

(Print) ISSN 1439–8222

(Internet) ISSN 1439–8303

Nummer/Number 5

Auflage/Edition 2

---

# Berichte zur Umweltphysik

## *Reports on Environmental Physics*

---

Die Entwicklung des Ausbreitungsmodells  
AUSTAL2000G

*The development of the dispersion model  
AUSTAL2000G*

Lutz Janicke, Ulf Janicke

März/March 2007



Ingenieurbüro Janicke, Alter Postweg 21, 26427 Dunum, Germany

Autoren/*Authors* :

Dr. Lutz Janicke  
Ing.-Büro Janicke  
Alter Postweg 21  
D - 26427 Dunum  
(email: [lj@janicke.de](mailto:lj@janicke.de))

Dr. Ulf Janicke  
Ing.-Büro Janicke  
Daisendorferstraße 14a  
D - 88709 Meersburg  
(email: [uj@janicke.de](mailto:uj@janicke.de))

Die Arbeiten zu diesem Bericht wurden gefördert mit Mitteln der Bundesländer  
Baden-Württemberg, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen.

1. Auflage: August 2004

2. Auflage: März 2007 (Bilder 3.4, 5.4, 5.5, 5.6 korrigiert)

**Berichte zur Umweltphysik (Print), ISSN 1439–8222**

**Berichte zur Umweltphysik (Internet), ISSN 1439–8303**

Herausgeber:

Ingenieurbüro Janicke  
Alter Postweg 21, 26427 Dunum  
Deutschland  
Internet: [www.janicke.de](http://www.janicke.de)

Publisher:

Janicke Consulting  
Alter Postweg 21, 26427 Dunum  
Germany  
Internet: [www.janicke.de](http://www.janicke.de)

Die Berichte dieser Schriftenreihe erscheinen in unregelmäßigen Zeitabständen. Sie werden im Selbstverlag gedruckt und außerdem auf der Internet-Seite [www.janicke.de](http://www.janicke.de) in Form von Pdf-Dateien kostenlos zur Verfügung gestellt. Alle Rechte sind dem Herausgeber vorbehalten.

The reports of this series are published at irregular time intervals and are printed by the publisher. In addition, the reports are made available free of charge in the Internet on page [www.janicke.de](http://www.janicke.de) in form of pdf files. All rights are reserved to the publisher.



# Die Entwicklung des Ausbreitungsmodells AUSTAL2000G

Lutz Janicke, Ulf Janicke

März 2007

## Zusammenfassung

Die TA Luft regelt, wie die Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre im Rahmen von Genehmigungsverfahren zu berechnen ist. Die Umsetzung dieser Vorschrift ist beispielhaft im Computerprogramm AUSTAL2000 (Version 1.1) erfolgt.

Der Wunsch der Bundesländer, mit einem möglichst ähnlichen Modell auch die Geruchsausbreitung zu berechnen, führte zum Projekt AUSTAL2000G. In einer Reihe von Vorstudien und Teilprojekten wurde die Umsetzung realisiert, die zur Version 2.0 von AUSTAL2000 führte. Sie ist sowohl für TA Luft Anwendungen als auch für Geruchsausbreitungsfragen einsetzbar. Dieser Bericht faßt die im Laufe der Entwicklung erstellten Berichte der Teilvorhaben zusammen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Entwicklung eines Modifizierungskonzeptes</b>	<b>5</b>
1.1	Grundsätzliches Vorgehen . . . . .	5
1.2	Häufigkeitsverteilungen . . . . .	6
1.2.1	Hypothetische Verteilungen . . . . .	7
1.2.2	Realistische Verteilungen . . . . .	7
1.3	Sensitivität bezüglich der Beurteilungsschwelle . . . . .	16
1.3.1	Schweinemastbetrieb . . . . .	16
1.3.2	Flächenquelle . . . . .	21
1.3.3	Erhöhte Quelle . . . . .	25
1.4	Geruchswahrnehmung . . . . .	27
1.5	Mäandern im Partikelmodell . . . . .	29
1.5.1	Zu erwartender Stichprobenfehler . . . . .	29
1.5.2	Detailarbeiten . . . . .	32
1.5.3	Praxisgerechte Lösung . . . . .	32
1.5.4	Besondere Anforderungen . . . . .	35
1.5.5	Praktische Realisierung . . . . .	36
1.6	Alternativer Modellansatz . . . . .	37
<b>2</b>	<b>Entwicklung von Validierungsstrategien</b>	<b>39</b>
2.1	Generelle Überlegungen . . . . .	39
2.2	Verwendbare Ergebnisse und Zwischenergebnisse . . . . .	40
2.3	Experimentelle Daten . . . . .	41
2.4	Durchführung der Validierung . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Erstellung der Prüfmodelle</b>	<b>44</b>
3.1	Einleitung . . . . .	44
3.2	Das Mittelwertmodell . . . . .	45
3.2.1	Konzentrationsverteilung in der $x/z$ -Ebene . . . . .	46
3.2.2	Die 3-dimensionale Fahnenstruktur . . . . .	47
3.2.3	Implementierung des Mittelwertmodells . . . . .	48
3.3	Das Fluktuationsmodell . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung</b>	<b>60</b>
4.1	Die Modelle zur Berechnung der Konzentration . . . . .	60
4.1.1	Das Mittelwertmodell . . . . .	60
4.1.2	Die Fluktuationsmodelle . . . . .	63



4.1.3	Die Geruchswahrnehmung . . . . .	68
4.2	Analyse von Einzelsituationen . . . . .	69
4.3	Analyse von Jahreswerten . . . . .	75
4.4	Analyse von Windkanalmessungen . . . . .	82
4.5	Ergebnis . . . . .	85
<b>5</b>	<b>Validierungs- und Vergleichsrechnungen</b>	<b>86</b>
5.1	Einleitung . . . . .	86
5.2	Geruchsbegehungen in Uttenweiler . . . . .	86
5.2.1	Konzentrationsmessungen und Vergleichsrechnungen . . . . .	87
5.2.2	Geruchsbegehungen und Vergleichsrechnungen . . . . .	92
5.3	Uttenweiler: Konzentrations-Zeitreihen . . . . .	101
5.4	Anmerkung zur Wahrnehmungsfunktion . . . . .	109
<b>6</b>	<b>Implementierung in AUSTAL2000</b>	<b>111</b>
6.1	Berechnung der Geruchsstundenhäufigkeiten . . . . .	111
6.2	Erweiterung von AUSTAL2000 . . . . .	118
6.2.1	Update-Information in AUSTAL2000 2.0 . . . . .	118
6.2.2	Verifikation 01 in AUSTAL2000 2.0 . . . . .	118
6.2.3	Beispielrechnungen . . . . .	121
6.3	Umrechnung auf Beurteilungsflächen . . . . .	121



## Vorbemerkung

Zunächst wurde in zwei Konzeptstudien untersucht, welche Möglichkeiten es gibt, die Modellierung der Geruchsausbreitung und die Verfahren der Geruchsbewertung in das bestehende Modell AUSTAL2000 einzubauen:

1. Lutz Janicke: *Entwicklung eines Modifizierungskonzeptes von AUSTAL2000 zu AUSTAL2000G*. Ing.-Büro Janicke, Dunum, im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe (März 2003).
2. Lutz Janicke: *Entwicklung von immissionsmeteorologischen Validierungsstrategien für die Anwendung auf die Geruchsausbreitung im Rahmen von AUSTAL2000G*. Ing.-Büro Janicke, Dunum, im Auftrag des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie, Hildesheim (November 2003).

Das entwickelte Konzept wurde in vier Teilvorhaben realisiert:

1. L. Janicke: *Sensitivitätsanalyse zu AUSTAL2000G: Erstellung der Prüfmodelle*, Ing.-Büro Janicke, Dunum, im Auftrag des Landesumweltamtes NRW, Essen (Oktober 2003).
2. L. Janicke: *AUSTAL2000G: Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung*, Ing.-Büro Janicke, Dunum, im Auftrag des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie, Hildesheim (Mai 2004).
3. U. Janicke, L. Janicke: *AUSTAL2000G: Validierungs- und Vergleichsrechnungen*, Ing.-Büro Janicke, Dunum, im Auftrag des Landesumweltamtes NRW, Essen (April 2004).
4. L. Janicke, U. Janicke: *AUSTAL2000G: Implementierung in AUSTAL2000*, Ing.-Büro Janicke, Meersburg, im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe (August 2004).

Die sechs Kapitel dieses Berichtes entsprechen den sechs durchgeführten Vorhaben.



# Kapitel 1

## Entwicklung eines Modifizierungskonzeptes

### 1.1 Grundsätzliches Vorgehen

Grundlage der Immissionsbeurteilung in der TA Luft 2002 ist der prognostizierte Stundenmittelwert der Schadstoffkonzentration. Hieraus werden dann Tages- und Jahresmittelwerte und Überschreitungshäufigkeiten berechnet, an Hand derer die Gesamtbeurteilung erfolgt. Die notwendigen Rechenverfahren werden in dem Programm AUSTAL2000 bereitgestellt.

Für die Beurteilung von Gerüchen gemäß GIRL ist ebenfalls die Stunde der primäre Bezugszeitraum, aber zur Beurteilung ist zu prognostizieren, ob innerhalb dieser Stunde zu 10 % der Zeit ein Geruch wahrgenommen wird. Ist dies der Fall, gilt die Stunde als *Geruchsstunde*. Für die Immissionsprognose ist im Wesentlichen die Häufigkeit der Geruchsstunden im Jahresmittel entscheidend.

Auch für einen Geruchsstoff kann natürlich eine normale Ausbreitungsrechnung gemäß TA Luft 2002 durchgeführt und der Stundenmittelwert der Geruchsstoffkonzentration ausgerechnet werden. Aber es treten dann folgende Probleme auf:

- Mit der Geruchswahrnehmung gilt es eine Wirkung zu beurteilen, während die Geruchsstoffkonzentration eine physikalische Größe darstellt, ein Immissionsangebot.
- Aus dem Stundenmittel der Konzentration kann man nicht zuverlässig auf das Vorliegen einer Geruchsstunde schließen, die sich ja nur auf einen effektiven Zeitraum von 6 Minuten bezieht.

Man muß zur Prognose der Geruchswahrnehmung zwei zusätzliche Schritte durchführen:<sup>1</sup>

<sup>1</sup>siehe VDI 3788 Blatt 1: Ausbreitung von Geruchsstoffen in der Atmosphäre — Grundlagen

- Es muß nicht nur der Stundenmittelwert  $\bar{c}$  der Konzentration bestimmt werden sondern die Häufigkeit  $f(c)$ , mit der einzelne Konzentrationswerte  $c$  im Verlauf der Stunde auftreten.
- Für jeden der Werte muß prognostiziert werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit  $P_0(c)$  er zu einer Geruchswahrnehmung führt, und unter Berücksichtigung der Häufigkeit seines Auftretens sein Beitrag zur Häufigkeit der Geruchswahrnehmung  $\kappa$  berechnet werden,

$$\kappa = \int_0^{\infty} P_0(c)f(c) dc \quad (1.1)$$

Der zweite dieser Schritte ist unproblematisch, denn die benötigte Wahrscheinlichkeit der Geruchswahrnehmung  $P_0(c)$  wird bei der Olfaktometrie in Form der sogenannten „S-Kurve“ in der Regel automatisch bestimmt, und der Rest ist reine Rechentechnik (Faltung der Häufigkeitsdichten). Bei den Auswerteverfahren der Olfaktometrie wird davon ausgegangen, daß die „S-Kurve“ durch eine logarithmische Normalverteilung beschrieben wird,

$$P_0(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda} \int_0^c \exp\left\{-\frac{[\log(c'/c_{GS})]^2}{2\lambda^2}\right\} \frac{dc'}{c'} \quad (1.2)$$

$$= 0.5 \left\{ 1 + \operatorname{erf}\left[\frac{\log(c/c_{GS})}{\sqrt{2}\lambda}\right] \right\} \quad (1.3)$$

Für die weitere Diskussion wird zunächst vereinfachend angenommen, daß dann ein Geruch wahrgenommen wird, wenn die Geruchsstoffkonzentration  $c$  die Konzentration an der Geruchsschwelle  $c_{GS}$  überschreitet. Dies ist in Strenge nur bei sehr kleinen Werten von  $\lambda$  erfüllt.

## 1.2 Häufigkeitsverteilungen

Bei der Prognose der Geruchshäufigkeit besteht also das Hauptproblem darin herauszubekommen, wie die Häufigkeitsverteilung der Konzentrationswerte innerhalb einer Stunde  $f(c)$  aussieht. Die wichtigsten Kenngrößen der Verteilung sind dabei der Mittelwert  $\bar{c}$ , den man relativ zuverlässig berechnen kann, und das 90-Perzentil  $c_{0,9}$ . Eine Geruchsstunde liegt vor, wenn das 90-Perzentil größer ist als die Geruchsschwelle,  $c_{0,9} > c_{GS}$ , also mehr als 10 Prozent der Werte oberhalb der Geruchsschwelle liegen. Eine wichtige Größe zur Beurteilung der Art der Häufigkeitsverteilung ist daher das Verhältnis  $r = c_{0,9}/\bar{c}$ .

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Intermittenz  $\mu$ . Sie gibt an, wie wahrscheinlich es ist, einen von Null verschiedenen Konzentrationswert vorzufinden. Ist die Konzentration innerhalb der Stunde vollkommen konstant ( $>0$ ), dann ist  $\mu = 1$ . Je häufiger der Wert Null auftritt, desto kleiner ist  $\mu$ .



### 1.2.1 Hypothetische Verteilungen

Um ein Gefühl dafür zu bekommen, was im Prinzip alles passieren kann, werden zunächst einige hypothetische Verteilungen betrachtet.

Bild 1.1 zeigt links oben eine Verteilung, bei der immer nur nahezu derselbe Wert 1 auftritt. Daher ist der Mittelwert  $\bar{c} = 1$  und ebenfalls  $c_{0,9} \approx 1$ , also auch  $r \approx 1$ .

Im Diagramm rechts oben ist eine gleichmäßige Verteilung der Werte zwischen 0 und 2 gezeigt. Der Mittelwert ist  $\bar{c} = 1$ , das 90-Perzentil  $c_{0,9} = 1.8$ , also  $r = 1.8$ .

Mitte links ist eine Verteilung mit einer Intermittenz von ganz wenig über 0.1 gezeigt, also fast 90 Prozent der Werte sind Nullwerte, der Rest liegt bei 1. Daher ist der Mittelwert  $\bar{c} \approx 0.1$ , das 90-Perzentil  $c_{0,9} \approx 1$  und damit  $r \approx 10$ .

Mitte rechts ist die Intermittenz auf 0.2 erhöht und man erhält  $\bar{c} = 0.2$ ,  $c_{0,9} = 1$  und  $r = 5$ .

Erniedrigt man dagegen die Intermittenz nur ganz wenig von 0.1 auf 0.09 (unten links), dann ist  $c_{0,9} = 0$  und damit auch  $r = 0$ .

Dies ändert sich auch nicht (unten rechts), wenn man die von Null verschiedenen Werte sehr hoch wählt und auf diese Weise einen hohen Mittelwert erhält. Auf diese Weise ist es auch möglich, mit einer scheinbar realistischen Verteilung wie der logarithmischen Normalverteilung einen hohen Mittelwert aber nur einen sehr kleinen Wert für das 90-Perzentil zu erhalten.

### 1.2.2 Realistische Verteilungen

Bild 1.2 zeigt eine Zeitreihe der Konzentration, wie sie im Guardo-Experiment<sup>2</sup> mit Hilfe von zeitlich hoch aufgelösten Lidar-Messungen ermittelt wurde. Bild 1.3 zeigt die zugehörige Verteilungsdichte der Konzentrationswerte.

Den Haupteinfluß auf die Form der Häufigkeitsverteilung der Konzentrationswerte haben die Quellkonfiguration, die Art der Emission und die Meteorologie.

Bei der Emission wird zunächst davon ausgegangen, daß die Emissionsparameter innerhalb einer Stunde konstant sind, also beispielsweise keine kurzzeitigen Freisetzungen oder Änderungen der Austrittsgeschwindigkeit auftreten.

Bei der Meteorologie wird in der Regel von Stundenmittelwerten der einzelnen Parameter ausgegangen, aber es ist offensichtlich, daß die Momentanwerte aufgrund der Luftturbulenz erheblichen Schwankungen unterliegen können. Zum Beispiel wird die Windrichtung sich innerhalb einer Stunde typischerweise um 10 bis 20 Grad ändern. Bei einer punktförmigen Quelle führt das dazu, daß die Abgasfahne fortwährend ihre Richtung ändert, man spricht von *mäandern*.

<sup>2</sup>Niedrige Punktquelle in einem Kaltluftabfluß, beschrieben in: H.E. Jørgensen and T. Mikkelsen: Lidar Measurements of Smoke Plumes During the Guardo 1990 Experiments. Risø-R-633, Risø-R-634, Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark, 1992

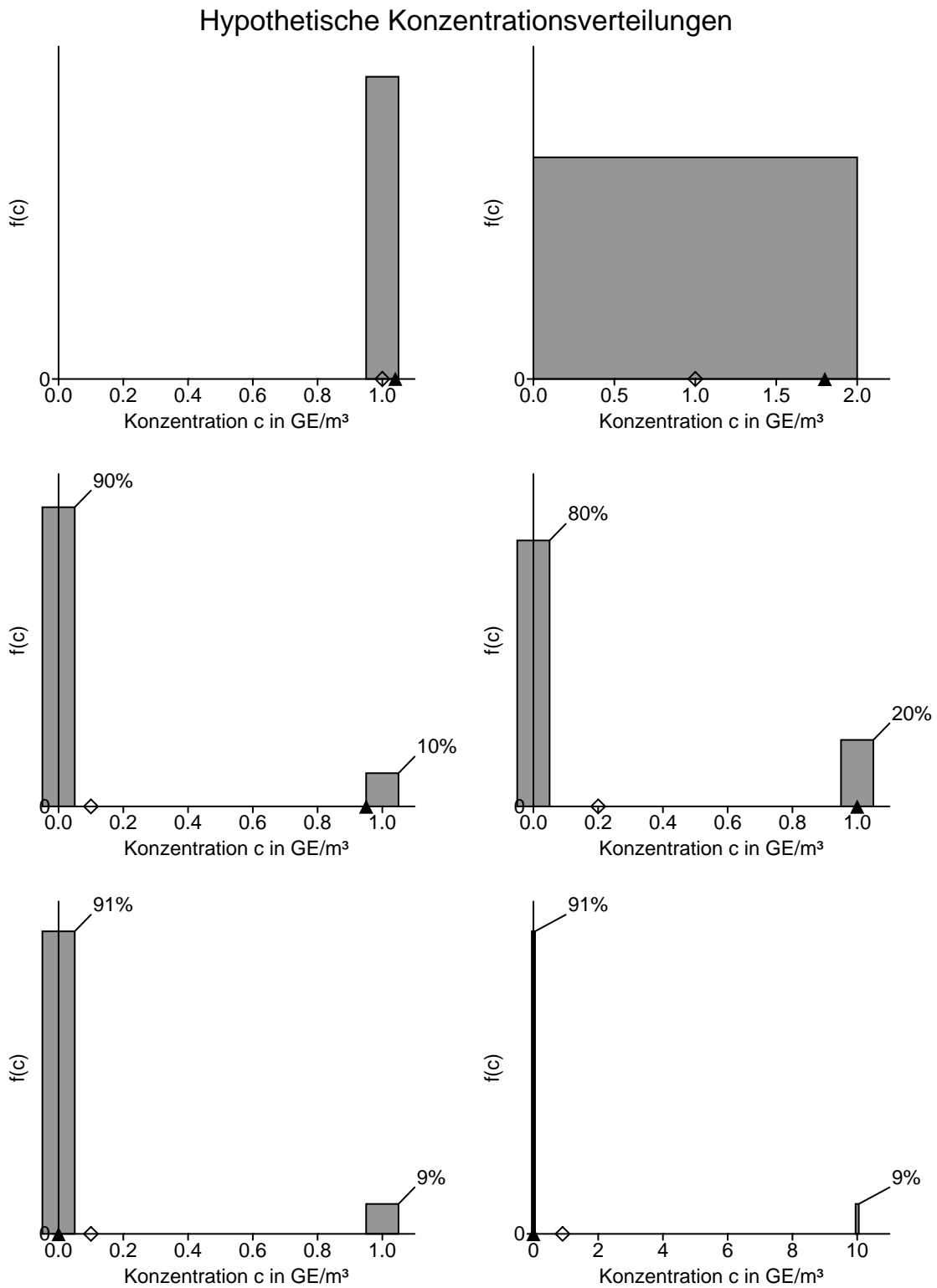


BILD 1.1: Verschiedene hypothetische Verteilungsdichten  $f(c)$ . Die Raute zeigt die Lage des Mittelwertes an, das Dreieck die Lage des 90-Perzentils.

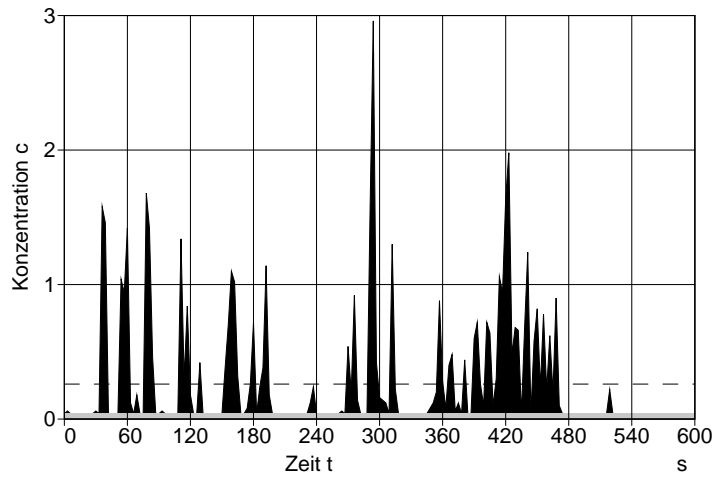


BILD 1.2: Ortsfest gemessene Zeitreihe der Konzentration in der Fahne einer punktförmigen Quelle. Die gestrichelte Linie markiert den zeitlichen Mittelwert.

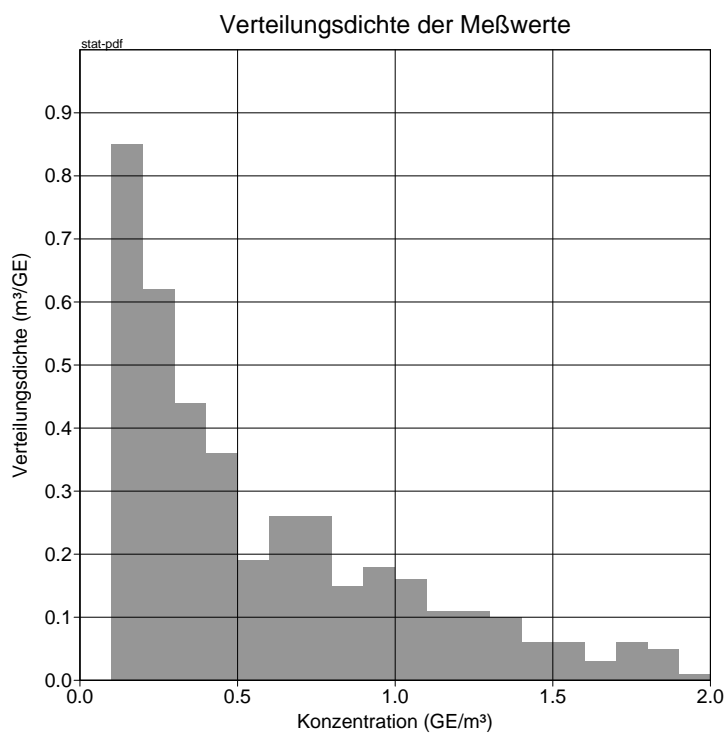


BILD 1.3: Verteilungsdichte  $f(c)$  der gemessenen Konzentrationswerte. Für die in Abbildung 1.2 ausschnittsweise gezeigte Meßreihe von 1000 Meßpunkten im Zeitabstand von 3 s ist das Histogramm der Meßwerte mit einer Klassenbreite von  $0.1 \text{ GE/m}^3$  dargestellt. 59 % aller Werte liegen im Bereich  $c < 0.1 \text{ GE/m}^3$ .

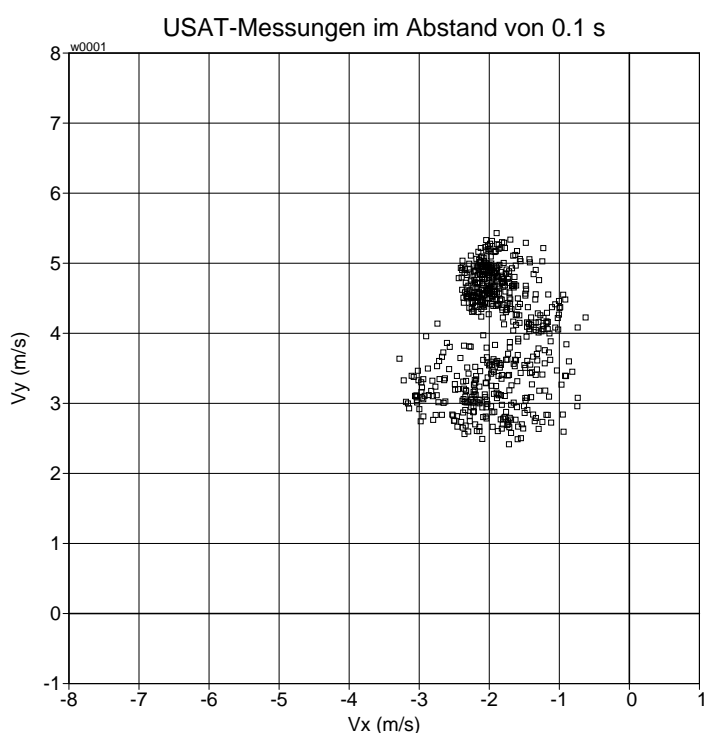


BILD 1.4: Momentanwerte des Vektors der horizontalen Windgeschwindigkeit, gemessen mit einem Ultraschall-Anemometer über den Zeitraum von 1 Minute im Abstand von 1/10 Sekunde.

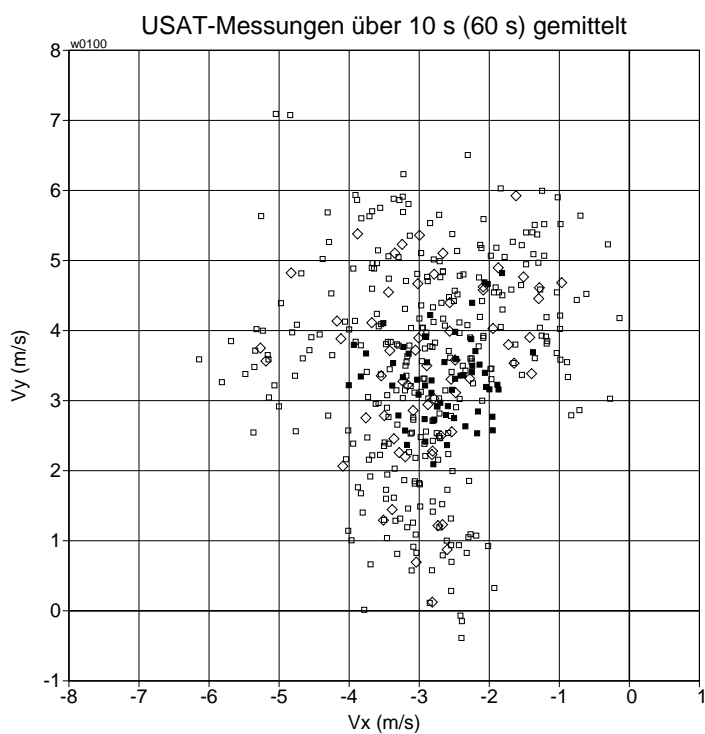


BILD 1.5: Vektor der horizontalen Windgeschwindigkeit, gemittelt über fortlaufende Intervalle von 10 Sekunden (offene Quadrate) oder 60 Sekunden (offene Rauten), im Zeitraum von 1 Stunde. Die ausgefüllten Quadrate kennzeichnen die 10-Sekunden-Mittelwerte innerhalb der ersten 10 Minuten.

Die Bilder 1.4 und 1.5 zeigen die Variation des Windvektors auf verschiedenen Zeitskalen. Die Größe des Mäanderns und damit auch die Breite der Fahne hängen davon ab, welchen Zeitraum man betrachtet.

Das Mäandern der Abgasfahne kann dazu führen, daß der Aufpunkt, an dem die Geruchshäufigkeit prognostiziert werden soll, manchmal von der Fahne überstrichen und manchmal vollständig verfehlt wird ( $\mu < 1$ ). Bei einer ausgedehnten Quelle mit einer breiten Abgasfahne wird es seltener passieren, daß der Aufpunkt vollkommen außerhalb der Fahne liegt, die Intermittenz  $\mu$  ist dann also größer als bei einer Punktquelle. Auf diese Weise trägt auch die Art der Quellkonfiguration zur Häufigkeitsverteilung der Konzentrationswerte bei und es ist zweckmäßig, bei der Ausbreitungsrechnung das Mäandern explizit zu modellieren.

Hierzu benötigt man Informationen, wie die Häufigkeitsverteilung der Konzentrationswerte in der momentanen Fahne aussieht, und wie sich die momentanen Fahnen zur mittleren Fahne überlagern. Während man mit einem üblichen stationären Meßgerät nur die mittlere Fahne ausmessen kann, ist es mit einem Lidar-Gerät möglich, die momentane Konzentrationsverteilung längs eines Laserstrahls quer zur Fahnenachse zu bestimmen. Mißt man auf diese Weise viele Konzentrationsprofile aus, dann kann man für jedes Profil die Lage der momentanen Fahnenachse als Schwerpunkt der Konzentrationsverteilung bestimmen und alle Profile so übereinanderlegen, daß die Schwerpunkte übereinstimmen. Auf diese Weise erhält man eine Statistik der Konzentrationswerte in Abhängigkeit von dem Abstand zur momentanen Fahnenachse.

Die Wertestatistik wird zweckmäßigerweise durch eine der üblichen zweiparametrischen Verteilungsfunktionen, wie Weibull-Verteilung oder Gamma-Verteilung, beschrieben, so daß man nur noch mit den Parametern dieser Verteilung zu operieren hat. Nimmt man noch die Intermittenz hinzu, dann hat man folgende drei Parameter zur Beschreibung der Konzentrationsfluktuationen in der momentanen Fahne<sup>3</sup> (Kernfahne):

$\hat{\mu}$  Intermittenz

$\bar{\hat{c}}$  Mittelwert

$\hat{\nu}$  Formfaktor der Verteilung

Diese Parameter hängen im Allgemeinen vom Abstand  $\hat{y}$  von der Fahnenachse ab.

Als Beispiel wird hier eine Weibull-Verteilung  $W(c)$  betrachtet

$$W(c) = (1 - \hat{\mu})\delta(c) + \hat{\mu} \frac{\hat{\nu}}{\hat{c}_s} \zeta^{\hat{\nu}-1} \exp(-\zeta^{\hat{\nu}}) \quad (1.4)$$

$$\zeta = c/\hat{c}_s \quad (1.5)$$

$$\hat{c}_s = \frac{\bar{\hat{c}}}{\hat{\mu}\Gamma(1 + 1/\hat{\nu})} \quad (1.6)$$

Bild 1.6 zeigt die Verteilungsdichte einer Weibull-Verteilung für verschiedene Formparameter  $\hat{\nu}$ . Bei  $\hat{\nu} = 1$  handelt es sich einfach um eine Exponential-Verteilung mit der höchsten Dichte

<sup>3</sup>Alle Symbole, die sich auf die momentane Fahne beziehen, werden durch ein Dach ( $\hat{\quad}$ ) gekennzeichnet.

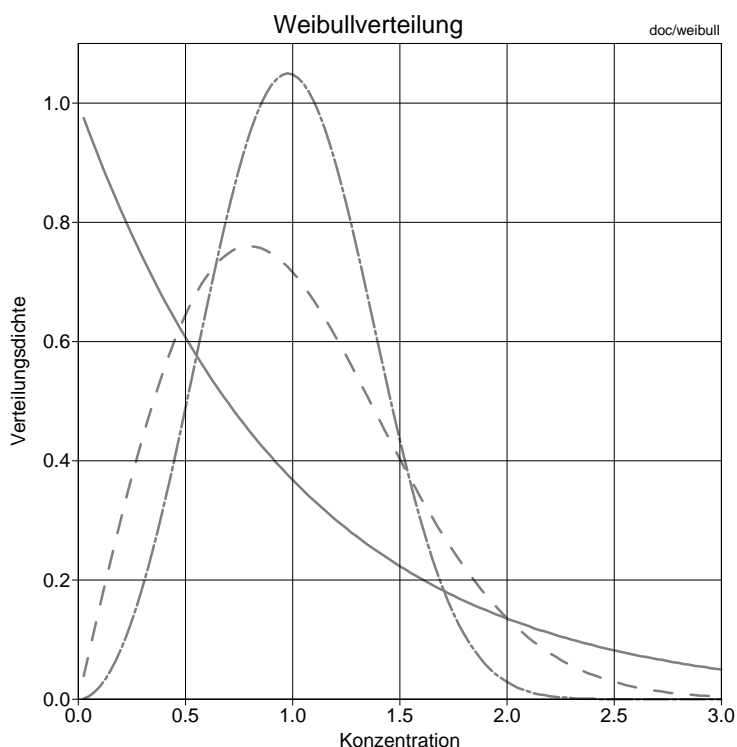


BILD 1.6: Weibull-Verteilung für  $\bar{c} = 1$ ,  $\mu = 1$  und verschiedene Formfaktoren  $\nu$ .  $\nu = 1$ : durchgezogen (Exponential-Verteilung);  $\nu = 2$ : gestrichelt;  $\nu = 3$ : strichpunktirt.

bei  $c = 1$ . Für  $\hat{\nu} > 1$  verschwindet die Dichte bei  $c = 0$  und je größer  $\hat{\nu}$  gewählt wird, desto mehr konzentriert sich die Verteilungsdichte in der Umgebung des Mittelwertes  $\hat{c}_s$ , nähert sich also der in Bild 1.1 oben links gezeigten Verteilung an.

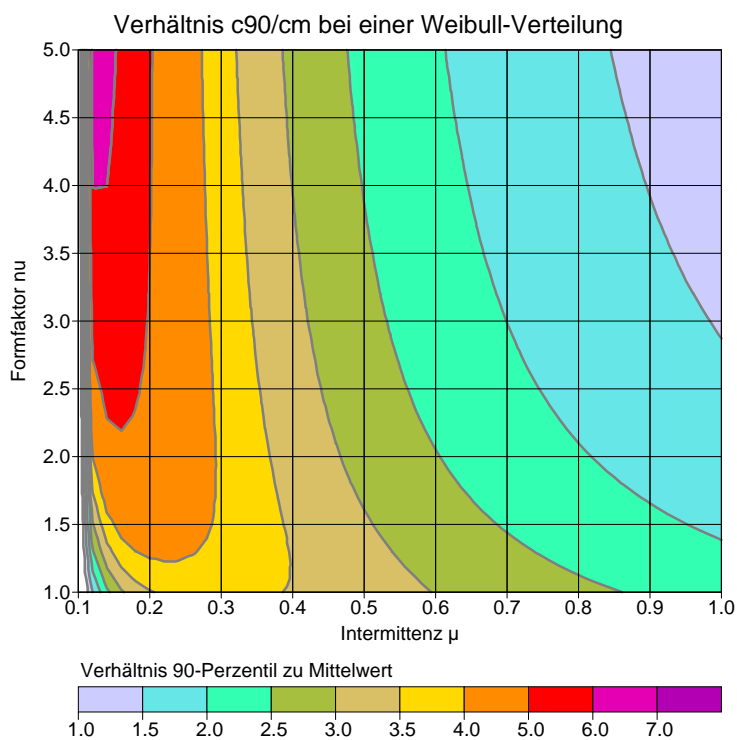


BILD 1.7: Verhältnis von 90-Perzentil zu Mittelwert bei einer Weibullverteilung gemäß Gleichung (1.4) in Abhängigkeit von Formfaktor  $\hat{\nu}$  und Intermittenz  $\hat{\mu}$ .

Das hier besonders interessierende Verhältnis  $r$  von 90-Perzentil zu Mittelwert ist in Bild 1.7 als Funktion von Formparameter  $\hat{\nu}$  und Intermittezz  $\hat{\mu}$  gezeigt. Für eine Exponentialverteilung (Punkt unten rechts) hat  $r$  den Wert  $\log(10) \approx 2.3$ . Für große Werte von  $\hat{\nu}$  geht  $r$  bei  $\hat{\mu} = 1$  gegen 1 (entspricht Bild 1.1 oben links), bei  $\hat{\mu} \gtrsim 0.1$  jedoch gegen 10 (entspricht Bild 1.1 mitte links).

Aus Lidar-Messungen kann man entnehmen, daß sich die Verteilungsdichte  $\hat{f}(c)$  in der momentanen Fahne recht gut durch eine Weibull-Verteilung mit  $\hat{\nu} = 2$  und  $\hat{\mu} = 1$  beschreiben läßt<sup>4</sup> (Bild 1.6, gestrichelte Kurve). Die genaue Wahl dieser Parameter hat voraussichtlich nur geringen Einfluß auf eine Immissionsprognose, wie eine Sensitivitätsanalyse für das Fahnenmodell MEPOD nahelegt.<sup>5</sup> Im folgenden wird daher ausschließlich mit diesen Werten für die momentane Fahne gearbeitet werden.

Bild 1.8 zeigt, wie bei einer Gauß-Fahne, in der die Konzentrationsfluktuationen entsprechend der Weibull-Verteilung (1.4) mit  $\hat{\nu} = 2$  und  $\hat{\mu} = 1$  verteilt sind, durch das Mäandern der Fahne eine Verteilung entsteht, bei der die häufigsten Konzentrationswerte bei  $c = 0$  liegen (roter Bereich im unteren Teilbild). Dies war auch bereits in der gemessenen Verteilung in Bild 1.3 zu erkennen gewesen.

Das Ergebnis des Mäanderns hängt davon ab, wie groß die Weite des Mäanderns, also die mittlere Verschiebung der Fahnenachse  $\tilde{\sigma}_y$ , im Vergleich zur Breite  $\hat{\sigma}_y$  der momentanen Fahne ist. Die Gesamtbreite  $\sigma_y$  der mittleren Fahne, also der über das Mäandern gemittelten Fahne, ist

$$\sigma_y = \sqrt{\hat{\sigma}_y^2 + \tilde{\sigma}_y^2} \quad (1.7)$$

Bild 1.9 und Bild 1.10 zeigen die Verteilungsdichte der mittleren Fahne auf der Fahnenachse für verschiedene Mäanderweiten. Je stärker das Mäandern ist, desto mehr Nullwerte sind in der Verteilung enthalten, aber auch desto mehr hohe Konzentrationswerte (wenn man den Mittelwert konstant hält).

In Bild 1.10 ist ebenfalls das Verhältnis von 90-Perzentil zu Mittelwert aufgetragen, das für die Geruchsprognose wichtig wird. Es steigt vom Wert 1.7 für die nicht mäandernde Fahne (siehe auch Bild 1.7) bis auf fast 4 bei der stark mäandernden Fahne. In Situationen, bei denen das Mäandern keine Rolle spielt, also beispielsweise in der Nähe ausgedehnter Geruchsquellen, würde man also erst dann, wenn der Mittelwert der Geruchskonzentration  $0.6 \text{ GE/m}^3$  erreicht, auf das Vorliegen einer Geruchsstunde schließen. Wenn das Mäandern wichtig ist, beispielsweise in größerer Entfernung einer stark lokalisierten Quelle, würde man schon bei der Überschreitung von  $0.25 \text{ GE/m}^3$  eine Geruchsstunde prognostizieren. Die Beurteilungsschwelle für den Stundenmittelwert variiert also um etwas mehr als einen Faktor 2.

<sup>4</sup>Untersuchungen hierzu sind vom Ing.-Büro Janicke im Auftrag des LUA NRW durchgeführt worden und in folgenden Berichten beschrieben:

- Ausbreitungsmodell LASKOF: Lagrange-Simulation von Konzentrationsfluktuationen. Oktober 1991
- Validierung des Modells zur Simulation von Konzentrationsfluktuationen LASKOF. November 1992
- Anwendung und Weiterentwicklung des Modells LASKOF. Juni 1994
- Entwicklung und Test eines Rechenverfahrens zur Bestimmung von Geruchshäufigkeiten auf der Basis des Modells LASKOF. November 1995

<sup>5</sup>IBJmepod: Eine Implementierung des Geruchsausbreitungsmodells MEPOD. Ing.-Büro Janicke, Juni 1999.

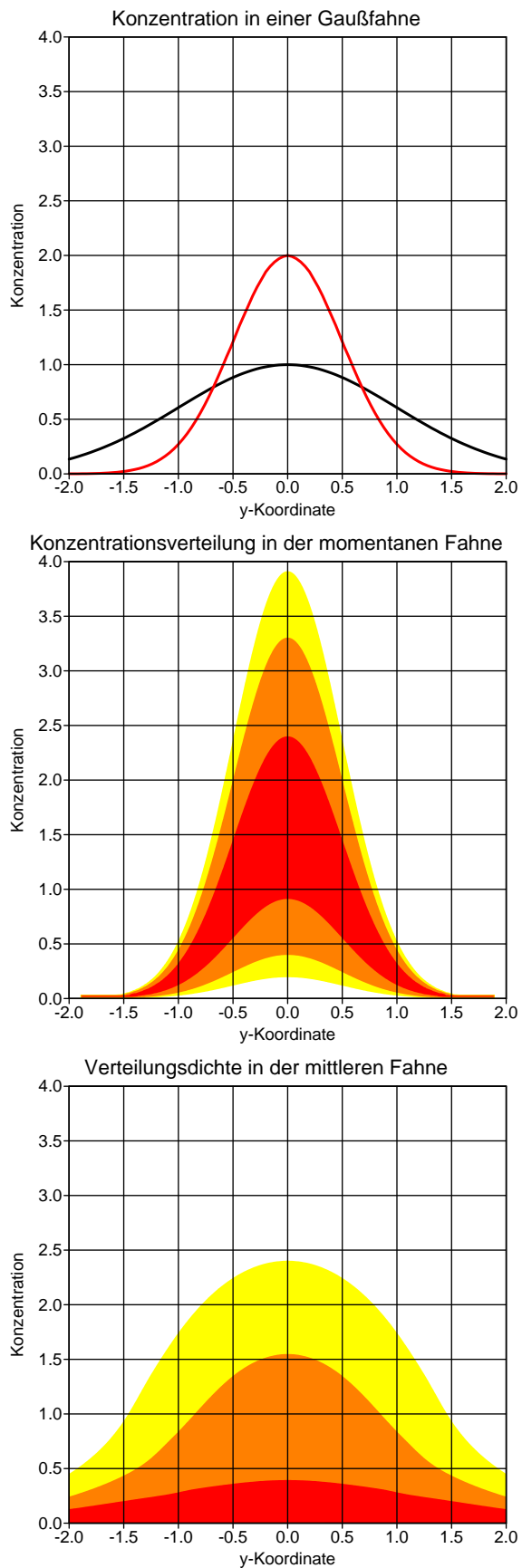


BILD 1.8: Oben: Mittelwert der Konzentration in einer Gauß-Fahne (rot: momentane Fahne; schwarz: mittlere Fahne). Mitte: Verteilungsdichte  $\hat{f}(c)$  der momentanen Fahne. Unten: Verteilungsdichte  $f(c)$  der mittleren Fahne, die durch das Mäandern der momentanen Fahne entsteht.



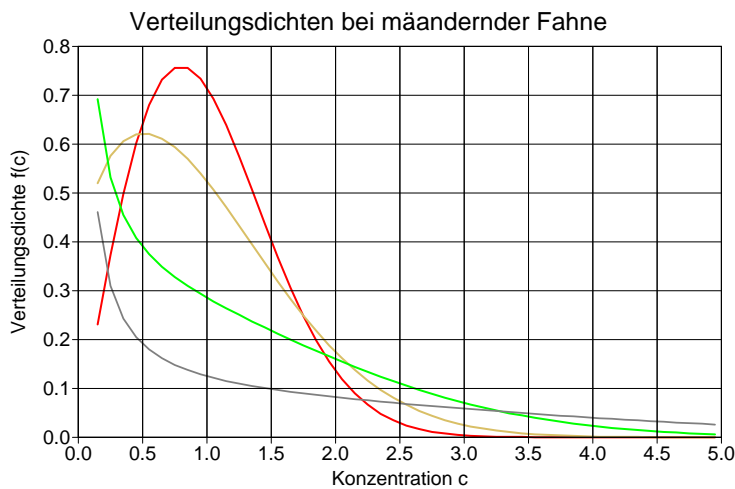


BILD 1.9: Verteilungsdichte in der Mitte der mittleren Fahne für verschiedene Verhältnisse von Mäanderweite zu Breite der momentanen Fahne: 0 (rote Kurve), 1 (braune Kurve), 2 (grüne Kurve), 4 (graue Kurve). Jede der Verteilungsdichten hat den Mittelwert 1.

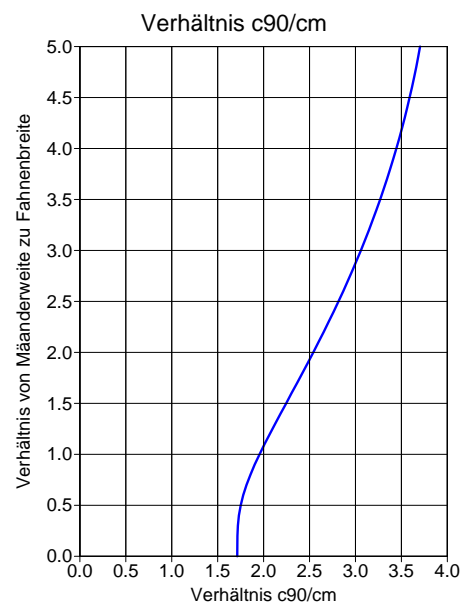
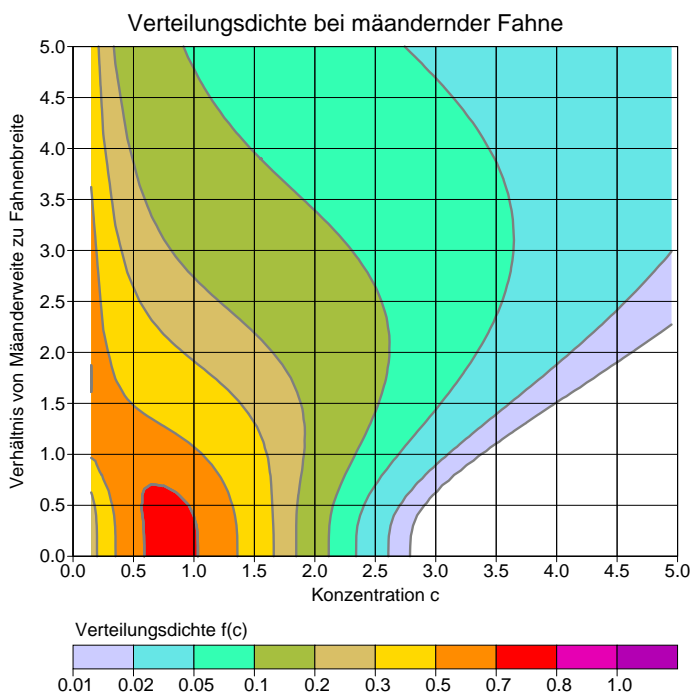


BILD 1.10: Links: Verteilungsdichte in der Mitte der mittleren Fahne in Abhängigkeit von dem Verhältnis Mäanderweite  $\bar{\sigma}_y$  zu Fahnenbreite  $\hat{\sigma}_y$  unter Verwendung einer momentanen Fahne mit  $\hat{v} = 2$  und  $\hat{\mu} = 1$ . Der Mittelwert für die mittlere Fahne ist 1. Rechts: Verhältnis  $r = c_{0,9}/\bar{c}$  in Abhängigkeit von der Stärke des Mäanderns.



## 1.3 Sensitivität bezüglich der Beurteilungsschwelle

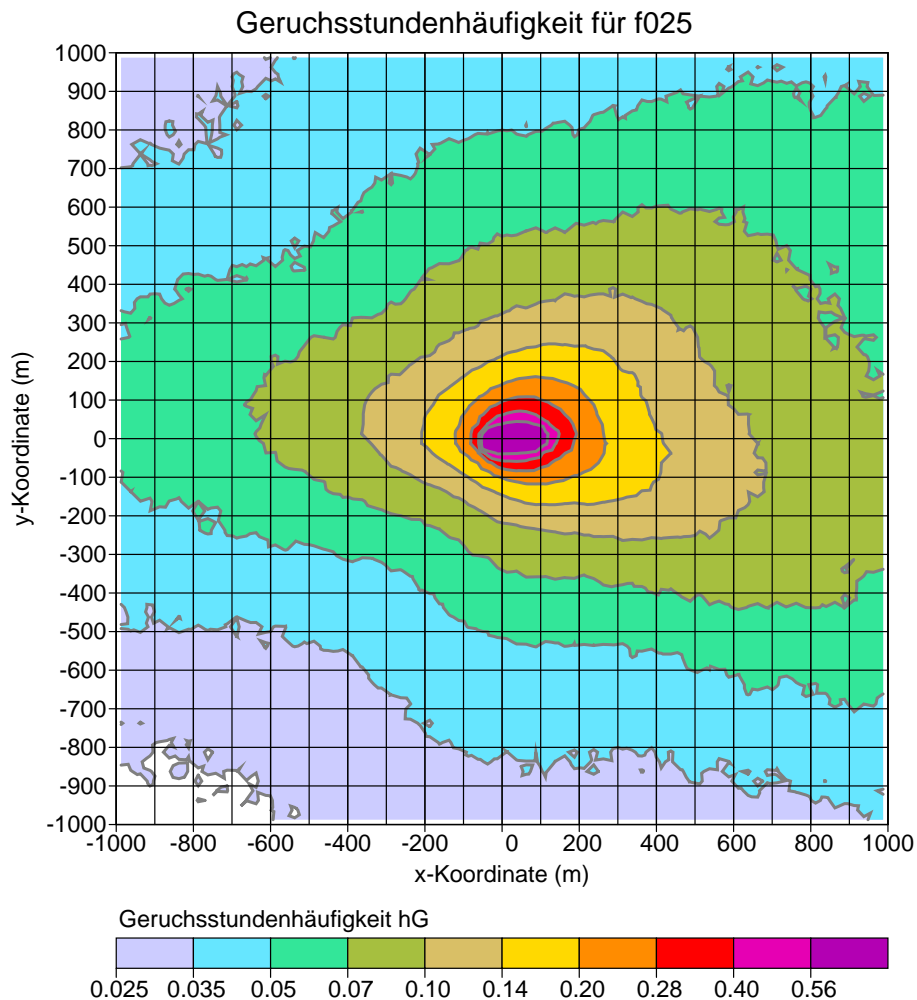
Aufgrund der Überlegungen zum Mäandern ist zu erwarten, daß die Beurteilungsschwelle  $c_{BS}$ , also der Wert für das Stundenmittel der Geruchskonzentration, bei der gerade eine Geruchsstunde erreicht wird, je nach Situation um etwa einen Faktor 2 variiert. Das bedeutet nicht, daß damit auch die für das Jahresmittel prognostizierte Häufigkeit von Geruchsstunden um einen Faktor 2 variiert.

Anhand von 2 Quellsystemen wurde diese Abhängigkeit untersucht:

1. Schweinemastbetrieb mit 2 Ställen, die Gesamtemission beträgt 127 kGE/s.
2. Flächenquelle  $40 \times 200 \text{ m}^2$  mit einer Emission von 64 kGE/s.
3. Punktquelle 28 m hoch mit einer Emission von 10 kGE/s.

