

PEF – Projekt europäisches Forschungszentrum
für Maßnahmen der Luftreinhaltung

Forschungsbericht FZKA-PEF

**Ausbreitung von Emissionen in komplexer Bebauung –
Vergleich zwischen numerischen Modellen und Windkanalmessungen**

von

R. Röckle, C.-J. Richter

iMA Freiburg, 79098 Freiburg

Th. Salomon, F. Dröscher, J. Kost

TÜV Ecoplan Umwelt, 70794 Filderstadt

Die Arbeiten des Projektes Europäisches Forschungszentrum für
Maßnahmen der Luftreinhaltung werden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg gefördert.

Förderkennzeichen: PEF 295002

94 Seiten
47 Abbildungen
28 Literaturstellen

September 1998

Ausbreitung von Emissionen in komplexer Bebauung – Vergleich zwischen numerischen Modellen und Windkanalmessungen

Zusammenfassung

Die Fortschritte in der Computertechnologie, insbesondere auf dem Sektor der Personalcomputer, führte in den letzten 10 Jahren zur Entwicklung praxisorientierter, leistungsfähiger mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. Diese Modelle berechnen dreidimensionale Strömungs- und Konzentrationsfelder mit hoher räumlicher Auflösung und stellen dadurch entsprechend hohe Anforderungen an Speicherplatz und Rechenleistung.

Die Einsatzgebiete für diese Modelle sind vielfältig. Der Schwerpunkt liegt im Bereich der Ausbreitung von Spurenstoffen aus bodennahen Quellen in bebauten Gebieten. Hierunter fallen z.B. die Abschätzung der vom Kfz-Verkehr verursachten Emissionen, die Analyse und Prognose von Störfällen oder die Ausbreitung von Gerüchen. Aufgrund mangelnder Vergleichsdatensätze aus Natur- und Windkanalmessungen sind die Modelle bislang allerdings nur unzureichend validiert.

Das vorliegende Forschungsprojekt setzt die vom PEF geförderte systematische Validierung mikroskaliger numerischer Modelle fort. Die Studie behandelt schwerpunktmäßig die Ausbreitung von Emissionen aus einer Linienquelle, die sich im Bereich verschiedener Kreuzungskonfigurationen mit geschlossener Randbebauung befindet.

Auf der Basis ausführlicher Windkanaluntersuchungen, die am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe durchgeführt wurden, wird eine systematische und untereinander vergleichbare Überprüfung der untersuchten Strömungsmodelle durchgeführt.

Am Vergleich nehmen die Modelle ABC, AIRPOL, ASMUS, DASIM, IBS_VERKEHR, LASAT, MISKAM und MUKLIMO_3 teil. Der Vergleich der gemessenen und berechneten Konzentrationen zeigt, daß die physikalisch einfacheren diagnostischen Modelle im Straßenraum durchaus mit den aufwendigeren prognostischen Modellen mithalten können.

Weitere Ergebnisse des Forschungsprojekts werden u.a. die Bestimmung von Modellschwächen und deren Auswirkungen auf die entsprechenden Anwendungsbereiche sowie die Initiierung von Verbesserungen der Modelle sein.

Dispersion of Emissions between Complex Building Structures – Intercomparison of Numerical Models and Wind Tunnel Measurements

Summary

The improvements in PC-technology within the last decade have lead to a considerable development of powerful numerical models. High storage-capacities and fast processing units are needed by the models to resolve small 3dimensional effects in flow- and concentration-fields near buildings.

The models cover a wide range of operational fields. The main task is the dispersion-calculation of emissions from near-surface sources in built-up areas, such as motor vehicle emissions in street-canyons, accidental releases in chemical plants or odours.

The validation of microscale simulation models is still not satisfying, because systematic field measurements and windtunnel investigations are poor.

This research project continues the systematic validation of microscale windfield and dispersion models sponsored by PEF. The study covers the complex source and building structure near a street-canyon crossing. The validation is based upon the intercomparison of numerical models and wind-tunnel experiments for varying building geometries.

The model intercomparison includes the microscale models ABC, AIRPOL, ASMUS, DASIM, IBS_VERKEHR, LASAT, MISKAM and MUKLIMO_3. Corresponding wind-tunnel experiments are conducted within a parallel PEF-research project, done by the University of Karlsruhe. Within the street-canyons the physically more simple diagnostic models are showing quite as good results as the prognostic models.

The research project will further result in recommendations for improvements of microscale numerical dispersion models, application limitations and standardization of microscale numerical dispersion models.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Eingesetzte Modelle	5
2.1 Grundlagen.....	5
2.2 Modellbeschreibungen	7
2.2.1 ABC	7
2.2.2 AIRPOL	9
2.2.3 ASMUS	11
2.2.4 DASIM.....	12
2.2.5 IBS	13
2.2.6 LASAT.....	13
2.2.7 MISKAM	14
2.2.8 MUKLIMO	14
2.3 Anwendung.....	16
3 Untersuchungsbedingungen	17
3.1 Hindernisgeometrie.....	17
3.2 Modellgeometrien.....	20
3.3 Quelle.....	20
3.4 Anströmung.....	21
3.5 Messungen im Windkanal	21
3.6 Ein- und Ausgabegrößen der Modelle	22
3.7 Windkanal	23
4 Ergebnisse	25
4.1 Fall 0 – Referenzfall.....	25
4.1.1 Strömungsverhältnisse	26
4.1.2 Konzentrationsverhältnisse	31
4.2 Fall 1 – Spitzdach	41
4.3 Fall 2 – Step-Up Situation	44
4.4 Fall 3 – höherer Block	46
4.5 Fall 4 – Turm.....	49
4.6 Statistische Auswertung aller Einzelfälle	50
4.7 Konsequenzen für die praktische Anwendung	54

5 Folgerungen	57
5.1 ABC	57
5.2 AIRPOL	58
5.3 ASMUS	58
5.4 DASIM.....	58
5.5 IBS	58
5.6 LASAT	59
5.7 MISKAM	59
5.8 MUKLIMO	60
5.9 Modellübergreifende Probleme.....	60
5.10 Anwender	62
6 Ausblick	64
7 Literatur.....	65
8 Anhang – Abbildungen.....	69

1 Einleitung

In den letzten Jahren werden in der gutachterlichen Praxis zunehmend mikroskalige Modelle eingesetzt. Ein bedeutender Anwendungsbereich ist die Berechnung der Ausbreitung von Schadstoffen innerhalb komplexer Bebauungsstrukturen. Hierunter fallen unter anderem die kraftfahrzeuginduzierte Schadstoffimmission im urbanen Raum. Aber auch Fragen zur Optimierung von Kaminen, zur Lage von Be- und Entlüftungsöffnungen usw. lassen sich mit Hilfe von Modellsimulationen beantworten.

In einem ersten Projekt wurden Vergleiche zwischen Modellsimulationen (Röckle, Richter, 1995) und Windkanalmessungen (Klein et. al., 1994) an einem U-förmigen Gebäude und in einer realen Bebauungssituation durchgeführt. Die Ergebnisse deckten einige Schwachstellen der untersuchten Modelle auf, die die Modellentwickler zu weiteren Verbesserungen angeregt haben. Dies betraf vor allem die Parametrisierung der Turbulenz und die Formulierung der Abbruchkriterien. Zusätzlich zu den dort untersuchten Modellen wurden zwei prognostische Modelle – AIRPOL und IBS-Verkehr – in den Vergleich aufgenommen.

Die im vorangegangenen Projekt verwendeten punktförmigen Quellen ließen keine Rückschlüsse auf die Fehlermargen der numerischen Modelle bei Linienquellen, wie sie z.B. der fließende Kfz-Verkehr darstellt, zu. Forschungsgegenstand des aktuellen Projekts sind deshalb die komplexen Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse im Kreuzungsbereich zweier Straßen. Die 3dimensionalen Strukturen des Strömungs- und Konzentrationsfeldes sind bisher noch nicht ausreichend gut verstanden.

Langjährige Beobachtungen zeigen beispielsweise, daß bodennahe Meßstationen im Kreuzungsbereich eher niedrigere Konzentrationen als Stationen in Straßenschluchten aufweisen, obwohl das Verkehrsaufkommen auf Kreuzungen deutlich höher sein kann. Die Ursachen hierfür sind nicht geklärt, da kaum systematische Naturmessungen vorliegen, d.h. Messungen, bei denen außer den Konzentrationen auch die anderen Parameter (Verkehrsaufkommen, Überdachwind usw.) gemessen wurden.

Gründe für die vergleichsweise niedrigen Konzentrationen könnten sein:

- Die Strömungsgeschwindigkeit ist im Mittel gegenüber der Straßenschlucht erhöht, was zu einem besseren Abtransport der Emissionen führt.
- Der Austausch belasteter Luft findet in der Straßenschlucht nur über das Dachniveau statt (vgl. Abb. 1). Im Kreuzungsbereich kann ein Luftaustausch auch horizontal erfolgen.
- Die Turbulenz ist im Kreuzungsbereich gegenüber der Straßenschlucht erhöht, was eine bessere Verdünnung der Emissionen bewirkt.

Einleitung

- Die je nach Anströmrichtung auftretenden Eckenwirbel (siehe Abbildung 1) können aufgrund ihres Vertikaltransports Auswirkungen auf die Ausbreitung im kreuzungsnahen Bereich haben.

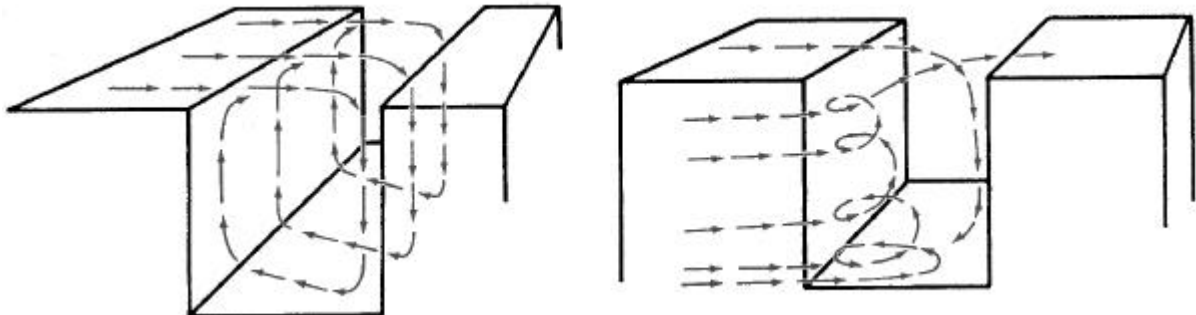


Abbildung 1: Rotor in einer langgestreckten Straßenschlucht (links), Eckenwirbel im Kreuzungsbereich (rechts). (aus Hosker 1987)

Diese Hypothesen sind zu überprüfen und es ist zu klären, inwieweit die numerischen Modelle die genannten Verhältnisse wiedergeben.

Die Windkanalmessungen und die Modellsimulationen liefern grundlegende Erkenntnisse über die Luftaustauschprozesse im Bereich von Kreuzungen. Der Modellvergleich gibt Aufschluß darüber,

- wie sich die bodennahe Strömung bei unterschiedlichen Anströmrichtungen verhält,
- welche Randbedingungen eine bedeutende Rolle spielen, z.B. wie sich unterschiedliche Bauungshöhen im kreuzungsnahen Bereich auswirken.
- wie gut praxisorientierte mikroskalige Strömungs- und Ausbreitungsmodelle die o.g. Sachverhalte wiedergeben und wo Schwachstellen liegen,
- welche Fehlermargen die einzelnen Modelle bei der Strömungsberechnung, der Turbulenzparametrisierung und der Ausbreitungsrechnung aufweisen,
- auf welche Details Modellierer und Anwender achten müssen, wenn sie Immissionen im kreuzungsnahen Bereich berechnen.

Die hier durchgeführte Verifikation der Strömungs- und Konzentrationsfelder basiert auf systematisch im Windkanal (Kastner-Klein, Plate, 1998) erhobenen, umfangreichen Datensätzen.

Dieses Vorhaben vergleicht die Ergebnisse der numerischen Modelle mit den Windkanaluntersuchungen.

2 Eingesetzte Modelle

2.1 Grundlagen

Wie aus Abbildung 1 zu entnehmen ist, sind die Strömungsverhältnisse im kreuzungsnahen Straßenraum dreidimensional. Die naturnahe Simulation der Strömungs- und Konzentrationsfelder erfordert deshalb den Einsatz dreidimensionaler Modelle.

Man unterscheidet zwischen prognostischen und diagnostischen Modellen. Prognostische Modelle lösen den kompletten Satz der (vereinfachten) strömungsmechanischen Erhaltungsgleichungen, wobei die Zeitabhängigkeit in den Impulstermen berücksichtigt wird. Bei diagnostischen Modellen finden die Bewegungsgleichungen üblicherweise keine direkt Berücksichtigung mehr. Das Strömungsfeld erfüllt nur die Kontinuitätsgleichung.

Für die numerischen Simulation von Ausbreitungsvorgängen werden die mittlere Strömung zur Beschreibung des Transports und die turbulenten Strömungsanteile zur Beschreibung der Diffusion benötigt. Unter der Annahme, daß der auszubreitende Stoff nicht auf den Strömungsteil rückwirkt, lassen sich die beiden Teile – Strömungssimulation und Ausbreitungssimulation – getrennt behandeln.

Bei den diagnostischen Modellen findet auch die Turbulenzparametrisierung in einem abgekoppelten Modul statt, d.h. die Diffusionskoeffizienten sind nur eine Funktion der Hindernisgeometrie und der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten.

Bei den prognostischen Modellen ist die Berechnung der Diffusionskoeffizienten an die Berechnung der mittleren Strömungskomponenten gekoppelt. Bei der Lösung der numerischen Gleichungssysteme können folglich Turbulenz und mittlere Strömung wechselwirken.

Die untersuchten Modelle und ihre Versionen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Eingesetzte Modelle

*Tabelle 1: Verwendete Modelle, Entwickler und Typisierung der Programmodule
(D - diagnostisches Verfahren, P - prognostisches Verfahren)*

Modellname	Version	Ansprechpartner	Strömungsteil	Turbulenzteil	Ausbreitungsteil
ABC	2.7	Dr. Röckle IMA Freiburg	D	D	D Gittermodell
ASMUS	2.0	Prof. Groß Meteorologisches Institut Hannover	wie ABC	D	wie ABC
AIRPOL/L	02.98	Dr. Jung IABG Ottobrunn	P	P	P Partikelmodell
DASIM_Verkehr	1.2	Prof. Manier Meteorologisches Institut Darmstadt	D	D	D Gittermodell
IBS_Verkehr	02.98	Prof. Schenk IBS+P Halle	P	P	P Gittermodell
LASAT	2.8	Dr. Janicke Dunum	D	(P)	P (Lagrange)
MISKAM	3.4	Dr. Eichhorn Meteorologisches Institut Mainz	P	P	P Gittermodell
MUKLIMO_3	11.97	Dr. Sievers DWD Frankfurt	P	P	P Gittermodell

Verwendetes Gitter

Die angegebenen Modelle arbeiten auf einem kartesischen Gitter. Der Vorteil ist die relativ leichte Handhabung dieses Gitters. Nachteile ergeben sich bei der Auflösung von Gelände oder nicht blockförmigen Bebauungsstrukturen. In dem in Abbildung 2 dargestellten Gitter werden die Hindernisse als undurchströmbare Zellen behandelt. Die vertikalen Abstände des Gitters sind bei allen Modellen variabel, die horizontalen Maschenweiten sind dagegen bei den diagnostischen Modellen äquidistant.

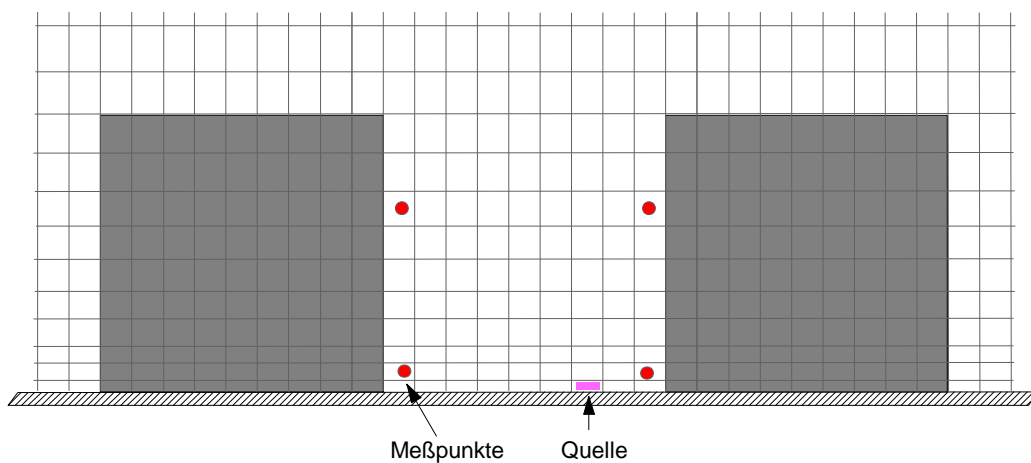


Abbildung 2: Vertikalschnitt im Bereich der Straßenschlucht mit Gittereinteilung, Lage der Quelle und Lage der Meßpunkte

Aus numerischen Gründen wird bei den Modellen ABC, AIRPOL, ASMUS, DASIM, MISKAM und MUKLIMO ein „gestagertes“ Gitter benutzt. Hier sind die Strömungskomponenten sowie die Diffusionskoeffizienten auf einem, um eine halbe Maschenweite in die jeweilige Raumrichtung, versetzten Gitter definiert (Abbildung 3).

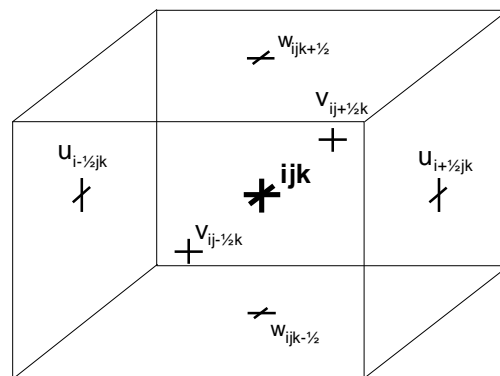


Abbildung 3: Anordnung der Variablen auf dem Rechengitter

Die einzelnen Module der Modelle ABC, ASMUS, DASIM, MISKAM und MUKLIMO arbeiten mit dem selben Gitter. Auf eventuelle Besonderheiten wird bei den Modellbeschreibungen eingegangen.

2.2 Modellbeschreibungen

Eine ausführliche Beschreibung der Modelle ist in den angegebenen Literaturstellen zu finden. Im folgenden werden die wesentlichen Charakteristika aufgeführt.

2.2.1 ABC

ABC wurde in seinen Grundzügen an der Technischen Hochschule in Darmstadt erarbeitet (RÖCKLE, 1990) und im Rahmen konkreter weiterentwickelt. Es besteht im wesentlichen aus den Modulen Strömungs-, Diffusionskoeffizienten- und Ausbreitungsberechnung. Nach den Ergebnissen des vorangegangenen PEF-Projektes wurden die Module von ASMUS für die Turbulenzparametrisierung und die Ausbreitungsrechnung in ABC übernommen.

Strömungsteil

Der semiempirische diagnostische Ansatz für die Strömungsberechnung beruht auf einem Initialwindfeld, das unter den Restriktionen der Divergenzfreiheit und der Erfüllung der Randbedingungen (keine Flüsse durch undurchlässige Oberflächen) nach einem Variationsschema so abgeändert wird, daß das resultierende Strömungsfeld diese Anforderungen erfüllt. Das Initialwindfeld wird durch ein objektives Verfahren erzeugt.

Zunächst wird die Hindernisgeometrie analysiert und jeder Gitterpunkt bestimmten Kategorien zugeordnet. Die horizontalen Strömungskomponenten werden auf die Werte der ungestörten Anströmung gesetzt und dann in den entsprechenden Zonen je nach Abstand zu den Hindernissen angepaßt. Die Maße für die Einteilung in die jeweiligen Regime und der Abstände der Einflußbereiche wurden Arbeiten von HOSKER (z.B. 1984) entnommen. Die Umströmung von Gebäuden zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- im Bereich des nahen Nachlaufs werden die Strömungskomponenten gedreht
- im Bereich des fernen Nachlaufs paßt sich die Strömung mit zunehmendem Abstand vom Hindernis der ungestörten Strömung an
- im Bereich der Frontwirbel werden die Strömungskomponenten auf Null gesetzt
- im Bereich von Straßenschluchten wird die straßensenkrechte Strömungskomponente um 180° gedreht, die straßenparallele Komponente bleibt erhalten.

Das „verbesserte“ Strömungsfeld (Initialwindfeld) wird durch eine Variationsmethode, bei der die quadratische Abweichung zwischen Initialwindfeld und resultierendem Windfeld minimiert wird, so geändert, daß es die Massenerhaltung erfüllt wird. Diese Verfahren werden z.B. bei SASAKI (1970) und SHERMAN (1978) beschrieben.

Die Komponenten des Initialwindfeldes werden variiert, bis sich ein quasi-divergenzfreies Windfeld ergibt. Die dem Verfahren zugrunde liegende Poisson-Gleichung für λ wird mit Hilfe eines SOR-Verfahrens numerisch gelöst.

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{\alpha_h^2}{\alpha_v^2} \right) \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2\alpha_h^2 \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$\lambda(x,y,z)$ sind die Lagrange'schen Multiplikatoren, u_0 , v_0 und w_0 die Komponenten des Initialwindfeldes und α_h, α_v stellen Wichtungsfaktoren dar. Unterschiedliche Werte von α_h und α_v erlauben die Steuerung der Anpassung der horizontalen bzw. vertikalen Strömungsanteile, wobei große Werte eine minimale Anpassung der entsprechenden Komponente bewirken.

Das resultierende divergenzfreie Strömungsfeld (u,v,w) wird durch Einsetzen von λ in die Euler-Lagrange'schen Gleichungen (2) erhalten.

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \frac{1}{2\alpha_h^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \\ v &= v_0 + \frac{1}{2\alpha_h^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \\ w &= w_0 + \frac{1}{2\alpha_v^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

Der obere und die seitlichen Ränder des Simulationsgebiets werden als offen betrachtet, d.h. die Strömung kann sich auf dem Rand frei einstellen. Der untere Rand und die Wände der Hindernisse werden als fest angesehen, so daß keine Masse durch diese Ränder strömen kann.

Turbulenzteil

Die Ausbreitungsmodule lösen die Advektions-Diffusions-Gleichung in der Form

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + P + S \quad (3)$$

wobei u , v und w die Komponenten des divergenzfreien Strömungsfeldes, K_x , K_y und K_z die Diffusionskoeffizienten in der x -, y - und z -Richtung, P der Produktionsterm und S Senkenterme (chemische Umwandlung, Deposition) sind.

Die Bestimmung der Diffusionskoeffizienten erfolgt nach dem Ansatz von GROSS et.al. (1994). Dazu wird die Erhaltungsgleichung für die turbulente kinetische Energie E iterativ gelöst. Diese Gleichung beinhaltet Advektions- und Diffusionsterme, einen Term für die dynamische Produktion (Scherungsterme), einen Term für thermisch bedingte Produktion und einen Term für die molekulare Dissipation:

$$0 = -u_j \frac{\partial E}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial E}{\partial x_j} \right) + K \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - K \frac{g}{\Theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \delta_{j3} - \frac{E^{1.5}}{a^{-3} \lambda} \quad (4)$$

• ist eine charakteristische Länge (z.B. $\lambda = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$), a eine empirische Konstante (0.4), g die Schwerebeschleunigung und Θ die potentielle Temperatur. Die Diffusionskoeffizienten werden aus der turbulenten kinetischen Energie nach Prandtl-Kolmogorov Beziehung ermittelt

$$K = a \lambda \sqrt{E} \quad (5)$$

Ausbreitungsteil

Das Ausbreitungsmodul löst die stationäre Form der Advektions-Diffusionsgleichung, d.h. Gleichung 3 mit $\partial C / \partial t = 0$, mittels eines SOR-Verfahrens auf dem gestagerten Gitter.

2.2.2 AIRPOL

Das Programmpaket AIRPOL/L ermöglicht die Berechnung der Strömungs- und Konzentrationfelder sowohl im Mesoscale als auch im Microscale.

