

(Print) ISSN 1439–8222

(Internet) ISSN 1439–8303

Nummer/Number 7

Auflage/Edition 1

---

# Berichte zur Umweltphysik

## *Reports on Environmental Physics*

---

Einige Aspekte zur Festlegung meteorologischer  
Grenzschichtprofile und Vergleiche mit Messungen

*Some aspects of the definition of meteorological  
boundary layer profiles and comparisons with  
measurements*

Ulf Janicke, Lutz Janicke

Februar 2011



Ingenieurbüro Janicke, Hermann-Hoch-Weg 1, 88662 Überlingen, Germany

Autoren/*Authors* :

Dr. Ulf Janicke  
Ing.-Büro Janicke  
Hermann-Hoch-Weg 1  
D-88662 Überlingen  
(Email [uj@janicke.de](mailto:uj@janicke.de))

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

Die Auswertungen der Meßdaten durch die Universität Hamburg wurden vom LANUV NRW gefördert.

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

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

Herausgeber:  
Ingenieurbüro Janicke  
Hermann-Hoch-Weg 1, 88662 Überlingen  
Deutschland  
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.

Publisher:  
Janicke Consulting  
Hermann-Hoch-Weg 1, 88662 Überlingen  
Germany  
Internet: [www.janicke.de](http://www.janicke.de)

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.



# Einige Aspekte zur Festlegung meteorologischer Grenzschichtprofile und Vergleiche mit Messungen

Ulf Janicke, Lutz Janicke

Februar 2011

## Zusammenfassung

Meteorologische Grenzschichtprofile, wie sie zur Zeit als Standardprofile in den Ausbreitungsmodellen LASAT und AUSTAL2000 implementiert sind, werden mit Messungen verglichen und es wird auf verschiedene Aspekte eingegangen, die bei der Festlegung von Standardprofilen, etwa im Rahmen der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8, zu beachten sind.

Die Messungen wurden von der Universität Hamburg (Arbeitsgruppe Prof. B. Brümmer; Dr. G. Peters, I. Lange) ausgewertet und als Datensätze bereitgestellt. Die Daten (Excel-Dateien und Abschlußbericht) werden auf der Webseite [www.janicke.de](http://www.janicke.de) zur Verfügung gestellt.

## Abstract

Meteorological boundary layer profiles, like the current standard profiles of the dispersion models LASAT and AUSTAL2000, are compared with measurements. Several aspects are discussed relevant for the setup of standard profiles, for example in connection with guideline VDI 3783 Part 8.

The measurements have been evaluated and prepared as data sets by the University of Hamburg (group of Prof. B. Brümmer; Dr. G. Peters, I. Lange). The data (Excel files and report) are provided on the website [www.janicke.de](http://www.janicke.de).



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Überprüfung der theoretischen Ansätze</b>	<b>5</b>
2.1	Windprofil . . . . .	5
2.1.1	Vergleich mit den Hamburger Meßdaten . . . . .	5
2.1.2	Semi-analytische Bestimmung des Windprofils . . . . .	6
2.1.3	Vergleich mit den KfK-Meßdaten . . . . .	14
2.2	Turbulenzprofil . . . . .	17
2.2.1	Turbulenzprofile nach VDI 3783 Blatt 8 . . . . .	17
2.2.2	Vergleich mit den Hamburger Meßdaten . . . . .	18
2.3	Temperaturprofil . . . . .	24
2.4	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	25
2.4.1	Parametrisierung des Windprofils . . . . .	25
2.4.2	Parametrisierung des Turbulenzprofils . . . . .	28
2.4.3	Parametrisierung des Temperaturprofils . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Weitere Aspekte für den praktischen Einsatz</b>	<b>31</b>
3.1	Art des Ausbreitungsmodells . . . . .	31
3.2	Abhängigkeit von der geographischen Lage . . . . .	31
3.3	Abhängigkeit von der Mittelungszeit . . . . .	31
3.4	Verdrängungshöhe . . . . .	32
3.5	Übertragung der Monin-Obukhov-Länge auf einen anderen Standort . . . . .	32
3.6	Ergänzende Festlegungen . . . . .	33
	<b>Anhänge</b>	<b>34</b>
<b>A</b>	<b>Einfach modifiziertes Grenzschichtmodell nach VDI 3783 Blatt 8</b>	<b>35</b>
A.1	Anpassung der Turbulenzparametrisierung . . . . .	35
A.2	Auswirkung auf die Grenzschichtprofile . . . . .	35
A.3	Auswirkung auf Immissionsprognosen . . . . .	36
A.3.1	Einzelfall . . . . .	36
A.3.2	Ausbreitungsklassenstatistik . . . . .	41
A.3.3	Validierungstests . . . . .	41
<b>B</b>	<b>KfK-Messungen zur Windrichtungs-drehung</b>	<b>52</b>
<b>C</b>	<b>Fahnenbreite und horizontaler Diffusionskoeffizient</b>	<b>59</b>
<b>D</b>	<b>Geschwindigkeitsfluktuationen und Mittelungszeit</b>	<b>60</b>
<b>E</b>	<b>Übertragung der Monin-Obukhov-Länge</b>	<b>65</b>
<b>F</b>	<b>Berechnung der Geschwindigkeitsfluktuationen</b>	<b>66</b>
<b>G</b>	<b>Validierungstests mit dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT</b>	<b>68</b>

# 1 Einleitung

Der atmosphärische Transport von Schadstoffen wird durch meteorologische Parameter bestimmt: Für eine passive Freisetzung ist die Konzentration umgekehrt proportional zur Windgeschwindigkeit; der horizontale Verlauf der Fahnenachse hängt von der Windrichtung ab; die Breite der Konzentrationsfahne hängt im Nahbereich des Emittenten von den Fluktuationen der Windgeschwindigkeit und im Fernbereich vom Austauschkoefizienten ab (Taylor-Theorem).

Wird über einen längeren Zeitraum gemittelt, etwa bei der Betrachtung von Jahresmittelwerten, überlagern einzelne Konzentrationsfahnen. Dadurch ist der Einfluß von Fahnenbreite und Fahnenrichtung auf die mittlere Konzentration an einem Aufpunkt nicht so groß wie für kürzere Zeiträume, etwa bei der Betrachtung von Stundenmitteln oder Geruchsstundenhäufigkeiten.

Für die Modellierung des atmosphärischen Transportes mit Hilfe von Ausbreitungsrechnungen müssen die meteorologischen Parameter und ihre Vertikalprofile vorgegeben werden. Eine genaue Beschreibung läßt sich im allgemeinen nur durch Kenntnis der aktuellen (gemessenen) Vertikalprofile erreichen. Diese sind jedoch oft nicht verfügbar oder liegen nur in Form von Messungen über beschränkte Zeiträume vor. Daher wird in Ausbreitungsrechnungen alternativ ein sogenanntes eindimensionales Grenzschichtmodell eingesetzt, das mit Hilfe eines Satzes von verfügbaren, einfach zu bestimmenden meteorologischen Meßgrößen (z.B. der Windgeschwindigkeit und Windrichtung an einem einzelnen Meßort sowie einer Charakterisierung der atmosphärischen Schichtungsstabilität) die Vertikalprofile aller relevanten Parameter durch analytische Ansätze beschreibt. Für Standardanwendungen wird das Grenzschichtmodell in der Regel per Konvention so festgelegt, daß es im Mittel über alle Anwendungsfälle eine möglichst realitätsnahe oder, im Sinne des Immissionsschutzes, eine konservative Immissionsprognose liefert.

In einem eindimensionalen Grenzschichtmodell werden meist die Vertikalprofile von Windgeschwindigkeit  $u(z)$ , Windrichtung  $r(z)$ , Fluktuationen der Windgeschwindigkeit  $\sigma(z)$  und Austauschkoefizienten  $K(z)$  angegeben, die beiden letzten Größen getrennt für die drei Hauptrichtungen – entlang der Windrichtung, horizontal senkrecht dazu, vertikal – mit den entsprechenden Indizes  $u$ ,  $v$  und  $w$ . Alternativ zum Austauschkoefizienten wird oft auch die Lagrange-Korrelationszeit  $T(z)$  vorgegeben, wobei der Zusammenhang  $T_\alpha = K_\alpha/\sigma_\alpha^2$  mit  $\alpha = u, v, w$  gilt.<sup>1</sup>

Für den anlagenbezogenen Immissionsschutz legt die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) im Anhang 3 ein Grenzschichtmodell fest, das im wesentlichen auf den Spezifikationen der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 beruht.<sup>2</sup> In der Anwendung im Rahmen von Ausbreitungsrechnungen mit den Modellen AUSTAL2000<sup>3</sup> und LASAT<sup>4</sup> haben sich in Einzelfällen Probleme gezeigt, die auf die aktuellen Parametrisierungen der Richtlinie VDI 3783

<sup>1</sup>Streng genommen handelt es sich hierbei um tensorielle Größen und die Beziehung gilt nur, wenn die Tensoren Diagonalform haben.

<sup>2</sup>• TA LUFT (2002): *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24.06.2002*. GMBI. 2002, Heft 25-29, S. 511-605. [http://www.umweltbundesamt.de/luft/messeinrichtungen/TALuft\\_020724.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/luft/messeinrichtungen/TALuft_020724.pdf). • VDI 3783 BLATT 8 (2002): *Umweltmeteorologie; Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle*. Beuth Verlag, Berlin.

<sup>3</sup>Siehe <http://www.austal2000.de>.

<sup>4</sup>Siehe <http://www.janicke.de>.



Blatt 8 zurückgeführt werden konnten. Das war der Anlaß, die zur Zeit gebräuchlichen Parametrisierungen erneut anhand von aktuellen meteorologischen Meßdaten zu überprüfen.

Als meteorologische Vergleichsdaten wurden umfangreiche Datensätze der Universität Hamburg eingesetzt. Sie wurden in langjährigen Messungen am Wettermast (Fernsehturm) Hamburg erhoben und beinhalten zeitaufgelöste Wind- und Turbulenzmessungen von dreidimensionalen Ultraschall-Anemometern in den Meßhöhen 10 m, 50 m, 110 m, 175 m und 250 m über Grund. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Daten von Experten der Arbeitsgruppe Prof. B. Brümmer (Herr Dr. G. Peters, Herr I. Lange) ausgewertet und bereitgestellt. Die Arbeiten sind in einem eigenen Bericht der Universität Hamburg dokumentiert<sup>5</sup> und die ausgewerteten Daten stehen in Form von Excel-Dateien zur Verfügung.

Abschnitt 2 beschreibt die Vergleiche zwischen den theoretischen Profilansätzen und den Meßdaten. Neben dem Grenzschichtmodell der TA Luft wird das Standard-Grenzschichtmodell von LASAT betrachtet,<sup>6</sup> das ebenfalls seit vielen Jahren im praktischen Einsatz ist. Abschnitt 3 geht auf weitere Aspekte ein, die für den Einsatz eines Grenzschichtmodells in Ausbreitungsmodellen von Bedeutung sind. Die Anhänge A bis G enthalten Zusatzuntersuchungen zum Thema.

---

<sup>5</sup> LANGE, I., PETERS, G. (2011): *Wettermast Hamburg – Datenauswertungen zur meßwertgestützten Turbulenzparametrisierung in Ausbreitungsmodellen*. KlimaCampus Hamburg / Universität Hamburg. Im Auftrag des LANUV NRW (Unterauftragnehmer des Ing.-Büros Janicke), BVB Erstellungsvertrag 6765/41-6001048.

<sup>6</sup> JANICKE, L., JANICKE, U. (2000): *Vorschlag eines meteorologischen Grenzschichtmodells für Lagrangesche Ausbreitungsmodelle*. Berichte zur Umweltphysik Nummer 2, Auflage 1, Ingenieurbüro Janicke, ISSN 1439-8222.

## 2 Überprüfung der theoretischen Ansätze

### 2.1 Windprofil

#### 2.1.1 Vergleich mit den Hamburger Meßdaten

Die Meßdaten der Universität Hamburg sind in Windrichtungssektoren und Stabilitätsgruppen unterteilt, um möglichst detaillierte Vergleiche zur ermöglichen:

- Die Windrichtung wurde in die Richtungssektoren A (Wind aus östlicher Richtung), B (Wind aus südlicher Richtung) und C (Wind aus westlicher Richtung) unterteilt. Der vierte Richtungssektor wurde aus den Untersuchungen ausgeklammert, da hier die Messungen teilweise durch den windaufwärtsgelegenen Mast beeinflusst sind.
- Die Meßdaten wurden in Stundenmittel umgewandelt und es wurden Mittelwerte für folgende Stabilitätsgruppen gebildet (die angegebenen Symbole und Farben werden in den folgenden Abbildungen verwendet):

Gruppe	Beschreibung	Symbol	Farbe
I-N	Sehr stabil	Gefülltes Dreieck	Dunkelblau
II-N	Stabil, kleine Mischungsschichthöhe	Gefülltes Quadrat	Blau
II-M	Stabil, mittlere Mischungsschichthöhe	Offenes Quadrat	Hellblau
III/1-M	Stabil bis indifferent, mittlere Mischungsschichthöhe	Gefüllter Kreis	Grün
III/1-H	Stabil bis indifferent, große Mischungsschichthöhe	Offener Kreis	Hellgrün
III/2-H	Indifferent bis labil, große Mischungsschichthöhe	Offener Kreis	Braun
IV-H	Labil, große Mischungsschichthöhe	Offener Kreis	Rot
V-H	Sehr labil, große Mischungsschichthöhe	Gefüllte Raute	Dunkelrot

Bild 1 zeigt den Vergleich der gemessenen Profile von Windgeschwindigkeit und Windrichtung (relativ zum Wert in 250 m Höhe) mit den theoretischen Profilen nach VDI 3783 Blatt 8 bzw. TA Luft. Als Eingangsgrößen für die theoretischen Profile wurde für jeden Richtungssektor die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  in 10 m Höhe, die daraus abgeleitete Rauigkeitslänge  $z_0$  (zwischen 0.2 m und 0.5 m) und die aus der Rauigkeitslänge und Stabilitätsgruppe nach TA Luft abgeleitete Monin-Obukhov-Länge und Mischungsschichthöhe verwendet:

- Während in dem theoretischen Ansatz das Windprofil bei indifferenter Schichtung logarithmisch ist, zeigen die gemessenen Profile eine abweichende Form. Das ist plausibel, da sich in der theoretischen Herleitung ein logarithmisches Profil nur bei Vernachlässigung der Windrichtungsrotation ergibt.
- In 10 m Höhe wird für indifferente Schichtung die gemessene Windgeschwindigkeit genau getroffen, denn so wurde die Rauigkeitslänge festgelegt.
- In größerer Höhe ist die theoretische Windgeschwindigkeit für labile und indifferente Schichtung niedriger als die gemessene.



- Für stabile Schichtung ist die modellierte Windrichtungsrotation vergleichbar mit der gemessenen. In den untersten 100 Höhenmetern werden mittlere Windrichtungsrotationen von mehr als 30 Grad beobachtet.
- Für labile Schichtung ergeben sich aus den Meßdaten systematische und zum Teil erhebliche mittlere Windrichtungsrotationen, während der theoretische Ansatz für labile Schichtung keine Richtungsrotation vorsieht.

Insbesondere der letzte Befund sticht ins Auge. Hierzu wurde untersucht, wie stark die gemessenen Windrichtungsrotationen innerhalb einer Stabilitätsgruppe streuen. Das Ergebnis ist in Bild 2 dargestellt. Man erkennt, daß besonders für labile Schichtung (siehe die unteren beiden Teilbilder) die Streuung der Werte so groß ist, daß ein Mittelwert zwar formal ausgewiesen, ihm aber keine signifikante Bedeutung mehr zugewiesen werden kann. Einen ähnlichen Befund zeigen die Auswertungen der KfK-Meßdaten (siehe weiter unten).

### 2.1.2 Semi-analytische Bestimmung des Windprofils

Bei Berücksichtigung der Windrichtungsrotation kann das Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit im allgemeinen nicht mehr in einfacher analytischer Form angegeben werden. Im folgenden wird eine semi-analytische Herleitung präsentiert.

Die Bewegung eines Volumenelementes in der atmosphärischen Strömung wird ohne Dissipation (Reibung) durch die Eulersche Gleichung beschrieben:

$$\rho \frac{d}{dt} \mathbf{v} = -\text{grad} p \quad (1)$$

Hierbei ist  $\rho$  die Dichte der Luft,  $\mathbf{v}$  der Geschwindigkeitsvektor und  $p$  der Luftdruck.

In einem erdfesten Koordinatensystem (Rotationsfrequenz  $\Omega$ ), dessen  $z$ -Achse senkrecht auf der Erdoberfläche in der geographischen Breite  $\varphi$  steht und dessen  $x$ -Achse nach Osten und  $y$ -Achse nach Norden zeigt, lauten die horizontalen Bewegungsgleichungen für den Vektor  $\mathbf{v} = (u, v, w)$  nach Ersetzen der absoluten Zeitableitung durch die partiellen Ableitungen:<sup>7</sup>

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - 2\Omega(w \cos \varphi - v \sin \varphi) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega u \sin \varphi \quad (3)$$

<sup>7</sup>Siehe z.B. SEINFELD, J.H., PANDIS, S.N.: *Atmospheric Chemistry and Physics*. Wiley & Sons, New York, 2006. Effekte der Zentrifugalkraft sind hier vernachlässigt bzw. es wird angenommen, daß die Koordinatenachse von  $z$  senkrecht auf der Geopotentialfläche steht.



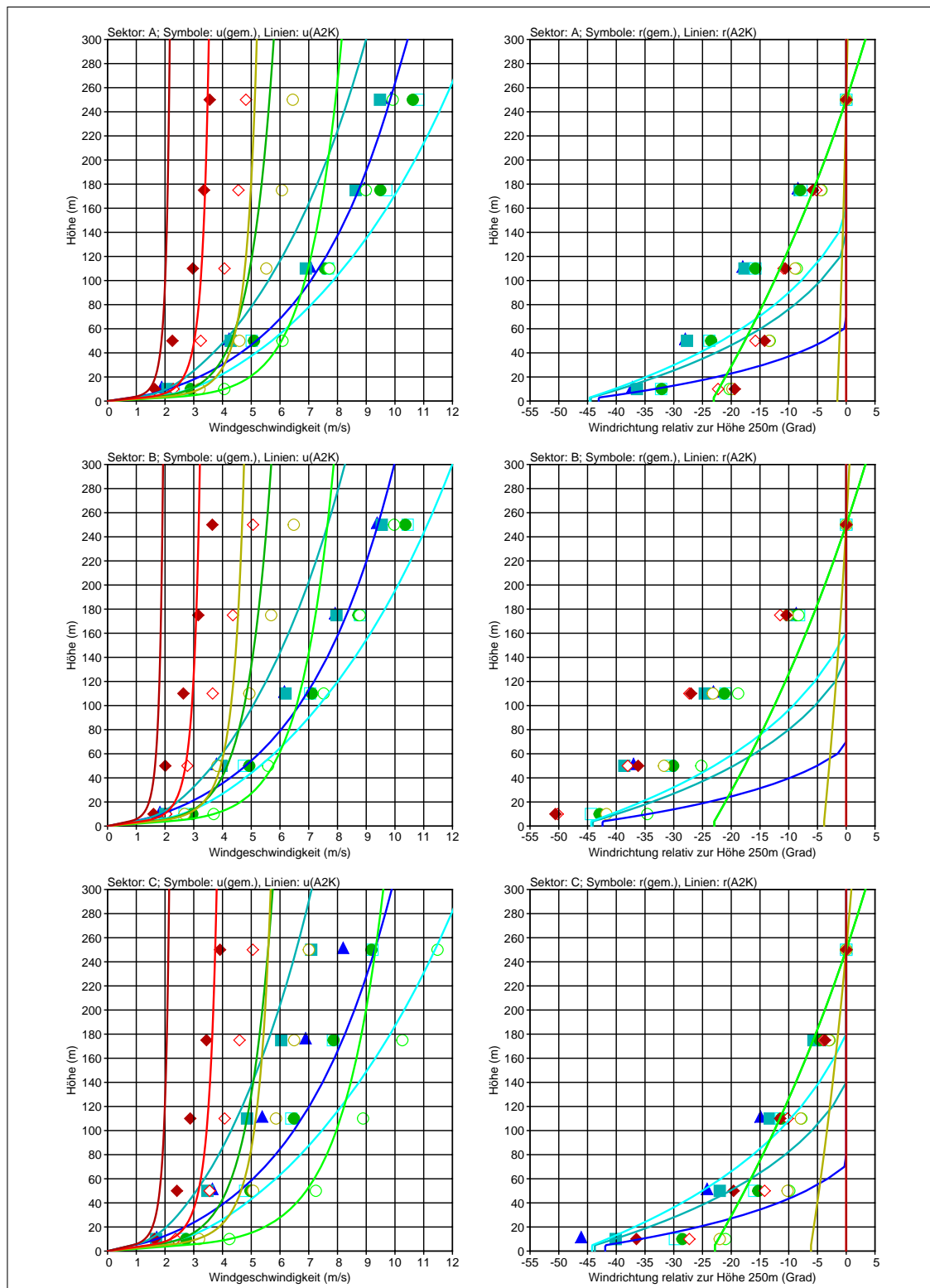


BILD 1: Profile von Windgeschwindigkeit und Windrichtung nach den Hamburger Meßdaten (Symbole, Mittelwerte der Stundenmittel innerhalb einer Stabilitätsgruppe) und nach VDI 3783 Blatt 8 bzw. TA Luft (Linien).

Die Bilder zeigen die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit (links) und der relativen Windrichtung (rechts) für Sektor A (oben), B (Mitte) und C (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse für die acht Stabilitätsgruppen (blau: stabil, grün und braun: indifferent, rot: labil).

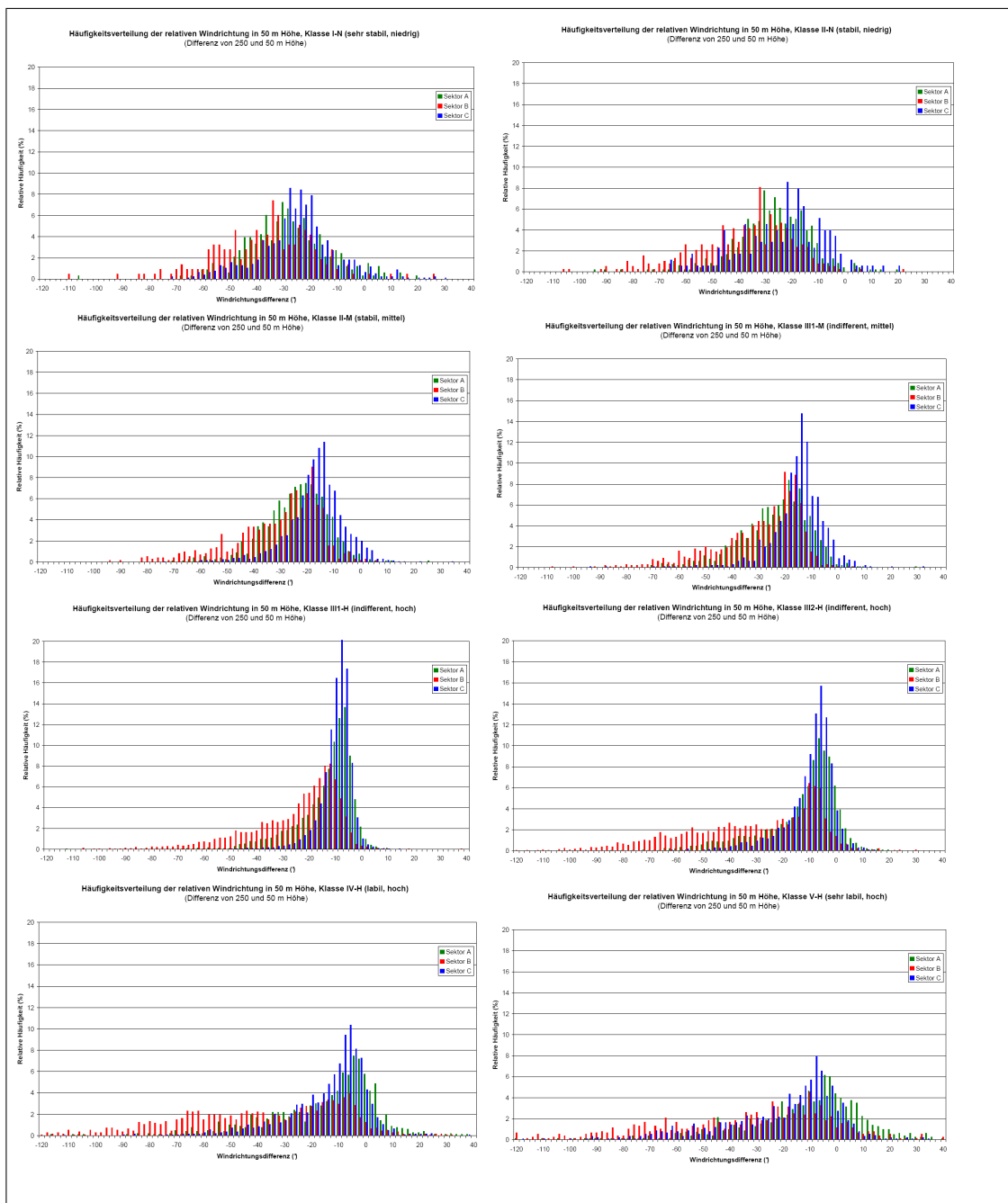


BILD 2: Streuung der Windrichtungsrotation in den Hamburger Meßdaten für die acht Stabilitätsgruppen (Grafiken aus dem Abschlußbericht der Universität Hamburg). Auf der horizontalen Achse ist jeweils die Windrichtungsdifferenz in Grad zwischen 250 m und 50 m Höhe aufgetragen, auf der vertikalen Achse die relative Häufigkeit in Prozent. Grün: Sektor A. Rot: Sektor B. Blau: Sektor C. Zeilenweise von oben nach unten: Klasse I-N, II-N, II-M, III/1-M, III/1-H, III/2-H, IV-H, V-H.



Für eine stationäre, homogene Strömung folgt:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv \quad (4)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu \quad (5)$$

Hierbei ist  $f = 2\Omega \sin \varphi$  der Coriolis-Parameter (in unseren Breiten ist  $f \approx 10^{-4} \text{ 1/s}$ ). Diese Gleichungen definieren den geostrophischen Wind mit den Komponenten

$$u_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (6)$$

$$v_g = \frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

Tatsächlich wirken in Bodennähe Reibungskräfte, die in der Bewegungsgleichung über einen Dissipationsterm mit dem Austauschkoefizienten  $K$  berücksichtigt werden können:<sup>8</sup>

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (9)$$

Die Ableitung nach  $z$  wird im folgenden vereinfacht durch einen Hochstrich ausgedrückt und die Druckgradienten werden durch die Komponenten des geostrophischen Windes ersetzt:

$$0 = -f(v_g - v) + (Ku')' \quad (10)$$

$$0 = f(u_g - u) + (Kv')' \quad (11)$$

Vernachlässigt man den Einfluß der Coriolis-Kraft ( $f \rightarrow 0$ ) und dreht das Koordinatensystem so, daß  $v = 0$  ist, dann gilt

$$0 = (Ku')' \rightarrow Ku' = \text{const.} \quad (12)$$

Hieraus kann das bekannte logarithmische Windprofil abgeleitet werden.

<sup>8</sup>Streng genommen muß – besonders bei labiler Schichtung – zwischen dem Austauschkoefizienten für eine vektorielle Größe wie dem Wind und dem Austauschkoefizienten für eine skalare Größe wie der Konzentration unterschieden werden. Für die folgende Diskussion wird der Unterschied vernachlässigt.



Wird die Windrichtungsrotation nicht vernachlässigt, so läßt sich für  $K(z) = \text{const.}$  und die Randbedingungen  $u(0) = 0, v(0) = 0, u(z \rightarrow \infty) = u_g, v(z \rightarrow \infty) = 0$  eine analytische Lösung für das Gleichungssystem (10) und (11) angeben, hier für  $f > 0$  (Nordhalbkugel):

$$u(z) = u_g (1 - e^{-bz} \cos(bz)) \quad (13)$$

$$v(z) = u_g e^{-bz} \sin(bz) \quad (14)$$

$$b = \sqrt{\frac{f}{2K}} \quad (15)$$

Der vorgegebene geostrophische Wind wird bei etwa  $z = \pi/b$  angenommen, d.h.  $u(\pi/b) \approx u_g$  und  $v(\pi/b) = 0$ . Für  $z \rightarrow 0$  ist  $u = u_g bz$  und  $v = u_g bz$ , der Wind ist in Bodennähe also gegenüber dem geostrophischen Wind um 45 Grad nach links gedreht.<sup>9</sup>

Für ein allgemeines  $K(z)$  läßt sich das Gleichungssystem (10) und (11) numerisch zum Beispiel mit Hilfe des Runge-Kutta-Verfahrens lösen. Das Gleichungssystem wird erweitert auf die Funktionen

$$y_0 = Ku' \quad (16)$$

$$y_1 = Kv' \quad (17)$$

$$y_2 = u \quad (18)$$

$$y_3 = v \quad (19)$$

mit den Ableitungen

$$y_0' = -f(y_3 - v_g) \quad (20)$$

$$y_1' = f(y_2 - u_g) \quad (21)$$

$$y_2' = y_0/K \quad (22)$$

$$y_3' = y_1/K \quad (23)$$

und dem Austauschoeffizienten  $K(z; z_0, u_*, L_M, h_m)$ .

Ein Problem sind die Randbedingungen: Für die Integration werden die Anfangswerte  $y_i(0)$  benötigt. Für die Geschwindigkeitskomponenten  $y_2$  (also  $u$ ) und  $y_3$  (also  $v$ ) ist das der Wert 0. Dagegen müssen  $y_0(0)$  und  $y_1(0)$  so gewählt werden, daß in einer vorgegebenen Höhe  $h$  (z.B. die Mischungsschichthöhe) eine vorgegebene Windgeschwindigkeit und Windrichtung (geostrophischer Wind mit den Komponenten  $u_g$  und  $v_g$ ) angenommen wird. Dies läßt sich als Minimierungsproblem formulieren:

$$f(h; y_0(0), y_1(0)) = [u(h; y_0(0), y_1(0)) - u_g]^2 + [v(h; y_0(0), y_1(0)) - v_g]^2 \quad (24)$$

$$\stackrel{!}{=} \min. \quad (25)$$

<sup>9</sup>Für  $f < 0$  (Südhalbkugel) ist  $b = -\sqrt{-f/(2K)}$ .

