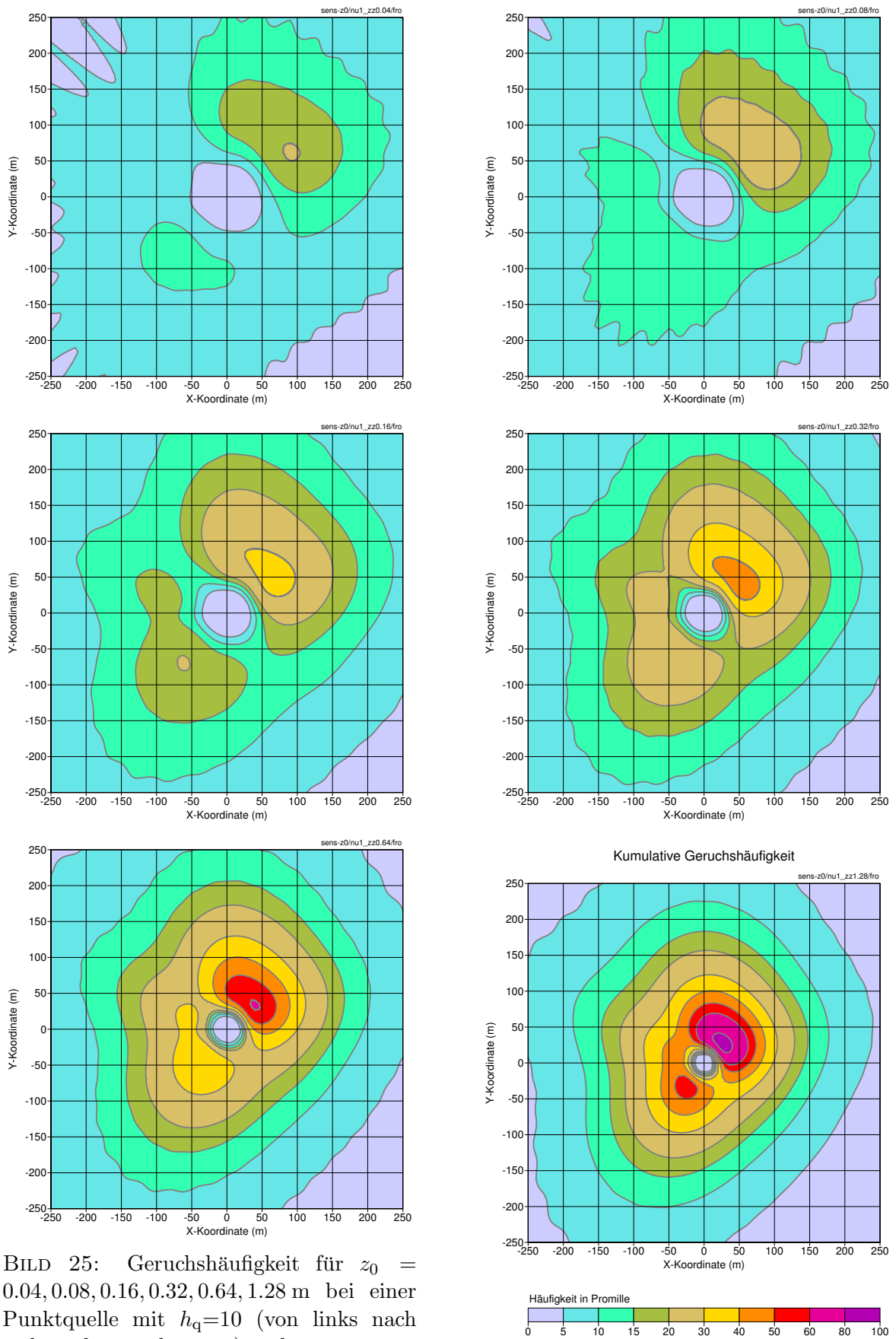


BILD 25: Geruchshäufigkeit für $z_0 = 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28$ m bei einer Punktquelle mit $h_q=10$ (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=1$.