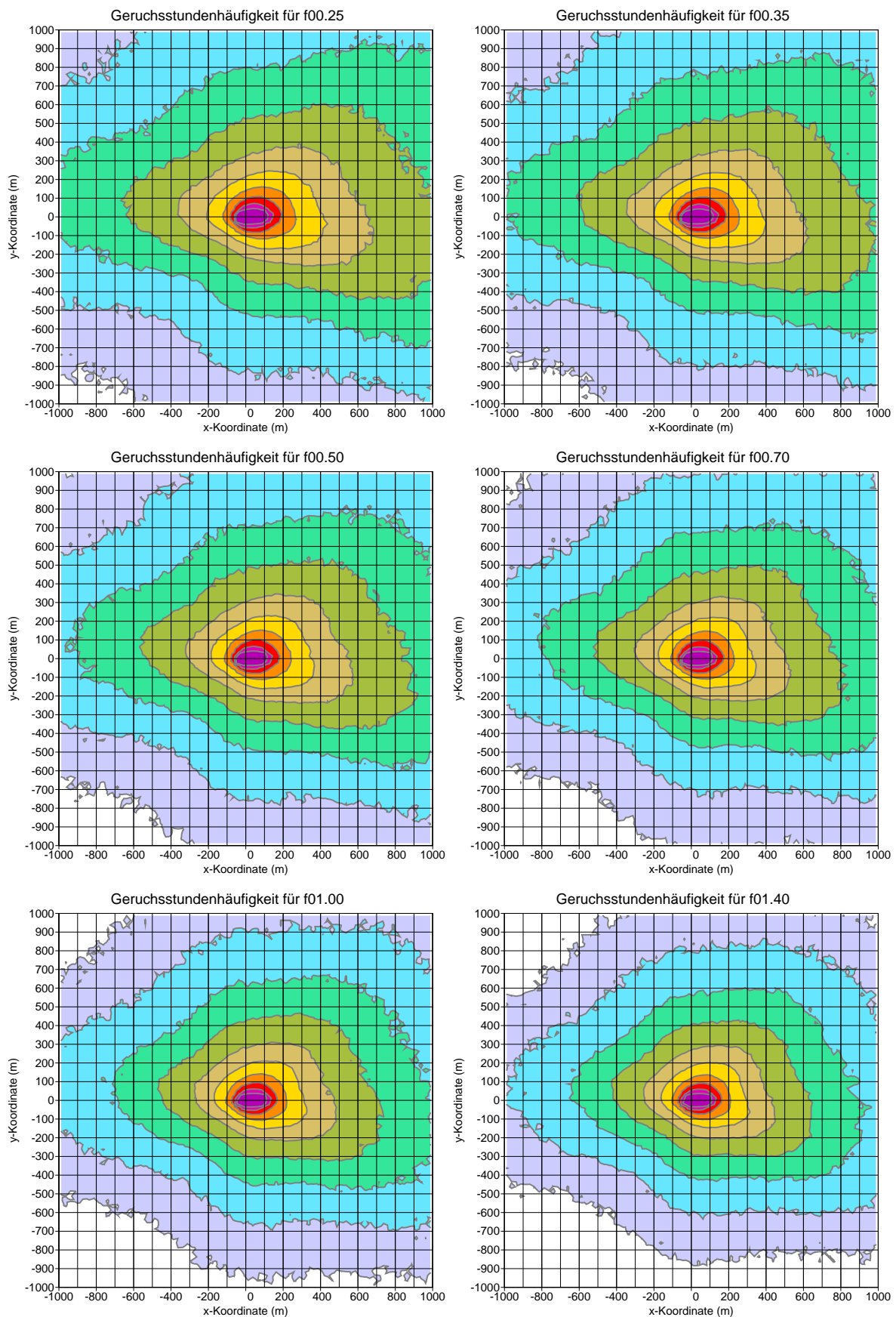
### 1.3.1 Schweinemastbetrieb

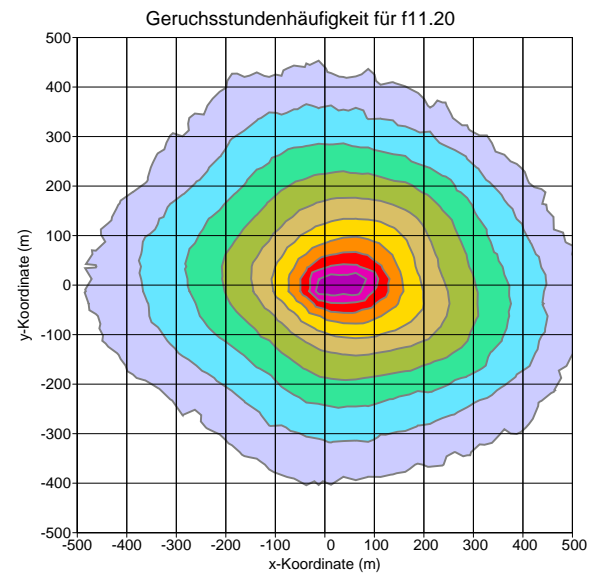
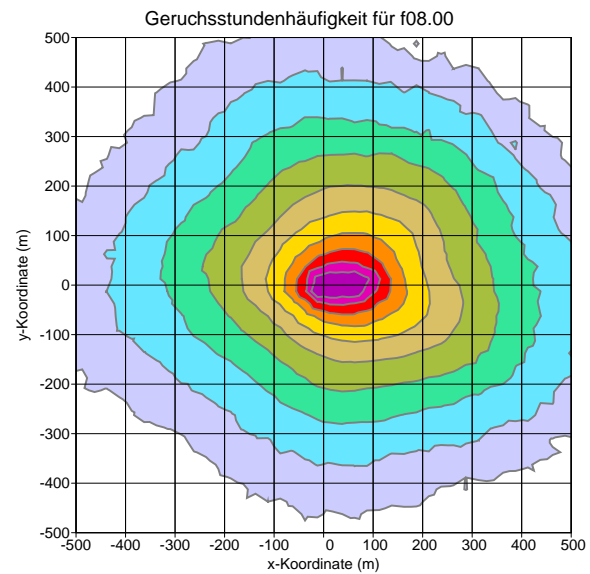
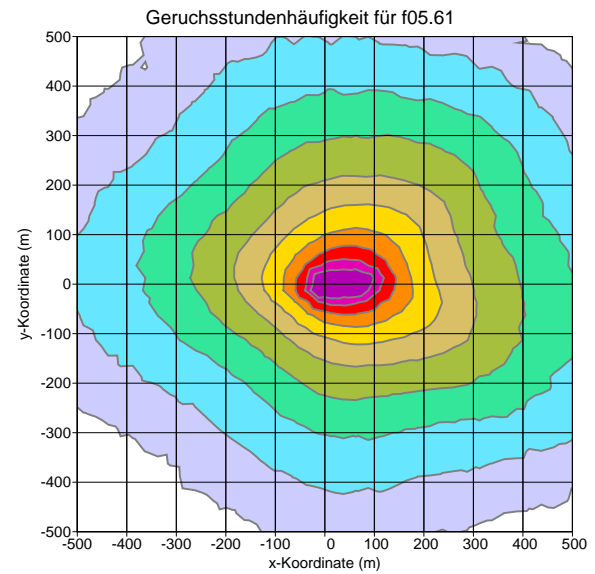
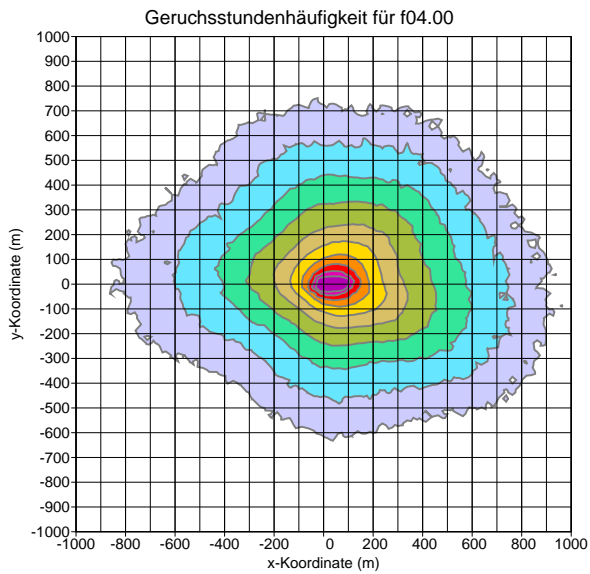
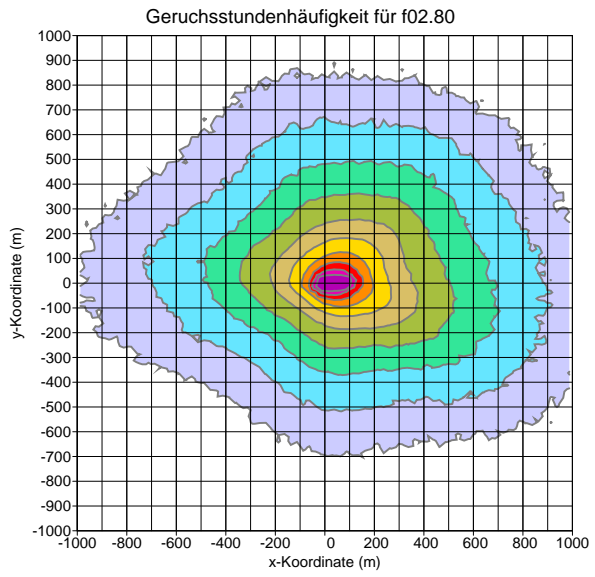
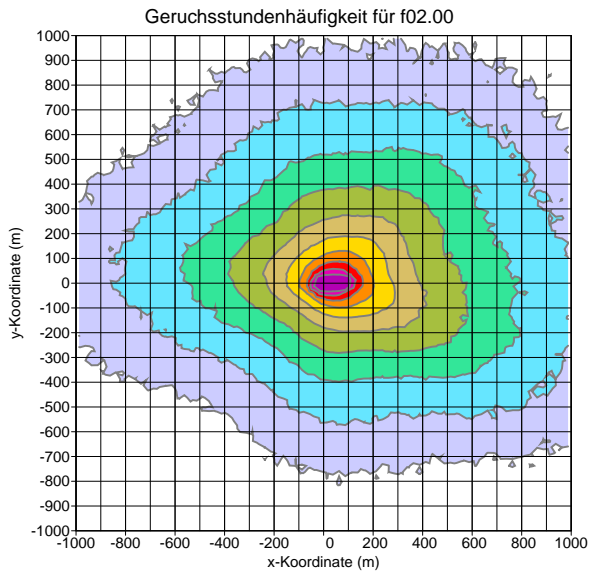
Am Beispiel des Schweinemastbetriebes in Nörvenich wird untersucht, welchen Einfluß die Beurteilungsschwelle  $c_{GS}$  auf die Höhe der ausgewiesenen Geruchsstundenhäufigkeit  $h_G$  besitzt. Der Betrieb besteht aus 2 Ställen, die zusammen eine Fläche von etwa  $60 \times 100 \text{ m}^2$  einnehmen. Die gesamte Geruchsemission liegt bei 127 kGE/s. Die Ausbreitungsrechnung wird mit LASAT (Austal2000-Modus) für die Jahresstatistik *anonym.aks* durchgeführt. Es wird mit einer Maschenweite von 25 m bis in eine Entfernung von 1000 m gerechnet. Die Bodenrauigkeit beträgt  $z_0 = 0.1 \text{ m}$ .

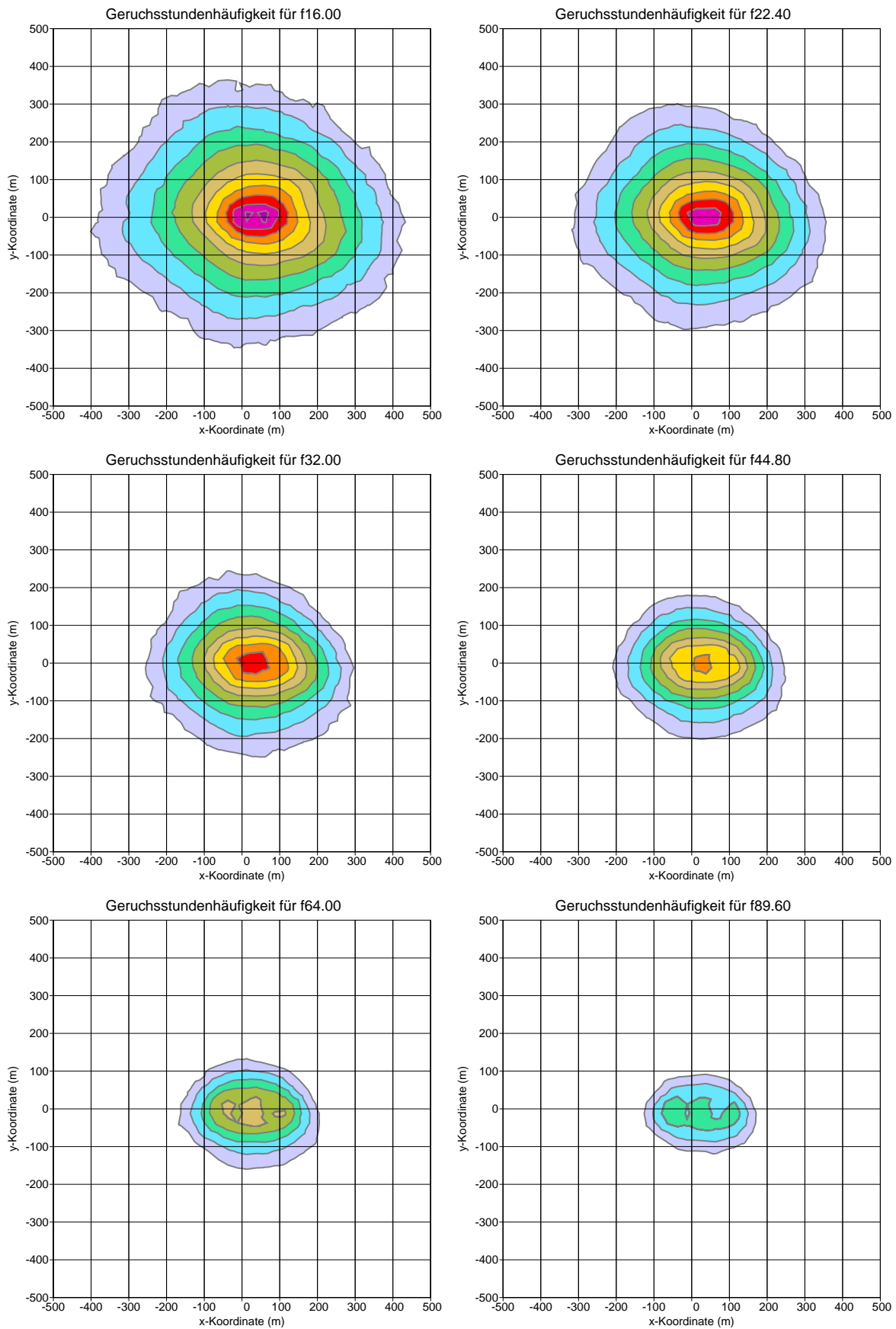


In den Bildern ist die berechnete Häufigkeit  $h_G$  von Geruchsstunden aufgetragen, wobei die den Isolinien zugeordneten Werte beginnend mit 2.5 % jeweils um den Faktor 1.4 zunehmen. In der Titelzeile ist die verwendete Beurteilungsschwelle angegeben. Beispielsweise bedeutet  $f_{00.25}$ , daß das Bild die Überschreitungshäufigkeit der Geruchsstoffkonzentration  $0.25 \text{ GE/m}^3$  darstellt.

Diese Schwelle ist in den folgenden Bildern jeweils um den Faktor  $\sqrt{2} \approx 1.4$  vergrößert worden. Man kann die Bilder auch so interpretieren, daß die Beurteilungsschwelle beibehalten wurde, aber die Quellstärke um jeweils den Faktor 1.4 reduziert wurde.



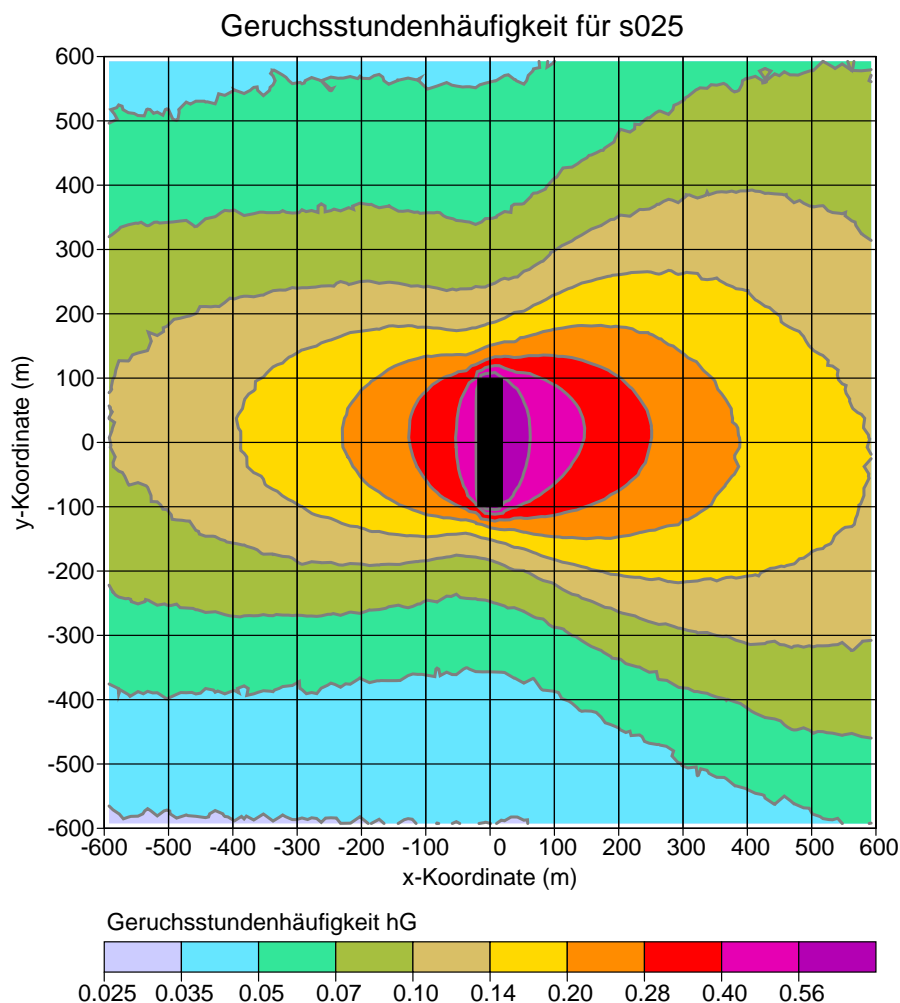




Die Bilderserie zeigt, daß die Größe des Gebietes, in dem die Geruchsstundenhäufigkeit größer als 10 % bzw. 5 % ist, anfangs nur wenig von der Wahl der Beurteilungsschwelle abhängt. Erst wenn die Quellstärke um einen Faktor 20 bis 50 reduziert worden ist und der Radius des Gebietes auf etwa 200 m abgenommen hat, ist eine deutliche Abhängigkeit von der Wahl der Beurteilungsschwelle zu erkennen.

### 1.3.2 Flächenquelle

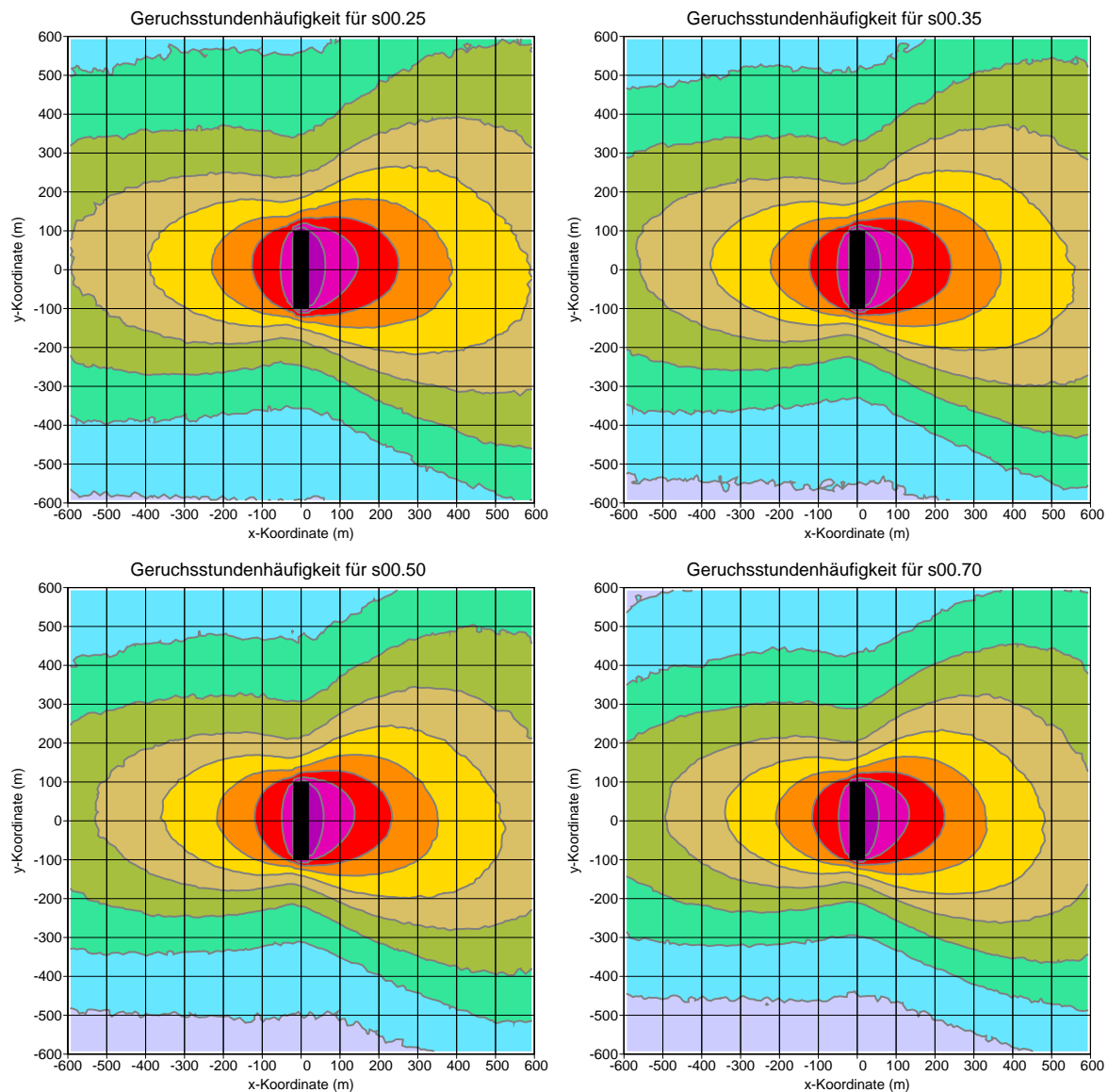
Am Beispiel einer ausgedehnten Flächenquelle wird untersucht, welchen Einfluß die Höhe der Beurteilungsschwelle  $c_{BS}$  auf die Höhe der ausgewiesenen Geruchsstundenhäufigkeit  $h_G$  besitzt. Die Quelle ist 40 m breit und 200 m lang. Die Geruchsemission liegt bei 64 kGE/s. Die Ausbreitungsrechnung wird mit LASAT (Austal2000-Modus) für die Jahresstatistik anonym.aks durchgeführt. Es wird mit einer Maschenweite von 15 m bis in eine Entfernung von 600 m gerechnet. Die Bodenrauigkeit beträgt  $z_0 = 0.1$  m.



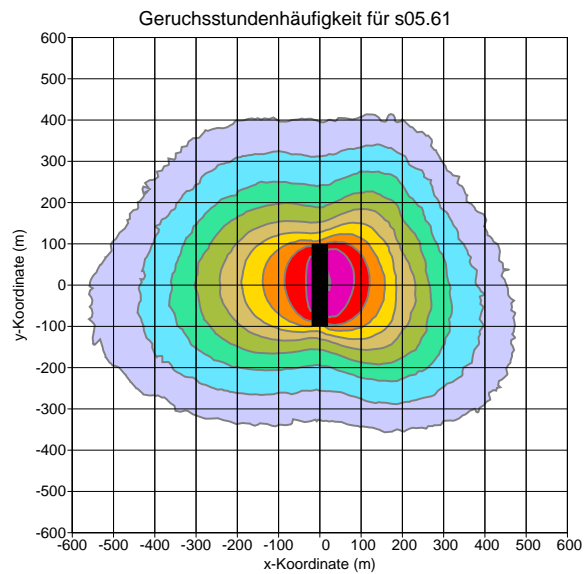
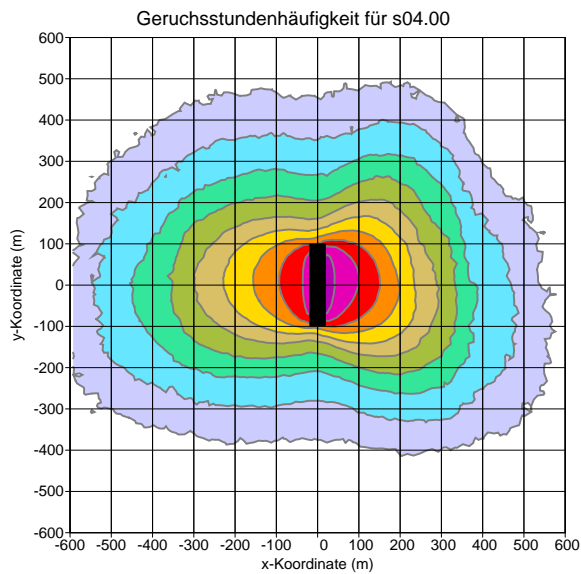
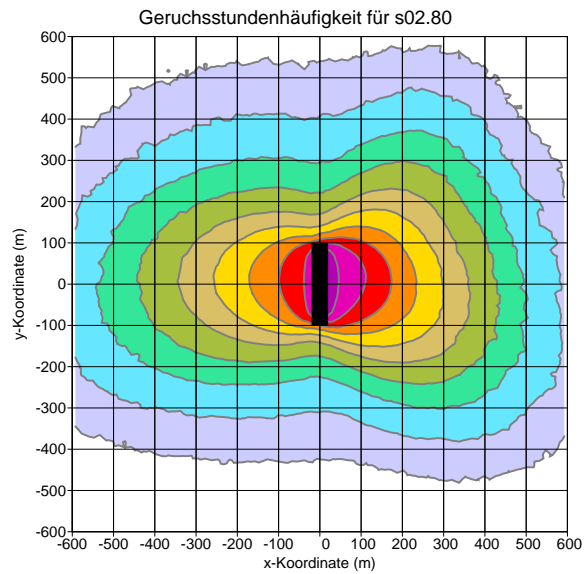
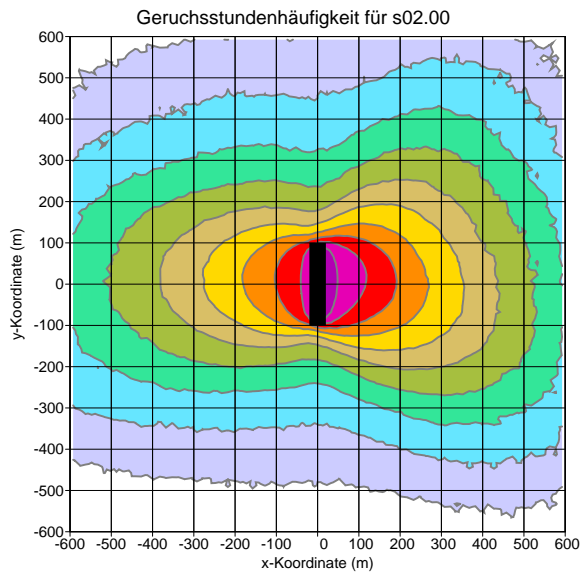
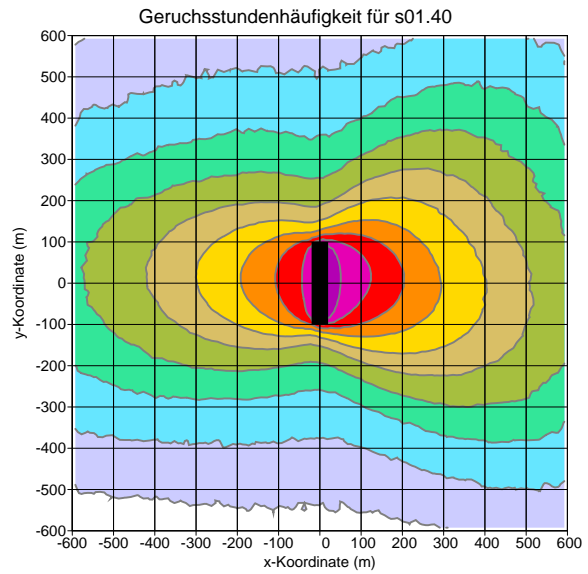
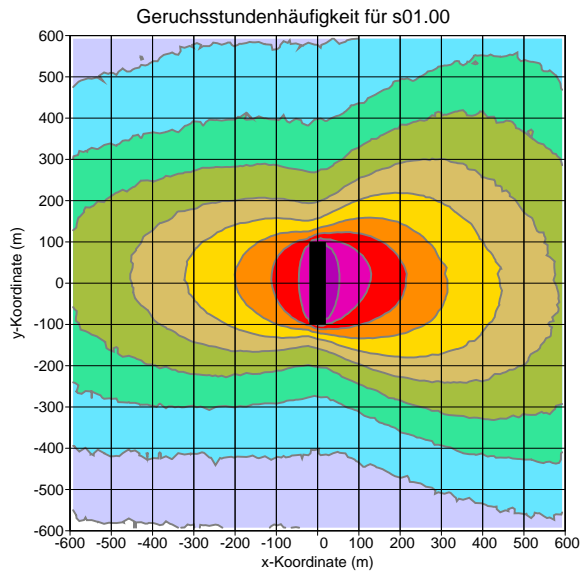
In den Bildern ist die berechnete Häufigkeit  $h_G$  von Geruchsstunden aufgetragen, wobei die

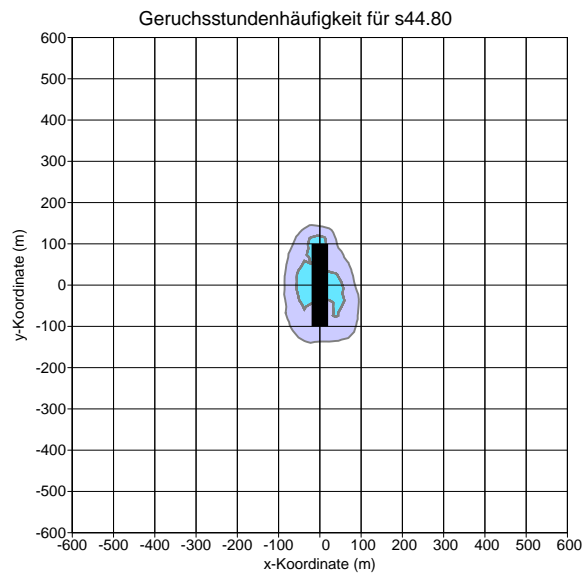
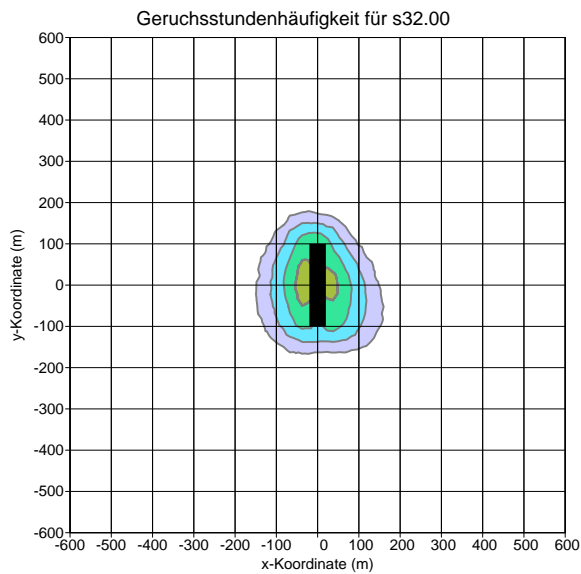
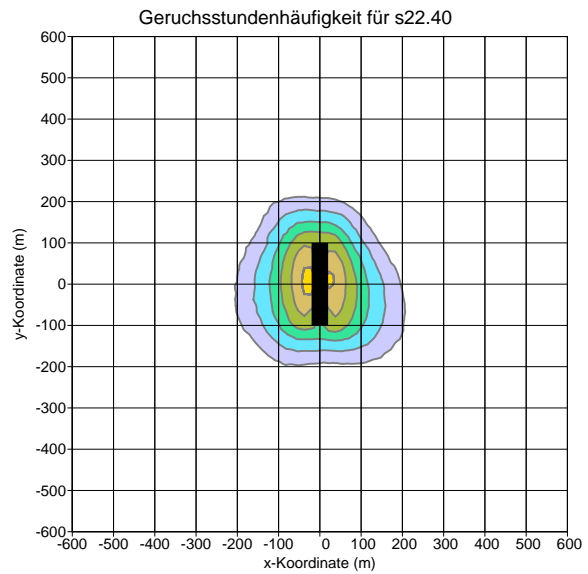
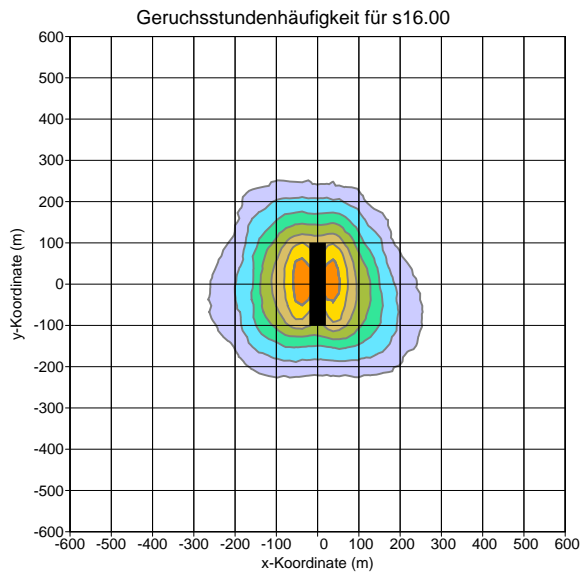
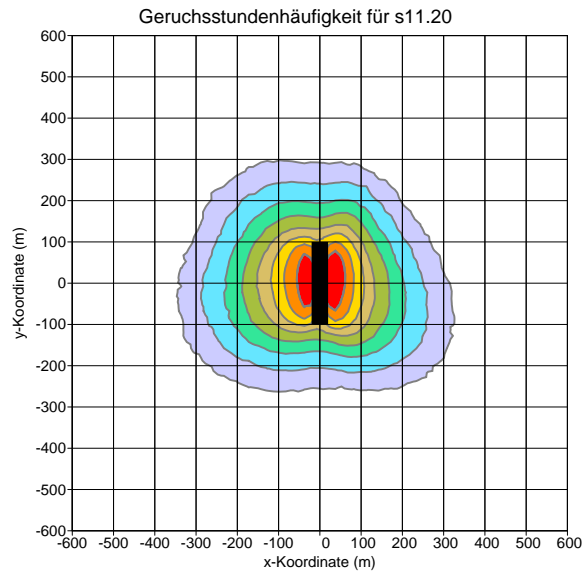
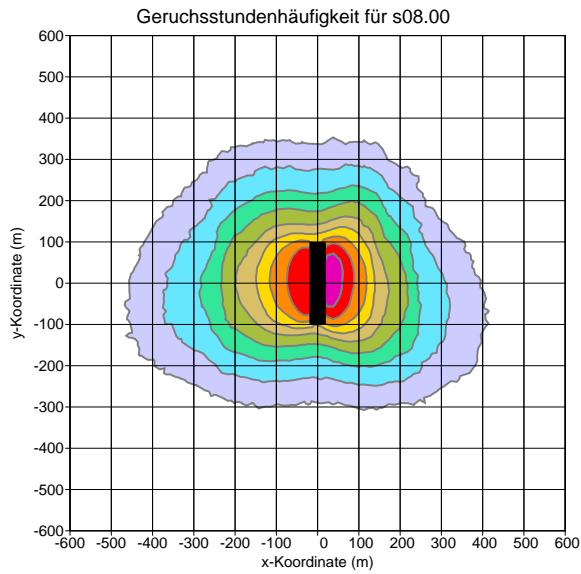
den Isolinien zugeordneten Werte beginnend mit 2.5 % jeweils um den Faktor 1.4 zunehmen. In der Titelzeile ist die Beurteilungsschwelle angegeben. Beispielsweise bedeutet  $s00.25$ , daß das Bild die Überschreitungshäufigkeit der Geruchsstoffkonzentration  $0.25 \text{ GE/m}^3$  darstellt.

Diese Schwelle ist in den folgenden Bildern jeweils um den Faktor  $\sqrt{2} \approx 1.4$  vergrößert worden. Man kann die Bilder auch so interpretieren, daß die Beurteilungsschwelle beibehalten wurde, aber die Quellstärke um jeweils den Faktor 1.4 reduziert wurde.









Wie in Abschnitt 1.3.1 ist auch hier zu erkennen, daß die Größe des Gebietes, in dem die Geruchsstundenhäufigkeit größer als 10 % bzw. 5 % ist, anfangs nur wenig von der Wahl der Beurteilungsschwelle abhängt. Dies ändert sich erst, wenn die Quellstärke um einen Faktor 20 reduziert worden ist und der Radius des Gebietes auf etwa 200 m abgenommen hat.

### 1.3.3 Erhöhte Quelle

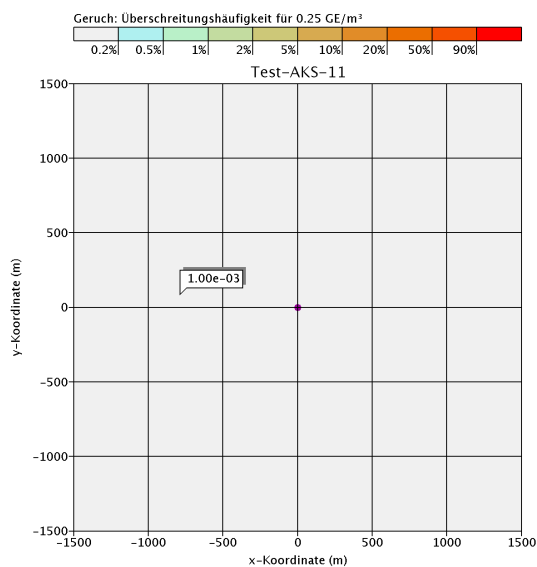
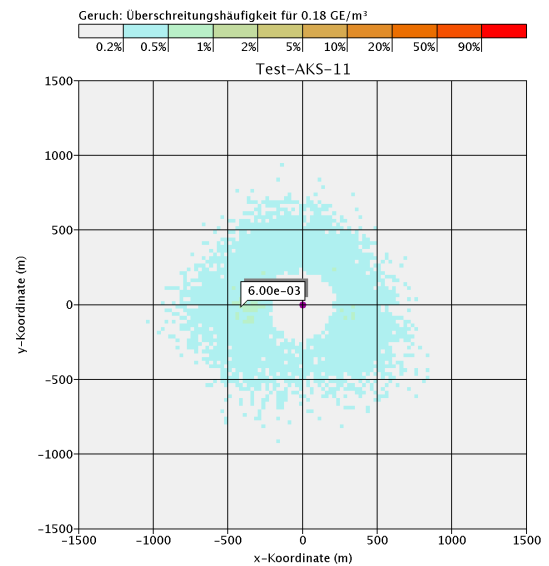
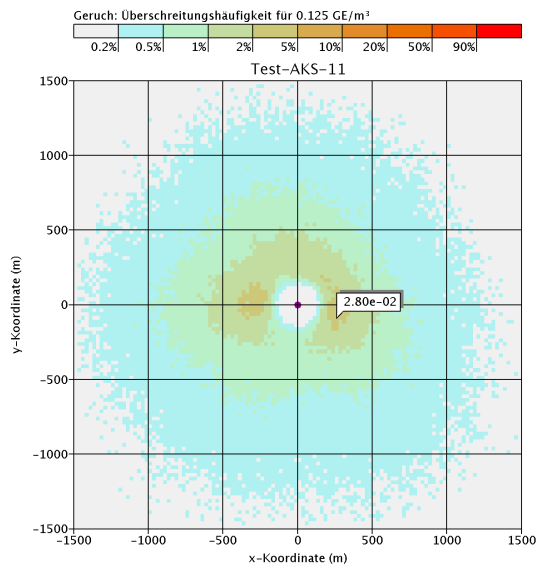
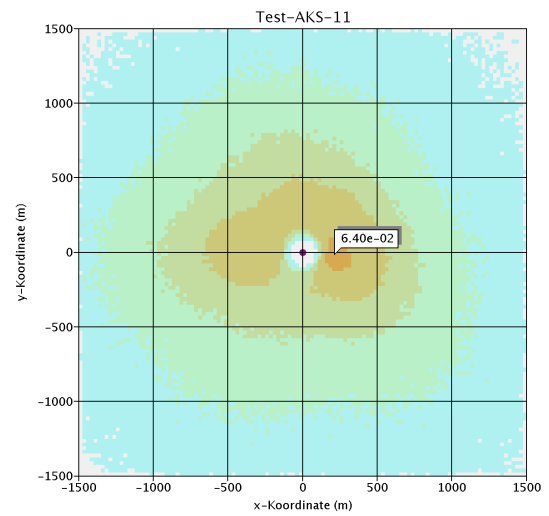
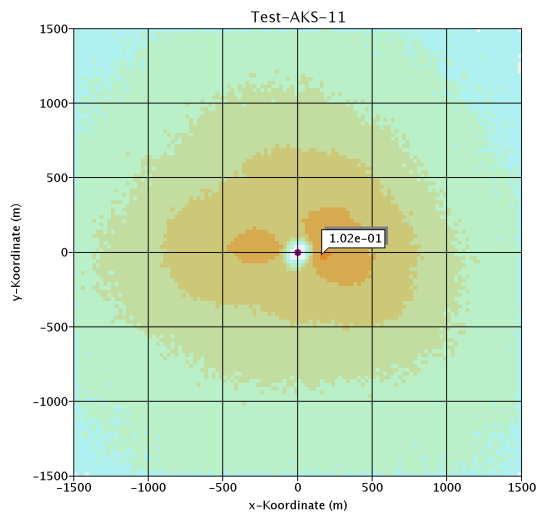
Als drittes Beispiel wird eine Quelle untersucht, die typisch ist für mittelständische Industrie:

- Sammelkamin mit Bauhöhe 28 m
- Austrittsfläche 0,302 m<sup>2</sup>
- Volumenstrom 17 700 m<sup>3</sup>/h
- Ablufttemperatur 25°C
- Emission 36 MGE/h

Es wird ein Zeitanteil der Emission von 100 % der Jahresstunden angesetzt und die Wetterstatistik anonym. aks verwendet ( $z_0=1$  m,  $d_0=6$  m). Die folgenden Bilder zeigen die Häufigkeit der Geruchsstunden für verschiedene Werte der Beurteilungsschwelle. In jedem Bild ist die Lage des Ortes mit der höchsten Geruchsstundenzahl und der entsprechende Wert eingezeichnet.

Im Gegensatz zu den niedrigen Quellen hängt hier das beaufschlagte Gebiet sehr stark von der Wahl der Beurteilungsschwelle ab. Lediglich bei einer niedrigen, schwachen und ausgedehnten Quelle war ähnliches zu beobachten.

Andererseits ist dies auch gleichbedeutend damit, daß in diesem Fall die Geruchsprognose sehr empfindlich von dem Wert der verwendeten Quellstärke abhängt. Würde man die Quellstärke um den Faktor 2 zu hoch ansetzen, stiege bei einer Beurteilungsschwelle  $c_{BS} = 0.25$  GE/m<sup>3</sup> die maximale Geruchsstundenhäufigkeit von 2.8 % auf 10 %, und würde man die Quellstärke um den Faktor 2 zu niedrig ansetzen, sänke die maximale Geruchsstundenzahl auf 0.1 %. Eine Unsicherheit von einem Faktor 2 ist aber selbst bei optimal durchgeführter Olfaktometrie einzukalkulieren.



## 1.4 Geruchswahrnehmung

Bisher wurde nur das Verhältnis von 90-Perzentil zu Mittelwert diskutiert und es wurde davon ausgegangen, daß dann eine Geruchsstunde vorliegt, wenn das 90-Perzentil der Verteilung  $f(c)$  der Konzentrationswerte innerhalb einer Stunde größer ist als die Geruchsschwelle  $c_{GS}$ . Das ist nicht ganz richtig.

Der korrekte Weg, die Geruchshäufigkeit  $\kappa$  zu bestimmen, besteht darin, die Verteilungsdichte  $f(c)$  gemäß Gleichung (1.1) über die Wahrnehmungsfunktion<sup>6</sup>  $P_0$  zu integrieren. Die Wahrnehmungsfunktion wird im Rahmen der Olfaktometrie üblicherweise als logarithmische Normalverteilung mit dem Median  $c_{GS}$  und der Streuung<sup>7</sup>  $\lambda$  angesetzt. In VDI 3882/1 ist als Beispiel für  $H_2S$  der Wert  $\lambda = 0.6$  angegeben. Bei kleinen Werten von  $\lambda$  ist der Unterschied zwischen der bisherigen Betrachtungsweise und der Einbeziehung der Wahrnehmungsfunktion sehr gering.

Bei größeren Werten von  $\lambda$  macht sich bemerkbar, daß auch in einer Situation, in der alle Konzentrationswerte unterhalb der Geruchsschwelle  $c_{GS}$  liegen (das 90-Perzentil ist dann natürlich auch kleiner als  $c_{GS}$ ), bis zu 50 % aller Probanden eine Geruchswahrnehmung melden können, so daß ganz eindeutig eine Geruchsstunde vorliegt.

In Bild 1.11 ist für eine mäandernde Fahne die Geruchshäufigkeit  $\kappa$  in der Fahnenmitte als Funktion des Mäanderns und des lokalen Mittelwertes für verschiedene Werte von  $\lambda$  aufgetragen. Bei  $\lambda = 0.1$  erhält man ohne Mäandern für  $\bar{c}/c_{GS} \gtrsim 0.58$  eine Geruchsstunde ( $\kappa > 0.1$ ), bei stark mäandernder Fahne bereits ab  $\bar{c}/c_{GS} \gtrsim 0.27$ . Dies entspricht den früheren Resultaten. Bei höheren Werten von  $\lambda$  nehmen die Unterschiede immer stärker ab. Bei  $\lambda = 0.6$  variiert das Verhältnis zwischen 0.40 und 0.26 und bei  $\lambda = 1.0$  zwischen 0.27 und 0.23.

Die Berücksichtigung einer realistischen Wahrnehmungsfunktion bewirkt also, daß die Unterschiede in der Bewertung einer mäandernden Fahne weniger von der Stärke des Mäanderns und damit auch von der Quellgeometrie abhängen. Bei Stoffen, für welche die Probanden stärkere Unterschiede (als bei  $H_2S$ ) in der Geruchsempfindlichkeit zeigen, hängt sie praktisch gar nicht mehr vom Mäandern ab. In diesem Fall liegt immer dann eine Geruchsstunde vor, wenn  $\bar{c}/c_{GS}$  den Wert 0.25 überschreitet.

<sup>6</sup>S-Kurve in VDI 3882 Blatt 1, Geruchsschwellenkennlinie in VDI 3881 Blatt 1.

<sup>7</sup>Auflösungsvermögen in VDI 3881/1

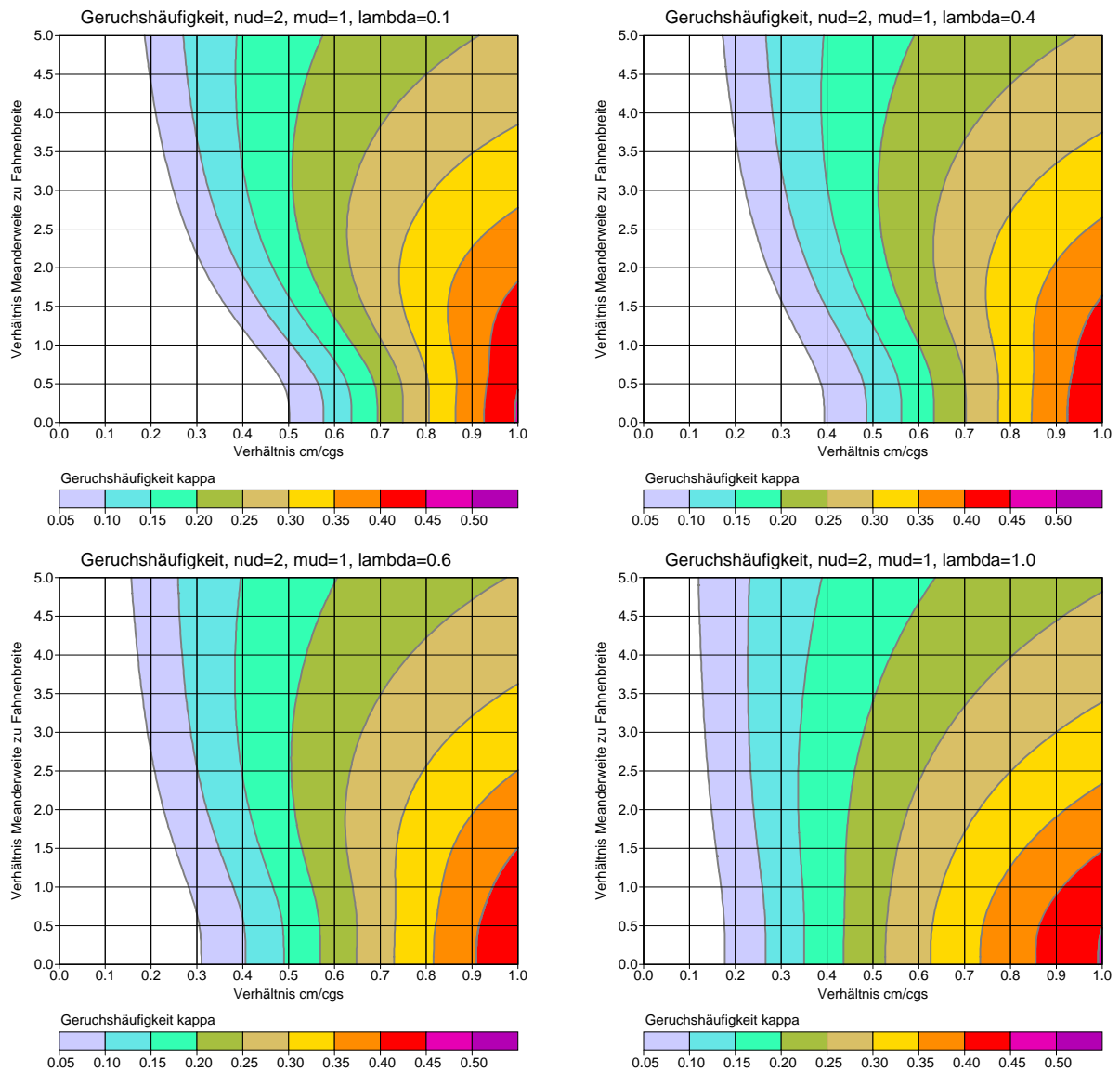


BILD 1.11: Geruchshäufigkeit  $\kappa$  in der Mitte einer mäandernden Fahne in Abhängigkeit von der Mäanderweite  $\bar{\sigma}_y/\hat{\sigma}_y$  und dem lokalen Mittelwert der Konzentration  $\bar{c}/c_{GS}$ . Die verwendete momentane Fahne ist eine Weibull-Verteilung mit  $\hat{\nu} = 2$  und  $\hat{\mu} = 1$ . Die vier Teilbilder unterscheiden sich durch die Wahl des Auflösungsvermögens  $\lambda$ . Links oben:  $\lambda = 0.1$ ; rechts oben:  $\lambda = 0.4$ ; links unten:  $\lambda = 0.6$ ; rechts unten:  $\lambda = 1.0$ .

## 1.5 Mäandern im Partikelmodell

Die Geruchshäufigkeit in einer mäandrierenden Fahne wurde bisher nur im Idealfall einer Gaußfahne betrachtet (Bild 1.8). Bei der Umsetzung in ein Partikelmodell kommt aber hinzu, daß die momentanen Fahnen einen Stichprobenfehler besitzen. Für die statistische Unsicherheit des Mittelwertes ist ein Schätzverfahren verfügbar. Es ist aber nicht klar, in welchem Umfang die Entscheidung über das Vorliegen einer Geruchsstunde durch diesen Stichprobenfehler beeinflusst wird.

### 1.5.1 Zu erwartender Stichprobenfehler

Um dies zu untersuchen, wurden mit LASAT eine Reihe von momentanen Fahnen berechnet, bei denen die Windrichtung in Schritten von 1 Grad verändert wurde. Die Quelle ist punktförmig und 5 m hoch. Die Bodenrauigkeit beträgt  $z_0 = 0.2$  m, die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe beträgt 3 m/s, die Schichtung ist neutral. Das Rechnetz hat eine Maschenweite von 20 m und reicht bis in eine Quellentfernung von 1000 m. Bild 1.12 zeigt die bodennahe Konzentration der mittleren Fahne.

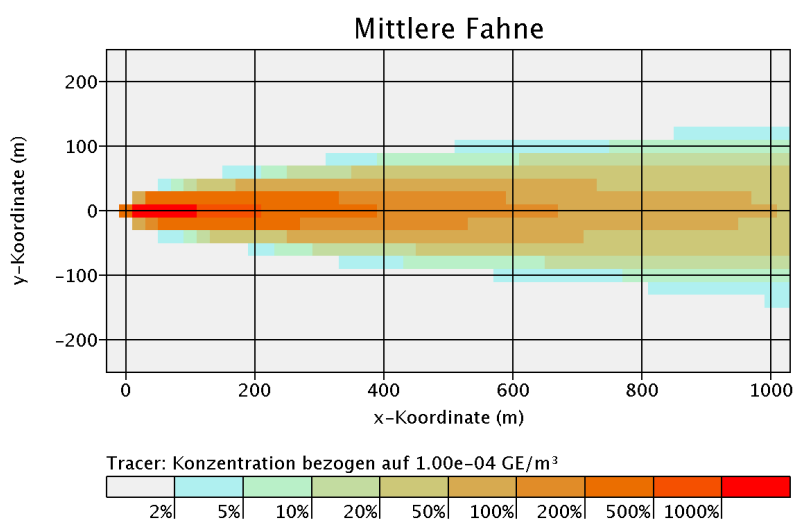


BILD 1.12: Mittelwert der bodennahen Konzentration in der mittleren Fahne.

Zur Simulation des Mäanderns wurden die einzelnen (momentanen) Fahnen so überlagert, wie es einer normalverteilten Windrichtung mit der Streuung  $\varphi$  entspricht. Die Ausbreitungsrechnungen wurden für  $\varphi = 4, 6, 8$  Grad bei  $\lambda = 0.6$  (Bild 1.13) und für  $\lambda = 0.3, 0.6, 0.9$  bei  $\varphi = 4$  Grad (Bild 1.14) durchgeführt. Jede Rechnung wurde 10 mal mit jeweils unterschiedlichen Zufallszahlen durchgeführt. Die verwendete Teilchenzahl war so, wie sie AUSTAL2000 bei einer Zeitreihenrechnung mit Qualitätsstufe  $qs=0$  verwenden würde.

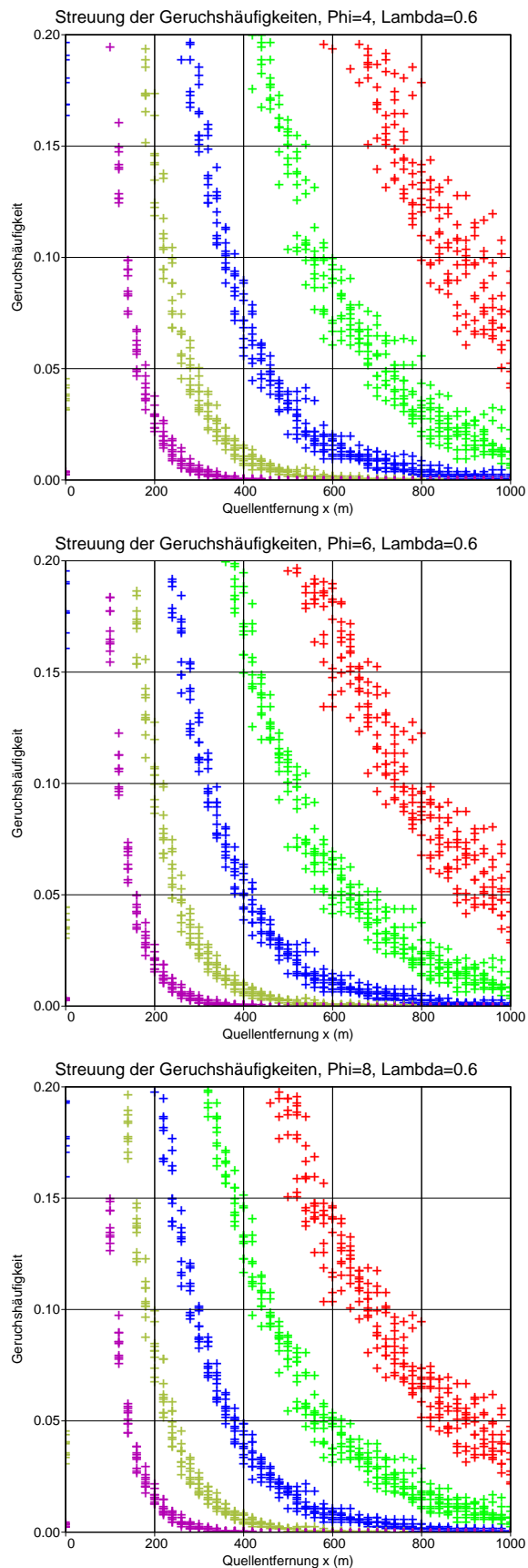


BILD 1.13: Prognostizierte Geruchshäufigkeit als Funktion der Quellentfernung für verschiedene Werte der Beurteilungsschwelle (unterschiedliche Farbe, mit jedem Farbwechsel ändert sich der Wert der Beurteilungsschwelle um den Faktor 2). Die 10 senkrecht übereinander stehenden Kreuze gleicher Farbe gehören zu 10 Rechnungen, die sich nur im Stichprobenfehler unterscheiden. Die Parameter zur Geruchsbeurteilung sind  $\lambda = 0.6$  und  $\varphi = 4$  (oben),  $\varphi = 6$  (mitte),  $\varphi = 8$  (unten).