Strömungs- und Turbulenzteil

Das dreidimensionale, divergenzfremie Windfeld in Stadtgebieten wird durch Lösung der prognostischen Navier-Stokes Gleichungen berechnet. Die Bilanzgleichungen für Impuls und Masse lauten

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\
 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)
 \end{aligned} \tag{6}$$

mit den Geschwindigkeitskomponenten u , v und w , dem Druck p und der Eddy-Viskosität ν_t .

Die Eddy-Viskosität wird mit Hilfe des k - ϵ Turbulenzmodells ermittelt. Die Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie k sowie die Dissipation ϵ lauten (vgl. Murakami et al., 1988)

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial ku}{\partial x} + \frac{\partial kv}{\partial y} + \frac{\partial kw}{\partial z} &= \frac{\nu_t}{\sigma_1} \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial z^2} \right) + \nu_t S - \epsilon \\
 \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon u}{\partial x} + \frac{\partial \epsilon v}{\partial y} + \frac{\partial \epsilon w}{\partial z} &= \frac{\nu_t}{\sigma_2} \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t S - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}
 \end{aligned} \tag{7}$$

mit $\nu_t = C_D k^2/\epsilon$, $C_D=0,09$, $C_1=1,44$, $C_2=1,92$, $\sigma_1=1,0$ und $\sigma_2=1,3$. S stellt die Scherungsproduktion dar und setzt sich aus den Quadraten verschiedener Scherungsterme zusammen.

Ausbreitungsteil

Der Transport und die Diffusion von Gasen und Aerosolen werden mit einem Lagrange'schen Partikelmodell berechnet. Bei dieser Methode werden im Bereich der Quelle mehrere Tausend Partikel markiert und ihr Weg in der turbulenten Strömung verfolgt. Jedem Partikel wird dabei abhängig von der Quellstärke und der Zahl der eingesetzten Partikel eine Masse zugeordnet. Aus der Aufenthaltsdauer der Partikel in den Zellen eines Auszählgitters kann die Konzentrationsverteilung bestimmt werden.

Die Ortskoordinaten jedes einzelnen Partikels werden über die Beziehung

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t (\bar{u}(t) + u'(t)) \tag{8}$$

für die x -Richtung und analog für die y - und z -Richtung berechnet. Die zeitlich und räumlich gemittelten Geschwindigkeitskomponenten \bar{u} , \bar{v} und \bar{w} der Strömung zur Zeit t am Ort des Partikels werden aus dem berechneten Windfeld übernommen. Die turbulenten Zusatzgeschwindigkeiten u' , v' und w' geben die Differenz zwischen der momentanen Bahngeschwindigkeit eines

Partikels und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit des Fluids an und können über die Langevin Gleichungen berechnet werden.

Unter der Voraussetzung, daß die turbulente Bewegung der Partikel zu diskreten Zeitpunkten betrachtet wird, können die Lösungen der Langevin Gleichungen in Form von Markov-Reihen der turbulenten Geschwindigkeitskomponenten geschrieben werden, z.B. für u' :

$$u'(t_n + \Delta t) = R_u u'(t_n) + \sqrt{(1 - R_u^2)} \sigma_u \Gamma_u(t_n) \quad (9)$$

Die Funktion Γ stellt Gauß-verteilte Zufallszahlen mit der Varianz 1 und dem Mittelwert 0 bereit. Die Lagrange'schen Autokorrelationen R_u , R_v und R_w sind Exponentialfunktionen und hängen vom Zeitschritt Δt und den Lagrange'schen Zeitmaßstäben T_{Lu} ab.

$$R_u = \exp(-\Delta t/T_{Lu}) \quad (10)$$

Die Standardabweichungen der turbulenten Zusatzgeschwindigkeiten σ und die Lagrange'schen Zeitmaßstäbe T_{Lu} werden schichtungsabhängig angesetzt.

Die berechneten Konzentrationswerte sind Schätzwerte für die räumlichen und zeitlichen Mittelwerte der Konzentration in den betrachteten Zellen. Sie unterliegen wegen des Zufallsprozesses in der Teilchenbewegung statistischen Schwankungen (Stichprobenfehler). Diese Schwankungen sind ein Artefakt des Verfahrens und haben nichts mit den in der Natur beobachteten Konzentrationsfluktuationen zu tun.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist die absolute Massenerhaltung (es gehen keine Teilchen verloren) und die Umgehung der numerischen Diffusion der Gittermodelle.

2.2.3 ASMUS

Das Modell ASMUS („Ausbreitungs- und Strömungsmodell für Urbane Strukturen“, GROSS et.al., 1994, 1997) setzt in der hier verwendeten Version auf dem Strömungsteil von ABC auf.

Turbulenzteil

Im vorangegangenen Projekt wurde bei ASMUS nach dem bei ABC beschriebenen Verfahren vorgegangen, d.h. Lösung der Erhaltungsgleichung für die turbulente kinetische Energie (Gleichung 4) und Mischungswegansatz (Gleichung 5) zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten. Nachteil dieses Verfahrens ist das Mischungswegkonzept, da eine fundierte Definition des Mischungsweges in bebautem Gelände nicht existiert.

Im vorliegenden Fall basiert der Turbulenzteil auf einem k- ϵ Ansatz, wie er beim Modell AIRPOL beschrieben wurde. Die Diffusionskoeffizienten bestimmen sich dann aus turbulenter kinetischer Energie und Dissipationsrate nach Gleichung 11.

$$K = C_\mu \frac{T_e^2}{\epsilon} \quad (11)$$

Ausbreitungsteil

Das Ausbreitungsmodul ist identisch mit dem bei ABC beschriebenen Verfahren.

2.2.4 DASIM

Das Modell DASIM (BLINDA et.al., 1992) beruht auf den Ansätzen von ABC. Die wesentlichen Unterschiede finden sich in der Erzeugung des Initialwindfeldes und der Turbulenzparametrisierung. Wesentliche Änderungen zu der zuvor untersuchten Version wurden nicht vorgenommen. Es wurde jedoch eine benutzerfreundliche Oberfläche geschaffen.

Strömungsteil

Wie bei ABC wird zunächst die Hindernisstruktur analysiert und ein Initialwindfeld generiert. Die Analyse erfaßt jedoch weitere Konstellationen und modifiziert die Strömung auch im Dachbereich. So wird z.B. bei tiefen Straßenschluchten ein zweiter Wirbel initiiert und die sogenannten Step-up/Step-down Konstellationen (niedriges Gebäude im Einflußbereich eines hohen Gebäudes) detaillierter behandelt.

Turbulenzteil

Abweichend zu ABC werden in DASIM die Diffusionskoeffizienten für die 3 Raumrichtungen aus dem Betrag der Geschwindigkeitsrotation bestimmt.

$$\begin{aligned}K_x &= \lambda^2 \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2} \\K_y &= \lambda^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2} \\K_z &= \lambda^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}\end{aligned} \quad (12)$$

Der Mischungsweg λ ist als der kürzeste Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Fläche, durch die die Diffusion stattfindet, und den undurchlässigen Rändern (Boden, Hindernisse) definiert.

Ausbreitungsteil

Das Ausbreitungsmodul ist weitgehend identisch mit dem bei ABC beschriebenen Verfahren.

2.2.5 IBS

IBS-Verkehr (Schenk, 1995) ist ein prognostisches Strömungs- und Ausbreitungsmodell, das für die Untersuchung der Ausbreitungsvorgänge in bebauten Arealen entwickelt wurde. Dem Modell liegen die Gleichungen für Impuls-, Wärme- und Stofftransport zugrunde.

Strömungs- und Turbulenzteil

Die Navier-Stokes Gleichungen werden mittels eines gewichteten Differenzenverfahrens numerisch gelöst. Die Diffusionskoeffizienten werden durch einen Scherungsansatz bestimmt.

Ausbreitungsteil

Der Ausbreitungsteil besteht aus einer prognostischen Lösung der Advektions-Diffusions-Gleichung.

2.2.6 LASAT

Das Ausbreitungsmodell LASAT (Lagrange-Simulation von Aerosol-Transport) ist ein klassisches Lagrange-Modell zur Berechnung des Erwartungswertes der Konzentration für Episoden im lokalen Maßstab (JANICKE, 1985, 1997). Es ist im Prinzip aus einem Meteorologie-Modell und einem Dispersions-Modell zusammengesetzt. Die Ursprünge des Modells gehen auf vom UBA geförderte Forschungsvorhaben der Fa. Dornier zurück. Seit etwa 8 Jahren ist es allgemein verfügbar und wird von einer Vielzahl von Anwendern vorwiegend für Sonderfallprüfungen eingesetzt.

Im Gegensatz zum vorangegangenen Projekt, bei dem die LASAT-Ausbreitungsrechnungen auf dem Strömungsfeld von MISKAM aufgesetzt wurden, existiert in der Zwischenzeit ein diagnostisches mikroskaliges Strömungsmodul.

Strömungs- und Turbulenzteil

Analog zu ABC und DASIM wird durch die Variationsmethode ein divergenzfreies Windfeld erzeugt. Die Generierung des Initialwindfeldes unterscheidet sich jedoch von den genannten Modellen. Zum Einsatz kommt ein Verfahren, bei dem mittels von den Hinderniswänden ausgehenden Potentialfeldern die Rückströmzonen generiert werden.

Die ungestörte Anströmung wird mittels eines eindimensionalen Grenzschichtmodells berechnet.

Ausbreitungsteil

Im Dispersions-Modell wird die turbulente Diffusion mit Hilfe eines Lagrange-Ansatzes simuliert. Das Verfahren wurde bereits beim Modelle AIRPOL beschrieben (siehe Seite 10)

2.2.7 MISKAM

MISKAM wurde am Institut für Physik der Atmosphäre der Universität in Mainz entwickelt (EICHHORN, 1989). Das vollständige Modell beschreibt sowohl die dynamischen Einflüsse wie Strömungskanalisation und Verwirbelung durch Gebäude als auch die thermischen Effekte wie z.B. Verschattung in Straßenschluchten. Die PC-Version enthält nur den Strömungs- und Ausbreitungsteil.

Strömungs- und Turbulenzteil

MISKAM-S ist ein 3dimensionales nichthydrostatisches Strömungsmodell. Es löst die Boussinesq-approximierten Bewegungsgleichungen, wobei ein Schließungsansatz 1. Ordnung (K-Ansatz) verwendet wird.

Die Austauschkoefizienten werden in der verwendeten Fassung von MISKAM mit einem $k-\epsilon$ Ansatz (vgl. AIRPOL) berechnet. Unterschiedliche Oberflächeneigenschaften können durch variable Rauigkeitsparameter berücksichtigt werden.

Die Advektionsterme sind upstream diskretisiert, die Diffusionsterme mit dem ADI-Verfahren. Zur Lösung der Verträglichkeitsbedingung (Poisson-Gleichung für die dynamischen Druckstörungen) wird ein SOR-Verfahren eingesetzt.

Ausbreitungsteil

Das Ausbreitungsmodul MISKAM-A löst die Bilanzgleichung für Luftbeimengungen, wobei die mittlere Strömung und die Austauschkoefizienten vom Strömungsmodul übernommen werden.

Bei MISKAM wird ein nicht-äquidistantes, kartesisches Gitter des Typs Arakawa-C verwendet, d.h. die u -, v - und w -Komponenten der Strömung sind gegenüber den Zellmittelpunkten, auf denen Stördruck, Temperatur und Diffusionskoefizienten definiert sind, um je eine halbe Maschenweite in die jeweilige Richtung versetzt (siehe Abbildung 2).

Zur Reduktion der numerischen Diffusion kann wahlweise ein Korrekturverfahren nach Smolarkievitsch angewandt werden. Im vorliegenden Fall wurde aufgrund der geringen Wirkung bei Linienquellen auf diesen Korrekturschritt verzichtet.

2.2.8 MUKLIMO

Ein weiterer Vertreter der prognostischen Modelle ist MUKLIMO_3 (Sievers, 1990, 1995). MUKLIMO gibt es als 2dimensionales und als 3dimensionales Modell. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde ausschließlich MUKLIMO in der 3dimensionalen Form (MUKLIMO_3) herangezogen. Der Einfachheit halber wird im Folgenden nur der Name MUKLIMO für diese Version verwendet.

Strömungs- und Turbulenzteil

Die Bewegungsgleichungen in der Boussinesq-approximierten Form werden mit Hilfe einer Stromfunktionsmethode gelöst. Für Klimaberechnungen wird das Windfeldmodell mit Gleichungen für den Wärme- und Feuchtehaushalt der Atmosphäre und des Erdbodens gelöst. Ferner existiert ein Canopy-Modell zur Behandlung bewachsenen Bodens.

Hindernisse können explizit als Blockstrukturen erfaßt oder über die Formulierung als poröses Medium berücksichtigt werden.

Ausgangspunkt für die numerischen Berechnungen des Modells MUKLIMO ist die Bewegungsgleichung einer inkompressiblen und neutral geschichteten Atmosphäre

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho_0 (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \nabla \cdot \mathbf{\tau} = -\nabla p - (\rho_0 + \rho') \nabla \Phi - 2\rho_0 \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} \quad (9)$$

mit der Dichte $\rho = \rho_0 + \rho'$, dem turbulenten Spannungstensor $\mathbf{\tau}$, dem Geopotential Φ und der Winkelgeschwindigkeit der Erde $\boldsymbol{\Omega}$. Zusätzlich ist die Filterbedingung der Divergenzfreiheit

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (10)$$

einzuhalten.

Die turbulenten Austauschkoefizienten berechnen sich nach der Beziehung

$$K_m = \lambda^2 \left(\left| \frac{\partial \mathbf{v}_h}{\partial z} \right| + b \left| \mathbf{v}_h \right| \right) \Phi_m(\text{Ri}) \quad (11)$$

wobei \bullet den Mischungsweg, b die Wandflächendichte (über einen hinreichend großen Bereich gemittelt Verhältnis der Fläche der Gebäudeaußenwände zum Gesamtvolumen) und Φ die von der Richardsonzahl abhängige Stabilitätsfunktion darstellt.

Der Mischungsweg wird durch die Gleichung $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{\lambda_\infty}$ definiert.

λ_∞ stellt dabei den maximalen Mischungsweg nach Blackadar dar. Die Bestimmung von λ_0 enthält den Abstand zum Boden und ein Maß für die Bebauungsdichte.

Ausbreitungsteil

MUKLIMO löst die Advektions-Diffusionsgleichung wie die anderen Gitterpunktmodelle auf einem versetzten kartesischen Gitter (Arakawa-C, vgl. Abbildung 3). Die Konzentrationen sind am Zellmittelpunkt definiert. Die Geschwindigkeitskomponenten sind jeweils um eine halbe Maschenweite dazu versetzt. Die Diffusionskoeffizienten sind allerdings im Gegensatz zu den anderen Modellen in den Zellecken angeordnet.

2.3 Anwendung

Die Modelle, mit Ausnahme von MUKLIMO_3, das auf Workstationbasis eingesetzt wird, laufen auf gut ausgestatteten PC's. Die Simulationen mit MUKLIMO_3, IBS und LASAT wurden von den Modellentwicklern durchgeführt. Bei den anderen Modellen wurden ausführbare Programme bereitgestellt, so daß die Simulationen auf den Rechnern von IMA durchgeführt werden konnten.

3 Untersuchungsbedingungen

3.1 Hindernisgeometrie

Im Grenzschichtwindkanal des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe wurden an idealisierten Straßenkreuzungen Konzentrations- und Strömungsmessungen durchgeführt (Kastner-Klein et.al., 1998).

Die Basisgeometrie bilden zwei Straßenzüge mit Blockrandbebauung, die sich rechtwinklig schneiden und dadurch eine Straßenkreuzung bilden (siehe Abbildung 4).

Die Abmessungen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

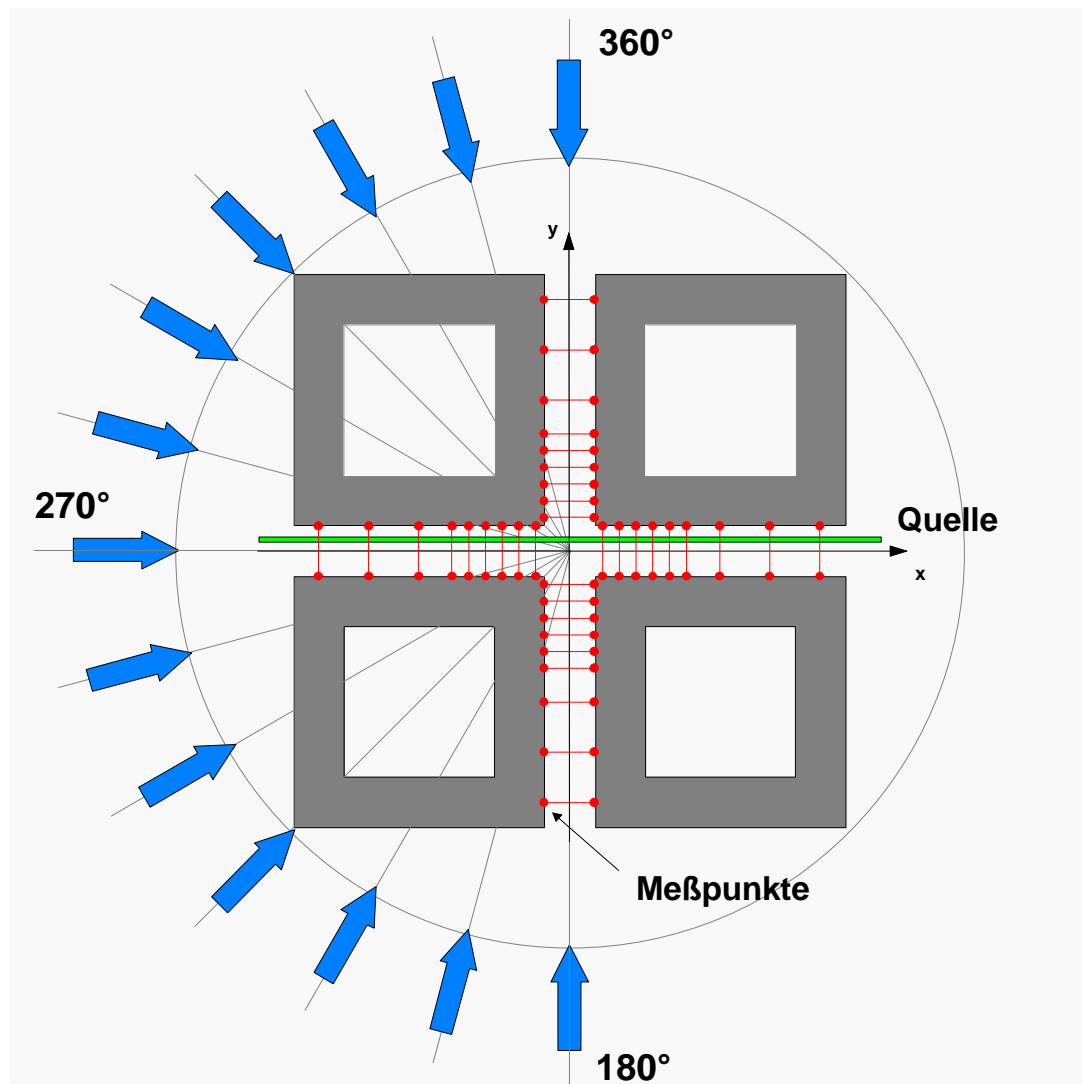


Abbildung 4: Hindernisgeometrie, Lage der Quelle und der Meßpunkte sowie Anströmrichtungen im Referenzfall (Fall 0)

Untersuchungsbedingungen

Tabelle 2: Abmessungen im Windkanal und in der Natur

	Abmessungen	im Windkanal	in der Natur
Hindernis- geometrie	Gebäudebreite	12 cm	18 m
	Gebäuelänge	60 cm	90 m
	Gebäudehöhe (Referenzfall)	12 cm	18 m
	Straßenbreite	12 cm	18 m
Quelle	Länge der Linienquelle	144 cm	216 m
	Höhe über Grund	0,2 cm	0,3 m
	Breite der Quelle	0,8 cm	1,2 m
	Abstand zur Straßenmitte/zur nächsten Fassade	2,5 cm / 3,5 cm	3,75 m / 5,25 m
Meßpunkte	Höhe der Meßebenen	1 cm, 8 cm	1,5 m, 12 m
	Abstand der Meßpunkte zur Wand	0,67 cm	1 m

Aus den im Windkanal untersuchten Kreuzungsbebauungen wurden 5 Fälle mit unterschiedlicher Hinderniskonstellations im Kreuzungsbereich ausgewählt. Variiert wurden die Hindernishöhen in den einzelnen Quadranten wie dies in Abbildung 5 dargestellt ist. Im Fall 1 werden Baukörper mit Spitzdächern, deren Traufhöhe 15 m und deren Firsthöhe bei 21 m liegt, untersucht. In den anderen Fällen handelt es sich um Flachdachbauten.

Bei der fünften Variante (Fall 4) wurde ein turmartiges Gebäude an der Kreuzung eingebaut, das mit 27 m die umliegende 18 m hohe Bebauung überragt.

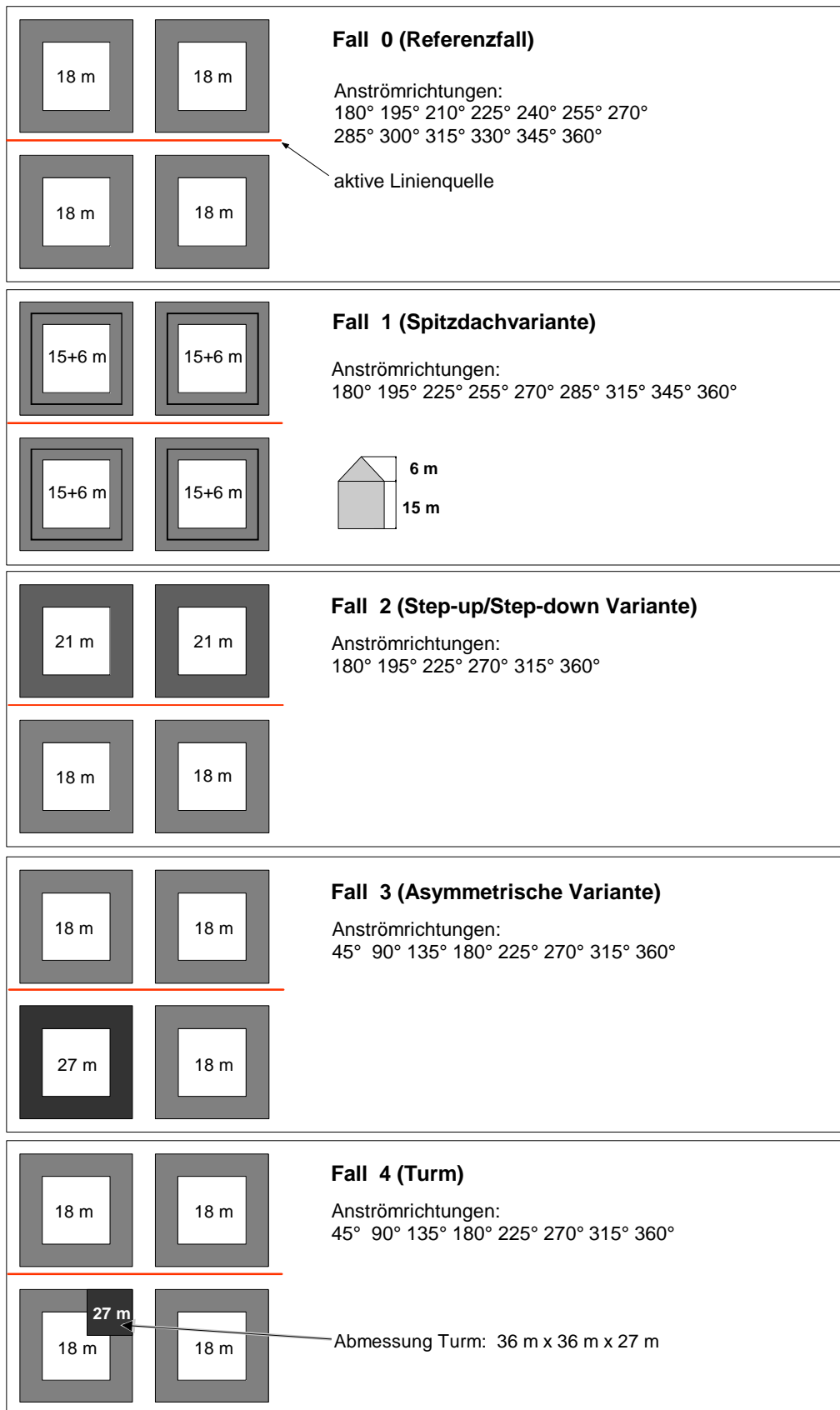


Abbildung 5: Untersuchte Varianten, Hindernisgeometrie, Lage der Quelle und Anströmrichtungen

3.2 Modellgeometrien

Die hier eingesetzten Modelle operieren auf einem kartesischen Gitter. ABC, AIRPOL, ASMUS, DASIM, LASAT und MUKLIMO rechnen mit horizontal äquidistanten Maschenweiten. MISKAM und vor allem IBS verwenden in den Straßenschluchten eine feinere horizontale Auflösung. In der Vertikalen wurden alle Modelle mit variabler Maschenweite gerechnet.