Das Minimum der Funktion  $f$  kann numerisch bestimmt werden (z.B. mit der Methode der konjugierten Richtungen nach Powell), wobei jeder Funktionsaufruf eine numerische Integration des Gleichungssystems (10) und (11) erfordert. Für den Spezialfall eines vertikal konstanten Austauschkoefizienten stimmen numerische and analytische Lösung exakt überein.

Die numerisch bestimmten Vertikalprofile von Windgeschwindigkeit und Windrichtung können mit den Hamburger Meßdaten verglichen werden. Randbedingung ist die gemessene Windgeschwindigkeit in 250 m Höhe und es wird der aus den Meßdaten abgeleitete Austauschkoefizient verwendet.<sup>10</sup>

Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt. Die gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Windprofilen zeigt im wesentlichen, daß die Herleitung des Austauschkoefizienten aus den Meßwerten konsistent ist mit der Theorie, aus dem das theoretische Geschwindigkeitsprofil abgeleitet wurde. Für die Windrichtungsdrehung ergeben sich jedoch systematisch kleinere Werte als gemessen wurden. Eine Ursache ist eventuell die geringe Anzahl der Stützpunkte für den hergeleiteten Austauschkoefizienten, zwischen denen lediglich linear interpoliert wurde.

Als Austauschkoefizient kann auch der theoretische Ansatz nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 verwendet werden. Bild 4 zeigt die Ergebnisse. Die Übereinstimmung der Geschwindigkeitsprofile ist hier weniger gut. Für stabile Schichtung wird bodennah die gemessene Windrichtungsdrehung recht gut wiedergegeben, in größerer Höhe ist sie systematisch zu hoch. Für labile Schichtung ergibt sich praktisch keine Windrichtungsdrehung (im Gegensatz zu den Meßwerten), dies entspricht dem analytischen Ansatz nach TA Luft.

Die Windrichtungsdrehung in den Hamburger Meßdaten für labile Schichtung kann mit anderen Datensätzen verglichen werden:

- Meßdaten von Cabauw zeigen für sehr labile Schichtung eine Windrichtungsdrehung in den untersten 200 Höhenmetern von 10 Grad.
- Meßdaten der DWD-Station Lindenberg zeigen für labile Schichtung Windrichtungsdrehungen in den untersten 100 Höhenmetern zwischen 2 Grad (hohe Windgeschwindigkeit) und 28 Grad (niedrige Windgeschwindigkeit).<sup>11</sup>
- Die KfK-Meßdaten (siehe nächster Abschnitt) zeigen im Mittel keine signifikante Windrichtungsdrehung für labile Schichtung, die Streuung der Einzelwerte ist groß.

<sup>10</sup>Unterhalb der untersten Quasi-Meßhöhe (Mittelwert zwischen zwei benachbarten Meßhöhen) von 30 m wurde auf den Wert 0 bei  $z = 0$  linear interpoliert, unterhalb von  $6z_0$  wurde das Profil konstant gesetzt, oberhalb der obersten Quasi-Meßhöhe von 210 m wurde linear fortgesetzt, zwischen den Quasi-Meßhöhen wurde linear interpoliert.

<sup>11</sup>F. Beyrich (DWD), private Mitteilung.

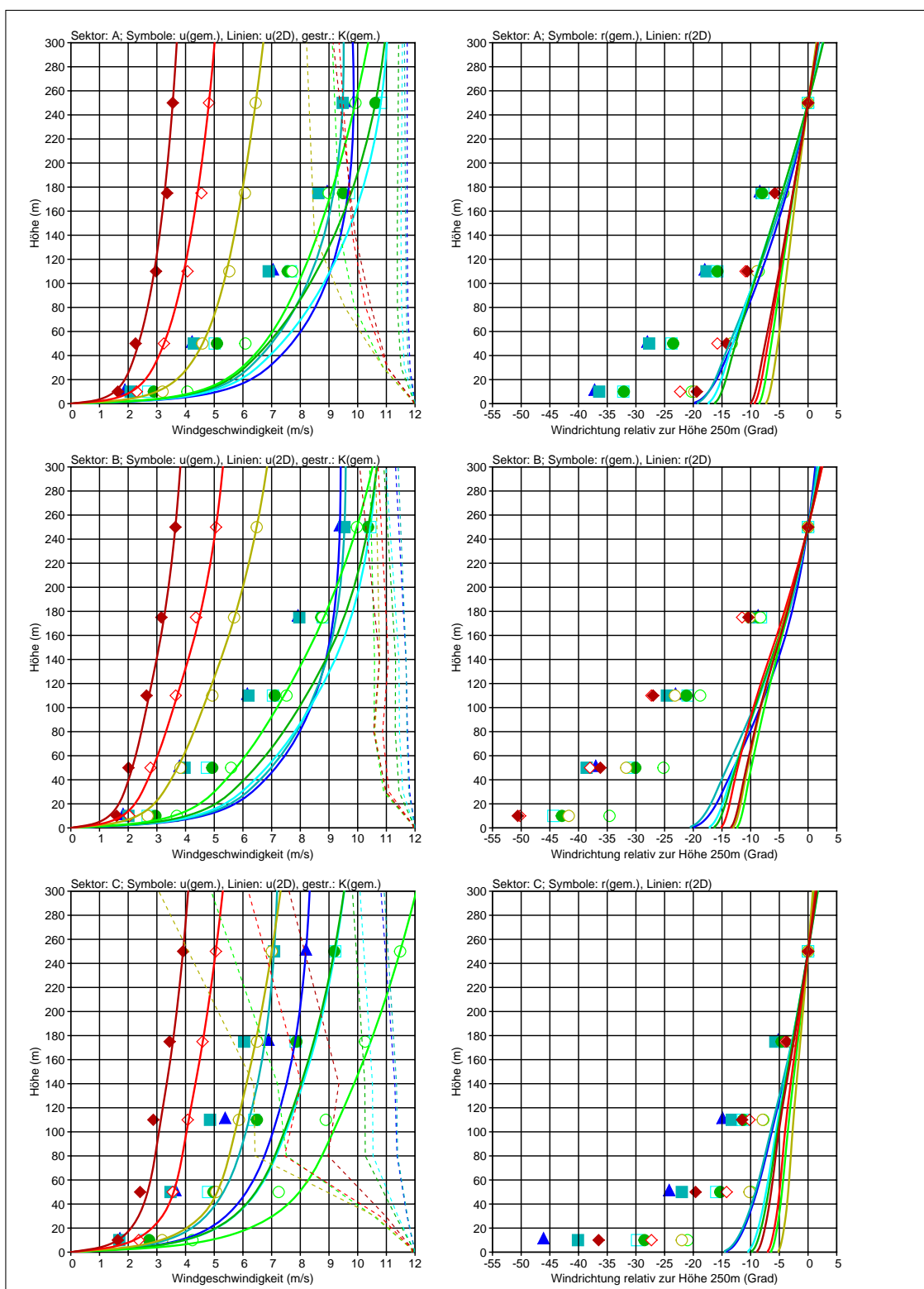


BILD 3: Vergleich der Hamburger Meßdaten mit einer numerischen Lösung der eindimensionalen Transportgleichungen, wobei der Austauschkoefizient  $K$  aus den Meßwerten abgeschätzt wurde. Die Bilder zeigen die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit (links) und der relativen Windrichtung (rechts) für Sektor A (oben), B (Mitte) und C (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse für 8 Stabilitätsgruppen (blau: stabil, grün und braun: indifferent, rot: labil). Der Verlauf von  $K$  ist in Form der gestrichelten Linien im linken Bild angedeutet (Wert 0 am rechten Bildrand).

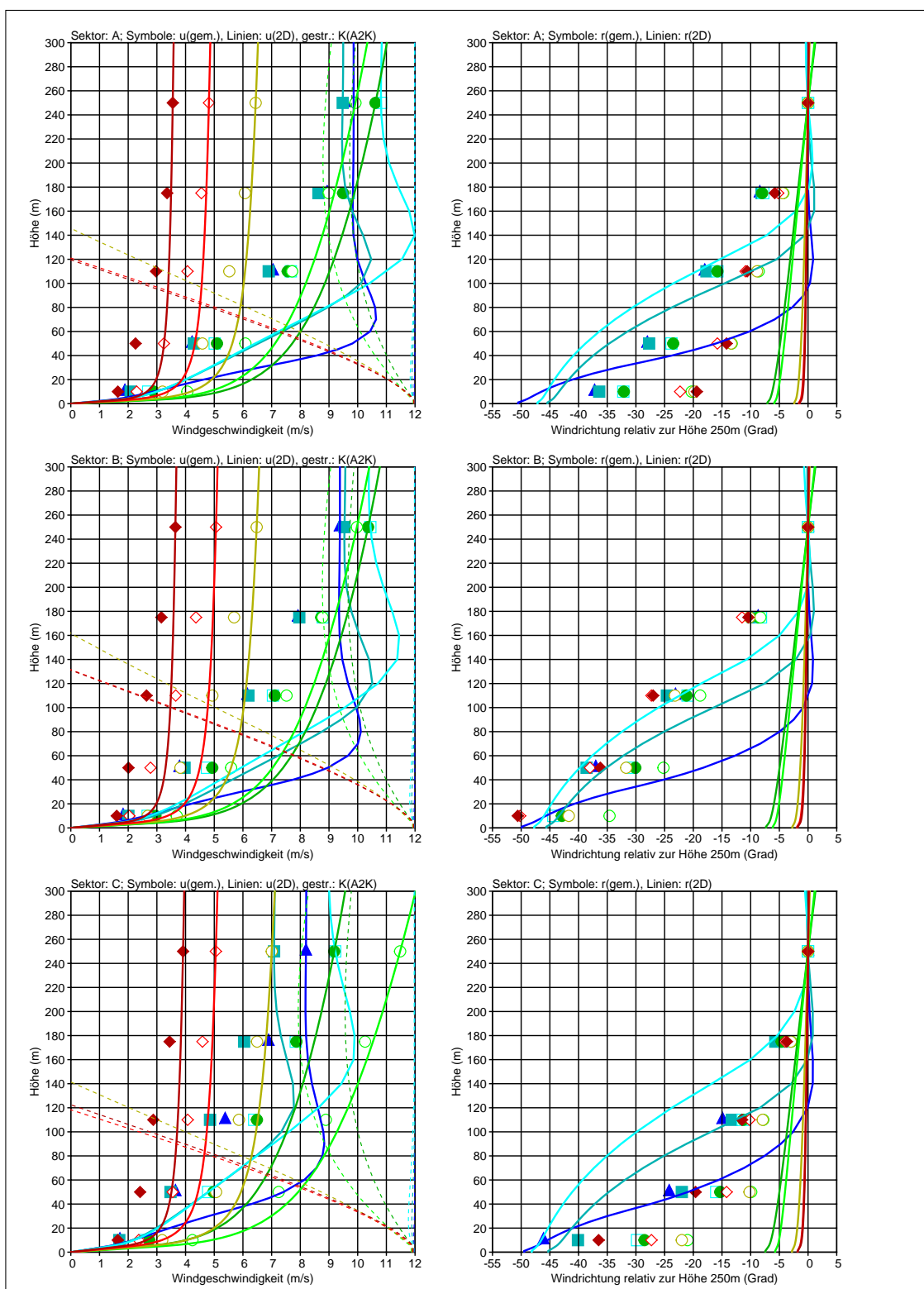


BILD 4: Vergleich der Hamburger Meßdaten und der numerischen Lösung der eindimensionalen Transportgleichungen, wobei der Austauschkoefizient  $K$  nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 festgelegt wurde. Die Bilder zeigen die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit (links) und der relativen Windrichtung (rechts) für Sektor A (oben), B (Mitte) und C (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse für 8 Stabilitätsgruppen (blau: stabil, grün und braun: indifferent, rot: labil). Der Verlauf von  $K$  ist als gestrichelte Linie im linken Bild angedeutet (Wert 0 am rechten Bildrand).

### 2.1.3 Vergleich mit den KfK-Meßdaten

In den siebziger Jahren wurden am Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) eine Reihe von Ausbreitungsexperimenten durchgeführt.<sup>12</sup> Von einem meteorologischen Turm aus wurden Spurengase emittiert, deren bodennahe Konzentrationsverteilungen an verschiedenen Monitorpunkten in der Umgebung gemessen wurden. Gleichzeitig wurde über SODAR- und Windmessungen die meteorologische Situation bestimmt.

Die Messungen fanden auf dem KfK-Gelände (Gebäude bis etwa 30 m Höhe) in ebener Umgebung (Wald, Wiesen) statt. Das Gelände wurde von THOMAS ET AL. aufgrund von Windprofilmessungen mit einer Rauigkeitslänge von 1.5 m charakterisiert.

Die Windgeschwindigkeit  $u(z)$ , die Windrichtung  $r(z)$ , die horizontale und vertikale Richtungsstreuung (in Grad)  $\sigma_{\theta}(z)$  bzw.  $\sigma_{\varphi}(z)$  und die Temperatur  $T(z)$  wurden am meteorologischen Turm als 10-Minuten-Mittel in folgenden Höhen gemessen:

	2 m	30 m	40 m	60 m	100 m	160 m	200 m
$u(z)$			x	x	x	x	x
$r(z)$			x	x	x	x	x
$\sigma_{\theta,\varphi}(z)$			x		x		
$T(z)$	x	x		x	x	x	

Zusätzlich wurde die Strahlungsbilanz am Erdboden in 1.5 m Höhe bestimmt.

Es lagen Datensätze für 22 Meßperioden zwischen den Jahren 1974 und 1980 vor. Jede Meßperiode umfaßt den Zeitraum von 5 Stunden. Die Meßdaten wurden bezüglich Windrichtung (relativ zur Windrichtung in 200 m Höhe) und Charakterisierung der atmosphärischen Schichtung ausgewertet. Es wurden die gemessenen 10-Minuten-Mittel und die daraus abgeleiteten, aufeinanderfolgenden Stundenmittel betrachtet.

Zur Bestimmung der Stundenmittel wurden die Quadrate der Geschwindigkeitsfluktuationen gemittelt. Sie wurden aus den Meßwerten (in Grad) über die Beziehungen  $\sigma_v(z) = ku(z)\sigma_{\theta}$  und  $\sigma_w(z) = ku(z)\sigma_{\varphi}$  mit  $k = (\pi/180 \text{ Grad})$  hergeleitet. Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden vektoriell, Temperatur und Strahlungsbilanz skalar gemittelt.

Die Schichtungsstabilität wurde nach KTA 1508 (Kategorien A bis F) anhand folgender Klassierungen bestimmt:

1. Strahlungsbilanz am Erdboden und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Störniveau.
2. Temperaturgradient zwischen 30 m und 100 m Höhe und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Störniveau.

<sup>12</sup> THOMAS, P., DILGER, H., HÜBSCHMANN, W., SCHÜTTELKOPF, H., VOGT, S. (1981): *Experimental determination of the atmospheric dispersion parameters at the Karlsruhe nuclear research center for 60 m and 100 m emission heights*. Kernforschungszentrum Karlsruhe KfK 3090, ISSN 0303-4003.



3. Horizontale Richtungsstreuung.
4. Vertikale Geschwindigkeitsfluktuationen und Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe.

Die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Störniveau wurde aus dem Meßwert in 40 m Höhe abgeschätzt.<sup>13</sup>

Für jede Meßperiode von 5 Stunden wurden die Vertikalprofile der relativen Windrichtung (bezogen auf den Wert in 200 m Höhe) für die 30 10-Minutenmittel und die 5 Stundenmittel grafisch dargestellt. Die nach den 4 Klassierungen bestimmten Stabilitätskategorien wurden über die Farbgebung der Verbindungslinien zwischen den Meßhöhen kodiert.

Höhenintervall	Klassierung
40 m bis 60 m	Strahlungsbilanz, $K_{Sb}$
60 m bis 100 m	Temperaturgradient, $K_{Tg}$
100 m bis 160 m	Horizontale Richtungsstreuung, $K_{St}$
160 m bis 200 m	Vertikale Geschwindigkeitsfluktuationen, $K_{Sw}$

Farbe	Kategorie
Violett	A (sehr labil)
Rot	B (labil)
Gelb	C (labil bis indifferent)
Grün	D (indifferent bis stabil)
Hellblau	E (stabil)
Blau	F (sehr stabil)
Grau	Kategorie nicht bestimmbar

Bild 5 zeigt als Beispiel die Serie der Vertikalprofile der relativen Windrichtung für die Meßperiode V26. Links sind die 10-Minuten-Mittel, rechts die Stundenmittel aufgetragen. Die Breite zwischen zwei Meßintervallen entspricht einer Richtungsänderung von 40 Grad, die vertikale schwarze Linie markiert den Nullpunkt, also die Windrichtung in 200 m Höhe. Die Grafiken aller Meßperioden sind im Anhang B aufgeführt.

Für die Summe der Meßperioden wurde für jede Stabilitätskategorie die Windrichtungsdifferenz zwischen 40 m und 200 m Höhe nach ihrer Häufigkeit sortiert (in Intervallen von 5 Grad) und der jeweilige Mittelwert und die Streuung bestimmt. Bild 6 zeigt das Ergebnis für die 10-Minuten-Mittel, wobei die Stabilitätskategorie einmal nach den vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen (Klassierung  $K_{Sw}$ ) und einmal nach der Strahlungsbilanz (Klassierung  $K_{Sb}$ ) bestimmt wurde. Der vertikale Strich zeigt die Lage des Mittelwertes. Die Ergebnisse für die Stundenmittel sehen ähnlich aus und sind hier nicht aufgeführt.

Die Meßdaten in Anhang B zeigen:

<sup>13</sup>Als  $u_{10} = u(40 \text{ m}) \ln[(10 \text{ m} + d_0 - d_0)/z_0] / \ln[(40 \text{ m} - d_0)/z_0]$  mit  $z_0 = 1.5 \text{ m}$  und  $d_0 = 9.0 \text{ m}$ .

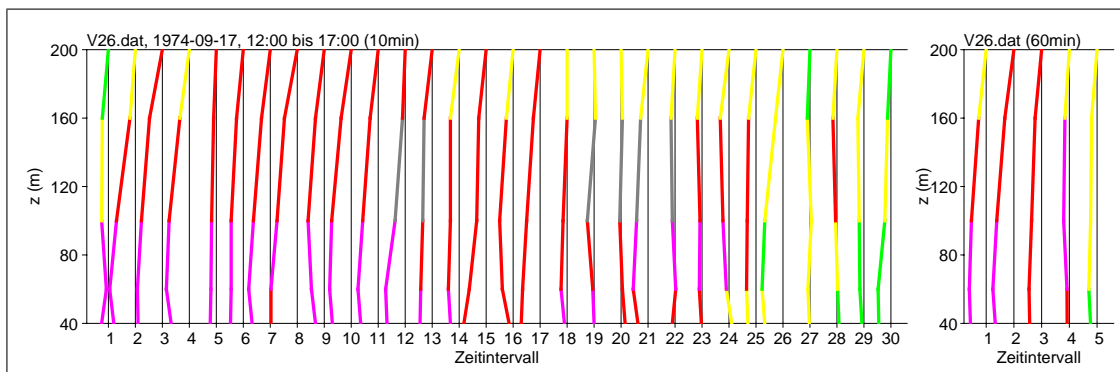


BIld 5: Serie der Vertikalprofile der relativen Windrichtung für die KfK-Meßperiode V26. Links sind die 10-Minuten-Mittel, rechts die Stundenmittel aufgetragen. Die Breite zwischen zwei Meßintervallen entspricht einer Richtungsänderung von 40 Grad, die vertikale schwarze Linie markiert den Nullpunkt, also die Windrichtung in 200 m Höhe. Die Farben der einzelnen Höhensegmente kodieren die nach den verschiedenen KTA-Methoden bestimmte Schichtungsstabilität (rot: labil; gelb und grün: indifferent; blau: stabil).

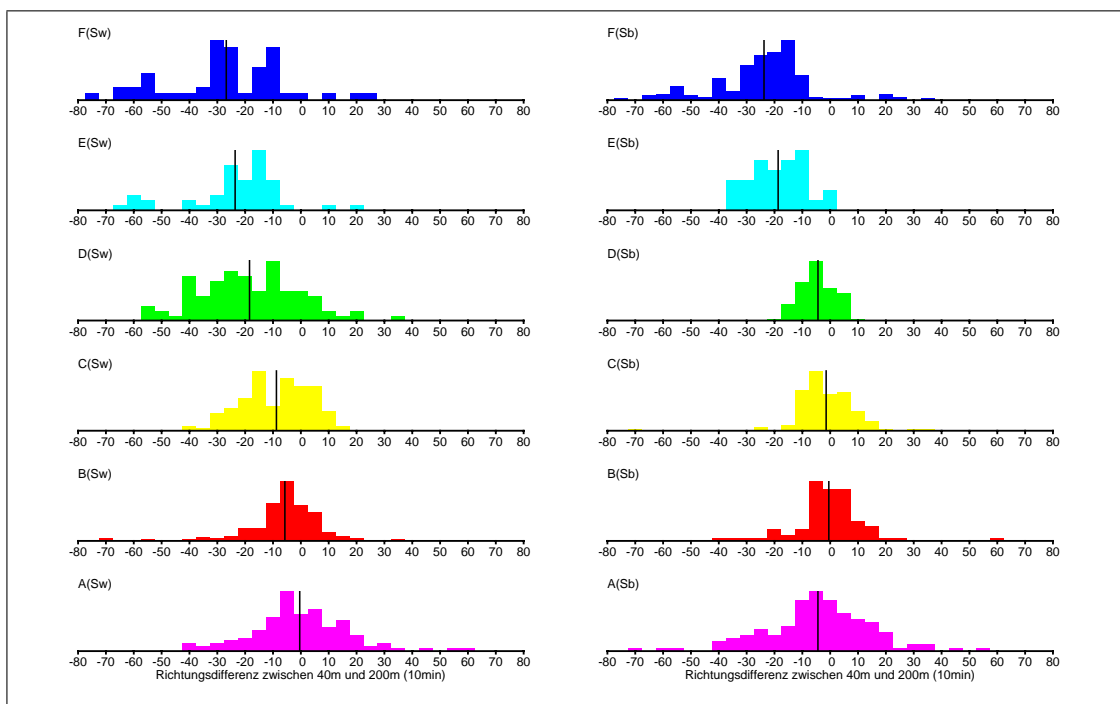


BIld 6: Streuung der Windrichtungsdifferenz zwischen 40 m und 200 m Höhe (10-Minuten-Mittel) als Funktion der Schichtungsstabilität (rot: labil; gelb und grün: indifferent; blau: stabil). Links wurde die KTA-Stabilitätskategorie nach den vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen, rechts nach der Strahlungsbilanz bestimmt. Der vertikale Strich zeigt die Lage des Mittelwertes.



- Die Zeitreihen der 10-Minuten-Profile enthalten vereinzelt extreme Schwankungen, die das entsprechende Stundenmittel deutlich beeinflussen (V35, V40, V50).
- Klassierung  $K_{Sw}$  führt meist auf eine etwas labilere Einstufung als Klassierung  $K_{Sb}$ .
- In einigen Fällen (Ende von V26, V32 und V35, Anfang von V51) scheinen die Messungen die Erwartung zu bestätigen, daß die zeitliche Entwicklung gemäß Klassierung  $K_{Sw}$  der gemäß Klassierung  $K_{Sb}$  hinterherhinkt.
- Die Streuung der Windrichtungsdrehung ist für stabile und labile Schichtung erheblich (von der Größe 20 Grad). Die Streuung für indifferente Schichtung ist deutlich kleiner, insbesondere für den Fall, daß die Stabilitätskategorie nach der Strahlungsbilanz bestimmt wird.
- Die mittlere Windrichtungsdrehung zwischen 40 m und 200 m liegt für labile Schichtung im Bereich 0 bis 5 Grad, für indifferente Schichtung im Bereich 5 bis 20 Grad und für stabile Schichtung im Bereich 20 bis 30 Grad.
- Für labile Schichtung ist die beobachtete Windrichtungsdrehung im Mittel deutlich kleiner als in den Hamburger Daten.
- Die beobachtete mittlere Windrichtungsdrehung ist konsistent mit der aktuellen Parametrisierung nach TA Luft.

## 2.2 Turbulenzprofil

### 2.2.1 Turbulenzprofile nach VDI 3783 Blatt 8

Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 legt die Vertikalprofile der Geschwindigkeitsfluktuationen und der Austauschkoefizienten (bzw. der Lagrange-Korrelationszeiten) als Funktion der Monin-Obukhov-Länge und der Mischungsschichthöhe fest. Im Angang 3 der TA Luft wird die Mischungsschichthöhe für stabile Schichtung (abweichend von der Richtlinie) als Funktion der Schubspannungsgeschwindigkeit und der Monin-Obukhov-Länge vorgegeben.

Die Richtlinie wählt für die horizontalen und den vertikalen Austauschkoefizienten denselben Ansatz ( $F = 2$ ,  $C_0 = 5.7$ , Dissipationsrate  $\epsilon$ ,  $\alpha = u, v, w$ ):

$$K_\alpha(z) = \frac{F\sigma_\alpha^4(z)}{C_0\epsilon(z)} \quad (26)$$

- Aufgrund des Ansatzes (26) ist die vertikale Variation der horizontalen Austauschkoefizienten vergleichbar mit der des vertikalen Austauschkoefizienten.
- Die Profile der Austauschkoefizienten hängen über die 4. Potenz und damit sehr empfindlich von der Parametrisierung des Profils der Geschwindigkeitsfluktuationen ab.

- Für stabile Schichtung nehmen  $K_\alpha$  und  $T_\alpha$  oberhalb etwa 100 m extrem kleine Werte an.

Zur Veranschaulichung ist in Bild 7 der Vertikalverlauf der Profile für drei verschiedene Schichtungsstabilitäten dargestellt.<sup>14</sup> Bild 8 zeigt die Profilwerte für die Höhen 10 m und 100 m als Funktion der inversen Monin-Obukhov-Länge.

- Die Stufe in den Kurven beim Wechsel von Ausbreitungsklasse III/2 nach IV beruht auf dem Wechsel der nach TA Luft angesetzten Mischungsschichthöhe von 800 m auf 1100 m.
- In Bodennähe (durchgezogene Linien) ist die Abhängigkeit von der Schichtungsstabilität wesentlich geringer als in größerer Höhe (gestrichelte Linien), wo die thermischen Terme wirksam werden.
- Deutlich sichtbar ist der starke Höhenabfall für stabile Schichtung. Ursache ist der postulierte Abfall der Geschwindigkeitsfluktuationen mit  $\exp(-z/h_m)$ , der beim Austauschkoefizienten auf einen Abfall mit  $\exp(-4z/h_m)$  führt.

Zum Vergleich sind in den Bildern 9 und 10 die entsprechenden Profile nach dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT dargestellt.

### 2.2.2 Vergleich mit den Hamburger Meßdaten

Bild 11 zeigt die Vertikalprofile der Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_u$  (in Richtung der mittleren Strömung),  $\sigma_v$  (senkrecht hierzu) und  $\sigma_w$  (vertikal) nach den Hamburger Meßdaten (Stundenmittel) und nach VDI 3783 Blatt 8.<sup>15</sup>

- In Bodennähe wird der gemessene Wert von  $\sigma_w$  vom theoretischen Profil recht gut getroffen. Dies war aufgrund der vorangegangenen Analyse der Meßdaten zu erwarten; sie hatte gezeigt, daß der aus dem theoretischen Ansatz (in Bodennähe)  $\sigma_w \approx 1.3u_*$  abgeleitete Wert  $u_* = \sigma_w/1.3$  gut mit der in Bodennähe gemessenen Schubspannungsgeschwindigkeit übereinstimmt.
- In Bodennähe sind die horizontalen Geschwindigkeitsfluktuationen meist etwas größer als nach dem theoretischen Ansatz  $\sigma_v = f_v u_*$  mit  $f_v = 1.8$ . Da die Fahnenbreite in größerer Entfernung proportional zu  $K_v^{1/2}$  und nach VDI 3783 Blatt 8 damit proportional zu  $\sigma_v^2$  ist, hat hier der Wert von  $f_v$  einen deutlichen Einfluß auf die Fahnenbreite.

<sup>14</sup>Entsprechend der Implementierung in AUSTAL2000 wurden ergänzende Festlegungen getroffen, siehe Abschnitt 3.6.

<sup>15</sup>Die Mischungsschichthöhe wurde entsprechend TA Luft festgelegt und es wurden die gemessenen Werte von  $u_*$  (Wert in 10 m Höhe) und  $L_M$  verwendet.

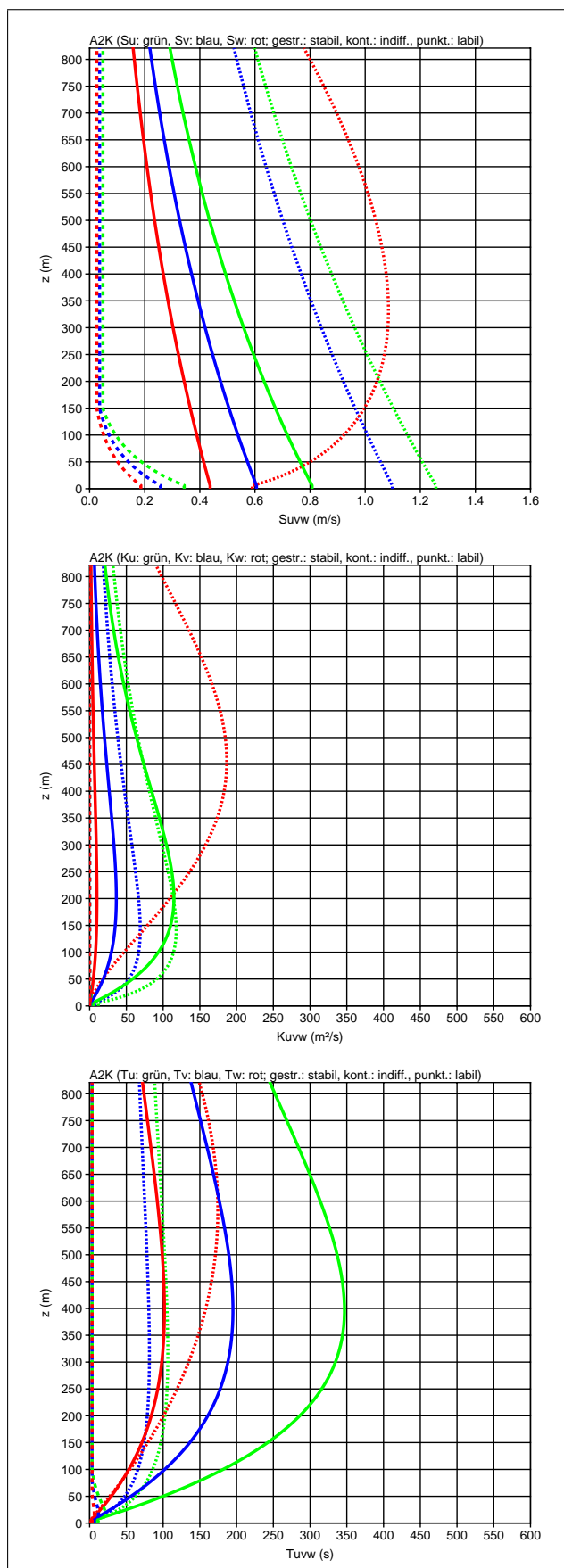


BILD 7: VDI 3783 Blatt 8, Vertikalverlauf der Turbulenzparameter (Mischungsschichthöhe nach TA Luft,  $z_0 = 0.5 \text{ m}$ ,  $u(60 \text{ m}) = 4 \text{ m/s}$ ).