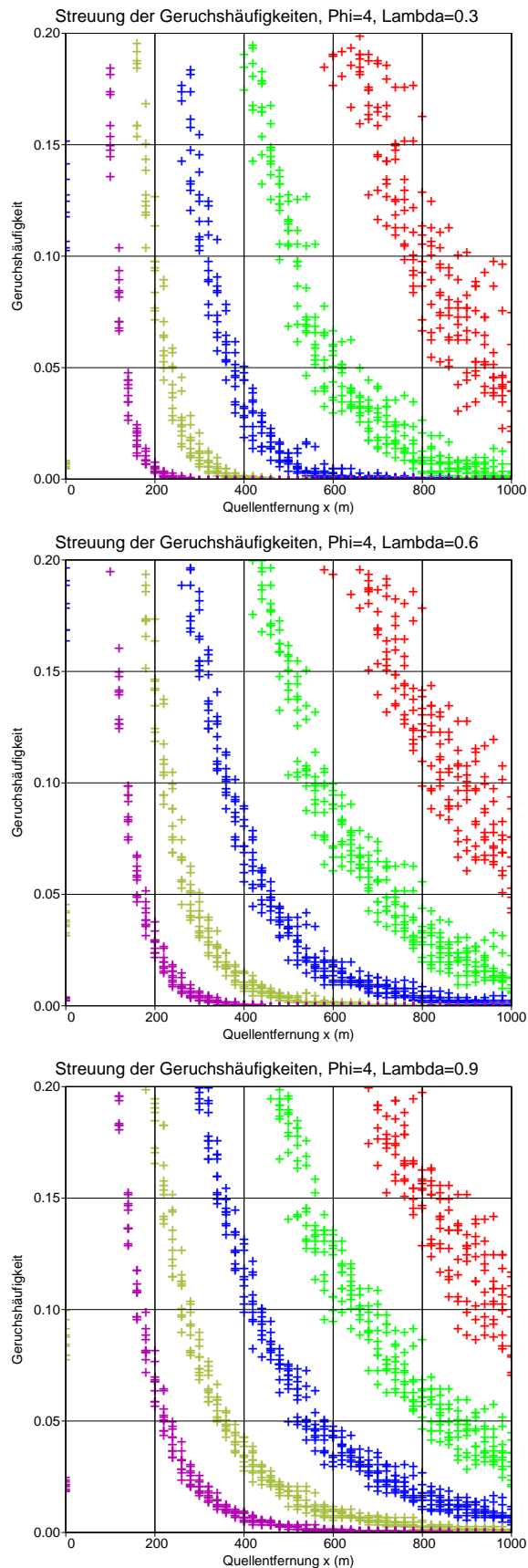


BILD 1.14: Prognostizierte Geruchshäufigkeit als Funktion der Quellentfernung für verschiedene Werte der Beurteilungsschwelle (unterschiedliche Farbe, mit jedem Farbwechsel ändert sich der Wert der Beurteilungsschwelle um den Faktor 2). Die 10 senkrecht übereinander stehenden Kreuze gleicher Farbe gehören zu 10 Rechnungen, die sich nur im Stichprobenfehler unterscheiden. Die Parameter zur Geruchsbeurteilung sind  $\varphi = 4$  und  $\lambda = 0.3$  (oben),  $\lambda = 0.6$  (mitte),  $\lambda = 0.9$  (unten).

Der Stichprobenfehler in der Ermittlung der Geruchshäufigkeit kann in größerer Quellentfernung bis zu einem Faktor 2 ansteigen. Da die Kurven, insbesondere im quellnahen Bereich, sehr steil verlaufen, hat dies aber nur einen mäßigen Einfluß auf den Entfernungsbereich, innerhalb dessen das Vorliegen einer Geruchsstunde prognostiziert wird. Diese Entfernung hängt etwa gleich stark vom Auflösungsvermögen  $\lambda$  des betreffenden Stoffes wie von der Stärke des Mäanderns (Windrichtungsstreuung  $\varphi$ ) ab.

### 1.5.2 Detailarbeiten

Die hier bisher vorgestellten Verfahren und Ergebnisse dienen nur dazu, einen Überblick über die grundsätzlichen Eigenschaften des Konzeptes und die zu erwartenden Probleme zu erhalten. Für eine Umsetzung in das Ausbreitungsmodell müssen die Ergebnisse besser abgesichert und die Rechenverfahren neu programmiert werden.<sup>8</sup>

Um das Konzept, die Konzentrationsfluktuationen innerhalb einer Stunde durch das Mäandern einer Fahne zu modellieren und daraus das Vorliegen einer Geruchsstunde zu entscheiden, sind daher folgende Vorarbeiten notwendig:

1. Es muß die Art der Verteilungsfunktion bestimmt werden, welche die Konzentrationsfluktuationen in der momentanen Fahne am besten beschreibt.
2. Die Parameter dieser Verteilung sind in Abhängigkeit vom Abstand zur Fahnenachse und eventuell weiterer Parameter zu bestimmen.
3. Es ist ein Algorithmus festzulegen, mit dem sich das Mäandern der Fahnenachse beschreiben läßt, und die zugehörigen Parameter sind zu bestimmen.
4. Es ist zu untersuchen, ob sich auch ein vertikales Mäandern, das bei hohen Quellen und labiler Schichtung bedeutsam sein kann, modellieren läßt.
5. Es ist ein effektives Verfahren zur Überlagerung der momentanen Fahnen beim Mäandern und Bestimmung der resultierenden Verteilungsfunktion zu entwickeln.
6. Das für eine Punktquelle entwickelte Verfahren ist auf ausgedehnte Quellen und Mehrquellensysteme zu erweitern.
7. Es ist ein effektives Verfahren zur Berechnung der Wahrnehmungshäufigkeiten aus den Konzentrationsfluktuationen und der Entscheidung, ob eine Geruchsstunde vorliegt, zu entwickeln.

### 1.5.3 Praxisgerechte Lösung

Das entwickelte Verfahren soll praxisgerecht sein. Das bedeutet in erster Linie:

<sup>8</sup>Die für die Tests verwendeten Verfahren sind in JAVA programmiert, um schnell und sicher den gewünschten Überblick zu erhalten. Für AUSTAL2000G müssen sie in C umgesetzt und neu geprüft werden.

- einfach handhabbar
- zuverlässig
- schnell

Diese Forderungen sind nur schwer gleichzeitig zu erfüllen und voraussichtlich wird man einen Kompromiß suchen müssen.

In der Handhabbarkeit ist zunächst keine Einschränkung gegenüber AUSTAL2000 zu erwarten. Es ist lediglich, um die Wirkung des betrachteten Geruchsstoffes zu beschreiben, die Angabe der Wahrnehmungsfunktion  $P_0(c)$  erforderlich. Hierzu reicht es vermutlich aus, die Steilheit der S-Kurve anzugeben. Als Ergebnis der Ausbreitungsrechnung wird nur eine Größe angegeben, nämlich die Häufigkeit des Auftretens von Geruchsstunden,  $h_{G;0}$  in der Terminologie von VDI 3788 Blatt 1.

Damit der Anwender die Zuverlässigkeit dieses Ergebnisses einschätzen kann, sollte das Programm den zugehörigen statistischen Fehler angeben. Hierzu ist ein neues Verfahren zu entwickeln, denn das in AUSTAL2000 zur Schätzung der statistischen Unsicherheit von Stundenmittelwerten verwendete Verfahren ist nicht bei Geruchsstunden einsetzbar.

Der Wunsch nach einem schnellen Verfahren bereitet größere Schwierigkeiten. Grundsätzlich ist der Rechenaufwand erheblich höher als bei AUSTAL2000, da nicht nur die über eine Stunde gemittelte Fahne sondern die momentane Fahne mit ihrem Mäandern simuliert werden muß. Dies erfordert einmal wegen der geringeren Fahnenbreite eine kleinere Maschenweite und darum — und auch wegen der geringeren Mittelungszeit — eine höhere Partikelzahl, wenn man keine erhöhte statistische Unsicherheit in Kauf nehmen will.

Bei einer Ausbreitungsrechnung mit einer Wetterstatistik läßt sich der Aufwand dadurch reduzieren, daß das Mäandern der Windrichtung in Schritten von 1 Grad simuliert wird. Da in AUSTAL2000 die Windrichtung bereits in Schritten von 2 Grad variiert wird, würde dies nur eine Verdoppelung des Aufwandes bedeuten. Allerdings müssen die Ergebnisse der Einzelschritte jetzt separat gespeichert und anschließend ausgewertet werden. Dies erfordert zumindest einen höheren Aufwand an Speicherplatz.

Bei der Verwendung einer meteorologischen Zeitreihe kommt man nicht umhin, das Mäandern explizit zu modellieren, also beispielsweise die Windrichtung in Zeitschritten von 1 Minute oder 5 Minuten zu variieren, die Konzentrationsverteilungen über diese kurzen Zeiten zu ermitteln und damit das Vorliegen einer Geruchsstunde zu prüfen. Als Notbehelf bleibt auch noch die Möglichkeit, eine Zeitreihe in eine Statistik umzuwandeln und entsprechend weiterzuverfahren.

Einen erheblichen Geschwindigkeitsgewinn kann man dadurch erzielen, daß man die Geruchsprognose nicht flächendeckend durchführt sondern nur für die Beurteilungspunkte. Dann braucht für die Windrichtungen, bei denen kein Beurteilungspunkt beaufschlagt wird, auch gar keine Ausbreitungsrechnung durchgeführt zu werden. Ein solches Vorgehen bietet sich bei der Geruchsprognose an, da häufig nur in kleinen Teilbereichen oder an einzelnen Orten (Beschwerdeführer) eine Beurteilung erforderlich ist.

Ein anderer Gesichtspunkt verschärft allerdings das Rechenzeitproblem: Bei der Geruchsprognose hat man es meist mit niedrigen Quellen zu tun, bei denen der Gebäudeeinfluß nicht vernachlässigt werden kann. Zwar kann zur Zeit in AUSTAL2000 noch keine Gebäudeumströmung gerechnet werden, aber eine entsprechende Erweiterung ist vorgesehen. Daher sollte auch dieser Aspekt in AUSTAL2000G berücksichtigt werden. Die Variation der Windrichtung in so feinen Schritten, wie es zur Darstellung des Mäanderns der Fahne erforderlich ist, kann bei 3-dimensionalen Wind- und Turbulenzfeldern einen erheblichen Aufwand bedeuten.

Zur Festlegung eines praxisgerechten Verfahrens sind folgende Arbeiten erforderlich:

1. Es ist zu prüfen, ob die Wahrnehmungsfunktion  $P_0(c)$  (S-Kurve) als logarithmische Normalverteilung angesetzt werden kann und welche Größe einen geeigneten Eingabeparameter zur Festlegung des Formfaktors darstellt.
2. Die statistische Sicherheit der Aussage darüber, ob eine Geruchsstunde vorliegt oder nicht, ist zu prüfen und zunächst die Relation zwischen dieser Sicherheit und Mittelwert und Stichprobenfehler der berechneten Konzentrationswerte darzustellen. Es ist zu prüfen, ob die statistische Sicherheit auch direkt vom Programm evtl. mit Hilfe des *bootstrap*-Verfahrens bestimmt werden kann und wie hoch der dafür bei einer Ausbreitungsrechnung zu veranschlagende Aufwand an Rechenzeit ist.
3. Das Mäandern der Windrichtung ist durch Überlagerung von Fahnen, die durch Windrichtungsänderungen von 1 Grad entstehen, zu modellieren und folgende Alternativen sind auf den erforderlichen Aufwand hin zu prüfen:
  - (a) Alle für die Berechnung der Geruchshäufigkeit an den Aufpunkten erforderlichen momentanen Fahnen werden zunächst berechnet und gespeichert. Sodann werden alle Aufpunkte durchgegangen und durch Überlagerung der gespeicherten Fahnen die Wahrnehmungshäufigkeit von Geruch am jeweiligen Aufpunkt berechnet.
  - (b) Es werden alle für die Berechnung der Geruchshäufigkeit an den Aufpunkten erforderlichen momentanen Fahnen berechnet und sobald eine Fahne berechnet ist, wird für alle Aufpunkte vermerkt, welchen Anteil sie zur Geruchshäufigkeit am jeweiligen Aufpunkt beiträgt.
4. Das Mäandern der Windrichtung ist nach dem in Abschnitt 1.1 entwickelten Verfahren in Zeitschritten von 1 bis 5 Minuten explizit durchzuführen und die von den momentanen Fahnen herrührenden Beiträge zu den Geruchshäufigkeiten an den Aufpunkten sind zu addieren.
5. Es ist ein Verfahren zu entwickeln, das eine vorgegebene Wetterstatistik oder meteorologische Zeitreihe so reduziert, daß nur die für die Beaufschlagung der Aufpunkte wichtigen Wetterlagen ausgewählt werden.
6. Es ist zu prüfen, welche weiteren Reduzierungen des Rechenaufwands möglich sind, ohne die Zuverlässigkeit der Immissionsprognose in Frage zu stellen.
7. Unter Einbeziehung des Ausbreitungsmodells LASAT, das in der Lage ist, 3-dimensionale Wind- und Turbulenzfelder mit Gebäudeumströmung zu erzeugen, ist zu prüfen, ob das

entwickelte Verfahren auch noch bei Hinzunahme von Gebäudeumströmung praktikabel ist. Eventuell sind geeignete Alternativen aufzuzeigen.

### 1.5.4 Besondere Anforderungen

Das Modell AUSTAL2000G soll auf der Basis einer Ausbreitungsklassenstatistik oder einer meteorologischen Zeitreihe die Geruchsstundenhäufigkeit prognostizieren, so daß eine Bewertung nach GIRL möglich ist. Zusätzlich ist aber für die Modellentwicklung und für die spätere Verifizierung und Validierung erforderlich, daß differenziertere Möglichkeiten der Eingabe bestehen und auch weitere Größen ausgegeben werden können.

Bei der Modellentwicklung, insbesondere bei der Bearbeitung der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Aufgaben, ist es wohl in den meisten Fällen zweckmäßig, separate Programme zu erstellen und nicht AUSTAL2000G damit zu überfrachten. Die Verifizierung und Validierung muß aber auch später anhand des Original-Programms möglich sein, so daß hier entsprechende Vorkehrungen zu treffen sind.

Ein Geruchsstoff ist ein Spurenstoff, wie andere in der TA Luft aufgeführten Stoffe auch. Er sollte sich genauso ausbreiten und seine Kenngrößen sollten ebenfalls mit AUSTAL2000 bestimmbar sein. Um zu überprüfen, ob die Immissionsberechnung in AUSTAL2000G mit der in AUSTAL2000 konsistent ist, sollte in AUSTAL2000G zumindest vorgesehen werden, auch den (Jahres-) Mittelwert der Geruchsstoffkonzentration aus der Häufigkeitsverteilung zu berechnen und auszugeben.

Um das Modell anhand von Fahnenbegehungen zu überprüfen, ist eine Erweiterung der Eingabemöglichkeiten erforderlich. Häufig liegen für die Begehungen detaillierte meteorologische Informationen vor (z.B. aus USAT-Messungen), aus denen eventuell sogar das konkrete Mäandern der Windrichtung ablesbar ist. Es sollte die Möglichkeit vorgesehen werden, diese Informationen in der Ausbreitungsrechnung auch zu verwerten.

Bei einer Fahnenbegehung liefert jeder Proband Geruchshäufigkeiten. Um diese direkt mit dem Ergebnis der Ausbreitungsrechnung vergleichen zu können, sollte das Programm auch in der Lage sein, beispielsweise in einer Zeitreihe Geruchshäufigkeiten auszugeben. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Geruchserhebung in einer Fahnenbegehung in der Regel nicht eine Stunde sondern nur 10 oder 20 Minuten dauert.

Um diese besonderen Anforderungen zu erfüllen, sind folgende Arbeiten erforderlich:

1. Neben der Ausgabe von Geruchsstundenhäufigkeiten ist in AUSTAL2000G auch die optionale Ausgabe des Mittelwertes der Geruchsstoffkonzentration vorzusehen.
2. Die Eingabe der meteorologischen Größen in einer Zeitreihe ist so zu erweitern, daß auch kürzere Meßintervalle (z.B. 10 Minuten oder 1 Minute) möglich sind und auch die Geschwindigkeitsfluktuationen ( $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$ ) vorgebbar sind und vom Meteorologiemodell berücksichtigt werden.



3. Die Ausgabe von AUSTAL2000G ist so zu erweitern, daß für die Beurteilungspunkte die Zeitreihe der prognostizierten Geruchshäufigkeiten ausgegeben werden kann. Der Bezugszeitraum sollte dabei auch auf 10 Minuten reduziert werden können.

## 1.5.5 Praktische Realisierung

Das Programm AUSTAL2000G wird aus dem Programm AUSTAL2000 entwickelt. Dies garantiert eine Konsistenz in der Art der Handhabung und der Form der Ergebnisdarstellung. An verschiedenen Stellen sind Änderungen notwendig, um der geänderten Fragestellung Rechnung zu tragen. Im folgenden werden — unter Bezug auf die Unterprogramme von AUSTAL2000 — die wichtigsten Punkte, soweit sie jetzt schon absehbar sind, aufgeführt:

### 1. Hauptprogramm `austal2000g`

Name und Erscheinungsbild des Hauptprogramms und die Protokolldatei sind der veränderten Aufgabenstellung anzupassen.

### 2. Einleseprogramm `TalInp`

Als neue Eingabeparameter sind `gs` (Geruchsstoff) und `ld` (Auflösungsvermögen  $\lambda$  der Wahrnehmungsfunktion  $P_0(c)$ ) einzuführen. Die nicht benötigten Parameter `lq` (Flüssigwassergehalt), `rq` (relative Feuchte) und die Quellstärken der Schadstoffe der TA Luft sind zu entfernen. Über den Optionsparameter `os` soll es möglich sein, die effektive Geruchsschwelle `Cgs` und die Dauer des Mittelungsintervalls bei der Ausgabe `Tav` festzulegen, die zusätzliche Ausgabe der Konzentrationsmittelwerte zu veranlassen (Option `+MEANVALUE`) und die Erstellung einer Zeitreihe von Geruchshäufigkeiten (Option `+FREQUENCY`).

### 3. Steuerung der Ausbreitungsrechnung `TalDef`

Es ist bei der Übernahme der Zeitreihe `zeitreihe.dmna` die Möglichkeit vorzusehen, auch in anderen Zeitschritten als 1 Stunde fortzuschreiten, die Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  zu übernehmen und diese Information an die eigentliche Ausbreitungsrechnung weiterzugeben.

### 4. Vorgabe der Meteorologie `TalPrf`

Die meteorologischen Größen sind so vorzugeben, wie sie zur Berechnung einer momentanen Fahne benötigt werden. Zusätzlich ist das Mäandern der Windrichtung zu modellieren und der Rechenablauf so zu steuern, daß die Beiträge der momentanen Fahnen während des Mäanderns einzeln erfaßt werden können.

### 5. Berechnung der Häufigkeitsverteilung `TalFrq`

Es ist ein neues Unterprogramm `TalFrq` zu schreiben, das aus den für die momentane Fahne am Ort der Beurteilungspunkte berechneten Konzentrationswerten eine Verteilungsfunktion der Konzentrationsfluktuationen konstruiert, diese innerhalb des Bezugszeitraums (gewöhnlich 1 Stunde) überlagert und anschließend mit Hilfe der Wahrnehmungsfunktion die Häufigkeit der Geruchswahrnehmung ermittelt und speichert.

## 6. Berechnung der Konzentration TalDos

Für die momentanen Fahnen sind die Konzentrationswerte am Ort der Beurteilungspunkte auszurechnen und dem Programm TalFrq zur Geruchsprognose zu übergeben.

## 7. Speichern der Ergebnisse TalMon

Die Zeitreihe der an den Beurteilungspunkten berechneten Geruchshäufigkeiten ist abzuspeichern und in der Protokolldatei sind die erhaltenen Häufigkeiten der Geruchsstunden zu vermerken.

# 1.6 Alternativer Modellansatz

Der in Abschnitt 1.5 beschriebene Weg ist die direkte Umsetzung des Konzeptes, die Geruchshäufigkeit für die Einzelsituation aus der Verteilungsfunktion der Konzentrationsfluktuationen zu bestimmen. Das Verfahren hat damit eine robuste theoretische Basis. Es hat aber auch eine Reihe von Nachteilen:

1. Die Rechenzeiten können dramatisch anwachsen. Bei einer AKS-Rechnung handelt es sich möglicherweise nur um einen Faktor 2. Bei einer Zeitreihenrechnung kann es erheblich mehr sein. Hier muß man bei Rechnungen mit 3-dimensionalen Windfeldern (komplexes Gelände oder Gebäudeumströmung) auch die Zeit mit einkalkulieren, die für die Berechnung der Modell-Meteorologie bei jeder Windrichtungsänderung benötigt wird. Im Beispiel haus-01 ist dies jedesmal gut 1 Sekunde<sup>9</sup> bei horizontal 50×50 Maschen. Dies summiert sich bei einer Zeitreihenrechnung über ein Jahr auf 3 Stunden. Wird jede Einzelsituation in 10 Momente mit unterschiedlicher Windrichtung aufgelöst, sind es 30 Stunden. Bei einem Netz mit typischerweise 100×100 Maschen kommt man auf 5 Tage. Bei Gebäudeumströmung wird die Verwendung geschachtelter Netze notwendig sein und die Rechenzeit steigt noch weiter. Dieser Aufwand ist unabhängig davon, ob man eventuell nur für einige Beurteilungspunkte rechnet und wie viele Beurteilungspunkte man verwendet.
2. Die Kompatibilität zu AUSTAL2000 wird trotz aller Bemühungen nicht erreicht. Dies würde erfordern, daß die durch das Mäandern entstehende mittlere Fahne mit der in AUSTAL2000 berechneten Fahne übereinstimmt. Das läßt sich aber nicht erreichen, denn hierzu müßte man die Fahnenbreite kennen. Diese ist aber nicht durch das Modell vorgegeben (wie beispielsweise bei einem Fahnen-Modell) sondern kann nur durch eine entsprechende Ausbreitungsrechnung bestimmt werden. Dies würde auch nur bei einer einzigen Punktquelle und nicht bei einer ausgedehnten Quelle oder einem Ensemble von Quellen funktionieren.
3. Um das beschriebene Verfahren durchführen zu können, muß das Auflösungsvermögen  $\lambda$  für den betreffenden Geruchsstoff bekannt sein. Wenn die Quellstärke olfaktometrisch bestimmt wird, ist dies kein Problem. Bei einer Vielzahl von Ausbreitungsrechnungen

<sup>9</sup>GCC unter Linux auf A2000+

wird aber mit Emissionsfaktoren gearbeitet, so daß zumindest für die am häufigsten vorkommenden Geruchsstoffe verbindliche Werte von  $\lambda$  vorgegeben werden müßten.

Der ganze beschriebene Aufwand hat das Ziel, möglichst zuverlässig die Beurteilungsschwelle  $c_{BS}$  zu bestimmen, also den Konzentrationswert, bei dessen Überschreitung durch das Stundenmittel der Konzentration auf das Vorliegen einer Geruchsstunde geschlossen werden kann. Sie variiert den beschriebenen Testrechnungen zufolge zwischen 0.23 und 0.48 GE/m<sup>3</sup> (bei  $\lambda \geq 0.4$ ).

Die Beurteilungsschwelle geht in die Modellrechnungen an der gleichen Stelle ein wie die Quellstärke. Diese ist nach Aussage von Fachleuten auch unter günstigen Bedingungen mit einer Unsicherheit von einem Faktor 2 behaftet und diese Unsicherheit wird allgemein toleriert.

Bei niedrigen Quellen hat die Wahl des genauen Wertes für die Beurteilungsschwelle in der Regel nur einen geringen Einfluß auf die Häufigkeit der Geruchsstunden im Jahr, wenn man sich hier im Bereich von 5 % bis 10 % bewegt. Lediglich wenn man sich im Nahbereich einer ausgedehnten, homogenen, schwachen Quelle befindet und es sich um einen Geruchsstoff handelt, der scharf erkennbar ist (kleines  $\lambda$ ), führt die Wahl eines zu kleinen Wertes  $c_{BS}$  zu einer deutlichen Überschätzung der Häufigkeit von Geruchsstunden. In dieser Situation dürfte die Quellstärkebestimmung aber das Hauptproblem darstellen.

Bei hohen Quellen wird zwar eine große Abhängigkeit von der Wahl der Beurteilungsschwelle beobachtet. Hier ist der Unsicherheitsbereich für  $c_{BS}$  aber wesentlich geringer als bei niedrigen Quellen und die Unsicherheit in der Quellstärkebestimmung dominiert eindeutig.

Unter diesen Gesichtspunkten bietet es sich an, vereinfachend mit einem festen Wert für die Beurteilungsschwelle  $c_{BS}$  zu arbeiten und folgendermaßen vorzugehen:

1. Eine Einzelsituation wird als Geruchsstunde gezählt, wenn der mit AUSTAL2000 berechnete Mittelwert der Konzentration größer als 0.25 GE/m<sup>3</sup> ist.
2. Die in AUSTAL2000 bereits vorhandenen Mechanismen zur Handhabung des maximalen Stundenmittelwertes werden verwendet, um die Häufigkeit von Geruchsstunden zu ermitteln und auszugeben. Details müssen noch ausgearbeitet werden.
3. Besteht der Verdacht, daß verfahrensbedingt eine zu große Häufigkeit von Geruchsstunden ausgewiesen wurde (Nahbereich ausgedehnter Quellen), kann eine Fahnenbegehung durchgeführt werden und die für die Ausbreitungsrechnung benötigte Quellstärke durch Anpassung an die Begehungsergebnisse ermittelt werden.

Das bietet folgende Vorteile:

- Das Verfahren ist streng konform zur TA Luft.
- Es läßt sich mit relativ geringem Aufwand realisieren.
- Die Unsicherheit ist nicht größer, als sie bisher auch bei den Eingangsdaten toleriert wird.
- Für Sonderfälle können aus Begehungen erhaltene Erkenntnisse berücksichtigt werden.



## Kapitel 2

# Entwicklung von Validierungsstrategien

### 2.1 Generelle Überlegungen

Die Validierung eines Ausbreitungsmodells hat die Aufgabe, den Unterschied zwischen dem modellierten Ergebnis und der Realität quantitativ zu beschreiben. Bei der Geruchsausbreitungsrechnung nach GIRL geht es in erster Linie darum, die Häufigkeit von Geruchsstunden im Jahresmittel zu prognostizieren. Es ist also die Anzahl der prognostizierten Geruchsstunden mit der Anzahl der beobachteten Geruchsstunden zu vergleichen.

Zur Erhebung der Geruchsstundenhäufigkeit im Jahresmittel werden üblicherweise Rasterbegehungen durchgeführt. Diese haben aber den Nachteil, daß der Stichprobenumfang relativ gering ist, was eine hohe statistische Unsicherheit mit sich bringt. Eine weitere Unsicherheit entsteht durch die Variation der Geruchsempfindlichkeit innerhalb eines Probandenkollektivs.

Andererseits können die Aussagen eines Ausbreitungsmodells nicht zuverlässiger sein als die Eingabeparameter, auf denen die Rechnung aufbaut. Hier ist insbesondere die olfaktometrisch bestimmte Quellstärke ein großer Unsicherheitsfaktor. Selbst bei sorgfältiger Durchführung der Olfaktometrie durch erfahrene Anwender muß mit einer Unsicherheit von einem Faktor 2 gerechnet werden.

Um zwischen der Unsicherheit, die in der Prognose steckt, und der Unsicherheit, die der Validierungsprozeß mit sich bringt, unterscheiden zu können, ist es zweckmäßig, nicht nur auf die Endaussage (Geruchsstundenhäufigkeit) zu schauen, sondern auch das Verfahren selbst mit seinen Zwischenschritten und Zwischenergebnissen zu analysieren und gezielt Einzelsituationen, wie sie durch Fahnenbegehungen erfaßt werden, in die Analyse einzubeziehen.

Im Augenblick ist es noch nicht klar, wie die Arbeitsweise des Geruchsausbreitungsmodells genau sein wird. Folgende beiden Modelltypen werden diskutiert:

Typ A: Das Mäandern der Fahne wird explizit berücksichtigt und die effektive Beurteilungsschwelle variiert mit jeder Einzelsituation.

Typ B: Es wird mit einer festen Beurteilungsschwelle  $c_{BS}$  gearbeitet.

Sofern mit einer einheitlichen Beurteilungsschwelle gearbeitet wird (Modell B), sind die Zwischenschritte verborgen. Aber sie sind implizit vorhanden, denn die Wahl der Beurteilungsschwelle ist auch das Ergebnis aus Erfahrungen, die an dem Modell der mäandrierenden Fahne (Modell A) gewonnen wurden. Um diese Zwischenschritte sichtbar und analysierbar zu machen, ist es in beiden Fällen sinnvoll, ein einfaches Fahnenmodell zu konstruieren, das in den wesentlichen Punkten mit dem zu prüfenden Modell übereinstimmt, aber zusätzlich die Möglichkeit bietet, diese Zwischenschritte einzusehen.

## 2.2 Verwendbare Ergebnisse und Zwischenergebnisse

Das Gesamtergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Anzahl der Geruchsstunden im Jahr, wird kaum für eine Validierung in Frage kommen, da die Vergleichsgröße, das Ergebnis einer Rasterbegehung, in der Regel mit einer zu großen Unsicherheit behaftet ist. Trotzdem sollten hier Vergleiche durchgeführt werden, um die Aussagen einander gegenüberstellen zu können.

Die dem Gesamtergebnis zu Grunde liegende Einzelentscheidung, ob eine bestimmte Ausbreitungssituation an einem bestimmten Ort als Geruchsstunde zu bewerten ist, kann auch für Vergleiche mit Fahnenbegehungen genutzt werden, sofern die Meteorologie bei der Begehung umfassend und zeitlich hoch aufgelöst gemessen wurde. Aussagekräftig sind vorwiegend die Begehungsergebnisse, bei denen eine Geruchshäufigkeit  $\kappa$  in der Nähe von 0.1 festgestellt wurde, denn hier kann geprüft werden, ob bei Werten größer 0.1 das Modell eine Geruchsstunde ausweist, bei Werten kleiner 0.1 dagegen nicht. Die Extremfälle „kein Geruch“ und „dauernder Geruch“ sind da bei einem Vergleich mit dem Modellergebnis weniger aussagekräftig, außer das Modell kommt zu dem gegenteiligen Schluß.

Leider werden die Fahnenbegehungen meist so angelegt, daß die Probanden häufige Gerucherfolge haben, und sind daher für die direkte Modellvalidierung weniger zu gebrauchen. Man muß außerdem beachten, daß die Begehungen in der Regel nur 10 bis 20 Minuten dauern. Dies führt zu systematischen Abweichungen gegenüber dem Resultat, das man bei einer Begehungszeit von 60 Minuten erhalten würde, denn im Zeitraum einer Stunde variiert die Windrichtung stärker als innerhalb von 10 Minuten, so daß die effektive Fahne breiter wird. Damit nimmt die Geruchshäufigkeit an den Flanken zu und in der Fahnenmitte ab.

Für Vergleiche mit Fahnenbegehungen ist der Modelltyp A besser geeignet, mit dem auch Geruchshäufigkeiten berechnet werden können. Das Modell sollte auch so angelegt sein, daß die Zeitreihe der Meteorologie in kurzen Zeitschritten (etwa 1 Minute) angebar ist, so daß das reale Mäandrieren der Fahne — sofern gemessen — näherungsweise modelliert werden kann und Abweichungen des Fahnenprofils von der idealen Gaußglockenform darstellbar sind.

Modell A berechnet die Geruchshäufigkeit aus der modellierten Verteilung der Konzentrationsfluktuationen, wobei die Verteilung in der über eine Stunde gemittelten Fahne aus der Verteilung in der momentanen Fahne berechnet wird. Beide Verteilungsfunktionen sind meßbar, wobei die



mittlere Fahne mit ortsfesten Meßgeräten ausgemessen werden kann und LIDAR-Messungen Informationen über die momentane Fahne liefern können.

Da alle Modelltypen auch den Stundenmittelwert der Konzentration berechnen, ist diese Größe auch für Vergleiche mit klassischen Ausbreitungsexperimenten verwendbar.

## 2.3 Experimentelle Daten

Für die Validierung stehen Daten aus Ausbreitungsexperimenten (physikalische Messungen) und aus Geruchsbegehungen zur Verfügung. Ein Teil dieser Daten ist bereits im Rahmen der Validierung des Ausbreitungsmodells MEPOD<sup>1</sup> ausgewertet worden.

### 1. Naturmessungen

In der Literatur sind verschiedentlich Messungen von Konzentrationsfluktuationen beschrieben und analysiert worden.<sup>2,3,4,5,6</sup> Datensätze stehen zur Verfügung für einige BOREX-Experimente<sup>7</sup> und das GUARDO-Experiment. Hierbei handelt es sich um LIDAR-Messungen, die auch Informationen über die momentane Fahne liefern.

### 2. Windkanalmessungen

Im Windkanal des Meteorologischen Institutes der Universität Hamburg sind Messungen von Konzentrationsfluktuationen im Rahmen des Projektes KSP<sup>8</sup> und des Forschungsprogramms „BW PLUS — Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“<sup>9</sup> durchgeführt worden. Sie enthalten detaillierte Informationen über die Konzentrationsfluktuationen in der mittleren Fahne, teilweise unter Einbeziehung von Gebäudeeinflüssen.

---

<sup>1</sup>L. Janicke: Das Geruchsausbreitungsmodell MEPOD und seine Implementierung in IBJmepod. Ing.-Büro Janicke, Dunum (November 1999)

<sup>2</sup>H.E. Jørgensen and T. Mikkelsen: Lidar Measurements of Smoke Plumes During the Guardo 1990 Experiments. Risø National Laboratory, Roskilde, 1992

<sup>3</sup>S.R. Hanna and E.M. Insley: Time Series Analysis of Concentration and Wind Fluctuations. Boundary Layer Meteorol. 47 (1989), 131-147.

<sup>4</sup>E. Yee, P.R. Kosteniuk, G.M. Chandler, C.A. Biltoft and J.F. Bowers: Statistical Characteristics of Concentration Fluctuations in Dispersing Plumes in the Atmospheric Surface Layer. Boundary-Layer Meteorol. 65 (1993), 69-109.

<sup>5</sup>E. Yee, R. Chan, P.R. Kosteniuk, G.M. Chandler, C.A. Biltoft and J.F. Bowers: Incorporation of Internal Fluctuations in a Meandering Plume Model of Concentration Fluctuations. Boundary-Layer Meteorol. 67 (1994), 11-39

<sup>6</sup>M. Nielsen, P.C. Chatwin, H. E. Jørgensen, N. Mole, R.J. Munro and S. Ott: Concentration Fluctuations in Gas Releases by Industrial Accidents. Risø-R-1329(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark (May 2002)

<sup>7</sup>H. Weber, W. aufm Kampe, T. Mikkelsen: Concentration Fluctuation Measurements in the Atmospheric Surface Layer, in: Proceedings of the Eight Symposium on Turbulence and Diffusion. Am. Met. Soc. (1988), 160-163

<sup>8</sup>L. Janicke, W. Klug, S. Rafailidis, M. Schatzmann, D. Strimaitis, R. Yamartino: Validierung des „Kinematic Simulation Particle Model (KSP-Modell)“ für Anwendungen im Vollzug des BImSchG. Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, UFOPLAN 98 - 295 43 354 (Juni 2000)

<sup>9</sup>B. Leidl, S. Aubrun, M. Schatzmann: Bereitstellung systematischer Vergleichsdaten für die Entwicklung und Validierung numerischer Geruchsausbreitungsmodelle — Windkanalversuche im Verbundprojekt „Geruchsfreisetzung und -ausbreitung“. Meteorologisches Institut der Universität Hamburg. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS (Juli 2002)

### 3. Fahnenbegehungen

Geruchserhebungen aus Fahnenbegehungen mit umfangreichen meteorologischen Daten liegen für verschiedene Orte vor: Nörvenich (LUA Essen)<sup>10</sup>, Niederrhein (LUA Essen)<sup>11</sup> und Uttenweiler (Ing.-Büro Lohmeyer)<sup>12</sup>. Bei der Untersuchung am Niederrhein handelt es sich um eine industrielle Quelle, bei den beiden anderen Untersuchungen um Schweineställe. In Nörvenich sind relativ viele Erhebungswerte mit Geruchshäufigkeiten um 10 % vorhanden, die also in diesem Zusammenhang besonders interessant sind. Die Daten aus Uttenweiler haben den Vorzug, daß parallel zur Geruchserhebung auch Ausbreitungsexperimente mit SF<sub>6</sub> durchgeführt worden sind, so daß die Geruchshäufigkeit zum Mittelwert der Konzentration in Beziehung gesetzt werden kann.

## 2.4 Durchführung der Validierung

Unter der Annahme, daß die anfangs beschriebenen modelltechnischen Voraussetzungen (Modelle A und B) erfüllt sind und die aufgeführten Daten bereit stehen, kann die Validierung in folgenden Schritten durchgeführt werden:

1. Anhand der LIDAR-Daten wird die Modellierung der momentanen Fahne überprüft. Die zu prüfenden Größen sind:
  - Art der Verteilungsfunktion
  - Variation der Verteilungsfunktion über den Fahnenquerschnitt hinweg
  - Variation der Fahnenbreite während des MäandernsHierzu wird direkt auf Originaldaten und auf publizierte Auswertungen zurückgegriffen.
2. An Hand von LIDAR-Daten wird die Stärke des Mäanderns überprüft.<sup>13</sup>
3. Aus ortsfesten Messungen der Konzentrationsfluktuationen (LIDAR und Meßsonden in der Natur oder im Windkanal) wird die Struktur der mittleren Fahne überprüft. Hierbei kann auch auf eine Vielzahl publizierter Auswertungen zurückgegriffen werden. Es wird die räumliche Variation der charakteristischen Größen überprüft.
4. Der Ansatz für die Wahrnehmungsfunktion (Geruchsschwellenkennlinie) in Modell A wird anhand olfaktometrischer Messungen überprüft. Als Datengrundlage reichen hierfür

<sup>10</sup>Dr. 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.

<sup>11</sup>U. Hartmann: Validierung von Geruchsausbreitungsmodellen — Ein Modellvergleich anhand von Geruchsimmissionsmessungen. Gefahrstoffe — Reinhaltung der Luft **62** (2002), 425-430.

<sup>12</sup>W. Bächlin, A. Rühling, A. Lohmeyer: Bereitstellung von Validierungsdaten für Geruchsausbreitungsmodelle — Naturmessungen. Ingenieurbüro Lohmeyer Karlsruhe und Dresden. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS (Juni 2002)

<sup>13</sup>Auch der zeitliche Verlauf des Mäanderns sollte modellhaft beschreibbar sein, da dies für Modell A von Bedeutung ist, wenn es als Episodenmodell angelegt ist.

die standardisierten Protokolle gemäß VDI 3882/1,<sup>14</sup> die aus olfaktometrischen Gutachten zur Verfügung gestellt werden müßten. Es ist die Variation des Auflösungsvermögens in Abhängigkeit von der Art des Geruchsstoffes zu bewerten.

5. Fahnenbegehungen werden mit Modell A nachgerechnet. Sofern das Mäandern der Windrichtung in den meteorologischen Messungen erfaßt ist, werden die Vergleiche einmal mit expliziter Berücksichtigung des realen Mäanderns durchgeführt und einmal ohne. Aus dem Vergleich der Ergebnisse wird geschätzt, welche Varianz des modellierten Ergebnisses aufgrund der aktuellen Realisierung des Mäanderns zu erwarten ist. Soweit Informationen über das Probandenkollektiv zur Verfügung stehen, wird ebenfalls der Beitrag zur Varianz aufgrund der Unsicherheit in der individuellen Geruchsbewertung abgeschätzt.
6. Die Fahnenbegehungen werden mit Modell A und Modell B unter dem Aspekt der Geruchsstundenfeststellung nachgerechnet und es wird abgeschätzt, wie weit die undifferenziertere Betrachtungsweise von Modell B die Varianz des Ergebnisses verändert. Es wird geprüft, ob Modell A gegenüber Modell B im Einzelfall deutlich bessere Prognosen liefert.
7. Für eine Reihe möglichst repräsentativer Anlagen werden Geruchsprognosen auf Jahresbasis mit Modell A und Modell B erstellt und es wird festgestellt, ob die Prognosen signifikant voneinander abweichen.
8. Für eine Reihe möglichst repräsentativer Anlagen werden die Ergebnisse von Rasterbegehungen mit Geruchsprognosen auf Jahresbasis mit Modell A und Modell B verglichen.

Wenn sich am Ende dieser Validierungsschritte herausstellt, daß Modell A gegenüber Modell B eindeutig bessere Prognosen liefert, wird untersucht, ob dieser Vorteil bei einer Realisierung in AUSTAL2000 voraussichtlich erhalten bleibt und den zu erwartenden höheren Entwicklungsaufwand rechtfertigt. Anschließend kann über die Realisierung von AUSTAL2000G als Modell vom Typ A oder vom Typ B entschieden werden.

---

<sup>14</sup>VDI 3882 Blatt 1: Olfaktometrie — Bestimmung der Geruchsintensität (Oktober 1992).

## Kapitel 3

# Erstellung der Prüfmodelle

### 3.1 Einleitung

Bei der Erarbeitung eines Modifizierungskonzeptes von AUSTAL2000 zur Prognose von Geruchsimmissionen haben sich zwei Alternativen ergeben:

- A** Im Lagrange-Modell AUSTAL2000 wird das Mäandern der Abluftfahne innerhalb der Beurteilungsstunde explizit modelliert, wie es auch schon im Fahnenmodell MEPOD erprobt ist. Aus der Überlagerung der sich innerhalb einer Stunde einstellenden Verteilungsfunktionen der Dichtefluktuations wird die Gesamtverteilung innerhalb einer Stunde berechnet und daraus mit Hilfe der Wahrnehmungsfunktion das Vorliegen einer Geruchsstunde prognostiziert.
- B** Es wird eine Beurteilungsschwelle  $c_{BS}$  eingeführt und wenn der von AUSTAL2000 für eine Stunde berechnete Mittelwert der Konzentration  $\bar{c}$  größer ist als diese Beurteilungsschwelle, dann wird die betreffende Stunde als Geruchsstunde gewertet.

Alternative A hat den Vorteil, daß sie theoretisch breiter fundiert ist und daher auch zuverlässigere Prognosen liefern sollte. Der Nachteil ist allerdings, daß gerade das Mäandern verhindert, daß die erzeugte mittlere Fahne die gleiche Form besitzt wie bei AUSTAL2000, so daß die enge Anbindung an die TA Luft verloren geht. Da zudem der Aufwand für die Modellentwicklung und die Durchführung der Ausbreitungsrechnungen erheblich höher ist als bei Alternative B, scheint es für die Praxis vorteilhafter zu sein, unmittelbar mit einer Beurteilungsschwelle zu arbeiten.

Die bisherigen Untersuchungen lassen erwarten, daß es möglich ist, in AUSTAL2000G mit einer festen Beurteilungsschwelle zu arbeiten (Alternative B). Letztendlich hat die Validierung des Modells die Daten zu erbringen, an Hand derer über die Akzeptanz zu entscheiden ist.

Das Problem bei der Validierung ist in diesem Falle aber, daß es von der Natur der Sache her (Beurteilung einer physiologischen Wirkung) keine Datensätze gibt, die genau genug sind, die

beiden zur Diskussion stehenden Realisierungsmöglichkeiten des Modells unzweifelhaft zu beurteilen. Daher gewinnen andere Gesichtspunkte an Bedeutung, wie Robustheit des Konzeptes, Konsistenz zur Modellierung in AUSTAL2000, Sensitivität gegenüber vereinfachenden Annahmen, Praktikabilität.

Neben dem Vergleich mit Begehungsdaten ist es daher wichtig, in einer Sensitivitätsanalyse zu ergründen, welche Parameter einen besonderen Einfluß auf das prognostizierte Ergebnis haben. Ausgangspunkt ist dabei das Modell einer mäandernden Fahne nach Alternative A, das von seiner theoretischen Basis her solide begründet ist.

Es ist nicht zweckmäßig, dabei mit dem Lagrange-Modell der TA Luft selbst zu arbeiten, da manche Parameter dort nur schwer oder gar nicht im erforderlichen Maße beherrschbar sind und die hohen Rechenzeiten das Erstellen umfangreicher Parameterstudien erschweren oder sogar unmöglich machen. Statt dessen können diese Fragestellungen zum größten Teil auch an einem einfacheren Fahnenmodell untersucht werden, dessen Fahnenstruktur in dem vorgesehenen Anwendungsbereich ausreichend mit der des Lagrange-Modells übereinstimmt.

Im folgenden wird die Erstellung eines solchen Fahnenmodells (Mittelwertmodell), des Fluktuationsmodells und der Prüfmodelle zur Ermittlung der Sensitivität gegenüber vereinfachenden Annahmen beschrieben.

## 3.2 Das Mittelwertmodell

Zur Berechnung des Erwartungswertes gibt es eine Reihe von Ausbreitungsmodellen (z.B. VDI 3782/1). 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 stellt zur Berechnung der Fahne folgende Größen zur Verfügung:

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

### 3.2.1 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 Diagonalform kann sie in folgender Form geschrieben werden:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \quad (3.1)$$

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 (3.1) 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,  $\sigma_w$ , 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

$$u(z) \frac{\partial C_y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K^*(x, z) \frac{\partial C_y}{\partial z} \right] \quad (3.2)$$

$$K^*(x, z) = \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{x \sigma_w^2(z)}{u(z) K_{zz}(z)} \right] \right\} K_{zz}(z) \quad (3.3)$$

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

$$C_y(0, z) = \frac{1}{u(h_q)} \delta(z - h_q) \quad (3.4)$$



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

### 3.2.2 Die 3-dimensionale Fahnenstruktur

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

$$\bar{c}(x, y, z) = QC_y(x, z) \hat{g}_y(x, y) \quad (3.5)$$

$$\hat{g}_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}_y(x)} \exp\left[-\frac{y^2}{2\hat{\sigma}_y^2(x)}\right] \quad (3.6)$$

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

$$\bar{c}_\eta(x, y, z) = QC_y(x, z) \hat{g}_y(x, y - \eta\tilde{\sigma}_y) \quad (3.7)$$

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

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \bar{c}_\eta(x, y, z) d\eta \quad (3.8)$$

$$= QC_y(x, z) g_y(x, y) \quad (3.9)$$

$$g_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right] \quad (3.10)$$

$$\sigma_y^2 = \hat{\sigma}_y^2 + \tilde{\sigma}_y^2 \quad (3.11)$$

Die horizontale Aufweitung der Fahne  $\sigma_y$  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:

$$\sigma_y(x)^2 = 2L_v \int_0^x \left[1 - \exp\left(-\frac{\bar{t}(x')}{T_v(x')}\right)\right] dx' \quad (3.12)$$

$$T_v(x) = L_v \frac{\bar{u}(x)}{\sigma_v^2} \quad (3.13)$$

$$\bar{t}(x) = \int_0^x \frac{dx'}{\bar{u}(x')} \quad (3.14)$$

$$\bar{u}(x) = \frac{\int_0^\infty u(z)C_y(x, z) dz}{\int_0^\infty C_y(x, z) dz} \quad (3.15)$$

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,

$$\hat{\sigma}_y(x)^2 = 2L_v \int_0^x \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\bar{t}(x')}{\hat{T}_v(x')}\right) \right] dx' \quad (3.16)$$

$$\hat{T}_v(x) = L_v \frac{\bar{u}(x)}{\hat{\sigma}_v^2} \quad (3.17)$$

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

$$\hat{\sigma}_v = u_* \quad (3.18)$$

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,

$$\bar{c}_\eta(x, y, z) = \sum_k Q^{(k)} C_y^{(k)}(x - x_q^{(k)}, z) \hat{g}_y(x - x_q^{(k)}, y - y_q^{(k)} - \eta \tilde{\sigma}_y^{(k)}) \quad (3.19)$$

### 3.2.3 Implementierung des Mittelwertmodells

Die Programme sind in JAVA geschrieben. Dies ermöglicht eine gute Strukturierung und vereinfacht die Fehlerbeseitigung. Zudem sind zur Modifizierung und Ausführung der Programme nur frei und kostenlos verfügbare Hilfsmittel erforderlich.

Um das Programm *Hegau* zu testen, wurden für verschiedene Situationen Vertikalprofile der quer zur Fahnenrichtung integrierten und normierten Konzentration  $C_y(x, z)$  untersucht. Die Rechenparameter sind:

- Quelle punktförmig in der Höhe  $H = 10$ , stationär mit Quellstärke  $Q = 1$
- Rechengebiet  $0 \leq x \leq 420$ ,  $0 \leq z \leq 80$ . Die Maschenweiten sind  $\Delta_x = 2$  und  $\Delta_z = 0.8$ . Für eine Referenzrechnung wurden die Maschenweiten auf 1/5 verkleinert.
- Vertikalprofile in den Quellentfernungen 50, 100, 200 und 400 m.
- Normierung von  $C_y$  auf  $QH_u(H)$

Die Bilder 3.1 bis 3.3 zeigen den Vergleich zwischen den theoretischen und den numerischen Ergebnissen. Die Referenzlösung mit verringerter Maschenweite ist innerhalb zeichnerischer

Genauigkeit mit der theoretischen Lösung identisch. Für praktische Zwecke ist aber auch die Genauigkeit der normalen numerischen Lösung ausreichend.

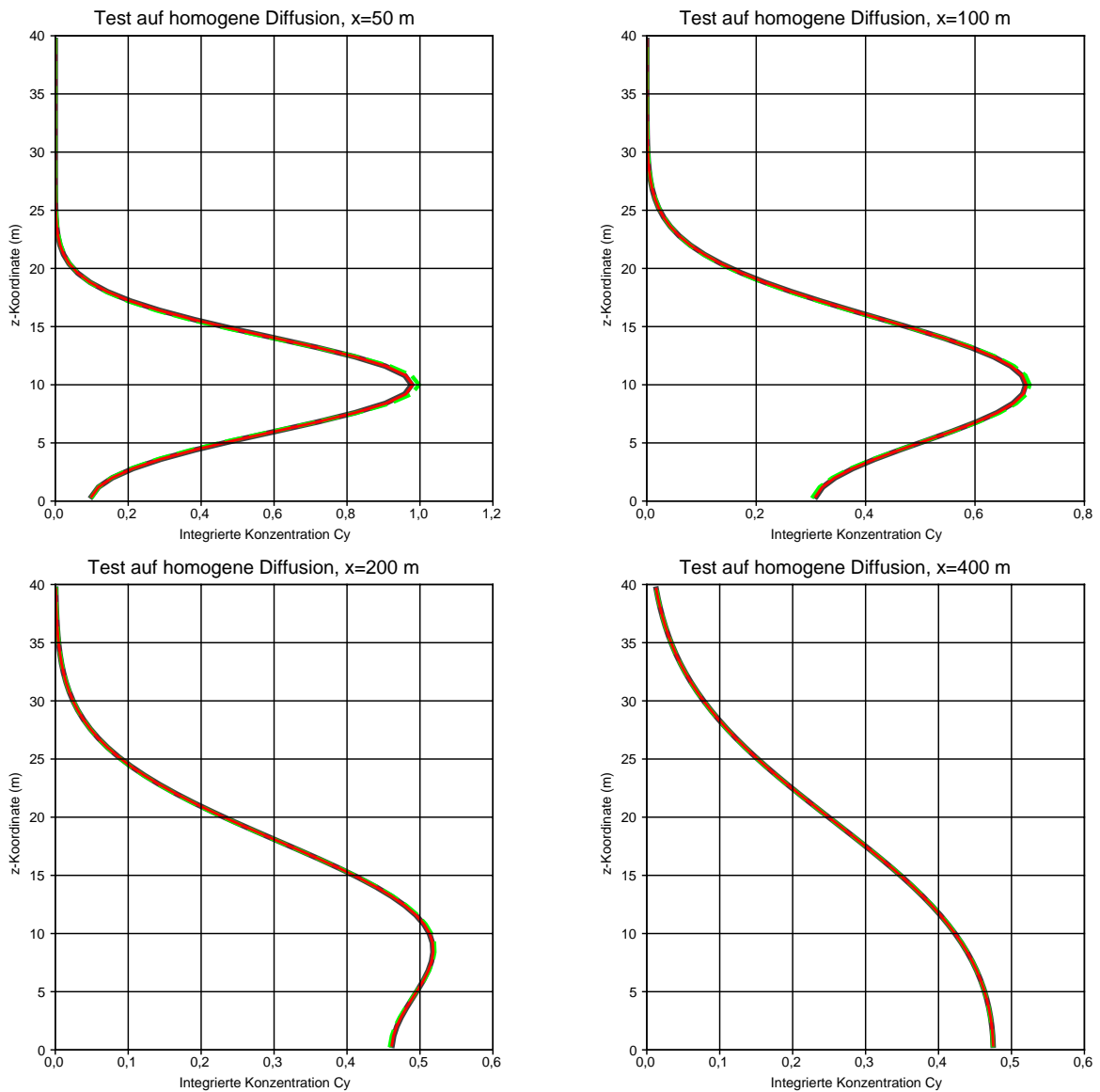


BILD 3.1: Vertikalprofile der Konzentration  $C_y(x, z)$  für  $x = 50, 100, 200, 400$  bei homogener Diffusion ohne Taylor-Korrektur ( $u_a = 6, K_{zz} = 1$ ). Die schwarze Kurve ist die exakte Lösung, die grün gestrichelte Kurve die numerische Lösung und die rote Kurve die numerische Referenzlösung.

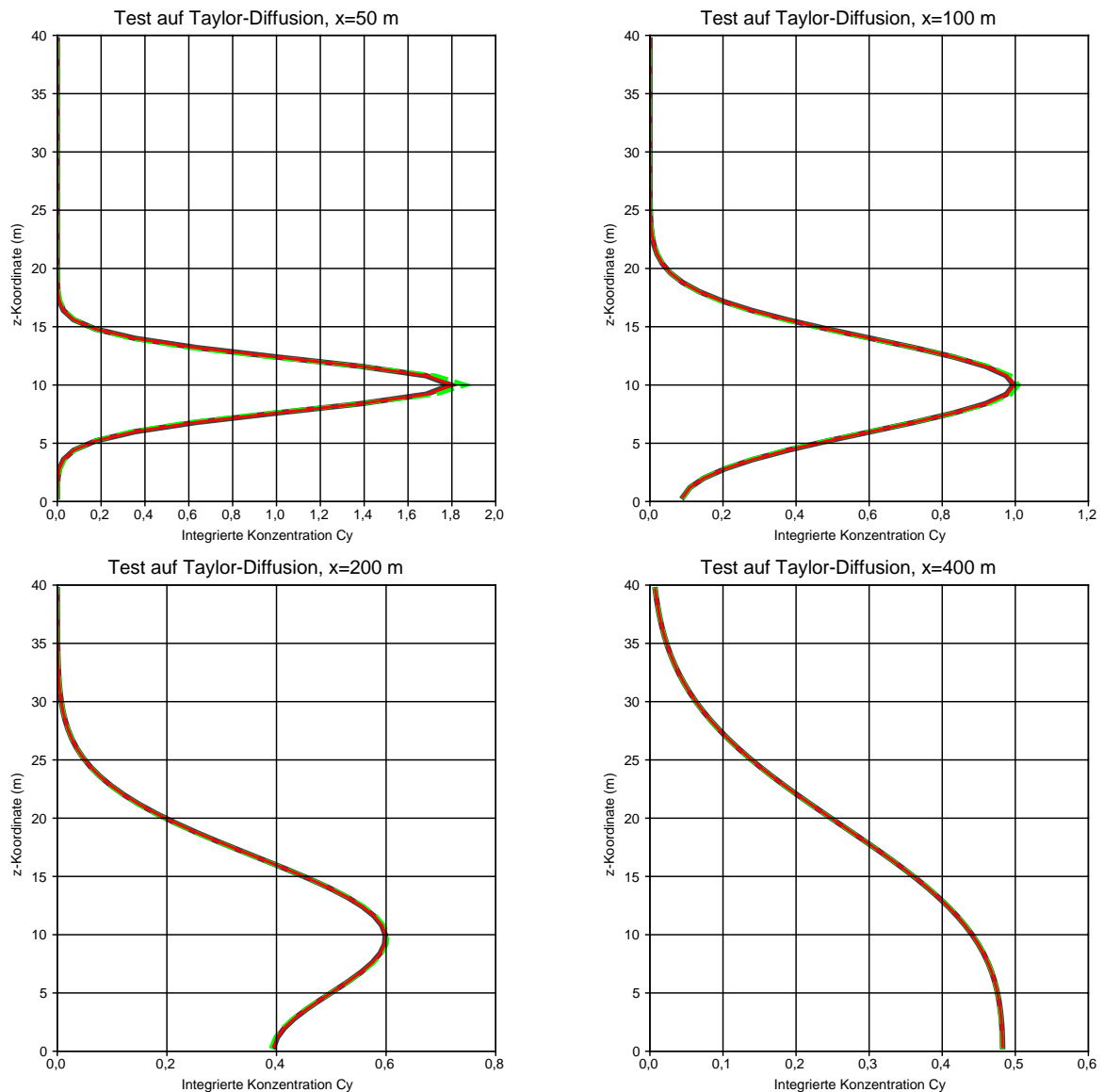


BILD 3.2: Vertikalprofile der Konzentration  $C_y(x, z)$  für  $x = 50, 100, 200, 400$  bei homogener Diffusion mit Taylor-Korrektur ( $u_a = 6, K_{zz} = 1, \sigma_w = 0.3$ ). Die schwarze Kurve ist die exakte Lösung, die grün gestrichelte Kurve die numerische Lösung und die rote Kurve die numerische Referenzlösung.