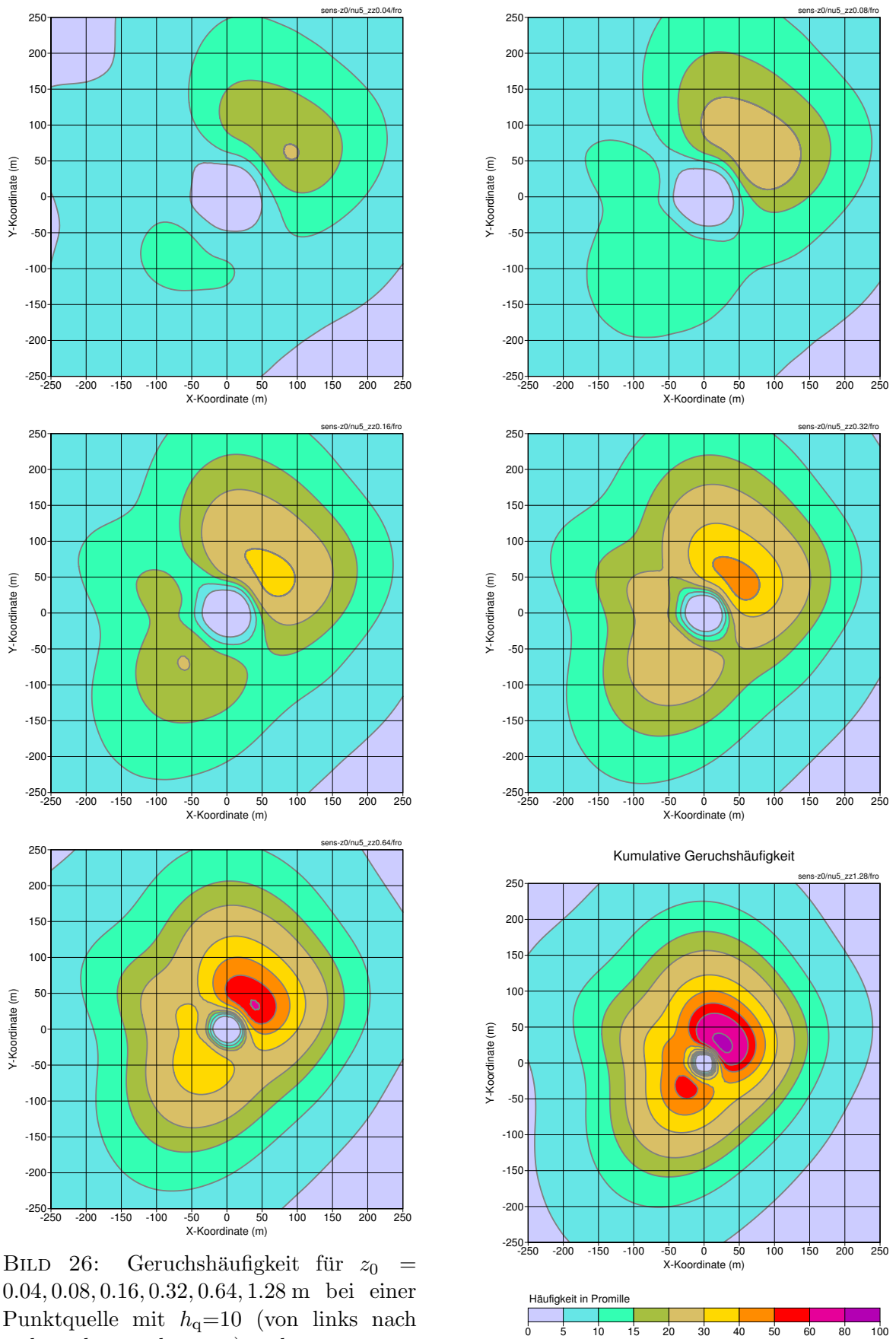


BILD 26: Geruchshäufigkeit für $z_0 = 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28$ m bei einer Punktquelle mit $h_q=10$ (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=5$.

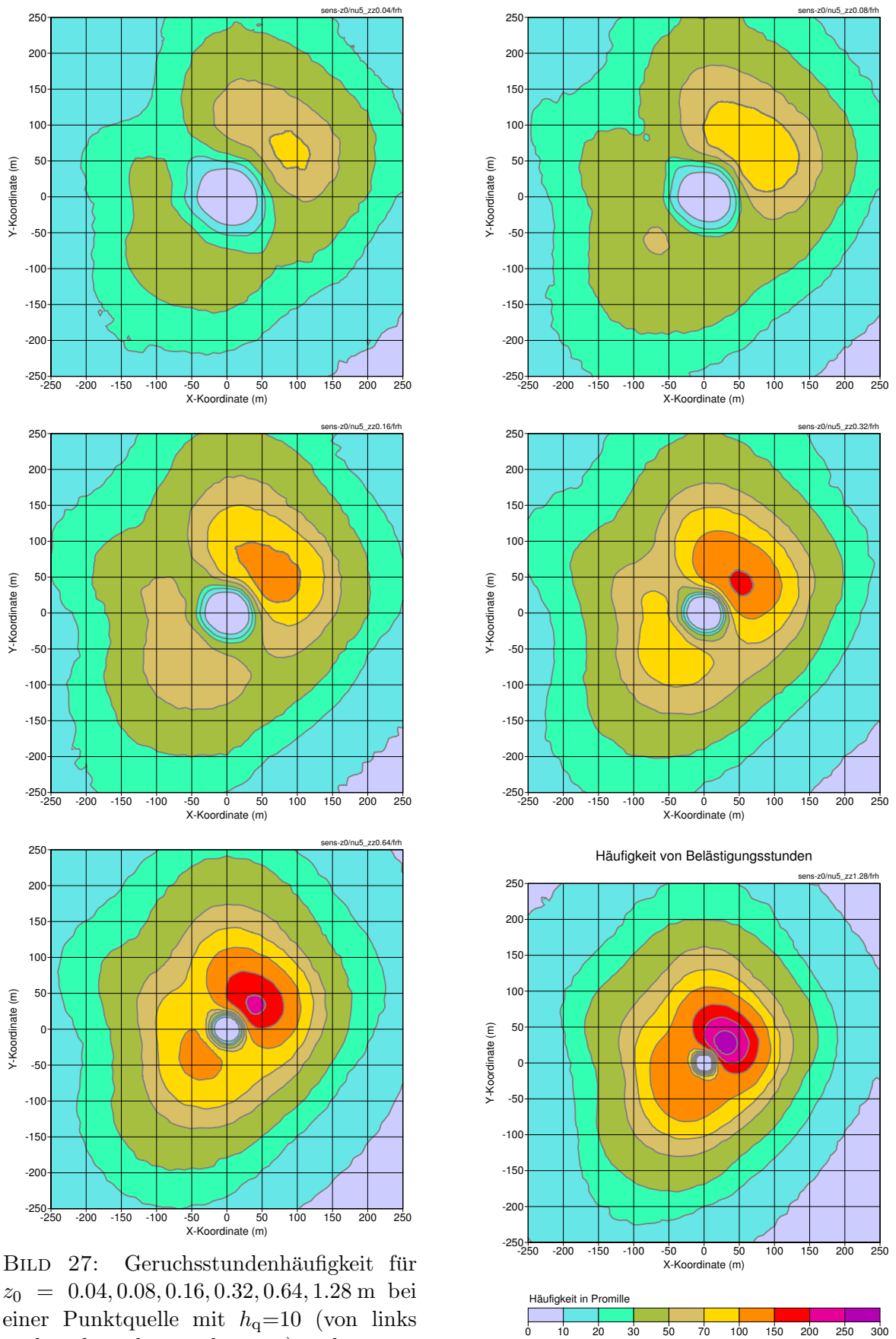


BILD 27: Geruchsstundenhäufigkeit für $z_0 = 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28$ m bei einer Punktquelle mit $h_q=10$ (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=5$.