Oben:  $\sigma_\alpha$ .

Mitte:  $K_\alpha$ .

Unten:  $T_\alpha$ .

Grün:  $\alpha = u$ .

Blau:  $\alpha = v$ .

Rot:  $\alpha = w$ .

Gestrichelt:  $L_M = 100 \text{ m}$ .

Durchgezogen:  $L_M = 99999 \text{ m}$ .

Gepunktet:  $L_M = -100 \text{ m}$ .

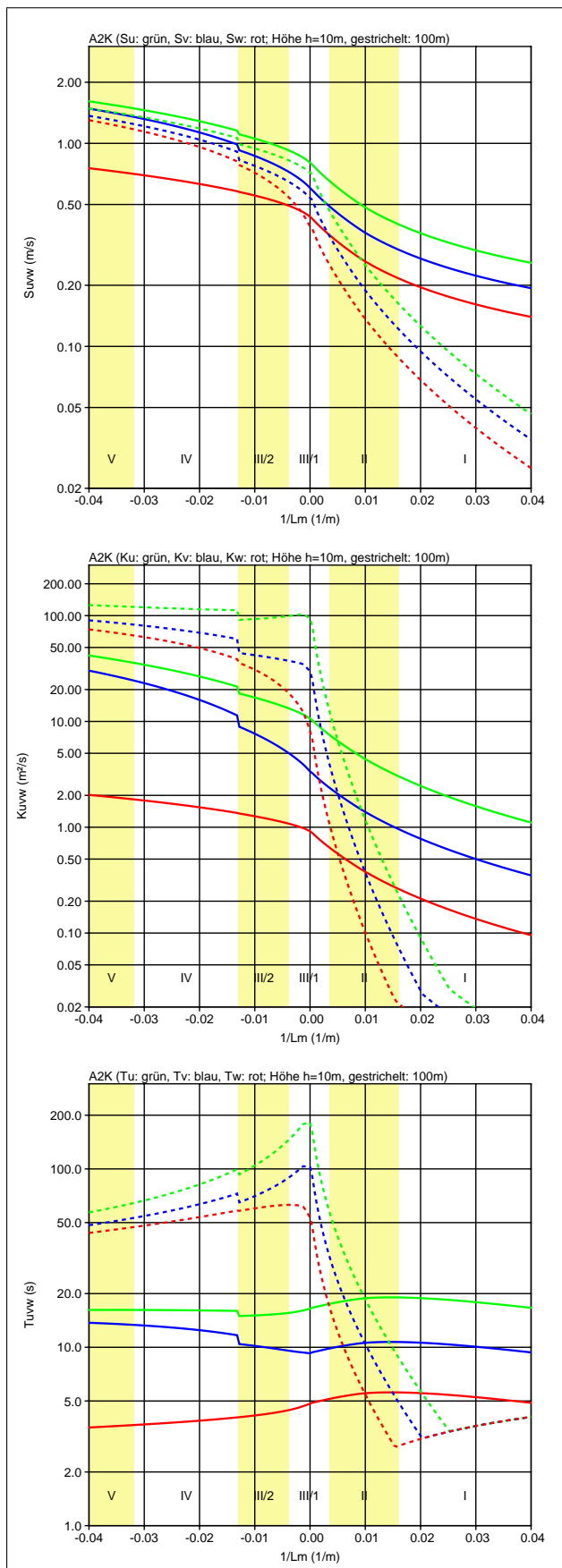


BILD 8: VDI 3783 Blatt 8, Turbulenzparameter in 10 m und 100 m Höhe als Funktion der inversen Monin-Obukhov-Länge (Mischungsschichthöhe nach TA Luft,  $z_0 = 0.5$  m,  $u(60$  m) = 4 m/s). Die verschiedenen Stabilitätsbereiche (Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier) sind durch die Folge von gelben und weißen Feldern im Hintergrund dargestellt.

Oben:  $\sigma_{\alpha}$ .

Mitte:  $K_{\alpha}$ .

Unten:  $T_{\alpha}$ .

Grün:  $\alpha = u$ .

Blau:  $\alpha = v$ .

Rot:  $\alpha = w$ .

Durchgezogen:  $z = 10$  m.

Gestrichelt:  $z = 100$  m.

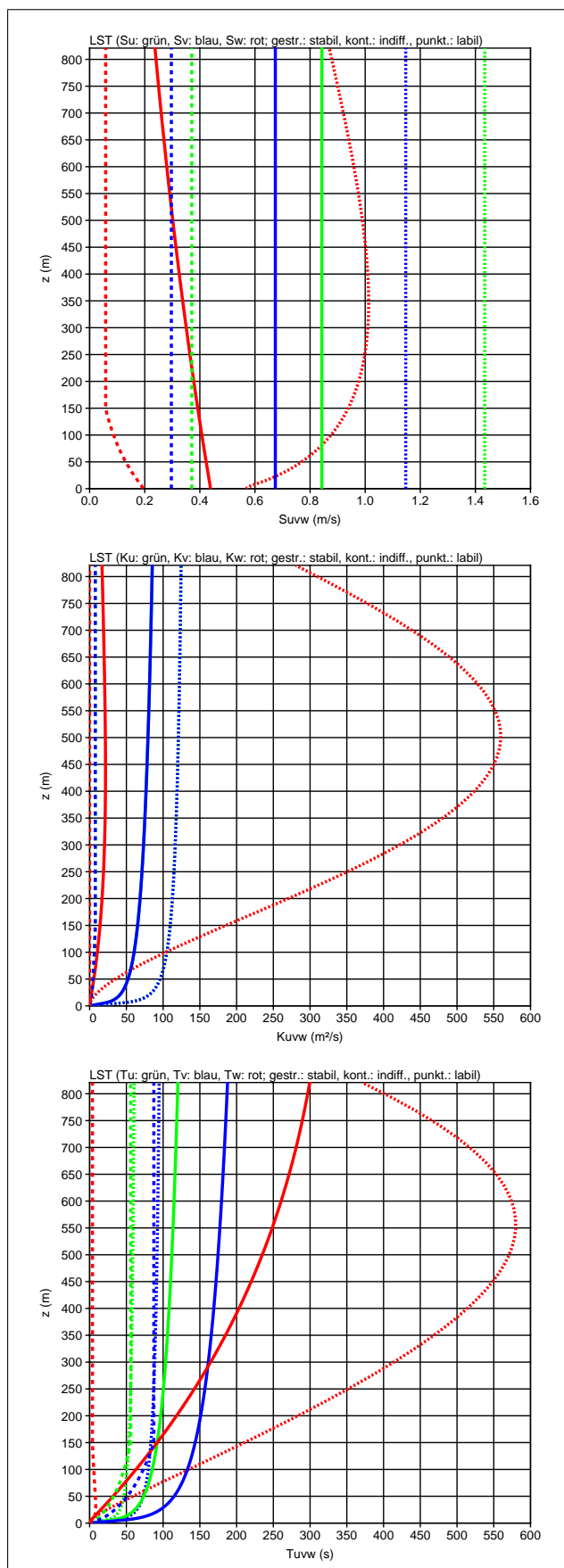


BILD 9: Standard-Grenzschichtmodell von LASAT, Vertikalverlauf der Turbulenzparameter (Mischungsschichthöhe nach TA Luft,  $z_0 = 0.5$  m,  $u(60$  m) = 4 m/s).  
Oben:  $\sigma_\alpha$ .  
Mitte:  $K_\alpha$  ( $K_u = K_v$ ).  
Unten:  $T_\alpha$ .  
Grün:  $\alpha = u$ .  
Blau:  $\alpha = v$ .  
Rot:  $\alpha = w$ .  
Gestrichelt:  $L_M = 100$  m.  
Durchgezogen:  $L_M = 99999$  m.  
Gepunktet:  $L_M = -100$  m.

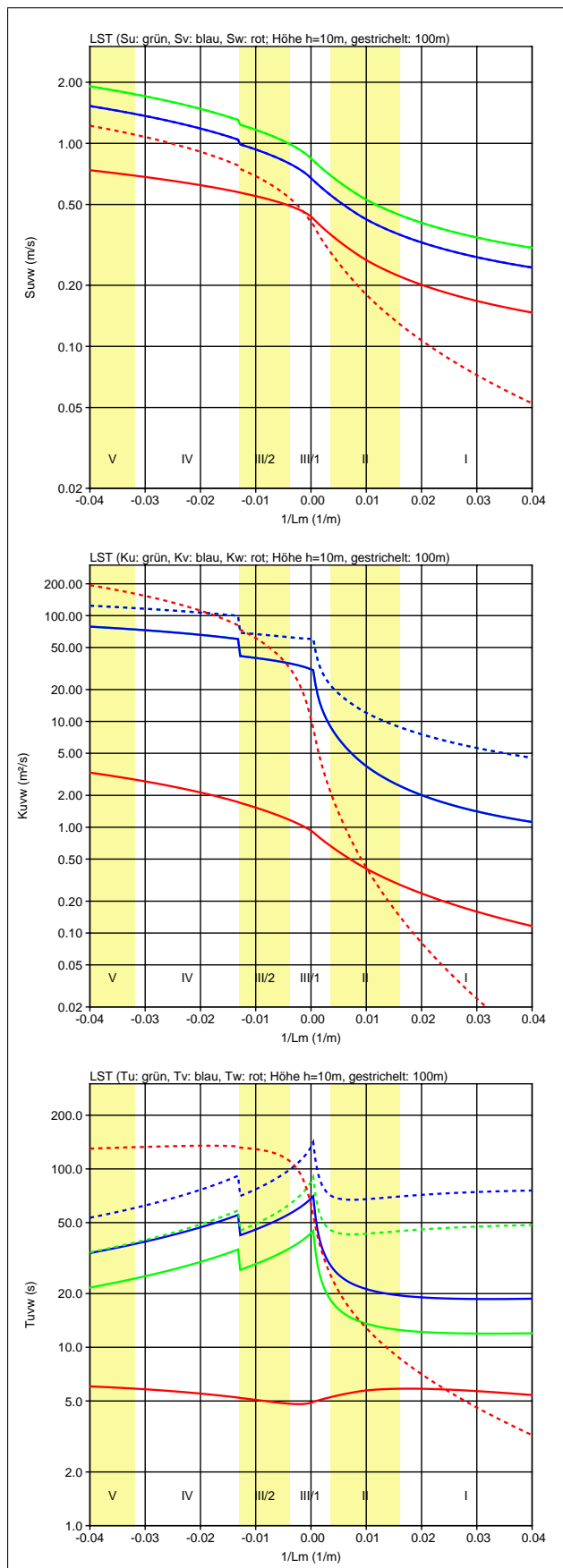


BILD 10: Standard-Grenzschichtmodell von LASAT, Turbulenzparameter in 10 m und 100 m Höhe als Funktion der inversen Monin-Obukhov-Länge (Mischungsschichthöhe nach TA Luft,  $z_0 = 0.5 \text{ m}$ ,  $u(60 \text{ m}) = 4 \text{ m/s}$ ). Die verschiedenen Stabilitätsbereiche (Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier) sind durch die Folge von gelben und weißen Feldern im Hintergrund dargestellt.  
 Oben:  $\sigma_\alpha$ .  
 Mitte:  $K_\alpha$  ( $K_u = K_v$ ).  
 Unten:  $T_\alpha$ .  
 Grün:  $\alpha = u$ .  
 Blau:  $\alpha = v$ .  
 Rot:  $\alpha = w$ .  
 Durchgezogen:  $z = 10 \text{ m}$ .  
 Gestrichelt:  $z = 100 \text{ m}$ .



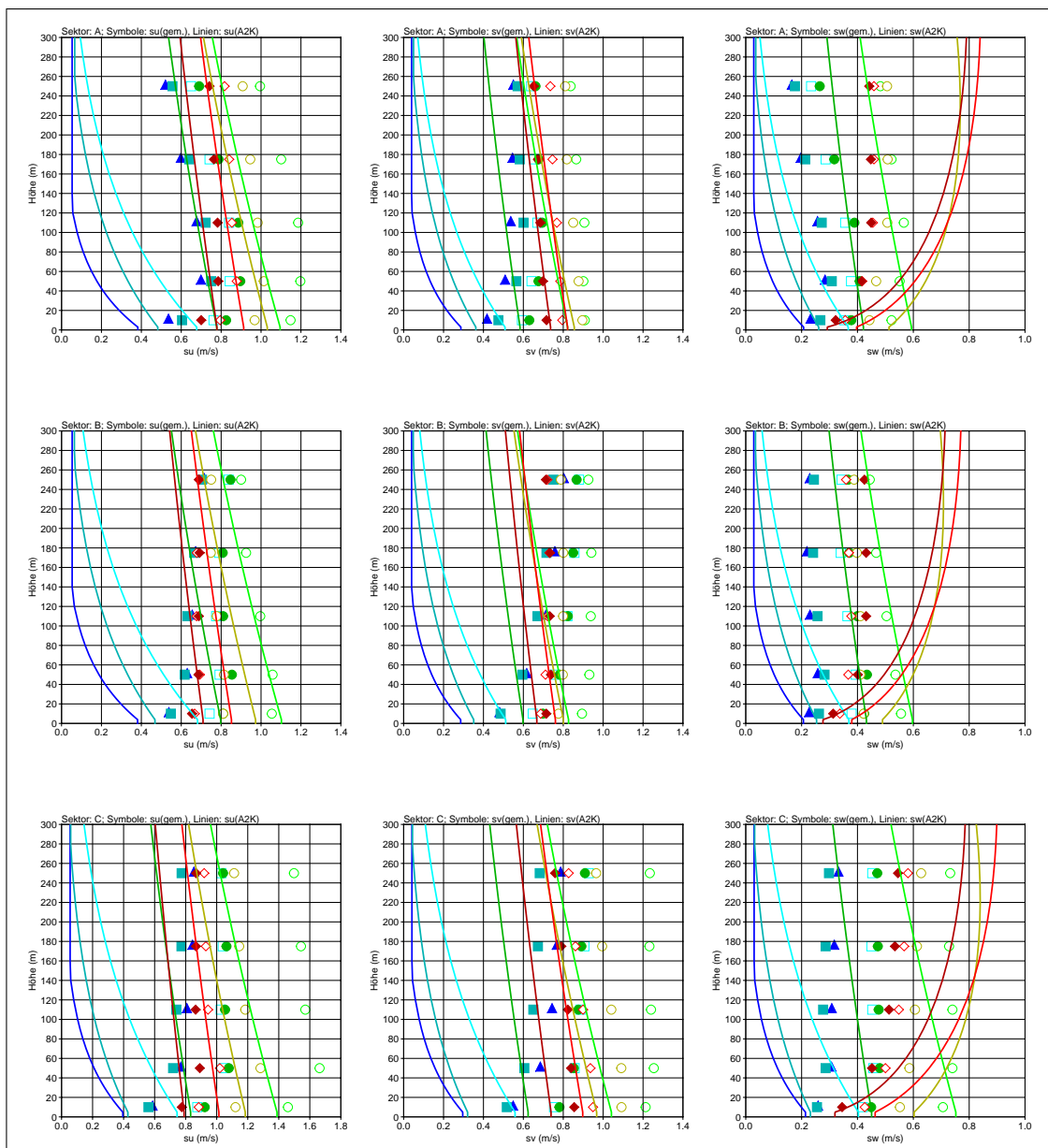


BIld 11: Vergleich der Profile der Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  nach den Hamburger Meßdaten (Symbole) und nach VDI 3783 Blatt 8 (Linien). Die Bilder zeigen die Vertikalprofile für den Windrichtungssektor A (oben), B (Mitte) und C (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse für 8 Stabilitätsgruppen (blau: stabil; grün und braun: indifferent; rot: labil).



- Die gemessenen Profile zeigen einen wesentlich geringeren Abfall mit der Höhe als der theoretische Ansatz. Dies gilt insbesondere für stabile Schichtung, wo in den theoretischen Profilen aufgrund der niedrigen Mischungsschichthöhe  $h_m$  der Faktor  $\exp(-z/h_m)$  durchschlägt.<sup>16</sup>
- Der gemessene Verlauf von  $\sigma_w$  für labile Schichtung (rot) ist ähnlich dem für indifferente Schichtung (grün). Dagegen liefert der theoretische Ansatz aufgrund des zusätzlichen Terms  $\propto (-z/L_M)^{1/3}$  einen deutlichen Anstieg von  $\sigma_w$  bei labiler Schichtung.

Insgesamt entsprechen die gemessenen Profile für alle Schichtungen eher denen, die man für indifferente Schichtung erwarten würde, und zeigen nur eine geringe Höhenabhängigkeit.

Die Profile von  $\sigma_w$  nach den Hamburger Daten können mit anderen Meßerhebungen verglichen werden:

- Der Datensatz Kittsee 2007 zeigt für alle Stabilitätsklassen eine Zunahme der vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen zwischen 50 m und 400 m.<sup>17</sup>
- Der Datensatz Brockdorf 1998 zeigt für labile und stabile Schichtung weitgehend konstante Werte zwischen 40 m und 280 m und für indifferente Schichtung eine Abnahme zwischen 40 m und 120 m.<sup>18</sup>
- Der Datensatz Rossendorf 1994 zeigt für labile Schichtung eine Zunahme zwischen 20 m und 270 m um fast einen Faktor 3, für indifferente Schichtung eine ebenso deutliche Abnahme; für stabile Schichtung ergibt sich eine leichte Zunahme mit der Höhe.<sup>19</sup>

Insgesamt ergeben die Datensätze kein konsistentes Bild. Mögliche Ursachen sind Unterschiede im Standort und seiner Umgebung, Unterschiede in hier nicht aufgelösten meteorologischen Parametern (beispielsweise der Korrelation mit der Windgeschwindigkeit) und Unterschiede in der Art der Meßerhebung und Datenauswertung.

## 2.3 Temperaturprofil

Für die Parametrisierung des Temperaturprofils in Grenzschichtmodellen gibt es zwei gebräuchliche Ansätze in der Praxis:

- Verwendung der stabilitäts- und windgeschwindigkeitsabhängigen Temperaturgradienten der KTA 1508.<sup>20</sup> Sie beruhen auf Temperaturmessungen zwischen 30 m und 100 m Höhe.

<sup>16</sup>Das ist auch der Fall, wenn die Mischungsschichthöhe nicht nach TA Luft, sondern nach VDI 3783 Blatt 8 festgelegt wird.

<sup>17</sup>C. Flandorfer und M. Hirtl (ZAMG Österreich), private Mitteilung.

<sup>18</sup>G. Peters (Universität Hamburg), private Mitteilung.

<sup>19</sup>G. Peters (Universität Hamburg), private Mitteilung.

<sup>20</sup>KERNTECHNISCHER AUSSCHUSS (KTA) (2006): *Instrumentierung zur Ermittlung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre*. Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 1508, Fassung 11/06.

- Verwendung von Ähnlichkeitsprofilen, die von der Schubspannungsgeschwindigkeit, der Rauigkeitslänge und der Monin-Obukhov-Länge abhängen. Ein Beispiel sind die Profile nach NIEUWSTADT (1978).<sup>21</sup>

Bild 12 zeigt die Temperaturprofile nach den Hamburger Meßdaten (Stundenmittel) im Vergleich zu den konstanten Temperaturgradienten nach KTA 1508. In den Hamburger Meßdaten standen für die Temperatur zusätzlich Werte in den Meßhöhen 2 m und 70 m zur Verfügung. Die KTA-Profile wurden an die gemessenen Profile so angepaßt, daß beide Profile in 2 m Höhe denselben Wert annehmen. Das entspricht der typischen Vorgehensweise, da in der Regel nur bodennahe Meßwerte für die Temperatur vorliegen.

Bild 13 zeigt den Vergleich von gemessenen Temperaturprofilen und den auf Ähnlichkeitsansätzen basierenden Temperaturprofilen nach NIEUWSTADT (1978), wobei die Eingangsparameter  $u_*$ ,  $z_0$ ,  $L_M$  aus den Messungen übernommen wurden (Mittelwerte jeder Stabilitätskategorie).

In den untersten 80 Höhenmetern stimmen die KTA-Profile insgesamt gut mit den gemessenen Profilen überein, die ab 10 m Höhe ebenfalls einen praktisch konstanten Gradienten aufweisen. Für Höhen zwischen 100 m und 250 m nimmt die gemessene Temperatur bei stabiler Schichtung deutlich weniger zu als von den KTA-Werten vorhergesagt, teilweise nimmt sie sogar ab.

Die Profile nach NIEUWSTADT (1978) zeigen bei labiler und stabiler Schichtung einen Anstieg der Temperatur in den untersten 10 Höhenmetern um etwa 1 Grad, im Gegensatz zu den Meßwerten (2 m und 10 m).<sup>22</sup> Auch sonst ist für labile und stabile Schichtungen der theoretische Gradient meist größer als der gemessene.

## 2.4 Diskussion der Ergebnisse

### 2.4.1 Parametrisierung des Windprofils

Die Windprofile der Hamburger Meßdaten werden mit dem theoretischen Ansatz nach VDI 3783 Blatt 8, der in Grenzschichtmodellen weit verbreitet ist, näherungsweise wiedergegeben, am besten für indifferente Schichtung. Für die Gültigkeit des Ansatzes oberhalb des Meßhöhenbereiches von 250 m kann keine Aussage getroffen werden. Das wäre jedoch von Interesse, da die analytischen Ansätze in erster Linie für den bodennahen Bereich entwickelt worden sind.

Für eine robuste Anwendung in der Praxis bestünde die Möglichkeit, den weiteren Anstieg der Windgeschwindigkeit ab einer bestimmten Maximalhöhe, etwa der einfachen oder doppelten Mischungsschichthöhe, zu unterbinden. Allerdings zeigen die Hamburger Meßdaten auch bei

---

<sup>21</sup> NIEUWSTADT, F.T.M. (1978): *The computation of the friction velocity  $u_*$  and the temperature scale  $T_*$  from temperature and wind velocity profiles by least-square methods*. *Boundary Layer Meteorology* **14**, 235-246. Siehe JANICKE, L., JANICKE, U. (2000): *Vorschlag eines meteorologischen Grenzschichtmodells für Lagrangesche Ausbreitungsmodelle*. Berichte zur Umweltphysik Nummer 2, Auflage 1, Ingenieurbüro Janicke, ISSN 1439-8222.

<sup>22</sup>Es lassen sich leicht extreme, aber nicht unrealistische Kombinationen von Schubspannungsgeschwindigkeit und Monin-Obukhov-Länge finden, für die das Profil nach NIEUWSTADT (1978) sogar eine Temperaturänderung von mehreren Grad auf den untersten 10 Höhenmetern liefert.

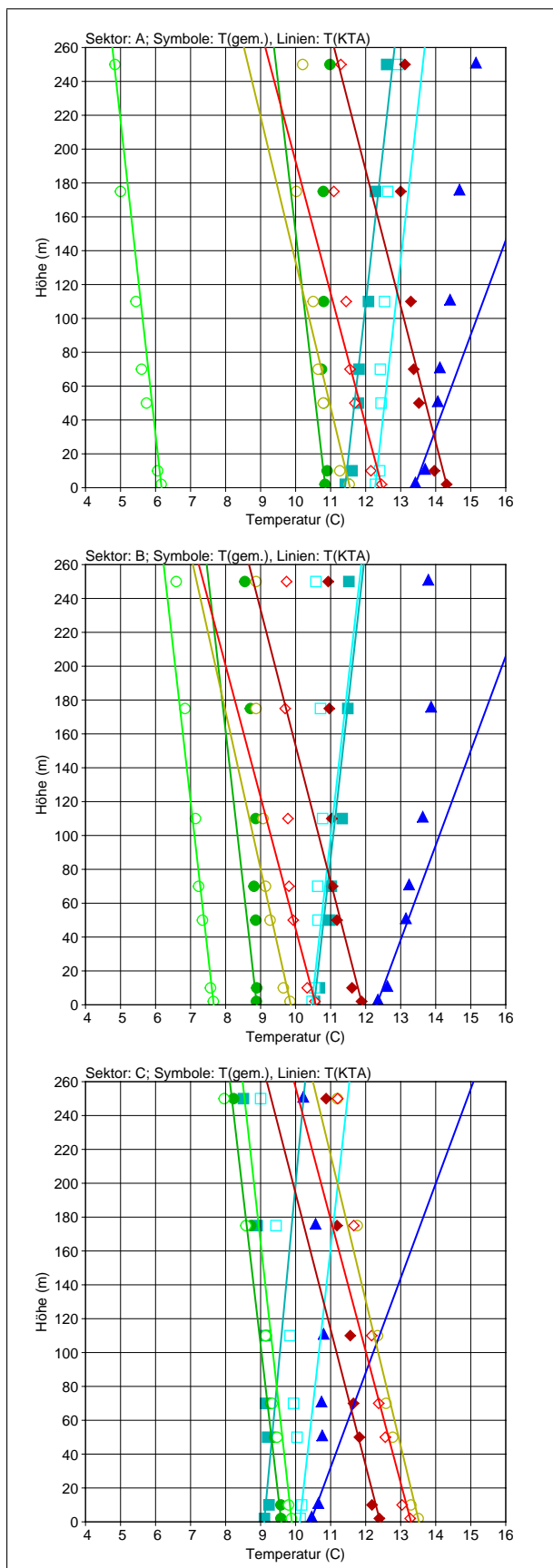


BILD 12: Vergleich der Temperaturprofile nach den Hamburger Meßdaten (Symbole) und nach KTA 1508 (Linien). Die Bilder zeigen die Vertikalprofile für den Windrichtungssektor A (oben), B (Mitte) und C (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse für 8 Stabilitätsgruppen (blau: stabil; grün und braun: indifferent; rot: labil).

Die theoretischen Profile wurden aus den konstanten Gradienten nach KTA 1508 so festgelegt, daß sie in 2 m Höhe jeweils die gemessene Temperatur annehmen.

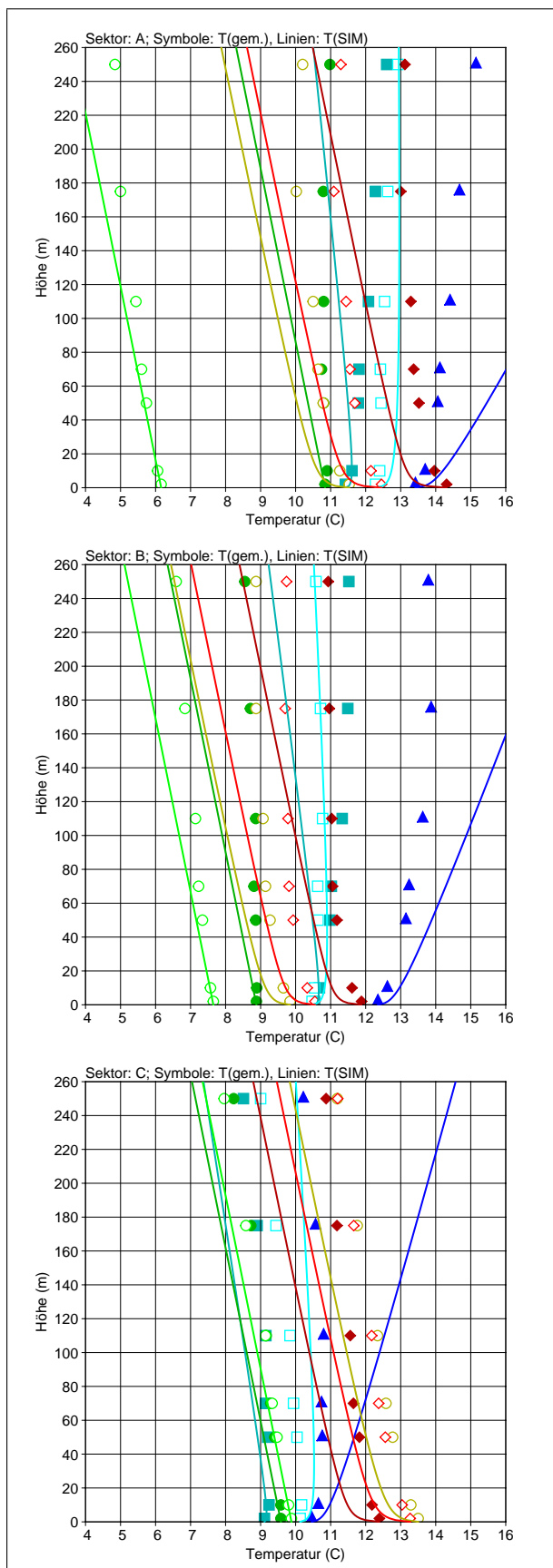


BILD 13: Vergleich der Temperaturprofile nach den Hamburger Meßdaten (Symbole) und nach NIEUWSTADT (1978) (Linien). Die Bilder zeigen die Vertikalprofile für den Windrichtungssektor A (oben), B (Mitte) und C (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse für 8 Stabilitätsgruppen (blau: stabil; grün und braun: indifferent; rot: labil). Eingangsgrößen für die theoretischen Profile waren die gemessenen Mittelwerte von  $u_*$ ,  $z_0$  und  $L_M$ .

sehr stabiler Schichtung und rechnerischen Mischungsschichthöhen unter 250 m über den gesamten Höhenbereich einen deutlichen Anstieg.