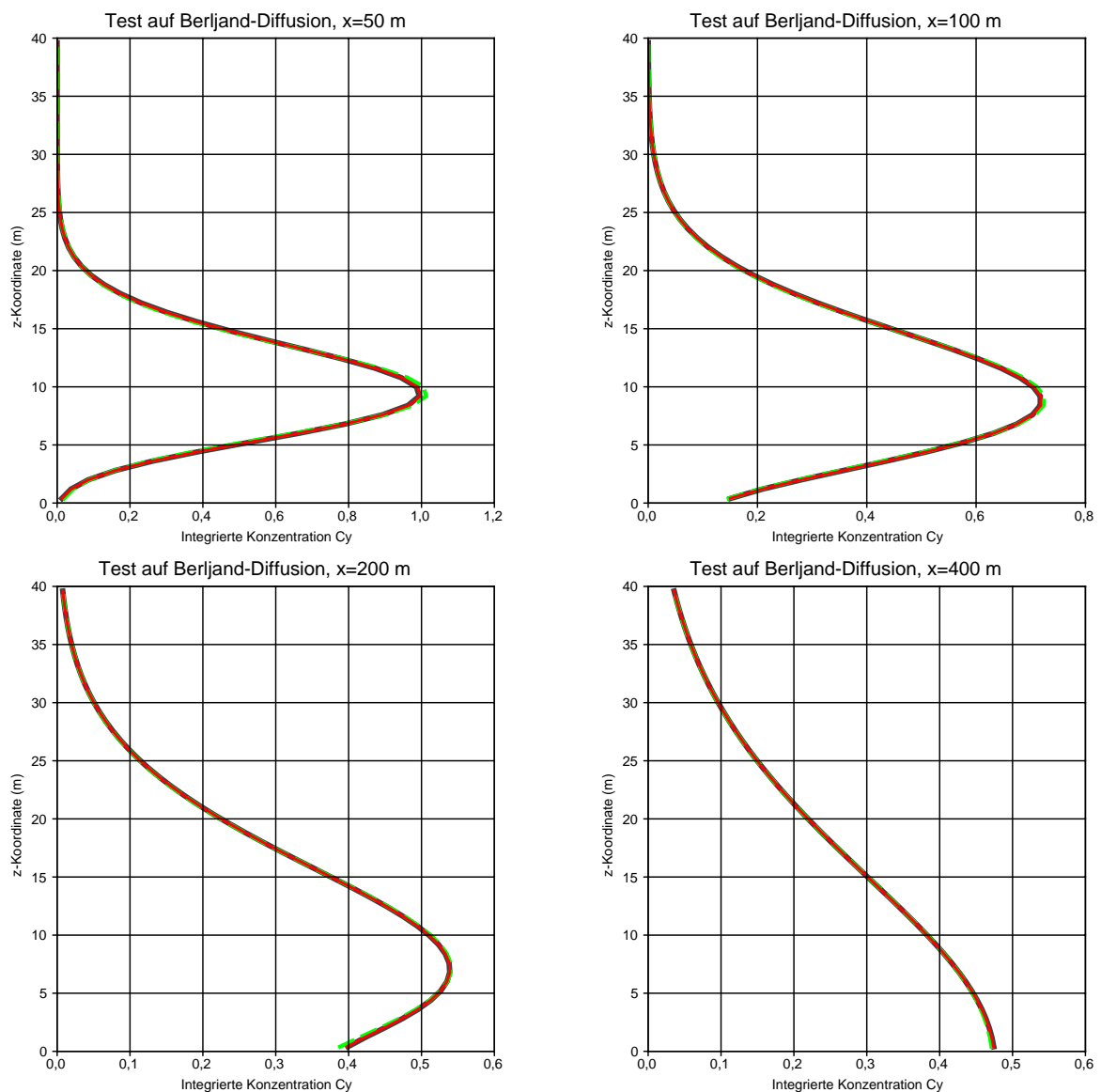


BILD 3.3: Vertikalprofile der Konzentration  $C_y(x, z)$  für  $x = 50, 100, 200, 400$  bei Diffusion in einem Berljand-Profil ( $h_a = 10, u_a = 6, m = 0.3, K_a = 1$ ). Die schwarze Kurve ist die exakte Lösung, die grün gestrichelte Kurve die numerische Lösung und die rote Kurve die numerische Referenzlösung.

### 3.3 Das Fluktuationsmodell

Zur Modellierung der Geruchswahrnehmung in einer bestimmten Situation muß nicht nur der Mittelwert der Geruchsstoffkonzentration bekannt sein sondern auch die zeitliche Fluktuation um diesen Mittelwert aufgrund der Luftturbulenz. Bei der modellmäßigen Erfassung dieser Fluktuationen ist es zweckmäßig, zwischen zwei verschiedenen Mechanismen, die zu Abweichungen vom Mittelwert führen, zu unterscheiden:

1. Kleine Luftwirbel (kleiner als der Fahndurchmesser) mischen Umgebungsluft in die Fahne ein und führen zu einer Aufweitung der Fahne.
2. Große Luftwirbel (größer als der Fahndurchmesser) führen dazu, daß die Fahnenachse verbogen wird und sich zufällig hin und her bewegt (mäandern).

Bei Messung der Konzentrationsverteilung längs eines Strahles quer durch die Fahne (LIDAR-Messungen) kann zwischen diesen beiden Effekten unterschieden werden, so daß auf Basis dieser Daten ein zweistufiges Fluktuationsmodell entwickelt werden kann:

- Es wird für eine relativ schmale Fahne die Konzentrationsfluktuation (Verteilungsfunktion der momentanen Konzentrationswerte) für jeden Raumpunkt angegeben.
- Die schmale Fahne wird einer Mäander-Bewegung unterworfen, so daß sich im zeitlichen Mittel die beobachtete breitere Fahne ergibt.

LIDAR-Messungen zur statistischen Beschreibung der mäandernden Fahne werden seit vielen Jahren vom Risø National Laboratory in Roskilde, Dänemark, durchgeführt und sind vor kurzem in einem zusammenfassenden Bericht beschrieben worden.<sup>1</sup> Der Schwerpunkt der Beschreibung liegt auf der momentanen Fahne. Man kann sie statistisch beschreiben, indem man bei jeder Einzelmessung das Koordinatensystem so legt, daß es mit der Fahnenachse übereinstimmt (Fahnenachse =  $x$ -Achse des Koordinatensystems).

Bezeichnet man mit  $f(c, y)$  die Wahrscheinlichkeitsdichte für das Auftreten der Konzentration  $c$  im Abstand  $y$  von der Fahnenmitte, dann ist definitionsgemäß

$$\int_0^{\infty} f(c, y) dc = 1 \quad (3.20)$$

Aus der Verteilungsdichte können die Momente der Verteilung gebildet werden:

$$c_n(y) = \int_0^{\infty} f(c, y) c^n dc \quad \text{für } n = 1, 2, \dots \quad (3.21)$$

$$c_{n,0} = c_n(0) \quad (3.22)$$

$$c_0 = c_{1,0} \quad (3.23)$$

<sup>1</sup>M. Nielsen, P.C. Chatwin, H.E. Jørgensen, N. Mole, R.J. Munro, S. Ott: *Concentration Fluctuations in Gas Releases by Industrial Accidents*, Risø-R-1329(EN), Mai 2002.

$c_1(y)$  ist der Erwartungswert der Konzentration, also der zeitliche Mittelwert. Die Breite der Fahne bezüglich des  $n$ -ten Momentes erhält man aus

$$\sigma_n^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} c_n(y) y^2 dy / \int_{-\infty}^{+\infty} c_n(y) dy \quad (3.24)$$

$\sigma_1$  ist die übliche Definition der Fahnenbreite ( $= \sigma_y$ ).

Die statistische Auswertung der Messungen liefert folgende Ergebnisse:

1. Die Verteilungsmomente haben praktisch alle die gleiche Form und unterscheiden sich nur durch ihre Breite  $\sigma_n$ :

$$c_n(y) = A_n \zeta(y/\sigma_n) \quad (3.25)$$

2. Die Breiten bezüglich der verschiedenen Momente stehen in einer einfachen Relation zueinander:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_n} = \frac{n + \beta}{1 + \beta} \text{ mit } \beta \approx 1.9 \quad (3.26)$$

3. Die Funktion  $\zeta(s)$  hat näherungsweise die Form

$$\zeta(s) = (1 + 2|s|) \exp(-2|s|) \quad (3.27)$$

4. Auf der Fahnenachse wird die Verteilung der Konzentrationswerte näherungsweise durch eine Gamma-Verteilung beschrieben:

$$f(c, 0) = g_2(c) \quad (3.28)$$

$$g_p(c) = \frac{p}{c_0 \Gamma(p)} \left( \frac{pc}{c_0} \right)^{p-1} \exp(-pc/c_0) \quad (3.29)$$

Im Risø-Report wird hieraus die Form der Verteilungsdichte  $f(c, y)$  hergeleitet. Eine Überprüfung der Herleitung zeigt jedoch, daß sie nicht fehlerfrei ist und zudem — auch nach Beseitigung des Fehlers — auf eine Funktion führt, die auch negative Werte annehmen kann. Dies ist bei einer Verteilungsdichte nicht zulässig.

Man kann das Problem beheben,<sup>2</sup> indem man statt einer Gamma-Verteilung eine Weibull-Verteilung  $w_p(c)$  verwendet,

$$w_p(c) = \frac{p}{\hat{c}} \left( \frac{c}{\hat{c}} \right)^{p-1} \exp \left[ - \left( \frac{c}{\hat{c}} \right)^p \right] \quad (3.30)$$

$$\hat{c} = c_0 / \Gamma(1 + 1/p) \quad (3.31)$$

<sup>2</sup>L. JANICKE: *A note on the distribution function of density fluctuations in the model COFIN*. Berichte zur Umweltp Physik, Nummer 4, ISSN 1439-8222, Hrsg. Ing.-Büro Janicke, Dunum (August 2004).

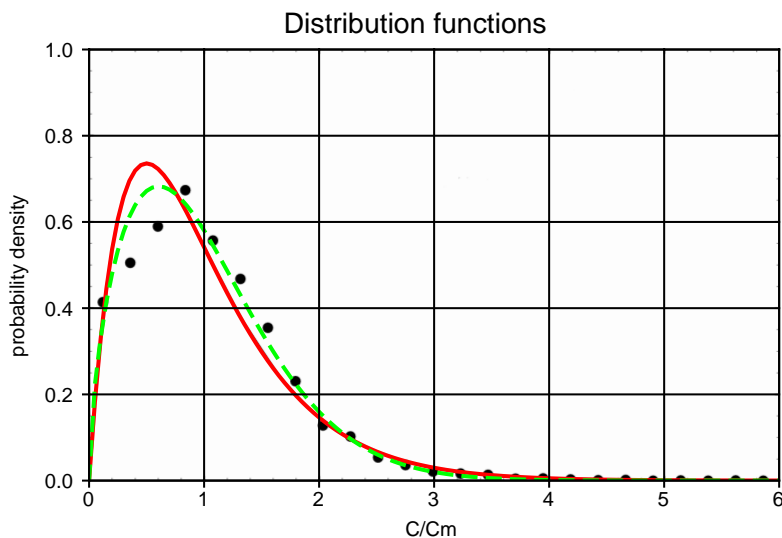


BILD 3.4: Vergleich von Verteilungsdichten: Gamma-Verteilung mit  $p = 2$  (durchgezogen, rot), Weibull-Verteilung mit  $p = 1.6$  (gestrichelt, grün) und Meßergebnisse (Punkte).

Bild 3.4 zeigt, daß die Meßergebnisse genau so gut durch die Weibull-Verteilung  $w_p(c)$  mit  $p = 1.6$  approximiert werden. Die resultierende Verteilungsdichte (im folgenden als COFIN-Modell bezeichnet) ist

$$f(c, y) = [1 - \mu(y)] \delta(c) + \mu(y) f_c(c, y) \quad (3.32)$$

$$f_c(c, y) = e^{2s} \frac{p \psi^{p-1} \Gamma(1 + 1/p)}{c_0 (1 + 2\beta s)} \exp(-\psi^p) [1 + 2s(\beta - p + p\psi^p)] \quad (3.33)$$

$$\mu(y) = \left(1 + 2 \frac{|y|}{\sigma_0}\right) \exp(-2|y|/\sigma_0) \quad (3.34)$$

$$\psi = \frac{c}{c_0} e^{2s} \Gamma(1 + 1/p) \quad (3.35)$$

$$\sigma_0 = \frac{1 + \beta}{\beta} \sigma_1 \quad (3.36)$$

$$s = \frac{|y|}{\sigma_1(1 + \beta)} \quad (3.37)$$

Auf der Fahnenachse ( $y = 0$ ) ist die Intermittenz  $\mu = 1$ , nach außen hin nimmt sie ab. Bild 3.5 zeigt die Funktion  $f(c, y)$  ohne die Nullwerte.



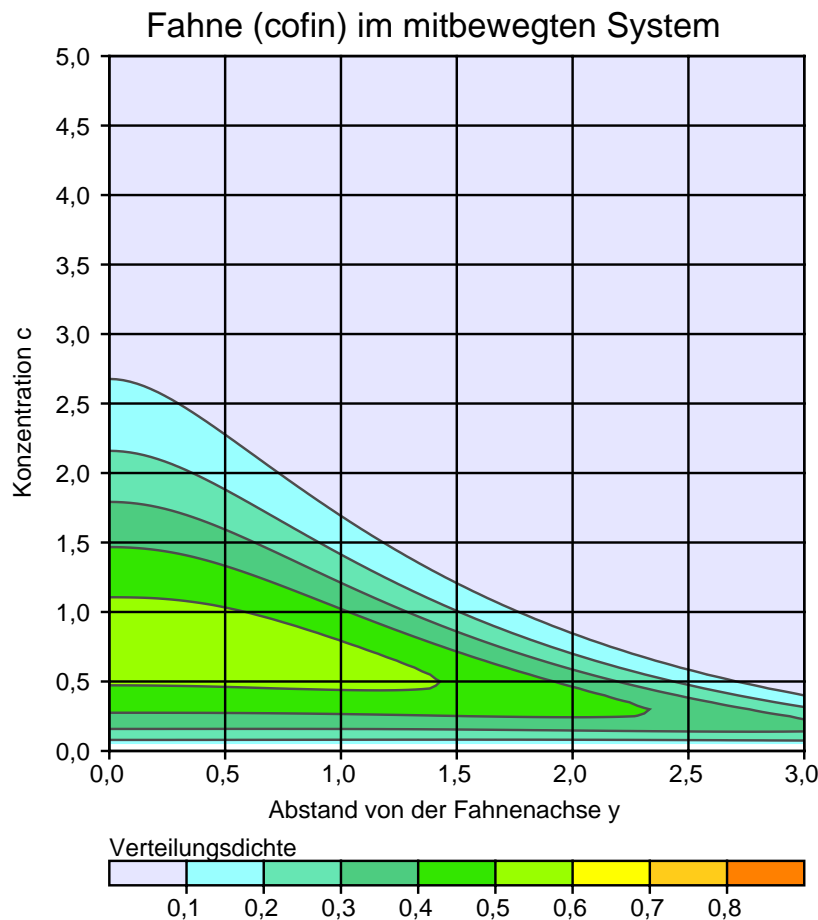


BILD 3.5: Verteilungsdichte  $f(c, y)$  im mitbewegten System nach Gleichung (3.32).

Läßt man diese Fahne eine Mäander-Bewegung (normalverteilte Verschiebung der Fahnenachse) ausführen, dann erhält man im raumfesten Koordinatensystem eine Verteilungsdichte, die auch in der Mitte der Fahne eine Intermittenz kleiner als 1 besitzt. Im raumfesten System interessiert vor allem das Verhältnis von 90-Perzentil  $c_{90}$  zu Mittelwert  $\bar{c}$ . Bild 3.6 zeigt diese Größe als Funktion des Abstandes von der Fahnenmitte. Variiert ist in den Teilbildern die Weite des Mäanderns,

$$r_p = \hat{\sigma}_y / \sigma_y \quad (3.38)$$

Hierbei ist  $\hat{\sigma}_y$  die Fahnenbreite im mitbewegten System und  $\sigma_y$  die Fahnenbreite im raumfesten System.  $r_p = 1$  bedeutet beispielsweise, daß die Fahne gar keine Mäanderbewegung ausführt, weil die Fahne beim Übergang vom mitbewegten zum raumfesten System nicht verbreitert wird.

Die Konzentrationswerte sind so normiert, daß  $\int c(y) dy = \sqrt{2\pi} \sigma_y$  gilt. Bei einer Gauß-Glocke ist dann  $c(0) = 1$ . Da das Fahnenprofil im mitbewegten System nicht die Form einer Gauß-Glocke besitzt, ist  $c(0)$  um so größer, je weniger das Mäandern zum Tragen kommt.

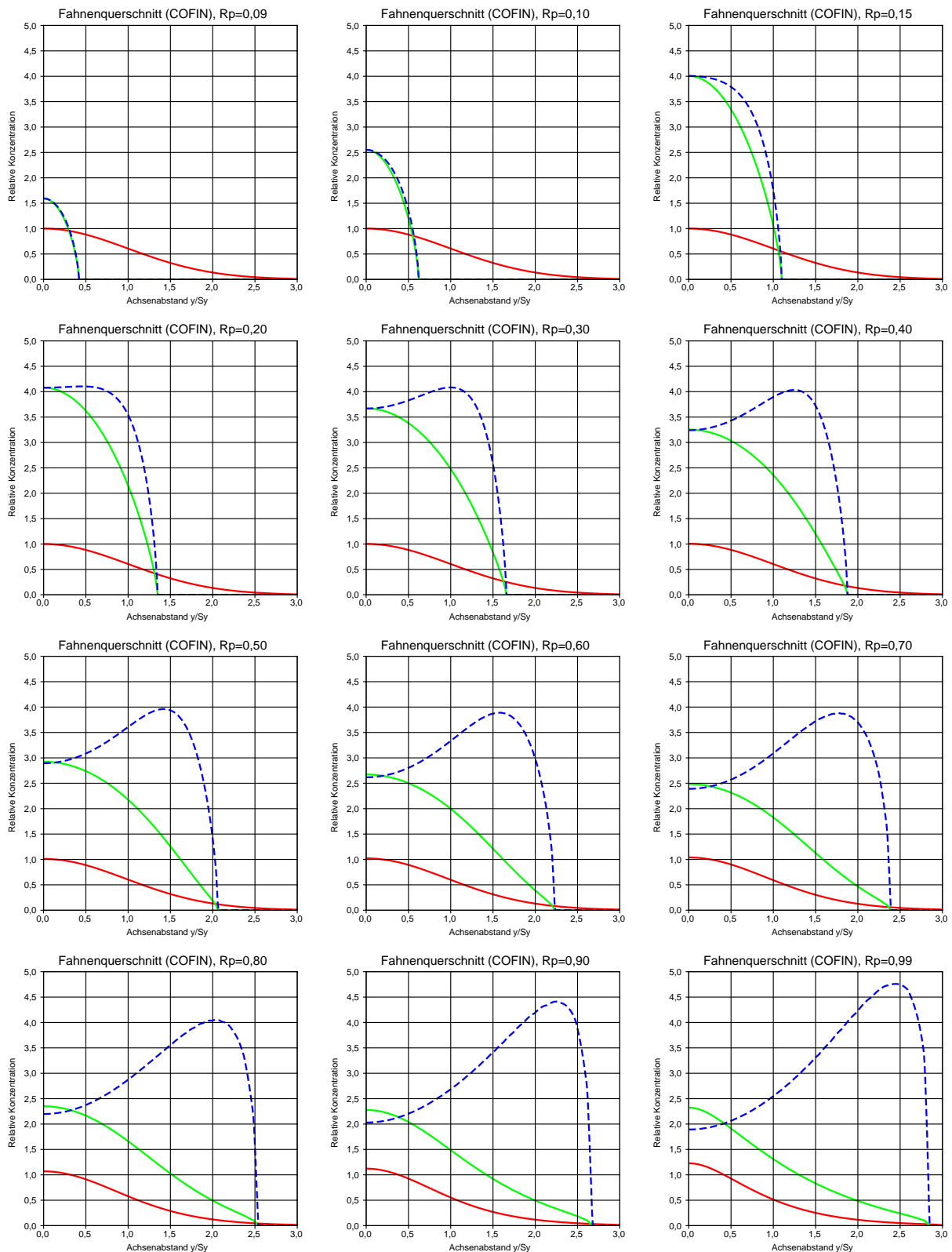


BILD 3.6: Variation von Kenngrößen über den Fahnenquerschnitt beim COFIN-Modell (Gleichung 3.32) im raumfesten System bei verschieden starkem Mäandern (Parameter  $r_p$  nach Gleichung (3.38)): mittlere Konzentration  $\bar{c}$  (rote Linie), 90-Perzentil  $c_{90}$  (grüne Linie) und Verhältnis  $c_{90}/\bar{c}$  (blaue gestrichelte Linie).

Der Wert des Verhältnisses  $c_{90}/\bar{c}$  ist wichtig für die Frage, wie weit aus der Kenntnis des Mittelwertes  $\bar{c}$  das 90-Perzentil  $c_{90}$  geschätzt werden kann, das für das Vorliegen einer Geruchsstunde wichtig ist. Die Diagramme zeigen, daß in der Fahnenmitte das Verhältnis den Wert 4 gerade erreichen kann. Außerhalb der Fahnenmitte sinkt der Wert des 90-Perzentils ab, aber das Verhältnis  $c_{90}/\bar{c}$  kann fast den Wert 5 erreichen.

Für den praktischen Einsatz des Fluktuationsmodells ist es zweckmäßig, auch eine vereinfachte Form zu haben, bei der die Struktur der Verteilungsfunktion nicht vom Abstand zur Fahnenachse abhängt. Da auf der Fahnenachse eine Weibull-Verteilung vorliegt, ist es naheliegend, diesen Verteilungstyp auch abseits der Achse zu verwenden:

$$w_{\mu,p}(c, y) = (1 - \mu) \delta(c) + \mu \frac{p}{c_r} \left( \frac{c}{c_r} \right)^{p-1} \exp \left[ - \left( \frac{c}{c_r} \right)^p \right] \quad (3.39)$$

$$c_r(y) = \frac{c_0}{\mu \Gamma(1 + 1/p)} \exp \left( - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \quad (3.40)$$

Soll dieser Ansatz mit der COFIN-Verteilung auf der Fahnenachse übereinstimmen, dann ist  $\mu = 1.0$  und  $p = 1.6$  zu setzen (dieser Ansatz wird mit WBL10 gekennzeichnet). Mit  $\mu = 0.7$  und  $p = 2.0$  würde man dagegen die COFIN-Verteilung im Mittel über den Fahnenquerschnitt approximieren (Ansatz WBL07). Bild 3.7 zeigt die entsprechenden Verteilungsdichten im mitbewegten System. Die Bilder 3.8 und 3.9 zeigen die Fahnen-Kenngrößen für WBL10 und WBL07 im raumfesten System bei verschieden starkem Mäandern.

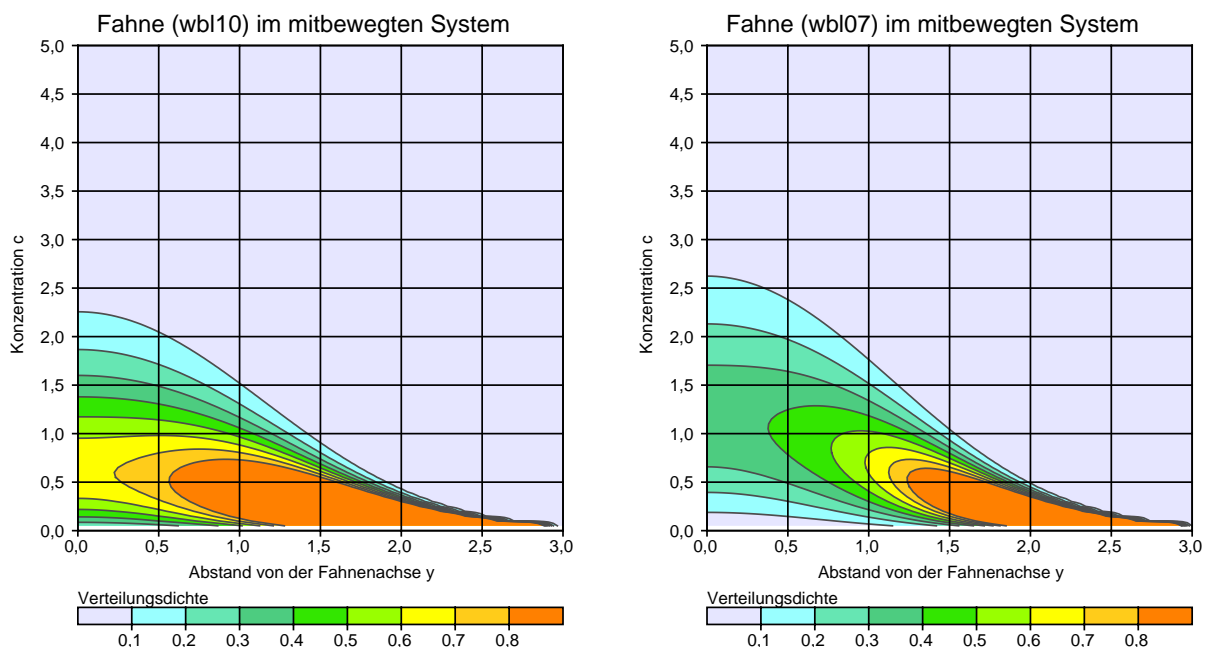


BILD 3.7: Verteilungsdichte  $w_{\mu,p}(c, y)$  im mitbewegten System nach Gleichung (3.39) für  $p = 1.6, \mu = 1.0$  (links) und für  $p = 2.0, \mu = 0.7$  (rechts).

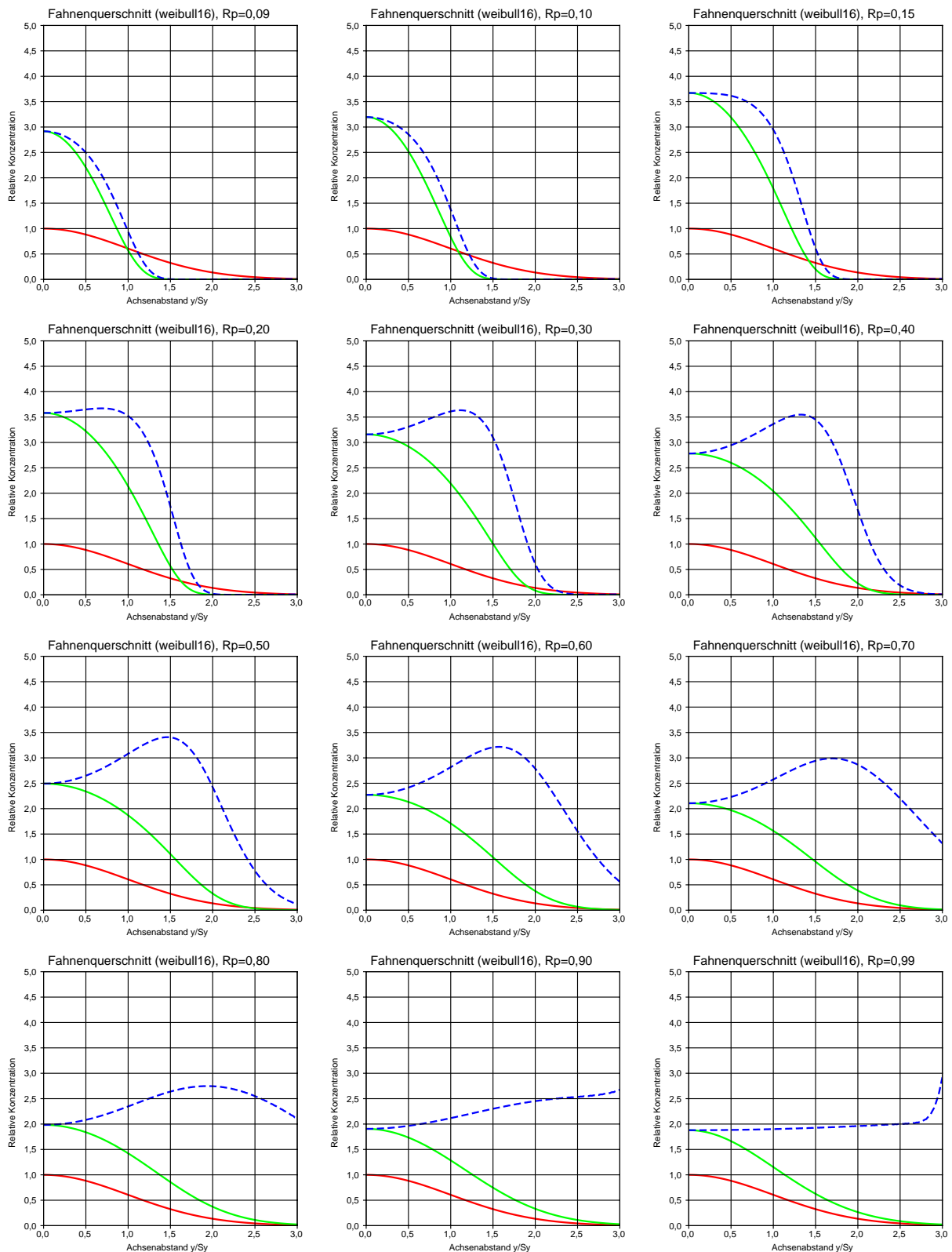


BILD 3.8: Variation von Kenngrößen über den Fahnenquerschnitt beim Modell WBL10 (Gleichung 3.32 mit  $p = 1.6$ ,  $\mu = 1.0$ ) im raumfesten System bei verschieden starkem Mäandern (Parameter  $r_p$  nach Gleichung (3.38)): mittlere Konzentration  $\bar{c}$  (rote Linie), 90-Perzentil  $c_{90}$  (grüne Linie) und Verhältnis  $c_{90}/\bar{c}$  (blaue gestrichelte Linie).

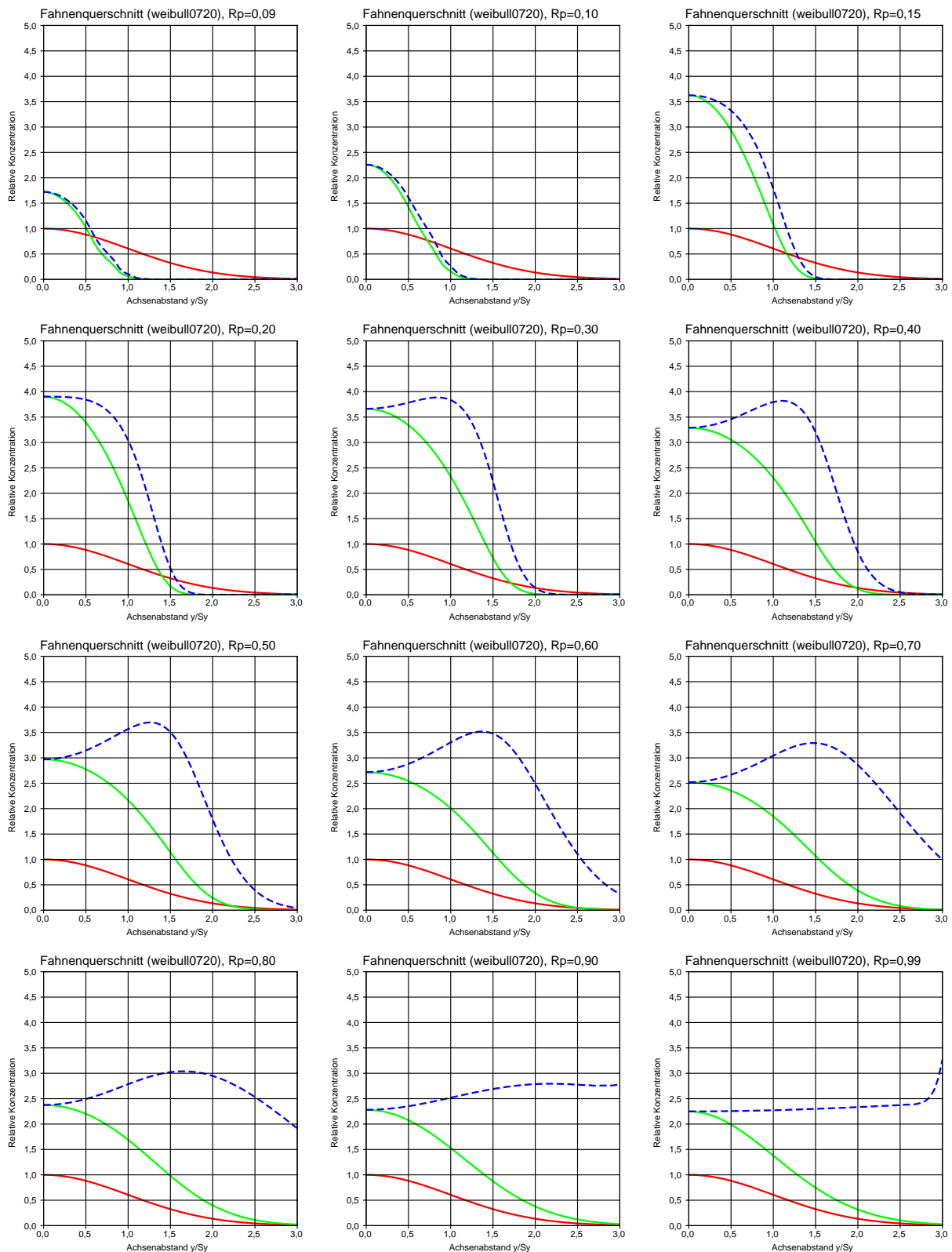


BILD 3.9: Variation von Kenngrößen über den Fahnenquerschnitt beim Modell WBL07 (Gleichung 3.32 mit  $p = 2,0$ ,  $\mu = 0,7$ ) im raumfesten System bei verschieden starkem Mäandern (Parameter  $r_p$  nach Gleichung (3.38)): mittlere Konzentration  $\bar{c}$  (rote Linie), 90-Perzentil  $c_{90}$  (grüne Linie) und Verhältnis  $c_{90}/\bar{c}$  (blaue gestrichelte Linie).

## Kapitel 4

# Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung

### 4.1 Die Modelle zur Berechnung der Konzentration

Die in Kapitel 3 beschriebenen Modelle gehen von einer punktförmigen Quelle aus, die eine stationäre, nicht gescherte Fahne erzeugt. Eine Erweiterung auf einfache ausgedehnte Quellen wird später diskutiert werden.

#### 4.1.1 Das Mittelwertmodell

Das Mittelwertmodell berechnet zunächst die quer zur Windrichtung integrierte, auf die Quellstärke  $Q$  normierte Konzentration  $C_y(x, z)$ . Die Quelle liegt bei  $x = 0$ ,  $y = 0$ , der Wind weht in  $x$ -Richtung.

Die 3-dimensionale Konzentrationsverteilung einer Gauß-Fahne der Breite  $\sigma_y$  ist dann

$$\bar{c}(x, y, z) = QC_y(x, z) g_y(x, y) \quad (4.1)$$

$$g_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right] \quad (4.2)$$

Die horizontale Aufweitung der Fahne  $\sigma_y$  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:

$$\sigma_y(x)^2 = 2L_v \int_0^x \left[1 - \exp\left(-\frac{\bar{t}(x')}{T_v(x')}\right)\right] dx' \quad (4.3)$$

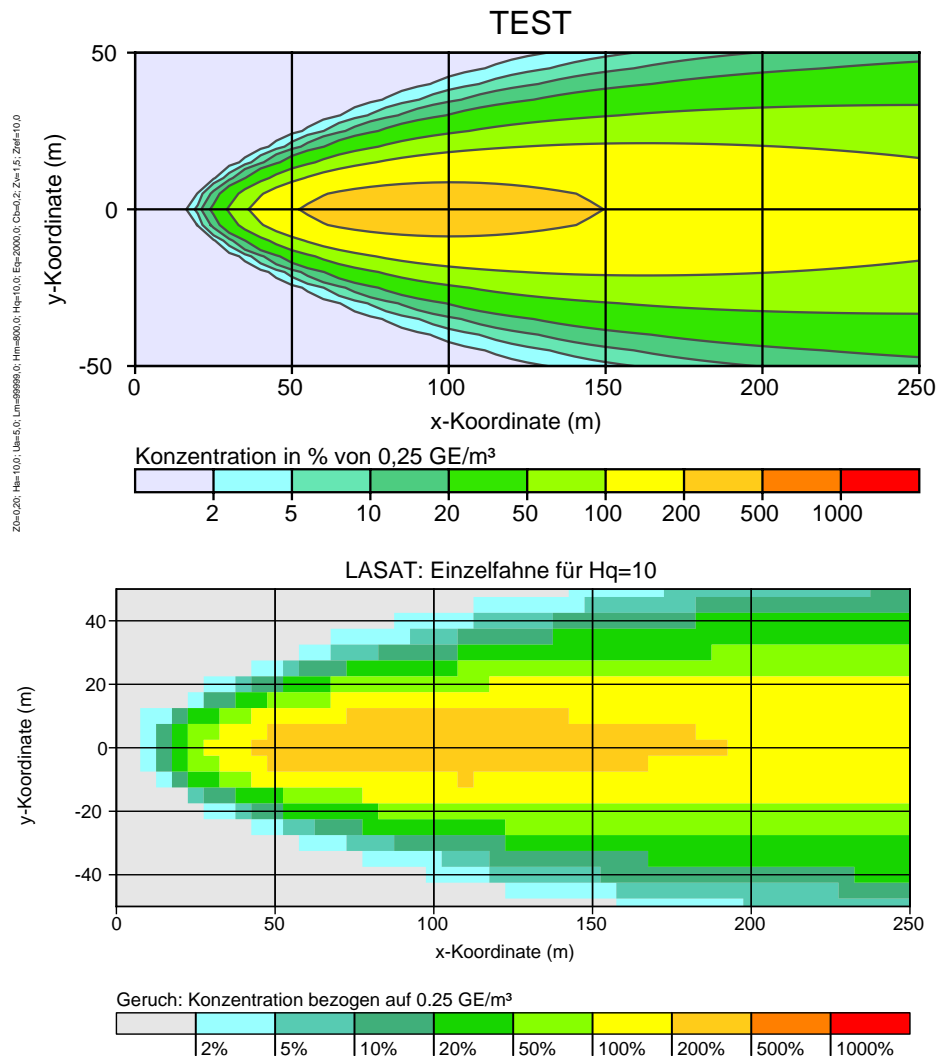
$$L_v = K_v(z_{\text{ref}})/u(z_{\text{ref}}) \quad (4.4)$$

$$T_v(x) = L_v \frac{\bar{u}(x)}{\sigma_v^2} \quad (4.5)$$

$$\bar{i}(x) = \int_0^x \frac{dx'}{\bar{u}(x')} \quad (4.6)$$

$$\bar{u}(x) = \frac{\int_0^\infty u(z) C_y(x, z) dz}{\int_0^\infty C_y(x, z) dz} \quad (4.7)$$

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). Als Referenzhöhe zur Berechnung der charakteristischen Länge  $L_v$  aus dem horizontalen Diffusionskoeffizienten  $K_v$  wird  $z_{\text{ref}}=60$  m verwendet.



**BILD 4.1:** Vergleich der bodennahen Konzentrationsverteilung für eine Einzelfall-Rechnung mit dem Mittelwertmodell (oben) mit dem Ergebnis einer LASAT-Rechnung (unten). Parameter:  $h_a = 10$ ,  $u_a = 5$ ,  $L_M = 99999$ ,  $z_0 = 0.02$ ,  $d_0 = 0$ ,  $z_{\text{ref}} = 10$ ,  $H_q = 10$ ,  $E_q = 2000$ .

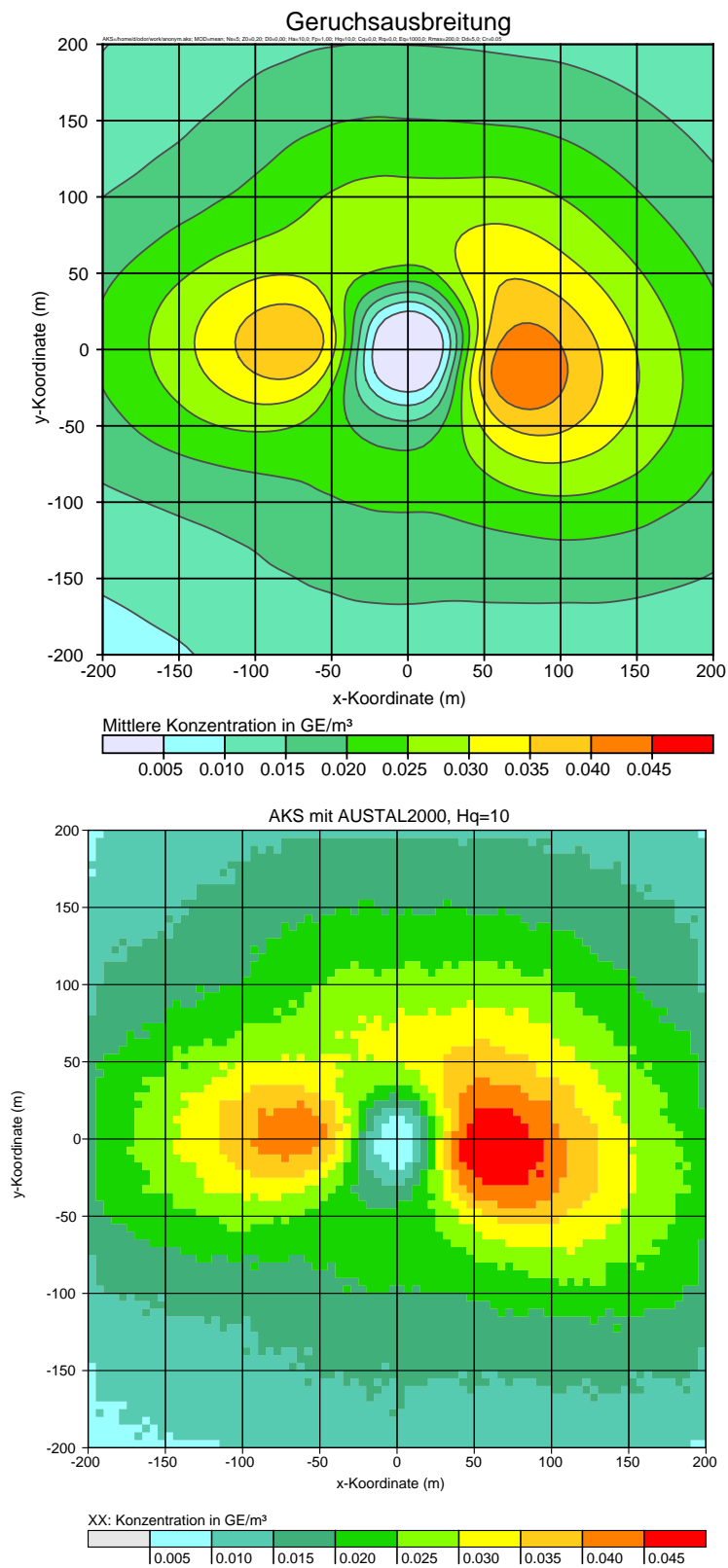


BILD 4.2: Vergleich der bodennahen Konzentrationsverteilung für eine AKS-Rechnung (anonym. aks) mit dem Mittelwertmodell (oben) mit dem Ergebnis einer AUSTAL2000-Rechnung (unten). Parameter:  $h_a = 10$ ,  $z_0 = 0.02$ ,  $d_0 = 0$ ,  $z_{ref} = 10$ ,  $H_q = 10$ ,  $E_q = 1000$ .



Im Modell der mäandernden Fahne entsteht die mittlere Konzentration  $\bar{c}$  durch die Überlagerung von Kernfahnen mit der Konzentrationsverteilung  $\hat{c}_\eta(x, y, z)$  und der Breite  $\hat{\sigma}_y$ ,

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \hat{c}_\eta(x, y, z) d\eta \quad (4.8)$$

$$\hat{c}_\eta(x, y, z) = QC_y(x, z) \hat{g}_y(x, y - \eta\tilde{\sigma}_y) \quad (4.9)$$

$$\hat{g}_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}_y(x)} \exp\left[-\frac{y^2}{2\hat{\sigma}_y^2(x)}\right] \quad (4.10)$$

$$\sigma_y^2 = \hat{\sigma}_y^2 + \tilde{\sigma}_y^2 \quad (4.11)$$

$$\hat{\sigma}_y(x)^2 = 2L_v \int_0^x \left[1 - \exp\left(-\frac{\bar{t}(x')}{\hat{T}_v(x')}\right)\right] dx' \quad (4.12)$$

$$\hat{T}_v(x) = L_v \frac{\bar{u}(x)}{\hat{\sigma}_v^2} \quad (4.13)$$

$$\hat{\sigma}_v = 0.83u_* \quad (4.14)$$

Wenn die Verteilung der mittleren Konzentration in der Kernfahne nicht Gauß-förmig ist, dann ist die gesamte Fahne nur für große Mäanderweiten näherungsweise Gauß-förmig.

## 4.1.2 Die Fluktuationsmodelle

Unter den Modellen, die die Konzentrationsfluktuationen in der Kernfahne beschreiben, ist das Modell COFIN dasjenige, das durch experimentelle Untersuchungen am besten abgesichert ist. Durch die bei der Analyse der Meßergebnisse gefundenen Gesetzmäßigkeiten ist seine Verteilungsdichte  $f(c, y)$  eindeutig festgelegt:

$$f(c, y) = [1 - \mu(y)] \delta(c) + \mu(y) f_c(c, y) \quad (4.15)$$

$$f_c(c, y) = e^{2s} \frac{p}{c_0} \frac{\psi^{p-1} \Gamma(1 + 1/p)}{1 + 2\beta s} \exp(-\psi^p) [1 + 2s(\beta - p + p\psi^p)] \quad (4.16)$$

$$\mu(y) = \left(1 + 2 \frac{|y|}{\sigma_0}\right) \exp(-2|y|/\sigma_0) \quad (4.17)$$

$$\psi = \frac{c}{c_0} e^{2s} \Gamma(1 + 1/p) \quad (4.18)$$

$$\sigma_0 = \frac{1 + \beta}{\beta} \hat{\sigma}_y \quad (4.19)$$

$$s = \frac{|y|}{\hat{\sigma}_y(1 + \beta)} \quad (4.20)$$

$$\text{mit } p = 1.6, \quad \beta = 1.9. \quad (4.21)$$

Auf der Fahnenachse ( $y = 0$ ) liegt eine Weibull-Verteilung vor und die Intermitenz ist  $\mu = 1$ , nach außen hin ändert sich die Verteilung und  $\mu$  nimmt ab.  $c_0$  ist die mittlere Konzentration auf der Fahnenachse,

$$c_0 = \bar{\hat{c}}(0) \quad (4.22)$$

$$\bar{\hat{c}}(y) = \int c f(c, y) dc \quad (4.23)$$

$$= c_0 \left( 1 + 2 \frac{|y|}{\hat{\sigma}_y} \right) \exp(-2|y|/\hat{\sigma}_y) \quad (4.24)$$

$$C_y = \int \bar{\hat{c}}(y) dy = 2c_0 \quad (4.25)$$

Da die Verteilung der Konzentrationswerte davon abhängt, wie weit man von der Fahnenachse entfernt ist, kann diese Art der Verteilung nicht auf Situationen erweitert werden, bei denen dieser Abstand gar nicht definiert ist, wie beispielsweise bei Mehrquellensystemen. Um auch diese Situationen modellieren zu können, wird Gleichung (4.15) dahingehend vereinfacht, daß eine Weibull-Verteilung verwendet wird, die nur vom lokalen Mittelwert abhängt:

$$w_{\mu,p}(c, y) = (1 - \mu) \delta(c) + \mu \frac{p}{c_r} \left( \frac{c}{c_r} \right)^{p-1} \exp \left[ - \left( \frac{c}{c_r} \right)^p \right] \quad (4.26)$$

$$c_r(y) = \frac{c_0}{\mu \Gamma(1 + 1/p)} \exp \left( - \frac{y^2}{2\hat{\sigma}_y^2} \right) \quad (4.27)$$

$$= \frac{\bar{\hat{c}}(y)}{\mu \Gamma(1 + 1/p)} \quad (4.28)$$

Soll dieser Ansatz mit der COFIN-Verteilung auf der Fahnenachse übereinstimmen, dann ist  $\mu = 1.0$  und  $p = 1.6$  zu setzen (dieser Ansatz wird mit WBL10 gekennzeichnet). Mit  $\mu = 0.7$  und  $p = 2.0$  würde man dagegen die COFIN-Verteilung im Mittel über den Fahnenquerschnitt approximieren (Ansatz WBL07).

Die Bilder 4.3 bis 4.5 zeigen die Verteilungsdichte im mitbewegten System und die charakteristischen Größen Mittelwert  $\bar{c}$ , 90-Perzentil  $c_{90}$  und Quotient  $c_{90}/\bar{c}$  im ortsfesten System für unterschiedlich starkes Mäandern. Während bei den Weibull-Ansätzen das Profil des Mittelwerts nicht von der Stärke des Mäanderns abhängt, liefert COFIN auf der Fahnenachse ohne Mäandern eine um 25 % höhere Konzentration.

Während bei COFIN das 90-Perzentil etwas größer werden kann als das 4-fache des lokalen Mittelwertes, bleiben die Weibull-Ansätze immer etwas darunter.

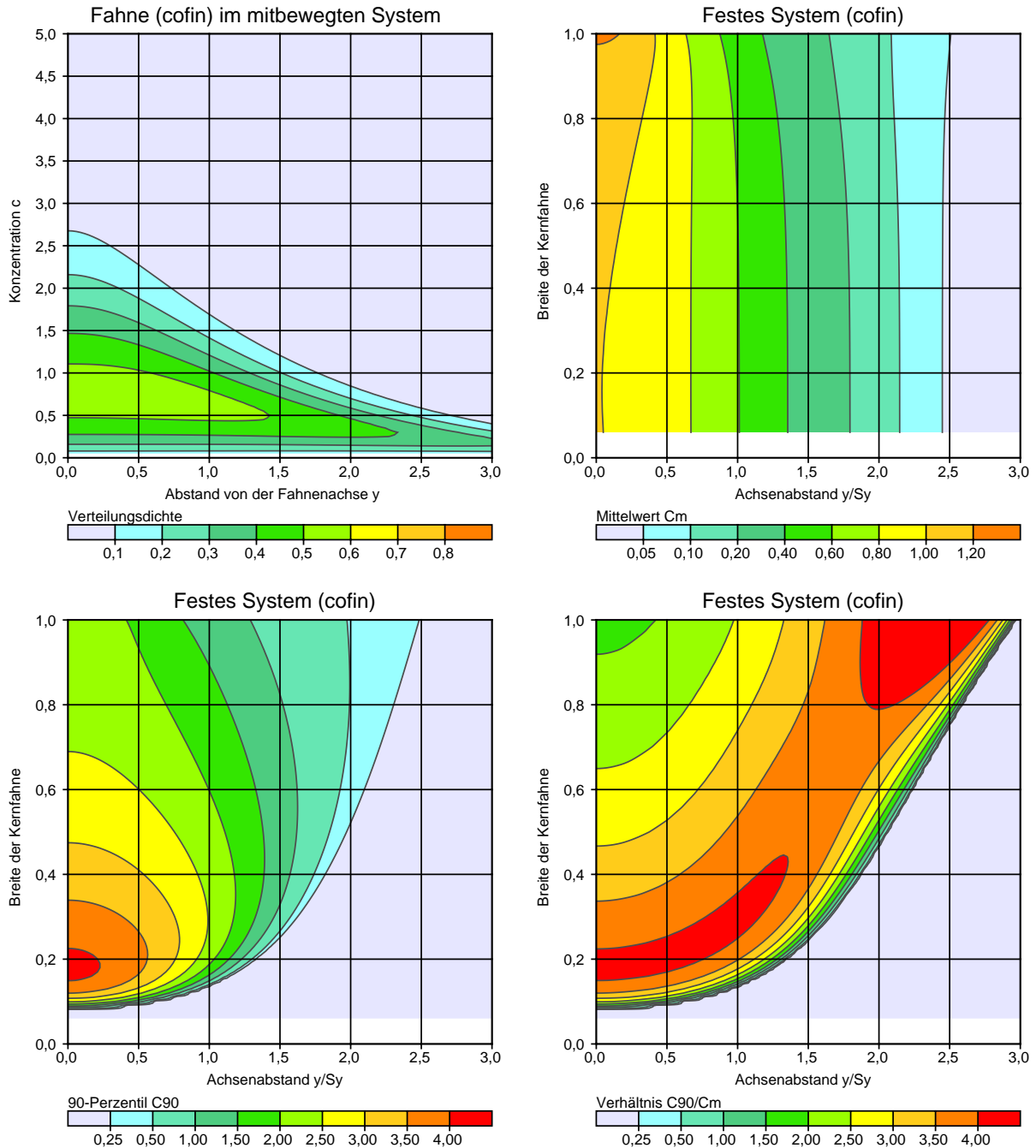


BILD 4.3: COFIN-Verteilung mit  $C_y = \sqrt{2\pi}$ . Oben links: Verteilungsdichte im mitbewegten System nach Gleichung (4.15) für  $\hat{\sigma}_y = 1$ . Oben rechts: Mittlere Konzentration  $\bar{c}$  im festen System mit  $\sigma_y = 1$  in Abhängigkeit vom Abstand von der Fahnenachse  $y/\sigma_y$  und von der Breite der Kernfahne  $\hat{\sigma}_y$ . Unten: 90-Perzentil  $c_{90}$  (links) und Quotient  $c_{90}/\bar{c}$  (rechts) im festen System.