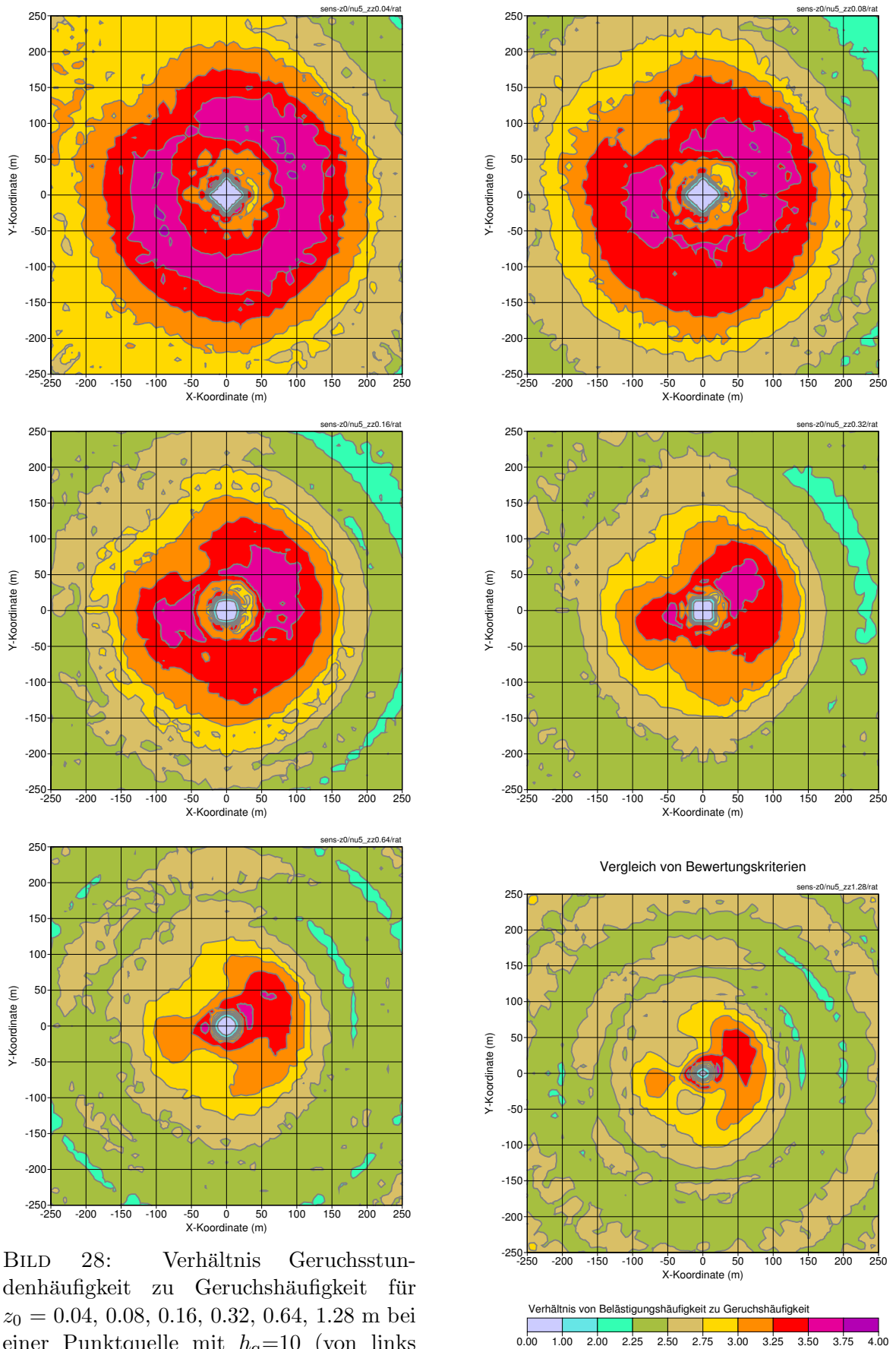


BILD 28: Verhältnis Geruchsstundenhäufigkeit zu Geruchshäufigkeit für $z_0 = 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28$ m bei einer Punktquelle mit $h_q=10$ (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=5$.

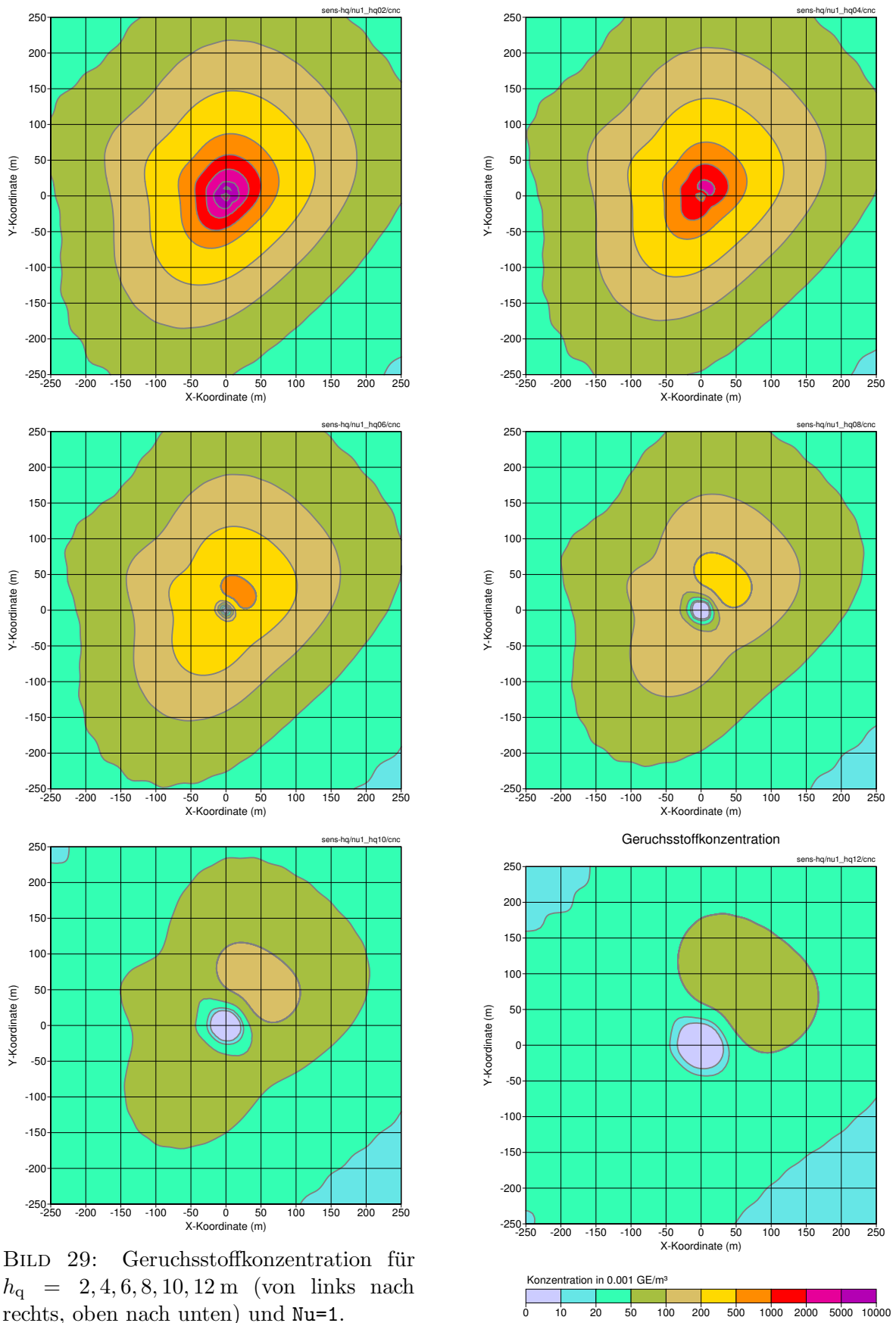


BILD 29: Geruchsstoffkonzentration für $h_q = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ m (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=1$.