In Tabelle 3 sind Angaben zur Größe der Modellgebiete und deren räumlicher Auflösung aufgelistet. Das Simulationsgebiet wurde in allen Fällen so groß gewählt, daß alle Hindernisse und die Quelle vollständig erfaßt wurden. Die horizontalen Maschenweiten betragen bei ABC/ASMUS, AIRPOL, und DASIM 2 m, bei LASAT 3 m. Bei den verbleibenden Modellen wurden variable horizontale Maschenweiten angesetzt, um, bei vertretbarer Rechenzeit, eine hohe Auflösung im kreuzungsnahen Bereich zu gewährleisten und trotzdem das gesamte Simulationsgebiet abzudecken.

Tabelle 3: Abmessungen der Simulationsgebiete und Anzahl der Rechenzellen

Modell	Abmessungen des Rechengebiets		Maschenweiten		Anzahl der Zellen	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
ABC/ASMUS	270 m · 270 m	50 m	2 m	1 – 10 m	135 · 135	16
AIRPOL	270 m · 270 m	400 m	2 m	1 – 200 m	135 · 135	19
DASIM	270 m · 270 m	50 m	2 m	1 – 10 m	135 · 135	16
IBS	216 m · 216 m	29 m	1,2 – 2 m	0,3 – 3 m	113 · 113	14/17
LASAT	270 m · 270 m	80 m	3 m	1 – 12 m	90 · 90	15
MISKAM	270 m · 270 m	80 m	2 – 6 m	1 – 12 m	79 · 79	20
MUKLIMO	270 m · 270 m	44 m - 50 m	2 – 6 m	1 – 8 m	79 · 79	15-17

3.3 Quelle

Die Lage der Quelle ist in Abbildung 4 eingetragen. Sie befindet sich in der Ost-West verlaufenden Straßenschlucht und stellt den nördlichen Fahrstreifen dar. Der Abstand der Quelle zur Straßenmitte beträgt 3.75 m. Die Länge ist auf 216 m festgesetzt, die Breite auf 1.20 m und die Höhe auf 0.30 m (vgl. Tabelle 2).

Die Ausbreitungsmodule, die auf der Basis von Partikelmodellen beruhen (AIRPOL, LASAT), können die Quellgeometrie „exakt“ nachbilden. Bei IBS wurde das Rechengitter in Bodennähe so fein gewählt, daß die Quelle als eine Zellenreihe behandelt werden kann. Bei den anderen Modellen „verschmiert“ sich der freigesetzte Tracer auf das jeweilige Zellvolumen, was einer Vorverdünnung gleichkommt.

Untersucht werden stationäre Verhältnisse, d.h. die Quelle emittiert kontinuierlich. Fahrzeuginduzierte Turbulenz wird nicht betrachtet.

3.4 Anströmung

In Abbildung 4 sind die für den jeweiligen Fall untersuchten Anströmrichtungen angegeben. Die Richtungen beziehen sich auf Modell-Nord, das in Richtung der positiven y-Achse definiert wurde.

Die ungestörte Anströmung im Windkanal läßt sich mit Hilfe eines Potenzprofils beschreiben.

$$u(z) = u_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z - d_0}{z_{\text{ref}} - d_0} \right)^m \quad (12)$$

Der Exponent m beträgt 0,23, die Windgeschwindigkeit in $z_{\text{ref}}=10$ m über Grund $u_{\text{ref}}=5$ m/s. Die Nullpunktverschiebung d_0 wurde zu 0,3 m ermittelt.

In den numerischen Modellen wird die Anströmung so vorgegeben, daß sie dem Profil im Windkanal im Wesentlichen entspricht. Die Vorgaben sind bei den einzelnen Modellen allerdings unterschiedlich. ABC und DASIM fordern beispielsweise die Vorgabe eines Profils, das für die vorliegende Bebauung als typisch anzusehen ist, während die prognostischen Modelle durch Angabe von Profilexponent und Rauigkeitslänge dem Windkanalprofil (ungestörte Anströmung) angepaßt werden. Tabelle 4 enthält die verwendeten Parameter.

Tabelle 4: Modellangaben zur Definition des Strömungsprofils

Modell	z_0	d_0	Profilexponent	Ausbreitungsklasse
ABC/ASMUS	0,5 m	14 m	0,23	—
AIRPOL	1,0 m	—	0,28	—
DASIM	0,5 m	14 m	0,23	—
IBS	0,85 m	—	0,23	—
LASAT	0,1 m	—	—	III/1
MISKAM	0,1 m / 0,02 cm	—	Log-Profil	—
MUKLIMO	1 cm	—	0,23	—

3.5 Messungen im Windkanal

Die Konzentrationen wurden an jeweils 9 Meßpunkten an allen straßenzugewandten Fassaden ermittelt. Bei 2 Meßebenen (1.5 m und 12 m) ergeben sich insgesamt 144 Meßpunkte. Die räumliche Auflösung ist im kreuzungsnahen Bereich höher, um kleinräumige Strukturen im Konzentrationsfeld zu erfassen. Die Lage der Meßpunkte ist in Abbildung 4 dargestellt.

Für den Vergleich Modell – Windkanal werden normierte Konzentrationen C^* verwendet, um von der Quellstärke Q unabhängig zu sein.

$$C^* = C \cdot U_{10} / Q \quad \text{in } [10^{-3}/\text{m}^2] \quad (13)$$

U_{10} ist dabei die ungestörte Anströmgeschwindigkeit in 10 m über Grund (5 m/s).

3.6 Ein- und Ausgabegrößen der Modelle

Die benötigten Eingangsdaten sind für alle Modelle nahezu gleich. Ausnahmen sind in der folgenden Auflistung in Klammern aufgeführt.

Die Daten müssen in der Regel als ASCII-Dateien zur Verfügung gestellt werden. Diese werden von den Programmen eingelesen und verarbeitet. Der Aufbau dieser Dateien ist sehr unterschiedlich, die Inhalte weniger. Folgende Größen müssen spezifiziert werden:

- Geometrische Größen (Abmessungen des Simulationsgebietes, Maschenweiten, ...)
- Standortspezifische Größen (Lage und Abmessungen der Hindernisse, Bodenrauigkeit, ...)
- Meteorologische Verhältnisse (Anströmrichtung, Angaben zum Anströmprofil, ...)
- Quellkonfigurationen (Lage der Quelle, Abmessung, Quellstärke, ...)
- Steuerparameter (Dateinamen, Abbruchschranke für Erkennung des stationären Zustands, ...)

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in Dateien, die aus Gründen der Platzersparnis meist formatfrei angelegt sind. Zum Auswerten der Daten sind deshalb spezielle Postprozessoren (z.B. Grafikprogramme) erforderlich, die es zu jedem Programm gibt. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Ergebnisse in diesem Bericht einheitlich mit dem ABC-Postprozessor dargestellt.

Als Ergebnisse werden folgende Größen abgelegt:

- 3dimensionale Felder der Strömungskomponenten u , v und w
- 3dimensionale Felder der Diffusionskoeffizienten K_x , K_y und K_z
- 3dimensionales Feld der Konzentrationen C

Sonstige Angaben zur Simulation wie Titel, Vorgaben, abgeleitete Größen, Angaben zur Gitterbelegung (diskrete Hindernisstruktur) usw. werden meist mit abgespeichert.

3.7 Windkanal

Als Referenz für die numerischen Modelle werden **Windkanaluntersuchungen** herangezogen. Unsicherheiten, die bei Naturmessungen vorhanden sind, können dadurch weitgehend ausgeschlossen werden. Die Randbedingungen lassen sich relativ genau definieren und die Ergebnisse sind weitgehend reproduzierbar. In der folgenden Tabelle sind einige Punkte zusammengestellt, die die Vor- bzw. Nachteile zeigen, die bei der Beschaffung von Vergleichsdatensätzen auftreten.

Tabelle 5: Unterschiede Windkanalmessung / Naturmessung bei Ausbreitungsfragen im Straßenraum

Windkanalmessung	Naturmessung
Definierte Hindernisgeometrie (einfache Formen) bedingt Strömungs- und Konzentrationsverteilung	„Unschärfe“ Hindernisgeometrie, da in der Regel hoher Strukturierungsgrad mit schwer abzuschätzenden Effekten auf Strömung und Ausbreitung
Die Quellparameter sind einstellbar und können konstant gehalten werden	Quellparameter müssen über Fahrzeugbewegungen und Emissionsfaktoren abgeschätzt werden
Immissionen werden nur von der vorgegebenen Quelle verursacht	Vorbelastung geht mit ein und muß zeitgleich ermittelt werden
Es können definierte Anströmbedingungen (quasistationäre Zustände) untersucht werden	Fluktuierende Anströmung erfordert Mittelung und Klassifizierung der Meßreihen über große Zeiträume
Die Datenerhebung ist an mehreren Meßstellen bei vertretbarem Aufwand möglich	Personalaufwand und Kosten limitieren die Zahl der Meßstellen drastisch

Wenn man sich also nicht auf einzelne Meßpunkte beschränken, sondern auch die Struktur der Strömungs- und Konzentrationsfelder erkennen und vergleichen will, stellt die Messung im Windkanal eine geeignete Methode dar.

Es ist jedoch zu beachten, daß der Windkanal nicht die Natur darstellt, sondern auch nur ein Modell ist. Ferner treten da, wo gemessen wird, auch Meßfehler auf.

Bei den folgenden Vergleichen, in denen zwangsläufig Zahlenwerte gegenüber gestellt werden, ist zu berücksichtigen, daß die Referenzwerte des Windkanals Toleranzen aufweisen. Diese Fehlermarge, die für einzelne Meßpunkte nicht bekannt sind, fließen folglich auch nicht in die Maßzahlen (z.B. Korrelationskoeffizienten) ein, die zur Bewertung herangezogen werden.

Meßungenauigkeiten können durch Vergleich der symmetrisch zur y-Achse liegenden Meßpunkte bei den Anströmrichtungen 180° und 360° gewonnen werden.

Windkanal

Abbildung 6 zeigt das Scatterdiagramm für diesen Fall. Aufgetragen ist auf der x-Achse die normierte Konzentration $C \cdot u / Q$ (10^{-3} m^{-2}) östlich der Kreuzungsmitte und auf der y-Achse die Konzentration westlich der Kreuzungsmitte für den im Windkanal vermessenen Bebauungsreferenzfall.

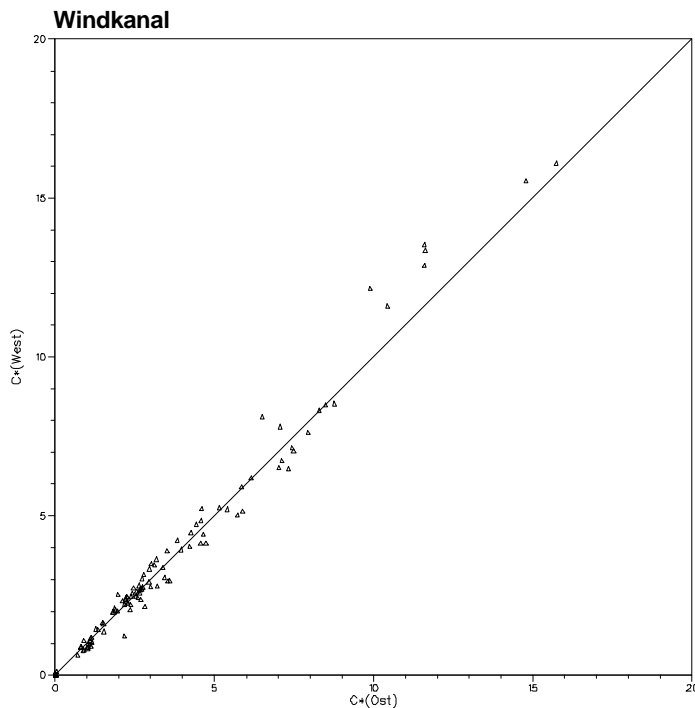


Abbildung 6: normierte Konzentrationen an den Meßpunkten östlich und westlich der Kreuzungsmitte

Idealerweise müßten alle Werte auf der Diagonalen liegen. Der mittlere relative Fehler beträgt 9%, wobei Werte kleiner als $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ nicht berücksichtigt wurden. In Einzelfällen treten auch Abweichungen über 25% auf. Ursachen für diese Streuung können Fehler in der Ausrichtung des Modells im Windkanal sein (Modell nicht genau zwischen den Kanalwänden zentriert, geringfügige Abweichungen der Modellausrichtung), Meßgerätefehler, Mittelungsfehler bei der Datenaufnahme (z.B. zu kurze Mittelungszeiten) usw.

Wechselt man den Modellmaßstab oder den Windkanal, so können zu diesen punktuellen Fehlern noch generelle in der Größenordnung von 30% hinzu kommen (Kastner-Klein et.al., 1998).

Auch die Strömungsmessungen im Windkanal sind nicht unproblematisch. Meßaufbau und Meßmimik spielen hier eine entscheidende Rolle. Erfahrungen können ebenfalls dem PEF-Bericht „Windkanalversuche zur Verbesserung der Ermittlung von Kfz-bedingten Konzentrationsverteilungen in Stadtgebieten“ (Kastner-Klein et.al., 1998) entnommen werden.

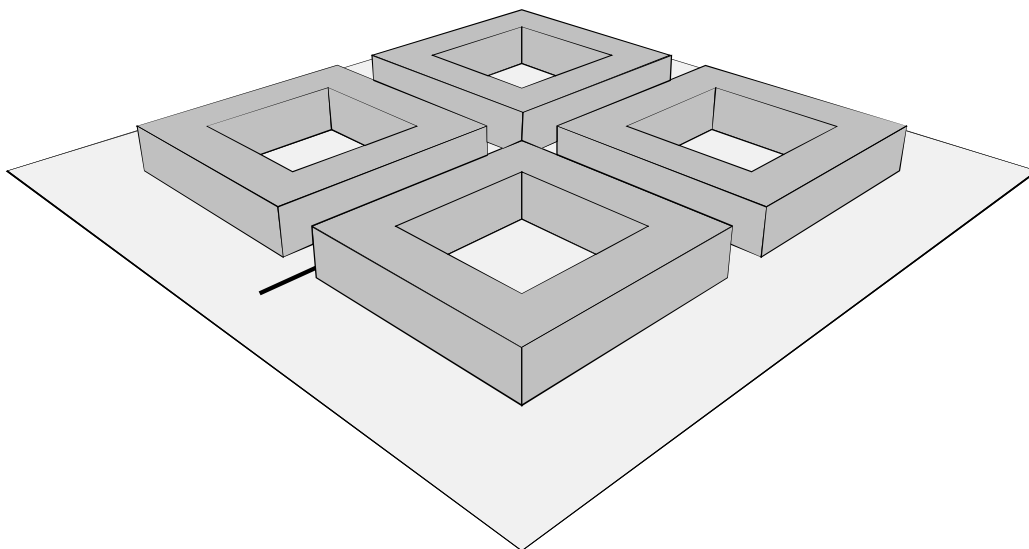
4 Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens wurden 5 Gebäudegeometrien bei insgesamt 44 Anströmrichtungen untersucht. Es wurden 8 numerische Modelle eingesetzt und mit den Ergebnissen der Windkanalmessungen an 144 Meßpunkten in 2 Ebenen verglichen. Da die Darstellung aller Einzelfälle zu unübersichtlich wäre, beschränkt sich dieser Bericht auf die Präsentation einiger exemplarischer Fälle. Um auch die nicht gezeigten Fälle zu berücksichtigen, wurden statistische Kenngrößen berechnet, auf die am Ende des Kapitels eingegangen wird.

Für den Referenzfall mit einheitlicher Bebauungshöhe wurden Strömungsmessungen für 3 Windrichtungen durchgeführt.

Das Koordinatensystem wurde so eingerichtet, daß der Kreuzungsmittelpunkt bei (0m,0m) liegt. Die Nordrichtung liegt oben.

4.1 Fall 0 – Referenzfall



Der Referenzfall ist charakterisiert durch einheitlich hohe Bebauung (18 m). Das Bild oben zeigt eine perspektivische Ansicht des Szenarios aus Nordost. Insgesamt wurden 13 Windrichtungen, beginnend bei Südwind (180°) in 15° -Schritten bis Nordwind (360°) untersucht.

Durch die Symmetrieeigenschaften können die fehlenden Felder für die Windrichtungen ($15^\circ - 165^\circ$) generiert werden, so daß alle Richtungen untersucht werden können. Dies ist Voraussetzung bei der Berechnung statistischer Konzentrations-Kenngrößen. Eine entsprechende Untersuchung ist in Kapitel 4.6 beschrieben.

4.1.1 Strömungsverhältnisse

Die vier Bebauungsblöcke bilden zwei Straßenschluchten mit einem Breiten- zu Höhenverhältnis von 1:1. In den Straßenschluchten bildet sich, abhängig von der Anströmrichtung, ein sogenannter Canyon-Vortex aus. Dies ist ein Wirbel mit straßenparalleler Achse. Angetrieben wird dieser Wirbel durch die Strömung im Dachniveau. Im Bereich der windzugewandten Fassaden wird die Strömung nach unten geführt, auf der anderen Straßenseite findet man aufsteigende Luftbewegungen.

Im Kreuzungsbereich stellen sich in Lee der Gebäudeecken, je nach Anströmrichtung, kleinräumige Wirbel mit senkrechter Achse ein. In diesen Eckenwirbeln wird die bodennahe Luft spiralförmig nach oben geführt (vgl. Abbildung 1).

In den Innenhöfen der Gebäude bilden sich Rezirkulationszonen aus, d.h. bodennah wird die Luft gegen die über dem Dach herrschende Strömung transportiert.

Um dem Leser den optischen Vergleich zu erleichtern, werden die Ergebnisfelder im Anhang graphisch einander gegenüber gestellt.

In den Abbildungen A1 bis A7 sind die Strömungsverhältnisse ca. 2,5 m über Grund für Ausschnitte von 120 m · 120 m in Form von Vektorgrafiken dargestellt. Die oberen Abbildungen zeigen die Windvektoren bei einer Anströmung aus 225° (Südwestwind), die unteren Abbildungen bei einer Anströmung aus 240° (West-südwestwind). Um einen direkten Vergleich mit den im Windkanal gemessenen Profilen zu ermöglichen, sind die entsprechenden Ausschnitte jeweils rechts neben den berechneten Strömungsfeldern dargestellt.

ABC (Abbildung A1)

In den Straßenschluchten wird eine straßensenkrechte Komponente simuliert, so daß die Strömung bodennah gegen die windabgewandten Straßenseiten geführt wird. Die Strömungsrichtung deckt sich weitgehend mit der im Windkanal beobachteten Strömungsrichtung. Die Windgeschwindigkeiten sind jedoch gegenüber dem Windkanal deutlich geringer. In der Kreuzungsmitte entspricht die Windrichtung der Anströmrichtung. Dies wird vom Modell gut wiedergegeben. Weniger gut ist die Übereinstimmung im Bereich der Eckenwirbel, die im Windkanal stärker ausgeprägt sind.

AIRPOL (Abbildung A2)

Das Modell AIRPOL zeigt in vielen Bereichen eine gute Übereinstimmung der Strömungsrichtungen. Die Eckenwirbel sind deutlicher als bei ABC ausgeprägt und stimmen besser mit den im Windkanal gefundenen Verhältnissen überein. Die Strömung in den Straßenschluchten ist stärker als bei ABC strukturiert, d.h. im Bereich der windzugewandten Fassaden werden höhere Windgeschwindigkeiten berechnet als an den windabgewandten Fassaden. Dies deckt sich jedoch nicht immer mit den Windkanalergebnissen.

DASIM (Abbildung A3)

Die DASIM Ergebnisse entsprechen in weiten Bereichen denen von ABC. Auffällig ist der spontane Übergang der Strömung vom Straßenschluchtregime in das Regime des Kreuzungsbereiches, der bei ABC durch ein Glättungsverfahren bei der Erzeugung des Initialwindfeldes reduziert wird.

IBS (Abbildung A4)

Bei IBS fällt zunächst die feinere Mascheneinteilung des Rechengitters auf. Die Strömungsrichtungen harmonisieren mit Ausnahme der Eckenwirbelbereiche mit den im Windkanal gemessenen Strömungen. Das Strömungsquersprofil im Straßenraum mit hohen Windgeschwindigkeiten in Straßenmitte und kleinen Geschwindigkeiten am Straßenrand ist im Windkanal weniger stark ausgeprägt.

LASAT (Abbildung A5)

LASAT wurde mit einer horizontalen Auflösung von 3 m gerechnet. Die Strömung in den Straßenschluchten stimmt gut mit den Windkanalmessungen überein. Die Eckenwirbel sind deutlich ausgeprägt, allerdings ist ihre Ausdehnung etwas zu groß. In den Innenhöfen werden zum Teil weniger plausible Verhältnisse modelliert. Dies betrifft vor allem die Strömung in den Eckenbereichen, die deutlich von den anderen Modellen abweicht.

MISKAM (Abbildung A6)

Das Rechengitter ist im Zentrum äquidistant angelegt. Zum Rechengietsrand hin nehmen die Maschenweiten sukzessive zu. Die Eckenwirbel werden von MISKAM gut wiedergegeben. Die Strömung in den Straßenschluchten ist im kreuzungsnahen Bereich stark in Straßenlängsrichtung kanalisiert. Der Windkanal weist hier größere straßensenkrechte Komponenten aus.

MUKLIMO (Abbildung A7)

Die Gittereinteilung von MUKLIMO entspricht der von MISKAM. Eine starke Kanalisierung der Strömung im Straßenraum ist wie bei MISKAM vorhanden. Eckenwirbel werden jedoch nicht simuliert.

Eine Beurteilung aller untersuchten Anströmrichtungen ist mit Hilfe der in Abbildung A8a (für die Modelle ABC; AIRPOL, DASIM, IBS) und A8b (für die Modelle LASAT, MISKAM und MUKLIMO) dargestellten Geschwindigkeitswindrosen an drei ausgewählten Punkten möglich. Die Windrosen zeigen die Richtung, aus der die Strömung am jeweils untersuchten Aufpunkt kommt. Die zugehörige Anströmrichtung ist als Zahlenwert am Balkenende angegeben. Die Länge der Balken stellt die Windgeschwindigkeit in 1,5 m über Grund dar.

Die betrachteten Aufpunkte sind:

Ergebnisse

- 1 Straßenmitte, 30 m westlich der Kreuzungsmitte
- 2 Kreuzungsmitte
- 3 Zone, in der Eckenwirbel auftreten können

Die linke Spalte (Aufpunkt 1) zeigt die Verhältnisse in der Straßenschlucht. Bei einer Anströmung aus Süd (180°) weisen ABC, DASIM, IBS und MUKLIMO eine nördliche Strömung auf. Die Geschwindigkeiten variieren zwischen knapp 1 m/s bei MUKLIMO bis ca. 1,5 m/s bei ABC. AIRPOL und MISKAM bilden die südliche Anströmung auf nordwestliche Windrichtungen ab. Die Asymmetrie bei LASAT kommt dadurch zustande, daß keine Gitterzelle in der Straßenmitte existiert und anstelle dessen der Wert der nördlich davon gelegenen Zelle ausgewertet wird.

Je straßenparalleler die Anströmung wird, desto höher wird die bodennah simulierte Strömungsgeschwindigkeit. Wind aus West (270°) führt bei folgenden Modellen zu den höchsten Geschwindigkeiten: ABC (3,1 m/s), IBS (4,4 m/s), LASAT (3,1 m/s) und MUKLIMO (3,8 m/s). Bei AIRPOL (3,8 m/s), DASIM (3,3 m/s) und MISKAM (3,4 m/s) liegen die Maxima bei um 15° versetzten Anströmrichtungen.