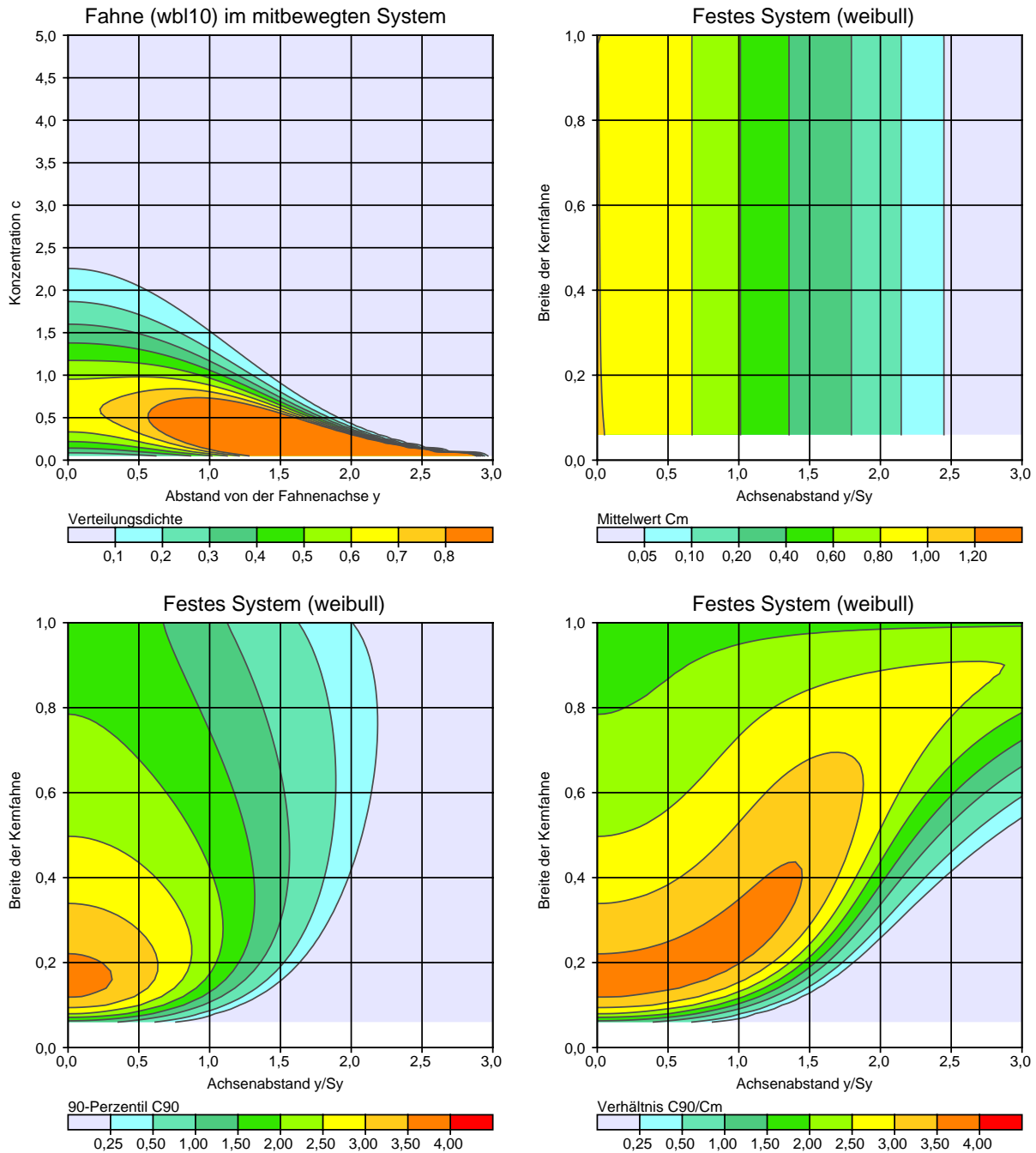


BILD 4.4: Weibull-Verteilung (WBL10) mit  $p = 1.6$ ,  $\mu = 1.0$ ,  $C_y = \sqrt{2\pi}$ . Oben links: Verteilungsdichte im mitbewegten System nach Gleichung (4.26) für  $\hat{\sigma}_y = 1$ . Oben rechts: Mittlere Konzentration  $\bar{c}$  im festen System mit  $\sigma_y = 1$  in Abhängigkeit vom Abstand von der Fahnenachse  $y/\sigma_y$  und von der Breite der Kernfahne  $\hat{\sigma}_y$ . Unten: 90-Perzentil  $c_{90}$  (links) und Quotient  $c_{90}/\bar{c}$  (rechts) im festen System.

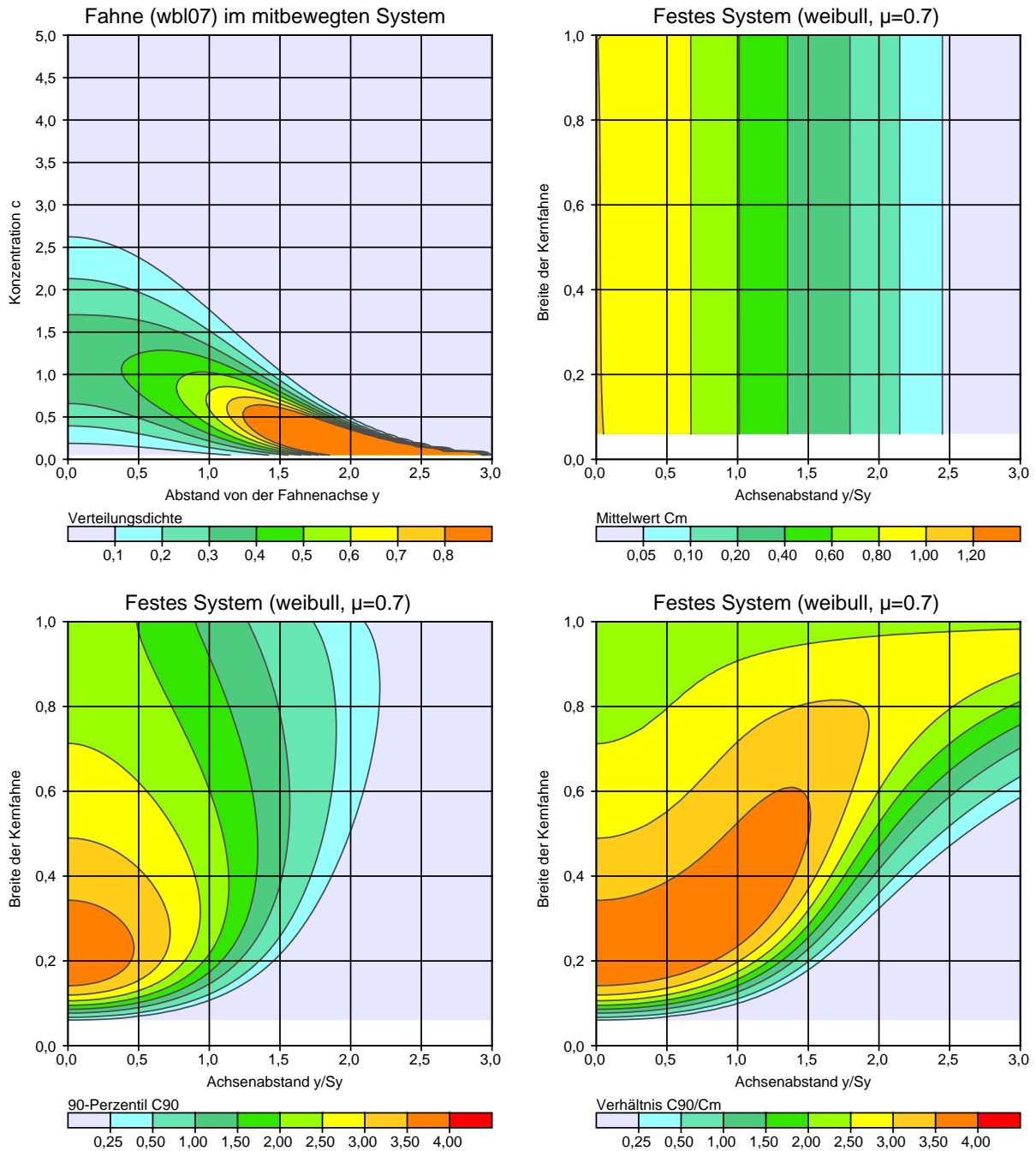


BIld 4.5: Weibull-Verteilung (WBL07) mit  $p = 2.0$ ,  $\mu = 0.7$ ,  $C_y = \sqrt{2\pi}$ . Oben links: Verteilungsdichte im mitbewegten System nach Gleichung (4.26) für  $\hat{\sigma}_y = 1$ . Oben rechts: Mittlere Konzentration  $\bar{c}$  im festen System mit  $\sigma_y = 1$  in Abhängigkeit vom Abstand von der Fahnenachse  $y/\sigma_y$  und von der Breite der Kernfahne  $\hat{\sigma}_y$ . Unten: 90-Perzentil  $c_{90}$  (links) und Quotient  $c_{90}/\bar{c}$  (rechts) im festen System.

### 4.1.3 Die Geruchswahrnehmung

Die Modelle, wie sie bisher diskutiert worden sind, liefern bei gegebener Ausbreitungssituation für einen bestimmten Raumpunkt die Verteilungsdichte  $f(c)$  der Konzentrationswerte. Nach VDI 3788/1 erhält man hieraus die Wahrscheinlichkeit für die Wahrnehmung eines Geruches,  $\kappa_0$ , durch Integration über die Wahrnehmungsfunktion  $P_0(c)$  (Geruchsschwellenkennlinie),

$$\kappa_0 = \int_0^{\infty} P_0(c) f(c) dc \quad (4.29)$$

Für  $P_0$  wird in der Regel eine logarithmische Normalverteilung angesetzt, also eine Normalverteilung von  $\log(c)$ , zentriert bei der Geruchsschwelle  $c_{GS}$ ,

$$p_0(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi c \lambda}} \exp \left\{ -\frac{[\log(c/c_{GS})]^2}{2\lambda^2} \right\} \quad (4.30)$$

$$P_0(c) = \int_0^c p_0(c') dc' \quad (4.31)$$

Hier wird mit  $\log$  der natürliche Logarithmus bezeichnet. Zur Unterscheidung wird der dekadische Logarithmus als  $\log_{10}$  geschrieben. Es ist näherungsweise

$$\log(c) = 2.3 \log_{10}(c) \quad (4.32)$$

Bezeichnet man mit  $c_{84}$  den Konzentrationswert, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 84 Prozent nicht überschritten wird, und entsprechend mit  $c_{16}$  den Wert für eine Wahrscheinlichkeit von 16 Prozent, dann sind die Logarithmen dieser Werte gerade durch eine Standardabweichung vom Median gegeben,

$$\log(c_{16}/c_{GS}) = -\lambda \quad (4.33)$$

$$\log(c_{84}/c_{GS}) = +\lambda \quad (4.34)$$

$$\lambda = \frac{1}{2} \log \left( \frac{c_{84}}{c_{16}} \right) \quad (4.35)$$

Das in der Olfaktometrie (VDI 3881/1) verwendete *Auflösungsvermögen* ist über den dekadischen Logarithmus definiert. Es wird hier der Klarheit halber mit  $\lambda_{10}$  bezeichnet,

$$\text{Auflösungsvermögen } \lambda_{10} = \frac{1}{2} \log_{10} \left( \frac{c_{84}}{c_{16}} \right) \quad (4.36)$$

$$= \frac{\lambda}{2.3} \quad (4.37)$$

Der Zahlenwert von  $\lambda$  hängt ab von der Art des Geruchsstoffes und der Zusammensetzung des Probandenkollektivs, das die Geruchswahrnehmung feststellt:

- Die Richtlinie VDI 3882/1 *Olfaktometrie, Bestimmung der Geruchsintensität* gibt als mittlere Standardabweichung  $s_{10}$  der Intensitätsübergänge für verschiedene Stoffe Werte zwischen 0.35 und 0.55 an. Für  $H_2S$  wird für den Intensitätsübergang 0, also die Geruchsschwelle, der Wert  $\lambda_{10} = 0.58$  angegeben.

- Bei der Untersuchung in Uttenweiler<sup>1</sup> werden für die einzelnen Probanden bei n-Butanol Werte von  $\lambda_{10}$  zwischen 0.11 und 0.33 angegeben. Berücksichtigt man die unterschiedlichen Geruchsschwellen der Probanden, dann kommt man für das Kollektiv auf einen Wert von 0.30, also  $\lambda = 0.69$ . Bei den Emissionsmessungen sind für Probandenkollektive Werte von  $Z_{16}$  und  $Z_{84}$  angegeben. Hieraus erhält man für  $\lambda$  Werte zwischen 0.34 und 0.86 mit dem Median bei 0.59.

Beim Geruch eines Schweinestalls, der wahrscheinlich typisch ist für Mischgerüche aus der Landwirtschaft, wurde  $\lambda \approx 0.6$  gefunden. Bei reinen Stoffen sind die typischen Werte von  $\lambda$  höher, bei 0.7 bis 1.3. Qualitative Angaben in der Literatur deuten darauf hin, daß bei manchen Stoffen die Unterschiede zwischen den Probanden noch erheblich höher sein können, so daß sich für das Kollektiv noch höhere Werte von  $\lambda$  ergeben.

Die Beurteilung einer Situation mit Geruchswahrnehmung erfolgt nach GIRL über die Geruchsstunde. Eine Stunde gilt als Geruchsstunde, wenn zu mehr als 10 Prozent der Zeit eine Geruchswahrnehmung vorliegt. Dies kann mit Hilfe von Fluktuationsmodellen (Modelltyp A) direkt berechnet werden. Arbeitet man nur mit einem Mittelwertmodell (Modelltyp B), dann wird das Vorliegen einer Geruchsstunde angenommen, wenn der Mittelwert größer ist als die Beurteilungsschwelle. Die Kriterien sind also:

$$\text{Modelltyp A: } \kappa_0 \geq 0.1 \quad (4.38)$$

$$\text{Modelltyp B: } \bar{c} \geq c_{BS} \quad (4.39)$$

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, daß eine solche Beurteilungsschwelle  $c_{BS}$  bei etwa  $0.25c_{GS}$  liegen sollte. Gibt man die Konzentrationswerte in  $\text{GE}/\text{m}^3$  an, dann hat  $c_{BS}$  also den Zahlenwert 0.25. Modelltyp B mit diesem Wert der Beurteilungsschwelle wird im folgenden als BS25 bezeichnet.

## 4.2 Analyse von Einzelsituationen

Die Unterschiede der verschiedenen Modellansätze wurden zunächst anhand der für Einzelsituationen berechneten Geruchshäufigkeit untersucht. Um einen Bewertungsmaßstab für die Unterschiede zu erhalten, wird für das Modell COFIN, das — soweit es anwendbar ist — als das zuverlässigste angesehen werden kann, der Bereich dargestellt, der sich bei einer Variation der Quellstärke um einen Faktor zwischen 1.2 und  $1/1.2$  ergibt (Toleranzbereich von 20 %). Da in der Praxis bei der Quellstärkebestimmung erfahrungsgemäß eine Unsicherheit von bis zu einem Faktor 2 einkalkuliert werden muß, sind alle Unterschiede im Rahmen des so definierten Toleranzbereiches viel kleiner als die Unsicherheit, die in der Praxis allein bei der Quellstärkebestimmung in das Verfahren eingebracht wird.

Die Bilder 4.6 und 4.7 zeigen die Geruchshäufigkeit  $\kappa_0$  im Lee einer 10 m hohen Quelle bei neutraler Schichtung. Die mit WBL10 erhaltenen Ergebnisse liegen in allen Fällen im Toleranzbereich. Deutliche Abweichungen sieht man bei geringen Konzentrationswerten, wenn die

<sup>1</sup>W. BÄCHLIN, A. RÜHLING, A. LOHMEYER: *Bereitstellung von Validierungsdaten für Geruchsausbreitungsmodelle — Naturmessungen*, Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, BWE 20003, Juni 2002.

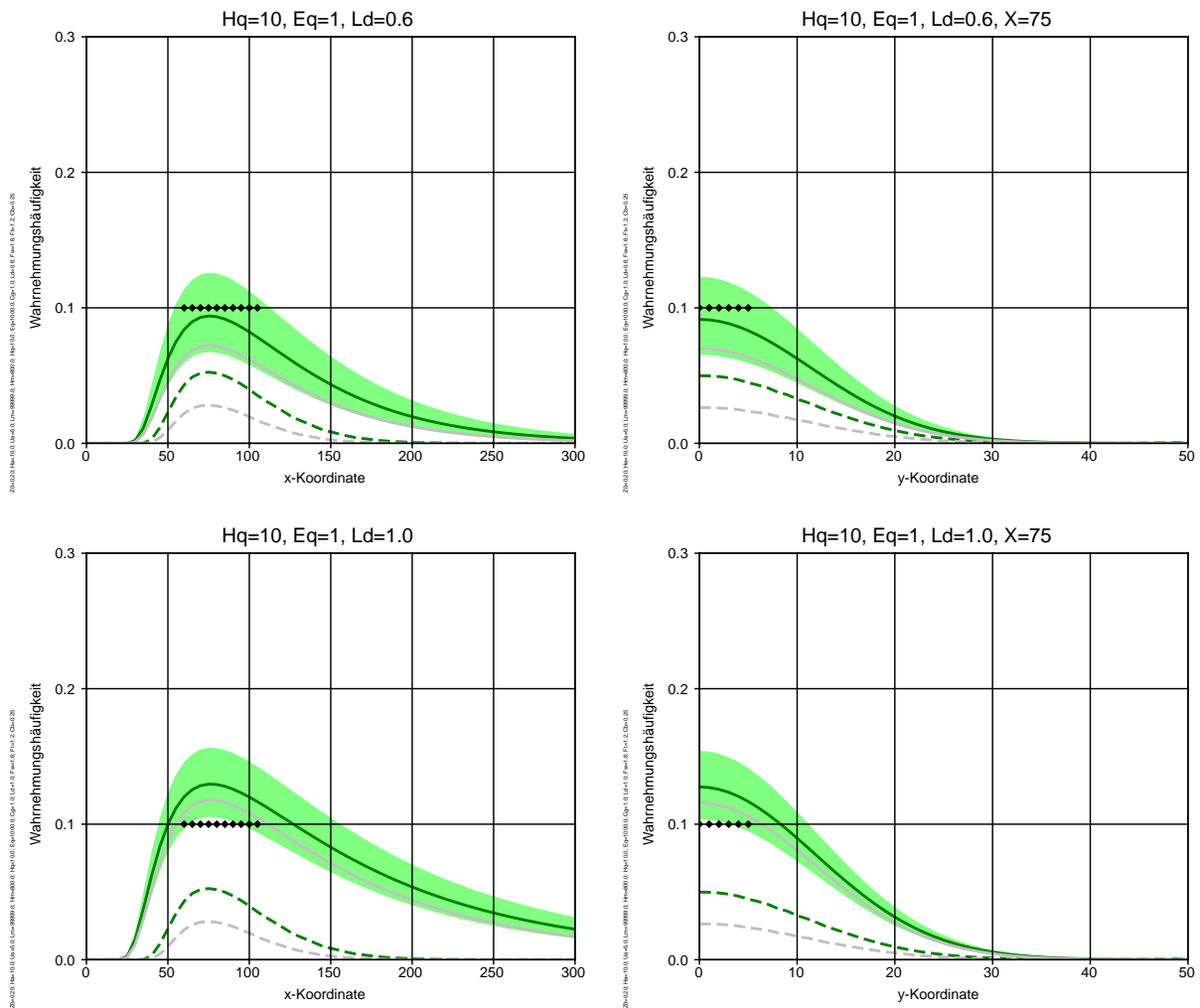
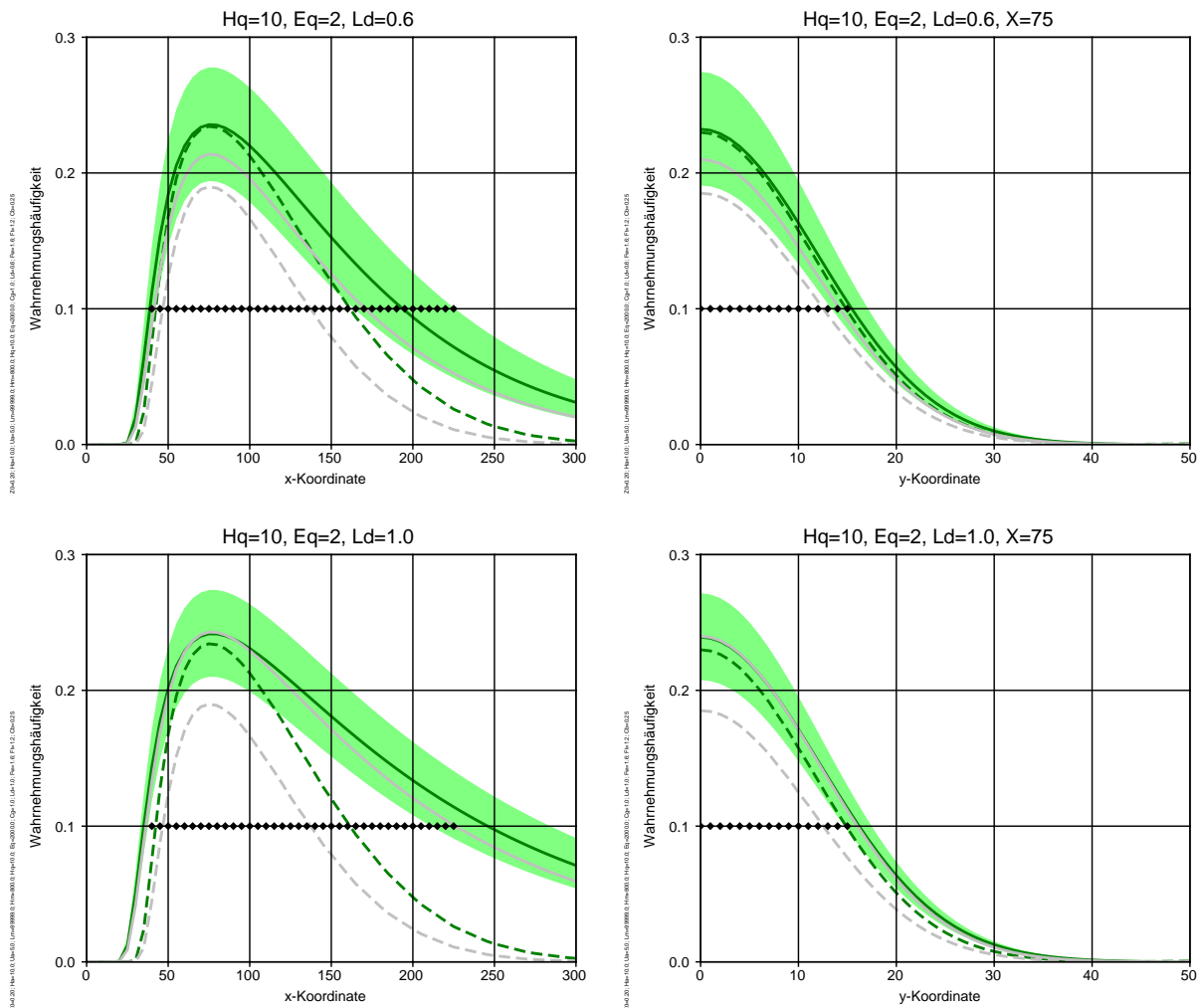


BILD 4.6: Wahrnehmungshäufigkeit von Geruch  $\kappa_0$  für eine punktförmige Quelle bei  $(0,0,10)$ , Parameter:  $E_q=1$  kGE/s,  $h_a=10$  m,  $u_a=5$  m/s,  $r_a=270$  Grad,  $L_M=99999$  m,  $h_m=800$  m,  $z_0=0.20$  m,  $d_0=0$  m. Links:  $\kappa_0$  als Funktion des Quellabstandes  $x$  für  $y = 0$  (Fahnenachse). Rechts:  $\kappa_0$  als Funktion von  $y$  für  $x=75$  m. Oben:  $\lambda=0.6$ . Unten:  $\lambda=1.0$ . Die verwendeten Modelle sind COFIN (grüne Kurve) und WBL10 (graue Kurve). Die gestrichelten Linien gelten für  $\lambda=0$ . Die Rauten kennzeichnen den Bereich, für den Modell BS25 eine Geruchsstunde angibt. Die hellgrüne Fläche ist der Bereich, in dem sich die grüne Kurve (COFIN) bewegt, wenn die Quellstärke  $E_q$  um bis zu 20 % variiert wird.



Streuung der Geruchswahrnehmung im Probandenkollektiv nicht berücksichtigt sondern mit  $\lambda=0$  gerechnet wird (gestrichelte Kurven). Dies ist die übliche Art, Windkanalmessungen auszuwerten. Sie führt zu einer deutlichen Unterschätzung der Geruchshäufigkeit in Situationen, wo eine Geruchsstunde gerade erreicht wird.



**BILD 4.7:** Wahrnehmungshäufigkeit von Geruch  $\kappa_0$  für eine punktförmige Quelle bei  $(0,0,10)$ , Parameter:  $E_q=2$  kGE/s,  $h_a=10$  m,  $u_a=5$  m/s,  $r_a=270$  Grad,  $L_M=99999$  m,  $h_m=800$  m,  $z_0=0.20$  m,  $d_0=0$  m. Links:  $\kappa_0$  als Funktion des Quellabstandes  $x$  für  $y = 0$  (Fahnenachse). Rechts:  $\kappa_0$  als Funktion von  $y$  für  $x=75$  m. Oben:  $\lambda=0.6$ . Unten:  $\lambda=1.0$ . Die verwendeten Modelle sind COFIN (grüne Kurve) und WBL10 (graue Kurve). Die gestrichelten Linien gelten für  $\lambda=0$ . Die Rauten kennzeichnen den Bereich, für Modell BS25 eine Geruchsstunde angibt. Die hellgrüne Fläche ist der Bereich, in dem sich die grüne Kurve (COFIN) bewegt, wenn die Quellstärke  $E_q$  um bis zu 20 % variiert wird.

Die Aussagen von Modell BS25 über das Vorliegen einer Geruchsstunde bewegen sich ebenfalls alle im Toleranzbereich, wobei es bei kleinen Werten von  $\lambda$  zur Überschätzung und bei großem  $\lambda$  zur Unterschätzung kommt.

Bei großen Quellstärken verschwinden die Unterschiede zwischen den Modellen immer mehr: Entweder der betrachtete Aufpunkt liegt im Inneren der Fahne, dann liefern alle Modelle eine Geruchsstunde, oder er liegt außerhalb, dann sind sich auch alle Modelle einig. Der Randbe-

reich, in dem Modellunterschiede auftreten könnten, wird immer schmaler, je höher die Quellstärke gewählt wird. Daher ist für die vorliegenden Untersuchungen auch nur der Parameterbereich wichtig, bei dem es gerade zum Vorliegen einer Geruchsstunde kommt.

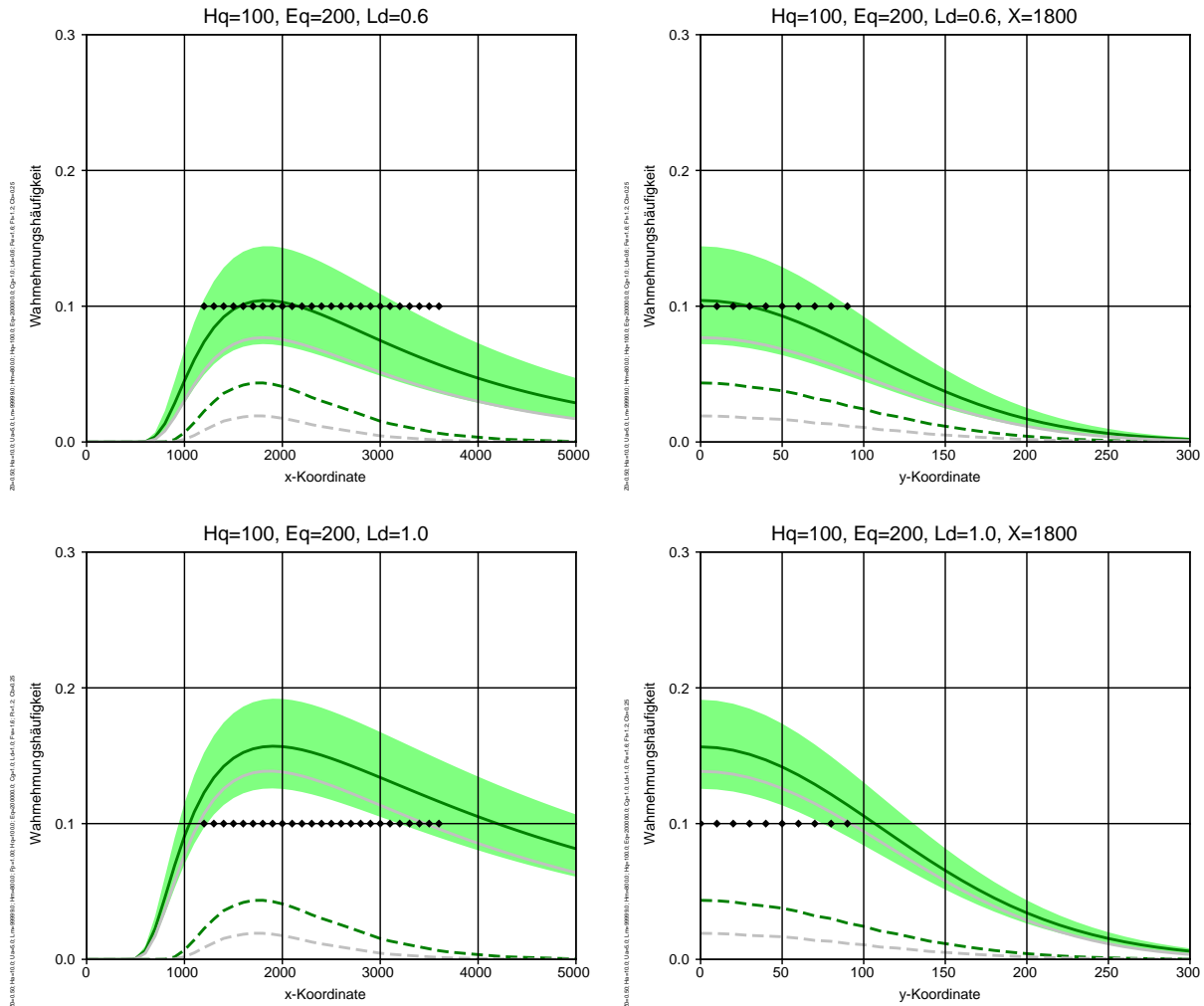


BILD 4.8: Wahrnehmungshäufigkeit von Geruch  $\kappa_0$  für eine punktförmige Quelle bei (0,0,100), Parameter:  $E_q=200$  kGE/s,  $h_a=10$  m,  $u_a=5$  m/s,  $r_a=270$  Grad,  $L_M=99999$  m,  $h_m=800$  m,  $z_0=0.50$  m,  $d_0=0$  m. Links:  $\kappa_0$  als Funktion des Quellabstandes  $x$  für  $y=0$  (Fahnenachse). Rechts:  $\kappa_0$  als Funktion von  $y$  für  $x=1800$  m. Oben:  $\lambda=0.6$ . Unten:  $\lambda=1.0$ . Die verwendeten Modelle sind COFIN (grüne Kurve) und WBL10 (graue Kurve). Die gestrichelten Linien gelten für  $\lambda=0$ . Die Rauten kennzeichnen den Bereich, für den Modell BS25 eine Geruchsstunde angibt. Die hellgrüne Fläche ist der Bereich, in dem sich die grüne Kurve (COFIN) bewegt, wenn die Quellstärke  $E_q$  um bis zu 20% variiert wird.

Sehr ähnliche Ergebnisse erhält man für eine 100 m hohe Quelle (Bild 4.8). Allerdings sollte man bei hohen Quellen berücksichtigen, daß die Fahne nicht nur horizontal sondern auch vertikal mäandern kann. Gegenüber dem COFIN-Ansatz erhält man dann eine geringere Intermittenz. Dies kann dadurch simuliert werden, daß die Kernfahne um einen Faktor  $f_p$  schmaler gewählt wird. Mit  $f_p=0.5$  (Bild 4.9) erhält man etwas höhere Geruchshäufigkeiten. Modell BS25 liegt aber weiterhin im Toleranzbereich oder nur unwesentlich außerhalb.

Die bisher vorgestellten Ergebnisse beziehen sich alle auf punktförmige Quellen. In einer Test-

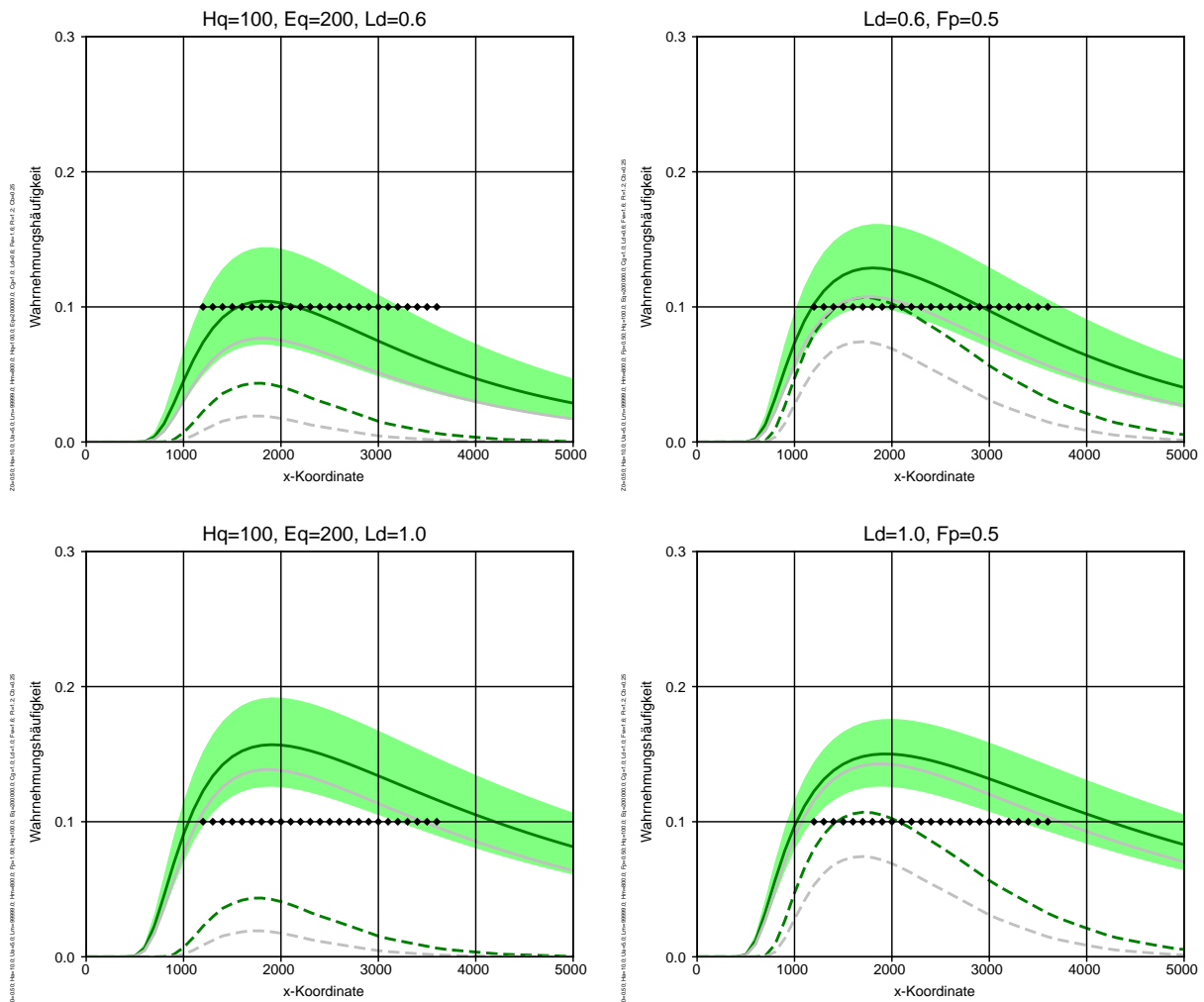


BILD 4.9: Wahrnehmungshäufigkeit von Geruch  $\kappa_0$  für eine punktförmige Quelle bei (0,0,100) als Funktion des Quellabstandes  $x$ . Parameter:  $E_q=200$  kGE/s,  $h_a=10$  m,  $u_a=5$  m/s,  $r_a=270$  Grad,  $L_M=99999$  m,  $h_m=800$  m,  $z_0=0.50$  m,  $d_0=0$  m. Links: Normale Breite der Kernfahne ( $f_p=1.0$ ). Rechts: Verringerte Breite der Kernfahne ( $f_p=0.5$ ). Oben:  $\lambda=0.6$ . Unten:  $\lambda=1.0$ . Die verwendeten Modelle sind COFIN (grüne Kurve) und WBL10 (graue Kurve). Die gestrichelten Linien gelten für  $\lambda=0$ . Die Rauten kennzeichnen den Bereich, für den Modell BS25 eine Geruchsstunde angibt. Die hellgrüne Fläche ist der Bereich, in dem sich die grüne Kurve (COFIN) bewegt, wenn die Quellstärke  $E_q$  um bis zu 20% variiert wird.

rechnung wurde versucht, den Effekt einer horizontalen Ausdehnung dadurch zu simulieren, daß die Breiten von Kernfahne und mittlerer Fahne so erhöht wurden, wie es einer Flächenquelle mit Radius  $r_q$  und Gauß-förmiger Queldichte entspricht. Die vom Mittelwertmodell berechnete integrierte Konzentration  $C_y(x)$  wurde ebenfalls mit einer Gauß-Glocke gefaltet. Es ist zwar ungewiß, ob die Verteilungsfunktion der Konzentrationswerte in der Kernfahne dadurch angemessen wiedergegeben wird, aber es wird zumindest die reduzierte Wirkung des Mäanderns simuliert. Bild 4.10 zeigt für den Fall  $r_q=50$  m, daß auch hierbei die Modelle sehr ähnliche Ergebnisse liefern.

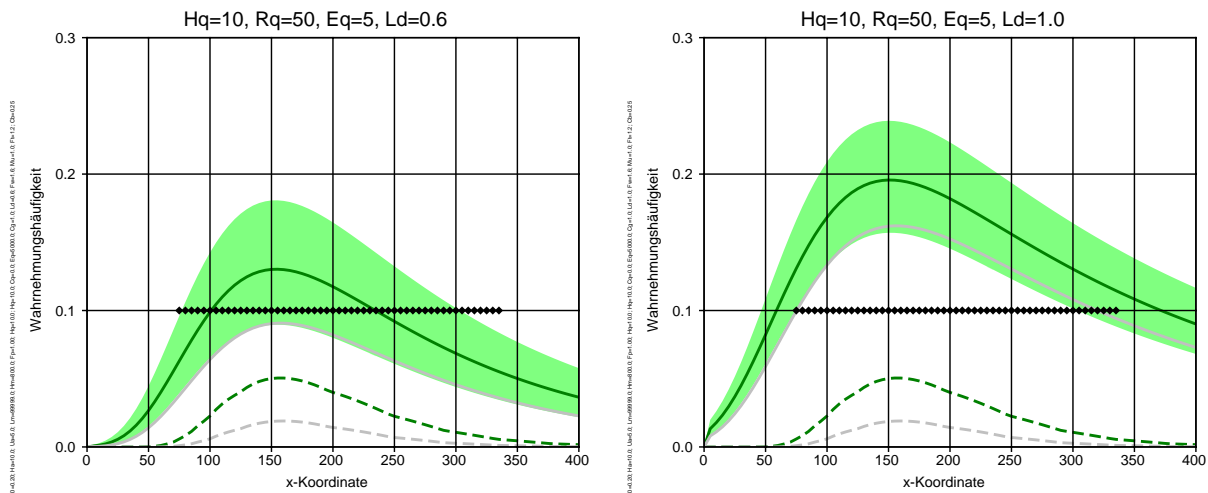


BILD 4.10: Wahrnehmungshäufigkeit von Geruch  $\kappa_0$  für eine Flächenquelle bei (0,0,10) mit Radius  $r_q=50$  m als Funktion des Quellabstandes  $x$ . Parameter:  $E_q=5$  kGE/s,  $h_a=10$  m,  $u_a=5$  m/s,  $r_a=270$  Grad,  $L_M=99999$  m,  $h_m=800$  m,  $z_0=0.20$  m,  $d_0=0$  m. Links:  $\lambda=0.6$ . Rechts:  $\lambda=1.0$ . Die verwendeten Modelle sind COFIN (grüne Kurve) und WBL10 (graue Kurve). Die gestrichelten Linien gelten für  $\lambda=0$ . Die Rauten kennzeichnen den Bereich, für den Modell BS25 eine Geruchsstunde angibt. Die hellgrüne Fläche ist der Bereich, in dem sich die grüne Kurve (COFIN) bewegt, wenn die Quellstärke  $E_q$  um bis zu 20 % variiert wird.

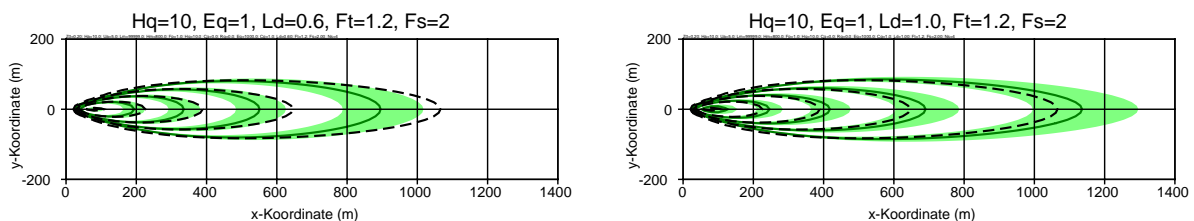


BILD 4.11: Fläche, für die eine Geruchsstunde ausgewiesen wird, bei Quellstärken von  $E_q=1, 2, 4, 8, 16$  kGE/s (von innen nach außen). Parameter: Punktquelle bei (0,0,10),  $h_a=10$  m,  $u_a=5$  m/s,  $r_a=270$  Grad,  $L_M=99999$  m,  $h_m=800$  m,  $z_0=0.20$  m,  $d_0=0$  m. Links:  $\lambda=0.6$ . Rechts:  $\lambda=1.0$ . Die verwendeten Modelle sind COFIN (grüne Kurve) und BS25 (schwarze gestrichelte Kurve). Die hellgrüne Fläche ist der Bereich, in dem sich die grüne Kurve (COFIN) bewegt, wenn die Quellstärke  $E_q$  um bis zu 20 % variiert wird.

In einer kompakteren Darstellung ist in Bild 4.11 dargestellt, für welche Fläche die Modelle COFIN und BS25 eine Geruchsstunde ausweisen. Für  $\lambda=0.6$  und für  $\lambda=1.0$  bleibt BS25 fast immer im Toleranzbereich von COFIN, lediglich bei hohen Quellstärken und kleinem  $\lambda$  wird er in  $x$ -Richtung etwas überschritten.

### 4.3 Analyse von Jahreswerten

Das Geruchsausbreitungsmodell soll dazu dienen, die Häufigkeit von Geruchsstunden im Jahresmittel zu schätzen. Es wurden daher Ausbreitungsrechnungen mit einer AKS für folgende Situationen durchgeführt:

- Es wird die AKS `anonym.aks` verwendet, die vom DWD für Testrechnungen freigegeben ist.
- Es werden 3 Quellhöhen untersucht, die für die Praxis am wichtigsten zu sein scheinen:  $h_q = 10, 30, 60$  m (Serie A, B, C). Die Quellen sind punktförmig. Lediglich die niedrigste Quelle wird als horizontale Kreisscheibe angesetzt mit einer Quelldichte von  $0.05 \text{ GE/m}^2\text{s}$ , um die reale Situation bei der Emission aus Ställen besser zu beschreiben. Zu diesem Zweck erhält sie auch eine vertikale Ausdehnung zwischen 5 und 10 m.
- Die Quellstärke wird um den Faktor 2 in einem Bereich variiert, der der jeweiligen Quellhöhe angepaßt ist.
- Es werden die Fluktuationsmodelle COFIN und WBL07 (also Weibull-Verteilung mit  $p = 2.0$  und  $\mu = 0.7$ ) eingesetzt. Das bisher verwendete WBL10 wurde durch WBL07 ersetzt, weil Testrechnungen gezeigt hatten, daß damit eine bessere Übereinstimmung mit COFIN zu erzielen ist.
- Die Geruchswahrnehmung wird für  $\lambda = 0.3, 0.6, 0.9, 1.2$  berechnet.
- Bei Modelltyp B werden die Beurteilungsschwellen  $c_{BS} = 0.20, 0.21, 0.22, \dots, 0.40$  betrachtet.
- Die Ergebnisse werden für die relativen Häufigkeiten  $\varphi = 0.02, 0.05, 0.10, 0.15$  von Jahresgeruchsstunden analysiert.

Um die Vielzahl von Ergebnissen in übersichtlicher Form darstellen zu können, werden folgende Schritte durchgeführt:

1. Die in den Ausbreitungsrechnungen berechneten Häufigkeiten von Geruchsstunden werden als Iso-Linien-Bilder dargestellt.
2. Es wird ausgerechnet, wie groß die Flächeninhalte  $a$  der Iso-Linien mit den vorgegebenen Werten von  $\varphi$  sind und bis zu welcher Quellentfernung  $r_{\max}$  sie sich erstrecken.
3. Es werden die Werte  $xx$  für die Beurteilungsschwelle  $c_{BS} = 0.xx$  herausgesucht, bei denen die Ergebnisse von  $BS_{xx}$  am besten mit denen von COFIN übereinstimmen.
4. Es wird dargestellt, wie weit die Ergebnisse von WBL07 und von  $BS_{25}$  von den mit COFIN ermittelten Ergebnissen abweichen.

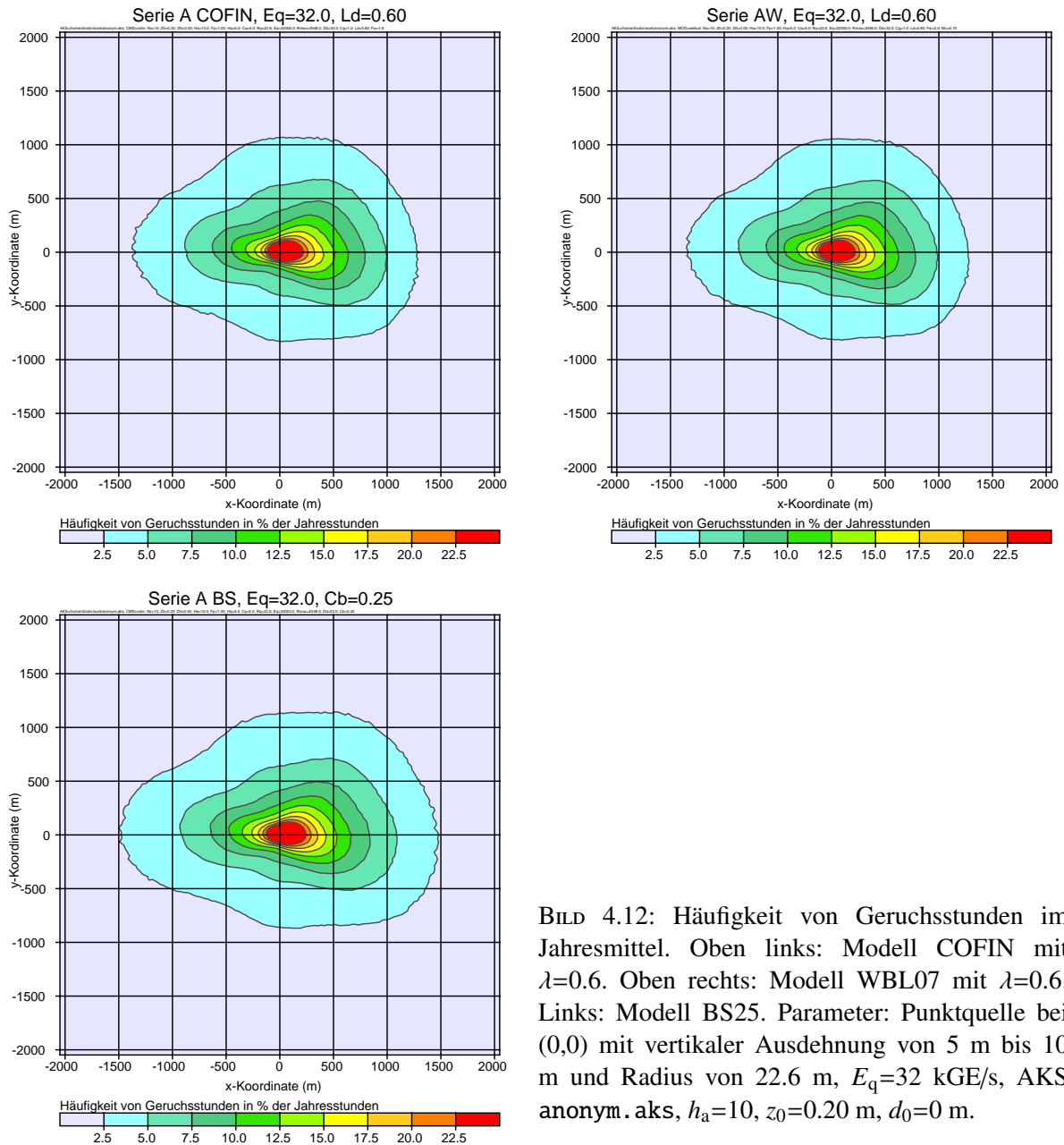


BILD 4.12: Häufigkeit von Geruchsstunden im Jahresmittel. Oben links: Modell COFIN mit  $\lambda=0.6$ . Oben rechts: Modell WBL07 mit  $\lambda=0.6$ . Links: Modell BS25. Parameter: Punktquelle bei (0,0) mit vertikaler Ausdehnung von 5 m bis 10 m und Radius von 22.6 m,  $E_q=32$  kGE/s, AKS anonym. aks,  $h_a=10$ ,  $z_0=0.20$  m,  $d_0=0$  m.

Bild 4.12 zeigt die Häufigkeit von Geruchsstunden im Jahresmittel für die drei betrachteten Modelle. Die Ergebnisse von COFIN und WBL07 stimmen praktisch überein, BS25 liefert etwas höhere Werte. Um bei dem in diesen Darstellungen verwendeten Wert  $\lambda = 0.6$  eine möglichst gute Übereinstimmung mit COFIN zu erhalten, müßte also die Beurteilungsschwelle etwas erhöht werden. Bild 4.13 zeigt, daß man in diesem Fall mit BS30 die beste Übereinstimmung mit COFIN hinsichtlich der Größe der betroffenen Fläche erhalten würde.

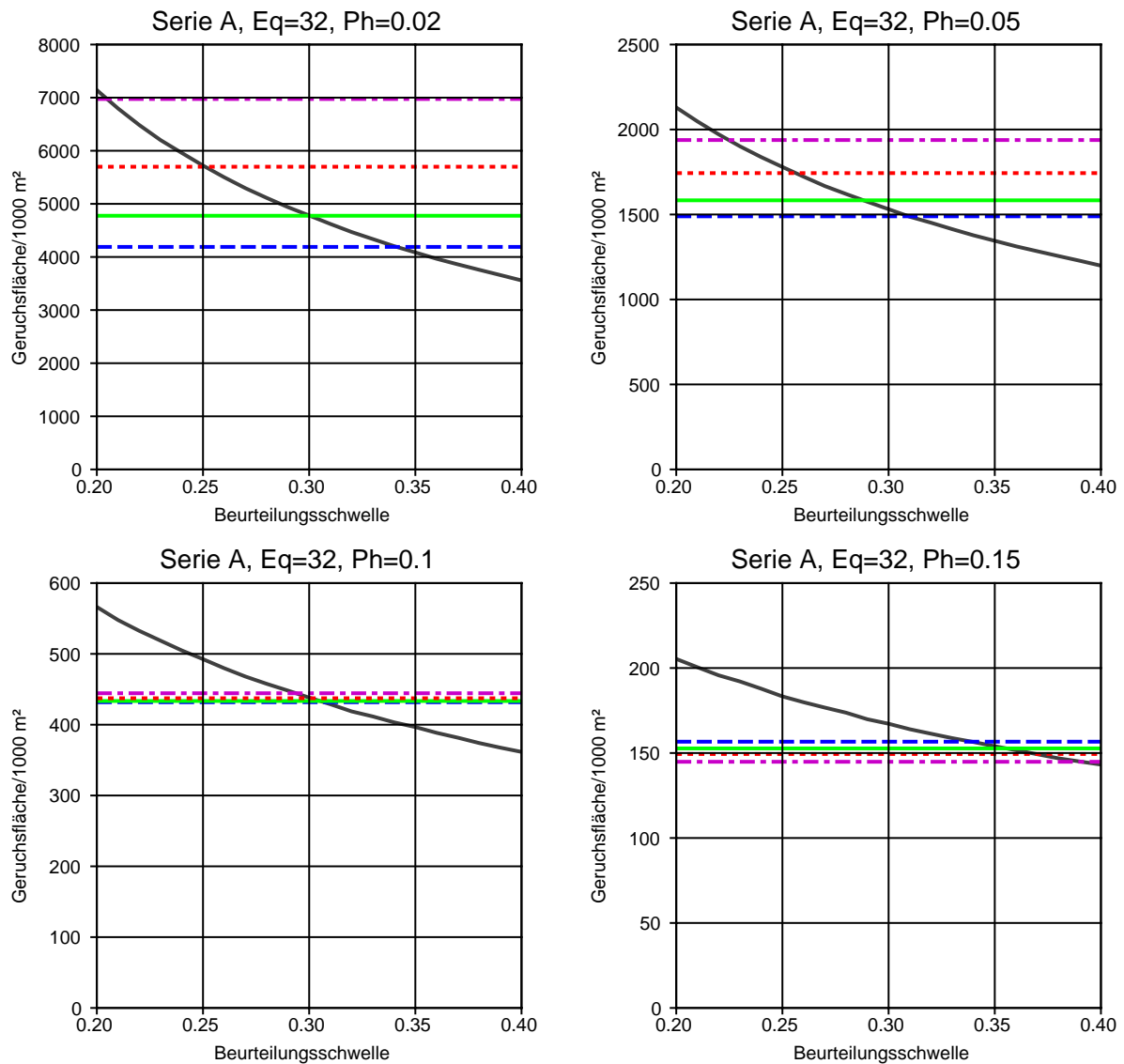


BILD 4.13: Größe des Gebietes, innerhalb dessen die Häufigkeit von Geruchsstunden größer als ein vorgegebener Wert  $\varphi$  ist. Die farbigen Linien bezeichnen COFIN-Rechnungen für verschiedene Werte von  $\lambda$ : blau = 0.3, grün=0.6, rot=0.9, violett=1.2. Die schwarze durchgezogene Kurve ist die Flächengröße bei Modelltyp B in Abhängigkeit vom Wert der verwendeten Beurteilungsschwelle. Die Bilder zeigen von links oben nach rechts unten die Ergebnisse für  $\varphi = 0.02, 0.05, 0.10, 0.15$ . Parameter: Punktquelle bei (0,0) mit vertikaler Ausdehnung von 5 m bis 10 m und Radius von 22.6 m,  $E_q=32$  kGE/s, AKS anonym. aks,  $h_a=10$ ,  $z_0=0.20$  m,  $d_0=0$  m.

Nimmt man nicht die Flächengröße als Kriterium sondern die maximale Entfernung, in der der vorgegebene Wert  $\varphi$  der Geruchsstundenhäufigkeit noch erreicht wird, dann kommt man auf den gleichen Wert für  $c_{BS}$  (Bild 4.14).