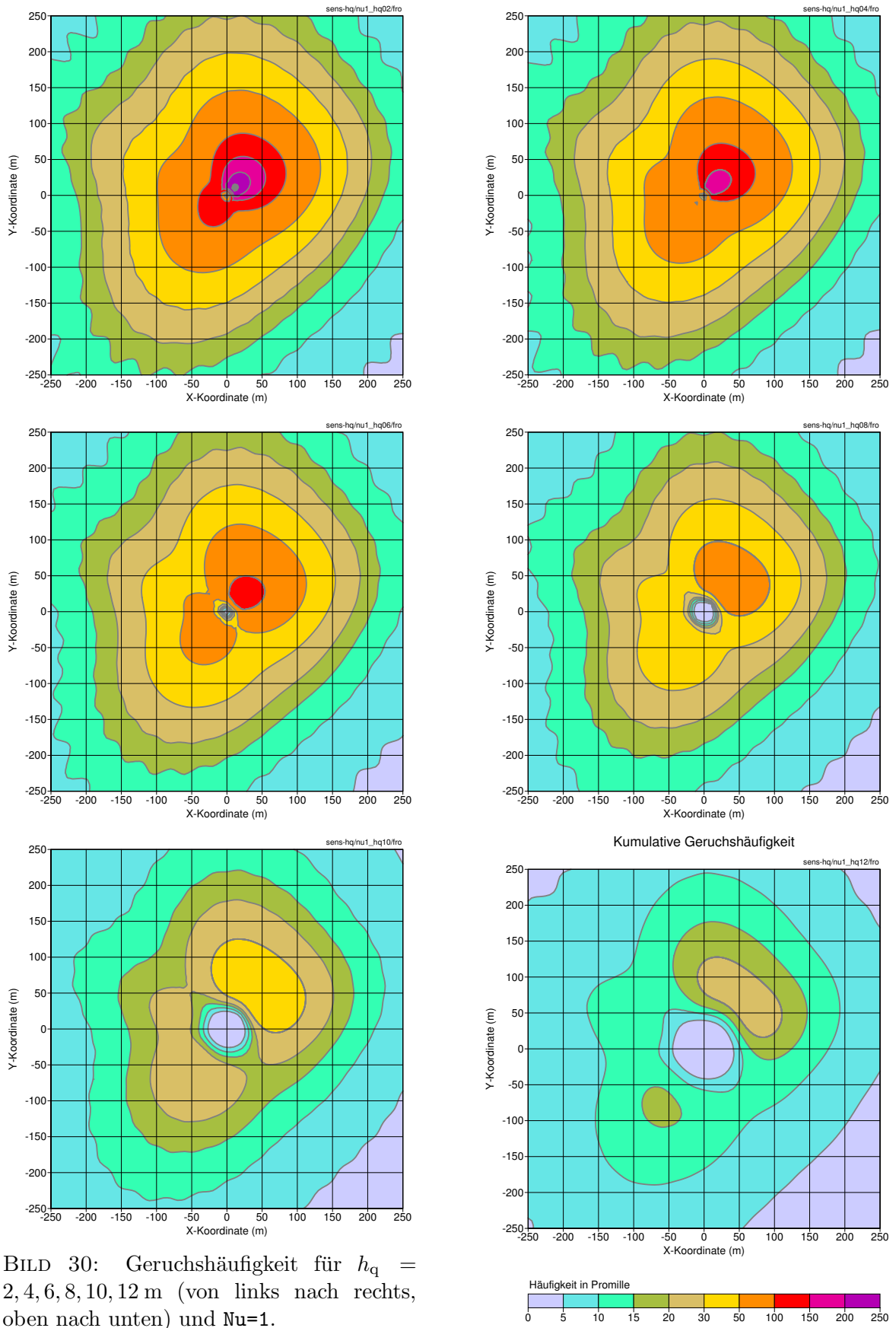


BILD 30: Geruchshäufigkeit für $h_q = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ m (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=1$.