Die Kanalisierung der Strömung in der Straßenschlucht nimmt mit zunehmender straßenparalleler Anströmung bei allen Modellen zu. Der Grad der Zunahme ist unterschiedlich stark ausgeprägt. AIRPOL, MISKAM und MUKLIMO kanalisieren im Gegensatz zu ABC, DASIM und LASAT relativ stark. IBS nimmt eine Zwischenstellung ein.

Für die Kreuzungsmitte (Aufpunkt 2, mittlere Spalte) ergibt sich ein anderes Bild. Hier setzt sich bei den Modellen ABC, AIRPOL, DASIM, IBS und MUKLIMO die ungestörte Anströmrichtung auch auf der Kreuzung durch, während bei LASAT und MISKAM eine Fortsetzung der Kanalisierung der angrenzenden Straßenschluchten zu beobachten ist. Die im Windkanal untersuchten Windrichtungen 270° , 240° und 225° lassen eine Beurteilung kaum zu, da sowohl bei 270° als auch bei 225° annähernd die gleichen Richtungen am Kreuzungsmittelpunkt gemessen und berechnet wurden. In Tabelle 6 sind die Strömungsrichtungen in der Kreuzungsmitte für die Anströmrichtung 240° zusammengestellt.

Tabelle 6: Windrichtung am Kreuzungsmittelpunkt bei einer Anströmung aus 240°

Windkanal	ABC	AIRPOL	DASIM	IBS	LASAT	MISKAM	MUKLIMO
$252,8^\circ$	$242,4^\circ$	$247,0^\circ$	$241,7^\circ$	$240,6^\circ$	$264,3^\circ$	$258,0^\circ$	$238,9^\circ$

Demzufolge kommen AIRPOL und MISKAM der im Windkanal gemessenen Richtung am nächsten, wobei MISKAM etwas zu stark und AIRPOL etwas zu wenig kanalisiert. Die anderen Modelle liegen mit Abweichungen von weniger als 14° ebenfalls nicht weit von diesem Meßwert entfernt.

Betrachtet man die Strömungsverhältnisse an der südöstlichen Kreuzungsecke (Aufpunkt 3, Abbildungen A8, rechte Spalte), bei denen eine wandnahe Punkt ausgewertet wurde, so findet man

überwiegend stark kanalisierte Strömungen aus westlicher Richtung. Strömungskomponenten aus östlicher Richtung zeigen die Ausbildung eines Eckenwirbels an.

Bei ABC wird beispielsweise ein solcher Wirbel für die Anströmrichtungen 180° und 195° generiert. Bei AIRPOL und MISKAM entsteht der Wirbel für Richtungen zwischen 180° und 225° . DASIM und IBS bilden keinen Eckenwirbel aus, LASAT dagegen für ein breites Anströmpektrum ($180^\circ - 240^\circ$).

Vertikalprofile der horizontalen Strömungskomponenten

Die vertikale Struktur der Strömung wurde anhand von Profilen an ausgewählten Punkten untersucht (siehe Abbildung 7) und mit den Windkanaldaten verglichen. Abbildung A9 zeigt auf der linken Seite die u-Komponente (West-Ost-Komponente der Strömung) in Kreuzungsmitte, auf der rechten Seite in der Nord-Süd verlaufenden Straße. Es wird eine straßenparallele Anströmung betrachtet. Die Kurven sind mit Symbolen für jedes Modell markiert, die Meßwerte aus dem Windkanal sind hervorgehoben.

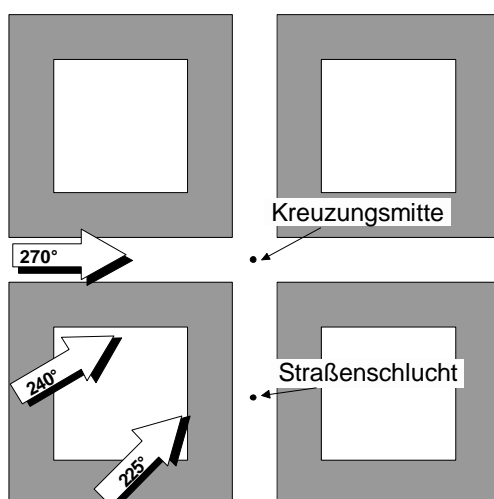


Abbildung 7: Lage der betrachteten Punkte und Anströmrichtungen

In der Kreuzungsmitte beträgt die Strömungsgeschwindigkeit in 2,3 m über Grund 2,2 m/s und steigt dann nahezu linear auf 6 m/s in 45 m Höhe an. Die numerischen Modelle mit Ausnahme von ABC und DASIM weisen typische Grenzschichtprofile auf. Die Windgeschwindigkeiten sind durchweg höher als im Windkanal. AIRPOL weist nahezu doppelt so hohe Windgeschwindigkeiten aus. Die Knicke in den Profilen von ABC und DASIM sind die Folge des Initialisierungsverfahrens. Das Anströmprofil für bebauten Gelände geht bei diesen Modellen von einer Nullpunktverschiebung des Profils aus, d.h. das Grenzschichtprofil ist um einen von der Bebauungsdichte abhängigen Betrag nach oben hin verschoben. Um unter diesem Nullpunkt, der etwa bei 14 m liegt, noch Geschwindigkeiten zu initialisieren, wird die Geschwindigkeit im mittleren Dachniveau (18 m) bei ABC linear, bei DASIM in Form eines Grenzschichtprofils zum Boden hin fortgesetzt.

Ergebnisse

In der Mitte der senkrecht angeströmten Straßenschlucht sind die Unterschiede zwischen den Modellen unterhalb des Dachniveaus nicht mehr so groß (Abbildung A9 rechts). Der Canyon-Vortex zeichnet sich bodennah durch eine negative u-Komponente aus. Das Wirbelzentrum liegt je nach Modell in einer Höhe zwischen 9 m (Windkanal) und 15 m (LASAT). Das Vertikalprofil von LASAT fällt dabei aus der Kurvenschar der anderen Modelle heraus. In 10 m über Grund wird von LASAT die höchste negative Strömungskomponente berechnet. Oberhalb des Dachniveaus ist hingegen ein deutliches Überschießen zu verzeichnen.

Abbildung A10 zeigt die Profile der u-Komponente in der Kreuzungsmitte und in der Straßenschlucht für eine Anströmung aus 240°. An den oben dargestellten Charakteristika ändert sich nur wenig. Die Windkanalmessungen liegen für diese Richtung nur bis in Höhen von 18 m vor. Eine Übereinstimmung mit den numerischen Modellierungen ist nur in Teilbereichen vorhanden, wobei die Ergebnisse der numerischen Modelle plausibler erscheinen.

Auch für die Anströmung 225° wurden die Profile an den oben genannten Punkten ausgewertet. Abbildung A11 zeigt die Profile für die u-Komponente (oben) und die v-Komponente (unten). In der Kreuzungsmitte (Grafiken links) findet sich die relativ breite Spreizung der Beträge der Strömungskomponenten wieder. Die Windkanalmessungen, die bis in eine Höhe von 18 m erfolgten, liegen in der Mitte der Kurvenschar. Geringere Geschwindigkeiten unterhalb des Dachniveaus weisen AIRPOL und ABC auf, höhere Windgeschwindigkeiten IBS und MUKLIMO.

Aus Symmetriegründen müßten die u- und v-Komponenten in der Kreuzungsmitte identisch sein, d.h. die Profile der einzelnen Modelle sollten in den linken Abbildungen weitgehend deckungsgleich verlaufen. Dies ist bei AIRPOL nicht der Fall. Zwischen 3 m und 25 m ist hier die v-Komponente kleiner als die u-Komponente.

In der Straßenschlucht weisen die numerischen Modelle einen relativ einheitlichen Verlauf der straßensenkrechten Strömungskomponente auf (Abbildung A11 rechts oben). Zum Vergleich sind zwei Windkanalprofile eingetragen – das am Meßpunkt aufgenommene und das am spiegelbildlich dazu liegenden Punkt. Während ein Profil relativ gute Übereinstimmungen zeigt, weicht das andere deutlich davon ab.

Dies ist auch beim Vergleich der straßenparallelen v-Komponente der Fall. Trotz des markanten Verlaufes stimmt in diesem Fall die v-Komponente von AIRPOL am besten mit den Messungen überein.

Vertikalkomponenten

Die Vertikalkomponenten sind eine entscheidende Einflußgröße für den Luftaustausch im Straßenraum. Im Windkanal wurden die Vertikalkomponenten in der Straßenschlucht für eine straßensenkrechte Anströmung ermittelt, so daß ein Vergleich mit den Modellergebnissen möglich ist. Tabelle 7 zeigt die maximalen Strömungskomponenten und deren Höhe. In einem Abstand von 6 m zur Straßenmitte findet man im Windkanal auf der Leeseite eine aufwärts gerichtete

Strömung mit 1,5 m/s zwischen 7 m und 9 m über Grund. Die abwärts gerichtete Strömungsgeschwindigkeit ist geringfügig kleiner (1,4 m/s) und wird auf der Luvseite in 11 m über Grund gemessen.

ABC, DASIM und IBS kommen diesen Werten relativ nahe. Bei AIRPOL und vor allem MISKAM und MUKLIMO wurden zum Teil deutlich kleinere Beträge simuliert. LASAT berechnet dagegen wesentlich zu hohe Vertikalgeschwindigkeiten.

Tabelle 7: größte positive bzw. größte negative Vertikal-Komponente in der Straßenschlucht und deren Aufttrittshöhe bei straßensenkrechter Anströmung

Modell	Vertikal-Komponente bei $x=-6\text{m}, y=-54\text{m}$	Höhe des Maximums	Vertikal-Komponente bei $x=+6\text{m}, y=-54\text{m}$	Höhe des Minimums
Windkanal	1,5 m/s	7 m - 9 m	-1,4 m/s	11 m
ABC	1,6 m/s	12 m - 15 m	-1,4 m/s	12 m
AIRPOL	1,3 m/s	7 m - 9m	-0,9 m/s	9 m
DASIM	1,4 m/s	9 m - 15 m	-1,5 m/s	9 m - 15 m
IBS	1,6 m/s	9 m	-1,6 m/s	9 m
LASAT	5,1 m/s	16 m	-4,3 m/s	14 m
MISKAM	0,9 m/s	12 m - 14 m	-0,4 m/s	12 m
MUKLIMO	0,9 m/s	13 m	-0,6 m/s	11 m

Die untersuchten Fälle zeigen, daß die grundlegenden Strömungscharakteristika in den Straßenschluchten und im Kreuzungsbereich von allen Modellen wiedergegeben werden. In den Details – Straßenquerprofile, Eckenwirbel, Stärke der Kanalisierung, Intensität des Canyon-Vortex – gibt es jedoch Unterschiede. Diese existieren sowohl zwischen den numerischen Modellen als auch im Vergleich zum Windkanal.

Die exemplarisch vorgestellten Horizontalschnitte werden von LASAT im Vergleich zu den Messungen am besten getroffen. Betrachtet man jedoch die Vertikalkomponenten in der Straßenschlucht, so liegt LASAT über dem üblichen Rahmen. Analoges gilt für die anderen Modelle. Stärken in Teilbereichen werden durch Schwächen in anderen Bereichen kompensiert.

4.1.2 Konzentrationsverhältnisse

Bei einer Punktquelle und freier Ausbreitung bestimmen Windrichtung, Windgeschwindigkeit und turbulente Diffusion die Konzentration eines Spurenstoffes an einem betrachteten Aufpunkt. Der Ausbreitungsweg ist leicht nachvollziehbar. In bebautem Gelände sind jedoch die Strömungsverhältnisse so komplex, daß bereits die Vorhersage der Orte, an denen nennenswerte Konzentrationen auftreten können, sehr schwierig ist. Ursache ist die Dreidimensionalität der Strömung. Je

nach Anströmung existieren zahlreiche Wirbelsysteme mit horizontaler und vertikaler Achse, die eine unterschiedlich starke Ausbreitung der Spurenstoffe in allen drei Raumrichtungen bewirken.

Bei Linienquellen erhöht sich die Komplexität noch weiter, da an einem Aufpunkt Anteile aus unterschiedlichen Quellsegmenten einen Immissionsbeitrag leisten können. Die Güte der Immissionsprognose hängt davon ab, wie gut kleinräumige Strömungssysteme nachgebildet werden. Daneben spielt die turbulente Diffusion eine Rolle, die in der Regel glättend auf das Konzentrationsfeld wirkt.

Straßenparallele Anströmung (270°)

Zunächst wird der verhältnismäßig einfache Fall einer straßenparallelen Anströmung betrachtet. In der durchströmten Straßenschlucht bildet sich kein Wirbelsystem aus. Die Emissionen werden geradlinig entlang der Straße transportiert. Lediglich die Diffusion führt zu einem Aufweiten der Fahne. Da entlang der Linienquelle stets neue Beiträge eingebracht werden, kommt es zu einer Anreicherung der Konzentration im Straßenraum.

Im Kreuzungsbereich wird dieses Verhalten durch die einmündenden Nebenstraßen modifiziert. Es kann sowohl unbelastete Luft eingemischt als auch belastete Luft abgeführt werden. Wo und wie intensiv dieser Prozeß stattfindet, hängt von der jeweiligen Ausprägung der Wirbelstrukturen ab. Daß diese sehr unterschiedlich sein können, zeigt die Abbildung 8.

Bei ABC, AIRPOL, LASAT und MISKAM füllt der Eckenwirbel die gesamte Straßenbreite der Nebenstraße aus. An der Ostseite wird folglich belastete Luft nach Norden geführt und an der Westseite unbelastete Luft in den Kreuzungsraum transportiert. Bei DASIM ist der Wirbel auf eine Gitterzeile zusammengeschrumpft. IBS und MUKLIMO modellieren grundsätzlich andere Strömungsstrukturen. Hier wird an der Westseite der Nebenstraße belastete Luft nach Norden geführt und an der Ostseite Luft aus der Nebenstraße zur Kreuzung hin transportiert.

Die im Windkanal in 4,5 m über Grund gemessenen Strömungskomponenten bringen keine Klarheit über die Richtigkeit der Ergebnisse, da hier über die gesamte Straßenbreite der Nebenstraße die Strömung in die Kreuzung einfließt.

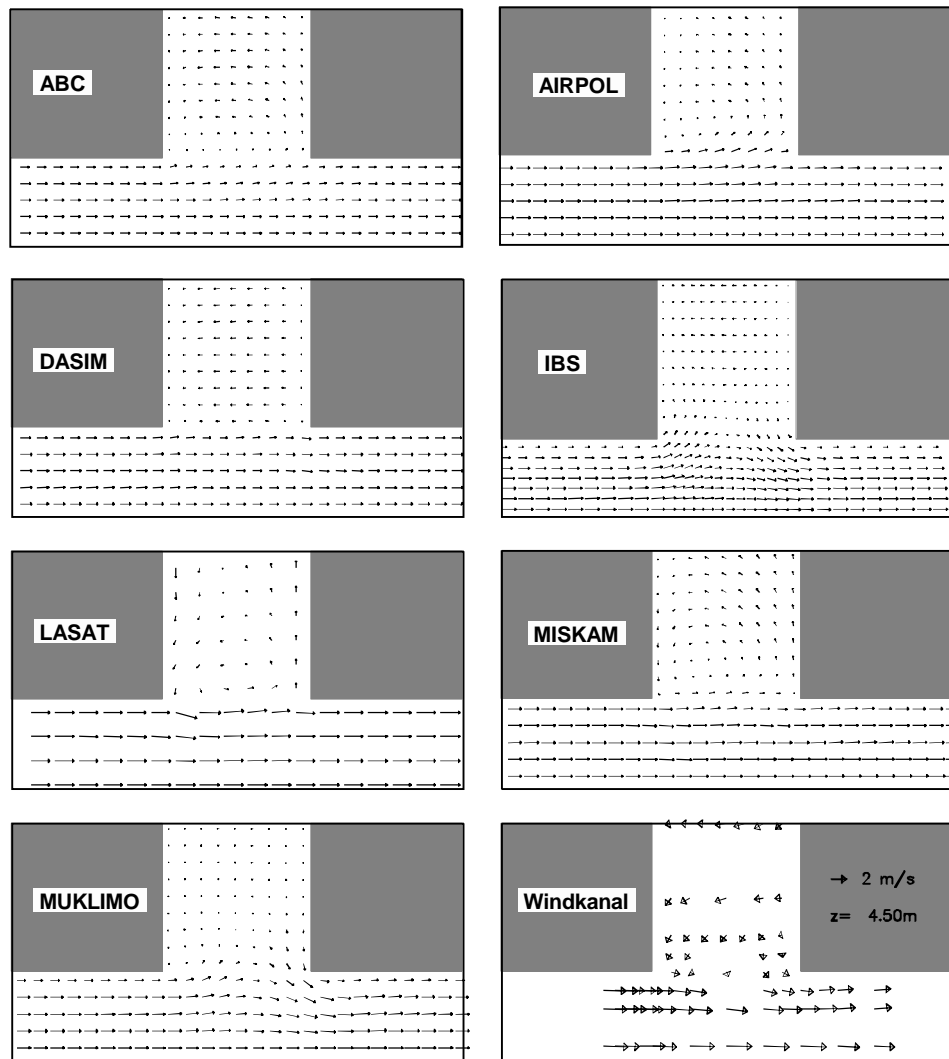


Abbildung 8: Strömungsverhältnisse im Kreuzungsbereich bei Anströmung aus West (270°). Bezugshöhe: numerische Modelle 1,5 m, Windkanal 4,5 m.

In den Abbildungen A12a und A12b sind die gemessenen und berechneten bodennahen Konzentrationsfelder für die gesamte Straßenlänge dargestellt. Eingezeichnet sind Linien gleicher normierter Konzentrationen in nichtäquidistanter Staffelung (1, 2, 5, 10, 15, 20, ... $\cdot 10^{-3}$ 1/m²). Bereiche mit Konzentrationen über $5 \cdot 10^{-3}$ 1/m² sind grau unterlegt.

Im Windkanal (Abb. A12, jeweils oberste Grafik) nimmt die Konzentration nach Osten hin zu und erreicht an der nördlichen Fassade bei der Einmündung in die Kreuzung ein lokales Maximum ($7,6 \cdot 10^{-3}$ 1/m²). Hinter der Kreuzung liegen die Konzentrationen an der nördlichen Fassade nahezu um die Hälfte geringer – ein Hinweis, daß hier unbelastete Luft in den Kreuzungsbereich eingemischt wurde. Im weiteren Verlauf der Straße nimmt die Konzentration wieder zu und erreicht am Ende der Straße ein Maximum ($9,1 \cdot 10^{-3}$ 1/m²). An der südlichen Fassade sind die Konzentrationen aufgrund des größeren Abstands zur Linienquelle geringer. Durch die turbulente Diffusion wird die Luft mit zunehmender Transportweglänge stärker über den gesamten Straßen-

Ergebnisse

raum verteilt. Dies äußert sich im Verhältnis der Konzentrationen von Nord- zu Südfassade, das am Beginn der Straße noch bei ca. 8, am Ende der Straße bei 2,4 liegt.

Der Konzentrationsverlauf in der nördlichen Nebenstraße weist darauf hin, daß eher an der östlichen Fassade belastete Luft in die Seitenstraße einfließt. In der südlichen Nebenstraße verhalten sich die Konzentrationen spiegelbildlich, jedoch auf einem etwas höheren Konzentrationsniveau. Dies erscheint nicht plausibel.

Bei ABC nimmt die Konzentration über der Linienquelle zunächst bis zur Kreuzungsmitte zu, hinter der Kreuzung zunächst ab, um dann erneut anzusteigen. Dies zeigt, daß im Kreuzungsbereich ebenfalls unbelastete Luft eingemischt wird. Dies geschieht an der nördlichen Fassade jedoch nicht analog zum Windkanal, da die Konzentration relativ kontinuierlich von West nach Ost ansteigt. Auf der Südseite der Straße liegen die Konzentrationen unter denen, die im Windkanal gemessenen wurden. Die turbulente Diffusion, die für die Verbreiterung der Fahne verantwortlich ist, liegt also unter der im Windkanal beobachteten.

AIRPOL liegt bezüglich der Durchmischung im Straßenraum näher an den gemessenen Verhältnissen. Auch in die südliche Nebenstraße werden Teile der belasteten Luft verfrachtet. Die Konzentrationsmaxima liegen deutlich unter dem von ABC. Dies ist auf die stärkere Durchmischung und die höheren bodennahen Windgeschwindigkeiten (vgl. Kapitel 4.1.1) zurückzuführen. Der teils gewellte Verlauf der Isolinien ist typisch für Partikelmodelle, wenn die Partikeldichte gering ist. Würden mehr Partikel gestartet, ergäben sich glattere Verläufe.

ASMUS, das auf dem Strömungsfeld von ABC aufsetzt und sich nur in der Turbulenzparametrisierung unterscheidet, zeigt im Konzentrationsfeld keine wesentlichen Unterschiede zu ABC. Die horizontale Diffusion ist etwas größer, was zu etwas höheren Immissionen an den Fassaden führt.

Trotz deutlich unterschiedlicher Ansätze zeigt DASIM im Ergebnis mit ABC vergleichbare Strukturen. Unterschiede existieren im Kreuzungsbereich und in der Aufweitung der Fahne.

IBS weist dagegen, wohl bedingt durch hohe Diffusion, eine starke Durchmischung im Straßenraum auf. Sieht man von den Konzentrationsverläufen in den Nebenstraßen ab, so ist die Korrelation mit den Windkanalmessungen recht hoch.

MISKAM weist die geringsten Konzentrationen aller Modelle auf. Eine der Ursachen könnte die hohe Strömungsgeschwindigkeit in Quellhöhe sein, die bei der Westanströmung auftritt (vgl. Abbildung A9).

MUKLIMO berechnet sehr hohe Konzentrationen über der Quelle. Die Aufweitung der Fahne ist gering, d.h. es findet nahezu keine laterale Diffusion statt. Die Konzentrationen an den Fassaden werden bei dieser Anströmung deutlich unterschätzt. Der kleine Eckenwirbel mit sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten führt in der nördlichen Nebenstraße zu einem lokalen Maximum, das sich mit den Verhältnissen im Windkanal nicht deckt.

Exemplarisch sind für die Anströmrichtung 270° auch die Konzentrationsfelder in 12 m über Grund dargestellt. Aus ihnen kann ersehen werden, wie die Modelle die Verfrachtung der Emissionen aus der Bodenquelle in die Höhe berechnen. Verantwortlich für diesen Transport sind die vertikale Advektion und vertikale turbulente Diffusion. In Abbildung A13a und A13b sind entsprechende Schnitte dargestellt. Die Isolinien wurden für normierte Konzentrationen mit einer Schrittweite von $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ eingetragen. Werte größer als $2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ sind grau unterlegt.

Mit zunehmendem Ausbreitungsweg, d.h. von West nach Ost, führt die vertikale Diffusion zu einem Transport der Luftbeimengungen in höhere Schichten. Der Verlauf korrespondiert im Windkanal mit den Konzentrationswerten im bodennahen Niveau. Die Maxima werden an der Nordfassade im östlichen Straßenstück ermittelt. Die Konzentrationen an der nördlichen und südlichen Fassade der Gebäude haben sich stärker angeglichen. Das Verhältnis beträgt am östlichen Straßenende nur noch 1,4. In der unteren Meßhöhe lag es an dieser Stelle noch bei 2,4.

Bei ABC und ASMUS stimmt der Konzentrationsverlauf an der nördlichen Fassade relativ gut mit den gemessenen Werten überein. An der Südfassade werden die Konzentrationen jedoch nach wie vor unterschätzt. Hervorzuheben ist der intensive Vertikaltransport im Bereich des Eckenwirbels in der nördlichen Seitenstraße, der von allen numerischen Modellen ähnlich wiedergegeben wird.

Bei AIRPOL halten sich die Partikel in den Eckenwirbeln offensichtlich länger auf, was zu hohen Konzentrationen in diesen Bereichen führt. Das Konzentrationsmaximum hat sich zudem in Richtung Straßenmitte verlagert. Dies ist wahrscheinlich auf die Modellierung der Partikelreflexion an den Gebäudewänden zurückzuführen.

DASIM verhält sich analog zu ABC bzw. ASMUS. Im Eckenbereich wird jedoch mehr Masse in die Höhe transportiert, was zu höheren Konzentrationen an der nördlichen Fassade führt.