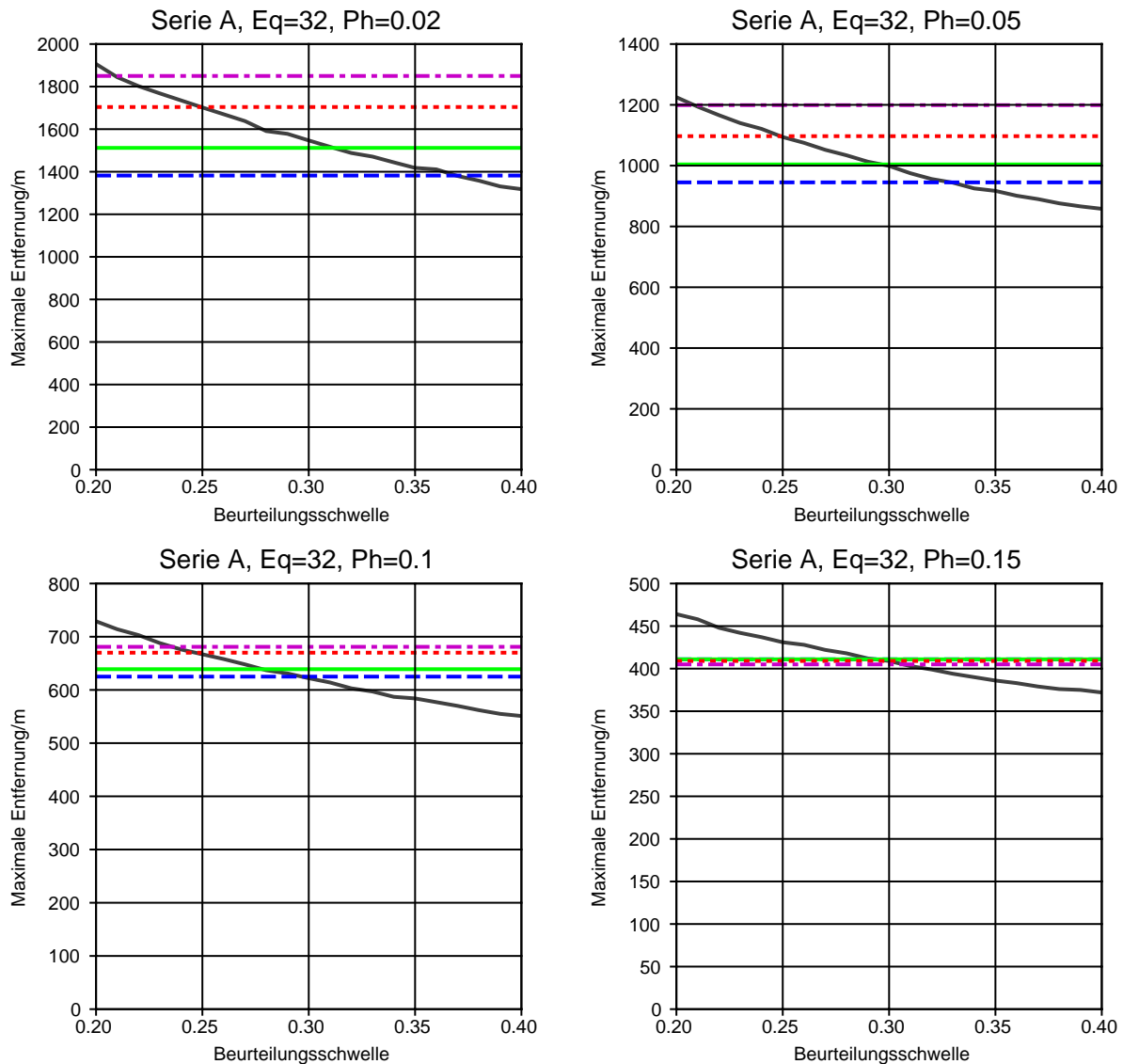


BILD 4.14: Maximale Quellentfernung, in der die Häufigkeit von Geruchsstunden einen vorgegebenen Wert  $\varphi$  erreicht. Die farbigen Linien bezeichnen COFIN-Rechnungen für verschiedene Werte von  $\lambda$ : blau = 0.3, grün=0.6, rot=0.9, violett=1.2. Die schwarze durchgezogene Kurve ist die Quellentfernung bei Modelltyp B in Abhängigkeit vom Wert der verwendeten Beurteilungsschwelle. Die Bilder zeigen von links oben nach rechts unten die Ergebnisse für  $\varphi = 0.02, 0.05, 0.10, 0.15$ . Parameter: Punktquelle bei (0,0) mit vertikaler Ausdehnung von 5 m bis 10 m und Radius von 22.6 m,  $E_q=32$  kGE/s, AKS anonym. aks,  $h_a=10$ ,  $z_0=0.20$  m,  $d_0=0$  m.

In Bild 4.15 sind für alle durchgeführten Rechnungen die optimalen Werte für  $c_{BS}$  dargestellt, also die Beurteilungsschwellen, die ein Modelltyp B verwenden müßte, um optimale Übereinstimmung mit den COFIN-Rechnungen hinsichtlich der ausgewiesenen Geruchsfläche oder der Geruchsreichweite zu erhalten. Es ist zu sehen, daß nur wenige Punkte links der Linie



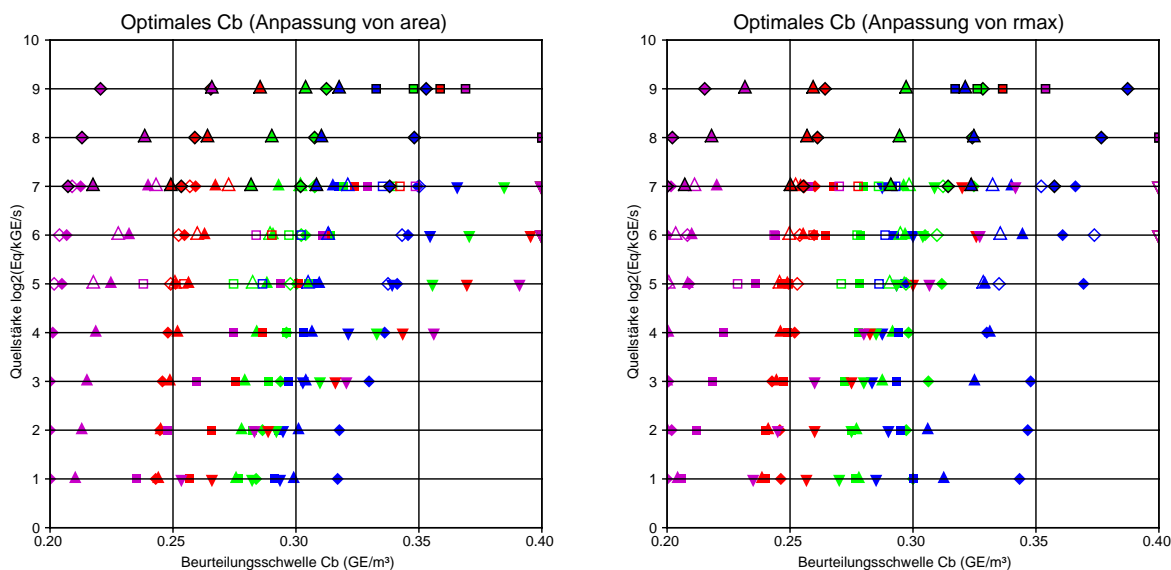


BIld 4.15: Optimale Werte der Beurteilungsschwelle bei Anpassung an die COFIN-Ergebnisse. Links: Anpassung der Geruchsfläche. Rechts: Anpassung der Geruchsreichweite. Vertikal aufgetragen ist der Zweier-Logarithmus der Quellstärke; der Zahlenwert 3 bedeutet also  $2^3 = 8$  kGE/s.

Die Parameter sind:  $\lambda = 0.3$  (blau),  $0.6$  (grün),  $0.9$  (rot),  $1.2$  (violett).

$\varphi = 0.02$  (Raute),  $0.05$  (Pyramide),  $0.10$  (Quadrat),  $0.15$  (Dreieck).

Serie = A (Fläche), B (Linienzug), C (Fläche mit schwarzem Rand).

$c_{BS} = 0.25$  liegen. Es handelt sich hierbei um niedrige Quellen mit geringer Quellstärke und einen Stoff mit  $\lambda = 1.2$ . Die Beurteilungsschwelle  $c_{BS} = 0.25$  führt also in weitaus den meisten Fällen zu korrekten oder konservativen Schätzungen der Geruchsstundenhäufigkeit.

Generell ist die Tendenz zu erkennen, daß bei hohen Quellen die optimalen Werte für die Beurteilungsschwelle höher liegen. Es ist aber zu beachten, daß in diesen Rechnungen kein vertikales Mäandern der Fahne modelliert wurde. Die für Einzelsituationen erhaltenen Ergebnisse lassen vermuten, daß in einem realistischeren Modell diese Tendenz deutlich schwächer ausgeprägt sein würde.

Entscheidet man sich auf Grund dieser Ergebnisse, im Modelltyp B die Beurteilungsschwelle  $c_{BS} = 0.25$  zu verwenden, dann ist wieder zu prüfen, wie relevant die Abweichungen zu den COFIN-Ergebnissen sind. Dies wird in den Bildern 4.16 und 4.17 dargestellt. Die graue Linie (Modell COFIN) durchläuft fast immer die blauen Rauten (Modell WBL07), beide Modelle liefern also praktisch identische Ergebnisse.

Die roten Quadrate (Modell BS25) sind mit einem roten Querbalken versehen, der über den jeweiligen Toleranzbereich (Faktor 1.2 in der Quellstärke) verläuft. Wenn dieser Querbalken die graue Linie schneidet oder berührt, stimmen die Ergebnisse von BS25 und von COFIN im Rahmen der hier zugelassenen Toleranz überein, d.h. die Verwendung von Modell BS25 führt zu keinen größeren Abweichungen von den COFIN-Ergebnissen als eine Variation der Quellstärke um 20 %. Dies ist für  $\lambda \geq 0.6$ , also in dem in der Praxis interessierenden Bereich, fast immer der Fall.

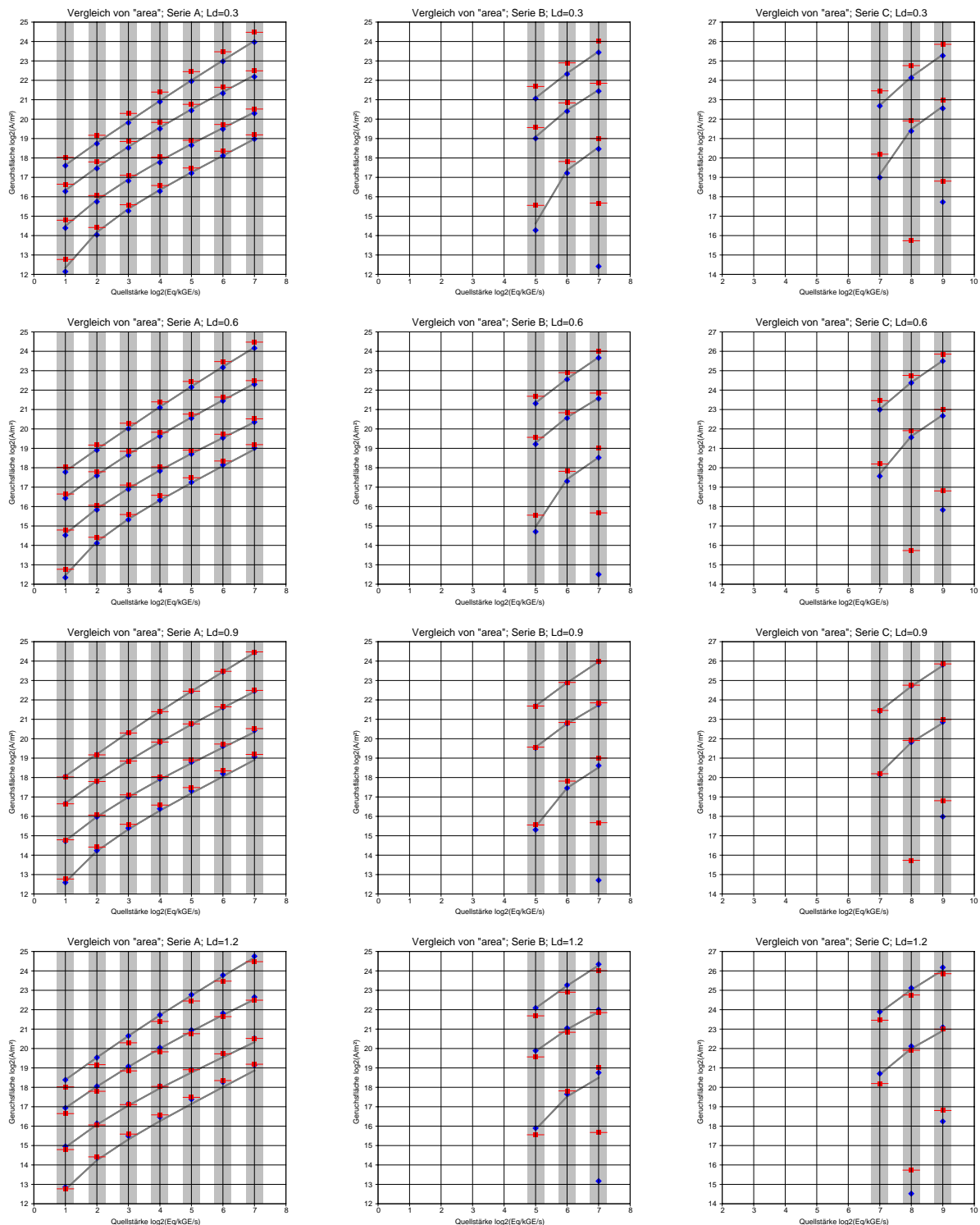


BIld 4.16: Die von den Modellen berechnete Geruchsfläche als Funktion der Quellstärke in doppelt logarithmischer Darstellung. Die hellgrauen vertikalen Streifen geben die Breite des Toleranzbereiches an (Variation der Quellstärke um den Faktor 1.2). Modelle: COFIN (graue Linie), WBL07 (blaue Rauten), BS25 (rote Quadrate mit Querbalken). Serie A (linke Spalte), B (mittlere Spalte), C (rechte Spalte).  $\lambda=0.3, 0.6, 0.9, 1.2$  (von oben nach unten). Die vier in einer Säule gezeichneten Symbole beziehen sich auf die Geruchsstundenhäufigkeiten  $\varphi=0.02, 0.05, 0.10, 0.15$  (von oben nach unten, die unteren Symbole können fehlen, wenn diese Geruchsstundenhäufigkeiten nicht auftraten).

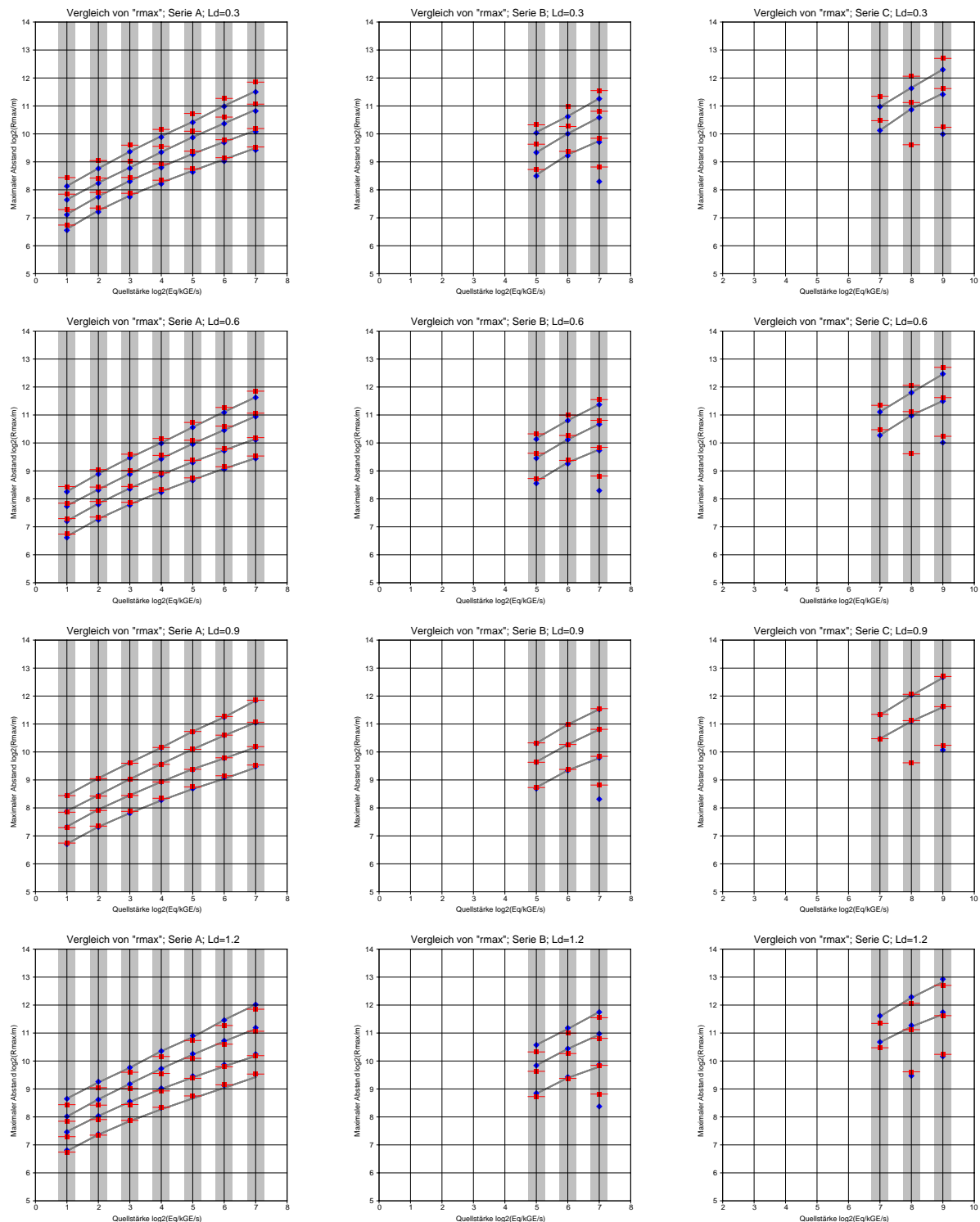


BIld 4.17: Die von den Modellen berechnete Geruchsreichweite als Funktion der Quellstärke in doppelt logarithmischer Darstellung. Die hellgrauen vertikalen Streifen geben die Breite des Toleranzbereiches an (Variation der Quellstärke um den Faktor 1.2). Modelle: COFIN (graue Linie), WBL07 (blaue Rauten), BS25 (rote Quadrate mit Querbalken). Serie A (linke Spalte), B (mittlere Spalte), C (rechte Spalte).  $\lambda=0.3, 0.6, 0.9, 1.2$  (von oben nach unten). Die vier in einer Säule gezeichneten Symbole beziehen sich auf die Geruchsstundenhäufigkeiten  $\varphi=0.02, 0.05, 0.10, 0.15$  (von oben nach unten, die unteren Symbole können fehlen, wenn diese Geruchsstundenhäufigkeiten nicht auftraten).

## 4.4 Analyse von Windkanalmessungen

Bisher wurden nur punktförmige oder horizontal ausgedehnte Quellen mit einfacher Quellstruktur betrachtet. Um auch für komplexere Situationen Anhaltspunkte zur angemessenen Modellierung zu erhalten, wurden die Ergebnisse der Windkanalmessungen analysiert, die im Windkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg im Rahmen der Untersuchungen an einem Stall in Uttenweiler durchgeführt worden sind.<sup>2</sup>

Dabei wurden für einen Stall (Grundfläche von  $30 \times 50 \text{ m}^2$ , Firsthöhe etwa 8 m) mit einem anschließenden Gebäude ( $15 \times 30 \text{ m}^2$ , Firsthöhe etwa 10 m) u.a. Zeitreihen von Konzentrationsfluktuationen an 21 Aufpunkten in 35 bis 300 m Entfernung gemessen. Die Windrichtung wurde über die gesamte Windrose in Schritten von 10 Grad variiert, so daß über 700 Zeitreihen zur Verfügung standen. Für diese Zeitreihen sind Mittelwert, Intermittenz und die Quantile 0.30, 0.50, 0.70, 0.90, 0.95, 0.98, 0.99 in der CEDVAL-Datenbank<sup>3</sup> als Datensatz D1-1 angegeben.

Die Daten sind als Quotient zur Konzentration  $c_s$  im emittierten Abgas angegeben. Leider sind die Angaben zur Intermittenz und damit auch der Persistenz nicht brauchbar, da die Schwelle, unterhalb der Meßwerte als Null-Werte eingestuft werden, auf  $0.0025 c_s$  festgelegt ist. In der realen Situation ist  $c_s \approx 2000 \text{ GE/m}^3$ , alle Werte unterhalb einer Konzentration von  $5 \text{ GE/m}^3$  sind also als Null-Werte aussortiert worden. Für Fragestellungen zu einer Beurteilungsschwelle bei  $0.25 \text{ GE/m}^3$  sind die Intermittenzangaben damit vollkommen unbrauchbar.

Für eine Analyse der Windkanalergebnisse wurden daher nur die Perzentile verwendet und aus den angegebenen Werten eine Meßwertverteilung als Histogramm konstruiert. Die zum 99-Perzentil angegebenen Werte wurden als 100-Perzentil interpretiert, um das Histogramm nach oben hin abzuschließen.

Aus den Histogramm-Darstellungen der Meßwerte wurden, wie zuvor für die modellmäßig ermittelten Verteilungsfunktionen, mit Hilfe der Wahrnehmungsfunktion (Geruchsschwellenkennlinie) für die Werte  $\lambda=0.6, 0.9$  und  $1.2$  die Geruchshäufigkeiten  $\kappa_0$  berechnet (Bild 4.18). Der Wert  $0.3$  wurde fortgelassen, da er in der Praxis kaum eine Rolle spielen dürfte. Das Diagramm ist in 4 farbige Felder unterteilt, die folgende Bedeutung haben:

<sup>2</sup>B. LEITL, S. AUBRUN, M. SCHATZMANN: *Bereitstellung systematischer Vergleichsdaten für die Entwicklung und Validierung numerischer Geruchsausbreitungsmodelle — Windkanalversuche im Verbundprojekt „Geruchsfreisetzung und -ausbreitung“*, im Rahmen des Programms *Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung* des Landes Baden-Württemberg (Förderkennzeichen BWE 20001), Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, Juli 2002.

<sup>3</sup>[www.mi.uni-hamburg.de/cedval](http://www.mi.uni-hamburg.de/cedval)

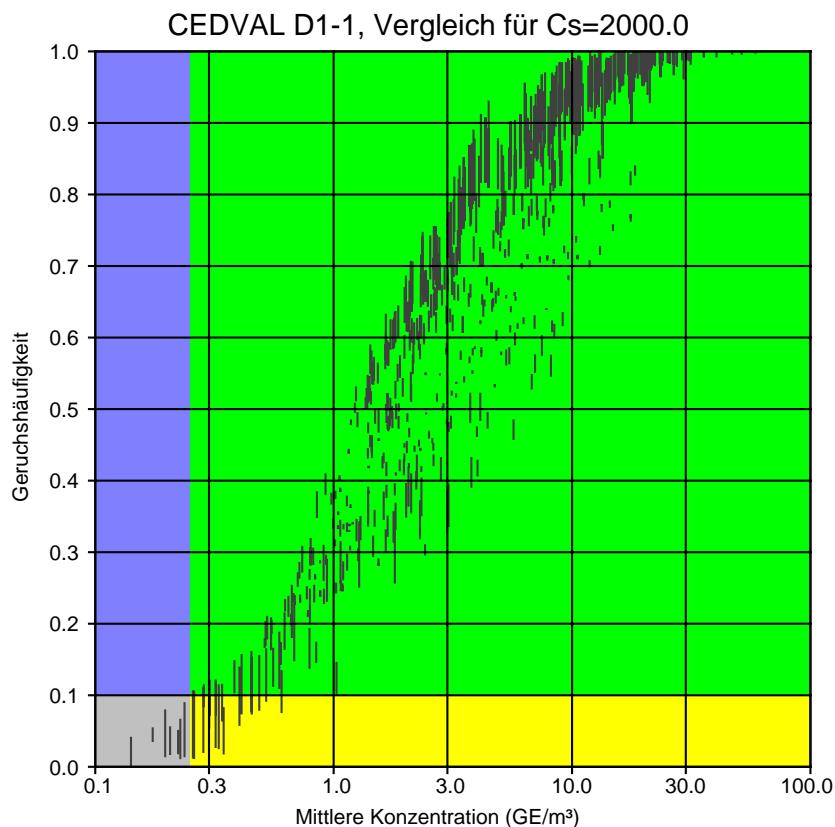


BILD 4.18: Geruchshäufigkeiten  $\kappa_0$  als Funktion des Mittelwertes  $\bar{c}$  für die CEDVAL-Daten D1-1. Die schwarzen Striche bezeichnen den Bereich, der bei einer Variation von  $\lambda$  zwischen 0.6 und 1.2 und einer Normierungskonzentration von  $c_s=2000 \text{ GE/m}^3$  erhalten wird.

Parameterbereich	Farbe	Interpretation
$\kappa_0 < 0.1, \bar{c} < 0.25$	grau	Eine Geruchsstunde liegt nicht vor und wird von BS25 auch nicht prognostiziert.
$\kappa_0 > 0.1, \bar{c} > 0.25$	grün	Eine Geruchsstunde liegt vor und wird von BS25 auch prognostiziert.
$\kappa_0 > 0.1, \bar{c} < 0.25$	blau	Eine Geruchsstunde liegt vor, wird aber von BS25 nicht prognostiziert.
$\kappa_0 < 0.1, \bar{c} > 0.25$	gelb	Eine Geruchsstunde liegt nicht vor, wird aber von BS25 prognostiziert.

Idealerweise sollten sich die schwarzen Linien nur im grauen oder im grünen Bereich bewegen. Der blaue Bereich ist auch tatsächlich leer, d.h. in keinem Fall wird das Vorliegen einer Geruchsstunde vom Modell BS25 nicht erkannt. Es gibt aber einige Situationen, in denen BS25 eine Geruchsstunde prognostiziert, aus den Fluktuationmessungen aber keine entsprechend hohe Geruchshäufigkeit abgeleitet werden konnte (gelber Bereich). Die Schätzungen von BS25 sind bei diesem Anwendungsfall also korrekt oder konservativ.

Für die Beurteilung des Modells BS25 sind die Situationen mit einer Geruchshäufigkeit in der Nähe von 0.1 interessant. Das Bild zeigt, daß nur ein ganz geringer Teil der Messungen in diesem Bereich liegt, der weit überwiegende Teil der Messungen ist also für eine Modellvalidierung gar nicht direkt brauchbar. Das gleiche Problem tritt natürlich auch bei den parallel durchgeführten Naturmessungen auf.

Um aus den Windkanalmessungen mehr Informationen herauszuholen, kann man sich zu Nutze machen, daß es sich um skalierte Größen handelt. Erniedrigt man die Skalierungseinheit, also die Geruchsstoffkonzentration  $c_s$  im Abgas an der Quelle, dann rutschen die Meßwerte in Bild 4.18 nach links unten und man erhält mehr verwertbare Messungen. Allerdings entsprechen die Messungen dann nicht mehr einer realen Situation: Erniedrigt man den Wert von  $c_s$  um beispielsweise den Faktor 10, dann werden die Emissionen so gering, wie es bei keinem Stall dieser (baulichen) Größe zu erwarten ist. Trotzdem ist es aufschlußreich zu sehen, wie sich das Modell BS25 in diesen Situationen verhält.

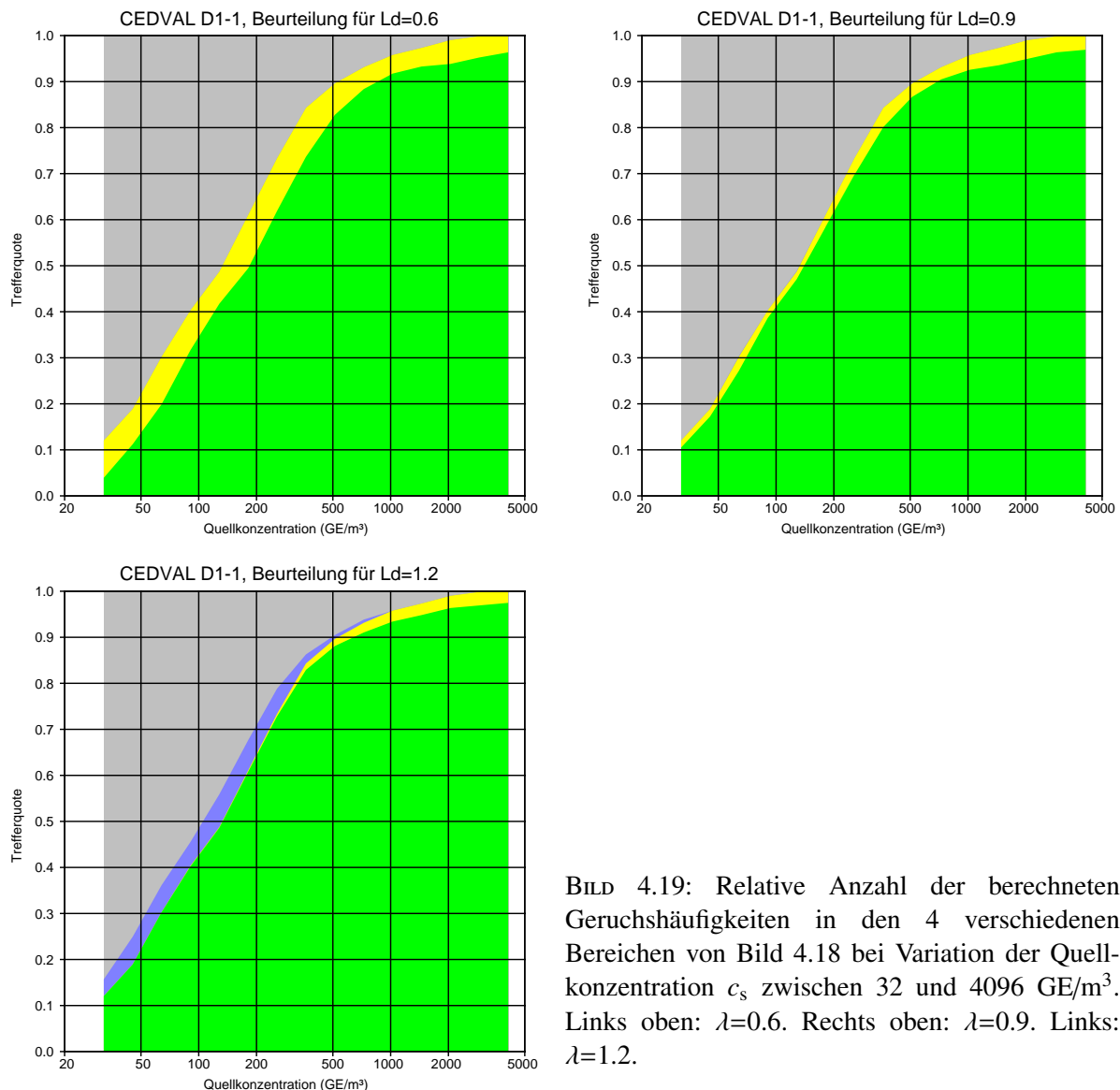


BILD 4.19: Relative Anzahl der berechneten Geruchshäufigkeiten in den 4 verschiedenen Bereichen von Bild 4.18 bei Variation der Quellkonzentration  $c_s$  zwischen 32 und 4096  $\text{GE}/\text{m}^3$ . Links oben:  $\lambda=0.6$ . Rechts oben:  $\lambda=0.9$ . Links:  $\lambda=1.2$ .

Bild 4.19 zeigt die Trefferquote des Modells BS25 bei Variation der Quellstärke um mehr als einen Faktor 100. Für  $\lambda=0.6$  und  $c_s=2000 \text{ GE}/\text{m}^3$  (der reale Fall bei den Begehungen in Uttenweiler) kann man beispielsweise ablesen, daß in etwa 1 % der Fälle (Höhe des grauen Feldes) keine Geruchsstunde vorlag und dies von BS25 auch richtig angegeben wurde, in etwa 5 % der Fälle (Höhe des gelben Feldes) BS25 eine Geruchsstunde angab, obwohl keine vorlag, und in etwa 94 % der Fälle das Vorliegen einer Geruchsstunde von BS25 korrekt erkannt

wurde. Bei  $\lambda=0.9$  wird der gelbe Bereich schmaler (die Häufigkeit von Überschätzungen sinkt), aber das Fehlen eines blauen Streifens zeigt, daß keine Unterschätzungen auftreten. Erst bei  $\lambda=1.2$  kommt es bei geringen Quellstärken zu Unterschätzungen, wie es auch bei den COFIN-Vergleichen beobachtet wurde.

Das Modell BS25 zeigt also bei der Analyse der Windkanalmessungen von Konzentrationsfluktuationen im Lee eines Stallgebäudes das gleiche Verhalten wie bei dem Modellvergleich mit COFIN für eine Punktquelle in ebenem Gelände.

## 4.5 Ergebnis

Im Rahmen von Modelltyp A (Modellierung von Konzentrationsfluktuationen) kann für Berechnungen von Geruchsstundenhäufigkeiten für eine Punktquelle in ebenem Gelände das Modell COFIN ohne Genauigkeitsverlust durch das Modell WBL07 ersetzt werden. Dadurch gewinnt man die technische Möglichkeit, auch Mehrquellensysteme zu modellieren. Allerdings sind keine Messungen verfügbar, anhand derer man die Genauigkeit bei Mehrquellensystemen beurteilen könnte. Auch für hohe Quellen liegen keine Messungen vor.

Im Rahmen von Modelltyp B (Beurteilung der Einzelsituation anhand des Mittelwertes) bietet sich an, die verschiedentlich schon verwendete Beurteilungsschwelle von  $0.25 \text{ GE/m}^3$  beizubehalten. Das Modell BS25 liefert bei der Berechnung von Geruchsstundenhäufigkeiten im Vergleich zu COFIN in der Regel konservative Werte, lediglich bei Stoffen mit sehr flacher Geruchsschwellenkennlinie ( $\lambda = 1.2$ ) können Unterschätzungen auftreten. Dies Verhalten zeigt sich auch bei der Analyse von Windkanalmessungen der Konzentrationsfluktuationen im Lee eines Stallgebäudes.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen von COFIN und von BS25 sind im gesamten Untersuchungsbereich fast immer kleiner als die Änderungen, die sich bei einer Variation der Quellstärke um 20 % einstellen würden. Da die Bestimmung der Quellstärke in der Praxis erheblich unsicherer ist, kann man davon ausgehen, daß die Unterschiede zwischen den Modellen anhand von Begehungen nicht nachweisbar sind.

AUSTAL2000 kann entsprechend WBL07 durch explizites Modellieren des Mäanderns der Fahne erweitert werden. Es läßt sich aber kaum so einrichten, daß die mittlere Fahne genau die Breite hat, wie sie AUSTAL2000 jetzt liefert. Auch die Frage des vertikalen Mäanderns ist weder technisch noch parametermäßig geklärt. Man würde also trotz enorm hohen Aufwandes die Verbindung zum bestehenden Modellsystem teilweise verlieren und immer noch in einigen Bereichen auf Vermutungen angewiesen sein.

Eine Erweiterung von AUSTAL2000 auf Basis von BS25 ist technisch am einfachsten und würde unmittelbar auf dem bestehenden Modellsystem aufbauen. Die Ergebnisse sind dann in der Regel leicht konservativ, lediglich bei Stoffen mit sehr flacher Geruchsschwellenkennlinie ( $c_{84}/c_{16} > 10$ ) sollte man prüfen, ob als Beurteilungsschwelle nicht ein niedrigerer Wert angesetzt werden muß.

## Kapitel 5

# Validierungs- und Vergleichsrechnungen

### 5.1 Einleitung

Im Rahmen der Modifizierung von AUSTAL2000 für Geruchsausbreitung (AUSTAL2000G) wurden Validierungsrechnungen, also die Feststellung der Aussagegenauigkeit durch Vergleich mit Experimenten durchgeführt. Ziel der Vergleichsrechnungen und Auswertungen war die Festlegung von Parametern für theoretische Ansätze und die Überprüfung, wie zuverlässig die Häufigkeit von Geruchsstunden auf der Basis der modellierten Langzeitwerte der Geruchsstoffkonzentration abgeschätzt werden kann.

Besonderes Augenmerk wurde auf ein Meßprogramm in Uttenweiler gelegt, in dem parallel zu den Begehungen Tracergas-Messungen mit SF<sub>6</sub> durchgeführt wurden. Diese Konzentrationsmessungen ermöglichen zum einen die Validierung des Mittelwertmodells (AUSTAL2000), das AUSTAL2000G zugrunde liegt, zum anderen können aus ihnen Rückschlüsse auf die Geruchsstoffkonzentrationen und ihre Korrelation mit den wahrgenommenen Geruchsintensitäten gewonnen werden.

### 5.2 Geruchsbegehungen in Uttenweiler

In dem BWPLUS-Vorhaben *Bereitstellung von Validierungsdaten für Geruchsausbreitungsmodelle – Naturmessungen* wurden Geruchsbegehungen an einem Schweinestall in Uttenweiler vorgenommen.<sup>1</sup>Nach einem Testexperiment mit der Kennung A wurden drei Meßserien durch-

<sup>1</sup>Nähere Einzelheiten finden sich in folgenden Berichten:

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS: *Bereitstellung systematischer Vergleichsdaten für die Entwicklung und Validierung numerischer Geruchsausbreitungsmodelle – Windkanalversuche im Verbundprojekt Geruchsfreisetzung und -ausbreitung*, B. Leitl, S. Aubrun, M. Schatzmann, Juli 2002.

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS: *Bereitstellung von Validierungsdaten für Geruchsausbreitungsmodelle – Naturmessungen*, W. Bächlin, A. Rühling, A. Lohmeyer, Juni 2002.

Daten zu den Freilandmessungen werden vom Ing.-Büro Lohmeyer auf der Internet-Seite [www.lohmeyer.de](http://www.lohmeyer.de) zur Verfügung gestellt.



geführt: Experimente B bis D am 2000-12-12, Experimente E bis H am 2000-12-13, Experimente I bis O am 2001-10-31.

In jedem Experiment wurde die Geruchsintensität von 11 oder 12 Probanden an unterschiedlichen Positionen in Abständen von 10 Sekunden für einen Zeitraum von 10 Minuten bestimmt. Die Probanden wurden entweder in zwei Traversen zu je 6 Probanden (Quellabstand für Positionen 1 bis 6 etwa 150 m, für Positionen 7 bis 12 etwa 350 m) oder in einer Traverse (Experimente I, J, K, L, Quellabstand etwa 150 m) positioniert. Der Abstand benachbarter Probanden betrug etwa 20 m. In den Experimenten E bis L wurde an der Position 12, in den Experimenten M bis O an der Position 6 keine Geruchsbegehung durchgeführt.

Aus der Abluftöffnung am Dachfirst des Schweinestalls in 8.5 m Höhe wurde während der Begehung das Tracergas SF<sub>6</sub> freigesetzt.<sup>2</sup> Seine Konzentration wurde an jeder der Probanden-Positionen als 10-Minuten-Mittel bestimmt, an 2 Probanden-Positionen wurde zusätzlich die Zeitreihe der Kurzzeitwerte<sup>3</sup> registriert.

Neben der Bestimmung der Quellstärke von SF<sub>6</sub> wurde für jedes Experiment die mittlere Geruchsemission olfaktometrisch mit Hilfe von 4 bis 8 Probanden abgeschätzt, von denen einige ebenfalls an der Begehung teilnahmen.

Während der Durchführung jedes Experimentes und für einen Zeitraum davor wurden USAT-Messungen in 3.5 m Höhe im Bereich der quellnahen Traverse mit einem Mittelungszeitraum von 10 Sekunden durchgeführt.

Die Experimente wurden mit dem Ausbreitungsmodell LASAT (AUSTAL2000-Modus) nachgerechnet. Für die Vergleiche wurde standardmäßig das meteorologische Grenzschichtprofil Version 2.6 (Profile nach VDI 3783 Blatt 8) benutzt und es wurde ohne Berücksichtigung von Gebäuden und Quellüberhöhung gerechnet. Die USAT-Meßdaten wurden direkt in Form einer meteorologischen Zeitreihe übernommen. Die experimentell bestimmten Geruchsemissionen und SF<sub>6</sub>-Massenströme wurden als während der Begehung zeitlich konstante Quellstärke vorgegeben. Es wurde ein Vorlauf von 10 Minuten vor dem eigentlichen Begehungintervall berücksichtigt. Das Gelände wurde als eben angenommen mit einer Rauigkeitslänge von 5 cm und einer Verdrängungshöhe von 30 cm.

## 5.2.1 Konzentrationsmessungen und Vergleichsrechnungen

Bild 5.1 zeigt als Beispiel einen Vergleich von gemessenen und berechneten 10-Minuten-Mitteln von SF<sub>6</sub> für das Experiment M, Bild 5.2 zeigt die Zeitreihen der Kurzzeitwerte von SF<sub>6</sub> und die dazugehörigen Häufigkeitsverteilungen an den Probandenpositionen 3 und 10. Für die weiteren Experimente sind die 10-Minuten-Mittel in Bild 5.7, die Zeitreihen und Häufigkeitsverteilungen in Abschnitt 5.3 in den Bildern 5.13 bis 5.20 dargestellt.

<sup>2</sup>Die Angaben zur Quellhöhe und den Firsthöhen unterschieden sich in den beiden in der Einleitung aufgeführten Forschungsberichten. Die hier gewählten Werte sind konsistent mit dem Bericht der Universität Hamburg, der nach Rückfrage die richtigen Werte aufführt.

<sup>3</sup>Die Proben wurden jeweils während des Einatmens eines Probanden genommen.

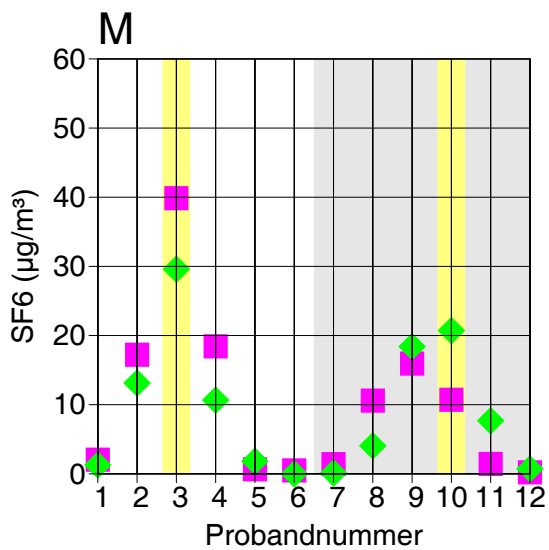


BILD 5.1: Beispiel für den Vergleich von gemessenen (violette Kästchen) und berechneten (grüne Rauten) 10-Minuten-Mitteln von SF<sub>6</sub> (Experiment M). Der graue Hintergrund kennzeichnet den Bereich der zweiten Traverse, die beiden gelben Linien markieren die Positionen, an denen auch die Zeitreihe der Kurzzeitwerte bestimmt wurde.

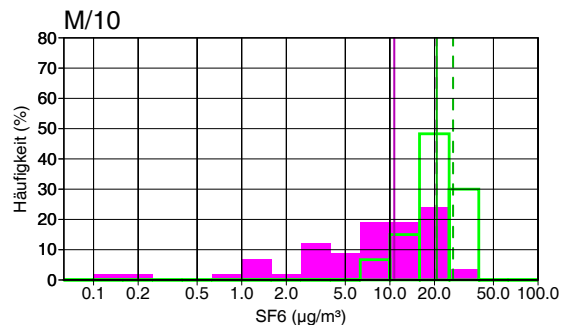
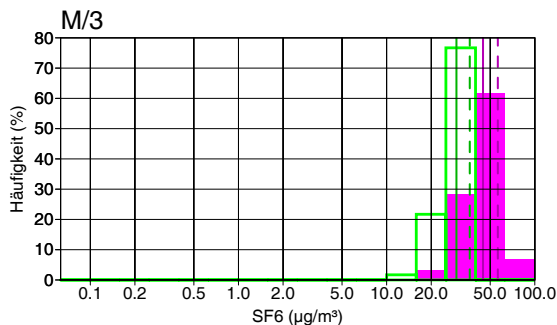
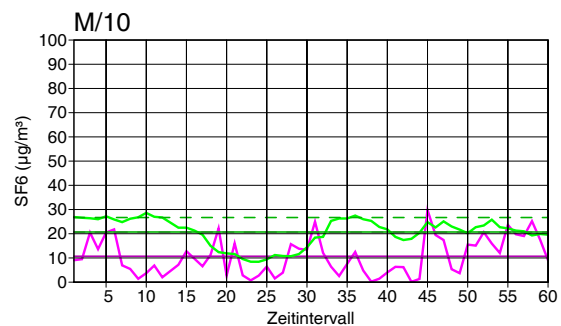
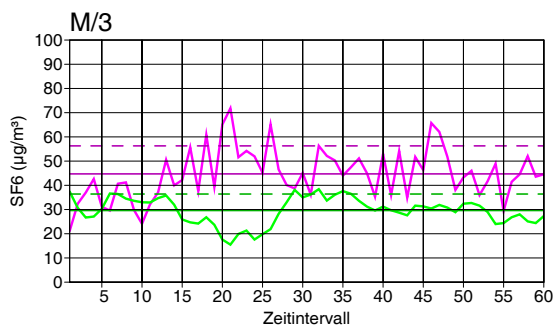


BILD 5.2: Beispiel für den Vergleich von gemessenen (violett) und berechneten (grün) Zeitreihen und den dazugehörigen Häufigkeitsverteilungen (Positionen 3 und 10 in Experiment M). Die gestrichelten Linien bezeichnen jeweils den Wert des 95-Perzentils.

Der an einer Probandenposition über die Zeitreihe bestimmte Mittelwert von SF<sub>6</sub> kann mit dem unabhängig hiervon gemessenen 10-Minuten-Mittel verglichen werden. Die relative Abweichung des Zeitreihenmittels vom 10-Minuten-Mittel für alle Zeitreihen ist in Bild 5.3 dargestellt. Es sind keine systematischen Unterschiede erkennbar. In den meisten Fällen liegt die Abweichung unter 20%, in 2 Fällen (Position D<sub>3</sub> und E<sub>8</sub>) ist sie jedoch größer als 50%.

Betrachtet man die 10-Minuten-Mittel der Modellrechnungen, dann wird die Breite und Lage der experimentell bestimmten Fahne meist richtig wiedergegeben, bei den Einzelwerten innerhalb der Fahne treten teilweise deutliche Abweichungen auf. Das gemessene 10-Minuten-Mittel von SF<sub>6</sub> für Position E<sub>6</sub> und H<sub>6</sub> erscheint nicht realistisch.

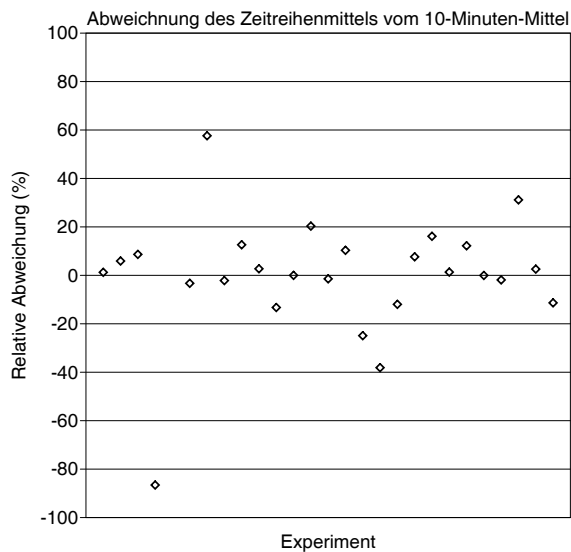


BILD 5.3: Relative Abweichung des Mittelwertes über die 10-minütige Konzentrationszeitreihe von SF<sub>6</sub> vom getrennt gemessenen 10-Minuten-Mittel für alle Zeitreihen. Nicht eingezeichnet ist Position B<sub>5</sub> und D<sub>9</sub>, wo das 10-Minuten-Mittel mit exakt 0 ausgewiesen wurde, das Mittel der Zeitreihe aber bei 0.01 µg/m<sup>3</sup> bzw. 0.02 µg/m<sup>3</sup> liegt.

In Bild 5.4 sind die Streudiagramme mit den Verteilungen von gemessenen und berechneten 10-Minuten-Mitteln von SF<sub>6</sub>, dem 90-Perzentil und dem Verhältnis von 90-Perzentil zu 10-Minuten-Mittel aufgeführt. Die Werte für die quellnahe Traverse 1 sind in rot, die für die quellferne Traverse 2 sind in blau dargestellt.

Die Verwendung der Grenzschichtprofile nach VDI 3783 Blatt 8 ist im Grunde nicht ganz korrekt, da sie für eine Mittelungszeit von typischerweise 1 Stunde bestimmt wurden. Für kleine Zeiträume sind z.B. aufgrund der weniger ausgeprägten Mäanderbewegung die Fluktuationen der Windgeschwindigkeit und die Diffusionskoeffizienten quer zur Fahne kleiner. Andererseits führt der Einfluß der Gebäude zu einer zusätzlichen Aufweitung der Fahne.

Der Einfluß des Mittelungsintervalls und der Gebäude kann mit dem Grenzschichtmodell von LASAT explizit berücksichtigt werden. Bild 5.5 die Ergebnisse, die sich bei Berücksichtigung von Gebäuden (Futterhaus und Stall mit gerundeten Gebäudehöhen von 10 m bzw. 8 m) und Überhöhung (Quelldurchmesser 1.24 m, pauschale Austrittsgeschwindigkeit von 4 m/s, Überhöhung nach VDI 3782/3) mit dem diagnostischen Windfeldmodell von LASAT und dem Grenzschichtmodell 2.1 (Mittelungsintervall 60 s) ergeben. Bild 5.6 zeigt die Ergebnisse für den Fall, daß die gebäudeinduzierte Zusatz turbulence vernachlässigt wird.

Die Streuung der Daten ist zu groß, als daß man einer der Modellierungsmethoden ein klar erkennbar besseres Ergebnis zuweisen könnte. Im weiteren werden nur die Ergebnisse der Standard-Rechnung ohne Gebäude und Überhöhung und dem Grenzschichtprofil nach VDI 3783 Blatt 8 aufgeführt.

Insgesamt treten keine systematischen Über- oder Unterschätzungen der Konzentrationswerte in den Vergleichsrechnungen auf. Das Verhältnis von 90-Perzentil zu Mittelwert liegt sowohl in den Messungen als auch in den Rechnungen bis auf wenige Ausnahmen zwischen 1 und 4.

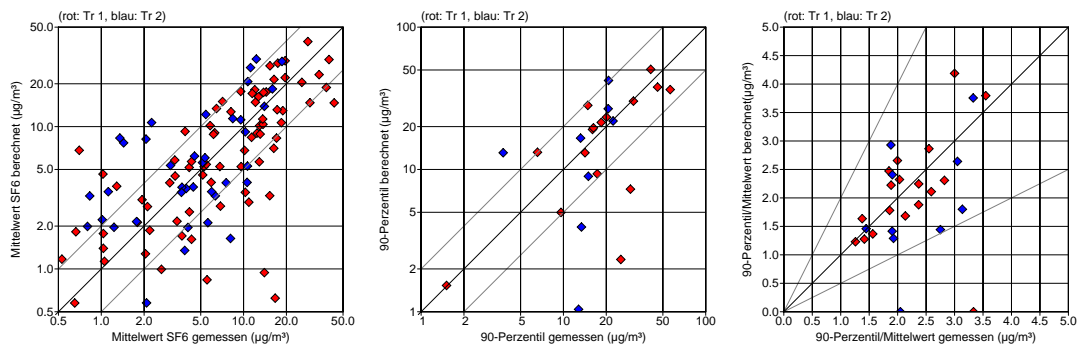


BILD 5.4: Statistische Auswertung der Messungen und Vergleichsrechnungen (Grenzschichtprofil nach VDI 3783 Blatt 8, ohne Gebäude und Überhöhung).

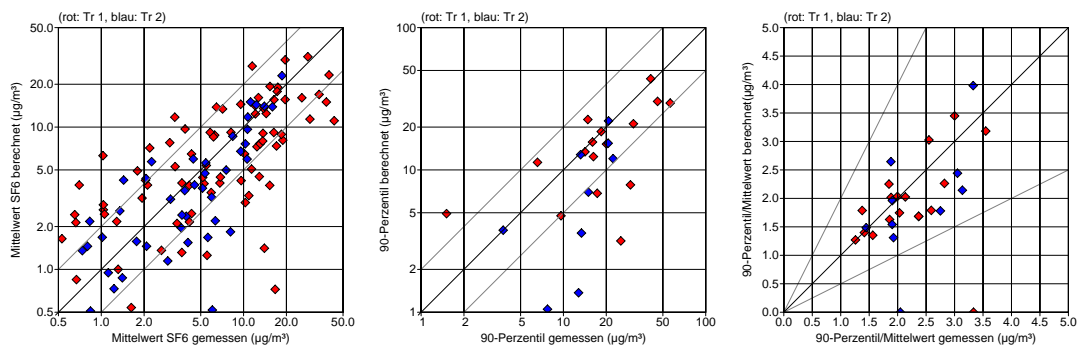


BILD 5.5: Statistische Auswertung der Messungen und Vergleichsrechnungen (LASAT-Grenzschichtprofil, mit Gebäuden und Überhöhung).

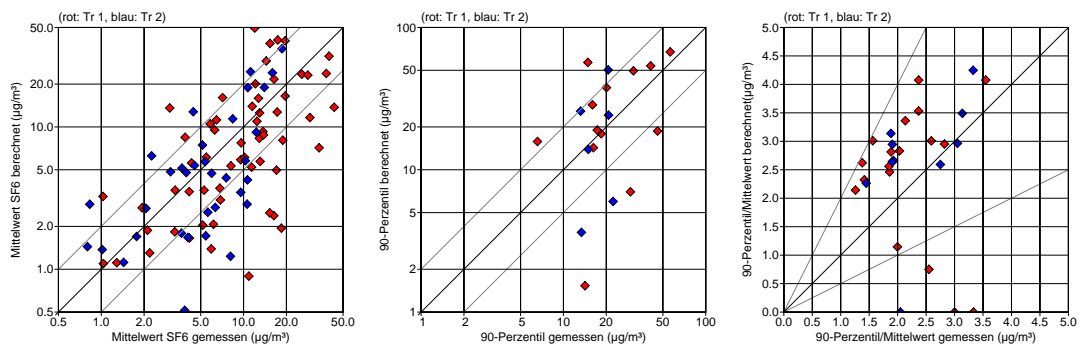


BILD 5.6: Statistische Auswertung der Messungen und Vergleichsrechnungen (LASAT-Grenzschichtprofil, mit Gebäuden und Überhöhung, ohne Zusatzbulenz).