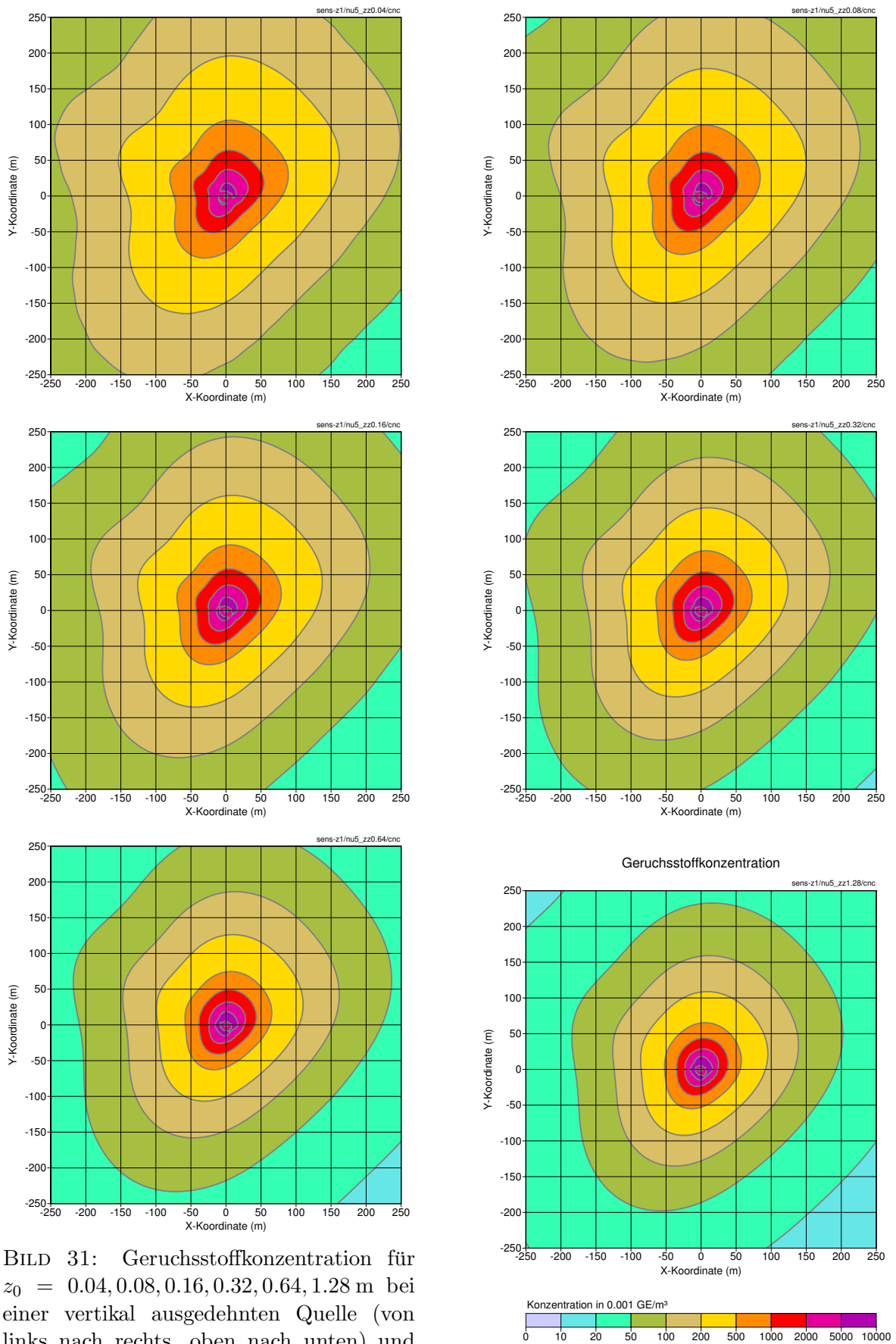


BILD 31: Geruchsstoffkonzentration für $z_0 = 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28$ m bei einer vertikal ausgedehnten Quelle (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=5$.

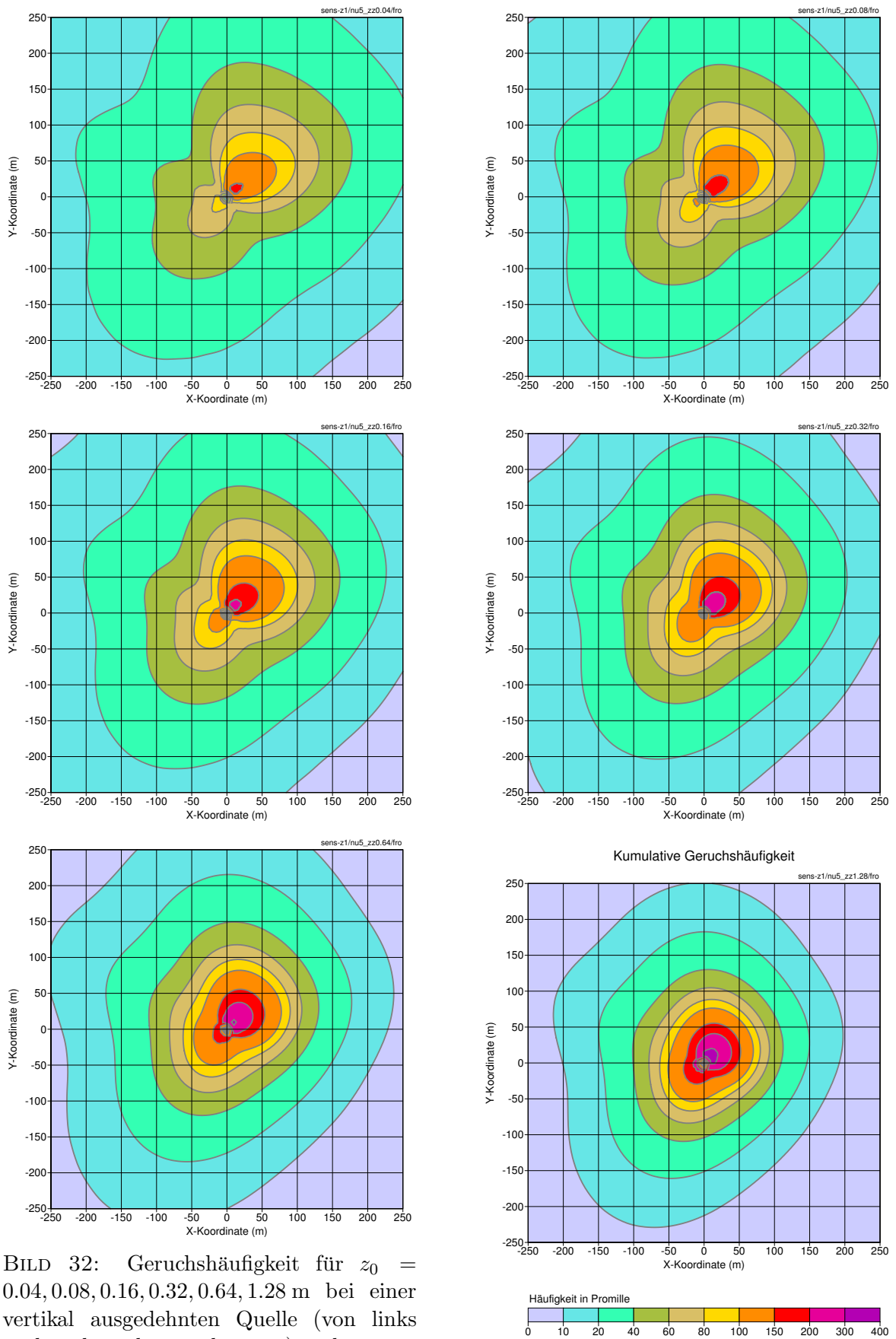


BILD 32: Geruchshäufigkeit für $z_0 = 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28$ m bei einer vertikal ausgedehnten Quelle (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=5$.