Bei IBS werden die Luftbeimengungen hauptsächlich in den Eckenwirbeln nach oben geführt. Die vertikale Diffusion in der durchströmten Straße führt zu keinen merklichen Konzentrationen in der betrachteten Höhe.

Während das Konzentrationsniveau von LASAT in Bodennähe durchaus mit ABC vergleichbar ist, findet man in der Höhe deutlich geringere Konzentrationen. Die prinzipielle Struktur – Aufsteigen im Eckenwirbel und Maximum im Bereich der nördlichen Fassade – deckt sich mit ABC. Die Unzulänglichkeiten, die beim Ausbreitungsmodul von AIRPOL auftreten, sind bei diesem Partikelmodell nicht vorhanden.

MISKAM unterschätzt zwar die Konzentrationen, jedoch stimmt die Struktur des Feldes vergleichsweise gut mit der gemessenen Konzentrationsverteilung überein. Als einziges Modell simuliert MISKAM das lokale Maximum am Ende der westlichen Straßenhälfte.

MUKLIMO unterschätzt sowohl die horizontale als auch die vertikale Diffusion. An den nördlichen und südlichen Fassaden werden keine merklichen Konzentrationen berechnet.

Mäßiger Querwind (240°)

Bei einer Anströmung aus 240° führt die straßensenkrechte Komponente zur Ausbildung eines Rotors in der Straßenschlucht. Die Emissionen werden also auf einer spiralförmigen Bahn in Straßenslängsrichtung verfrachtet. Dabei verläßt ein Teil der freigesetzten Spurenstoffe den Straßenraum im Dachniveau, ein anderer im Kreuzungsbereich. Der Rest wird längs der Straße verfrachtet. Analog zur Abbildung A12 sind die gemessenen und berechneten Immissionsverhältnisse für diese Anströmrichtung in den Abbildungen A14a und A14b dargestellt. Die bodennahen Strömungsverhältnisse wurden bereits in Kapitel 4.1.1 besprochen.

Die höchsten Konzentrationen werden im Windkanal an der Südfassade im östlichen Straßenabschnitt gemessen. Längs der Straße hat eine Aufkonzentration stattgefunden und der Rotor bewirkt eine bodennahe Verfrachtung zur Südfassade hin. Die auf der Kreuzung vorherrschende Westsüdwestströmung führt nordöstlich der Kreuzung zu relativ hohen Konzentrationen. Ein nicht unerheblicher Teil der Emissionen fließt in die nördliche Seitenstraße ein. Aus der südlichen Seitenstraße wird dagegen unbelastete Luft in den Straßenraum eingebracht.

Diese Sachverhalte werden im Wesentlichen von den numerischen Modellen wiedergegeben. Anders als bei der straßenparallelen Anströmung, bei der die Diffusion entscheidend für die Konzentration an den Fassaden ist, dominieren in diesem Fall die advektiven Prozesse. Dementsprechend stimmen die Konzentrationsfelder in diesem Fall besser überein. Die stärkere Kanalisierung der Strömung bei LASAT und MISKAM führt zwar zu geringeren Konzentrationen an den südlichen Fassaden, die Lage der Maxima und Minima wird jedoch auch von diesen Modellen gut getroffen. Die Maximalkonzentrationen der unterschiedlichen Modelle haben sich ebenfalls angeglichen, wobei MISKAM immer noch die geringsten und MUKLIMO die höchsten Konzentrationen aufweist.

Weitere Anströmrichtungen

Ein Überblick, wie sich die bodennahe Konzentration an ausgewählten Punkten in Abhängigkeit von der Anströmrichtung ändert, ist in Abbildung A14a und A14b gegeben. Analog zur Auswertung der Strömungsrichtungen wurden Konzentrationswindrosen erstellt. Die Richtung der Balken in den Polardiagrammen gibt die ungestörte Anströmrichtung wieder, die Länge der Balken stellt die normierte Konzentration am jeweiligen Aufpunkt dar. Ausgewählt wurden folgende Punkte:

- 1 Nordfassade, 36 m westlich der Kreuzungsmitte
- 2 Nordfassade, 12 m westlich der Kreuzungsmitte
- 3 Südfassade, 18 m östlich der Kreuzungsmitte
- 4 Nordfassade, 36 m östlich der Kreuzungsmitte

Die Konzentrationsverteilungen für diese Punkte sind spaltenweise von links nach rechts angeordnet. Die Auswertung für die einzelnen Modelle steht zeilenweise untereinander, wobei zur Wahrung der Vergleichsmöglichkeiten der Windkanal auf beiden Seiten aufgeführt ist.

Am Vergleichspunkt 1 findet man im Windkanal das Maximum ($15,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$) bei straßensenkrechter Anströmung aus Nord. Der Wert ist nahezu doppelt so hoch wie die Konzentrationen, die bei anderen Anströmrichtungen mit Ausbildung eines Canyon-Vortex gemessen wurden. Ein sekundäres Maximum stellt sich bei nordwestlicher Anströmung ein. Bei nahezu straßenparalleler Anströmung ($240^\circ - 285^\circ$) werden an der Nordfassade ebenfalls erhöhte Konzentrationen gemessen. Für südlichere Anströmrichtungen ($195^\circ - 225^\circ$) werden nur sehr geringe Konzentrationen ermittelt. Bei straßensenkrechter Anströmung aus Süd zeigt Meßpunkt 1 wieder eine etwas erhöhte Konzentration ($2,7 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$).

Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte weniger auf die Beträge, sondern auf die Verteilung der Konzentrationen geachtet werden.

Das absolute Maximum bei Nordwind wird nur von den Modellen AIRPOL und MISKAM prognostiziert. Beim Übergang zu westlicheren Anströmrichtungen nehmen die Konzentrationen wesentlich fließender ab als im Windkanal. ABC, ASMUS, DASIM, IBS und MUKLIMO weisen ihr Maximum bei westsüdwestlichen Richtungen auf, was der Richtung des sekundären Maximums im Windkanal entspricht.

Strömungen aus dem Südwestsektor sind bei den Modellen ABC, DASIM, IBS und MUKLIMO mit geringen Konzentrationen am Aufpunkt 1 verbunden. AIRPOL, LASAT und MISKAM weisen im Vergleich zur nordwestlichen Anströmung noch relativ hohe Werte auf.

Am wenige Meter östlich davon gelegenen Aufpunkt 2 verschiebt sich das Maximum im Windkanal auf die Anströmrichtung 345° . Dies wird auch von MUKLIMO simuliert. Die anderen Modelle weisen ihr Maximum bei eher westlichen Richtungen auf.

Aufpunkt 3 befindet sich auf der anderen Seite der Kreuzung und ist etwas in die Straße hinein versetzt. Aufgrund des größeren Abstands zur Quelle ergeben sich dort im Mittel geringere Konzentrationen. Das Maximum wird bei Wind aus 180° gemessen. Die numerischen Modelle stimmen mit diesem Ergebnis überein. Ein sekundäres Maximum bei nordwestlichen Richtungen wird ebenfalls von den Modellen prognostiziert.

Am Aufpunkt 4 findet man ähnliche Verhältnisse wie am Aufpunkt 1. Das sekundäre Maximum hat sich im Windkanal in westliche Richtung verschoben. Tendenziell wird diese Verschiebung auch von den Modellen wiedergegeben.

Zusammenfassende Wertung

Bei den berechneten Konzentrationen stimmen die wesentlichen Gesetzmäßigkeiten, wie höhere Konzentrationen an der Nordfassade bei Anströmungen aus dem Nordwestsektor und niedrigere

Ergebnisse

bei Anströmung aus dem Südwestsektor, mit den Windkanalmessungen überein. In den Details finden sich aber von Modell zu Modell und von betrachtetem Aufpunkt zu betrachtetem Aufpunkt größere Unterschiede. Um sich einen Gesamtüberblick zu verschaffen, ist die Berechnung statistischer Kenngrößen zur Beurteilung der Modellgüte sinnvoll.

In diesem Bericht werden die berechneten und normierten Konzentrationen derjenigen Zellen verglichen, in denen der jeweilige Meßpunkt liegt. Zu beachten ist, daß es sich bei den Meßwerten um zeitliche Mittelwerte an einem Punkt handelt. Bei den Rechnungen stellt der Konzentrationswert ein Volumenmittel über die Rechenzelle dar. Problematisch wird ein Vergleich zwischen Punktwert und Volumenmittel in Bereichen mit sehr hohen Gradienten, also vorzugsweise in Quellnähe. Hier ist das Volumenmittel über eine Rechenzelle nicht identisch mit dem Meßwert, wenn die Konzentration nicht linear im Bereich der Zelle zu- oder abnimmt.

Da sich die Werte über mehrere Zehnerpotenzen erstrecken, müssen unterschiedliche Kennzahlen verwendet werden. Folgende Größen werden bei der Auswertung betrachtet:

- Der lineare Korrelationskoeffizient, der Aussagen zur Übereinstimmung der Struktur vor allem bei großen Konzentrationen liefert. Werte nahe 1 bedeuten, daß die Verteilung der hohen Konzentrationen recht gut getroffen wird.
- Der logarithmische Korrelationskoeffizient, in den auch kleine Konzentrationswerte mit ähnlichem Gewicht wie die großen Werte eingehen. Werte nahe 1 bedeuten, daß die Struktur der berechneten Konzentrationswerte gut getroffen wird.
- Die Trefferquote $T(p)$, die angibt wieviel Prozent der berechneten Werte um einen bestimmten Faktor, z.B. 25% oder 50%, von den gemessenen Konzentrationen abweichen.

$$T(p) = \frac{1}{N} \sum^N j$$

$$\text{mit } j = \begin{cases} 1 & \text{wenn gilt } |C_{\text{Modell}} - C_{\text{Messung}}| \leq p \cdot C_{\text{Messung}} \\ 0 & \text{in allen restlichen Fällen} \end{cases}$$

C_{modell} und C_{Messung} sind die normierten Konzentrationen von numerischem Modell und der Windkanalmessung an den berücksichtigten Meßpunkten. Als Treffer wurde auch gewertet, wenn beide Konzentrationen unter 0,75 lagen. Die Trefferquote gibt nicht an, ob die hohen oder die niedrigen Konzentrationswerte besser getroffen werden.

- Ein mittleres Fehlerquadrat (RMS), das wie folgt definiert wurde

$$\text{RMS} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum (C_{\text{Modell}} - C_{\text{Messung}})^2}$$

Dieses Maß wird überwiegend durch die Abweichungen bei den hohen Konzentrationen bestimmt.

- Ein relatives Fehlermaß, das als folgendes Verhältnis definiert ist:

$$F_r = \frac{\sum (c_{\text{Modell}} - c_{\text{Messung}})}{\sum c_{\text{Messung}}} \cdot 100$$

Mit dieser Kenngröße lassen sich Aussagen treffen, ob ein Modell die Konzentrationen im Mittel über- oder unterschätzt.

In Tabelle 8 sind diese Maße für die Beurteilungshöhe 1,5 m tabellarisch aufgeführt. Betrachtet wurden alle Meßpunkte bis zur Mitte der jeweiligen Straßenschluchten, die also im Umkreis von 55 m um die Kreuzungsmitte liegen. Dies ist bei 56 Meßpunkten pro Ebene der Fall. Bei 13 Anströmrichtungen ergibt sich pro Meßebeine somit ein Kollektiv von 728 Werten. Außerhalb liegende Punkte gehen in die Auswertung nicht ein, da die horizontalen Maschenweiten bei einigen Modellen recht groß werden und dadurch Verfälschungen auftreten könnten. Die jeweils besten Maßzahlen sind grau hinterlegt.

Die linearen Korrelationskoeffizienten liegen bei etwa 0,8. Die Bereiche mit höheren Konzentrationen werden von den numerischen Modellen somit gut getroffen. Die räumlichen Strukturen der Immissionsfelder werden weniger gut nachgebildet. LASAT weist hier mit einem logarithmischen Korrelationskoeffizienten von 0,73 die beste Übereinstimmung auf. MUKLIMO fällt deutlich ab, da bei kleinen und mittleren Konzentrationen die turbulente Diffusion eine bedeutende Rolle spielt, und diese vom Modell unterschätzt wird. Der mittlere quadratische Fehler ist bei DASIM und MUKLIMO relativ hoch. Beide überschätzen die Konzentrationen. AIRPOL, LASAT und MISKAM unterschätzen die Konzentrationen, was vor allem die höheren Werte betrifft. Von LASAT werden allerdings vor allem die kleinen und mittleren Konzentrationen gut getroffen, was sich in der hohen Trefferquote bei einer zulässigen Abweichung von 50% zeigt.

Tabelle 8: Gütemaße Fall 0, Beurteilungshöhe 1,5 m

Modell	R _{lin}	R _{log}	RMS	F _{rel}	T(25%)	T(50%)
ABC	0,83	0,61	1,87	7,28	51,2	72,3
AIRPOL	0,82	0,57	1,72	-9,79	51,0	73,2
ASMUS	0,81	0,57	1,85	6,89	56,3	74,5
DASIM	0,84	0,55	2,69	33,07	48,2	64,4
IBS	0,81	0,59	1,95	7,55	48,5	69,1
LASAT	0,79	0,73	1,87	-16,75	49,0	76,2
MISKAM	0,79	0,64	1,96	-26,78	45,9	70,2
MUKLIMO	0,78	0,17	3,50	21,04	40,5	50,4

Ergebnisse

Tabelle 9: Gütemaße Fall 0, Beurteilungshöhe 12 m

Modell	R _{lin}	R _{log}	RMS	F _{rel}	T(25%)	T(50%)
ABC	0,73	0,61	0,96	-24,34	58,1	76,2
AIRPOL	0,74	0,20	1,05	-41,30	59,1	73,1
ASMUS	0,74	0,47	0,95	-7,52	63,0	77,5
DASIM	0,78	0,58	4,00	171,67	43,8	51,9
IBS	0,73	0,18	1,06	-45,18	55,1	65,0
LASAT	0,74	0,58	0,98	-25,29	57,6	75,3
MISKAM	0,77	0,56	0,92	-23,69	59,1	76,1
MUKLIMO	0,67	-0,08	1,97	-0,88	46,8	56,2

In der zweiten Meßebe, die sich im oberen Drittel der Straßenschlucht befindet, stimmen die Windkanalmessungen und numerische Modellen weniger gut überein. Die Maßzahlen sind in Tabelle 9 zusammengefaßt. Mit Ausnahme von DASIM unterschätzen die Modelle die Immissionen in dieser Höhe. Auch die Struktur der Immissionsfelder wird zum Großteil schlechter als in Bodennähe getroffen.

Im Anhang ist für diesen Fall ein Konzentrationsvergleich in Form von Scatterdiagrammen dargestellt (Abbildungen A16a und A16b). Die Auswertung beinhaltet beide Meßebeben. Auf der x-Achse sind die im Windkanal gemessenen normierten Konzentrationen, auf der y-Achse die normierten Konzentrationen des jeweiligen Modells aufgetragen. Eine vollständige Übereinstimmung wäre erzielt, wenn alle Punkte auf der Diagonalen lägen. Als zusätzliche Hilfslinien wurden die Toleranzbereiche $\pm 25\%$ eingezeichnet.

Der überwiegende Teil der Werte liegt im Konzentrationsbereich unter $4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$. Bei ABC und ASMUS sind hier die Streubereiche im Vergleich zu den anderen Modellen gering. Teilweise erklären sich die hohen Gütemaße durch eine gute Übereinstimmung bei den eher geringen Konzentrationen.

AIRPOL streut im mittleren Konzentrationsbereich stärker. Bei kleinen Konzentrationen neigt das Modell zur Unterschätzung. DASIM überschätzt die Konzentrationen im mittleren und hohen Konzentrationsbereich, trifft die Verhältnisse bei kleinen Konzentrationen relativ gut.

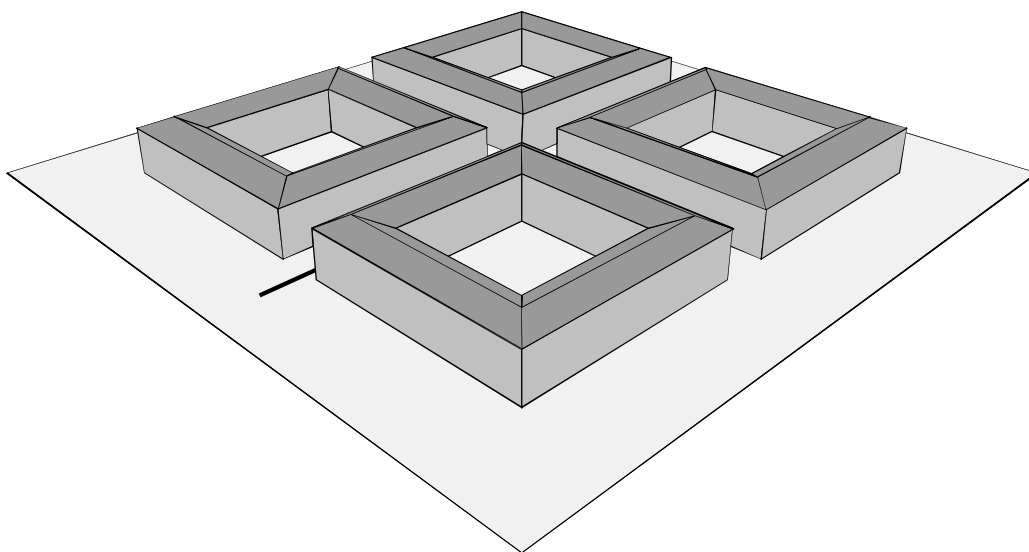
IBS zeigt Schwächen bei den kleinen Konzentrationswerten, die hauptsächlich auf die zu gering ausgewiesenen Konzentrationen in der zweiten Meßebebe zurückzuführen sind. Im oberen Bereich ist das Streumuster mit ABC vergleichbar.

LASAT unterschätzt die Konzentrationen bei höheren Werten. Besonders markant sind die Unterschiede, wenn im Windkanal Werte über $12 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ gemessen wurden. Hier berechnet LASAT zwischen $5 \cdot 10^{-3}$ und $6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$. Diese hohen Konzentrationen treten im Windkanal bei Anströmung aus Nord auf.

MISKAM weist die geringste Streubreite auf, unterschätzt allerdings die gemessenen Konzentrationen im mittleren und hohen Konzentrationsbereich.

Die Verteilung der Punkte bei MUKLIMO kann mit der geringen turbulenten Diffusion im Modell erklärt werden. In Bereichen mit kleinen Konzentrationen kommt nahezu nichts an, in Bereichen mit hohen Konzentrationen dagegen sehr viel.

4.2 Fall 1 – Spitzdach



Der Fall „Spitzdach“ sowie andere Dachvarianten wurden im Bericht von Kastner-Klein et.al. (1998) untersucht. Für den Vergleich in diesem Bericht wurde die Spitzdachvariante ausgewählt, da sie eine typische Bebauungsform darstellt.

Bei der numerischen Modellierung stellt sich zunächst die Frage, wie diese Dachformen sinnvoll auf das kartesische Gitter zu übertragen sind. Hier bieten sich die in Abbildung 9 dargestellten Möglichkeiten an:

- A Die Dachform wird nicht nachgebildet – die effektive Gebäudehöhe wird als Mittelwert aus First- und Traufhöhe angesetzt
- B Die Dachform wird nicht nachgebildet – als effektive Gebäudehöhe wird die Firsthöhe angesetzt
- C Die Dachform wird in der Auflösung des Rechengitters nachgebildet

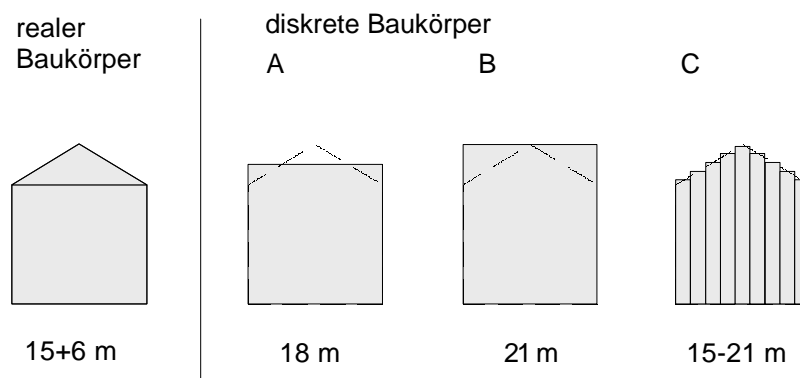


Abbildung 9: Abbildung der Dachform auf das Rechengitter

Während die prognostischen Modelle mit Variante C rechnen können, wird, mangels abgesicherter Initialisierungsverfahren, bei den diagnostischen Modellen mit Variante A oder B gerechnet.

Bei den IBS-Simulationen wurde die Dachform nach Variante C berücksichtigt. Alle anderen Modelle wurden zunächst für die Variante B gerechnet. Da die vorliegende Bebauungssituation nach Variante A gleichbedeutend mit 18 m hohen Hindernissen ist, können die Windkanalmessungen für Fall 1 auch mit den Modellergebnissen für den Fall 0 verglichen werden. Daraus lassen sich Aussagen ableiten, welche Art der Diskretisierung für welches Modell geeigneter ist.

Die Dachform und die Gebäudehöhen haben Einfluß auf das Strömungsgeschehen und damit auch auf die Ausbreitung. Durch die etwas tiefer eingeschnittene Straßenschlucht ändert sich, abhängig von der Anströmung, die Ausprägung des Canyon-Vortex. Im Windkanal wurden für die Spitzdachvariante insgesamt kleinere Konzentrationen gemessen. Ebenso haben sich die Konzentrationsmaxima gegenüber dem Fall 0 verschoben.

Die folgenden Tabellen zeigen Gütemaße, die analog zu Fall 0 aus den Werten für 9 Anströmrichtungen und 56 berücksichtigte Meßpunkte in 2 Ebenen berechnet wurden. Die Maßzahlen für die unterschiedlichen Dachrealisierungen sind für jedes Modell untereinander aufgeführt. Die besten Werte in jeder Spalte sind grau unterlegt.

Der Tabelle 10 kann entnommen werden, daß eine möglichst gute Nachbildung von Dachkonstruktionen, wie dies bei IBS geschehen ist, zu hohen logarithmischen Korrelationen führt, die Strukturen des Konzentrationsfeldes also gut nachgebildet werden. Ist eine detaillierte Übertragung der Dachformen auf das Gitter nicht möglich, so werden die besten Resultate mit effektiven Gebäudehöhen, die dem Mittelwert aus First- und Traufhöhe entsprechen, erzielt.

In geringerem Maße wird dies auch durch die Gütemaße in 12 m über Grund (Tabelle 11) bestätigt.