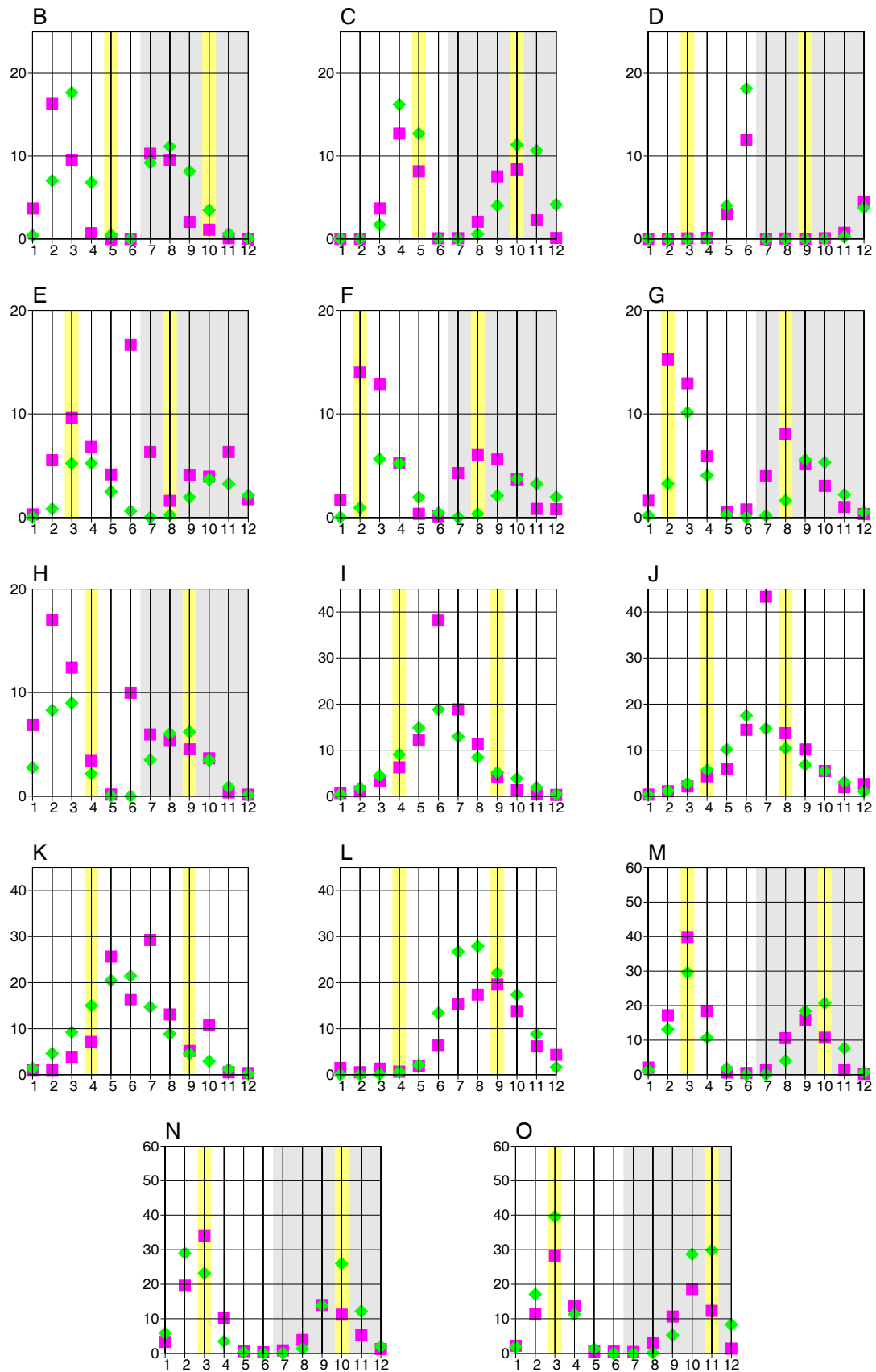


BILD 5.7: Vergleich von gemessenen (violett) und berechneten (grün) 10-Minuten-Mitteln von SF<sub>6</sub>. Achsenbeschriftung wie in Bild 5.1.

## 5.2.2 Geruchsbegehungen und Vergleichsrechnungen

Während der 10-minütigen Geruchsbegehung wurde von jedem Probanden im Zeittakt von 10 Sekunden die wahrgenommene Geruchsintensitätsstufe  $I_S$  protokolliert. Die Stufeneinteilung läuft entsprechend der Richtlinie VDI 3788 Blatt 1 von  $I_S = 0$  (nicht wahrnehmbar) bis  $I_S = 6$  (extrem stark). Stufe 6 wurde gar nicht, Stufe 5 insgesamt nur zweimal registriert. Bezieht man die Ergebnisse auf einen Beurteilungszeitraum von einer Stunde, dann liegt an einer Probandenposition eine Geruchsstunde vor, wenn in mindestens 10% der Fälle, hier also mindestens 6 mal, eine Geruchsintensitätsstufe  $I_S > 0$  wahrgenommen wurde.

Da bei einer Ausbreitungsmodellierung nicht Intensitäten, sondern Konzentrationen betrachtet werden, sind neben den wahrgenommenen Geruchsintensitäten auch Informationen über die dargebotenen Geruchsstoffkonzentrationen von Interesse.

Soweit nur die Geruchsstoffe eine Rolle spielen, die zusammen mit dem Tracergas  $SF_6$  freigesetzt werden und dasselbe Ausbreitungsverhalten zeigen (keine chemischen Umsetzungen), können die Geruchsstoffkonzentrationen anhand der experimentell bestimmten  $SF_6$ -Konzentrationen und Quellstärken beider Stoffe abgeschätzt werden.

In der Praxis ist eine solche Vorgehensweise mit einigen Unsicherheiten behaftet. Neben den prinzipiellen Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Geruchsemissionen (typische Unsicherheiten liegen im Bereich eines Faktors 2) wurden für Emissionsbestimmungen und Geruchsbegehungen unterschiedliche Probandenkollektive eingesetzt. Daneben ist es in Feldversuchen meist nicht möglich, alle Geruchsquellen, die bei der Geruchswahrnehmung eine Rolle spielen, auch bei der Emissionsbestimmung zu berücksichtigen.

### 5.2.2.1 Übersicht

Nimmt man diese Unsicherheiten in Kauf, dann können für jedes Experiment und jede der Probandenpositionen die 10-Minuten-Mittel der Geruchsstoffkonzentration und zusätzlich an 2 Positionen pro Experiment die Zeitreihen der Kurzzeitwerte der Geruchsstoffkonzentration ermittelt werden.

Als Beispiel zeigt Bild 5.8 für Experiment M die 10-Minuten-Mittel der Geruchsstoffkonzentrationen an den Probandenpositionen (violette Quadrate), die modellierten Werte (grüne Rauten) und die Häufigkeiten, mit denen eine Geruchsintensitätsstufe größer als 0 (Geruchshäufigkeit, dunkelblaue Balken) und größer als 1 (hellblaue Balken) wahrgenommen wurde (an Punkt 6 wurde keine Geruchsbegehung durchgeführt). Eine Darstellung aller Experimente zeigt Bild 5.9.

In den Experimenten B, C und D fällt auf, daß an mehreren Probandenpositionen niedrige 10-Minuten-Mittel der Konzentration gemessen, aber hohe Geruchshäufigkeiten beobachtet wurden. Der gleiche Effekt tritt auch in anderen Experimenten auf, vor allem an den Randpositionen der Traversen. Dies deutet darauf hin, daß in den Experimenten zum Teil noch weitere Geruchsquellen wirksam waren, etwa nicht abgedichtete Stallöffnungen oder Emissionen von Nachbarfeldern.

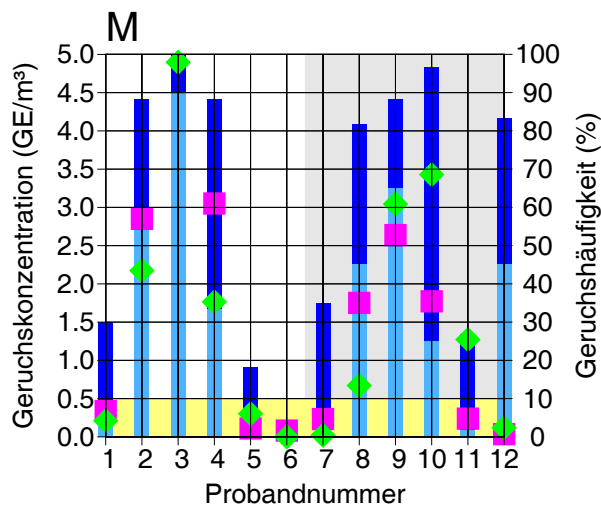


BILD 5.8: Vergleich der 10-Minuten-Mittel der Geruchsstoffkonzentration (linke Achse) und der Häufigkeit der Geruchswahrnehmung (rechte Achse) für Experiment M. Violette Quadrate: aus den Meßwerten bestimmte Mittelwerte. Grüne Rauten: modellierte Mittelwerte. Dunkelblaue Balken: Häufigkeit für Geruchsintensitätsstufen größer als 0. Hellblaue Balken: Häufigkeit für Geruchsintensitätsstufen größer als 1. Der gelbe Bereich kennzeichnet Häufigkeiten unter 10 Prozent.

In Bild 5.10 sind die Ergebnisse für alle Probandenpositionen in einer einzigen Grafik dargestellt, sortiert von links nach rechts einmal nach aufsteigender, aus den Meßwerten bestimmten Geruchsstoffkonzentration (oben) und einmal nach aufsteigender modellierter Geruchsstoffkonzentration (unten). Die Wahrnehmungshäufigkeiten sind als Quadrate anstelle von Balken dargestellt. Zu jeder Probandenposition gehören also 4 übereinander liegende Symbole, zur besseren Orientierung ist jede zweite Probandenposition grau hinterlegt. Neben der großen Streubreite der Werte werden in dieser Darstellung besonders die hohen Geruchshäufigkeiten bei kleinen Konzentrationswerten deutlich (dunkelblaue Quadrate am linken Rand der Bilder). Eine mögliche Ursache hierfür könnten zusätzliche Geruchsemissionen wie undichte Stellen am Stall sein, die bei dem Vergleich, der auf den SF<sub>6</sub>-Messungen beruht, nicht berücksichtigt werden.

In den folgenden Auswertungen wurden Positionen, an denen Geruchshäufigkeiten wahrgenommen wurden, die im Vergleich zu den geschätzten 10-Minuten-Mitteln der Geruchsstoffkonzentration deutlich zu hoch erscheinen, nicht berücksichtigt (alle Positionen der Experimente B, C und D sowie die Positionen I<sub>10</sub>, J<sub>4</sub>, K<sub>2,9</sub>, L<sub>3</sub>, M<sub>1,5,7,12</sub>, N<sub>1,7,12</sub>, O<sub>1,7,12</sub>).

### 5.2.2.2 Wahrnehmungshäufigkeiten

Für jedes Experiment liegt für zwei Probandenpositionen sowohl die Zeitreihe mit den Kurzzeitwerten der Geruchsstoffkonzentration (abgeschätzt aus den Kurzzeitwerten von SF<sub>6</sub>) als auch die Zeitreihe mit den wahrgenommenen Geruchsintensitätsstufen vor. Ordnet man die Konzentrationen festen Konzentrationsintervallen zu, dann kann aus den beiden Zeitreihen die Häufigkeit  $P_s$  bestimmt werden, mit der für ein bestimmtes Konzentrationsintervall eine Intensitätsstufe größer als  $I_s = s$  wahrgenommen wird (sogenannte *S-Kurve*).  $\bar{P}_s$  bezeichnet das Mittel über alle Probanden und Experimente.

Entsprechende Häufigkeitsverteilungen in Abhängigkeit von der Konzentration lassen sich auch auf Basis der aus den Meßwerten bestimmten 10-Minuten-Mittel der Geruchsstoffkonzentration festlegen. Zu den mittleren Verteilungen,  $\bar{P}_s$ , tragen in diesem Fall alle 11 bzw. 12 Probanden aus jedem Experiment bei.

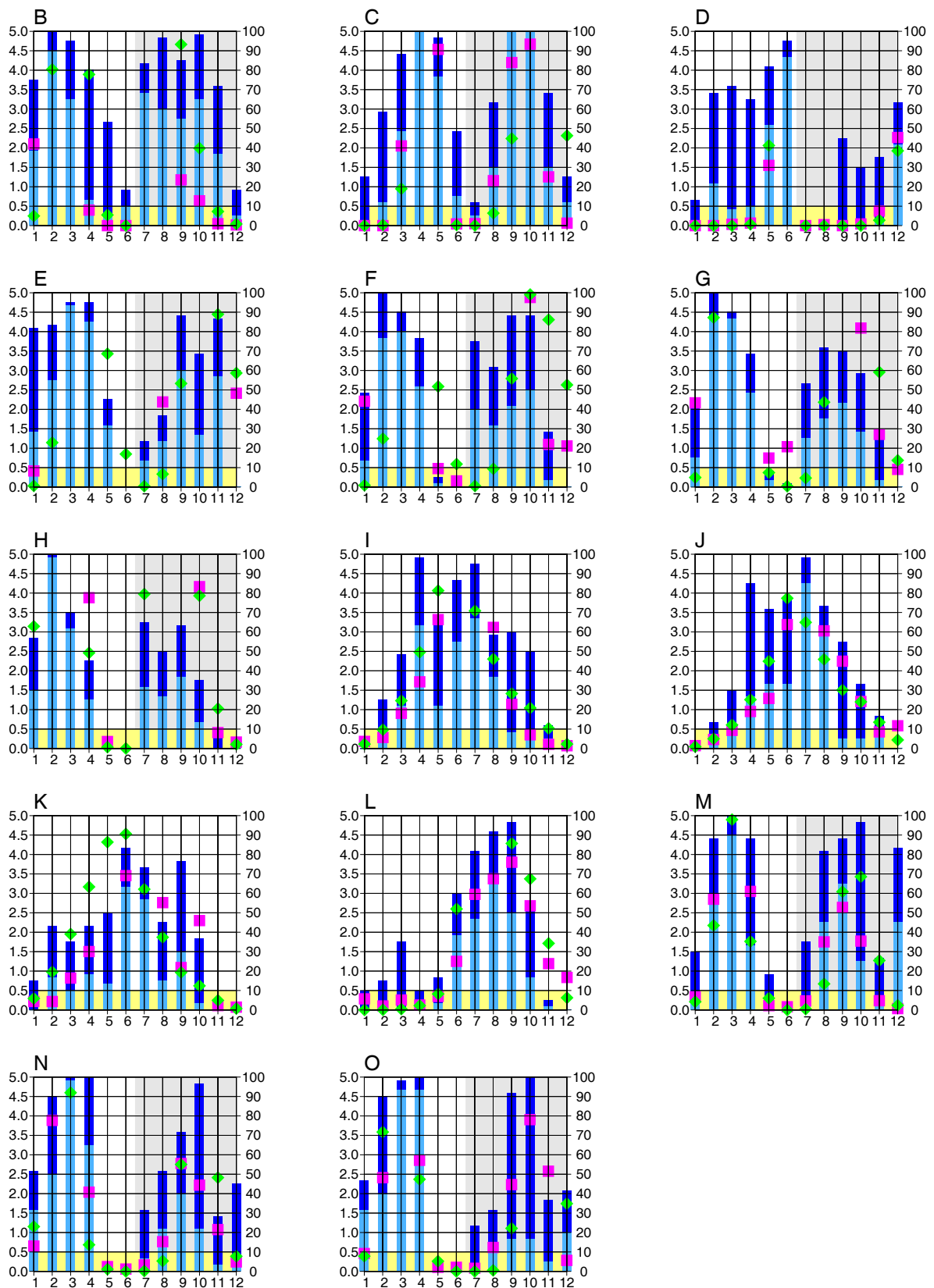


BILD 5.9: Vergleich der 10-Minuten-Mittel der Geruchsstoffkonzentration (linke Achse) und der Häufigkeit der Geruchswahrnehmung (rechte Achse). Symbole und Achsenbeschriftungen wie in Bild 5.8.



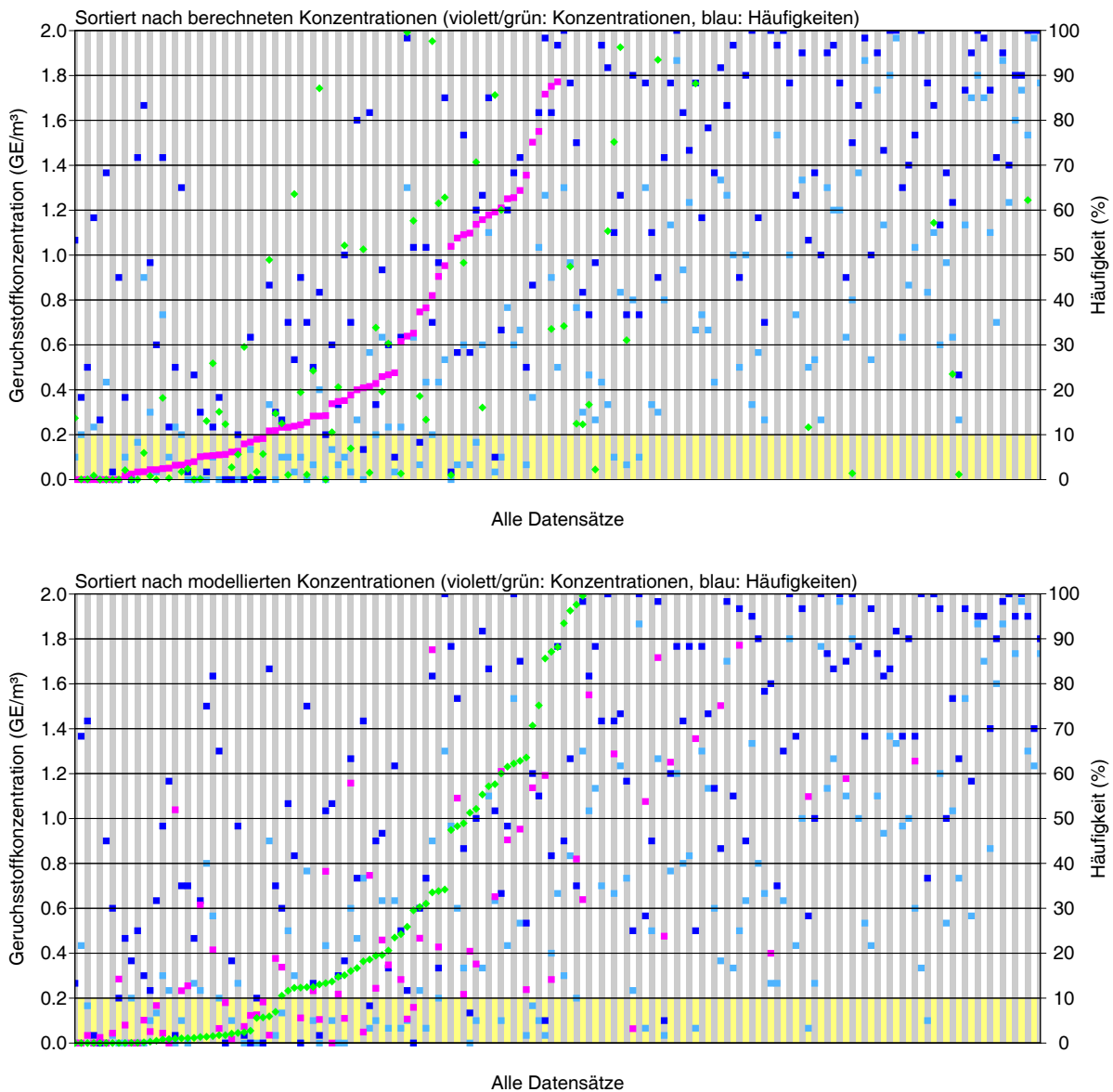


BILD 5.10: Das aus den experimentellen Werten berechnete 10-Minuten-Mittel der Geruchsstoffkonzentration (violette Quadrate), das modellierte 10-Minuten-Mittel (grüne Rauten) und die Häufigkeit für das Auftreten einer Intensitätsstufe größer als 0 (dunkelblaue Quadrate) und 1 (hellblaue Quadrate) für alle Probandenpositionen. Im oberen Bild sind die Werte nach berechneten, im unteren Bild nach modellierten Geruchsstoffkonzentrationen sortiert. Jede zweite Probandenposition ist grau hinterlegt.

Bild 5.11 zeigt die Verteilungen  $\bar{P}_s$  (Quadrate) und  $\bar{P}'_s$  (Rauten) für  $s = 0, 1, 2, 3$ . Die Grenzen der Konzentrationsintervalle wurden auf einer logarithmischen Skala äquidistant zwischen den Werten  $0.1 \text{ GE/m}^3$  und  $100 \text{ GE/m}^3$  gewählt, Werte kleiner als  $0.1 \text{ GE/m}^3$  wurden dem ersten Intervall zugeordnet. Der Verlauf der Häufigkeitsverteilung  $\bar{P}_0$  (grüne Quadrate) für die Kurzzeitwerte deutet darauf hin, daß bei niedrigen Konzentrationswerten ähnliche Effekte wie im vorigen Abschnitt für die 10-Minuten-Mittel diskutiert auftreten.

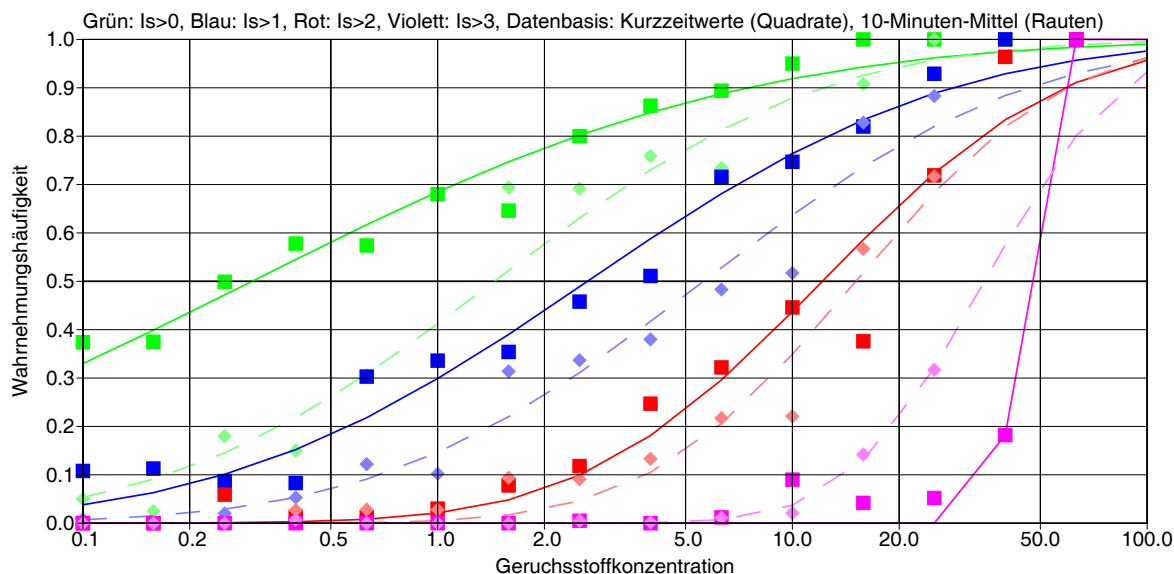


BIld 5.11: Abhängigkeit der Wahrnehmungshäufigkeit für eine Intensitätsstufe  $I_s > s$  für  $s = 0, 1, 2, 3$  von der angebotenen Geruchsstoffkonzentration. Datenbasis sind einmal die Kurzzeitwerte der Konzentrationszeitreihen (Quadrate) und einmal die 10-Minuten-Mittel an den Probandenpositionen (Rauten), jeweils bestimmt aus den experimentellen Meßwerten. Die Linien zeigen die an die Datenpunkte im quadratischen Mittel optimal angepaßten S-Kurven nach Gleichung (5.1).

Die S-Kurven werden in der Olfaktometrie durch eine logarithmische Normalverteilung beschrieben (ln bezeichnet den natürlichen,  $\log_{10}$  den dekadischen Logarithmus),

$$P_s(c) = \frac{1}{\ln(10) \sqrt{2\pi} \lambda_{10;s}} \int_0^c \exp\left\{-\frac{[\log_{10}(c'/g_s)]^2}{2\lambda_{10;s}^2}\right\} \frac{dc'}{c'} \quad (5.1)$$

$$= 0.5 \left\{ 1 + \operatorname{erf}\left[\frac{\log_{10}(c/g_s)}{\sqrt{2}\lambda_{10;s}}\right] \right\}. \quad (5.2)$$

$\lambda_{10;s}$  kennzeichnet die Breite des Kurvenanstiegs, der Subskript „10“ erinnert daran, daß sich die Breite auf den dekadischen Logarithmus bezieht. Ist die Konzentration  $c$  gleich der Wahrnehmungsschwelle  $g_s$ , dann ist  $P_s = 0.5$ , d.h. in genau der Hälfte der Fälle wird eine Geruchsintensitätsstufe  $I_s > s$  wahrgenommen.  $g_0$  ist die Geruchsschwelle.

Die Linien in Bild 5.11 zeigen die an die Datenpunkte im quadratischen Mittel optimal angepaßten S-Kurven (durchgezogene Linien für  $\bar{P}_s$ , gestrichelte Linien für  $\bar{P}'_s$ ). Die Kurvenparameter sind:

$s$	$\bar{P}_s$		$\bar{P}'_s$	
	$\lambda_{10;s}$	$g_s$ (GE/m <sup>3</sup> )	$\lambda'_{10;s}$	$g'_s$ (GE/m <sup>3</sup> )
0	1.1	0.3	0.7	1.4
1	0.8	2.6	0.7	5.6
2	0.5	12.2	0.5	15.1
3	0.04	43.6	0.3	34.8

Die Werte für  $s = 3$  sind wegen der geringen Anzahl von Datenpunkten nicht aussagekräftig. Die Breite der Kurven liegt im Mittel bei etwa 0.7. Für die Kurzzeitwerte ergibt sich eine Geruchsschwelle von 0.3 GE/m<sup>3</sup>, dieser Wert ist aufgrund der vorangegangenen Diskussionen jedoch nur bedingt aussagekräftig. Für die 10-Minuten-Mittel liegt die Geruchsschwelle bei 1.4 GE/m<sup>3</sup>.

Die Geruchshäufigkeit  $\bar{P}'_0$  erreicht 10% bei einer Geruchsstoffkonzentration von etwa 0.17 GE/m<sup>3</sup>. Für Langzeitmittel oberhalb von 0.17 GE/m<sup>3</sup> würde man also auf das Vorliegen einer Geruchsstunde schließen. Dieser Wert ist jedoch mit einigen Unsicherheiten behaftet, da die angebotenen Geruchsstoffkonzentrationen anhand der SF<sub>6</sub>-Konzentrationen abgeschätzt wurden.

Bei den Messungen am Olfaktometer ergeben sich für Schweinegeruch je nach Experiment Kurvenbreiten  $\lambda_{10;0}$  zwischen 0.15 und 0.37 (siehe Abschlußbericht des Ing.-Büros Lohmeyer), der Median liegt bei 0.26. Dieser Wert ist deutlich kleiner als die über die Feldmessungen hergeleiteten Werte von 1.1 (Kurzzeitwerte) bzw. 0.7 (Langzeitmittel). Eine Ursache für den schärferen Anstieg der Wahrnehmungshäufigkeit bei den Olfaktometer-Messungen liegt sicherlich darin, daß hier stabilere Randbedingungen als in den Feldversuchen vorlagen; zum anderen können bei den Feldversuchen, wie bereits oben diskutiert, auch zusätzliche Geruchsemissionen, die die Wahrnehmung, nicht aber die auf den SF<sub>6</sub>-Messungen basierende Konzentrationsbestimmung beeinflussen, die Wahrnehmungskurve ausgeschmiert haben (siehe Diskussion in Abschnitt 5.4).

### 5.2.2.3 Weber-Fechner-Gesetz

Den Geruchsintensitätsstufen  $I_s$  für  $I_s = 1$  bis  $I_s = 5$  werden auf einer kontinuierlichen Intensitätsskala Intensitätsintervalle gleicher Breite  $I_s - 0.5 \leq I < I_s + 0.5$  zugeordnet. Die Stufe  $I_s = 0$  umfaßt den Bereich  $I < 0.5$  und die Stufe  $I_s = 6$  den Bereich  $I \geq 5.5$ . An der Intervallgrenze zwischen der Stufe  $I_s$  und  $I_s + 1$  wird in 50% der Fälle ein Geruch der Intensitätsstufe  $I_s + 1$  wahrgenommen. Damit können den im vorigen Abschnitt bestimmten Wahrnehmungsschwellen  $g_s$  die Geruchsintensitäten  $0.5 + s$  zugeordnet werden. Der Zusammenhang zwischen den Geruchsstoffkonzentrationen  $g_s$  und den dazugehörigen Intensitäten sollte durch

das Weber-Fechner-Gesetz beschrieben werden, das einen linearen Zusammenhang zwischen der Geruchsintensität und dem Logarithmus der Geruchsstoffkonzentration annimmt:

$$I = k_w \log_{10} \left( \frac{c}{c_0} \right) + 0.5 \quad (5.3)$$

$k_w$  ist der Weber-Fechner-Koeffizient und  $c_0$  ist die Geruchsschwelle. In Bild 5.12 ist der Logarithmus der oben bestimmten Wahrnehmungsschwellen  $g_s$  (Quadrate) und  $g'_s$  (Rauten) über den ihnen zugeordneten Intensitäten  $0.5 + s$  aufgetragen. Für beide Wertereihen wurde die Parameter  $k_w$  und  $c_0$  bestimmt, die im quadratischen Mittel eine optimale Übereinstimmung liefern (für die Wertereihe  $g_s$  wurde  $g_0$  nicht berücksichtigt):

$g_s$		$g'_s$	
$k_w$	$c_0$ (GE/m <sup>3</sup> )	$k'_w$	$c'_0$ (GE/m <sup>3</sup> )
1.6	0.7	2.2	1.6

Bis auf den Wert  $g_0$  werden die aus den Experimenten abgeleiteten Daten sehr gut durch das Weber-Fechner-Gesetz beschrieben. Die extrapolierte Geruchsschwelle für die Kurzzeitwerte liegt bei 0.7 GE/m<sup>3</sup>.

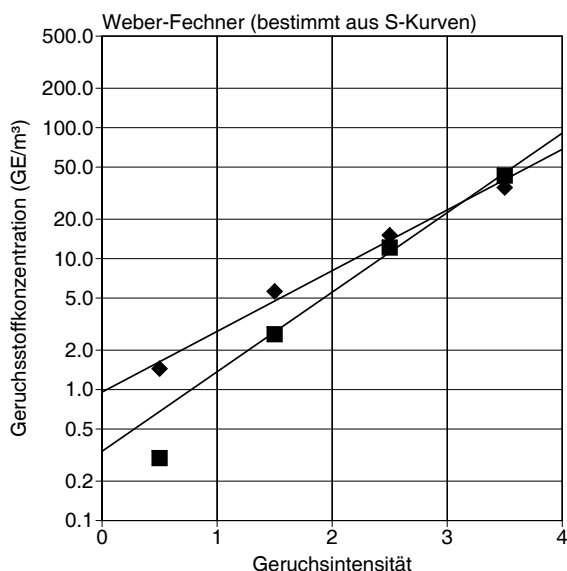


BILD 5.12: Wahrnehmungsschwellen aus Bild 5.11 (Quadrate: Kurzzeitwerte, Rauten: 10-Minuten-Mittel) als Funktion der zugeordneten Geruchsintensität. Die durchgezogenen Linien zeigen den optimal angepaßten Verlauf, der sich nach dem Weber-Fechner-Gesetz ergibt. Die aus den Kurzzeitwerten bestimmte Geruchsschwelle (Quadrat bei  $I = 0.5$ ) wurde bei der Anpassung nicht berücksichtigt.

#### 5.2.2.4 Vorhersagegenauigkeit der Geruchsstunden

Oft möchte man im Rahmen einer einfachen Konvention das Auftreten einer Geruchsstunde anhand der Überschreitung einer vorgegebenen Beurteilungsschwelle  $c_T$  für die mittlere Geruchsstoffkonzentration abschätzen (*Faktor-Modell*). Die Darstellungen in Bild 5.10 zeigten bereits,

daß eine solche Festlegung anhand der experimentellen Daten problematisch ist, auch wenn man die kritischen Punkte bei kleinen Konzentrationswerten außer acht läßt.

Aus den 10-Minuten-Mitteln der Geruchsstoffkonzentrationen  $c_i$ , die als Stundenmittel interpretiert werden, und den Geruchshäufigkeiten  $P_{0,i}$  (der Index  $i$  läuft über alle Probandenpositionen und Experimente,  $i = 1, \dots, N$ ) wurden folgende Größen bestimmt:<sup>4</sup>

Kennung für eine wahrgenommene Geruchsstunde	$e_i = \begin{cases} 1 & \text{für } P_{0,i} \geq 0.1 \\ -1 & \text{für } P_{0,i} < 0.1 \end{cases}$
Kennung für eine geschätzte Geruchsstunde	$m_i = \begin{cases} 1 & \text{für } c_i \geq c_T \\ -1 & \text{für } c_i < c_T \end{cases}$
Anteil tatsächlich wahrgenommener Geruchsstunden	$f_e = \sum e_i \Theta(e_i) / N$
Anteil geschätzter Geruchsstunden	$f_m = \sum m_i \Theta(m_i) / N$
Anteil, für den nach Wahrnehmung und Schätzung eine Geruchsstunde vorliegt	$f_{11} = \sum e_i \Theta(e_i) m_i \Theta(m_i) / N$
Anteil, für den nach Wahrnehmung und Schätzung keine Geruchsstunde vorliegt	$f_{00} = \sum e_i \Theta(-e_i) m_i \Theta(-m_i) / N$
Anteil, für den nach Wahrnehmung eine, nach Schätzung keine Geruchsstunde vorliegt	$f_{10} = \sum e_i \Theta(e_i) m_i \Theta(-m_i) / N$
Anteil, für den nach Wahrnehmung keine, nach Schätzung eine Geruchsstunde vorliegt	$f_{01} = \sum e_i \Theta(-e_i) m_i \Theta(m_i) / N$
Korrelationskoeffizient ( $-1 \leq K \leq 1$ )	$K = \sum e_i m_i / N$

Es werden folgende Fälle betrachtet:

Fall A:  $c_i$  sind die aus den Meßwerten bestimmten Geruchsstoffkonzentrationen (10-Minuten-Mittel) und  $c_T$  ist der Wert, bei dem die Korrelation maximal ist ( $c_T^*$ ).

Fall B:  $c_i$  sind die modellierten Geruchsstoffkonzentrationen (10-Minuten-Mittel) und  $c_T$  ist der Wert, bei dem die Korrelation maximal ist.

Fall C:  $c_i$  sind die modellierten Geruchsstoffkonzentrationen (10-Minuten-Mittel) und  $c_T = c_T^*$  aus Fall A.

Die Auswertung ergibt:

<sup>4</sup>Die Stufenfunktion  $\Theta(x)$  ist 1 für  $x > 0$  und 0 für  $x < 0$ .



Parameter	Fall A	Fall B	Fall C
$c_T$ (GE/m <sup>3</sup> )	0.2	0.0	0.2
$f_e$	0.88	0.88	0.88
$f_m$	0.90	1.00	0.88
$f_{11}$	0.85	0.88	0.82
$f_{00}$	0.07	0.00	0.05
$f_{10}$	0.03	0.00	0.07
$f_{01}$	0.05	0.12	0.07
$K$	0.84	0.77	0.73

Der Wert für die Beurteilungsschwelle von 0.2 GE/m<sup>3</sup> (Fall A) ist konsistent mit der Auswertung der S-Kurve ( $\bar{P}_0$ ) weiter oben. Die optimale Beurteilungsschwelle für die Modellrechnungen (Fall B) ist 0, da hier zum Teil andere Probandenpositionen problematisch sind als die, die aufgrund der experimentell bestimmten 10-Minuten-Mittel aus der Auswertung herausgenommen worden waren.

Für die Beurteilungsschwelle von 0.2 GE/m<sup>3</sup> ist die Anzahl der anhand der Modellrechnungen geschätzten Geruchsstunden etwa gleich groß wie die tatsächlich beobachteten (Fall C). Für eine etwas höhere Beurteilungsschwelle von 0.25 GE/m<sup>3</sup> ergeben sich ähnliche Werte ( $K = 0.71$  und  $f_m = 0.85$ ).

### 5.3 Uttenweiler: Konzentrations-Zeitreihen

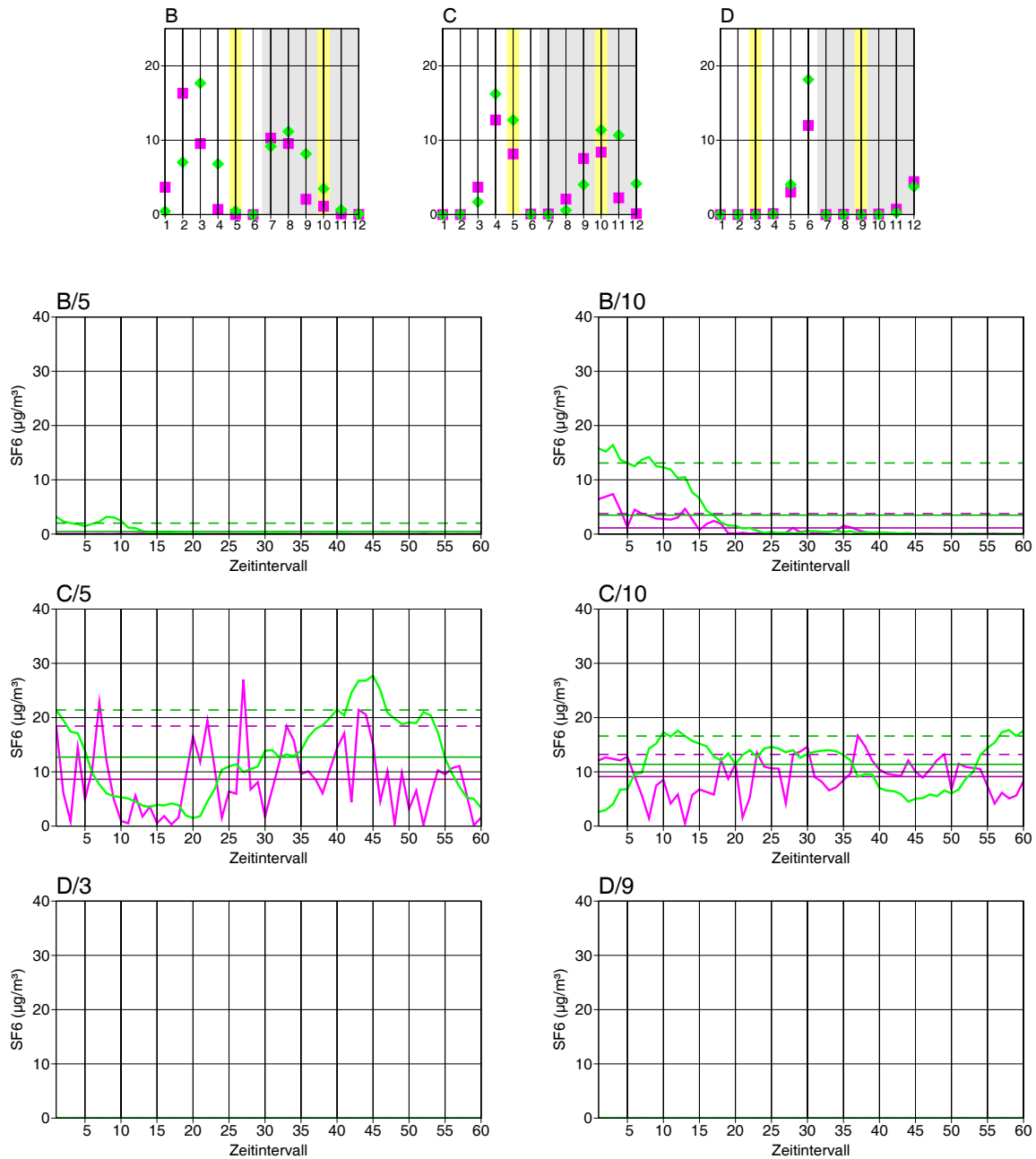


BILD 5.13: Vergleich der gemessenen (violett) und berechneten (grün) Zeitreihen von SF<sub>6</sub>.

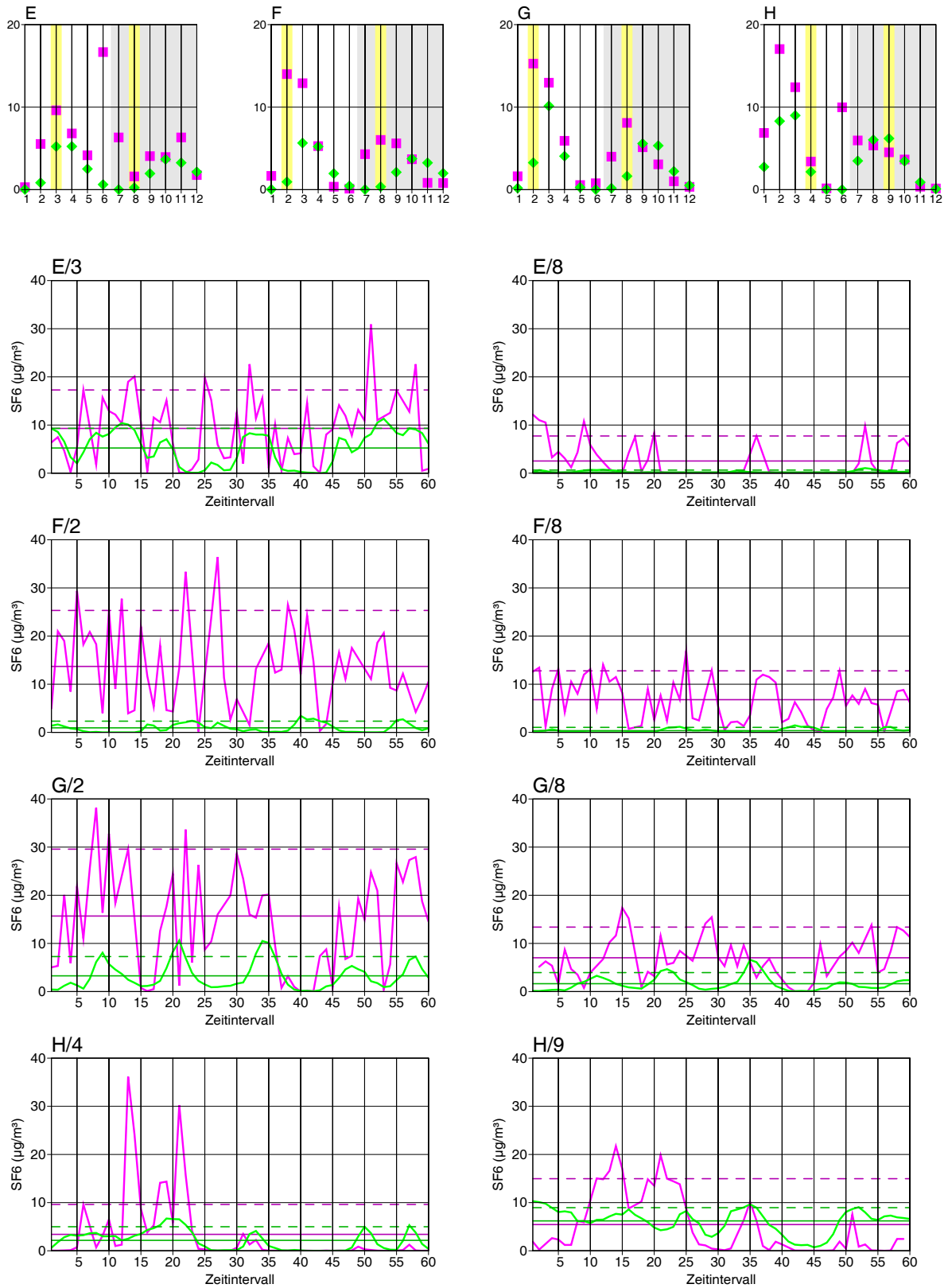


BILD 5.14: Vergleich der gemessenen (violett) und berechneten (grün) Zeitreihen von SF<sub>6</sub>.



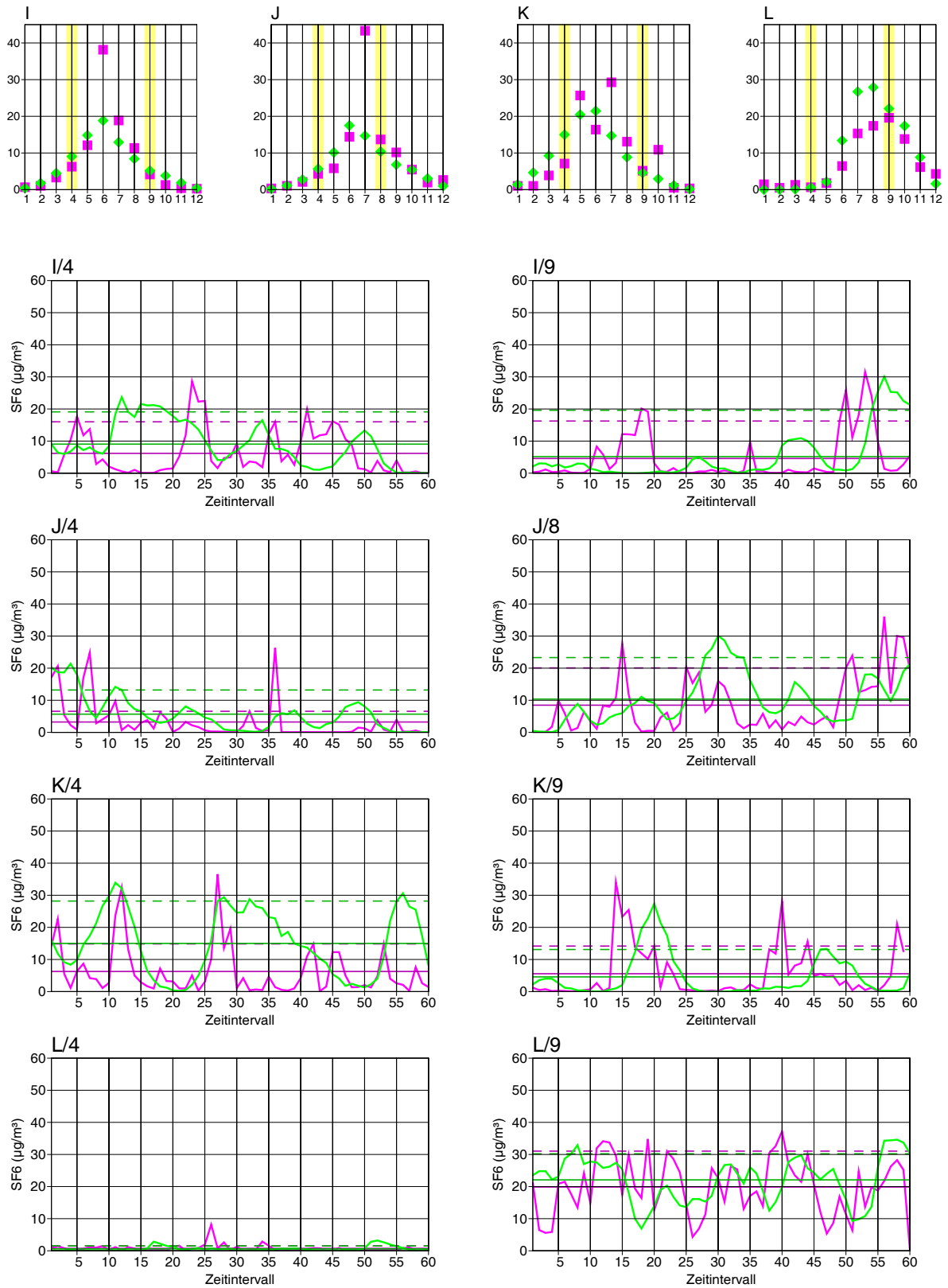


BILD 5.15: Vergleich der gemessenen (violett) und berechneten (grün) Zeitreihen von SF<sub>6</sub>.

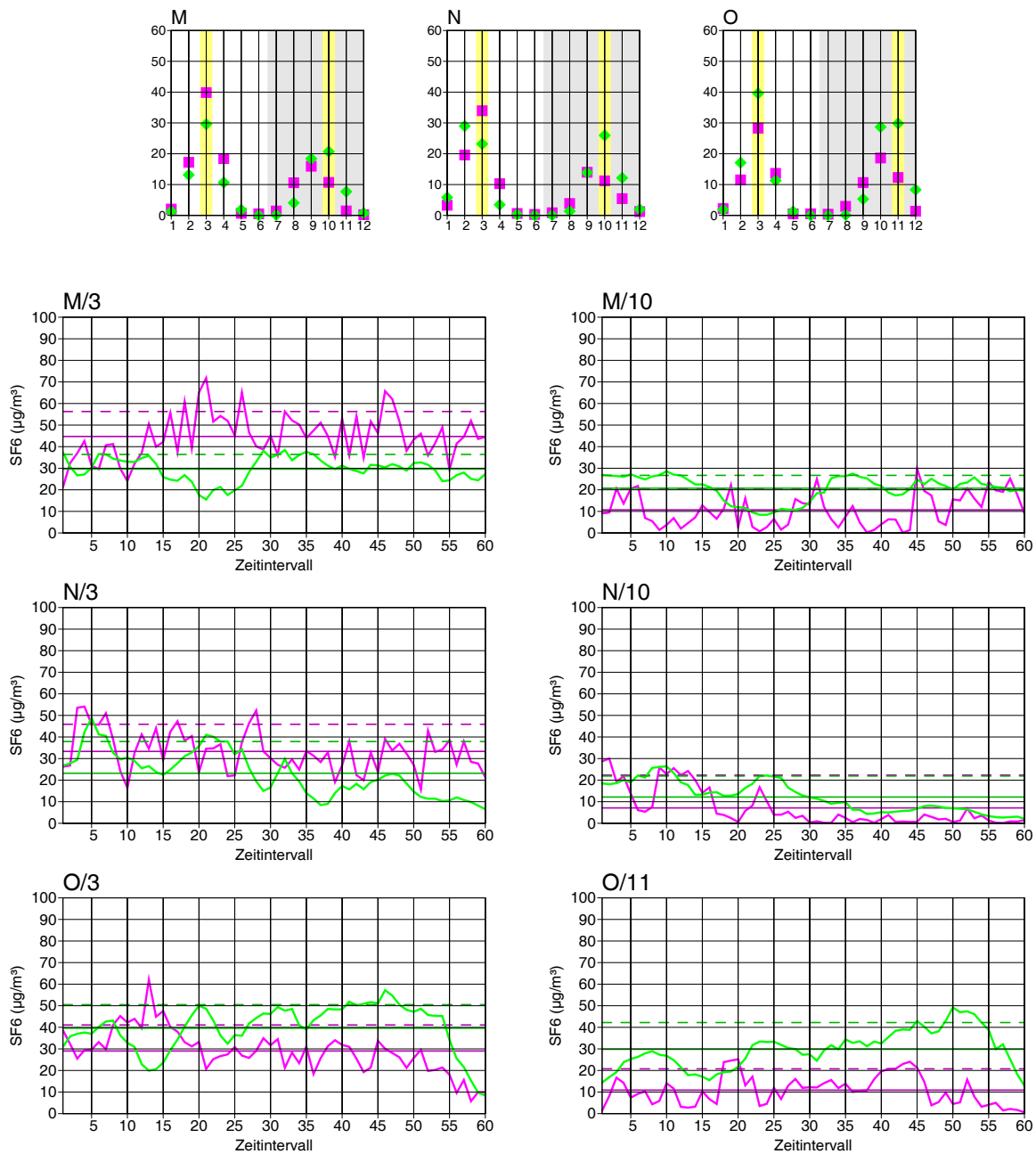


BIld 5.16: Vergleich der gemessenen (violett) und berechneten (grün) Zeitreihen von SF<sub>6</sub>. Bemerkung: Stabile Schichtungen, deutlicher Gebäudeeinfluß in der ersten Traverse.

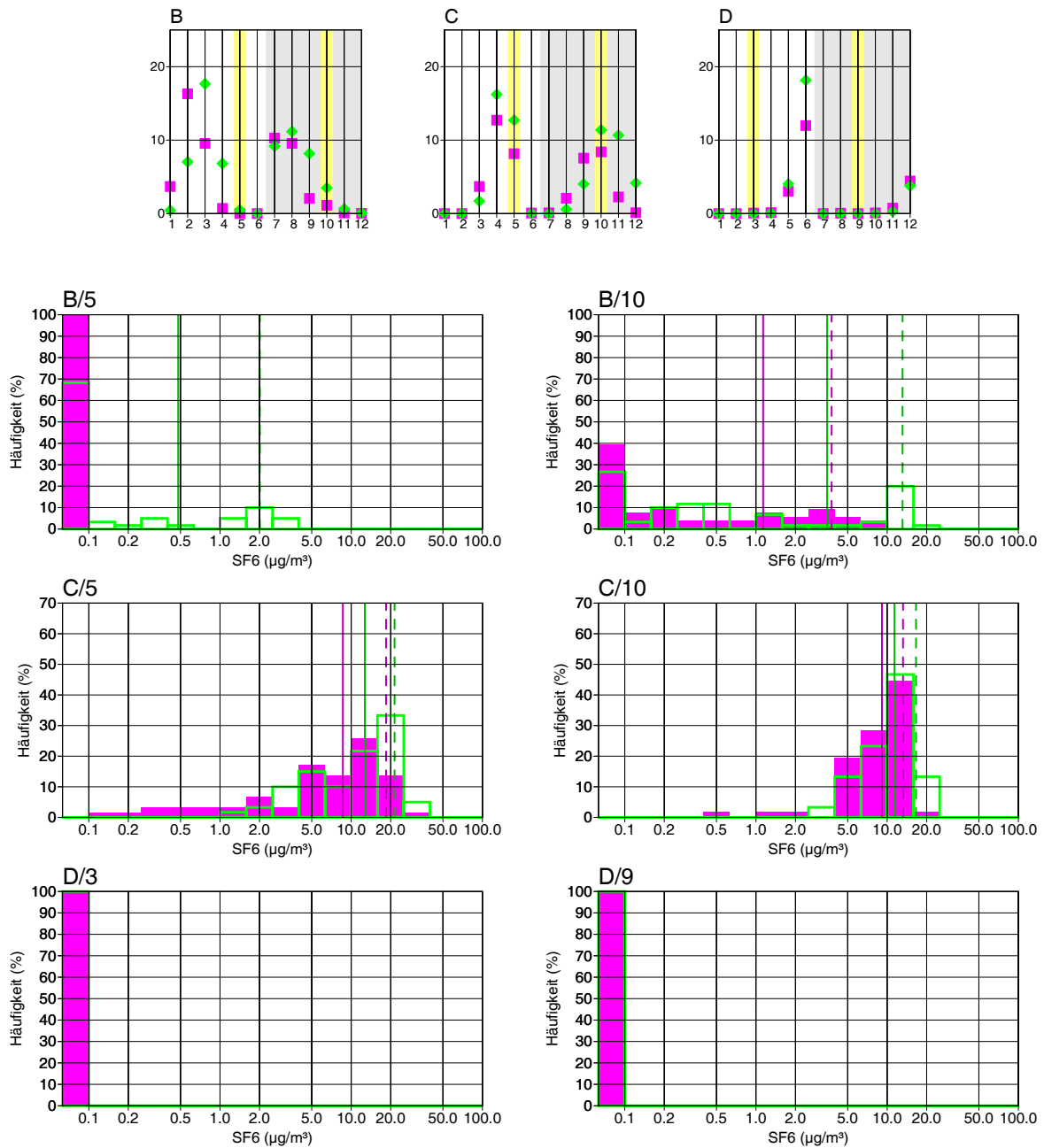


BILD 5.17: Vergleich der gemessenen (violett) und berechneten (grün) Häufigkeitsverteilungen von SF<sub>6</sub>.