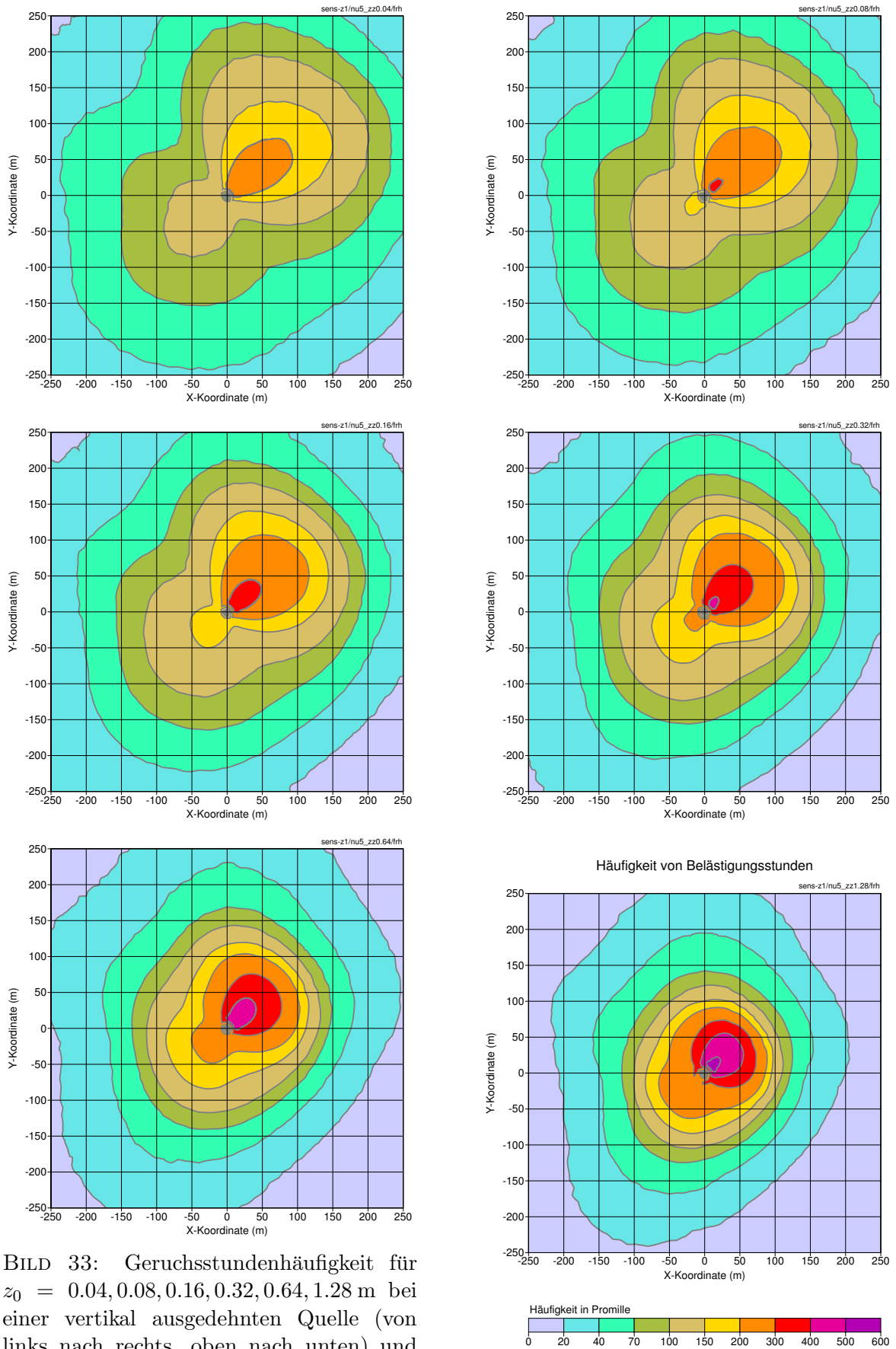


BILD 33: Geruchsstundenhäufigkeit für $z_0 = 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28$ m bei einer vertikal ausgedehnten Quelle (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=5$.