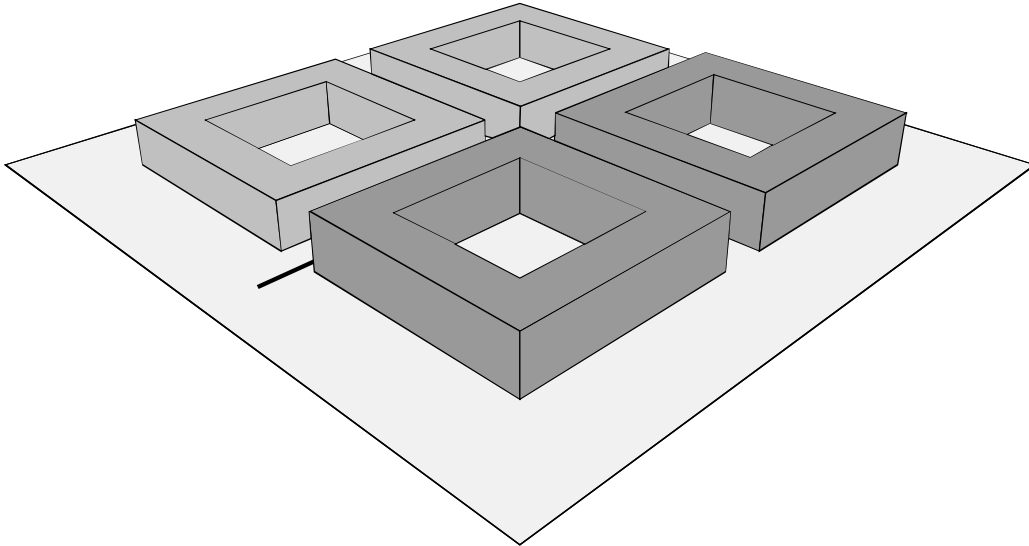
Tabelle 10: Gütemaße Fall 1 für unterschiedliche Realisierungen des Spitzdaches, Beurteilungshöhe 1,5 m

Modell (Dachvariante)	R_{lin}	R_{log}	RMS	F_{rel}	T(25%)	T(50%)
ABC (A)	0,82	0,59	1,9	14,9	52,2	68,5
ABC (B)	0,83	0,57	2,0	21,9	48,8	65,7
AIRPOL (A)	0,75	0,56	2,0	3,6	45,4	65,1
AIRPOL (B)	0,75	0,57	2,2	15,1	43,7	62,3
ASMUS (A)	0,80	0,56	1,9	15,9	51,4	68,1
ASMUS (B)	0,82	0,55	2,0	23,0	51,2	65,5
DASIM (A)	0,83	0,57	2,8	45,6	48,0	61,7
DASIM (B)	0,77	0,58	3,9	86,7	41,5	48,4
IBS (A)	0,78	0,58	2,1	20,0	47,0	62,1
IBS (C)	0,78	0,67	1,9	23,3	46,6	60,9
LASAT (A)	0,76	0,66	1,8	-6,9	43,3	66,7
LASAT (B)	0,74	0,63	1,9	-6,0	42,9	65,9
MISKAM (A)	0,72	0,62	2,0	-19,0	47,2	64,1
MISKAM (B)	0,72	0,64	2,0	-23,1	46,6	63,7
MUKLIMO (A)	0,75	0,13	3,5	27,5	39,5	50,2
MUKLIMO (B)	0,72	0,14	3,6	26,4	39,7	48,6

Tabelle 11: Gütemaße Fall 1 für unterschiedliche Realisierungen des Spitzdaches, Beurteilungshöhe 12 m

Modell (Dachvariante)	R_{lin}	R_{log}	RMS	F_{rel}	T(25%)	T(50%)
ABC (A)	0,75	0,58	0,7	-7,8	60,7	74,0
ABC (B)	0,75	0,58	0,7	-5,7	59,5	72,6
AIRPOL (A)	0,65	0,18	0,8	-24,8	59,5	68,8
AIRPOL (B)	0,63	0,18	0,9	-18,6	57,3	67,3
ASMUS (A)	0,75	0,46	0,9	13,3	54,4	68,8
ASMUS (B)	0,76	0,45	0,9	14,8	55,0	68,5
DASIM (A)	0,77	0,55	4,3	230,7	42,1	46,4
DASIM (B)	0,74	0,54	3,5	164,7	47,6	54,6
IBS (A)	0,61	0,10	0,9	-28,7	56,7	63,3
IBS (C)	0,63	0,13	0,9	-47,6	58,1	65,1
LASAT (A)	0,78	0,49	0,6	-10,8	55,0	72,4
LASAT (B)	0,77	0,52	0,6	-8,6	56,7	71,4
MISKAM (A)	0,66	0,55	0,8	-2,7	53,8	67,5
MISKAM (B)	0,66	0,58	0,8	-5,2	54,0	70,4
MUKLIMO (A)	0,71	-0,08	2,0	34,6	52,4	58,1
MUKLIMO (B)	0,67	-0,09	2,0	22,7	53,2	57,3

4.3 Fall 2 – Step-Up Situation



Diese Situation, bei der die Bebauung auf einer Straßenseite höher als auf der anderen ist, wird untersucht, weil sich je nach Anströmung ein stärkerer oder schwächerer Rotor in der Straßenschlucht ausbildet. Ist die straßensenkrechte Komponente gegen die höhere Bebauung gerichtet, so wird mehr Luft in den Straßenraum geleitet – der Wirbel ist also intensiver. Wird die Straßenschlucht über das höhere Gebäude angeströmt, kann die Luft weniger in den Straßenraum durchgreifen – der Wirbel ist entsprechend schwächer ausgebildet.

Exemplarisch sind die mit ABC modellierten Strömungsverhältnisse in der Straßenschlucht für die beiden straßensenkrechten Anströmrichtungen in Abbildung 10 dargestellt. Man kann deutlich die Unterschiede in der Lage des Wirbelzentrums und der bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten erkennen.

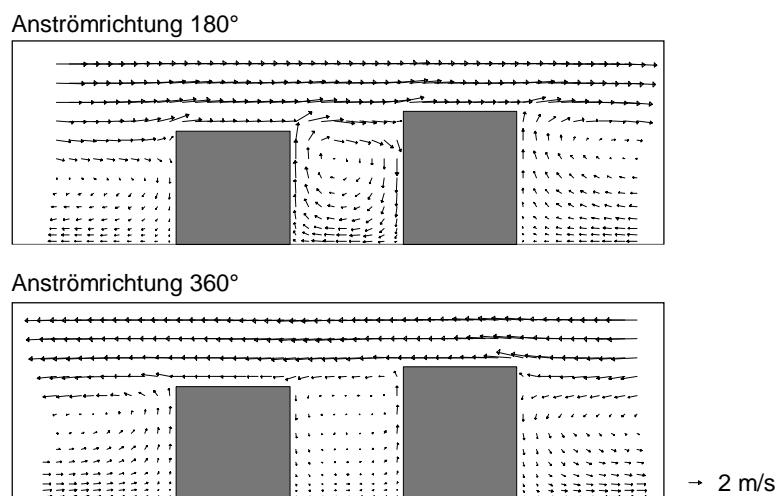


Abbildung 10: Strömungsverhältnisse in der ungleich bebauten Straßenschlucht, Ausschnitt Modell ABC

Die für die einzelnen Modelle berechneten Gütemaße sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 zusammengestellt. Gemessen am Referenzfall sind vor allem die logarithmischen Korrelationen deutlich schlechter. Dies kann auch an der Auswahl der Windrichtungen liegen. Untersucht wurden bei dieser Bebauungsvariante nur 6 Anströmungen, wobei 3 Richtungen straßensenkrecht bzw. straßenparallel liegen. In diesen Grenzfällen waren auch beim Referenzfall die Übereinstimmungen mit dem Windkanal weniger gut.

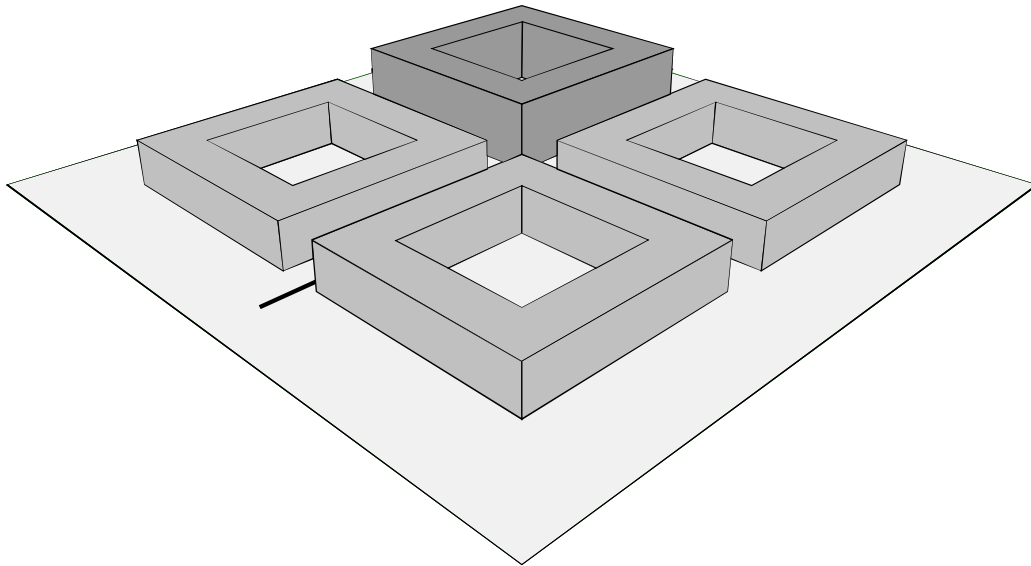
Tabelle 12: Gütemaße Fall 2, Beurteilungshöhe 1,5 m

Modell	R_{lin}	R_{log}	RMS	F_{rel}	T(25%)	T(50%)
ABC	0,77	0,39	2,6	17,1	50,0	62,5
AIRPOL	0,63	0,30	2,5	-5,6	39,6	56,8
ASMUS	0,76	0,43	2,6	18,3	46,4	61,3
DASIM	0,77	0,48	3,4	48,2	42,9	56,0
IBS	0,72	0,49	2,2	5,8	44,0	62,2
LASAT	0,63	0,40	2,4	-14,2	44,3	63,1
MISKAM	0,60	0,44	2,5	-26,9	41,4	59,8
MUKLIMO	0,69	0,31	3,7	25,7	49,7	53,9

Tabelle 13: Gütemaße Fall 2, Beurteilungshöhe 12 m

Modell	R_{lin}	R_{log}	RMS	F_{rel}	T(25%)	T(50%)
ABC	0,74	0,39	1,0	-25,0	52,7	71,1
AIRPOL	0,58	0,04	1,3	-46,4	47,3	58,0
ASMUS	0,75	0,31	1,1	-3,8	53,3	64,3
DASIM	0,74	0,37	3,8	132,3	40,8	52,1
IBS	0,68	0,22	1,3	-57,0	43,5	50,9
LASAT	0,73	0,18	1,1	-34,6	55,4	71,7
MISKAM	0,72	0,32	1,1	-36,8	46,1	72,3
MUKLIMO	0,71	0,08	2,1	15,7	43,5	55,4

4.4 Fall 3 – höherer Block



Ein höherer Block in einem der Quadranten beeinflusst die Strömung in der Haupt- wie in der Seitenstraße. Die Step-Up/Step-Down Situation ist stark ausgeprägt, da das Gebäude 27 m hoch ist. Aufgrund der Asymmetrie bildet sich je nach Anströmrichtung auf der Kreuzung ein Sog- oder Verdrängungseffekt aus.

Abbildung 11 zeigt die Strömungsverhältnisse, wie sie von MISKAM und LASAT berechnet werden. Bei einer westlichen Anströmung stellt sich in Lee des hohen Gebäudes ein Sogeffekt ein, der die Strömung auf der Kreuzung nach Süden ablenkt. Bei Anströmung aus Ost wird an der höheren Gebäudefassade Luft nach unten geführt. Dies führt zu einem Ausströmen aus der südlichen Seitenstraße in die Hauptstraße hinein, das sich auch in der nördlichen Seitenstraße noch fortsetzt. Die prognostischen Modelle AIRPOL, IBS, LASAT und MUKLIMO zeigen diesen Effekt.

Die diagnostischen Modelle ABC, DASIM und LASAT simulieren diesen dynamischen Vorgang nur sehr wenig. Stellvertretend für diesen Modelltyp sind in Abbildung 11 unten die von LASAT berechneten Strömungsverhältnisse im Kreuzungsbereich dargestellt. Hier strömt die Luft nahezu ungestört über die Kreuzung hinweg. Eine Querströmung in die Seitenstraße hinein oder aus ihr heraus wird nicht simuliert.

Die Abbildungen A17a und A17b veranschaulichen die Auswirkungen auf das bodennahe Konzentrationsfeld bei einer Anströmung aus West. Im Windkanal werden die höchsten Werte an der Nordfassade nahe der Kreuzung gemessen. Die Werte liegen knapp 50% höher als im Fall 0 (vgl. Abbildung A12). Da bei dieser Anströmung Luft aus dem Kreuzungsbereich in die südliche Straße abgesaugt wird, findet man dort ebenfalls höhere Konzentrationen. Aus der nördlichen Seitenstraße strömt durch den Sogeffekt ebenfalls Luft in den Kreuzungsbereich ein, so daß hier die Immissionen etwas niedriger liegen.

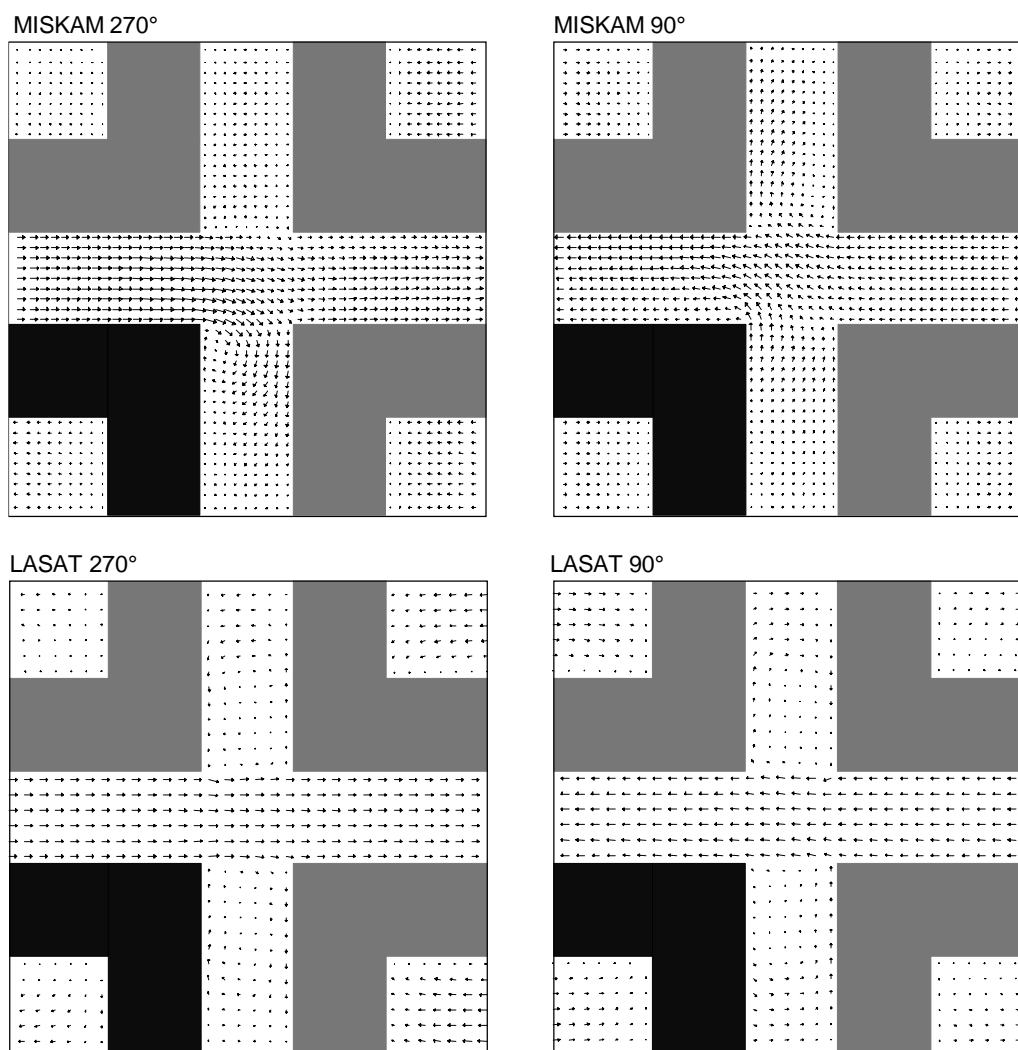


Abbildung 11: Strömung im Kreuzungsbereich bei Anströmung aus 270° links und 90° rechts.
oben - Modell MISKAM, unten - Modell LASAT

Bei ABC hat sich gegenüber dem Referenzfall (Fall 0) kaum etwas geändert. An der Südfassade im östlichen Straßenabschnitt hat die Konzentration geringfügig zugenommen, in der nördlichen Seitenstraße etwas abgenommen. Die ASMUS- und DASIM-Ergebnisse verhalten sich analog.

Bei AIRPOL werden Teile der mit Luftbeimengungen belasteten Kreuzungsluft in die südliche Seitenstraße verfrachtet. In der nördlichen Seitenstraße nimmt die Konzentration gegenüber dem Referenzfall etwas ab. Die in der Hauptstraße berechneten Tendenzen entsprechen nicht dem Trend, den der Windkanal vorgibt.

IBS berechnet ebenfalls eine deutliche Strömungskomponente in die südliche Seitenstraße hinein. Die Immissionsstruktur zeigt diesen Effekt. Die Absolutwerte der Konzentration liegen jedoch zu hoch.

Ergebnisse

Bei LASAT hat das Konzentrationsniveau in der Hauptstraße gegenüber dem Referenzfall zugenommen, eine Änderung der Struktur tritt jedoch nicht auf. Auch in den Seitenstraßen ergeben sich keine Veränderungen.

Am besten wird dieser Fall bei der betrachteten Anströmung von MISKAM dargestellt. In der Hauptstraße findet man nahezu überall Tendenzen, die im Windkanal beobachtet werden. In der nördlichen Seitenstraße nehmen die Konzentrationen erwartungsgemäß ab und in der südlichen Seitenstraße wird belastete Luft aus dem Kreuzungsbereich hineintransportiert.

MUKLIMO berechnet das Strömungsfeld plausibel, denn auf der Kreuzung findet man einen deutlichen Versatz der Fahne in südliche Richtung. Die geringe Diffusion hält die Konzentrationsfahne jedoch dicht beisammen, so daß keine merklichen Anteile in die südliche Seitenstraße gelangen können.

Tabelle 14: Gütemaße Fall 3, Beurteilungshöhe 1,5 m

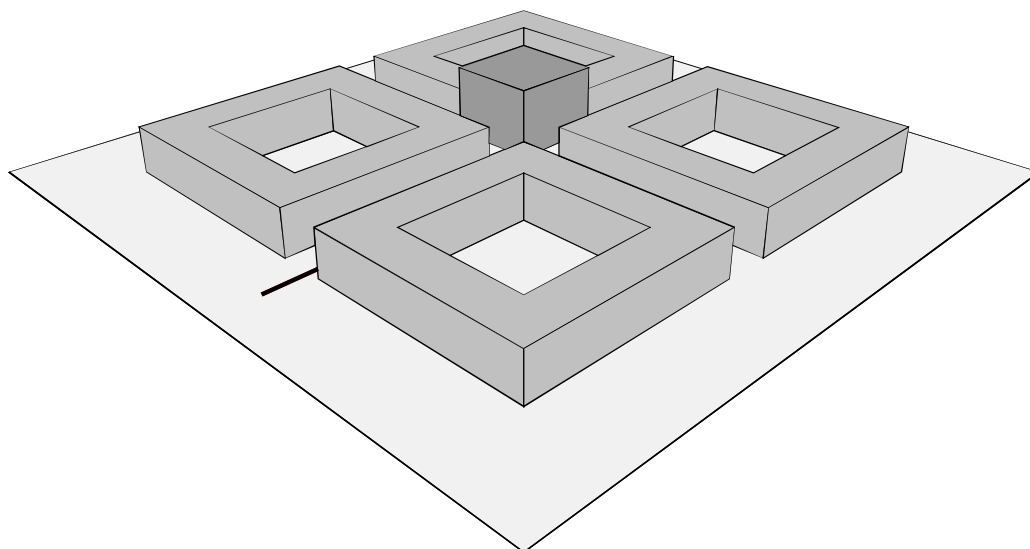
Modell	R_{lin}	R_{log}	RMS	F_{rel}	T(25%)	T(50%)
ABC	0,73	0,62	2,6	-6,9	50,9	64,5
AIRPOL	0,71	0,60	2,7	-16,7	46,7	66,7
ASMUS	0,69	0,63	2,8	-1,7	48,7	65,8
DASIM	0,72	0,57	3,4	23,5	44,6	57,1
IBS	0,56	0,60	3,2	10,4	39,7	55,1
LASAT	0,76	0,70	2,4	-20,4	46,4	67,0
MISKAM	0,77	0,64	2,7	-34,5	48,0	72,3
MUKLIMO	0,58	0,19	4,4	14,9	42,6	50,9

Tabelle 15: Gütemaße Fall 3, Beurteilungshöhe 12 m

Modell	R_{lin}	R_{log}	RMS	F_{rel}	T(25%)	T(50%)
ABC	0,66	0,60	1,1	-29,0	56,3	72,3
AIRPOL	0,62	0,27	1,2	-39,9	58,3	71,7
ASMUS	0,63	0,56	1,2	-10,3	50,9	64,5
DASIM	0,61	0,51	3,6	113,4	41,5	49,3
IBS	0,43	0,09	1,5	-70,9	48,0	55,4
LASAT	0,69	0,57	1,1	-29,5	49,1	64,3
MISKAM	0,66	0,56	1,1	-29,7	57,1	74,3
MUKLIMO	0,49	-0,13	2,2	-9,4	45,1	50,2

Daß sich die Defizite der diagnostischen Modelle in den Maßzahlen nur wenig auswirken, kann den Tabelle 14 und Tabelle 15 entnommen werden. MISKAM trifft zwar bei den höheren Konzentrationen die Verteilung am besten und liegt auch mit den Trefferquoten vorne, die anderen Modelle weisen jedoch kaum schlechtere Werte auf. Ausnahmen bilden MUKLIMO und IBS, das bei diesem Szenario gegenüber den anderen Fällen deutlich abfällt.

4.5 Fall 4 – Turm



Ähnlich wie bei Fall 3 beeinflusst der Turm die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse. Die Effekte sind, abhängig von der Anströmrichtung, häufig schwächer ausgeprägt, da der „schlanke“ Baukörper über dem Dachniveau besser umströmt werden kann und somit weniger Vertikalbewegungen induziert werden. Die Auswirkungen bleiben dadurch eher auf den kreuzungsnahen Bereich beschränkt.

Aus den Gütemaßen, die in Tabelle 16 und Tabelle 17 aufgelistet sind, kann jedoch kein direkter Hinweis darauf entnommen werden, daß diese Situation von den diagnostischen Modellen besser modelliert wird. Die linearen Korrelationskoeffizienten nehmen zwar gegenüber den Werten von Fall 3 (vgl. Tabelle 14, Tabelle 15) zu, die logarithmischen dagegen ab. Auch bei MISKAM fällt der logarithmische Korrelationskoeffizient schlechter aus, jedoch schneidet das Modell in der oberen Beurteilungshöhe deutlich besser ab.

Tabelle 16: Gütemaße Fall 4, Beurteilungshöhe 1,5 m

Modell	R_{lin}	R_{log}	RMS	F_{rel}	T(25%)	T(50%)
ABC	0,77	0,55	2,3	-3,7	49,1	65,6
AIRPOL	0,70	0,50	2,9	-4,1	42,0	60,7
ASMUS	0,71	0,50	2,6	2,2	49,6	64,1
DASIM	0,79	0,53	2,9	27,3	41,1	53,6

IBS	0,52	0,57	3,1	2,0	40,6	53,3
LASAT	0,76	0,66	2,3	-17,8	42,4	63,8
MISKAM	0,76	0,58	2,5	-34,5	46,7	67,9
MUKLIMO	0,61	0,23	4,3	18,1	42,2	47,3

Tabelle 17: Gütemaße Fall 4, Beurteilungshöhe 12 m

Modell	R_{lin}	R_{log}	RMS	F_{rel}	T(25%)	T(50%)
ABC	0,69	0,57	1,1	-28,4	52,2	71,2
AIRPOL	0,51	0,12	1,3	-35,6	49,1	62,1
ASMUS	0,66	0,43	1,2	-13,4	51,1	63,4
DASIM	0,64	0,47	3,8	127,4	42,2	50,2
IBS	0,53	0,08	1,6	-78,4	46,0	49,6
LASAT	0,66	0,53	1,1	-31,5	52,0	63,8
MISKAM	0,78	0,57	1,0	-27,7	60,9	77,5
MUKLIMO	0,61	-0,08	2,0	-15,6	47,3	49,8

4.6 Statistische Auswertung aller Einzelfälle

Auf der Basis des Datenkollektivs, das auf der Untersuchung von 5 Fällen mit insgesamt 44 Anströmrichtungen an jeweils 144 Meßpunkten besteht, kann analog zu den Auswertungen der einzelnen Fälle, eine Gesamtstatistik der Gütemaße erstellt werden. Wie bei den vorangegangenen Fällen wurde der für den Vergleich herangezogene Bereich auf den Ausschnitt bis zur Mitte der 4 Quadranten (maximaler Abstand: 55 m zum Kreuzungsmittelpunkt) beschränkt. Die im folgenden dargestellten Kennzahlen basieren auf dem Vergleich von jeweils 4480 Meßwerten mit den entsprechenden Konzentrationen der numerischen Modelle. Angemerkt sei noch, daß der Referenzfall aufgrund der am meisten untersuchten Anströmungen am stärksten eingeht. Bei den Fällen 1 bis 4 sind straßensenkrechte und straßenparallele Anströmrichtungen überrepräsentiert. Dies benachteiligt vor allem die Modelle, deren turbulente Diffusionsmodellierung Schwächen aufweist.