Der gemessene Verlauf der Windrichtungsrotation ist für stabile Schichtung ähnlich dem, der sich aus der numerischen Lösung der eindimensionalen Transportgleichungen unter Verwendung des Austauschkoefizienten nach VDI 3783 Blatt 8 ergibt und auch ähnlich dem, der im Anhang 3 der TA Luft festgelegt ist. Für labile Schichtung zeigen die Hamburger Meßdaten im Mittel eine systematische Windrichtungsrotation, die teilweise ähnlich groß ist wie die für stabile Schichtung, während der Ansatz in Anhang 3 der TA Luft hier keine Rotation vorsieht. Der Unterschied relativiert sich, wenn man die große Streuung der Windrichtungsrotation in den Meßwerten einbezieht. Im Gegensatz zu den Hamburger Meßdaten zeigen die KfK-Meßdaten für labile Schichtung im Mittel keine nennenswerte Windrichtungsrotation, auch hier ist die Streuung der Werte groß.

## 2.4.2 Parametrisierung des Turbulenzprofils

Die Parametrisierung von  $\sigma_w$  in Bodennähe, d.h. im wesentlichen der Wert für den Proportionalitätsfaktor  $f_w = 1.3$ , wird durch die Auswertungen der Hamburger Meßdaten im wesentlichen bestätigt. Für den Proportionalitätsfaktor von  $\sigma_v$  legen die Meßdaten dagegen einen größeren Wert als aktuell  $f_v = 1.8$  nahe. Auswertungen anderer USA-Meßdaten ergeben einen ähnlichen Befund, siehe Anhang D.

Sowohl die Hamburger Meßdaten als auch die KfK-Messungen zeigen eine geringe Höhenabhängigkeit der Geschwindigkeitsfluktuationen. Eine geringe Höhenabhängigkeit wird in vielen theoretischen Formulierungen<sup>23</sup> auch für den horizontalen Austauschkoefizienten angesetzt. Beides läßt sich mit dem in VDI 3783 Blatt 8 gewählten isotropen Ansatz

$$K_\alpha(z) = \frac{F\sigma_\alpha^4(z)}{C_0\epsilon(z)} \quad (27)$$

nicht erzielen: Für indifferente Schichtung ist nach der aktuellen Parametrisierung

$$K_\alpha \propto z e^{-4z/h_m} \quad (28)$$

und  $K_v$  hat damit denselben Verlauf wie  $K_w$ . Würde man nun die Höhenabhängigkeit von  $\sigma_v$  nach den Meßbefunden ganz herausnehmen, wäre  $K_v \propto z$  in allen Höhenbereichen, was den üblichen Ansätzen für  $K_v$  noch mehr widerspricht.

Aus physikalischer Sicht erscheint es nicht zwingend, für die horizontalen und den vertikalen Austauschkoefizienten denselben Ansatz (27) zu postulieren. Auch die Dissipationsrate ist in der atmosphärischen Grenzschicht vermutlich nicht isotrop.

<sup>23</sup>Siehe die Übersichten in: • KERSCHGENS, M.J., NÖLLE, CH., MARTENS, R. (2000): *Comments on turbulence parameters for the calculation of dispersion in the atmospheric boundary layer. Meteorologische Zeitschrift* **9**, 155-163. • JANICKE, L., JANICKE, U. (2000): *Vorschlag eines meteorologischen Grenzschichtmodells für Lagrangesche Ausbreitungsmodelle*. Berichte zur Umweltphysik Nummer 2, Auflage 1, Ingenieurbüro Janicke, ISSN 1439-8222.

Für eine Verbesserung der Turbulenzparametrisierung nach VDI 3783 Blatt 8 ergeben sich damit zwei Möglichkeiten:

1. Die formale Struktur (27) wird beibehalten und nur die Höhenabhängigkeit der Geschwindigkeitsfluktuationen wird entsprechend den experimentellen Befunden reduziert, aber nicht ganz herausgenommen. Zusätzlich wird der Proportionalitätsfaktor  $f_v$  in der Definition der horizontalen Geschwindigkeitsfluktuationen erhöht.

Mit diesen Minimaländerungen ergeben sich beim Einsatz in einer Ausbreitungsrechnung insbesondere für die Kombination großer Quellhöhen und stabiler Schichtung breitere Fahnen.

2. Der isotrope Ansatz (27) wird fallengelassen und eine Reihe von Meßbefunden werden in der theoretischen Formulierung berücksichtigt. Ein mögliches Vorgehen ist:

- Für den vertikalen Austauschkoeffizienten wird der bisherige Ansatz (27) beibehalten. Hiermit wäre  $K_w$  für stabile und labile Schichtung über die üblichen Ähnlichkeitsprofile definiert.<sup>24</sup>

Dieses Vorgehen erscheint auch deshalb sinnvoll, weil das Profil von  $K_w$  an den Gradienten der potentiellen Temperatur gekoppelt ist, der meist ebenfalls über die Ähnlichkeitsprofile festgelegt wird.

- Für die horizontalen Austauschkoeffizienten wird ein Ansatz gewählt, mit dem sich weitgehend höhenunabhängige Profile sowohl für  $\sigma_\alpha$  als auch für  $K_\alpha$  ( $\alpha = u, v$ ) einstellen lassen.

- Messungen im Windkanal haben ergeben, daß die Fahnenbreite im wesentlichen unabhängig von der Höhe über Grund ist.<sup>25</sup> Das läßt sich modelltechnisch nur erreichen, wenn  $K_v \sim u(z)$  gewählt wird (siehe Anhang C).

Da der Gradient von  $u(z)$  außer unmittelbar am Erdboden nur schwach ist, wäre damit auch gleich die Forderung des vorigen Punktes erfüllt. Derselbe Ansatz kann für  $K_u$  gewählt werden.

- Entsprechend den Hamburger Meßdaten werden die Profile von  $\sigma_\alpha$  als weitgehend höhenunabhängig angesetzt. Insbesondere wird der exponentielle Abfall abgeschwächt oder ganz unterdrückt und in der Definition von  $\sigma_w$  wird der Zusatzterm  $\propto -z/L_M$  reduziert.

Eine Implementierung des zweiten Ansatzes liegt bereits zum Großteil im Programmsystem LASAT in Form des Standard-Grenzschichtmodells (Grenzschichtmodell-Version 2.1) vor, das im Rahmen von Ausbreitungsrechnungen anhand verschiedener Datensätze validiert worden ist.<sup>26</sup> Eine Betrachtung des ersten Ansatzes ist in Anhang A aufgeführt.

<sup>24</sup>In VDI 3783 Blatt 8 in der Definition von  $\sigma_w$  implementiert.

<sup>25</sup>Siehe: • JANICKE, L. (1991): *Programm zur Prüfung der Kühlturmeinflüsse beim Kernkraftwerk Grohnde – Ausbreitungsmodellierung*. Im Auftrag des NLIS Hannover. • JANICKE, L. (1992): *Programm zur Prüfung der Kühlturmeinflüsse beim Kernkraftwerk Emsland – Ausbreitungsmodellierung*. Im Auftrag des NLIS Hannover.

<sup>26</sup>Siehe zum Beispiel: KSP-BERICHT (2000): *Validierung des Kinematic Simulation Particle Model (KSP-Modell) für Anwendungen im Vollzug des BImSchG*. Meteorologisches Institut der Universität Hamburg. Im Auftrag des Bundesumweltamtes, Forschungsbericht 98-295 43 354.



### 2.4.3 Parametrisierung des Temperaturprofils

Temperaturprofile werden für Ausbreitungsrechnungen mit einem Lagrangeschen Partikelmodell nicht unmittelbar benötigt. Einsatzbereich ist eher die Modellierung der Abgasfahnenüberhöhung und der Schallausbreitung, für die auch Profilangaben zur Windgeschwindigkeit und Windrichtung erforderlich sind. Gemessene Profile von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur sind für die Validierung prognostischer Windfeldmodelle von Bedeutung.

Die konstanten Temperaturgradienten nach KTA 1508 liefern in den untersten 100 Höhenmetern eine gute Übereinstimmung mit den Hamburger Meßdaten. Der hier betrachtete, auf Ähnlichkeitsprofilen basierende Ansatz nach NIEUWSTADT (1978) liefert eine deutlich schlechtere Übereinstimmung.



### 3 Weitere Aspekte für den praktischen Einsatz

In der analytischen Festlegung des Grenzschichtmodells werden hauptsächlich theoretische Überlegungen und experimentelle Befunde berücksichtigt. Daneben kann es erforderlich sein, auf den geplanten Einsatzrahmen Rücksicht zu nehmen, insbesondere den Typ des nachgeschalteten Ausbreitungsmodells (z.B. Lagrangesches Partikelmodell oder Gaußsches Fahnenmodell), die praktische Implementierung (z.B. Vorgabe von Sicherheitsgrenzen für Wertebereiche) und den Zweck der Ausbreitungsrechnung (z.B. wissenschaftliche Untersuchung oder standardisiertes Genehmigungsverfahren).

Die Berücksichtigung dieser Aspekte in Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 wäre wünschenswert.

#### 3.1 Art des Ausbreitungsmodells

Hier wurde von dem Einsatz in einem Lagrangeschen Partikelmodell ausgegangen. Eine solche Spezifikation kann wichtig sein: So wurde in dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT ein Zusatzterm in der Definition von  $K_w$  für labile Schichtung eingeführt, um eine bessere Übereinstimmung mit den Konzentrationsmessungen der Prairie-Grass-Experimente zu erhalten. Die resultierenden hohen Werte von  $K_w$  und  $T_w$  sind nicht kritisch, da die Fahnenbreite in einem Lagrangeschen Ausbreitungsmodell durch die Geschwindigkeitsfluktuationen begrenzt wird – im Gegensatz beispielsweise zu einem Gaußschen Fahnenmodell, wo die Fahnenbreite mit zunehmendem  $K_w$  immer größer wird.

#### 3.2 Abhängigkeit von der geographischen Lage

Die Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 und die Vorgaben der TA Luft werden im Rahmen der Modellsysteme AUSTAL2000 und LASAT zunehmend in Nachbarländern und im nicht-europäischen Ausland eingesetzt. Für diese Regionen muß die Drehung der Windrichtung (Ekman-Spirale) an die aktuelle geographische Breite angepaßt werden.

Für eine Anwendung in Regionen, in denen sich die meteorologischen Verhältnisse deutlich von denen in Deutschland unterscheiden, kann es auch erforderlich sein, die Klassierung der Schichtungsstabilität nach Klug/Manier anzupassen.

#### 3.3 Abhängigkeit von der Mittelungszeit

In der Festlegung von  $K_v$  und  $\sigma_v$  sollte berücksichtigt werden, daß die Geschwindigkeitsfluktuationen und damit die horizontalen Fahnenbreiten von der Mittelungszeit  $\bar{t}$  abhängen. Das ist insbesondere dann ein wichtiger Aspekt, wenn das Grenzschichtmodell für kürzere Mittelungsintervalle als das Stundenintervall der TA Luft eingesetzt wird, beispielsweise im Rahmen von Störfallanwendungen.

Für  $\sigma_v$  ist eine Abhängigkeit der Form  $\bar{t}^{0.2}$  gebräuchlich.<sup>27</sup> Nach (älteren) experimentellen Befunden ist auch die resultierende Fahnenbreite in etwa proportional zu  $\bar{t}^{0.2}$ ,<sup>28</sup> was eine Bedingung für den Ansatz von  $K_v$  liefert (siehe das Standard-Grenzschichtmodell von LASAT).

Experimentelle Daten und Auswertungen zu diesem Thema sind im Anhang D aufgeführt.

### 3.4 Verdrängungshöhe

Die Verdrängungshöhe sollte in der Definition der meteorologischen Profile berücksichtigt werden. Zusätzlich ist eine Vorschrift erforderlich, wie die Profile unterhalb der Verdrängungshöhe anzusetzen sind. Eine solche Vorgabe gibt es zur Zeit im Anhang 3 der TA Luft, nicht aber in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8.<sup>29</sup>

### 3.5 Übertragung der Monin-Obukhov-Länge auf einen anderen Standort

Die in einer AKTerm (meteorologische Zeitreihe) oder AKS (Ausbreitungsklassenstatistik) bereitgestellten Daten (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Stabilitätsmaß) werden an einer Meßposition erhoben, die unter anderem durch die Rauigkeitslänge in der näheren Umgebung gekennzeichnet ist. In der Praxis stellt sich die Frage, wie die Daten auf einen anderen Standort zu übertragen sind. Hier wird nur der relativ einfache Fall betrachtet, daß sich Meßort und Standort nur in ihrer charakteristischen Rauigkeitslänge (und Verdrängungshöhe) unterscheiden.

Der DWD wählt zur Zeit folgendes Verfahren, um die Meßwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung vom Meßort auf den neuen Standort zu übertragen: Es wird ein logarithmisches Windprofil angesetzt, das durch Meßhöhe, gemessene Windgeschwindigkeit, Rauigkeitslänge und Verdrängungshöhe am Meßort definiert ist. Die Rauigkeitslänge und Verdrängungshöhe am Standort ist gegeben; die rechnerische Meßhöhe (Anemometerhöhe) am Standort wird nun so gewählt, daß die logarithmischen Windprofile am Meßort und am Standort in 100 m Höhe über Grund denselben Wert annehmen.

Dieses Verfahren läßt die Ausbreitungsklasse unverändert. Im nächsten Schritt ordnet die TA Luft jeder Ausbreitungsklasse in Abhängigkeit von 9 klassierten Rauigkeitslängen eine mittlere Monin-Obukhov-Länge zu. Das Verfahren gewährleistet also, daß sich eine geänderte Rauigkeitslänge sowohl in Windgeschwindigkeit und Windrichtung (durch Änderung der Anemometerhöhe) als auch in der Monin-Obukhov-Länge (anhand der Rauigkeitslänge klassierter Wert) niederschlägt.

<sup>27</sup> WOLLENWEBER, G.C., PANOFSKY, H.A. (1989): *Dependence of velocity variance on sampling time*. *Boundary-Layer Meteorology* **47**, 205-215.

<sup>28</sup>Siehe Übersicht in: DRAXLER, R.R. (1984): *Diffusion and transport experiments*. In: *Atmospheric Science and Power Production* (ed. D. Randerson) DOE/TIC-27601, US Dept. Energy, available from NTIS, Springfield, VA, USA.

<sup>29</sup>Die TA Luft und das Standard-Grenzschichtmodell von LASAT verwenden unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung der Turbulenzprofile in der Verdrängungsschicht.

Wenn die AKTerm nicht die Ausbreitungsklasse, sondern direkt eine gemessene Monin-Obukhov-Länge enthält, stellt sich die Frage, welcher Wert bei einer geänderten Rauigkeitslänge benutzt werden soll. Einen Ansatz bietet das Verfahren, das schon für die Klassierung der Monin-Obukhov-Längen in der TA Luft angewendet wurde und das im Abschlußbericht zu AUSTAL2000 aufgeführt ist.<sup>30</sup> Das Vorgehen ist in Anhang E beschrieben.

### 3.6 Ergänzende Festlegungen

Folgende weitere Aspekte und Konventionen sind für die praktische Anwendung notwendig oder hilfreich:

- Da die Turbulenzprofile zur Mischungsschichthöhe hin stark abnehmen und in erster Linie für den Bereich unterhalb der Mischungsschichthöhe abgeleitet wurden, ist aus praktischer Sicht eine Beschränkung der Werte oberhalb der Mischungsschichthöhe sinnvoll, um in diesem Bereich, der auch in einer Ausbreitungsrechnung abgedeckt werden muß, unrealistisch kleine Werte zu vermeiden. So werden in den aktuellen Implementierungen in AUSTAL2000 und LASAT – wie auch in den hier gezeigten theoretischen Profilen – die Turbulenzprofile oberhalb der doppelten Mischungsschichthöhe konstant gehalten.
- Das theoretische Profil der Windgeschwindigkeit wird oberhalb der Mischungsschichthöhe zunehmend unsicher, vor allem bei stabiler Schichtung. Auch wenn dieser Bereich für die Immissionsprognose in Bodennähe in der Regel nicht relevant ist, kann eine Konvention, das theoretische Profil der Windgeschwindigkeit oberhalb der einfachen oder der doppelten Mischungsschichthöhe konstant zu setzen, sinnvoll sein.
- In einem Lagrangeschen Partikelmodell hängt der Zeitschritt, mit dem die Simulationspartikel bewegt werden, von der Lagrange-Korrelationszeit ab. Daher sollte bei der Vorgabe der Grenzschichtprofile darauf geachtet werden, daß diese nicht unrealistisch klein wird, insbesondere in größeren Höhen. Eine naheliegende, formale Untergrenze – die auch in den hier gezeigten theoretischen Profilen angesetzt wurde – ist  $z_0/u_*$ . Auch in der theoretischen Formulierung sollte dieser Aspekt berücksichtigt werden. Die Festlegung einer maximalen Lagrange-Korrelationszeit (z.B. 1200 s) in der Implementierung des Grenzschichtmodells ist ebenfalls sinnvoll.
- Bei einer analytischen Festlegung der Mischungsschichthöhe wie im Anhang 3 der TA Luft ist es sinnvoll, eine untere Grenze (etwa ein Wert zwischen 20 m und 50 m) vorzusehen. Im aktuellen Einsatz (AKTerm oder AKS, Minimalgeschwindigkeit von 0.7 m/s, klassierte Monin-Obukhov-Länge) können sich zwar keine sehr niedrigen Werte ergeben, dies kann sich jedoch in Zukunft, z.B. bei Vorgabe einer gemessenen Monin-Obukhov-Länge, ändern.

<sup>30</sup> JANICKE, L., JANICKE, U. (2003): *Entwicklung eines modellgestützten Beurteilungssystems für den anlagenbezogenen Immissionsschutz*. UFOPLAN 200 43 256, im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) .



## ANHÄNGE

## A Einfach modifiziertes Grenzschichtmodell nach VDI 3783 Blatt 8

Als Verbesserung der aktuellen Grenzschicht-Parametrisierung nach VDI 3783 Blatt 8 wurde die in Abschnitt 2.4 diskutierte erste Möglichkeit geprüft. Sie stellt einen minimalen Eingriff dar und läßt den grundsätzlichen Ansatz der Richtlinie unverändert.

### A.1 Anpassung der Turbulenzparametrisierung

Es wurden folgende Änderungen vorgenommen:

1. Der exponentielle Abfall der Geschwindigkeitsfluktuationen wurde abgeschwächt gemäß

$$\sigma_{\alpha} \sim e^{-z/h_m} \longrightarrow \sigma_{\alpha} \sim e^{-0.3z/h_m} \quad (\text{A.29})$$

für  $\alpha = u, v, w$ . Mit dieser Änderung ist  $K_{\alpha} \sim e^{-1.2z/h_m}$ .

2. Der Proportionalitätsfaktor für die horizontalen Geschwindigkeitsfluktuationen quer zur Windrichtung wurde erhöht gemäß

$$f_v = 1.8 \longrightarrow f_v = 2.0 . \quad (\text{A.30})$$

Die Meßdaten legen zwar einen noch größeren Wert im Bereich 2.2 bis 2.4 nahe (siehe Anhang D), allerdings würde dann in der Parametrisierung nach VDI 3783 Blatt 8 ( $K_v \sim \sigma_v^4$ ) die horizontale Fahnenbreite unter Umständen zu groß werden.

Als Folge dieser Änderungen ist die Fahnenbreite sowohl im Nah- als auch im Fernbereich etwas größer und zeigt einen geringeren Abfall mit der Höhe.

Die Änderungen wurden in LASAT (ab Version 3.1.26) in den Grenzschichtmodell-Versionen 3.1 (Anpassung von Version 2.6) und 3.3 (Anpassung von Version 2.8) realisiert. Version 3.3 entspricht Version 3.1 ohne Windrichtungsdrehung.<sup>31</sup>

In den folgenden Abschnitten sind die resultierenden Änderungen sowohl im Grenzschichtprofil als auch in den Ergebnissen von Ausbreitungsrechnungen aufgeführt.

### A.2 Auswirkung auf die Grenzschichtprofile

Bild A.14 zeigt den Vertikalverlauf von alten und neuen Grenzschichtprofilen, Bild A.15 die Darstellung in Abhängigkeit von der Monin-Obukhov-Länge.

<sup>31</sup>Die Version des einzusetzenden Grenzschichtmodells wird über den Parameter `Version` in Datei `meteo.def` vorgegeben.

Bild A.16 zeigt den Vergleich der geänderten Parametrisierung mit den Hamburger Meßdaten, Bild A.17 den semi-analytisch berechneten Verlauf von Windprofil und Windrichtungsänderung mit dem geänderten vertikalen Austauschkoefizienten. Beide Vergleiche fallen mit der geänderten Parametrisierung zufriedenstellender aus als bisher, insbesondere im Bereich stabiler Schichtung.

### A.3 Auswirkung auf Immissionsprognosen

Im folgenden werden verschiedene Testrechnungen mit dem Ausbreitungsmodell LASAT vorgestellt, wobei die Grenzschichtmodelle nach dem Original-Ansatz von VDI 3783 Blatt 8 und der TA Luft (Grenzschichtmodell-Version 2.6 bzw. 2.8), nach dem geänderten Ansatz (Grenzschichtmodell-Version 3.1 bzw. 3.3) und nach dem Standardansatz von LASAT (Grenzschichtmodell-Version 2.1) verwendet wurden.

Die Testrechnungen und Vergleiche geben einen Anhaltspunkt zur Größe und Relevanz der immissionsseitigen Änderungen, die aufgrund der hier vorgestellten Modifizierung des Grenzschichtmodells nach VDI 3783 Blatt 8 zu erwarten sind. Einer der Haupteffekte ist die Verbreiterung der Konzentrationsfahne, insbesondere für stabile Schichtung und größere Quellhöhen.

In Bezug auf die Häufigkeit von Geruchsstunden hängt die Auswirkung der Änderungen stark von der Emissionsstärke ab. Eine verbreiterte Fahne besitzt ein kleineres Maximum und überstreicht ein größeres Gebiet. Liegt die Geruchsstoffkonzentration in einer Einzelfahne deutlich über dem Schwellenwert, der zu einer Geruchsstunde führt, dann führt die Verbreiterung der Einzelfahnen zu einer Erhöhung der Geruchsstundenhäufigkeit, da Raumgebiete häufiger beaufschlagt werden. Liegt sie dagegen nur knapp über dem Schwellenwert, führt die Verbreiterung der Einzelfahnen zu einer Erniedrigung der Geruchsstundenhäufigkeit, da der Schwellenwert nun weniger häufig oder gar nicht mehr erreicht wird.

#### A.3.1 Einzelfall

Der stationäre Konzentrationsverlauf für eine passive Freisetzung wurde für eine 10 m und eine 200 m hohe Quelle und für drei verschiedene Schichtungen (stabil, indifferent, labil) bestimmt.<sup>32</sup>

Für die niedrige Quelle wurde der gasförmige Spurenstoff SO<sub>2</sub> betrachtet, für die hohe Quelle Staub der Korngrößenklasse 3 nach TA Luft. Letzere Wahl wurde getroffen, da aus der Praxis mit AUSTAL2000 bekannt ist, daß das Grenzschichtmodell für hohe Quellen und sedimentierenden Staub unrealistische Immissionswerte liefern kann (Sternstruktur bei einer AKS-Rechnung, siehe Anhang F im AUSTAL2000-Handbuch).

Bild A.18 zeigt die Ergebnisse für die niedrige Quelle, Bild A.19 die Ergebnisse für die hohe

<sup>32</sup>Rauhigkeitslänge  $z_0 = 0.5$  m, Verdrängungshöhe  $d_0 = 3.0$  m, Anemometerhöhe  $h_a = 15.0$  m, Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe  $u_a = 1.0$  m/s (Klug/Manier-Klasse I),  $u_a = 3.0$  m/s (Klug/Manier-Klasse III/1),  $u_a = 2.0$  m/s (Klug/Manier-Klasse IV).

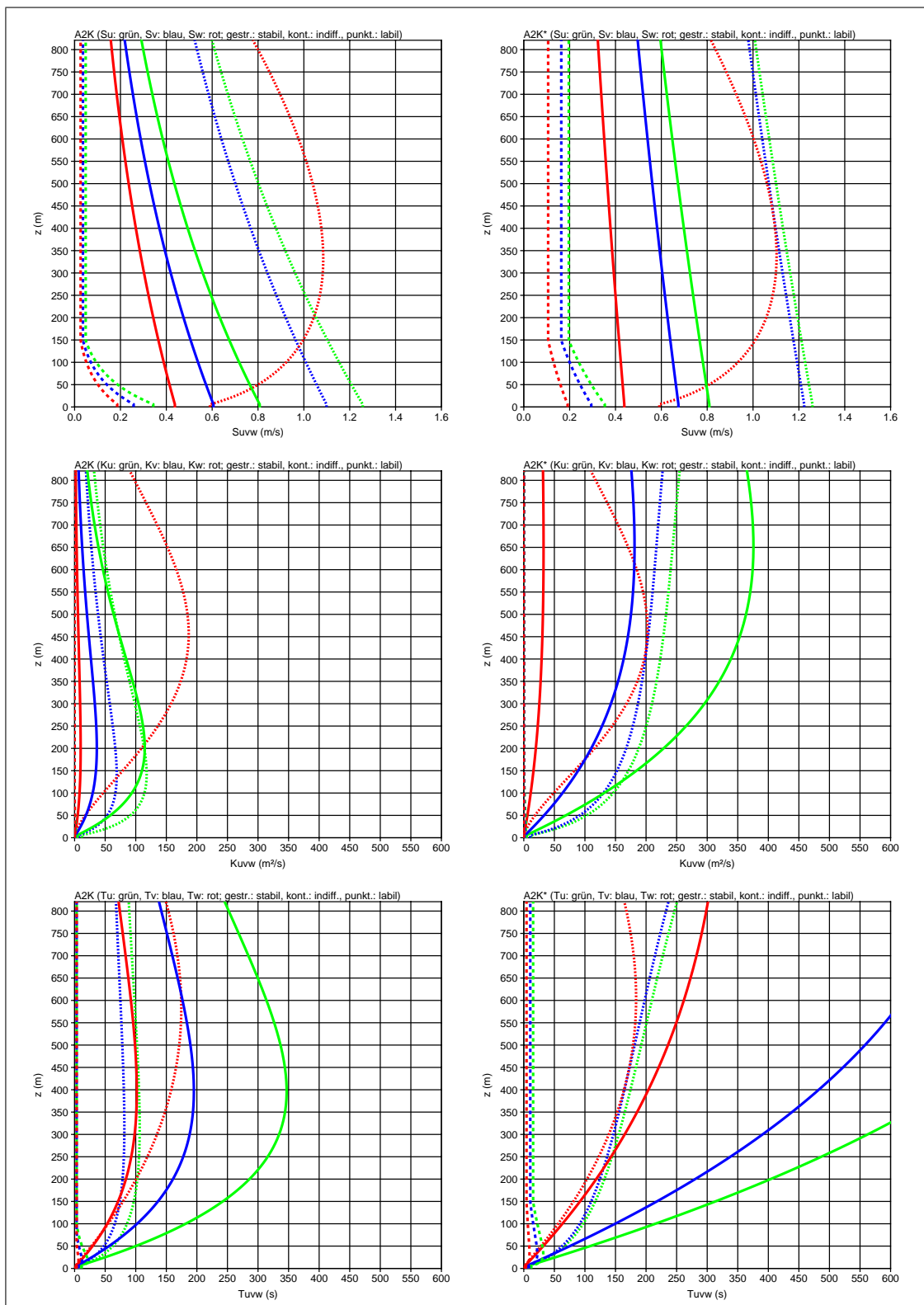


BILD A.14: Vertikalverlauf der Turbulenzparameter nach VDI 3783 Blatt 8, aktuell (links) und modifiziert (rechts). Oben:  $\sigma_\alpha$ . Mitte:  $K_\alpha$ . Unten:  $T_\alpha$ . Grün:  $\alpha = u$ . Blau:  $\alpha = v$ . Rot:  $\alpha = w$ . Gestrichelt:  $L_M = 100$  m. Durchgezogen:  $L_M = 99999$  m. Gepunktet:  $L_M = -100$  m.

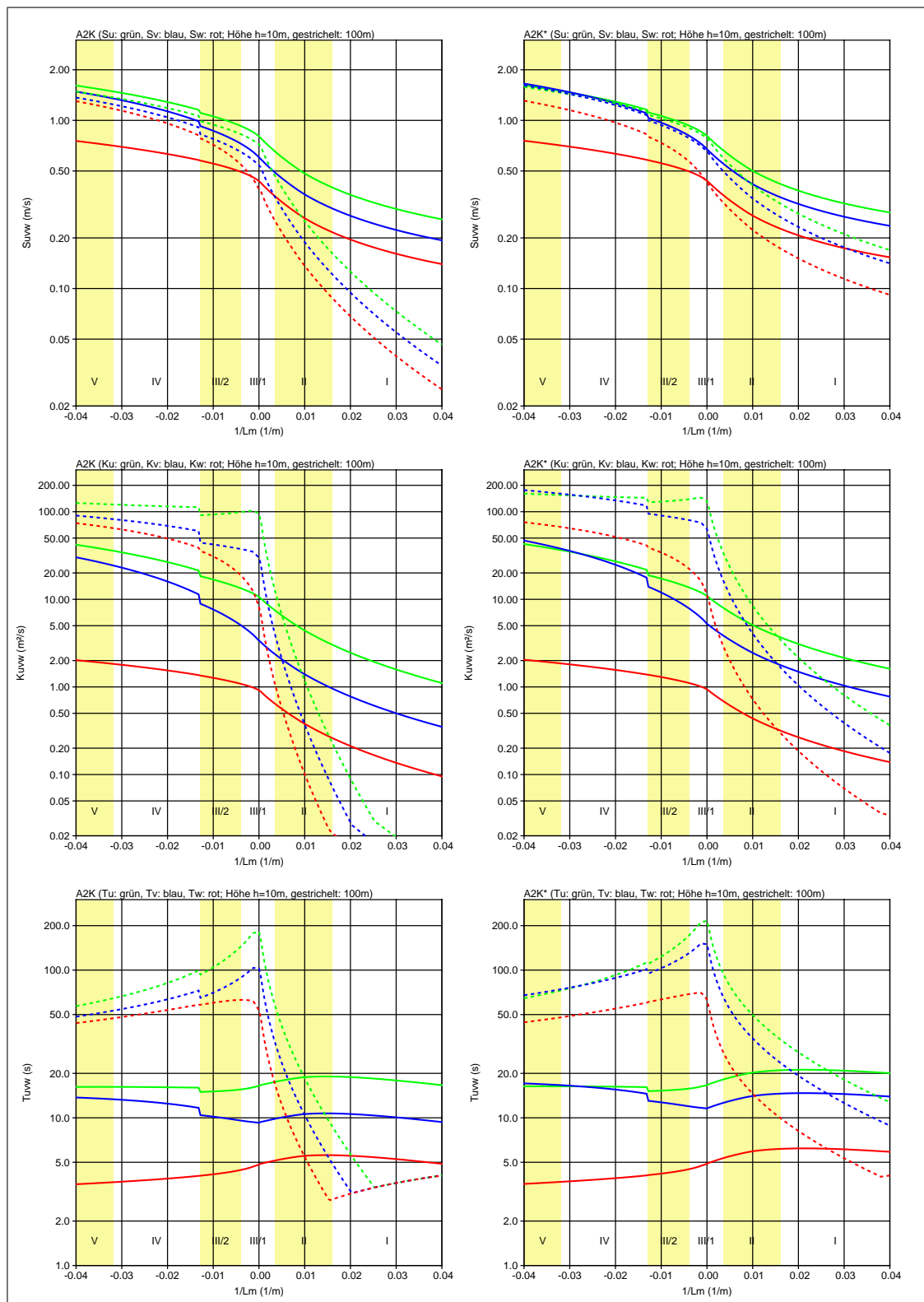


BILD A.15: Turbulenzparameter nach VDI 3783 Blatt 8 als Funktion der inversen Monin-Obukhov-Länge, aktuell (links) und modifiziert (rechts). Oben:  $\sigma_\alpha$ . Mitte:  $K_\alpha$ . Unten:  $T_\alpha$ . Grün:  $\alpha = u$ . Blau:  $\alpha = v$ . Rot:  $\alpha = w$ . Durchgezogen:  $z = 10$  m. Gestrichelt:  $z = 100$  m.