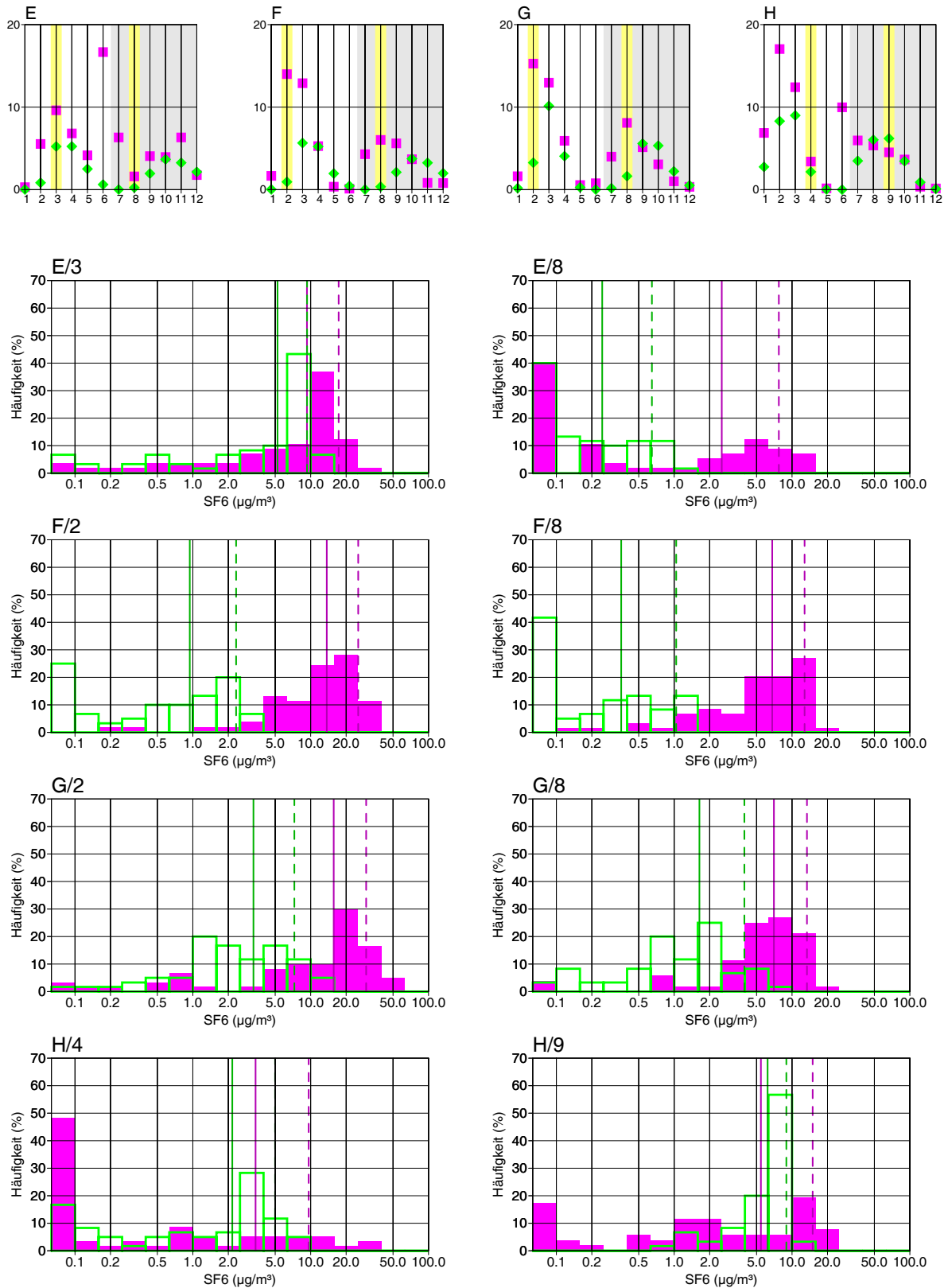


BILD 5.18: Vergleich der gemessenen (violett) und berechneten (grün) Häufigkeitsverteilungen von SF<sub>6</sub>.

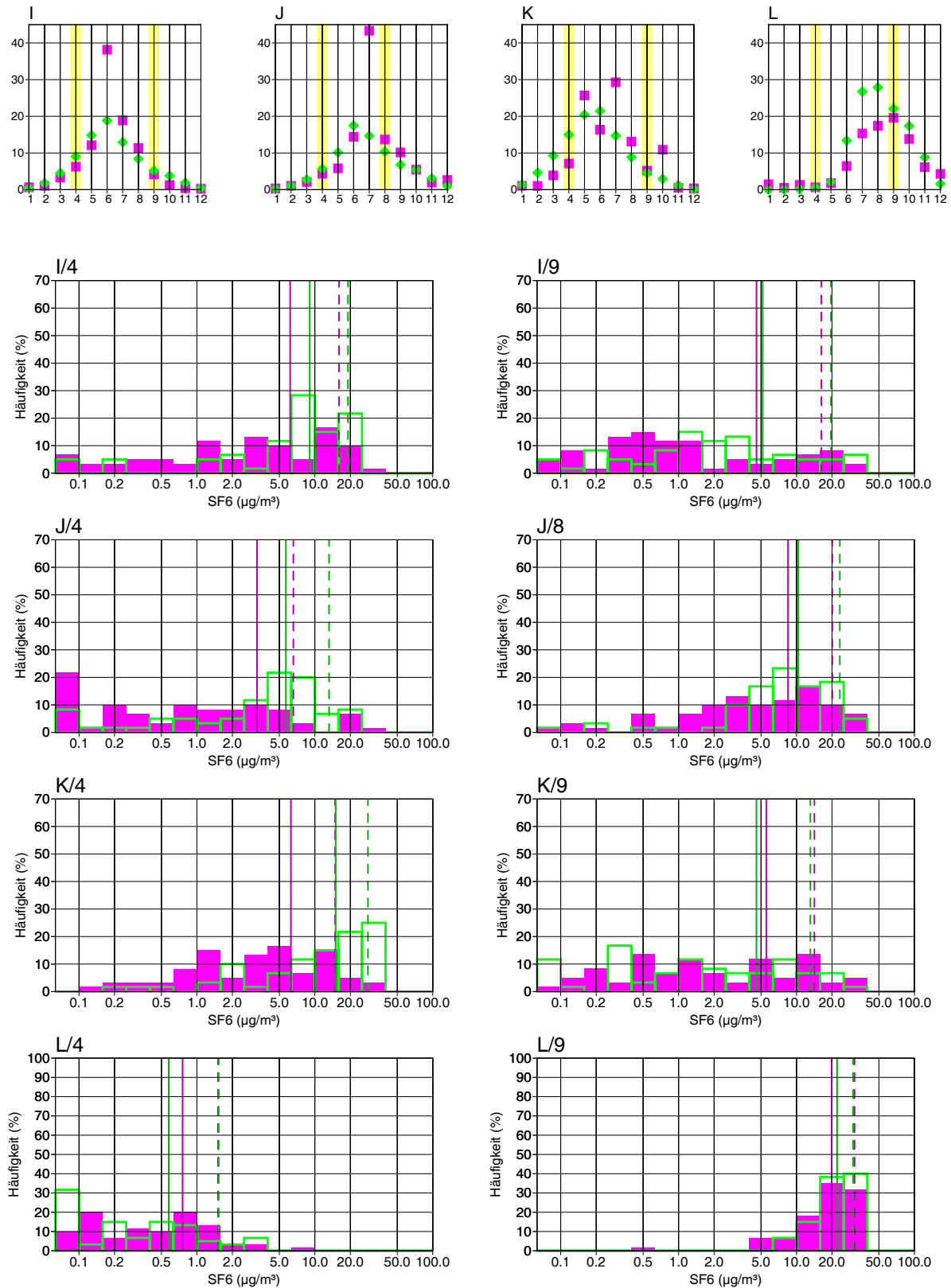


BILD 5.19: Vergleich der gemessenen (violett) und berechneten (grün) Häufigkeitsverteilungen von SF<sub>6</sub>.

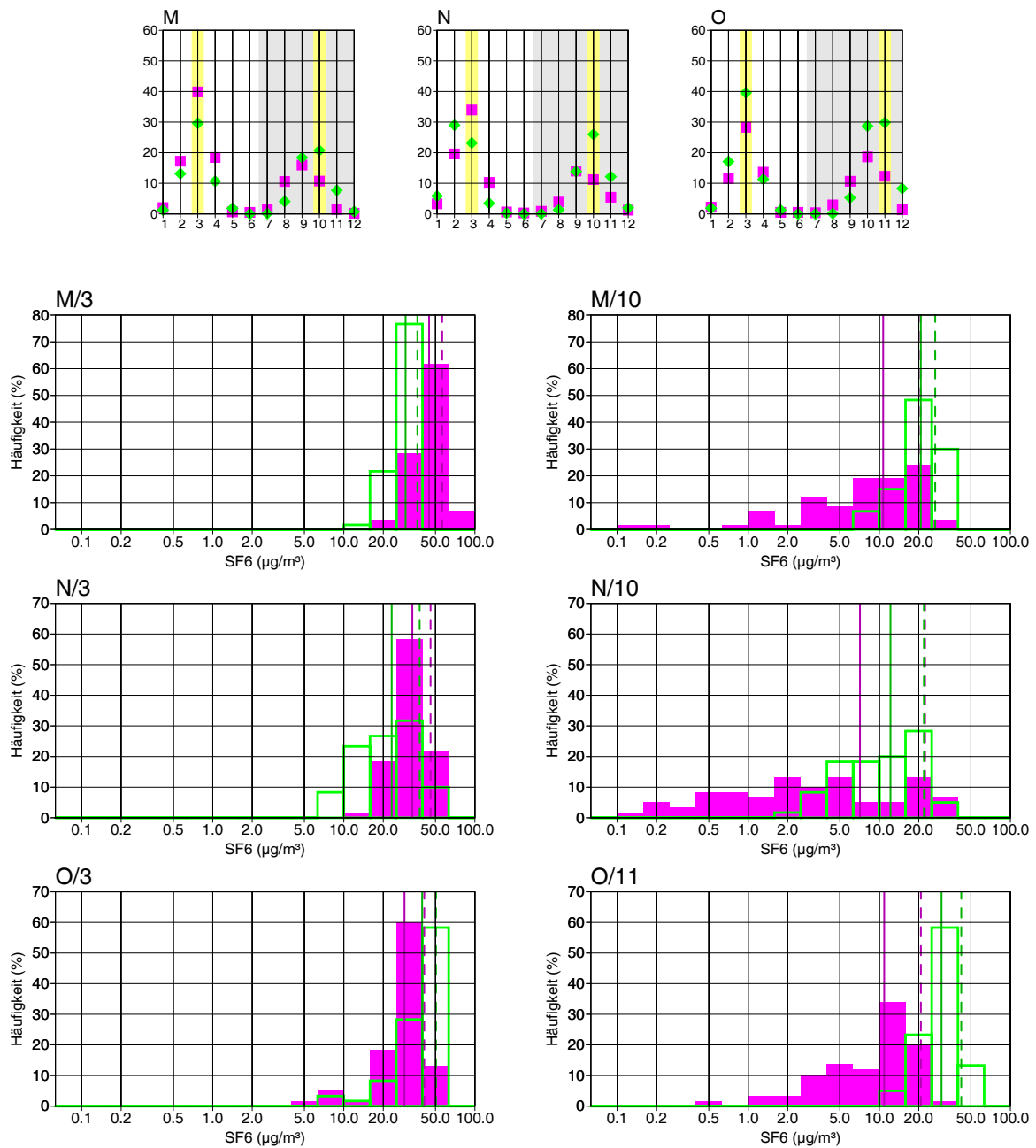


BIld 5.20: Vergleich der gemessenen (violett) und berechneten (grün) Häufigkeitsverteilungen von SF<sub>6</sub>.  
 Bemerkung: Stabile Schichtungen, deutlicher Gebäudeeinfluß in der ersten Traverse.

## 5.4 Anmerkung zur Wahrnehmungsfunktion

### Logarithmische Normalverteilung

Die logarithmische Normalverteilung einer Größe  $x$  ist

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x\sigma}} \exp\left\{-\frac{[\log(x/x_0)]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \text{mit} \quad \int_0^\infty f(x)dx = 1. \quad (5.4)$$

Hierbei bezeichnet  $\log$  den natürlichen Logarithmus. Die Bedeutung der Parameter  $x_0$  und  $\sigma$  wird klar, wenn man das Integral von  $f(x)$  betrachtet:

$$F(x) = \int_0^x f(x')dx' = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left\{\frac{\log(x/x_0)}{\sqrt{2}\sigma}\right\} \right]. \quad (5.5)$$

Für die Fehlerfunktion gilt  $\operatorname{erf}(0) = 0$  und daher  $F(x_0) = 1/2$ , d.h.  $x_0$  ist der Median der Verteilung  $f(x)$ . Für  $\log(x/x_0) = \sigma$  ist  $F(x) = 0.841$ , d.h.  $\sigma$  ist die Standardabweichung der auf den Logarithmus bezogenen Normalverteilung.

### Wahrnehmungsfunktion

Die Wahrnehmungsfunktion oder Geruchsschwellenkennlinie  $P_0(c)$  ist die Wahrscheinlichkeit, bei Darbietung einer Geruchsstoffkonzentration  $c$  einen Geruch wahrzunehmen. Sie wird in der Regel über eine logarithmische Normalverteilung definiert,

$$p_0(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi c\lambda}} \exp\left\{-\frac{[\log(c/c_{GS})]^2}{2\lambda^2}\right\} \quad (5.6)$$

$$P_0(c) = \int_0^c p_0(c')dc' = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left\{\frac{\log(c/c_{GS})}{\sqrt{2}\lambda}\right\} \right]. \quad (5.7)$$

Hierbei wird  $\lambda$  als das Auflösungsvermögen und  $c_{GS}$  als die Geruchsschwelle bezeichnet. In der Olfaktometrie wird statt des natürlichen Logarithmus häufig der dekadische Logarithmus  $\log_{10}$  verwendet, für die Umrechnung des Auflösungsvermögens gilt  $\lambda_{10} = \lambda/2.3$ .

### Geruchsbegehungen in Uttenweiler

Bei den Olfaktometermessungen in Uttenweiler ergaben sich für den Geruch eines Schweine-stalls Werte für  $\lambda$  zwischen 0.34 und 0.86 mit einem Median bei 0.59. Bestimmt man andererseits die Wahrnehmungsfunktion aus den Geruchsbegehungen als Mittel über alle Probandenpositionen und Begehungstage, so erhält man einen deutlich größeren Wert für  $\lambda$  von 2.5

(bestimmt aus den Konzentrationszeitreihen) bzw. 1.6 (bestimmt aus den 10-Minuten-Mitteln). Eine Ursache hierfür ist, daß über ein Probandenkollektiv gemittelt wurde, für das aufgrund der Freilandbedingungen und der unterschiedlichen Begehungspositionen nicht so einheitliche Randbedingungen wie bei den Olfaktometermessungen vorlagen. Daneben mußte die Geruchsstoffkonzentration aus den parallel durchgeführten SF<sub>6</sub>-Messungen abgeschätzt werden.

Die Verbreiterung der Wahrnehmungskurve aufgrund dieser Umstände kann abgeschätzt werden, wenn man annimmt, daß alle Probanden das gleiche Auflösungsvermögen besitzen und sich die unterschiedlichen Randbedingungen primär in unterschiedlichen Geruchsschwellen niederschlagen. Dies wird auch von den Meßdaten nahegelegt, die zeigen, daß bei den zwei Probanden, für die in einem Meßzyklus die Zeitreihe der Geruchsstoffkonzentrationen bestimmt wurden, Unterschiede in der Geruchsschwelle von der Größe 5 GE/m<sup>3</sup> auftreten konnten.

Nimmt man für die Verteilung der Geruchsschwelle innerhalb des Probandenkollektivs ebenfalls eine logarithmische Normalverteilung an,

$$g(c_{\text{GS}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}c_{\text{GS}}\mu} \exp \left\{ -\frac{[\log(c_{\text{GS}}/c_{\text{GS};0})]^2}{2\mu^2} \right\}, \quad (5.8)$$

dann gilt für das Mittel über das gesamte Probandenkollektiv

$$\bar{P}_0(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\mu} \int_0^\infty \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda} \int_0^c p_0(c') \frac{dc'}{c'} \right] \frac{dc_{\text{GS}}}{c_{\text{GS}}} \quad (5.9)$$

$$= \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left\{ \frac{\log(c/c_{\text{GS};0})}{\sqrt{2}\lambda_{\text{eff}}} \right\} \right] \quad (5.10)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \sqrt{\lambda^2 + \mu^2}. \quad (5.11)$$

Schätzt man  $\mu$  mit  $\log(5 \text{ GE/m}^3/1 \text{ GE/m}^3) = 1.6$  ab und wählt für  $\lambda$  den Median der Olfaktometermessungen 0.6, dann ergibt sich  $\lambda_{\text{eff}} = 1.7$ , was im Bereich der aus den Messungen hergeleiteten Werte liegt.



## Kapitel 6

# Implementierung in AUSTAL2000

Folgende Alternativen sind geprüft worden:

- A** Im Lagrange-Modell AUSTAL2000 wird das Mäandern der Abluftfahne innerhalb der Beurteilungsstunde explizit modelliert, wie es auch schon im Fahnenmodell MEPOD erprobt ist. Aus der Überlagerung der sich innerhalb einer Stunde einstellenden Verteilungsfunktionen der Dichtefluktuationen wird die Gesamtverteilung innerhalb einer Stunde berechnet und daraus mit Hilfe der Wahrnehmungsfunktion das Vorliegen einer Geruchsstunde prognostiziert.
- B** Es wird eine Beurteilungsschwelle  $c_{BS}$  eingeführt, und wenn der von AUSTAL2000 für eine Stunde berechnete Mittelwert der Konzentration  $\bar{c}$  größer ist als diese Beurteilungsschwelle, dann wird die betreffende Stunde als Geruchsstunde gewertet.

Die Entscheidung der Ländervertreter im UAK Ausbreitungsrechnung des LAI fiel zu Gunsten von Alternative B aus. Daher wird im folgenden ihre Implementierung in AUSTAL2000 beschrieben.

### 6.1 Berechnung der Geruchsstundenhäufigkeiten

Eine Geruchsstunde liegt vor, wenn der berechnete Stundenmittelwert der Konzentration  $\bar{c}$  größer ist als die Beurteilungsschwelle  $c_{BS} = 0.25 \text{ GE/m}^3$ . Der Stundenmittelwert  $\bar{c}$  ist mit einer Unsicherheit  $s_c$  behaftet, die während der Ausbreitungsrechnung aus der Varianz  $v_c$  ermittelt wird, die relative Unsicherheit ist  $\varepsilon_c = s_c/\bar{c}$ . Hierzu wird das Teilchenensemble in  $n$  Gruppen aufgeteilt, für jede Gruppe wird die Dosis  $d_i$  berechnet und es werden in den Ergebnisfeldern

die Größen  $D$  und  $Q$  gespeichert,

$$D_c = \sum d_i, \quad (6.1)$$

$$Q_c = \sum d_i^2, \quad (6.2)$$

$$\bar{c} = \frac{D_c}{\gamma VT}, \quad (6.3)$$

$$\gamma = \text{statistisches Gewicht}, \quad (6.4)$$

$$V = \text{Zellvolumen}, \quad (6.5)$$

$$T = \text{Mittelungszeit}, \quad (6.6)$$

$$v_c = \bar{c}^2 \frac{nQ_c D_c^{-2} - 1}{n - 1}, \quad (6.7)$$

$$s_c = \sqrt{v_c}, \quad (6.8)$$

$$\varepsilon_c = \sqrt{\frac{nQ_c D_c^{-2} - 1}{n - 1}}. \quad (6.9)$$

Das statistische Gewicht  $\gamma$  ist nur bei einer AKS-Rechnung von Bedeutung, bei der es durch die Häufigkeit der betreffenden Ausbreitungssituation in der AKS festgelegt ist. Sonst ist  $\gamma = 1$ .

Es ist zweckmäßig, bei der Entscheidung, ob eine Geruchsstunde vorliegt, zu berücksichtigen, daß der Wert von  $\bar{c}$  unsicher ist. Setzt man als statistische Verteilung  $f$  hierfür eine Gauß-Verteilung mit der Breite  $\sigma_c$  an,

$$f(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left[-\frac{(c - \bar{c})^2}{2\sigma_c^2}\right], \quad (6.10)$$

dann erhält man als Wahrscheinlichkeit  $\alpha$  dafür, daß  $c$  die Beurteilungsschwelle überschreitet,

$$\alpha = \mathcal{P}\{c \geq c_{\text{BS}}\}, \quad (6.11)$$

$$= \int_{c_{\text{BS}}}^{\infty} f(c) dc, \quad (6.12)$$

$$= 0.5 \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\bar{c} - c_{\text{BS}}}{\sqrt{2}\sigma_c}\right) \right]. \quad (6.13)$$

Die Häufigkeit  $h$  für das Auftreten einer Geruchsstunde unterliegt einer Verteilung, die nur die beiden Werte 0 (keine Geruchsstunde) und 1 (Geruchsstunde liegt vor) annimmt. Die Verteilungsdichte  $p(h)$  für die Werte von  $h$  läßt sich also unter Verwendung der DIRAC'schen Delta-

Funktion  $\delta(x)$  schreiben als

$$p(h) = (1 - \alpha)\delta(h) + \alpha\delta(1 - h), \quad (6.14)$$

$$\bar{h} = \int_0^1 hp(h) dh = \alpha, \quad (6.15)$$

$$\overline{h^2} = \int_0^1 h^2 p(h) dh = \alpha. \quad (6.16)$$

Damit erhält man für die Varianz von  $h$

$$v_h = \overline{h^2} - \bar{h}^2 = \alpha[1 - \alpha] \quad (6.17)$$

Man kann im Programm die Routinen zur Weiterverarbeitung der Stundenmittelwerte  $\bar{c}$  ebenso für die Weiterverarbeitung der Geruchsstundenhäufigkeit verwenden, wenn man statt mit der Zufallsgröße  $h$  mit dem Erwartungswert  $\bar{h} = \alpha$  arbeitet und die Größen  $D_c$  und  $Q_c$  durch die entsprechenden Größen  $D_h$  und  $Q_h$  ersetzt,

$$D_h = \alpha\gamma VT, \quad (6.18)$$

$$Q_h = \frac{D_h^2}{n} \left\{ 1 + (n - 1) \frac{v_h}{\alpha^2} \right\}, \quad (6.19)$$

$$= \frac{\gamma^2 V^2 T^2}{n} \{ \alpha^2 + (n - 1)\alpha[1 - \alpha] \}. \quad (6.20)$$

Mit dieser Substitution erhält man in den Ergebnisfeldern statt des Jahresmittels der Konzentration das Jahresmittel der Geruchsstundenhäufigkeit. Bei der Ausweisung des Stichprobenfehlers sollte aber nicht der relative Fehler, sondern der absolute Fehler verwendet werden. Er ist aussagekräftiger, während der relative Fehler bei kleinen Werten der Geruchsstundenhäufigkeit divergieren kann,

$$\varepsilon_h = \sqrt{\frac{1 - \alpha}{\alpha}}. \quad (6.21)$$

Das beschriebene Verfahren wurde an 3 Beispielen getestet:

1. Test-AKS mit 2 Ausbreitungssituationen
2. AKS anonym.aks
3. AKTerm anno95.akterm

Die Quellparameter waren in allen Fällen: Quelhöhe 10 m, Quellstärke 2000 GE/m<sup>3</sup>. Bei den Rechnungen wurde neben dem Geruchsstoff odor noch der Stoff xx mit gleicher Quellstärke mitgeführt, um auch Aussagen über die Konzentrationswerte zu erhalten.

### 1. Test-AKS mit 2 Ausbreitungssituationen

Die AKS enthält nur 2 Situationen mit von 0 verschiedener Eintrittswahrscheinlichkeit: Westwind mit der Wahrscheinlichkeit 0.80 und Ostwind mit der Wahrscheinlichkeit 0.20, beide bei neutraler Schichtung. Die folgende Tabelle zeigt die berechnete Geruchsstundenhäufigkeit (in Prozent) in der Umgebung der Quelle (Ausschnitt aus der Datei t/odor/01/odor-j00z-dmna):

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.1	48.0
20.0	20.0	20.0	12.7	0.0	0.0	48.2	80.0	80.0	80.0
20.0	20.0	20.0	13.0	0.0	0.0	48.2	80.0	80.0	80.0
11.9	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	48.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Die in den Zentren der Fahnen ausgewiesenen Geruchsstundenhäufigkeiten sind korrekt: Im Westen 20 % und im Osten 80 %.

### 2. AKS anonym. aks

Die Geruchsstundenhäufigkeit wurde einmal in einer entsprechenden LASAT-Rechnung über die Überschreitungshäufigkeit des Wertes 0.25 GE/m<sup>3</sup> berechnet und einmal mit AUSTAL2000G nach dem zuvor beschriebenen Verfahren. Bild 6.1 zeigt die beiden Ergebnisse.

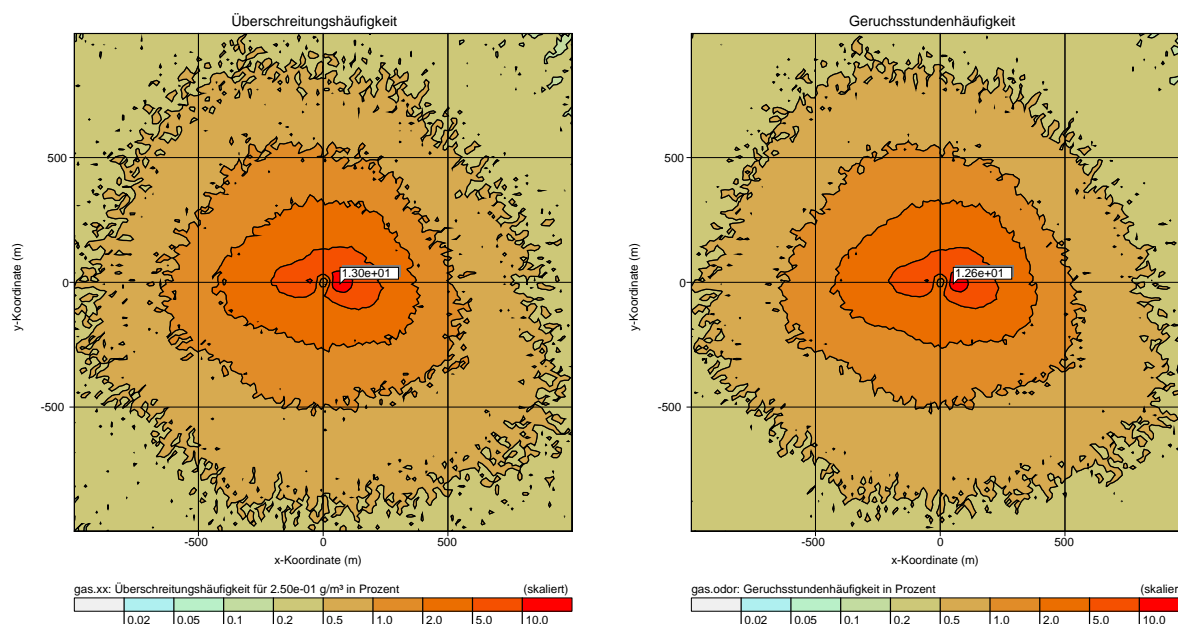


BILD 6.1: Überschreitungshäufigkeit für den Wert 0.25 GE/m<sup>3</sup> nach LASAT (links) und Geruchsstundenhäufigkeit nach AUSTAL2000G (rechts).

Die Ergebnisse stimmen praktisch überein. Der Maximalwert der Geruchsstundenhäufigkeit wird von AUSTAL2000G mit 12.6 % der Jahresstunden angegeben, von LASAT mit 13.0 % der Jahresstunden angegeben. Die etwas glatteren Konturen bei der Rechnung mit AUSTAL2000G deuten

darauf hin, daß hier der Stichprobenfehler etwas geringer ist. Dies liegt daran, daß bei AUSTAL2000G für jede Stunde nicht die aus  $\bar{c}$  unmittelbar erhaltene Geruchsstundenhäufigkeit  $h$  verwendet wird (Wert 0 oder 1) sondern der unter Einbeziehung des Stichprobenfehlers ermittelte Erwartungswert  $\bar{h}$  der Geruchsstundenhäufigkeit.

Der von AUSTAL2000G geschätzte Stichprobenfehler ist in Bild 6.2 dargestellt (mit LASAT läßt er sich nicht schätzen). Der Absolutwert der Streuung liegt immer unter 0.4 %, der Maximalwert wird unmittelbar neben dem Ort mit der größten Geruchsstundenhäufigkeit angenommen. Dort beträgt die absolute Streuung 0.28 % (der Jahresstunden), die relative Streuung 2.3 % (von 12.6 %). Sie liegt damit deutlich höher als die Streuung des Jahresmittelwertes an dieser Stelle (1.3 %), der mit einer separaten Rechnung ermittelt wurde.

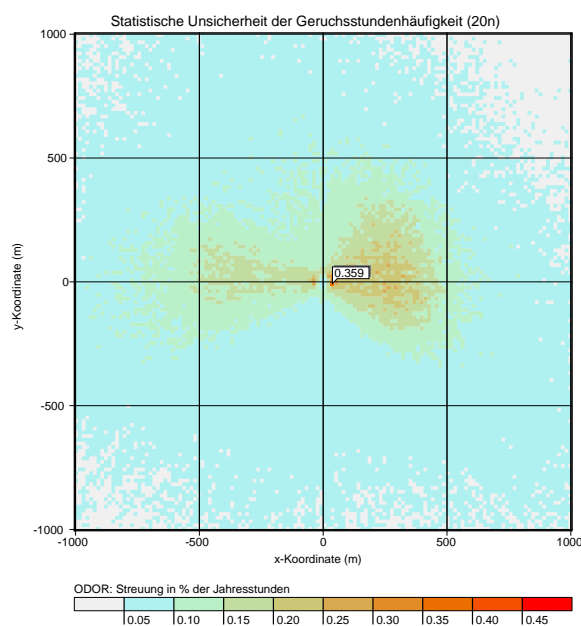


BILD 6.2: Von AUSTAL2000G geschätzte Streuung der Geruchsstundenhäufigkeit (Absolutwerte in % der Jahresstunden) für die AKS-Rechnung in Bild 6.1.

Der geschätzte Stichprobenfehler wurde dadurch kontrolliert, daß 10 verschiedene Ausbreitungsrechnungen mit AUSTAL2000G mit unterschiedlichen Zufallszahlen durchgeführt wurden. Hieraus wurde die tatsächliche Unsicherheit der Geruchsstundenhäufigkeit bestimmt und diese Werte wurden dann mit den von AUSTAL2000G geschätzten Unsicherheiten verglichen (Bild 6.3).

Bei der Interpretation des Bildes ist zu berücksichtigen, daß der geringe Stichprobenumfang von 10 Vergleichsrechnungen keine sehr genaue Bestimmung der Streuung zuläßt. Rein zufällige Abweichungen von einem Faktor 2 bis 3 sind bei der großen Anzahl der Vergleichspunkte durchaus möglich. Die beobachtbare Aufweitung der Punktwolke liegt in diesem Bereich, wobei insbesondere bei größeren Streuungen die Schätzung der Streuung durch AUSTAL2000G fast durchweg konservativ ist. Der von AUSTAL2000G für die Geruchsstundenhäufigkeit ausgewiesene Stichprobenfehler ist also ein brauchbares Mittel zur Beurteilung der statistischen Unsicherheit des Ergebnisses.

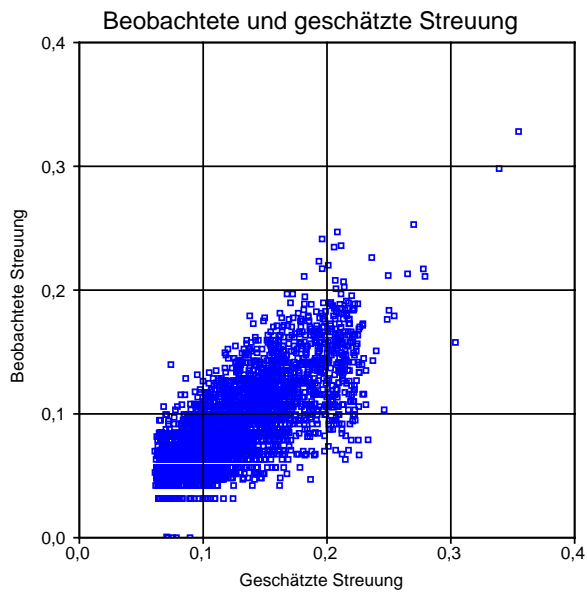


BILD 6.3: Auswertung einer AKS-Rechnung: Für alle bodennahen Gitterzellen mit einer Geruchsstundenhäufigkeit  $h \geq 0.1\%$  ist die von AUSTAL2000G geschätzte Unsicherheit (quadratisches Mittel aus 10 Läufen) gegen die aus 10 Läufen ermittelte tatsächliche Streuung aufgetragen (Absolutwerte in Prozent der Jahresstunden).

### 3. AKTerm anno95.akterm

Wie bei der AKS-Rechnung wurden zunächst die berechneten Geruchsstundenhäufigkeiten mit den Überschreitungshäufigkeiten verglichen, die LASAT für den Wert  $0.25 \text{ GE/m}^3$  liefert (Bild 6.4).

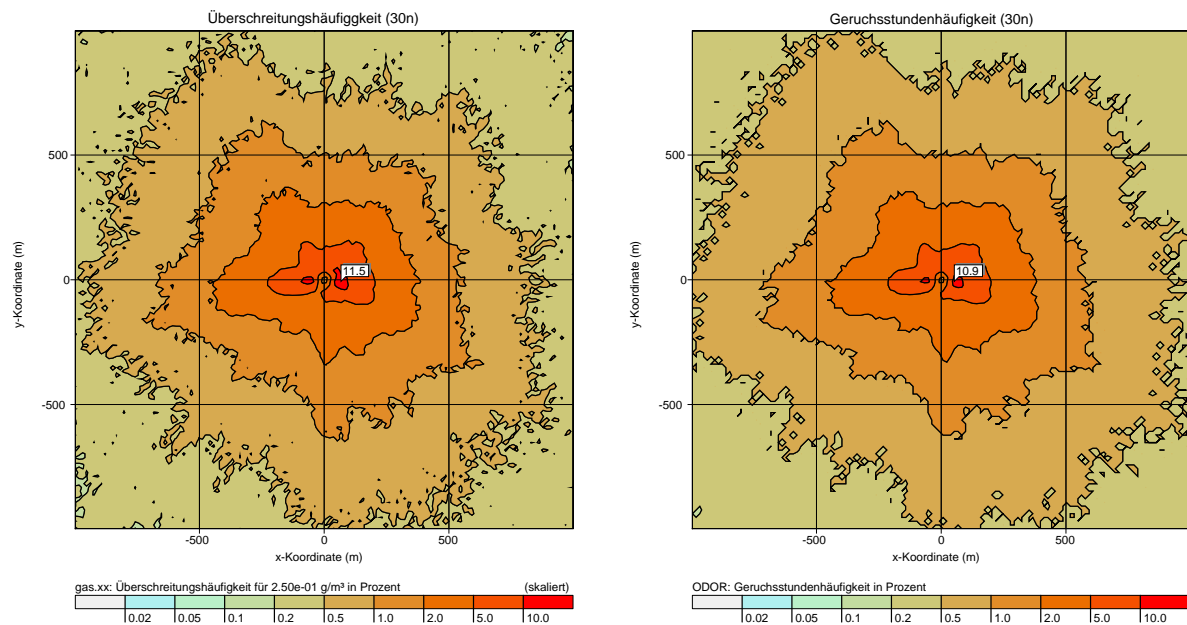


BILD 6.4: Überschreitungshäufigkeit für den Wert  $0.25 \text{ GE/m}^3$  nach LASAT (links) und Geruchsstundenhäufigkeit nach AUSTAL2000G (rechts).

Die Werteverteilung und die Maximalwerte stimmen gut überein (LASAT: 11.5 %, AUSTAL2000G: 10.9 %). Die Protokolldatei weist für den Maximalwert einen absoluten Fehler von 0.16 % der Jahresstunden aus, der relative Fehler beträgt also 1.5 % (von 10.9 % der Jahresstunden).

den). Die statistische Unsicherheit des maximalen Konzentrationswertes beträgt 1,4 %, unterscheidet sich also nur sehr wenig von der Unsicherheit der maximalen Geruchsstundenhäufigkeit.

Die Verteilung der beobachteten statistischen Unsicherheit ist in Bild 6.5 dargestellt, der Vergleich zwischen geschätzter und in 10 verschiedenen Läufen beobachteter Streuung in Bild 6.6. Die statistische Unsicherheit ist geringer als bei der AKS-Rechnung, die Abweichungen zwischen geschätzten und die beobachteten Streuungen liegen wieder im Bereich des Verfahrensfehlers. Die Überschätzung der Unsicherheit durch AUSTAL2000G scheint aber etwas weniger stark ausgeprägt zu sein als bei der AKS-Rechnung.

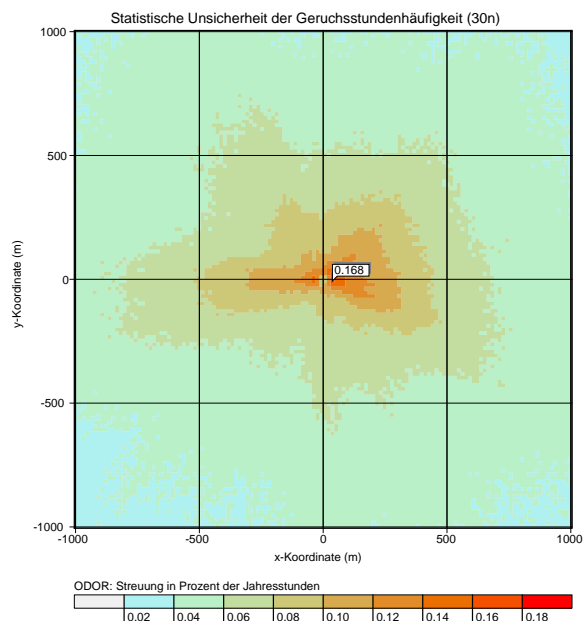


BILD 6.5: Von AUSTAL2000G geschätzte Streuung der Geruchsstundenhäufigkeit (Absolutwerte in % der Jahresstunden) für die AKTerm-Rechnung in Bild 6.4.

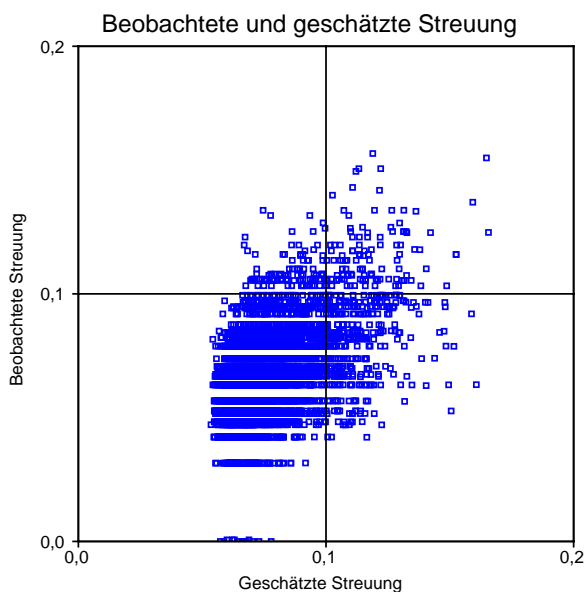


BILD 6.6: Auswertung einer AKTerm-Rechnung: Für alle bodennahen Gitterzellen mit einer Geruchsstundenhäufigkeit  $h \geq 0.1$  % ist die von AUSTAL2000G geschätzte Unsicherheit (quadratisches Mittel aus 10 Läufen) gegen die aus 10 Läufen ermittelte tatsächliche Streuung aufgetragen (Absolutwerte in Prozent der Jahresstunden).



## 6.2 Erweiterung von AUSTAL2000

Um Handhabung und Wartung der AUSTAL2000-Familie zu erleichtern, wird AUSTAL2000G nicht als eigenständiges Programm erstellt, sondern es wird AUSTAL2000 entsprechend erweitert und dies durch den Sprung der Versionsnummer von 1.1 auf 2.0 kundgegeben.

### 6.2.1 Update-Information in AUSTAL2000 2.0

Gegenüber Version 1.1 ist die Möglichkeit hinzugekommen, für einen Geruchsstoff die Geruchsstundenhäufigkeit zu bestimmen. Die Maßeinheit ist *Prozent der Gesamtstundenzahl*. In der Ausbreitungsrechnung wird der Geruchsstoff als inertes Gas behandelt. Folgende Erweiterungen gibt es:

1. In der Eingabedatei können zusätzlich Emissionen für den Stoff odor angegeben werden, wobei als Einheit GE/s zu wählen ist.
2. In der Protokolldatei wird zusätzlich die Geruchsstundenhäufigkeit in Prozent der Gesamtstundenzahl angegeben. Die statistische Unsicherheit wird — anders als bei den Konzentrationswerten — als Absolutwert angegeben, und zwar ebenfalls in Prozent der Gesamtstundenzahl.
3. In den Dateien odor-j00x.dma werden Geruchsstundenhäufigkeit und der geschätzte Stichprobenfehler abgespeichert.
4. In der Datei odor-zbpz.dma wird die Zeitreihe des Auftretens von Geruchsstunden an den Beurteilungspunkten abgespeichert. Angegeben ist die Wahrscheinlichkeit (in Prozent) für das Vorliegen einer Geruchsstunde zu der betreffenden Stunde. Die Wahrscheinlichkeit wird aus dem berechneten Konzentrationswert und seiner statistischen Unsicherheit bestimmt.
5. In der Verifikation 01 wird die Berechnung der Geruchsstundenhäufigkeit geprüft.

Die Ausbreitungsrechnung für den Stoff odor kann zusammen mit der Ausbreitungsrechnung für andere Stoffe durchgeführt werden.

### 6.2.2 Verifikation 01 in AUSTAL2000 2.0

Es wird getestet, ob das Vorliegen einer Geruchsstunde richtig erkannt wird und die Schätzung des Stichprobenfehlers für die Geruchsstundenhäufigkeit korrekt ist.

Es wird ähnlich wie bei Verifikation 00 ein Rechengebiet von  $200 \times 200 \text{ m}^2$  Grundfläche festgelegt, das horizontal in  $10 \times 10$  Maschen aufgeteilt wird. Vertikal gibt es nur eine Masche bis 200 m Höhe. Es wird eine Zeitreihe von 10 Tagen gerechnet, wobei nur während der letzten





Stunde des ersten Tages Partikel freigesetzt werden. Die Randbedingungen werden so modifiziert, daß die Partikel das Rechengebiet nicht verlassen können. Es wird eine zeitlich und räumlich konstante Turbulenz angesetzt. In allen Zellen sollte die gleiche mittlere Konzentration herrschen, Abweichungen hiervon sind rein zufällig.

Die Emission wird so gewählt, daß die mittlere Konzentration  $0.25 \text{ GE/m}^3$  beträgt, also mit 50 % Wahrscheinlichkeit eine Geruchsstunde angenommen wird. Um neben der Geruchsstundenhäufigkeit auch die Konzentration verfolgen zu können, wird neben dem Stoff odor auch der Stoff xx mit gleicher Quellstärke emittiert. Zusätzlich zu den 10 Tagesmittelwerten wird auch für 10 Beurteilungspunkte die Zeitreihe von Konzentration und von Geruchsstundenhäufigkeit berechnet.

**Rechengebiet:**  $200 \times 200 \times 200 \text{ m}^3$ , aufgeteilt in  $10 \times 10 \times 1$  Maschen mit periodischen Randbedingungen.

**Meteorologie:** Homogene Turbulenz mit  $u_a=0.2$ ,  $r_a=270$ ,  $z_0=0.5$  und „Blm=0.1; Su=1.2; Sv=1.0; Sw=0.65; Tau=10; Us=0.2;“, Zeitreihe über 10 Tage.

**Quelle:** Volumenquelle über das gesamte Rechengebiet. Die Emission erfolgt nur in der letzten Stunde des ersten Tages. Bei Groups=36; Rate=0.1; bedeutet dies, daß jede Gruppe 10 Partikel enthält. Die Gesamtemission ist 2000 kGE (bzw. 2000 kg), die mittlere Konzentration also  $0.25 \text{ GE/m}^3$ .

Tagesmittel der Konzentration:

N	Mean	Observed	Estimated
1	0.005220	5.50	5.96
2	0.250026	0.82	0.83
3	0.250018	0.96	0.82
4	0.250018	0.94	0.84
5	0.250017	0.86	0.82
6	0.250018	0.73	0.82
7	0.250019	0.65	0.83
8	0.250016	0.76	0.82
9	0.250022	0.83	0.81
10	0.250024	0.93	0.82

Bei der Auswertung in der nebenstehenden Tabelle wird für jeden Tag N der beobachtete Mittelwert Mean der Konzentration angegeben, aus der Variation der Konzentrationswerte in den  $10 \times 10$  Maschen der tatsächliche Stichprobenfehler berechnet (Spalte Observed, Angabe in Prozent) und mit dem Stichprobenfehler verglichen, den das Programm selbst für jede Masche schätzt (Spalte Estimated, quadratisches Mittel über alle Zellen, Angabe in Prozent). Der Mittelwert liegt im Rahmen der Darstellungsgenauigkeit in den Ergebnisdateien (4 signifikante Stellen) bei den vorgesehenen  $0.25 \text{ GE/m}^3$ . Der Median des tatsächlichen Stichprobenfehlers über alle 9 verwertbaren Tage beträgt 8.3 %, der mittlere vom Programm geschätzte Stichprobenfehler beträgt 8.2 %.

Zeitreihe der Konzentration:

P	Mean	Observed
1:	0.25093	4.381
2:	0.25048	4.024
3:	0.25011	3.931
4:	0.25091	4.064
5:	0.25029	4.164
6:	0.24907	4.103
7:	0.25145	4.237
8:	0.25058	4.180
9:	0.25031	4.322
10:	0.25042	3.875

Die nebenstehende Tabelle zeigt die Auswertung der Konzentrationszeitreihen für die 10 Beurteilungspunkte (Spalte P) bezüglich der Tage 2 bis 10. Die Spalte Mean enthält die über die 9 Tage gemittelte Konzentration, die Spalte Observed den beobachteten Stichprobenfehler der Stundenmittelwerte. Theoretisch sollte er um den Faktor  $\sqrt{24}=4.9$  über dem Stichprobenfehler des Tagesmittels liegen, also bei 4.07 %. Der beobachtete Wert ist 4.10 % (Median).

Tagesmittel der Geruchsstundenhäufigkeit:

N	Mean	Observed	Estimated
1	0.00	0.00	0.00
2	49.54	6.17	8.26
3	49.39	6.71	8.32
4	49.34	6.60	8.30
5	49.25	6.06	8.31
6	49.27	5.17	8.27
7	49.32	4.65	8.23
8	49.68	5.38	8.22
9	49.36	5.78	8.23
10	49.25	6.48	8.29

Bei der Auswertung in der nebenstehenden Tabelle wird für jeden Tag N der beobachtete Mittelwert Mean der Geruchsstundenhäufigkeit angegeben (in Prozent der Tagesstunden), aus der Variation der Häufigkeitsswerte in den  $10 \times 10$  Maschen der tatsächliche Stichprobenfehler berechnet (Spalte Observed, Angabe in Prozent der Tagesstunden) und mit dem Stichprobenfehler verglichen, den das Programm selbst für jede Masche schätzt (Spalte Estimated, quadratisches Mittel über alle Zellen, Angabe in Prozent der Tagesstunden). Der Mittelwert liegt knapp unter dem theoretischen Wert von 50 %. Der Median des tatsächlichen Stichprobenfehlers über alle 9 verwertbaren Tage beträgt 6.06, der mittlere vom Programm geschätzte Stichprobenfehler beträgt 8.27.

Den theoretisch zu erwartenden Wert für den vom Programm geschätzten Stichprobenfehler erhält man durch folgende Überlegung. Die Parameter dieser Rechnung sind so gewählt, daß der Erwartungswert  $\bar{c}$  der einzelnen Stundenmittelwerte  $c$  gleich der Beurteilungsschwelle  $c_{BS} = 0.25 \text{ GE/m}^3$  ist. Die Einzelwerte streuen um diesen Mittelwert mit einer Streuung  $\sigma$ , die etwa 4 % des Mittelwertes beträgt, wie zuvor gezeigt wurde. Man kann daher näherungsweise von einer Gauß-Verteilung ausgehen,

$$g(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(c - c_{BS})^2}{2\sigma^2}\right], \quad (6.22)$$

$$G(c) = \int_{-\infty}^c g(c') dc'. \quad (6.23)$$

Tritt der Wert  $c$  auf, dann wird diesem Wert die Geruchsstundenhäufigkeit  $\alpha$  mit der Varianz  $v$  zugeordnet,

$$\alpha(c) = G(c), \quad (6.24)$$

$$v(c) = \alpha(c)[1 - \alpha(c)]. \quad (6.25)$$

Der Mittelwert der Varianz ist

$$\bar{v} = \int_{-\infty}^{+\infty} v(c)g(c) dc, \quad (6.26)$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} G(c)[1 - G(c)]g(c) dc = \frac{1}{6}. \quad (6.27)$$

Das Integral läßt sich durch partielle Integration exakt berechnen. Die für das Tagesmittel (Mittel über 24 Einzelwerte) zu erwartende Streuung ist daher  $1/\sqrt{6 \times 24} = 0.083333$ , also 8.33 % der Tagesstunden, was sehr gut mit dem vom Programm angegebenen Wert übereinstimmt.

Die tatsächlich beobachtete Streuung ist deutlich geringer. Das liegt daran, daß das Tagesmittel nicht über die Binär-Werte (ja/nein-Entscheidung) des Auftretens einer Geruchsstunde gebildet wird, sondern über die Eintrittswahrscheinlichkeit  $\alpha$ .

Zeitreihe der Geruchsstundenhäufigkeit: Die nebenstehende Tabelle zeigt die Auswertung der Zeitreihe der Geruchsstundenhäufigkeit für die 10 Beurteilungspunkte (Spalte P) bezüglich der Tage 2 bis 10. Die Spalte Mean enthält die über die 9 Tage gemittelte Geruchsstundenhäufigkeit (Median ist 50.56 % der Gesamtstunden), die Spalte Observed den beobachteten Stichprobenfehler der Häufigkeitswerte. Theoretisch sollte er um den Faktor  $\sqrt{24}=4.9$  über dem Stichprobenfehler des Tagesmittels liegen, also bei 29.7 %. Der beobachtete Wert ist 29.2 % (Median). Die Spalte Counted enthält zum Vergleich die Häufigkeit der Geruchsstunden, die sich durch Auszählen der Konzentrationswerte  $c \geq c_{BS}$  aus der Zeitreihe für den Stoff xx ergibt. Der Median liegt hier bei 51.6 % der Gesamtstunden.

### 6.2.3 Beispielrechnungen

Um dem Anwender Rechnungen zur Geruchsausbreitung vorzuführen, werden im Verzeichnis test/odor zwei Fälle durchgerechnet.

h50a95: Dies ist eine Modifizierung des Beispiels test/h50a95. Für eine 50 m hohe Quelle ohne Überhöhung wird die Ausbreitung anhand der AKTerm anno95 .akt erm berechnet. Es wird der Stoff odor mit der Quellstärke 100 kGE/s und der Stoff xx mit der Quellstärke 100 kg/s emittiert.

h10aksn: Es wird die Ausbreitung aus einem Stall der Grundfläche 16×60 m<sup>2</sup> anhand der AKS anonym .aks für den Stoff odor mit der Quellstärke 5 kGE/s und den Stoff xx mit der Quellstärke 5 kg/s unter Verwendung einer Netzschachtelung berechnet.

## 6.3 Umrechnung auf Beurteilungsflächen

Das JAVA-Programm A2KArea dient dazu, die Ergebnisse von Rechnungen mit dem Ausbreitungsmodell AUSTAL2000 zur Geruchsausbreitung auszuwerten. Das Programm unterliegt der GNU Public Licence (GPL) und kann kostenlos aus dem Internet von [www.austal2000.de](http://www.austal2000.de) bezogen werden.

Während das Programm AUSTAL2000 das Rechenetz (oder die Rechenetze) so wählt, daß die Immissionskennwerte lokal ausreichend genau ermittelt werden können, schreiben die für die Geruchsbewertung maßgeblichen Geruchs-Immissions-Richtlinien (GIRL) in der Regel vor, daß die Auswertung auf bestimmten Beurteilungsflächen zu erfolgen hat. Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung, die selbst Mittelwerte über — in der Regel kleinere — Flächen darstellen, müssen also noch einmal auf die Flächen der GIRL umgerechnet werden.

Hierzu stellt das Programm fest, wie weit die Flächen von AUSTAL2000 die Beurteilungsflächen überlappen, und es wird das gewichtete Mittel der Geruchsstundenhäufigkeit gebildet.

Durch entsprechende Mittelung der Varianzen wird auch die statistische Unsicherheit geschätzt. Wurden in der AUSTAL2000-Rechnung geschachtelte Netze verwendet, dann wird bei der Mittelung immer auf die Werte des feinst möglichen Netzes zurückgegriffen.

Voraussetzung ist, daß die Beurteilungsflächen ein regelmäßiges Raster mit quadratischen Flächen bilden, deren Kanten parallel zu den Gitterlinien des Netzes von AUSTAL2000 verlaufen (reguläres Gitter). Die Maschenweite des Auswerterasters, seine Lage und seine Ausdehnung können vom Benutzer vorgegeben werden. Das Auswerteraster darf allerdings nicht über das Rechengebiet der AUSTAL2000-Rechnung hinausragen.

Um mit A2KArea rechnen zu können, muß das *Java Runtime Environment* (JRE) installiert sein (Version 1.4). Das Programm A2KArea wird dann folgendermaßen gestartet:

```
java -jar A2KArea.jar Pfad Optionen
```

Hierbei gibt *Pfad* das Arbeitsverzeichnis an, in dem die Ergebnisse der AUSTAL2000-Rechnung stehen. Mit den folgenden Optionen wird das Auswerteraster festgelegt:

- d $Dr$  Maschenweite des neuen Netzes
- r $Rr$  Ausdehnung des neuen Netzes
- x $Xr$   $x$ -Koordinate des Netz-Mittelpunktes
- y $Yr$   $y$ -Koordinate des Netz-Mittelpunktes

Das Auswerteraster mit der Maschenweite  $Dr$  wird so über das Gebiet der AUSTAL2000-Rechnung gelegt, daß sein Mittelpunkt bei  $(Xr, Yr)$  liegt und es einen Kreis mit Radius  $Rr$  um diesen Punkt überdeckt. Dabei darf das Gebiet der AUSTAL2000-Rechnung nicht überschritten werden. Je nach Wahl von  $Rr$  und  $Dr$  fällt der Punkt  $(Xr, Yr)$  entweder mit einem Gitterpunkt des Auswerterasters zusammen (gerade Anzahl von Rasterflächen in einer Koordinatenrichtung) oder mit dem Mittelpunkt einer Rasterfläche (ungerade Anzahl).

Die berechneten Werte werden als DMNA-Datei im Arbeitsverzeichnis Pfad abgespeichert. Der Dateiname ist odor-d $Dr$ r $Rr$ x $Xr$ y $Yr$ -z.dmna für die Geruchsstundenhäufigkeit und ...-s.dmna für die statistische Unsicherheit. Dabei sind  $Dr$ ,  $Rr$ ,  $Xr$  und  $Yr$  durch die entsprechenden (ganzzahligen) Werte ersetzt.

### Beispiel:

Im AUSTAL2000-Paket gibt es eine Beispielrechnung im Verzeichnis test/odor/h50a95. Soll die Geruchsauswertung auf einem Raster mit 250 m Maschenweite bis in eine Quellentfernung von 1000 m erfolgen, dann ist folgender Aufruf notwendig (falls die Datei A2KArea.jar im Hauptverzeichnis von AUSTAL2000 steht und dies auch das aktuelle Verzeichnis ist):

```
java -jar A2KArea.jar test/odor/h50a95 -d250 -r1000 -x0 -y0
```

In das Verzeichnis test/odor/h50a95 werden die Dateien odor-d250r1000x0y0-z.dmna und odor-d250r1000x0y0-s.dmna geschrieben. Die erste enthält die Geruchsstundenhäufigkeit (in Prozent der Gesamtstunden), die zweite die statistische Unsicherheit der Werte (ebenfalls in Prozent der Gesamtstunden).