In Abbildung 12 sind die Korrelationskoeffizienten in Form eines Säulendiagramms dargestellt. Der lineare Korrelationskoeffizient (linke Säulen) ist ein Maß, wie gut vor allem die höheren Konzentrationen getroffen werden. Die Werte liegen bei im Bereich von 0,65 bis 0,78, also relativ dicht beieinander. Die physikalisch weniger aufwendigen diagnostischen Modelle weisen mitunter bessere Werte als die prognostischen Modelle auf.

Durch Logarithmieren der Konzentrationen, die sich über 3 Zehnerpotenzen erstrecken, fließen kleine wie große Konzentrationen gleichermaßen in den Korrelationskoeffizienten ein. Der logarithmische Korrelationskoeffizient charakterisiert somit, wie gut die Struktur des Immissionsfeldes getroffen wird. Hier sind deutliche Unterschiede zwischen den Modellen auszumachen (rechte Säulen in Abbildung 12). Vor allem das Modell MUKLIMO schneidet deutlich schlechter

ab. Die Einzelauswertungen haben gezeigt, daß die turbulente Diffusion von MUKLIMO stark unterschätzt wird. Das äußert sich in einer Unterschätzung in Bereichen mit kleinen Konzentrationen und einer Überschätzung in Bereichen mit hoher Konzentration, so daß die räumliche Struktur nicht getroffen werden kann.

Bei IBS wird der schlechte logarithmische Korrelationskoeffizient durch die Unterschätzung der Konzentrationen im 12 m-Niveau verursacht. Betrachtet man nur die bodennahe Schicht, so wird ein Wert von 0,59 erzielt.

Dies trifft auch auf das Modell AIRPOL zu. Bei AIRPOL beträgt der Korrelationskoeffizient in der unteren Meßebeine 0,51. Durch Defizite des Partikelmodells in der Nähe von Wänden wird die Konzentration in der oberen Meßebeine an den Fassaden unterschätzt.

Die Konzentrationsverteilung wird von den Modellen ABC, LASAT und MISKAM am besten dargestellt.

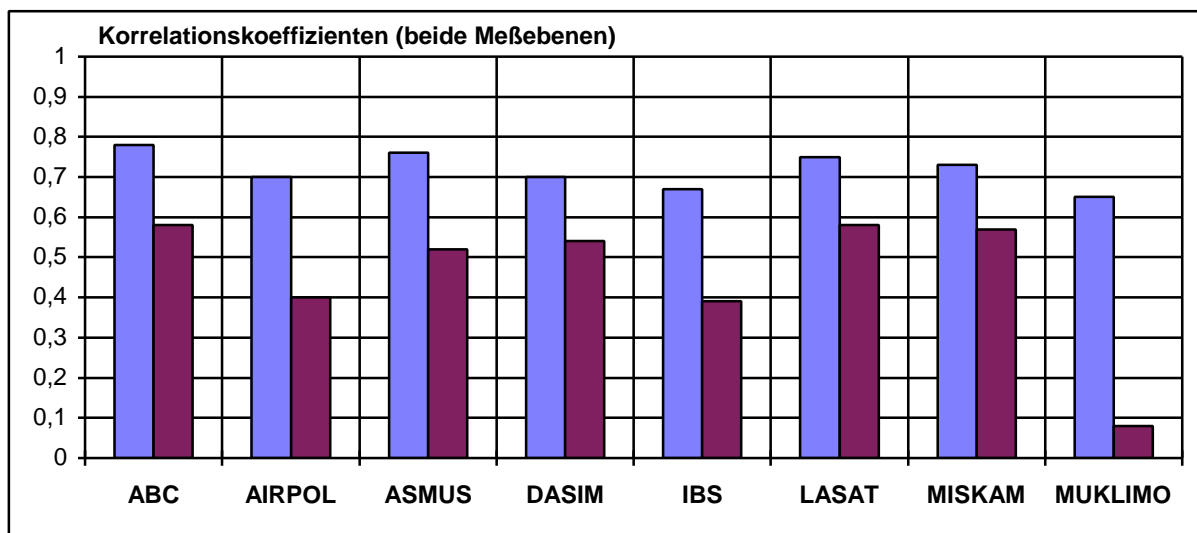


Abbildung 12: lineare (Balken links) und logarithmische (Balken rechts) Korrelationskoeffizienten (alle Fälle, alle Meßebenen)

In die mittleren Fehlerquadrate, die in Abbildung 13 für beide Ebenen dargestellt sind, gehen vor allem die Abweichungen zwischen modellierter und gemessener Konzentration bei hohen Werten ein. Die Modelle ABC, AIRPOL, ASMUS, IBS, LASAT und MISKAM weisen keine großen Unterschiede in den Kennzahlen auf. Da DASIM und MUKLIMO zum Teil sehr hohe Konzentrationen berechnen, die in dieser Größenordnung im Windkanal nicht gefunden wurden, fällt das Fehlerquadrat entsprechend hoch aus.

Mehr Information kann der Verteilung der mittleren Abweichung entnommen werden (siehe Abbildung 14). Auch hier gehen die hohen Konzentrationen stärker in das Beurteilungsmaß ein, da sie die mittlere Konzentration einer Meßebeine stärker beeinflussen als die kleinen Konzentrationen.

Ergebnisse

ABC, ASMUS, IBS und MUKLIMO überschätzen in der unteren Meßebene die Konzentrationen im Mittel geringfügig. Im oberen Meßniveau werden die mittleren Konzentrationen dagegen unterschätzt. DASIM weist in beiden Niveaus zu hohe mittlere Konzentrationen aus. LASAT und MISKAM unterschätzen in beiden Niveaus.

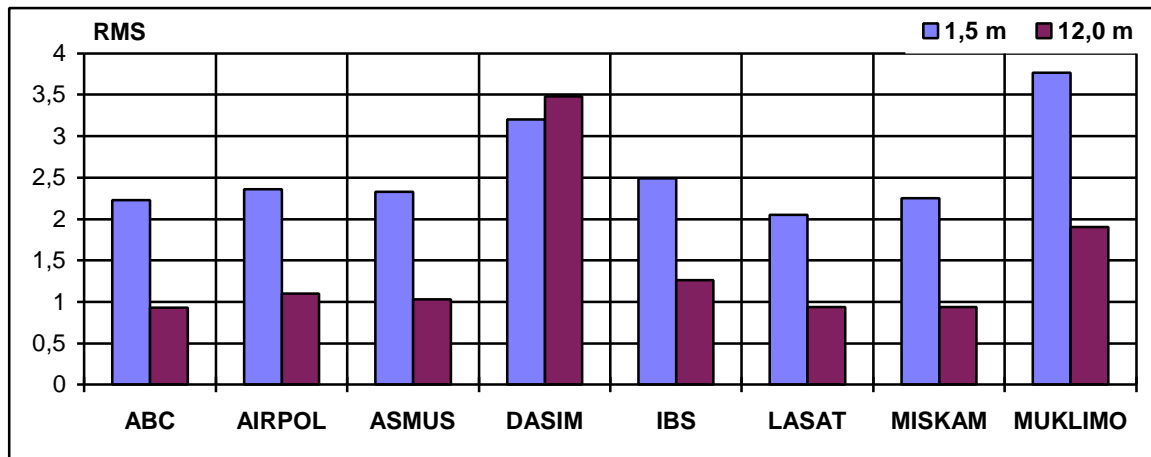


Abbildung 13: mittleres Fehlerquadrat für die Konzentrationen in 1,5 m (Säulen links) und 12 m (Säulen rechts)

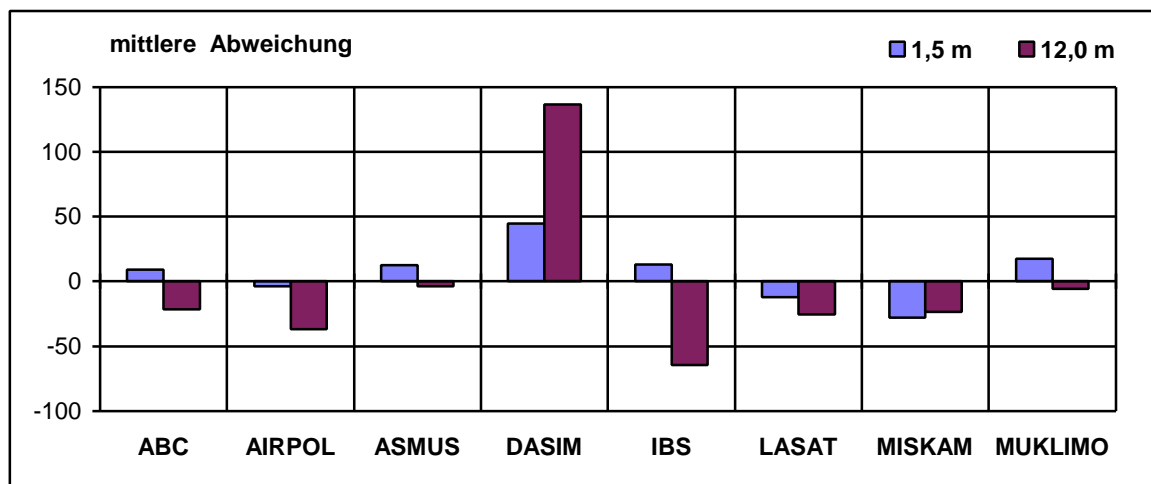


Abbildung 14: mittlere Abweichung der modellierten zu den gemessenen Konzentrationen in 1,5 m (Säulen links) und 12 m (Säulen rechts) in Prozent

Eine Kennzahl, in die hohe wie niedrige Werte einfließen, ist die Zahl der Punkte, an denen die relative Abweichung zum Meßwert unter einer prozentualen Schranke liegt. Der Anteil dieser Punkte am Gesamtkollektiv kann auch als Trefferquote bezeichnet werden. In den Abbildung 15 und Abbildung 16 sind die Trefferquoten für maximale Abweichungen von 25% bzw. 50% dargestellt. Um Abweichungen bei sehr kleinen Konzentrationen nicht überzubewerten, wurden Fälle, bei denen Meßwert und berechnete Konzentration unter $0,75 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ lagen, ebenfalls als Treffer gezählt.

Bedenkt man, daß die Windkanal-Meßwerte im Mittel einen Fehler von ca. 10% aufweisen (vgl. Kapitel 3.7), so kann eine Abweichung von 25% durchaus als tolerable Spanne angesehen werden. Die Modelle weisen für diese Trefferzone durchweg Werte um 50% auf. Diesen Wert selbst würde man eher als schlechte Übereinstimmung interpretieren. Interessanter ist aber das Faktum, daß keines der Modelle herausragende Werte liefert, d.h. so nahe am Windkanal liegt, daß es als Referenzmodell eingesetzt werden könnte.

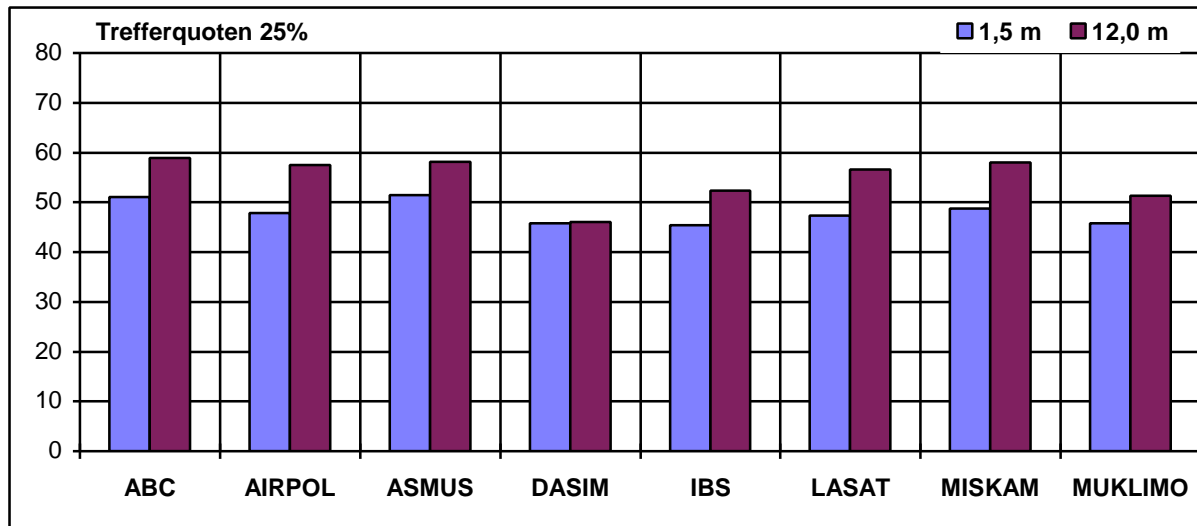


Abbildung 15: Anteil der Konzentrationswerte die maximal um 25% vom gemessenen Wert abweichen für 1,5 m (Säulen links) und 12 m (Säulen rechts) in Prozent

Weitet man den Toleranzbereich auf 50% auf, so ergibt sich bei den Trefferquoten (Abbildung 16) zwar eine stärkere Differenzierung, herausragende Übereinstimmungen sind jedoch weiterhin nicht zu finden.

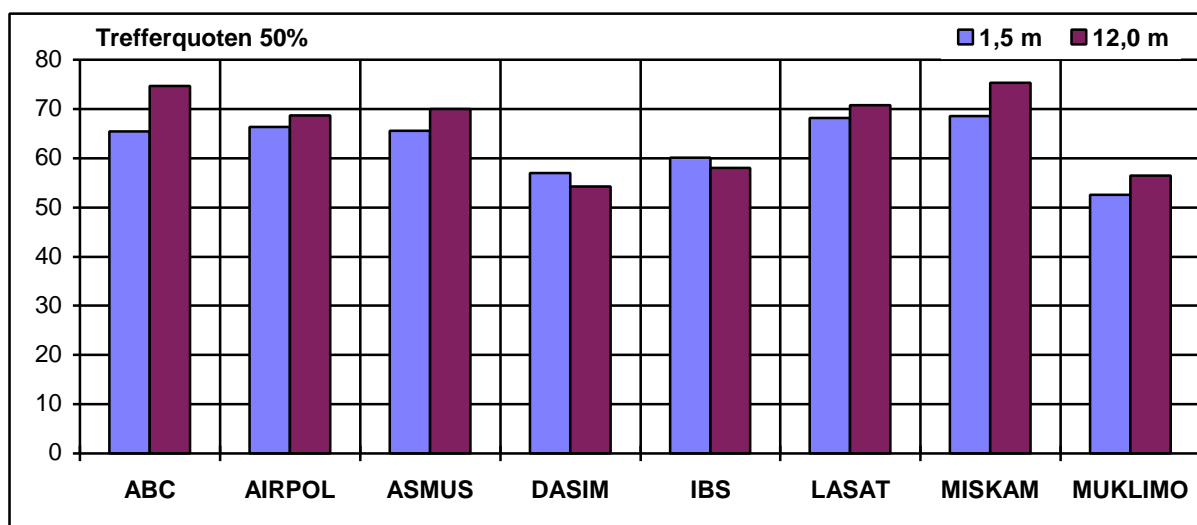


Abbildung 16: Anteil der Konzentrationswerte die maximal um 50% vom gemessenen Wert abweichen für 1,5 m (Säulen links) und 12 m (Säulen rechts) in Prozent

4.7 Konsequenzen für die praktische Anwendung

Was bedeuten die bisherigen Ergebnisse für die Praxis? Hier sind zwei Fragestellungen zu unterscheiden.

1. Die Epsiodenuntersuchung

Für eine bestimmte meteorologische Situation sollen die Immissionen in bebautem Gebiet abgeschätzt werden. Bei sehr komplexer Bebauung mit stark variierender Höhenstaffelung ist der Einsatz prognostischer Modelle gegenüber diagnostischen Modellen vorzuziehen. Bei der Interpretation der berechneten Immissionen sind die Fehlerbandbreiten zu berücksichtigen. Hierbei ist auch wichtig zu wissen, ob ein Modell eher zur Über- oder Unterschätzung der Konzentrationen neigt.

2. Die Ermittlung statistischer Kenngrößen

Die Bewertung der Immissionssituation erfolgt häufig auf der Basis jahresbezogener Kenngrößen. Abhängig vom Schadstoff ist dies zum Beispiel der Jahresmittelwert oder der 98-Perzentilwert. Zur Berechnung dieser Werte benötigt man die berechneten Konzentrationsfelder für alle Anströmrichtungen und eine Statistik, die eine Häufigkeitsverteilung der Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Turbulenzzustand der Atmosphäre beinhaltet. Durch Wichtung der einzelnen Konzentrationsfelder mit dieser Statistik erhält man die gesuchten Werte.

Einen Eindruck über die dabei auftretenden Fehlermargen vermittelt die folgende Auswertung.

Die Konzentrationsverteilungen wurden im Referenzfall für alle Windrichtungen aus dem westlichen Halbraum gemessen bzw. von den numerischen Modellen berechnet. Aus Symmetriegründen lassen sich die fehlenden Felder für Anströmungen aus dem östlichen Sektor ergänzen. Als Häufigkeitsverteilung wird eine Windstatistik für den Standort Mannheim verwendet. Diese setzt sich aus 24 Windrichtungsklassen und 9 Windgeschwindigkeitsklassen zusammen. Eine Aufspaltung in Stabilitätsklassen wurde nicht vorgenommen. Die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen an diesem Standort ist in Abbildung 17 dargestellt. Im betrachteten Fall dominieren die straßensenkrechten Anströmrichtungen, bei denen im Windkanal die höchsten Konzentrationen verzeichnet wurden.

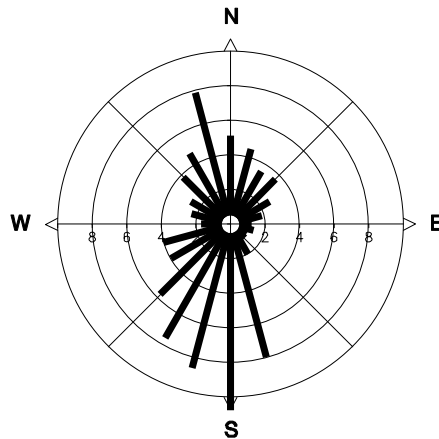


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen für den Standort Mannheim

Die Abbildungen A18a und A18b zeigen die auf dieser Grundlage berechneten Jahresmittelwerte in 1,5 m über Grund. Die Linien gleicher Konzentrationen sind zwischen $1 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ und $5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ linear gestaffelt, darüber wurden die Isolinien mit einem Abstand von $5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ weitergeführt. Werte größer als $10 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ sind grau unterlegt.

Die Maxima im Windkanal liegen an der nördlichen Fassade nahe an der Kreuzung. Die Konzentrationen betragen dort zwischen $16,2 \cdot 10^{-3}$ und $17,0 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$. Die Konzentrationen an der südlichen Fassade liegen bei ungefähr der Hälfte der Werte an der nördlichen Fassade. In den Seitenstraßen werden noch Konzentrationen bis $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ berechnet.

ABC, AIRPOL, ASMUS und LASAT prognostizieren sich die Maxima ebenfalls im kreuzungsnahen Bereich an der Nordfassade. DASIM, IBS, MISKAM und MUKLIMO weisen die Maxima weiter von der Kreuzung entfernt aus.

Die Konzentrationen an der südlichen Fassade werden von allen Modellen, außer von MUKLIMO und DASIM, unterschätzt. In den Seitenstraßen werden die Konzentrationsniveaus vom überwiegenden Teil der Modelle gut getroffen.

Die Bewertung erfolgt normalerweise nach dem maximalen Wert. In Abbildung 18 sind, unabhängig vom Ort des Auftretens, die maximalen Jahresmittelwerte zusammengestellt. Die größte Abweichung nach oben wird von MUKLIMO berechnet. Das Maximum wird hier um 28,6% überschätzt. Die größte Abweichung nach unten ist bei LASAT zu verzeichnen, das 17% unter dem Windkanalwert liegt. Gemessen an den Fehlermargen, die bei Einzeluntersuchungen auftreten können, sind diese Abweichungen als eher gering zu bezeichnen. Dies zeigt auch, daß die Modelle bislang erfolgreich für solche Fragestellungen eingesetzt werden, da sie relativ nah an die in der Natur- bzw. im Windkanal bestimmten Mittelwerte herankommen.

Ergebnisse

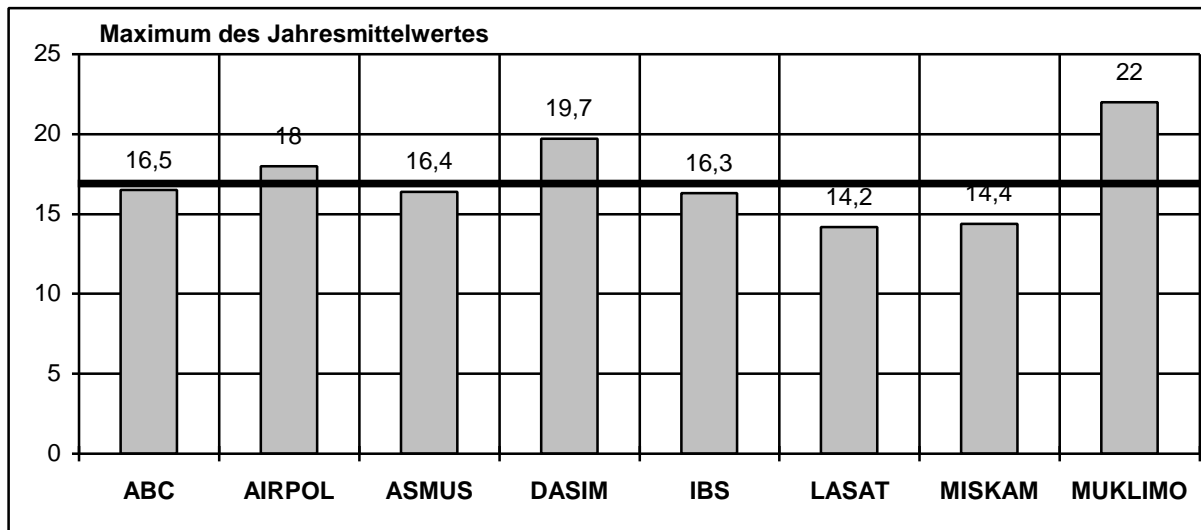


Abbildung 18: Maximum des Jahresmittelwertes. Horizontale Linie - Maximum Windkanal

Bei den Perzentilen gehen die Extremwerte, die bei einzelnen Anströmrichtungen auftreten können, stärker ein. Abbildung 19 zeigt die Maxima der 98-Perzentilwerte. Diese liegen im Windkanal wieder im Bereich der nördlichen Gebäudeecken und weisen Werte knapp über $82 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}^2$ auf.

LASAT und MISKAM unterschätzen diesen Wert um fast 50%, MUKLIMO überschätzt ihn um mehr als 50%. DASIM, AIRPOL und IBS kommen dem Windkanal-Perzentilwert am nächsten.

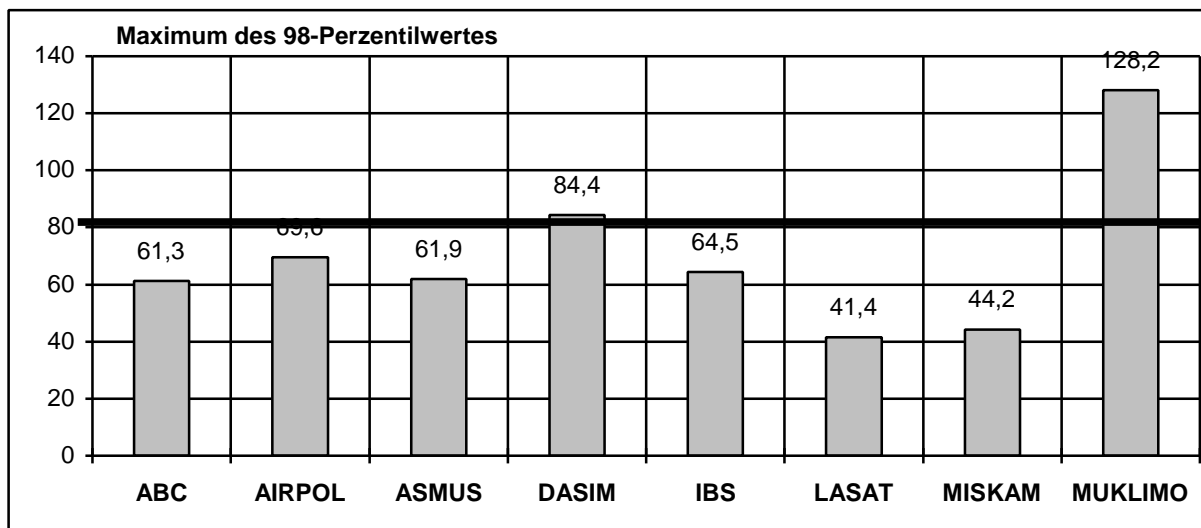


Abbildung 19: Maximum des 98-Perzentilwertes. Horizontale Linie - Maximum Windkanal

Diese Auswertung zeigt, daß die Berechnung jahresbezogener Mittelwerte mit allen Modellen bei akzeptabler Fehlerbandbreite möglich ist. Die Abschätzung der Perzentile ist weniger genau. Hier können, abhängig von Bebauungsgeometrie und der verwendeten Häufigkeitsverteilung, Fehler von 50% nicht ausgeschlossen werden.