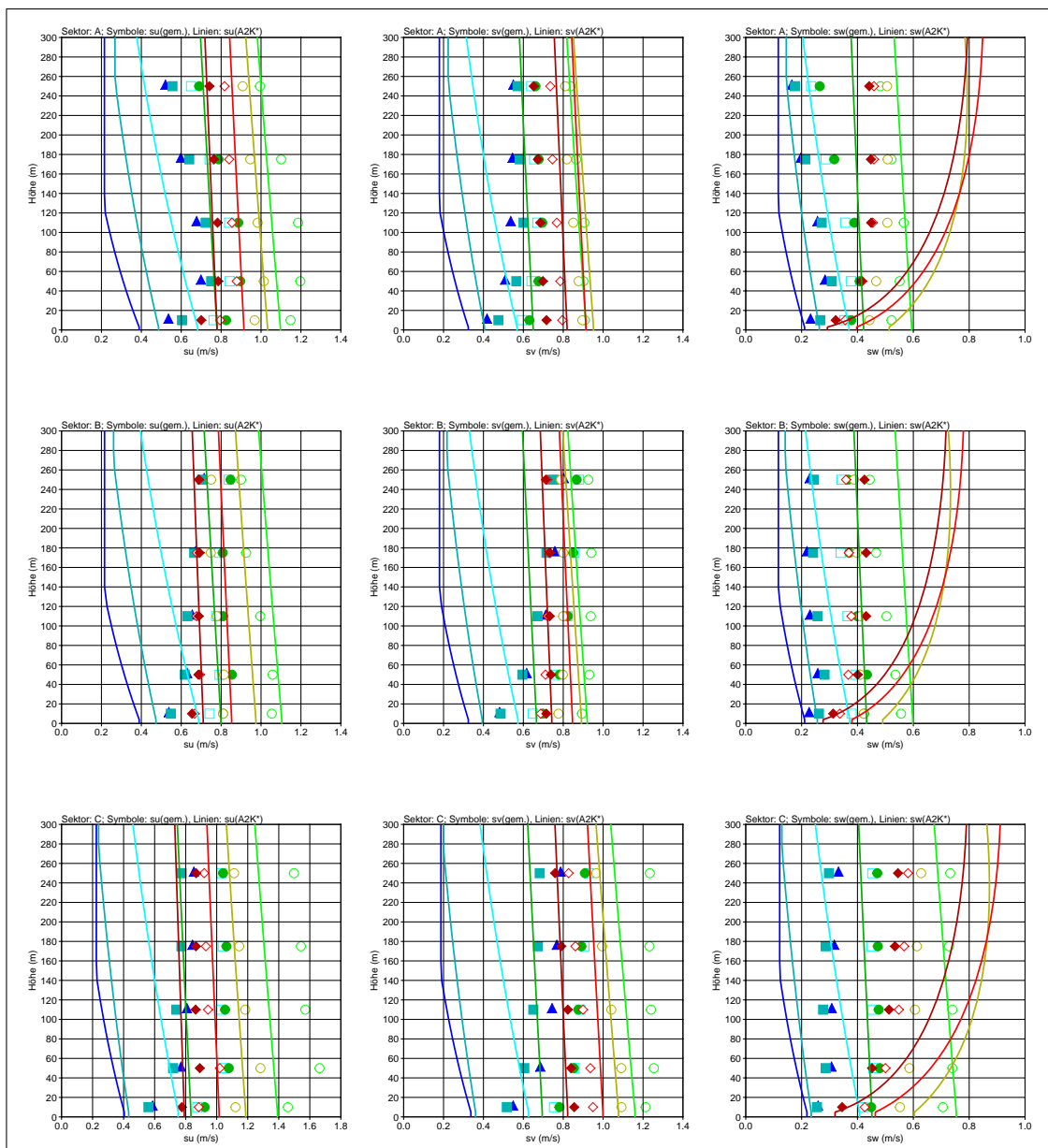


BILD A.16: Vergleich der Profile der Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  nach den Hamburger Meßdaten (Symbole) und nach dem modifizierten Ansatz (Linien). Die Bilder zeigen die Vertikalprofile für den Windrichtungssektor A (oben), B (Mitte) und C (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse für 8 Stabilitätsgruppen (blau: stabil; grün und braun: indifferent; rot: labil).

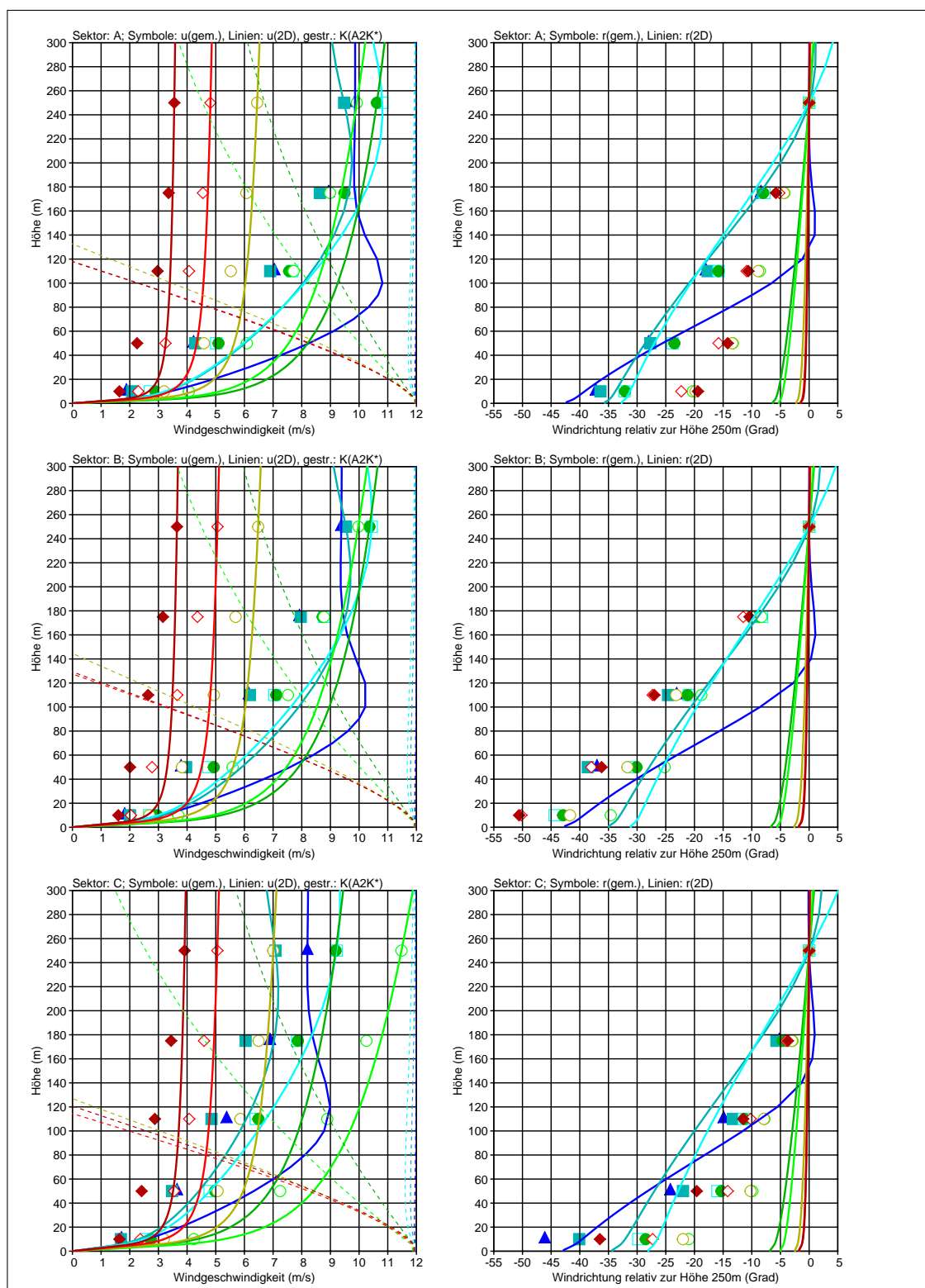


BILD A.17: Vergleich der Hamburger Meßdaten und der numerischen Lösung der eindimensionalen Transportgleichungen, wobei der Austauschkoefizient  $K$  nach dem modifizierten Ansatz festgelegt wurde. Die Bilder zeigen die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit (links) und der relativen Windrichtung (rechts) für Sektor A (oben), B (Mitte) und C (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse für 8 Stabilitätsgruppen (blau: stabil, grün und braun: indifferent, rot: labil). Der Verlauf von  $K$  ist in Form der gestrichelten Linien im linken Bild angedeutet (Wert 0 am rechten Bildrand).

Quelle. Mit dem modifizierten Ansatz fallen die Fahnen etwas breiter aus und die Maximalkonzentrationen sind etwas niedriger. Sie stimmen besser mit den Ergebnissen überein, die sich mit dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT ergeben.

Der augenfällige Unterschied zwischen dem Ansatz der TA Luft und dem Standardansatz von LASAT in der Fahnenrichtung bei stabiler Schichtung, der auf der Berücksichtigung der Windrichtungsdrehung in dem Ansatz der TA Luft beruht, ist in praktischen Anwendungen, bei denen statistische Kenngrößen ermittelt werden (z.B. Jahresrechnungen), in der Regel nicht erheblich.

### A.3.2 Ausbreitungsklassenstatistik

Die Rechnungen mit einer niedrigen und einer hohen Quelle wurden für eine Ausbreitungsklassenstatistik (AKS) wiederholt (Datei *anonym.aks* der AUSTAL2000-Distribution), wobei die niedrige Quelle zusätzlich einen Geruchsstoff freisetzte.

Bild A.20 zeigt als Ergebnisse für die niedrige Quelle die mittlere SO<sub>2</sub>-Konzentration, die Geruchsstundenhäufigkeit und das Stundenmittel von SO<sub>2</sub> mit 24 Überschreitungen.<sup>33</sup>

Bild A.21 zeigt als Ergebnisse für die hohe Quelle die mittlere SO<sub>2</sub>-Konzentration, die mittlere Deposition von Staub der Korngrößenklasse 3 und das Stundenmittel von SO<sub>2</sub> mit 24 Überschreitungen.

### A.3.3 Validierungstests

Mit dem modifizierten Grenzschichtmodell wurden die in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 aufgeführten Validierungstests wiederholt.

Im Vergleich mit den Prairie-Gras-Daten ergeben sich nur geringe Änderungen, siehe Bilder A.22 bis Bild A.25. Die experimentell gemessene Fahnenbreite wird in größerer Quellentfernung etwas besser getroffen, ist aber für indifferente Schichtung immer noch etwas zu niedrig. Für labile Schichtung werden in größerer Entfernung wie bisher zu hohe Gesamtkonzentrationen ausgewiesen.

Die Übereinstimmung mit den Windkanalmessungen verbessert sich, insbesondere in Bezug auf den Verlauf der Fahnenbreite (Darstellung nicht in der Richtlinie aufgeführt), siehe Bild A.26 (aktueller Ansatz) und Bild A.27 (modifizierter Ansatz).

Die entsprechenden Validierungstests mit dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT sind im Anhang G aufgeführt.

---

<sup>33</sup>Die Unterschiede zwischen dem Ergebnis mit Grenzschichtmodell nach VDI 3782 Blatt 3 und dem mit dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT sind eher untypisch und in anderen Anwendungen in der Regel kleiner.

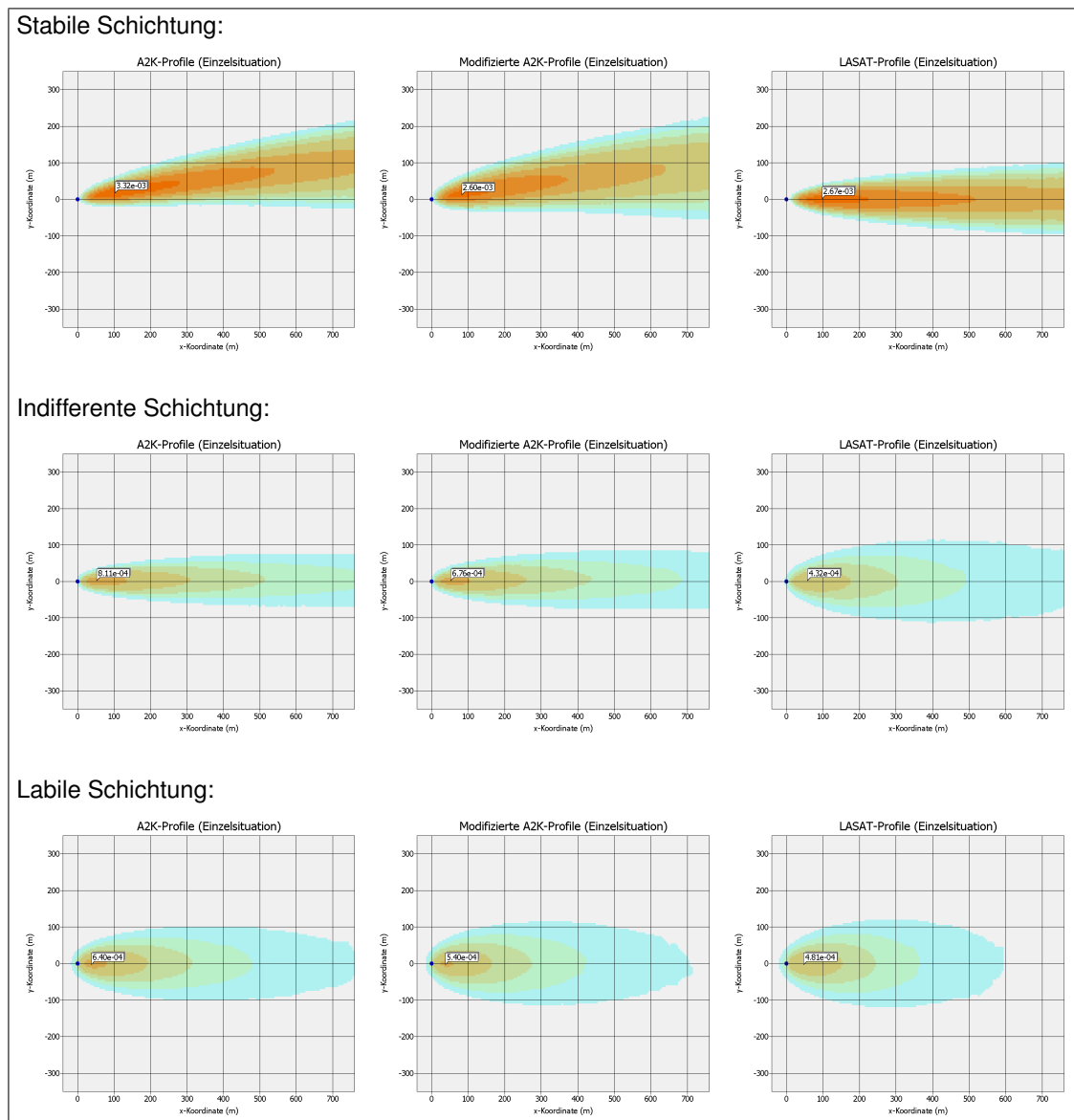


BILD A.18: Stationäre, bodennahe Konzentrationsverteilung für eine 10 m hohe passive Quelle und ein inertes, nicht-deponierendes Gas mit dem aktuellen Ansatz VDI 3783 Blatt 8 (links), dem modifizierten Ansatz (Mitte) und dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT (rechts) für stabile Schichtung (oben), indifferente Schichtung (Mitte) und labile Schichtung (unten).

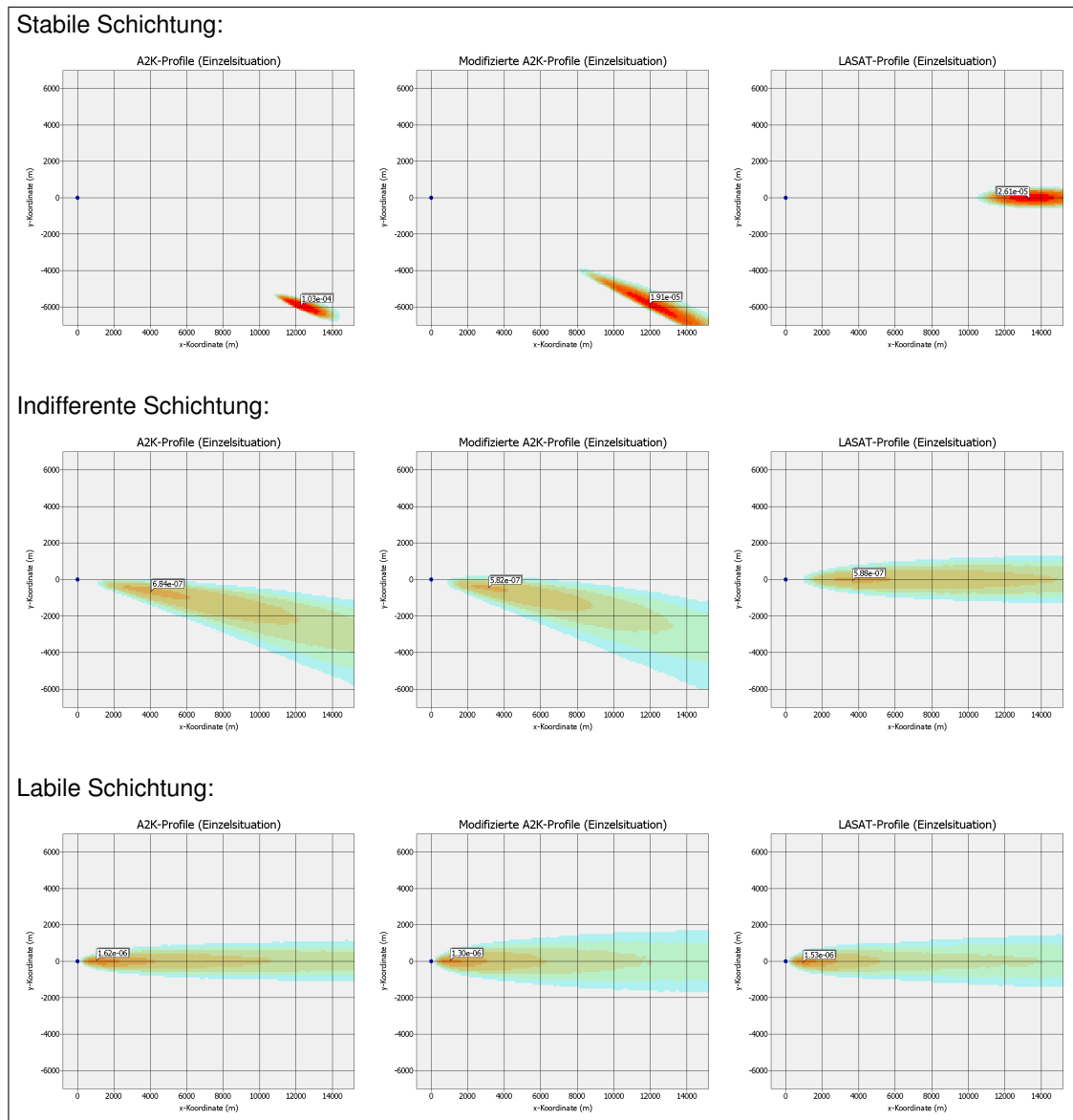


BILD A.19: Stationäre, bodennahe Konzentrationsverteilung für eine 200 m hohe passive Quelle und sedimentierenden Staub der Korngrößenklasse 3 mit dem aktuellen Ansatz VDI 3783 Blatt 8 (links), dem modifizierten Ansatz (Mitte) und dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT (rechts) für stabile Schichtung (oben), indifferente Schichtung (Mitte) und labile Schichtung (unten).

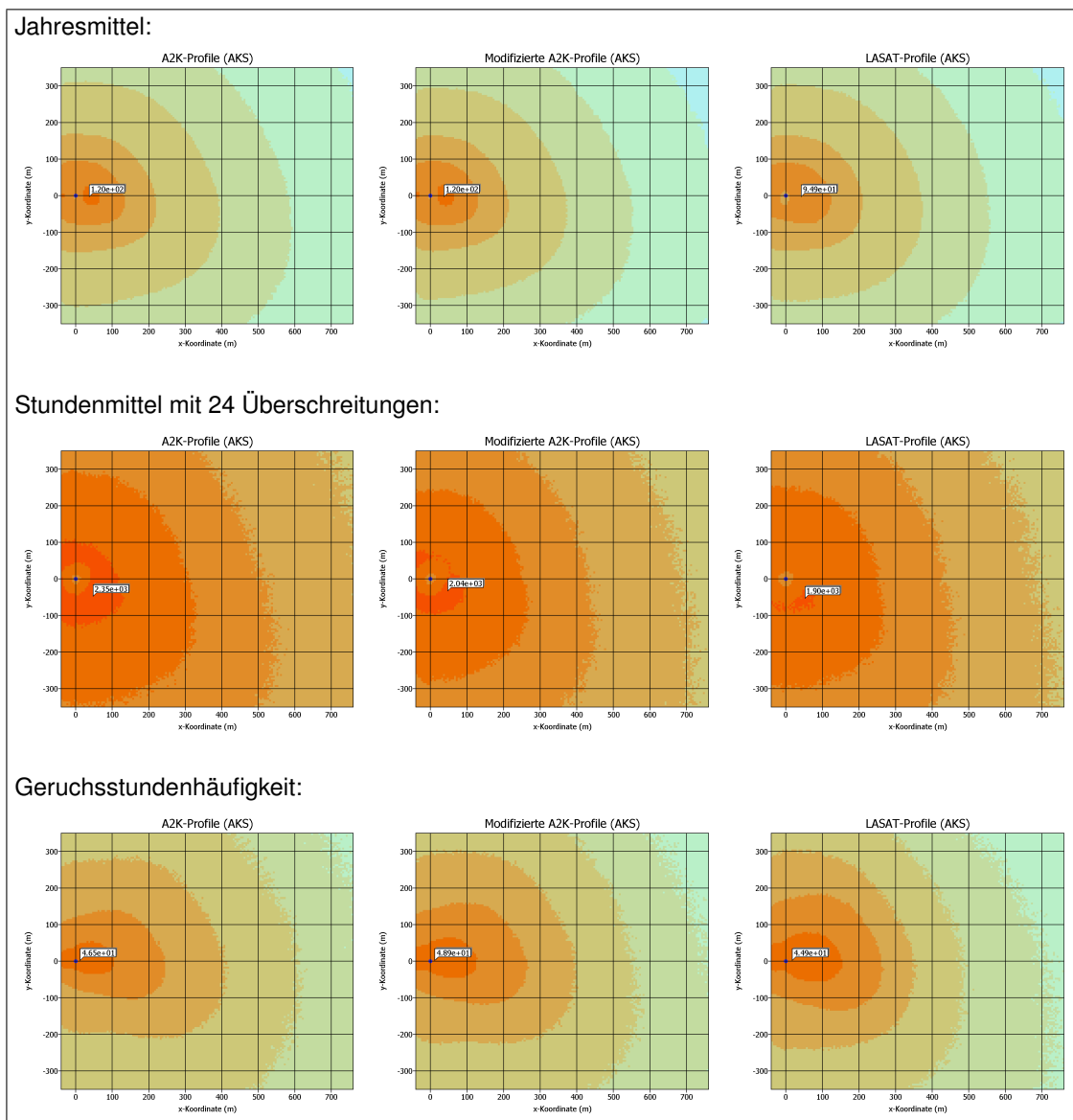


BILD A.20: Ergebnisse einer AKS-Rechnung für eine 10 m hohe passive Quelle mit dem aktuellen Ansatz VDI 3783 Blatt 8 (links), dem modifizierten Ansatz (Mitte) und dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT (rechts).

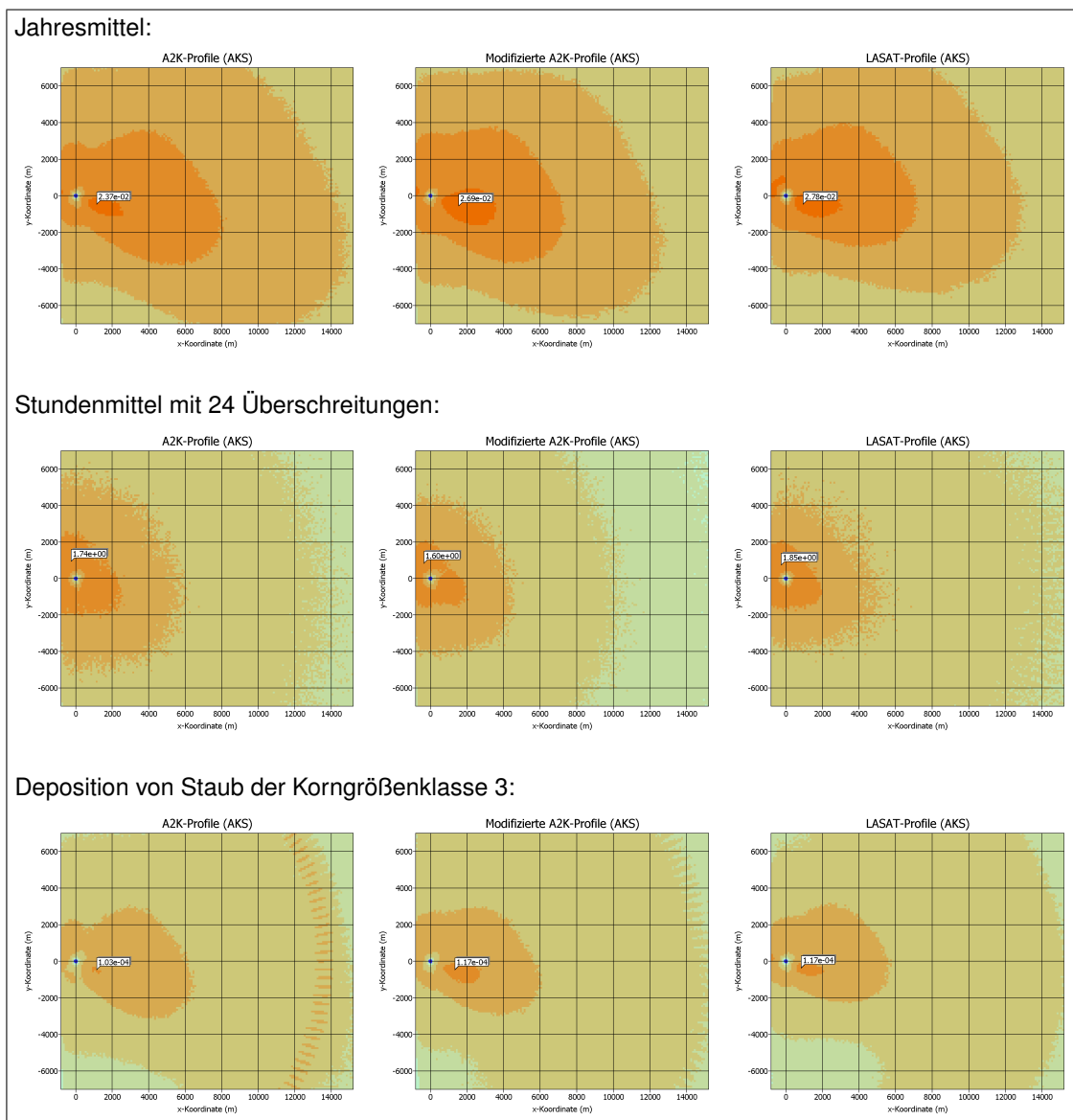


BILD A.21: Ergebnisse einer AKS-Rechnung für eine 200 m hohe passive Quelle mit dem aktuellen Ansatz VDI 3783 Blatt 8 (links), dem modifizierten Ansatz (Mitte) und dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT (rechts).