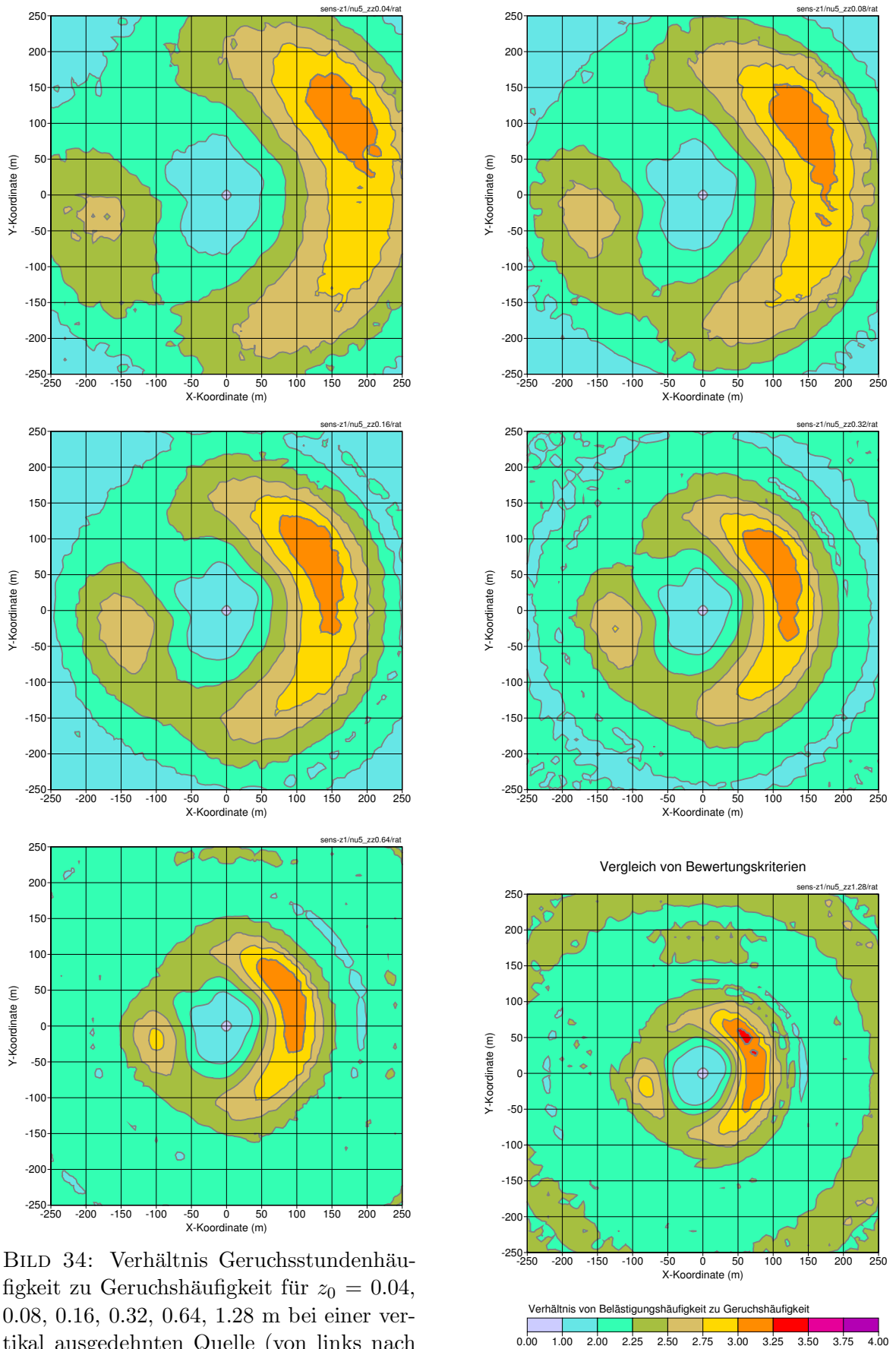


BILD 34: Verhältnis Geruchsstundenhäufigkeit zu Geruchshäufigkeit für $z_0 = 0.04$, 0.08 , 0.16 , 0.32 , 0.64 , 1.28 m bei einer vertikal ausgedehnten Quelle (von links nach rechts, oben nach unten) und $Nu=5$.



C Vergleich mit der Abstandsregelung

In der Richtlinie VDI 3471 ist eine Abstandsregelung aufgestellt, nach der ein Mindestabstand r_{\min} in Abhängigkeit vom Tierbesatz m_T eines Stalles gefordert wird. Für einen 100-Punkte-Schweinestall lautet die Formel³²

$$r_{\min} = 48.7m_T^{0.338} \quad (\text{C.1})$$

Hierbei ist m_T in Großvieheinheiten (GV) anzugeben.

Eine oft diskutierte Frage ist, ob sich aus Ausbreitungsrechnungen mit der Vorgabe einer maximalen Geruchshäufigkeit oder Geruchsstundenhäufigkeit eine ähnliche Beziehung herleiten läßt. Von praktischer Bedeutung ist die Frage, ob aus dem Einhalten des Mindestabstandes bereits mit einiger Sicherheit auf das Unterschreiten einer bestimmten Geruchsstundenhäufigkeit geschlossen werden kann.

Um dies zu untersuchen, wurden Ausbreitungsrechnungen mit einer isotropisierten Wetterstatistik gemacht, da ja eine Abstandregelung auch keine Himmelsrichtung auszeichnet. Es wurde wieder die Bocholter Wetterstatistik verwendet und für jede durch Stabilitätsklasse und Windgeschwindigkeit charakterisierte Wettersituation die Häufigkeit des Auftretens auf alle Windrichtungssektoren gleichmäßig verteilt. Für die beiden Rauhhigkeitslängen $z_0 = 0.04 \text{ m}$ und $z_0 = 0.32 \text{ m}$ wurde die isotropisierte Wetterstatistik in Eingabe-Files für *IBJmepod* umgewandelt (Files `iso_zz0.40.txt` und `iso_zz0.32.txt` im Unterverzeichnis `abstand`). Die Verwendung von unterschiedlichen Eingabe-Files ist notwendig, weil die Umsetzung der Stabilitätsklasse in eine Monin-Obukhov-Länge von der Rauhhigkeitslänge abhängt.

Als Emissionsquelle wurde eine vertikal ausgedehnte Quelle mit $h_q = 0 \text{ m}$ und $c_q = 5 \text{ m}$ verwendet. Die Quellstärke wurde als

$$Q = q_0 m_T \quad (\text{C.2})$$

mit $q_0 = 60 \text{ GE}/(\text{s GV})$

angesetzt und zwischen den Werte 480 GE/s und 30720 GE/s variiert. Aufpunkte wurden im Quellabstand zwischen 8 m und 512 m gewählt. Die Bilder [35](#) und [36](#) zeigen die Abstände, die man bei den beiden Rauhhigkeiten für verschiedene Vorgaben der Geruchsstundenhäufigkeit erhält, die Bilder [37](#) und [38](#) zeigen die Abstände bei Vorgabe von Geruchshäufigkeiten.

³²zitiert nach Krause, KTBL 233

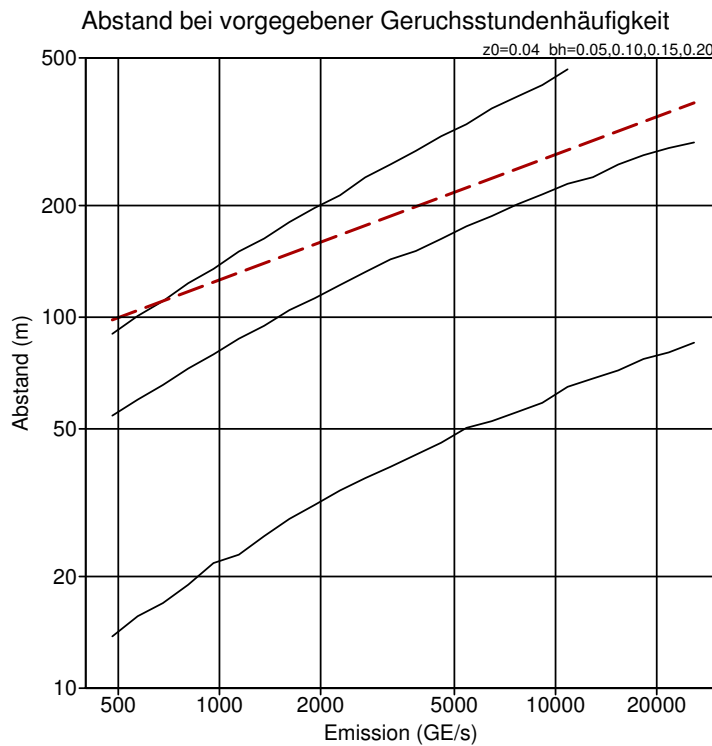


BILD 35: Quellabstand, für den bei $z_0 = 0.04$ m eine Geruchsstundenhäufigkeit von 0.05, 0.10 bzw. 0.15 (von oben nach unten) berechnet wird. Die rote gestrichelte Kurve ist die Abstandskurve nach VDI 3471.