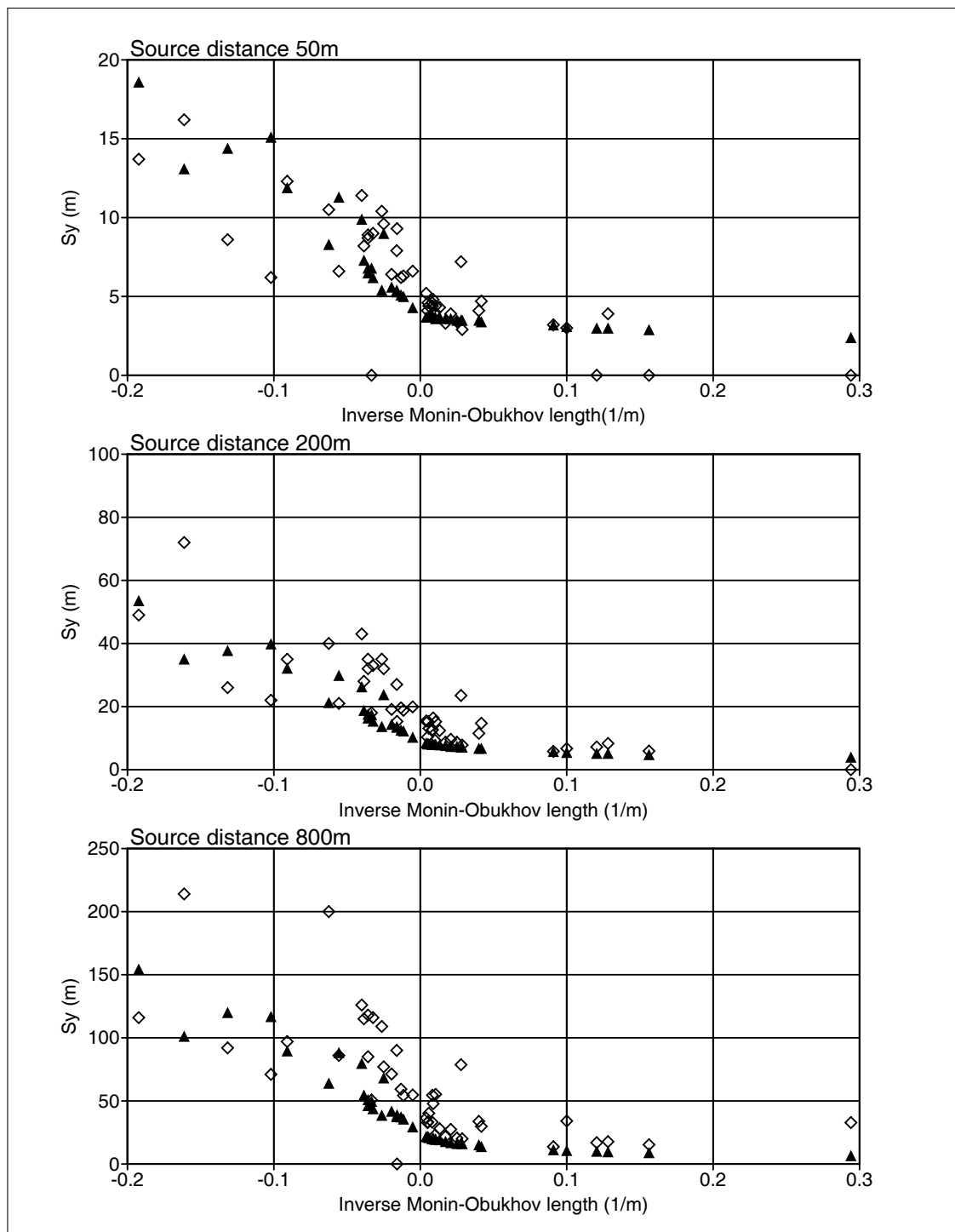


BILD A.22: Validierung anhand der Prairie-Gras-Experimente (aktuelles Grenzschichtmodell VDI 3783 Blatt 8). Dargestellt ist die Fahnenbreite als Funktion der inversen Monin-Obukhov-Länge für verschiedene Quellentfernungen (entspricht Bild 5 in Richtlinie VDI 3783 Blatt 5). Die offenen Symbole geben die Meßwerte, die gefüllten Symbole die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung wieder.



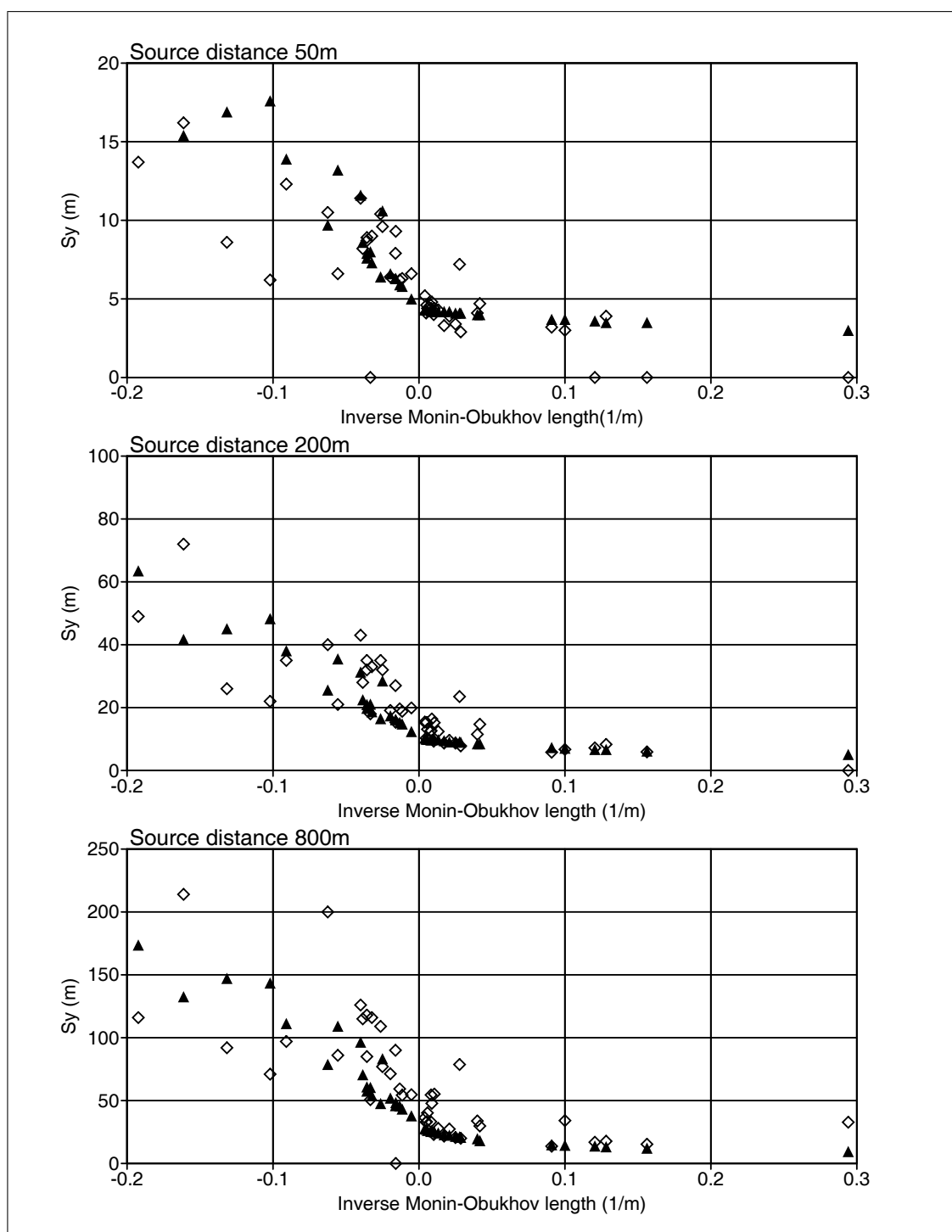


BILD A.23: Validierung anhand der Prairie-Gras-Experimente (modifiziertes Grenzschichtmodell VDI 3783 Blatt 8). Dargestellt ist die Fahnenbreite als Funktion der inversen Monin-Obukhov-Länge für verschiedene Quellentfernungen. Die offenen Symbole geben die Meßwerte, die gefüllten Symbole die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung wieder.

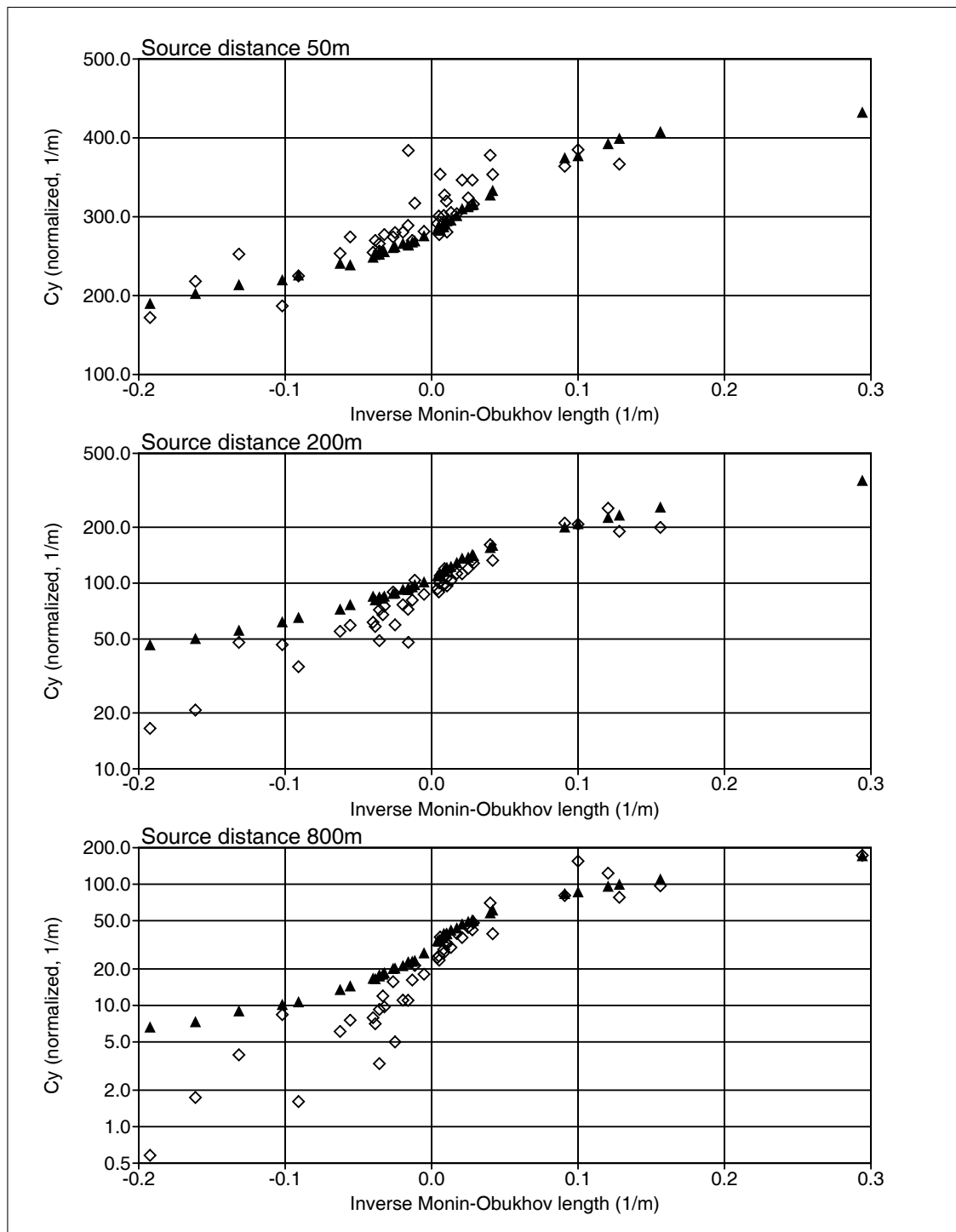


BILD A.24: Validierung anhand der Prairie-Gras-Experimente (aktuelles Grenzschichtmodell VDI 3783 Blatt 8). Dargestellt ist die skalierte, quer zur Fahne integrierte Konzentration als Funktion der inversen Monin-Obukhov-Länge für verschiedene Quellentfernungen (entspricht Bild 6 in Richtlinie VDI 3783 Blatt 5). Die offenen Symbole geben die Meßwerte, die gefüllten Symbole die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung wieder.

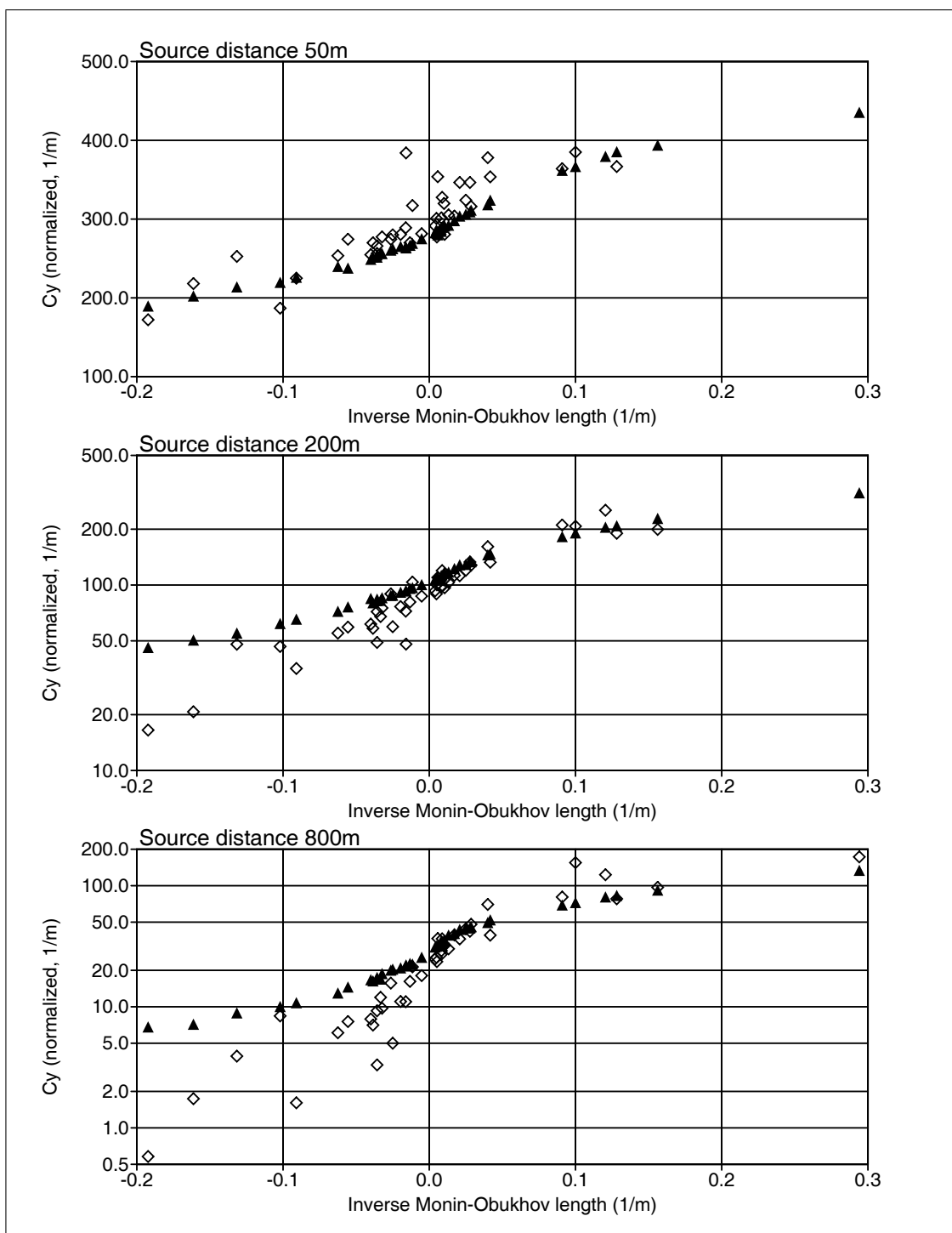


BILD A.25: Validierung anhand der Prairie-Gras-Experimente (modifiziertes Grenzschichtmodell VDI 3783 Blatt 8). Dargestellt ist die skalierte, quer zur Fahne integrierte Konzentration als Funktion der inversen Monin-Obukhov-Länge für verschiedene Quellentfernungen. Die offenen Symbole geben die Meßwerte, die gefüllten Symbole die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung wieder.

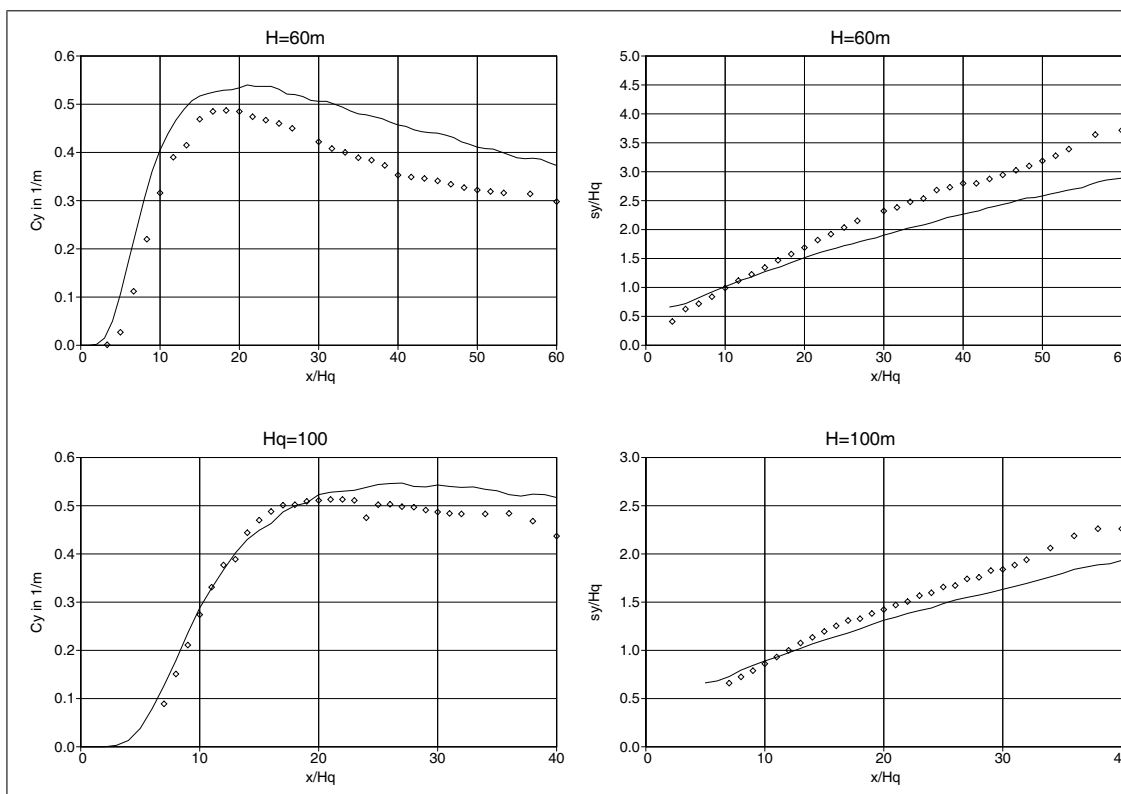


BILD A.26: Validierung anhand der Windkanalexperimente (aktuelles Grenzschichtmodell VDI 3783 Blatt 8). Dargestellt ist die skalierte, quer zur Fahne integrierte Konzentration (links) und die skalierte Fahnenbreite (rechts) für die Quellhöhen 60 m (oben ) und 100 m (unten). Die Symbole geben die Meßwerte, die Linien die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung wieder.

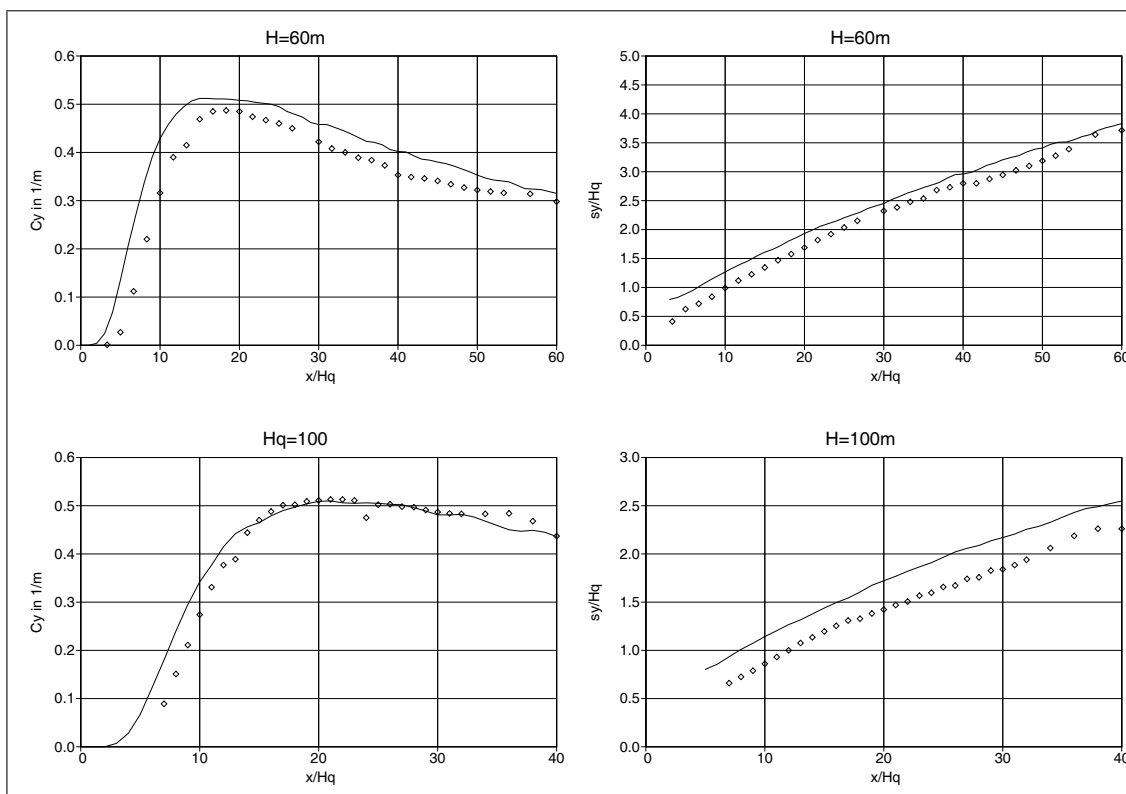


BILD A.27: Validierung anhand der Windkanalexperimente (modifiziertes Grenzschichtmodell VDI 3783 Blatt 8). Dargestellt ist die skalierte, quer zur Fahne integrierte Konzentration (links) und die skalierte Fahnenbreite (rechts) für die Quellhöhen 60 m (oben ) und 100 m (unten). Die Symbole geben die Meßwerte, die Linien die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung wieder.



## B KfK-Messungen zur Windrichtungsdrehung

Im folgenden ist die Auswertung der zeitabhängigen Windrichtungsdrehung für sämtliche KfK-Meßperioden grafisch dargestellt.

Für jede Meßperiode von 5 Stunden wurden die Vertikalprofile der relativen Windrichtung (bezogen auf den Wert in 200 m Höhe) für die 30 10-Minutenmittel und die 5 Stundenmittel grafisch dargestellt. Die nach den 4 Klassierungen bestimmten Stabilitätskategorien wurden über die Farbgebung der Verbindungslinien zwischen den Meßhöhen kodiert.

In jedem Teilbild sind links die 10-Minuten-Mittel, rechts die Stundenmittel aufgetragen. Die Breite zwischen zwei Meßintervallen entspricht einer Richtungsänderung von 40 Grad, die vertikale schwarze Linie markiert den Nullpunkt, also die Windrichtung in 200 m Höhe. Die Farben der einzelnen Höhensegmente kodieren die nach den verschiedenen KTA-Methoden bestimmte Schichtungsstabilität (rot: labil; gelb und grün: indifferent; blau: stabil).

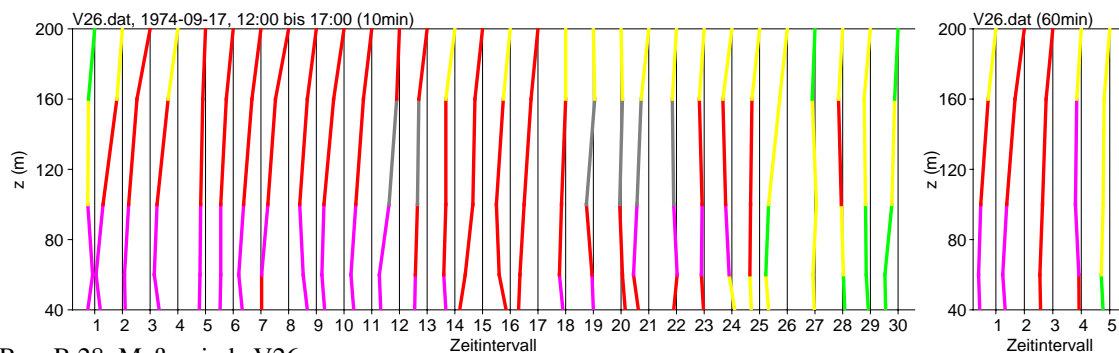


BILD B.28: Meßperiode V26.

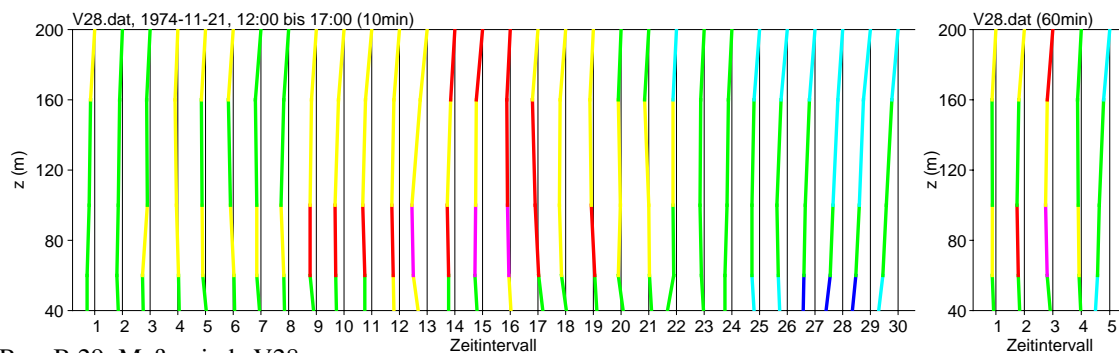


BILD B.29: Meßperiode V28.

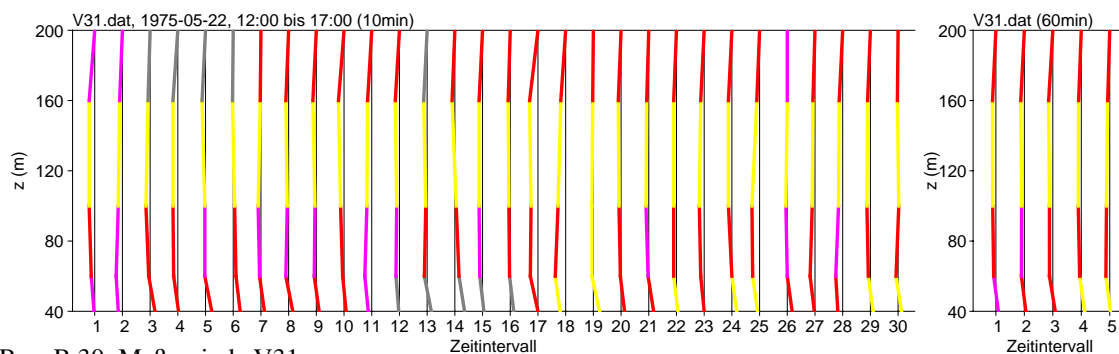


BILD B.30: Meßperiode V31.

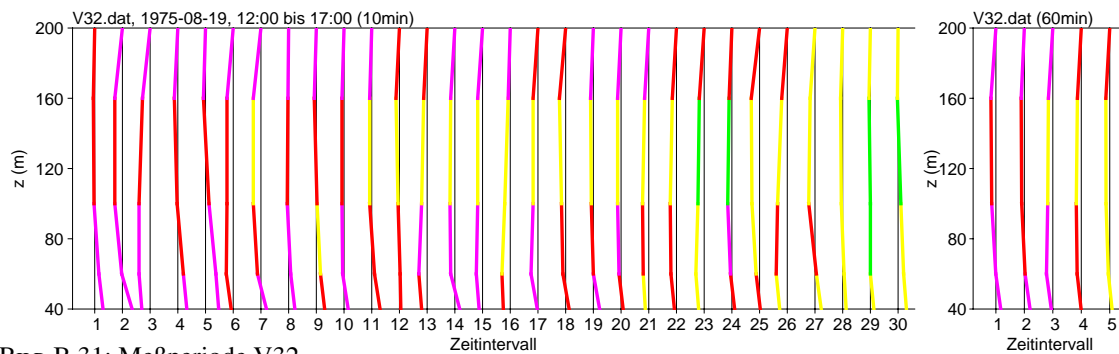


BILD B.31: Meßperiode V32.

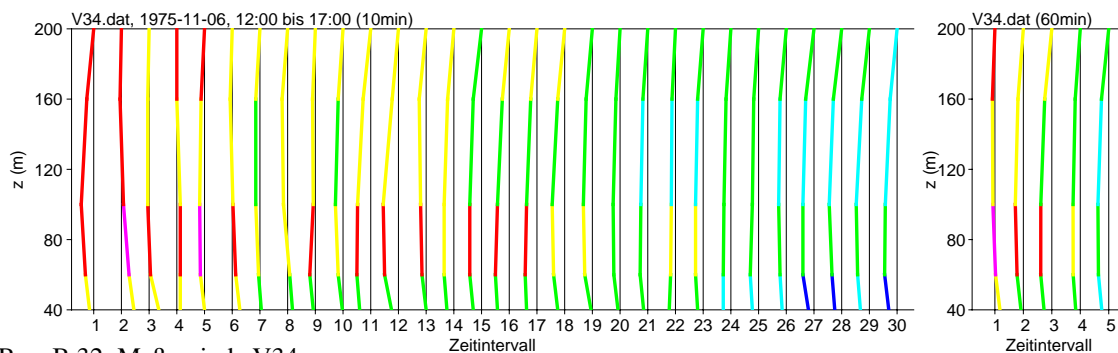


BILD B.32: Meßperiode V34.

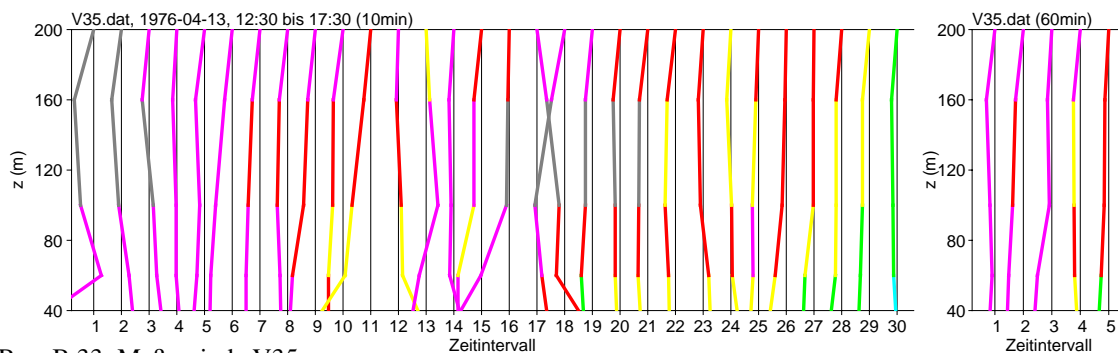


BILD B.33: Meßperiode V35.

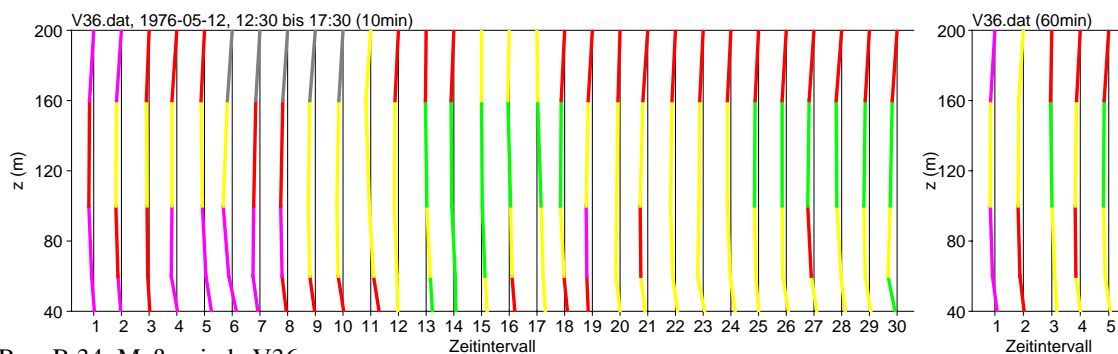


BILD B.34: Meßperiode V36.

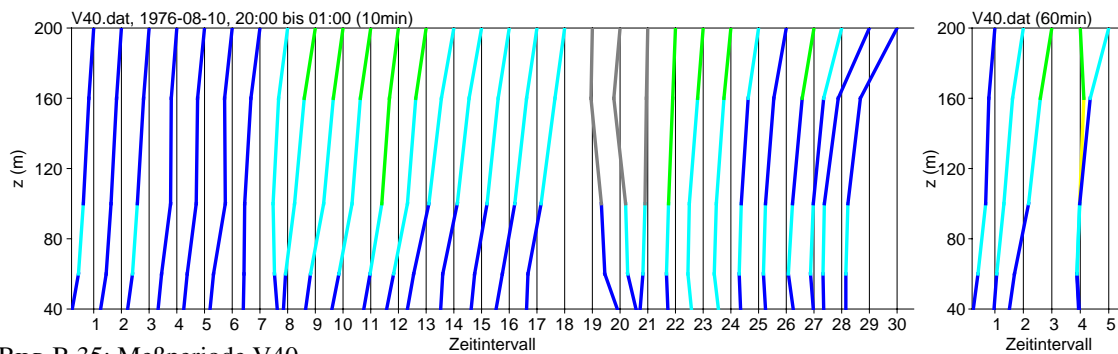


BILD B.35: Meßperiode V40.



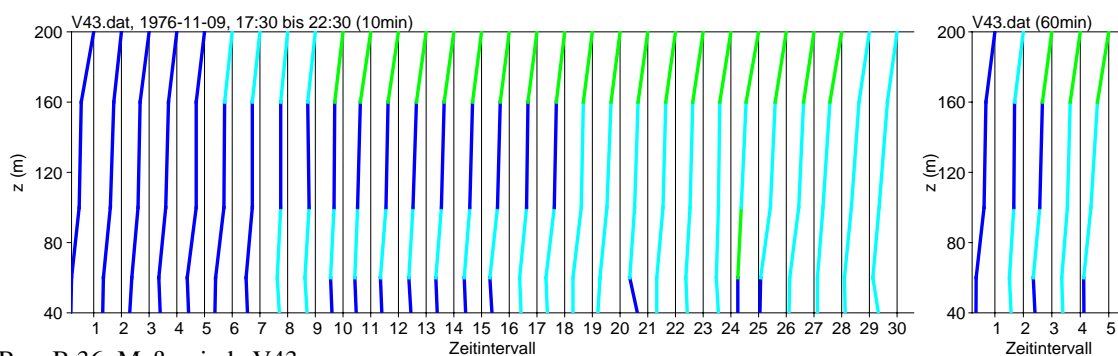


BILD B.36: Meßperiode V43.

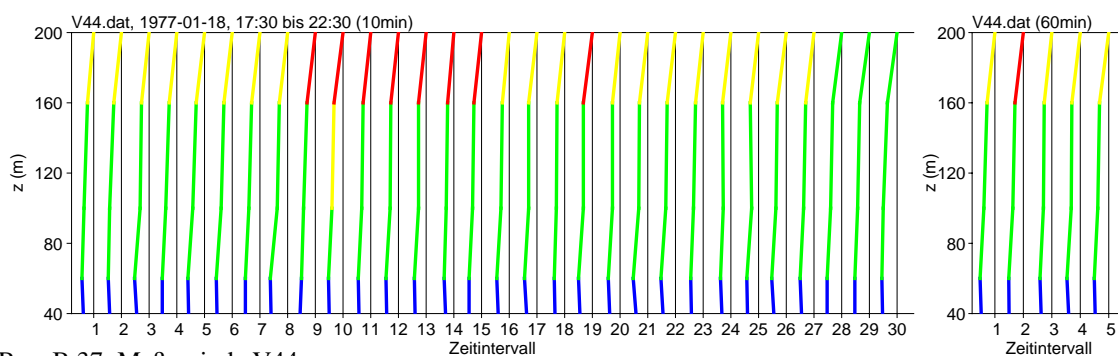


BILD B.37: Meßperiode V44.

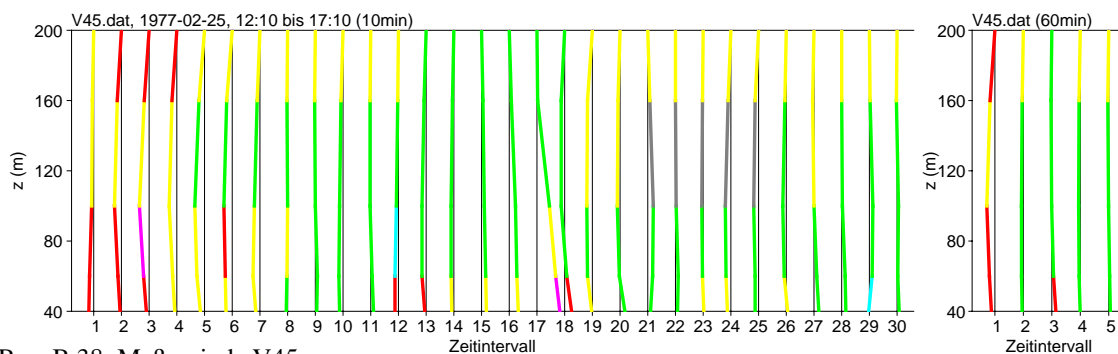


BILD B.38: Meßperiode V45.

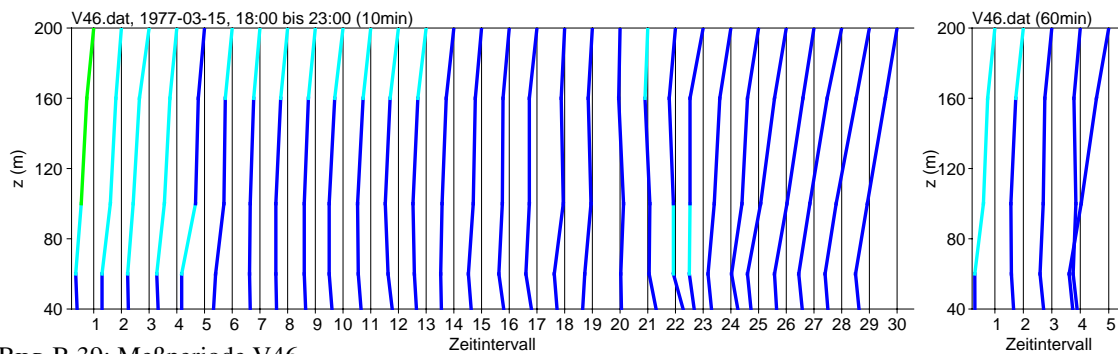


BILD B.39: Meßperiode V46.

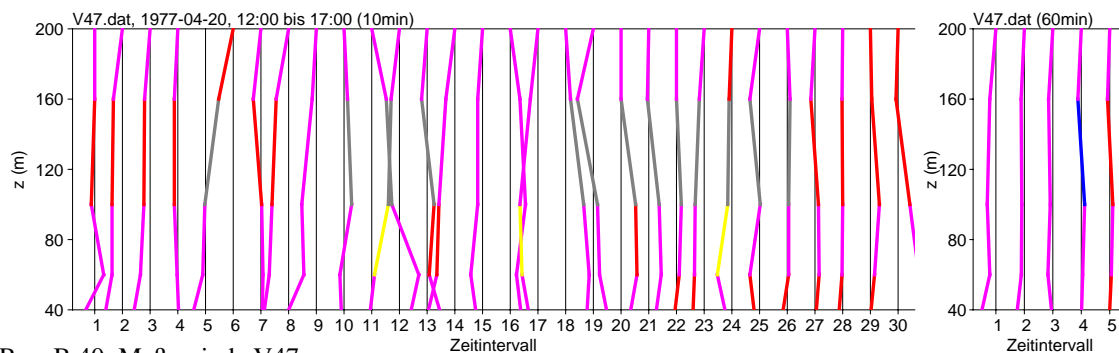


BILD B.40: Meßperiode V47.

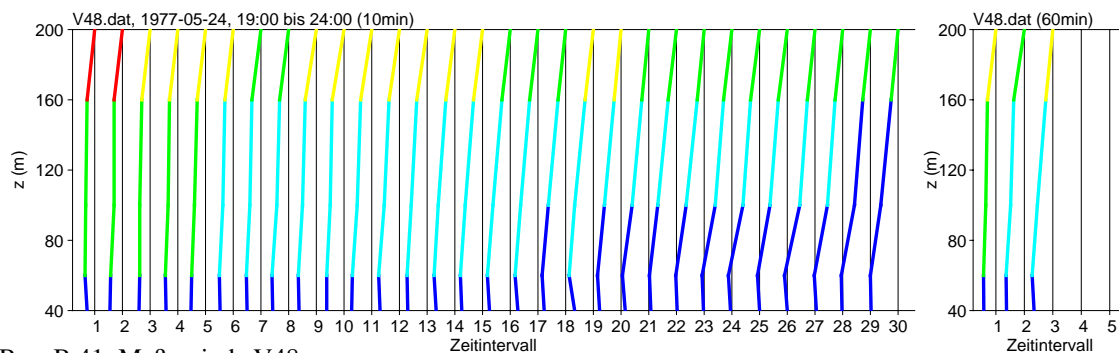


BILD B.41: Meßperiode V48.

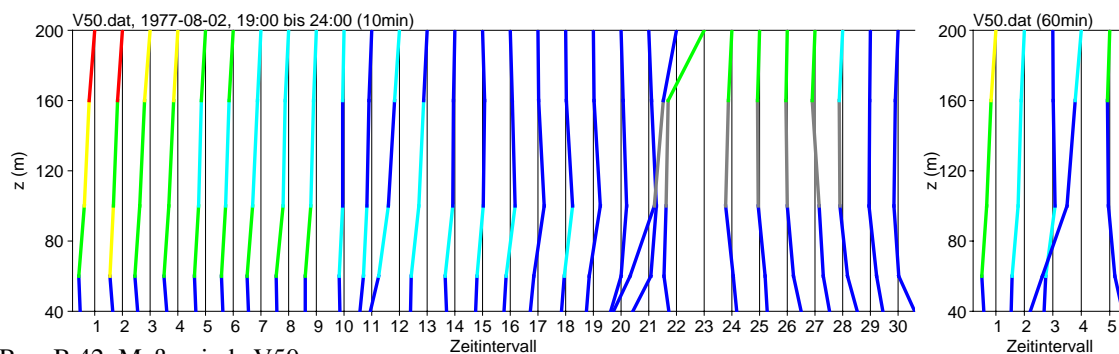


BILD B.42: Meßperiode V50.

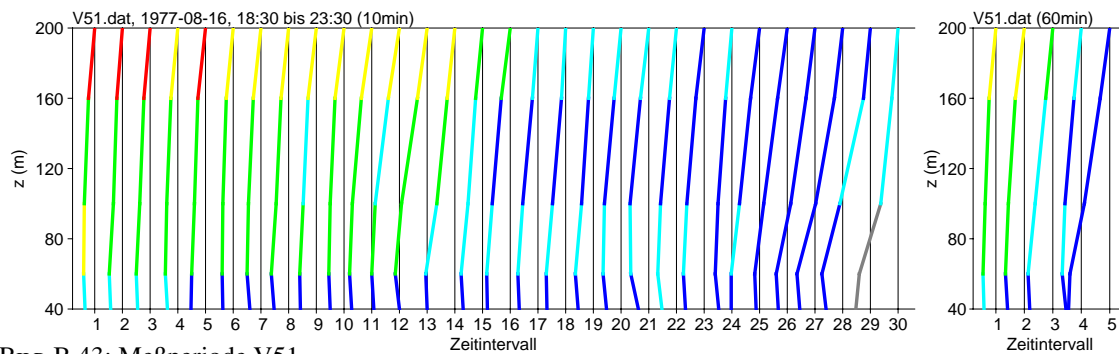


BILD B.43: Meßperiode V51.

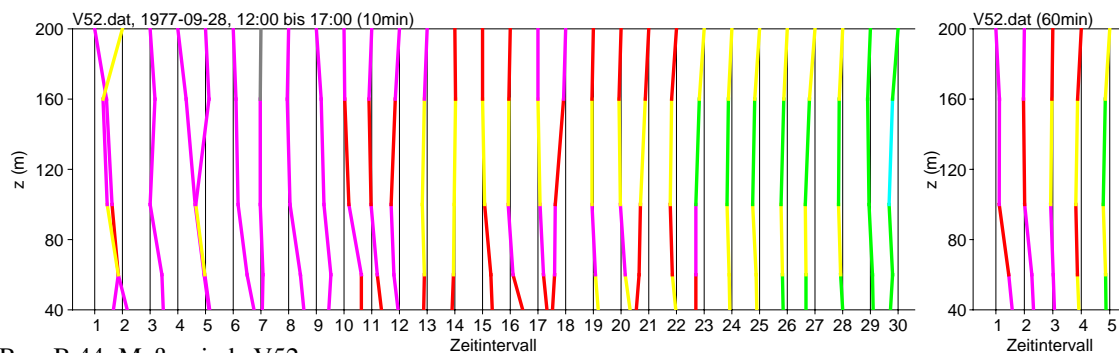


BILD B.44: Meßperiode V52.

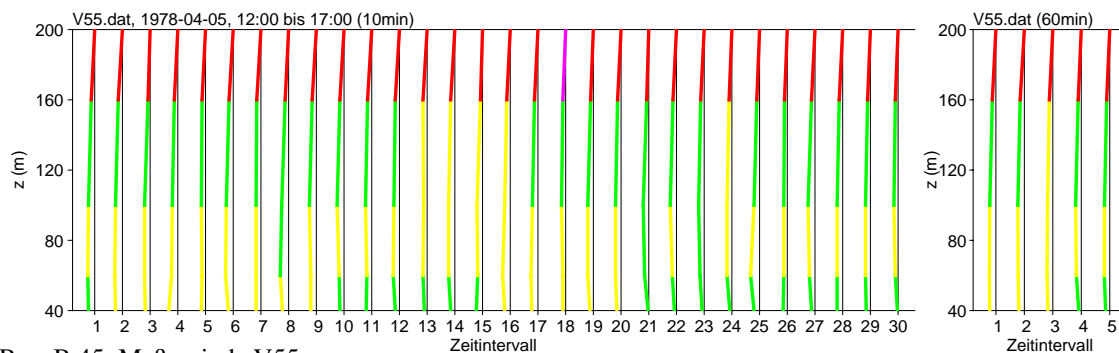


BILD B.45: Meßperiode V55.

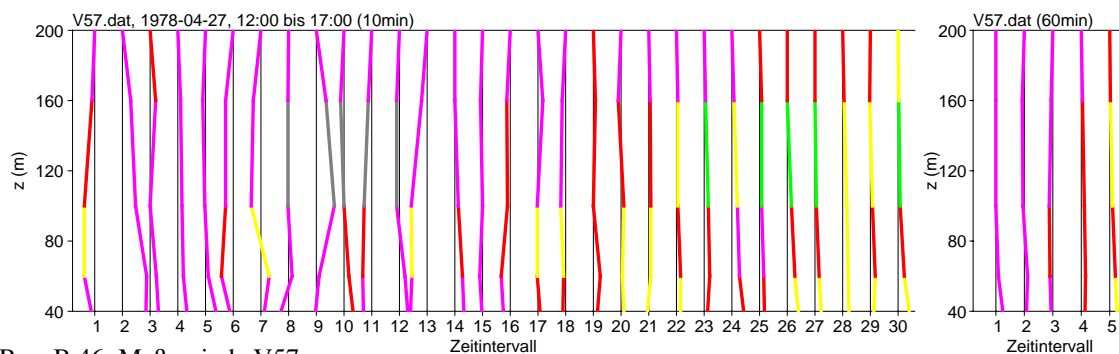


BILD B.46: Meßperiode V57.

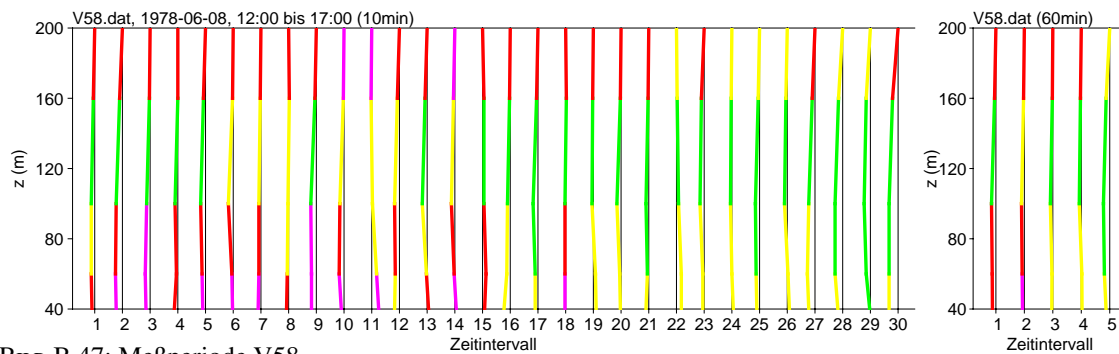


BILD B.47: Meßperiode V58.

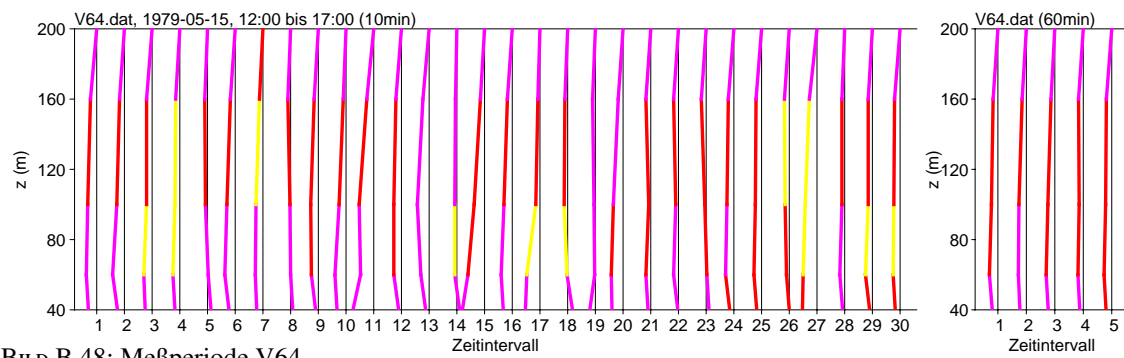


BILD B.48: Meßperiode V64.

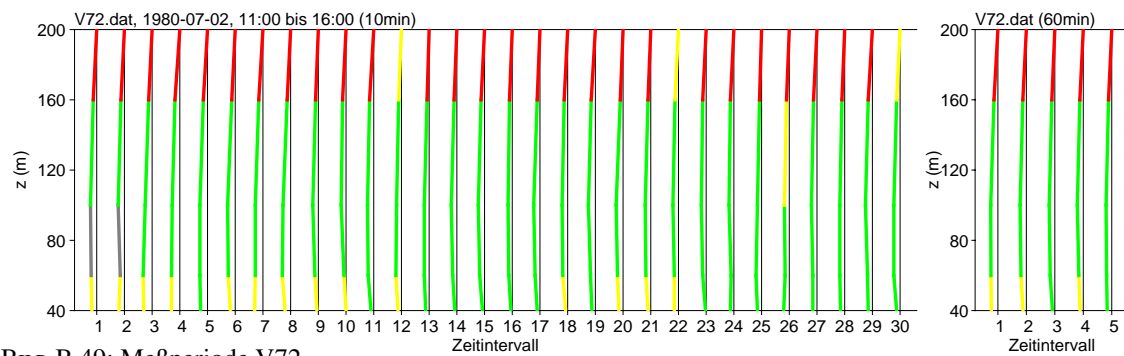


BILD B.49: Meßperiode V72.



## C Fahnenbreite und horizontaler Diffusionskoeffizient

Warum legt der Befund aus Windkanalmessungen, daß die Fahnenbreite im wesentlichen unabhängig von der Höhe ist, die Wahl  $K_v(z) \sim u(z)$  nahe?

Die Diffusionsgleichung für die Konzentration  $c(x, y, z)$  bei ebenem Gelände ohne Winddrehung und Vernachlässigung der Diffusion in Windrichtung lautet:

$$u(z) \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_v(z) \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_w(z) \frac{\partial c}{\partial z} \right] \quad (\text{C.31})$$

Es wird folgender Separationsansatz gemacht:

$$c(x, y, z) = f(x, y)g(x, z) \quad (\text{C.32})$$

Durch Einsetzen in die Diffusionsgleichung erhält man:

$$\frac{g(x, z)u(z)}{f(x, y)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) - L(z) \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) \right\} = -u(z) \frac{\partial}{\partial x} g(x, z) + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_w(z) \frac{\partial}{\partial z} g(x, z) \right] \quad (\text{C.33})$$

$$L(z) = K_v(z)/u(z) \quad (\text{C.34})$$

Diese Gleichung läßt sich lösen, wenn man die geschweifte Klammer zu Null und  $L(z) = \text{const}$ , also  $K_v(z) \sim u(z)$  setzt.<sup>34</sup>

Für  $f(x, y)$  erhält man so die bekannte Gauß-Glocke:

$$f(x, y) = \frac{f_0}{\sigma(x)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2(x)}\right) \quad (\text{C.35})$$

$$\sigma^2(x) = 2Lx \quad (\text{C.36})$$

Es bleibt dann nur noch die rechte Seite von (C.33) zu lösen, die eine Diffusionsgleichung in  $(x, z)$  darstellt.

<sup>34</sup>Streng genommen muß die geschweifte Klammer nicht unbedingt zu Null gesetzt werden, es reicht, wenn sie gleich  $f(x, y)h(x, z)$  mit einer beliebigen Funktion  $h(x, z)$  ist. Wenn man dies weiterverfolgt, sieht es aber so aus, als ob keine Fahnenlösung möglich ist, die für große Werte von  $y$  verschwindet.

## D Geschwindigkeitsfluktuationen und Mittelungszeit

Die horizontalen Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_v$  des Strömungsfeldes quer zur mittleren Strömungsrichtung bestimmen die horizontale Breite der Konzentrationsfahne und ihre Mäanderbewegung.

Erfahrungen zu Geschwindigkeitsfluktuationen und ihrer Parametrisierung im Rahmen von Grenzschichtmodellen liegen aufgrund der Anforderungen der TA Luft vor allem für längere Mittelungszeiten von typischerweise einer Stunde vor. Um für kürzere Mittelungszeiten einen quantitativen Eindruck von der Größe der Geschwindigkeitsfluktuationen und ihrer Abhängigkeit von der Mittelungszeit zu bekommen, wurden im Rahmen des Projektes ESOFIN (im Auftrag des LANUV NRW) Meßreihen von Ultraschall-Anemometern für verschiedene Standorte ausgewertet.

Die Mittelungszeit, mit der die Meßdaten erhoben wurden, und die Meßdauer (als Summe über sämtliche Meßperioden) betragen

Standort	Mittelungszeit	Gesamtdauer
Telgte	600 s	134 Tage
Dülmen	60 s	17 Stunden
Ölmühle	60 s	13 Stunden
Uttenweiler	10 s	15 Stunden

In Grenzschichtmodellen wird  $\sigma_v$  proportional zur Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  gesetzt.<sup>35</sup> Man könnte also einfach die gemessenen Werte von  $\sigma_v$  gegen die gemessenen Werte von  $u_*$  auftragen, um den Proportionalitätsfaktor zu bestimmen. Jedoch ist die Messung von  $u_*$  mit Unsicherheiten behaftet und in der Praxis hat es sich oft als robuster erwiesen, anstelle von  $u_*$  die gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_w$  zu betrachten.

Auch  $\sigma_w$  sollte proportional zu  $u_*$  sein, der Proportionalitätsfaktor  $f_w$  hat nach den Grenzschichtansätzen von LASAT<sup>36</sup> und VDI 3783 Blatt 8 den Wert 1.3. Bild D.50 zeigt für die verschiedenen Standorte  $\sigma_w$  aufgetragen gegen  $u_*$ , einmal für 10-Minuten-Mittel und einmal für Stundenmittel.<sup>37</sup> Für Telgte sind die Originalwerte bereits 10-Minuten-Mittel, sonst wurde die Mittelbildung wie in Anhang F beschrieben durchgeführt.

Für Dülmen und Uttenweiler geben die Meßwerte sehr gut den Ansatz  $f_w = 1.3$  (durchgezogene Linie) wieder. Für Telgte und Ölmühle streuen die Werte stärker (es kommen auch systematisch negative Werte von  $u_*$  vor), bis auf wenige Ausnahmen ist der Wert 1.3 eine untere Grenze für den Proportionalitätsfaktor. Eine systematische Abhängigkeit von der Mittelungszeit ist nicht erkennbar.

<sup>35</sup>Eine Abhängigkeit von der Meßhöhe kann für bodennahe Messungen und nicht zu stabile Schichtung sowohl für  $\sigma_v$  als auch für  $\sigma_w$  vernachlässigt werden.

<sup>36</sup>JANICKE, L., JANICKE, U. (2000): *Vorschlag eines meteorologischen Grenzschichtmodells für Lagrangesche Ausbreitungsmodelle*. Berichte zur Umweltphysik Nummer 2, Auflage 1, Ingenieurbüro Janicke, ISSN 1439-8222.

<sup>37</sup>Die 1-Minuten-Mittel zeigen ein ähnliches Verhalten, streuen allerdings sehr stark.

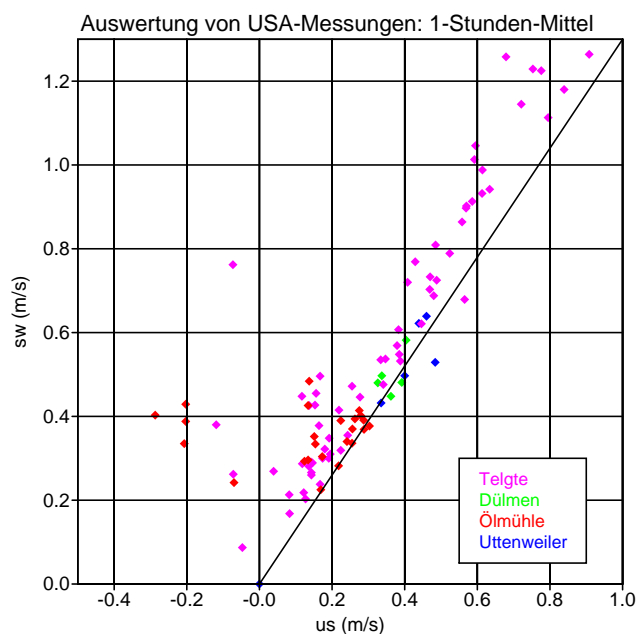
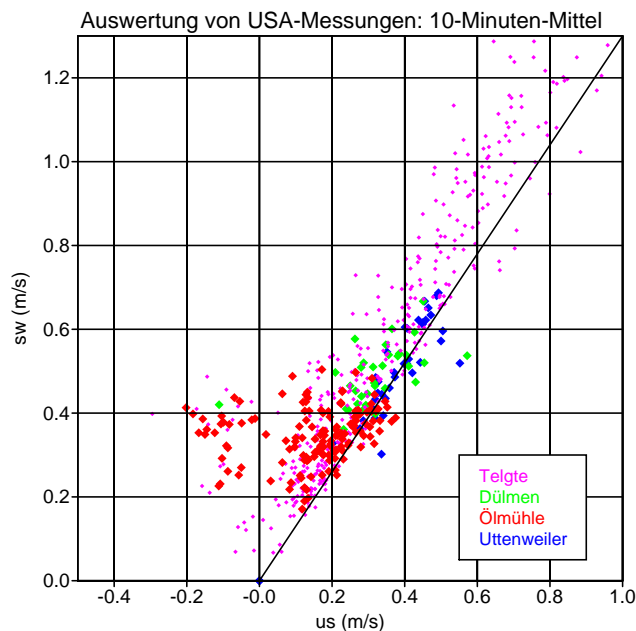


BILD D.50: Auswertung von USA-Messungen. Für unterschiedliche Meßstandorte ist der Durchschnittswert von  $\sigma_w$  gegen den Durchschnittswert von  $u_*$  für die Mittelungszeiten 10 Minuten und eine Stunde aufgetragen. Die durchgezogene Linie gibt die Beziehung  $\sigma_v = 1.3u_*$  wieder. Für Telgte sind die Originalwerte bereits 10-Minuten-Mittel, sonst wurde die Mittelbildung wie in Anhang F beschrieben durchgeführt.