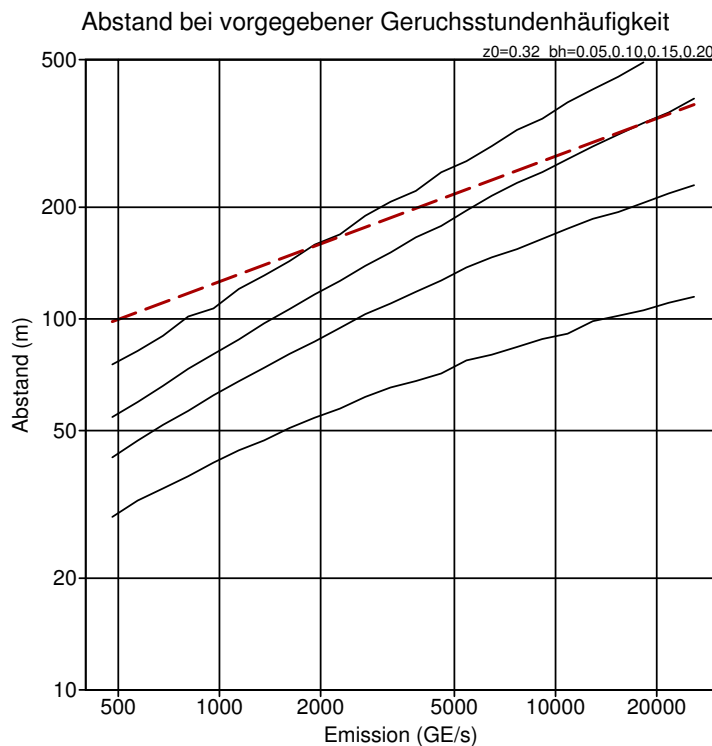


BILD 36: Quellabstand, für den bei $z_0 = 0.32$ m eine Geruchsstundenhäufigkeit von 0.05, 0.10, 0.15 bzw. 0.20 (von oben nach unten) berechnet wird. Die rote gestrichelte Kurve ist die Abstandskurve nach VDI 3471.

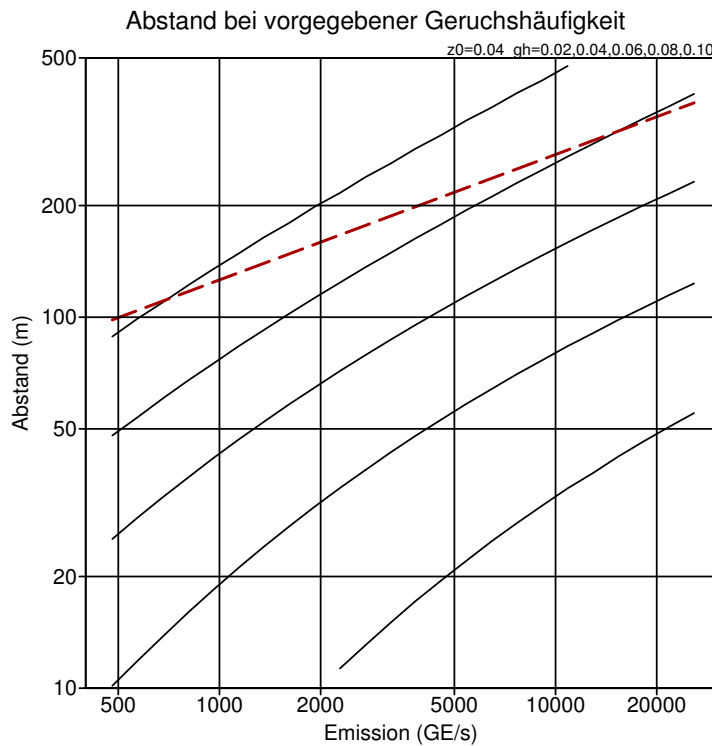


BILD 37: Quellabstand, für den bei $z_0 = 0.04$ m eine Geruchshäufigkeit von 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 bzw. 0.10 (von oben nach unten) berechnet wird. Die rote gestrichelte Kurve ist die Abstandskurve nach VDI 3471.

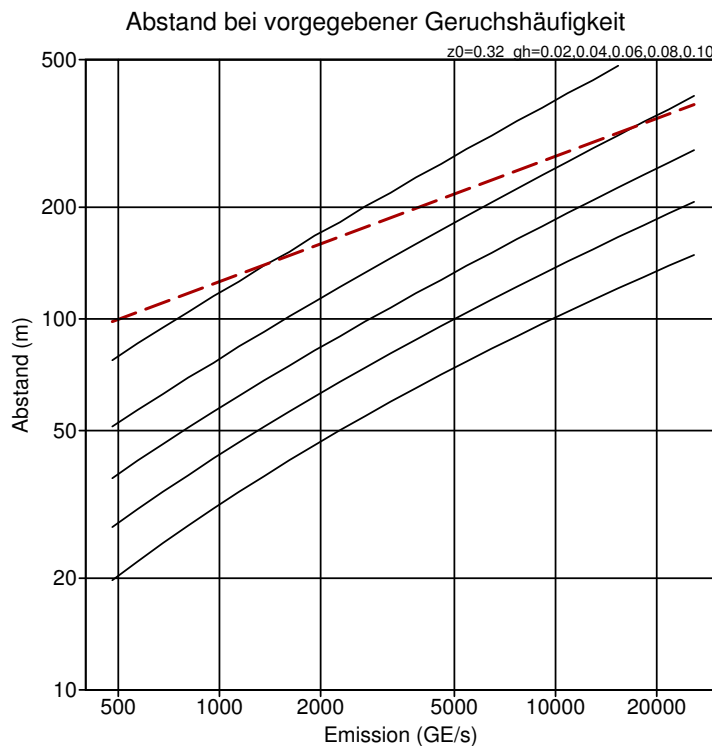


BILD 38: Quellabstand, für den bei $z_0 = 0.32$ m eine Geruchshäufigkeit von 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 bzw. 0.10 (von oben nach unten) berechnet wird. Die rote gestrichelte Kurve ist die Abstandskurve nach VDI 3471.