Nachdem die Beziehung  $u_* = \sigma_w / f_w$  mit  $f_w = 1.3$  anhand der Messwerte gut belegt ist,<sup>38</sup> kann der Proportionalitätsfaktor  $f_v = \sigma_v / u_*$  bestimmt werden als  $\sigma_v / (\sigma_w / 1.3)$  mit den aus den Meßdaten gewonnenen Werten von  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  für verschiedene Mittelungszeiten. Das Ergebnis ist in Bild D.51 dargestellt. Mit eingezeichnet ist die Parametrisierung nach dem LASAT-Grenzschichtmodell,  $\sigma_v = f_v (\bar{t} / 3600 \text{ s})^{0.2} u_*$  mit der Mittelungszeit  $\bar{t}$ .

Der Durchschnittswert liegt für das Stundenmittel bei  $f_v = 2.4$  und damit über dem Standardwert von LASAT ( $f_v = 2.0$ ) und noch deutlicher über dem Wert nach VDI 3783 Blatt 8 ( $f_v = 1.8$ ). Auch die Hamburger Meßdaten legen einen Wert von  $f_v > 2.0$  nahe, siehe Bild D.52.

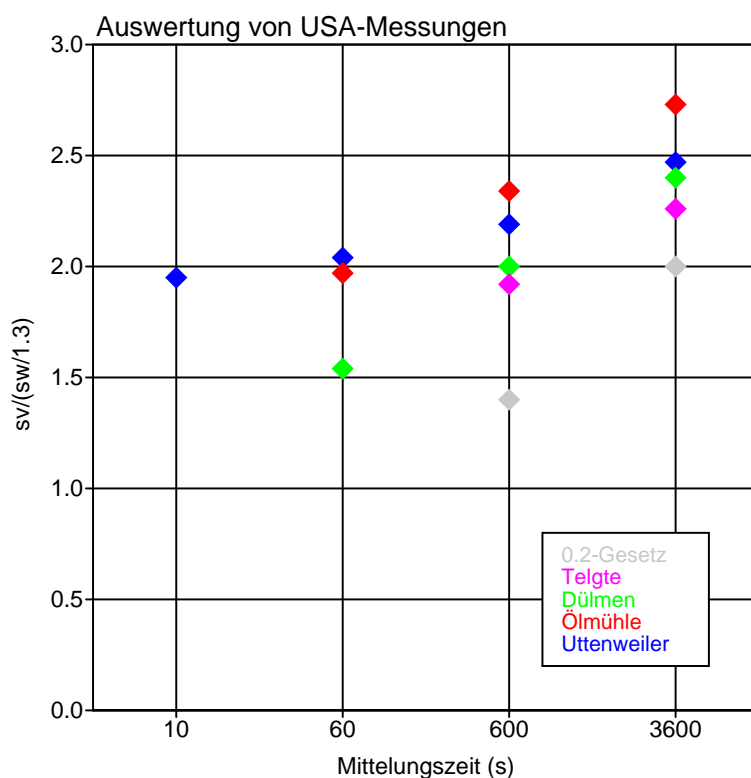


BILD D.51: Auswertung von USA-Messungen. Für unterschiedliche Meßstandorte ist der Durchschnittswert von  $\sigma_v / (\sigma_w / 1.3)$  für verschiedene Mittelungszeiten dargestellt.

Würde man im Standard-Grenzschichtmodell von LASAT den Wert von  $f_v$  gemäß dieser Befunde anpassen, hätte das hauptsächlich eine Auswirkung im Nahbereich der Quelle, wo die Fahnenbreite proportional zu  $\sigma_v$  ist. Anders sieht es bei Verwendung des Grenzschichtmodells nach VDI 3783 Blatt 8 aus: Hier ist der horizontale Diffusionskoeffizient  $K_v \propto \sigma_v^4$ , so daß sich auch im Fernbereich, wo die Fahnenbreite proportional zu  $\sqrt{K_v}$  ist, eine deutliche Änderung ergibt.

Auch die Hamburger Meßdaten wurden bezüglich der Abhängigkeit von  $\sigma_v$  von der Mittelungszeit ausgewertet. Die Mittelwerte von  $\sigma_v$  in der Höhe 50 m für Mittelungszeiten zwischen 5 Minuten und 60 Minuten sind in Bild D.53 getrennt für die drei Richtungssektoren und die unterschiedlichen Stabilitätsgruppen dargestellt.

<sup>38</sup>Für die Standorte Dülmen und Telgte zumindest als untere Grenze, wobei Werte  $f_w$  größer als 1.3 in der folgenden Auswertung auf noch größere Werte von  $f_v$  führen.



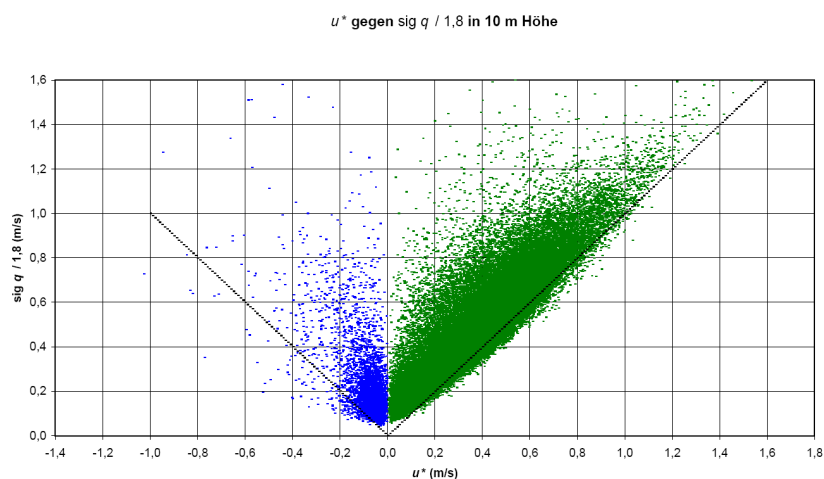


BILD D.52: Auswertung der Hamburger Meßdaten (Stundenmittel). Dargestellt ist der Wert  $\sigma_v/1.8$  als Funktion der gemessenen Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  (Werte in 10 m Höhe über Grund).

Die Abhängigkeit von der Mittelungszeit  $\bar{t}$  beträgt für die Hamburger Meßdaten im Mittel über alle Fälle  $(\bar{t})^{0.13}$ , was gut mit den USA-Auswertungen in Bild D.51 übereinstimmt und eine etwas kleinere Zeitabhängigkeit impliziert als sie im Standard-Grenzschichtmodell von LASAT implementiert ist.

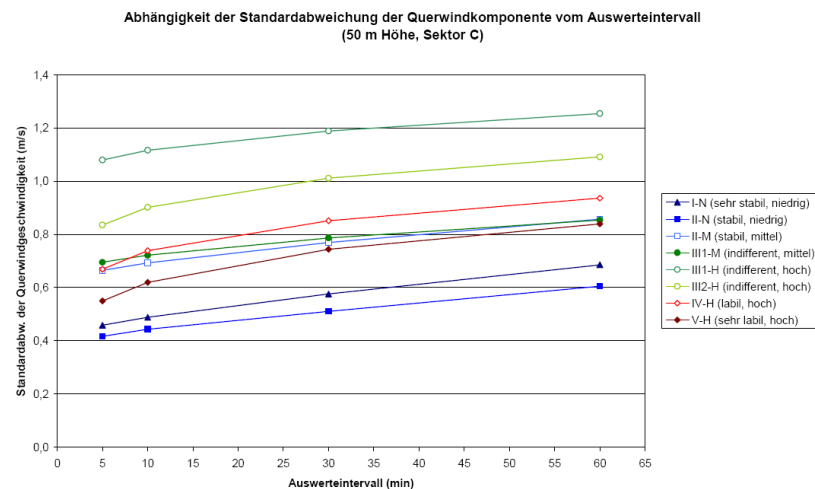
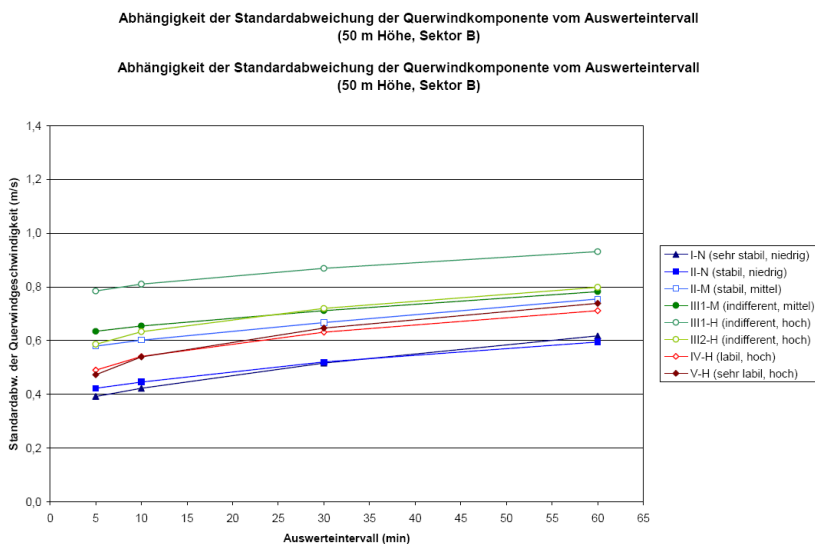
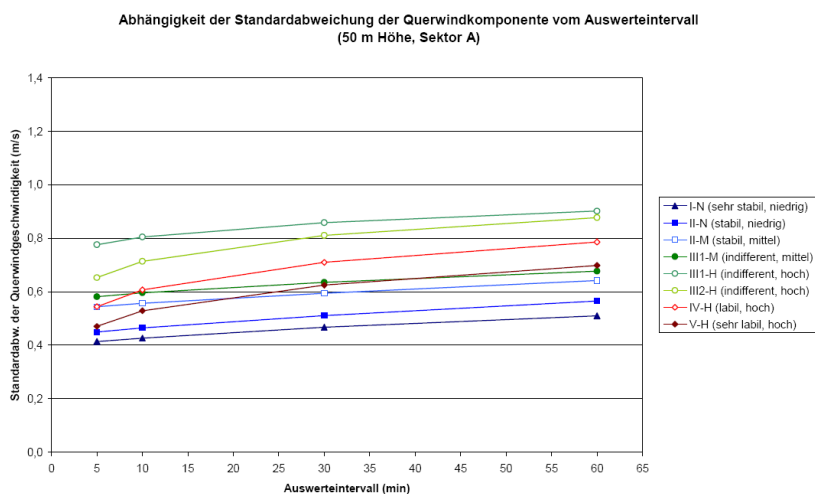


BILD D.53: Abhängigkeit der Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_v$  von der Mittelungszeit (Auswertintervall) für die Hamburger Meßdaten (Grafiken aus dem Abschlußbericht der Universität Hamburg).

## E Übertragung der Monin-Obukhov-Länge

Für die Monin-Obukhov-Länge  $L_M$  gilt

$$L_M(z_0) \propto u_*^3 / q_3 \quad (\text{E.37})$$

mit der Rauigkeitslänge  $z_0$ , der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  und dem vertikalen Wärmestrom  $q_3$ . Das Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit hat die Form

$$u(z) = u_* f(z; L_M, z_0), \text{ insbesondere} \quad (\text{E.38})$$

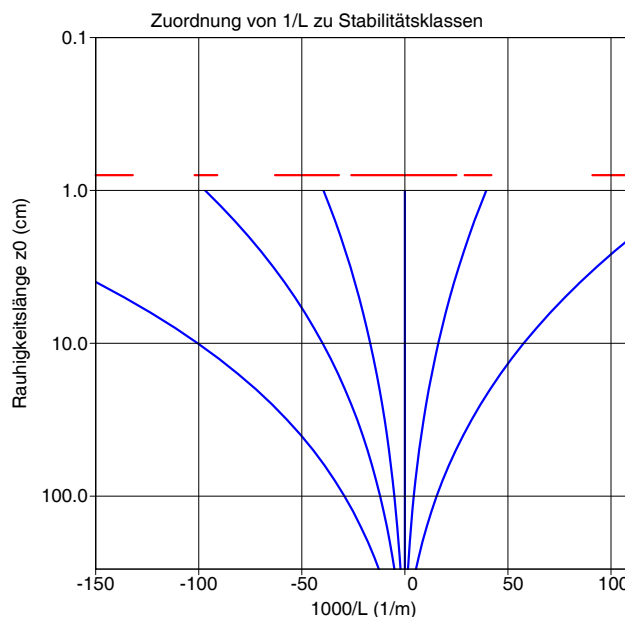
$$u_a = u_* f(h_a; L_M, z_0). \quad (\text{E.39})$$

Variiert man  $z_0$  und hält dabei  $q_3$  und  $u_a$  konstant, dann ist

$$L_M(z_0) f^3(h_a; L_M, z_0) = \text{const.} \quad (\text{E.40})$$

Ist also der Wert von  $L_M$  für einen Wert von  $z_0$  gegeben (z.B. gemessen), kann hieraus die Abhängigkeit  $L_M(z_0)$  bestimmt werden.

Für die Bestimmung der Werte nach TA Luft wurde als Bezugshöhe  $h_a$  der Wert 80 m verwendet. Das folgende Bild zeigt den Verlauf von  $L_M(z_0)$ , wobei für die 6 Stabilitätsklassen die Werte von  $L_M$  für die Rauigkeitslänge 1.5 m vorgegeben wurden. Die roten Linien kennzeichnen die Bereiche, in denen bei den Prairie-Grass-Experimenten mit  $z_0 = 0.8 \text{ cm}$  die Stabilitätsklassen A, B, C, D, E, F (von links nach rechts) ausgewiesen wurden.





## F Berechnung der Geschwindigkeitsfluktuationen

Sei  $\mathcal{S}$  das mit dem Sensorsystem verknüpfte Koordinatensystem. Die in diesem System gemessenen Geschwindigkeitskomponenten  $x$ ,  $y$  und  $z$  bilden einen Vektor  $\mathbf{s}$ :

$$\mathbf{s} = (x, y, z) \quad (\text{F.41})$$

Der Mittelwert sei  $\bar{\mathbf{s}}$ , die Abweichung vom Mittelwert sei  $\mathbf{s}'$ :

$$\bar{\mathbf{s}} = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \quad (\text{F.42})$$

$$\mathbf{s}' = \mathbf{s} - \bar{\mathbf{s}} \quad (\text{F.43})$$

$$= (x', y', z') = (x - \bar{x}, y - \bar{y}, z - \bar{z}) \quad (\text{F.44})$$

Das natürliche Koordinatensystem  $\mathcal{N}$  mit seinen drei Einheits-Vektoren  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{v}$  und  $\mathbf{w}$  ist dadurch definiert, daß  $\mathbf{u}$  in Richtung der mittleren Geschwindigkeit zeigt,  $\mathbf{v}$  horizontal senkrecht zu  $\mathbf{u}$  steht und  $\mathbf{w}$  senkrecht auf beiden steht:

$$\mathbf{u} = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})/U \quad (\text{F.45})$$

$$\mathbf{v} = (-\bar{y}, \bar{x}, 0)/V \quad (\text{F.46})$$

$$\mathbf{w} = (-\bar{x}\bar{z}, -\bar{y}\bar{z}, V^2)/(UV) \quad (\text{F.47})$$

$$U = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2} \quad (\text{F.48})$$

$$V = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (\text{F.49})$$

Mit dieser Definition haben  $\mathcal{S}$  und  $\mathcal{N}$  die gleiche Orientierung.

Die Streuungen  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  sind die Geschwindigkeitsfluktuationen in  $\mathbf{u}$ -,  $\mathbf{v}$ - bzw.  $\mathbf{w}$ -Richtung. Man erhält sie aus dem Tensor  $\mathbf{M}$  der Kovarianzen durch Projektion auf die verschiedenen Richtungen:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \overline{x'x'} & \overline{x'y'} & \overline{x'z'} \\ \overline{x'y'} & \overline{y'y'} & \overline{y'z'} \\ \overline{x'z'} & \overline{y'z'} & \overline{z'z'} \end{pmatrix} \quad (\text{F.50})$$

$$\sigma_u^2 = \mathbf{u} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{u} \quad (\text{F.51})$$

$$\sigma_v^2 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{v} \quad (\text{F.52})$$

$$\sigma_w^2 = \mathbf{w} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{w} \quad (\text{F.53})$$

Setzt man die Darstellung der Vektoren im  $\mathcal{S}$ -System ein, dann erhält man

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{U^2} \left[ \overline{x'x'} \bar{x}^2 + \overline{y'y'} \bar{y}^2 + \overline{z'z'} \bar{z}^2 + 2\overline{x'y'} \bar{x}\bar{y} + 2\overline{x'z'} \bar{x}\bar{z} + 2\overline{y'z'} \bar{y}\bar{z} \right] \quad (\text{F.54})$$

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{V^2} \left[ \overline{x'x'} \bar{y}^2 - 2\overline{x'y'} \bar{x}\bar{y} + \overline{y'y'} \bar{x}^2 \right] \quad (\text{F.55})$$

$$\sigma_w^2 = \frac{1}{U^2 V^2} \left[ \overline{x'x'} \bar{x}^2 \bar{z}^2 + \overline{y'y'} \bar{y}^2 \bar{z}^2 + \overline{z'z'} V^4 + 2\overline{x'y'} \bar{x}\bar{y}\bar{z}^2 - 2\overline{x'z'} \bar{x}\bar{z} V^2 - 2\overline{y'z'} \bar{y}\bar{z} V^2 \right] \quad (\text{F.56})$$



Durch Einsetzen läßt sich leicht nachvollziehen, daß die Spur von  $\mathbf{M}$  gegenüber Drehungen invariant ist:

$$\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2 = \overline{x'x'} + \overline{y'y'} + \overline{z'z'} \quad (\text{F.57})$$

Die Gleichungen für  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  ändern sich nicht, wenn  $\mathcal{S}$  und  $\mathcal{N}$  nicht die gleiche Orientierung haben. Ändert man beispielsweise die Orientierung von  $\mathcal{N}$  dadurch, daß man den Vektor  $\mathbf{v}$  in der entgegengesetzten Richtung festlegt, also die rechte Seite von Gleichung (F.46) mit -1 multipliziert, dann bleibt trotzdem der Ausdruck  $\mathbf{v} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{v}$  unverändert.

Die Kovarianzen für einen längeren Zeitraum,  $\overline{I'J'}$  mit  $I, J = X, Y, Z$ , berechnen sich aus den gegebenen Kovarianzen  $\overline{i'j'}$  mit  $i, j = x, y, z$  durch folgende Mittelbildung:

$$\overline{I'J'} = \langle ij \rangle - \langle i \rangle \langle j \rangle \quad (\text{F.58})$$

$$= \langle \overline{i'j'} \rangle + \langle \overline{i} \overline{j} \rangle - \langle \overline{i} \rangle \langle \overline{j} \rangle \quad (\text{F.59})$$

Hieraus können wieder gemäß Gleichungen (F.54) bis (F.56) die Geschwindigkeitsfluktuationen im natürlichen Koordinatensystem bestimmt werden.

Die Schubspannungsgeschwindigkeit ergibt sich aus der Kovarianz  $\overline{u'w'}$ ,

$$u_* = \begin{cases} \sqrt{-\overline{u'w'}} & \text{für } \overline{u'w'} < 0 \\ -\sqrt{\overline{u'w'}} & \text{für } \overline{u'w'} > 0 \end{cases} \quad (\text{F.60})$$

Für das Mittel über einen längeren Zeitraum gilt entsprechend

$$\overline{U'W'} = \langle \overline{u'w'} \rangle + \langle \overline{u} \overline{w} \rangle - \langle \overline{u} \rangle \langle \overline{w} \rangle \quad (\text{F.61})$$

Bei korrekter Durchführung der Mittelbildung sind z.B. bei Vorgabe einer Zeitreihe von 10-Sekunden-Mitteln die hieraus berechneten Stundenmittel der Geschwindigkeitsfluktuationen unabhängig davon, ob sie direkt aus den 10-Sekunden-Mitteln berechnet werden oder ob aus den 10-Sekunden-Mitteln zuerst 1-Minuten-Mittel bestimmt und hieraus dann die Stundenmittel berechnet werden.

## G Validierungstests mit dem Standard-Grenzschichtmodell von LASAT

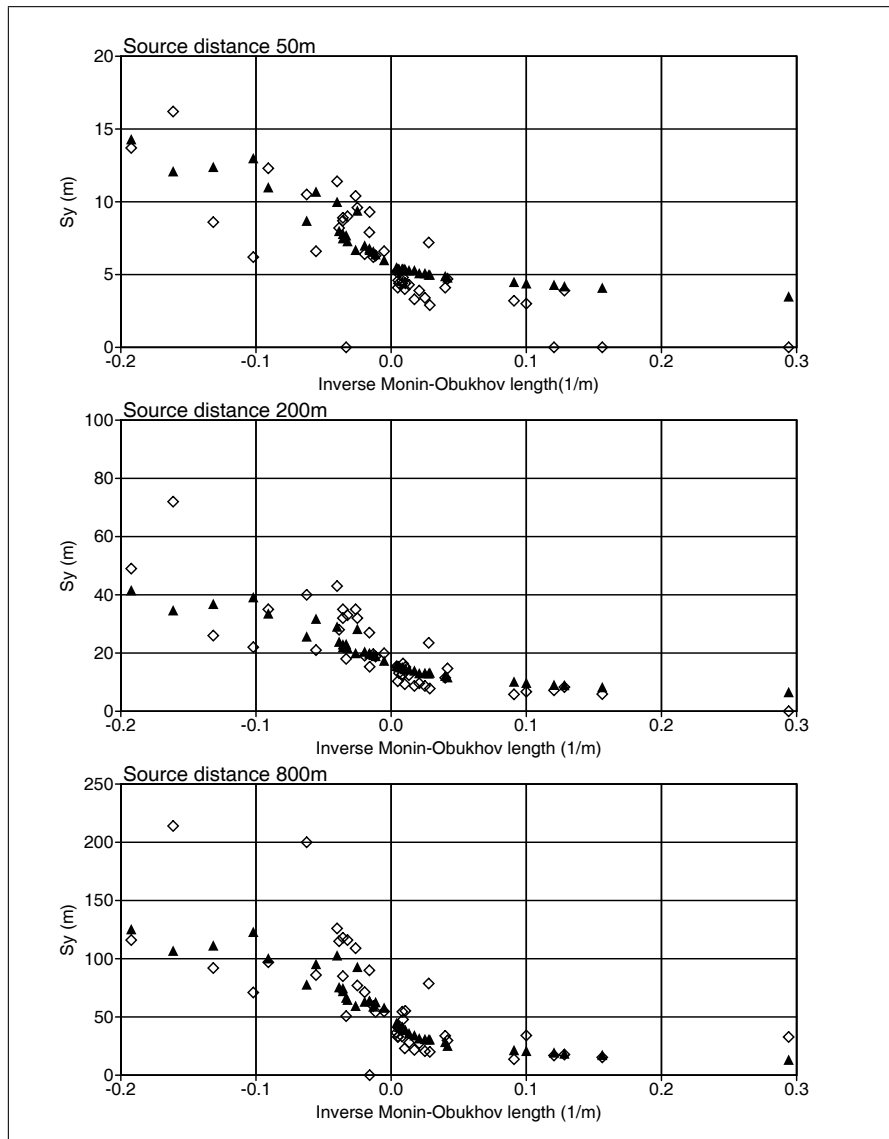


BILD G.54: Validierung anhand der Prairie-Gras-Experimente (Standard-Grenzschichtmodell von LASAT). Dargestellt ist die Fahnenbreite als Funktion der inversen Monin-Obukhov-Länge für verschiedene Quellentfernungen. Die offenen Symbole geben die Meßwerte, die gefüllten Symbole die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung wieder.

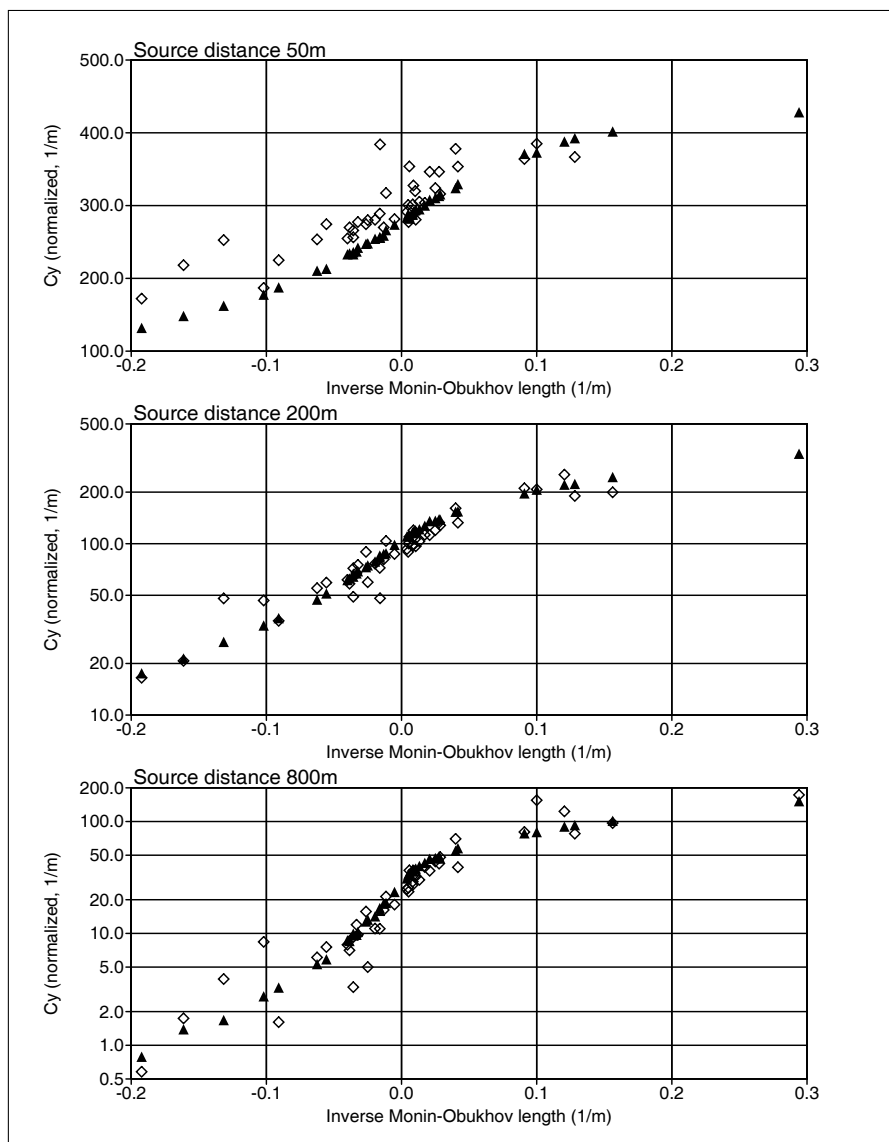


BILD G.55: Validierung anhand der Prairie-Gras-Experimente (Standard-Grenzschichtmodell von LASAT). Dargestellt ist die skalierte, quer zur Fahne integrierte Konzentration als Funktion der inversen Monin-Obukhov-Länge für verschiedene Quellentfernungen (entspricht Bild 6 in Richtlinie VDI 3783 Blatt 5). Die offenen Symbole geben die Meßwerte, die gefüllten Symbole die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung wieder.

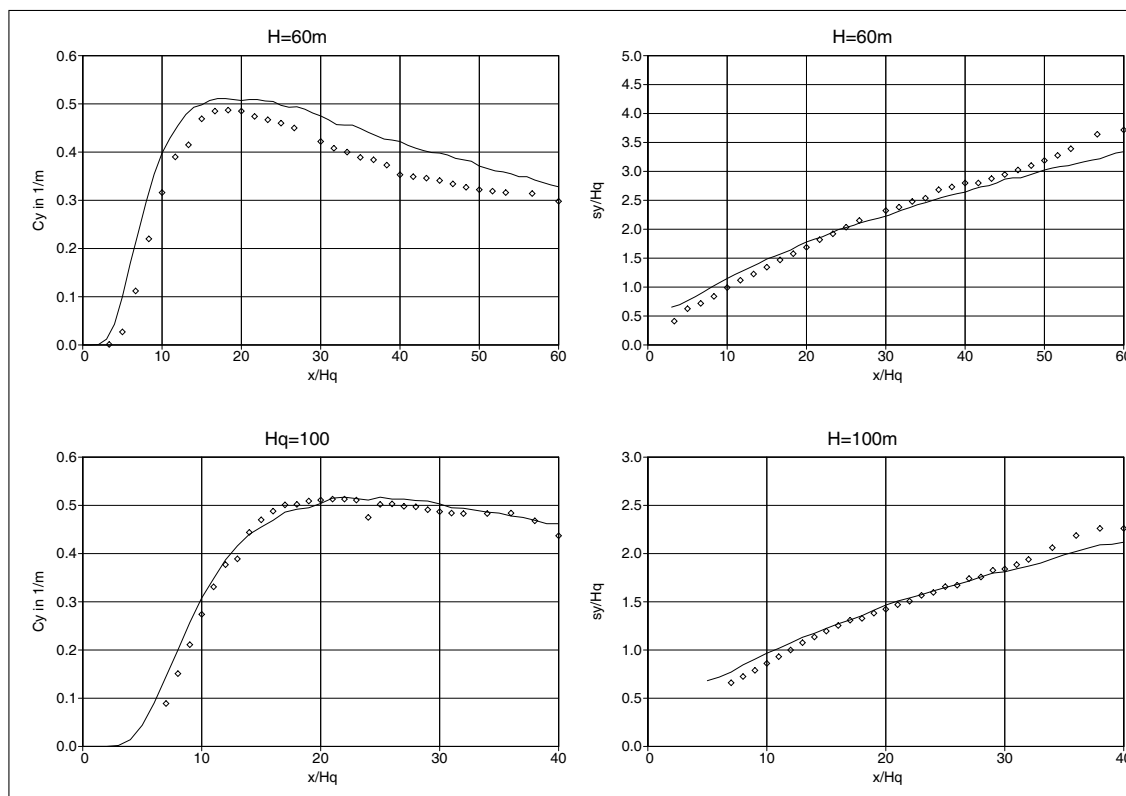


BILD G.56: Validierung anhand der Windkanalexperimente (Standard-Grenzschichtmodell von LASAT). Dargestellt ist die skalierte, quer zur Fahne integrierte Konzentration (links) und die skalierte Fahnenbreite (rechts) für die Quellhöhen 60 m (oben ) und 100 m (unten). Die Symbole geben die Meßwerte, die Linien die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung wieder.