5 Folgerungen

Die Untersuchung hat die Komplexität der Strömungs- und Konzentrationsverhältnisse, selbst bei eher einfachen Hindernisgeometrien, wie es eine Straßenschlucht mit Kreuzung darstellt, aufgezeigt. Je nach Anströmung wechselwirken Wirbelstrukturen mit horizontaler (Canyon-Vortex) und vertikaler Achse (Eckenwirbel).

Eine erfolgreiche Ausbreitungsberechnung in einem solchen Untersuchungsgebiet beruht auf einer detaillierten Bestimmung des Strömungsfeldes, das diese Wirbelstrukturen im richtigen Verhältnis zueinander beinhalten sollte. Eine weitere wichtige Einflußgröße ist die turbulente Diffusion, die vor allem bei straßenparallelen Anströmrichtungen für die Konzentrationen an den Fassaden ausschlaggebend ist.

Auf diejenigen Erkenntnisse, die für Anwender und Modellentwickler von Bedeutung sind, soll im folgenden eingegangen werden. Zu beachten ist, daß sich die Angaben auf die der Untersuchung zugrundeliegenden Modellversionen (vgl. Tabelle 1) beziehen. Da die numerischen Modelle mit jedem Projekt, das mit ihnen untersucht wird, verbessert werden können, ist es möglich, daß Weiterentwicklungen die hier beschriebenen Defizite bereits nicht mehr aufweisen.

5.1 ABC

Als diagnostisches Strömungs- und Ausbreitungsmodell hat ABC den Vorteil, mit wenig Speicherplatz große Felder in vertretbarem Zeitrahmen zu rechnen. Der Anwendungsbereich sollte deshalb eher bei Fragestellungen liegen, in denen ganze Stadtquartiere flächendeckend behandelt werden.

Bei Ausbreitungsrechnungen im unmittelbaren Nahbereich von Hindernissen oder dann, wenn das Initialisierungsverfahren nicht ausreicht, die dynamischen Effekte zu diagnostizieren, sollte jedoch auf ein prognostisches Modell ausgewichen werden.

In längs angeströmten Straßenschluchten ist die Nullpunktverschiebung bei der Initialisierung des Strömungsprofiles zu überdenken. Die Vertikalprofile weisen einen Knick in $2/3$ der Hindernishöhe auf, der so von den anderen Modellen bzw. dem Windkanal nicht wiedergegeben wird.

Die der Strömungsrechnung nachgeschaltete Lösung der Bilanzgleichung der turbulenten kinetischen Energie liefert zumindest bei straßenparalleler Anströmung zu geringe horizontale Diffusionskoeffizienten. Hier könnte der bei diesem Verfahren verwendete Mischungsweg, der zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten aus der turbulenten kinetischen Energie notwendig ist, ein Ansatz zur Verbesserung sein.

5.2 AIRPOL

Der Strömungsteil von AIRPOL liefert plausible Strömungsfelder. Auch kleinräumige Details wie Eckenwirbel werden modelliert. Probleme gibt es bei einzelnen Anströmrichtungen (z.B. 225°). Hier weichen die Vertikalprofile im Kreuzungsbereich von denen anderer Modelle ab.

Das Partikelmodell weist derzeit noch Effekte auf, die beim anderen untersuchten Partikelmodell (LASAT) nicht auftreten. In den Eckenwirbel sammeln sich Partikel an oder verbleiben zu lange dort. Beides führt zu relativ hohen Konzentrationen in den Wirbeln.

Bei straßenparalleler Anströmung tendieren die Partikel zur Straßenmitte hin. An den Fassaden treten nur noch sehr geringe Konzentrationen auf. Die Ursachen können in den Reflektionsbedingungen für die Partikel an den Wänden liegen oder auch anderer Natur sein. Hier ist der Entwickler gefragt.

5.3 ASMUS

ASMUS ist in der hier verwendeten Form kein eigenständiges Modell, sondern nur eine Fortentwicklung des Turbulenzansatzes von ABC. Insofern gilt das bereits bei ABC gesagte auch für dieses Modell. Eine Verbesserung gegenüber dem bei ABC verwendeten Ansatz bringt das ke-Modell zwar in Details, nicht aber bei der Betrachtung alle Fälle.

5.4 DASIM

DASIM besitzt die gleichen Stärken und Schwächen bei der Strömungsmodellierung wie ABC. Deshalb sind die Anwendungsbereiche wie bei ABC eingeschränkt.

Verbesserungswürdig ist das Initialisierungsverfahren dahingehend, daß eine Glättung nachgeschaltet wird, damit die relativ abrupten Übergänge der Strömungsregime, z.B. von „Straßenschlucht“ auf „Kreuzung“, realitätsnäher abgebildet werden.

Unklar ist noch, welche Effekte den zum Teil hohen Konzentrationen (vor allem in der oberen Schicht) zugrunde liegen. Vermutet wird die Turbulenzmodellierung, die auf einem reinen Scheurungsansatz beruht. Der dabei angesetzte Mischungsweg ist in Gebäudenähe zu klein, so daß im wandnahen Bereich nahezu keine Diffusion stattfindet.

5.5 IBS

Das prognostische Modell IBS berechnet plausible Strömungen, reagiert aber anders als z.B. MISKAM auf bauliche Änderungen (höhere Gebäude). Hier werden die Strömungseffekte meist

überschätzt. In Lee der Gebäudeecken bilden sich dagegen keine Eckenwirbel aus, d.h. die dynamischen Wirkungen werden vom Modell unterschätzt.

Als wesentliches Defizit ist bei IBS die geringe vertikale Diffusion anzusehen. Dies führt dazu, daß die Konzentrationen im oberen Meßniveau stark unterschätzt werden. Bei straßenparalleler Anströmung wird in dieser Höhe nur durch die Eckenwirbel und deren advektiven Transport eine merkliche Konzentration zugeführt (vgl. Abbildung A13b). Auch die Konzentrationsverteilung in 1,5 m über Grund weist je nach Anströmrichtung Verteilungen auf, die nicht zu den anderen Modellen passen (vgl. Abbildung A14b). Ursache ist auch hier die fehlende vertikale Diffusion. Die Quelle liegt bei diesem Modell nämlich 4 Rechenzellen tiefer als das betrachtete Meßniveau. Die Advektion verfrachtet hier die Spurenstoffe schneller zur Seite, als die zu gering angesetzte Diffusion sie in die Höhe transportieren kann.

Da die Turbulenzmodellierung derzeit auf einem Scherungsansatz beruht, lohnt sich hier der Aufwand, ein geeigneteres Verfahren einzusetzen.

5.6 LASAT

Das Ausbreitungsmodul LASAT ist ein klassisches Lagrange-Modell, das auf über 8 Jahre Anwendungs- und Entwicklungszeit zurückblickt und entsprechend ausgereift ist. Neu hingegen ist der für den Microscale geschaffene Strömungsteil, der auf einem diagnostischen Ansatz beruht. Dynamische Effekte, die der Initialisierungsansatz nicht nachbildet, werden wie bei ABC und DASIM nicht oder unzureichend modelliert.

Die bodennahen Strömungsfelder für den Referenzfall passen gut zu dem im Windkanal gemessenen Strömungen. Problembereiche finden sich eher in der Höhe. Der Rotor in den Straßenschluchten weist im Bereich des Wirbelzentrums sehr hohe Windgeschwindigkeiten auf. Die anderen Modelle zeigen in diesem Bereich eher sehr geringe Komponenten. Auch in den Vertikalkomponenten (vgl. Tabelle 7) bildet sich dieser Effekt ab. Hier sollte das Initialisierungsverfahren verbessert werden.

Auffällig ist auch die starke Kanalisierung der Strömung im Kreuzungsbereich, die ebenso bei den MISKAM-Simulationen auftritt. Aufgrund der Windkanalmessungen kann dieser Sachverhalt weder bestätigt noch verworfen werden.

5.7 MISKAM

Das Modell MISKAM ist ein Klassiker in der mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungssimulation und wurde in den letzten Jahren ständig weiterentwickelt.

Das Modell trifft die Charakteristika der Strömungs- und Konzentrationsverteilung recht gut und gibt auch Details wieder, die von anderen Modellen nicht nachgebildet werden. Auffällig an den

Folgerungen

Ergebnissen von MISKAM sind jedoch die starke Kanalisierung der Strömung in den Straßenschluchten und im Kreuzungsbereich. Hinzu kommt, daß die turbulente Diffusion recht hoch ist. Dies führt überwiegend zu einer Unterschätzung der Konzentrationen, insbesondere bei den Spitzenwerten. Dies wirkt sich vor allem auf die Berechnung der 98%-Werte aus, die von MISKAM und auch LASAT zum Teil deutlich unterschätzt werden.

5.8 MUKLIMO

Das prognostische Modell MUKLIMO beruht auf der Stromfunktionsmethode. Die damit berechneten Strömungsfelder sehen plausibel aus. Auch die Konzentrationsverteilungen bei Anströmrichtungen quer zur Straße zeigen eine gute Korrelation der Maxima und Minima mit dem Windkanal.

Das Manko von MUKLIMO liegt in einer unterdurchschnittlichen horizontalen Diffusion. Das Immissionsfeld wird deshalb stark von den advektiven Prozessen bestimmt. Die mangelnde Verdünnung durch die Diffusion führt zu hohen Konzentrationsgradienten, d.h. je nach Anströmrichtung können einige Meßpunkte sehr hohe Konzentrationen aufweisen und an Meßpunkten daneben kommen so gut wie keine Spurenstoffe an.

Die Turbulenzparametrisierung von MUKLIMO sollte dahingehend überprüft und verbessert werden.

5.9 Modellübergreifende Probleme

Bei der Modellierung der Ausbreitung von Spurenstoffen in bebautem Gebiet stellt sich immer die Frage, wie groß das Gebiet gewählt werden muß und mit welcher räumlichen Auflösung in horizontaler und vertikaler Richtung operiert werden soll. Bei der Behandlung von Kfz-bedingten Emissionen wählt man gerne in Bodennähe Maschen von z.B. 3 m Höhe, um so eine Vorverdünnung der Emissionen aus der Linienquelle zu erhalten. Diese Vorverdünnung ist sinnvoll, da bewegte Fahrzeuge zu einer effizienten Vermischung ihrer freigesetzten Abgase beitragen. Im vorliegenden Fall, in dem fahrzeuginduzierte Turbulenz fehlt, führt eine grobe vertikale Auflösung zu deutlichen Fehlern. Abbildung 20 zeigt exemplarisch für den Referenzfall einen Vergleich der Konzentrationen, wie sie von ABC berechnet und im Windkanal gemessen wurden.

Auf der linken Seite ist das Scatterdiagramm für eine 3 m-Stufung der Schichten, auf der rechten Seite für eine 1 m-Stufung in den untersten 3 m dargestellt. Bei der groben Auflösung berechnet das Modell, vor allem bei den kleinen Konzentrationswerten, zu hohe oder zu niedrige Konzentrationen. Bei feinerer Auflösung werden gerade hier die Konzentrationsniveaus deutlich besser getroffen. Dies dokumentieren auch die Korrelationskoeffizienten, die in der Grafik angegeben sind. Rein theoretisch müßten bei immer feinerer Auflösung die Ergebnisse immer besser werden. Dies ist jedoch nicht der Fall. Bei einer vertikalen Auflösung von 0,5 m im bodennahen Bereich

ist keine wesentliche Verbesserung mehr zu erzielen. Der lineare Korrelationskoeffizient erhöht sich zwar noch geringfügig auf 0,84, der mittlere quadratische Fehler nimmt jedoch wieder zu.

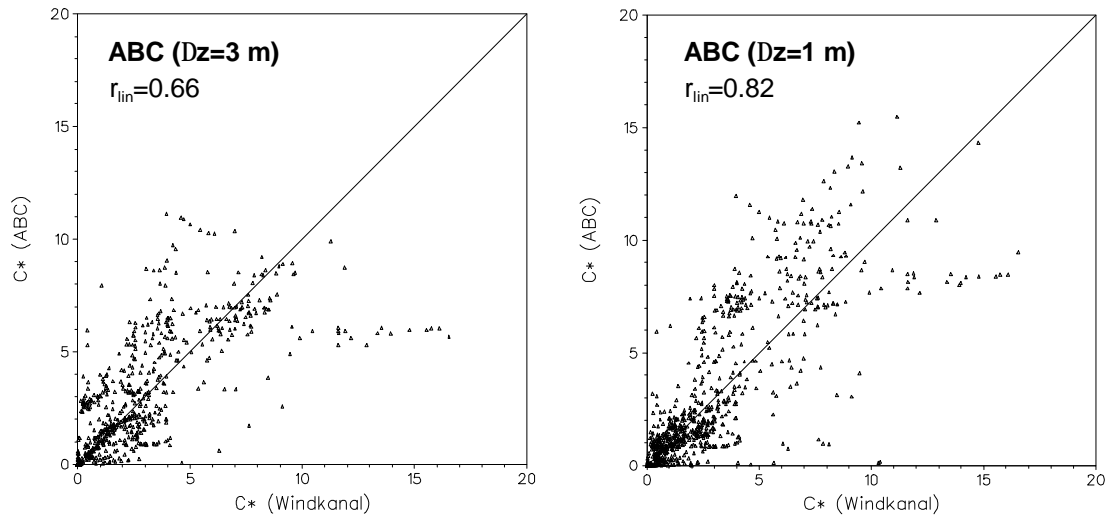


Abbildung 20: Scatterdiagramm für normierte Konzentrationen bei unterschiedlicher vertikaler Auflösung des Rechengitters. Links 3 m, rechts 1 m. Modell ABC, Referenzfall.

Die Ursache liegt in dem komplexen Zusammenwirken von advektivem und diffusivem Transport auf dem Weg von der Quelle zum Rezeptor. Abbildung 21 verdeutlicht dies graphisch.

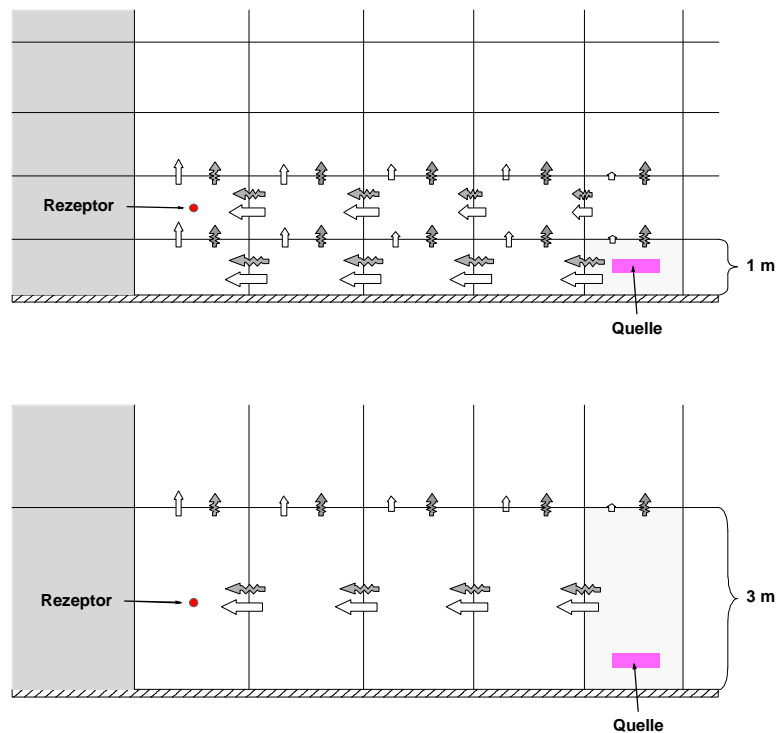


Abbildung 21: Die Komplexität der advektiven (\Leftarrow) und diffusiven (\gg) Prozesse zwischen Quelle und Rezeptor hängt von der Gittereinteilung ab. Oben - vertikale Auflösung 1 m; unten - vertikale Auflösung 3 m.

Folgerungen

Je mehr advektive und diffusive Prozesse am Transport beteiligt sind, desto genauer müssen sie aufeinander abgestimmt sein, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erreichen.

Weiterhin spielt die Anfangsverdünnung, die bei Euler'schen Ausbreitungsmodellen von der Zel-
lengröße abhängt, eine wesentliche Rolle. Das Zusammenwirken dieser Effekte ist im 3dimen-
sionalen Fall nicht mehr isoliert darstellbar, so daß aus der Güte der Konzentrationsverteilungen
nicht direkt auf die Güte der Strömungs- und Turbulenzfelder geschlossen werden kann.

5.10 Anwender

Die Abbildungen zeigen vor allem in den Konzentrationsfeldern größere Unterschiede in Lage
und Ausprägung der Maximalkonzentrationen zwischen den einzelnen Modellen. Hierbei sollte
bedacht werden, daß die Abbildungen überwiegend Sonderfälle (z.B. straßenparallele Anströ-
mung) darstellen, die zwar geeignet sind, Sachverhalte aufzuzeigen, nicht jedoch einen Gesamt-
eindruck zu vermitteln.

Von Anwenderseite wird die Frage gestellt, mit welchem Modell gerechnet werden soll.

Aus den angegebenen Gütemaßen ließe sich, bei Vorgabe einer Gewichtung der einzelnen Maße
– z.B. Trefferquote und logarithmischer Korrelationskoeffizient je 40%, RMS und mittlere Ab-
weichung je 10% – eine Rangfolge bilden. Diese würde jedoch bei einer anderen, prinzipiell nicht
objektivierbaren, Gewichtung deutlich variieren. Eine Empfehlung für ein einzelnes Modell kann
auf dieser Basis nicht ausgesprochen werden.

Von praktischer Relevanz ist die Berechnung von Jahresmittelwerten und Perzentilen, da diese
für die Beurteilung der Immissionsverhältnisse bestimmt werden müssen. Bei der Untersuchung
der statistischen Immissionskenngrößen in diesem Projekt wurde eine stark gebündelte Häufig-
keitsverteilung zugrunde gelegt. Ferner wurden unterschiedliche atmosphärisch Stabilitäten nicht
betrachtet, da entsprechende Windkanalmessungen nicht vorliegen. Nicht zuletzt spielt auch die
fahrzeuginduzierte Turbulenz, wie sie in befahrenen Straßenzügen auftritt, eine Rolle in der Aus-
prägung lokaler Konzentrationsmaxima. Die Untersuchung kann also nicht zeigen, wie gut die
Realität mit ihrer großen Bandbreite an Einflußfaktoren getroffen wird, sondern lediglich, wie
sich die unterschiedlichen Konzentrationsfelder der einzelnen Modelle bei einer statistischen
Auswertung darstellen. Modelle, die die im Windkanal gefundenen Perzentilwerte unterschätzen,
können bei realen Fragestellungen deutlich bessere Ergebnisse liefern, falls sie die fahrzeugindu-
zierte Turbulenz nicht explizit berücksichtigen. Die Praxistauglichkeit eines Modells kann also
nicht ausschließlich an einem solchen Vergleich beurteilt werden.

Zudem können Modellergebnisse nur so gut sein, wie es die Qualität der Eingangsdaten zuläßt.
Hier stellt der Anwender mitunter die größte Fehlerquelle dar. Die Aufbereitung der Eingangs-
daten, die Wahl des Rechengitters und der Anströmbedingungen erfordern vom Benutzer ein

tiefere Verständnis für die Sensitivitäten und Möglichkeiten eines Modells (vgl. FLASSAK et.al., 1996).

Die Güte einer Immissionsprognose hängt folglich von der Erfahrung des Anwenders, dem der Fragestellung und dem Einsatzgebiet entsprechenden Modell und der Qualität des Modells selbst ab. Für den letzten Punkt kann dieser Bericht hilfreich sein.

6 Ausblick

Die in Kapitel 5 beschriebenen Erkenntnisse zeigen, mit welchen Problemen die Entwickler numerischer Modelle derzeit konfrontiert sind. In jedem Modell taucht das Problem der Turbulenzparametrisierung auf. Eine Lösung, wie verlässliche Diffusionskoeffizienten zwischen den Hindernissen generiert werden, ist bislang noch nicht gefunden. Ansätze mit Mischungswegen scheitern ebenso wie die vielversprechenden, aber aufwendigen $k\varepsilon$ -Ansätze. Im ersten Fall ist nicht bekannt, welche Maße als Mischungsweglänge einzusetzen sind, im zweiten Fall gibt es freie Konstanten, die eingestellt werden müssen.

Der Kenntnisstand auf dem Gebiet der Turbulenz in bebautem Gelände ist nach wie vor dürftig und einzelne punktuelle Messungen sind für eine Modellbildung oder Verifikation unzureichend.

Eine nachhaltige Verbesserung der mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungsmodelle über den gegenwärtigen Stand hinaus, wird erst erzielt, wenn die Turbulenzverhältnisse besser erforscht sind. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

7 Literatur

BLINDA, S., HOPF, A., MANIER, G., MARBURG, K. (1992)

Entwicklung und Verifizierung eines Rechenmodelles zur Simulation der Ausbreitung von KFZ-Emissionen im Bereich komplexer Gebäudekonfigurationen.

Abschlußbericht für das Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen. Institut für Meteorologie der Technischen Hochschule Darmstadt.

EICHHORN, J. (1989)

Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modells.

Dissertation, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz.

FLASSAK, T., BÄCHLIN, W., BÖSINGER, R., BLAZEK, R., SCHÄDLER, G., LOHMEYER, A.

Einfluß der Eingangparameter auf berechnete Immissionswerte für Kfz-Abgase – Sensitivitätsanalyse.

Forschungsbericht FZKA-PEF 150, 1996

GROSS, G., RÖCKLE, R., JANSSEN, U. (1994)

ASMUS – Ein numerisches Modell zur Berechnung der Strömung und der Schadstoffverteilung im Bereich einzelner Gebäude. I: Das Strömungsfeld.

Meteorologische Zeitschrift N.F. 3, 267-274

GROSS, G. (1997)

ASMUS – Ein numerisches Modell zur Berechnung der Strömung und der Schadstoffverteilung im Bereich einzelner Gebäude. I: Schadstoffausbreitung und Anwendung.

Meteorologische Zeitschrift N.F. 6, 130-136.

HOSKER, R. P. (1984)

Flow and diffusion near obstacles. In Atmospheric Science and Power Production, SOE/TIC-27601, ISBN 0-87079-126-5.

JANICKE, L. (1982)

Particle Simulation of inhomogeneous turbulent diffusion.

In: Air pollution modeling and its application II, Plenum Press, N.Y. 527-535

JANICKE, L. (1985)

Particle simulation of dust transport and deposition and comparison with conventional models.

In Air Pollution Modeling and its Application, IV. Plenum Press N.Y., 759-769.

JANICKE, L. (1997)

Literatur

Ausbreitungsmodell LASAT – Referenzbuch zu Version 2.6. Handbuch zur Programmversion. 157 Seiten.

JUNG, H.J. (1996)

AIRPOL/L - Modell zur Berechnung der Ausbreitung von Schadstoffen.
Handbuch Version 2.3. IABG/TAF. 1996

KASTNER-KLEIN, P., PLATE, E.J. (1998)

Windkanalversuche zur Verbesserung der Ermittlung von KFZ-bedingten Konzentrationsverteilungen in Stadtgebieten. Forschungsbericht FZKA-PEF 295001

KLEIN,P., RAU,M., WANG,Z., PLATE,E.J. (1994)

Concentrations and flow field in the neighbourhood of buildings and building complexes (wind tunnel experiments). Annual Report, Research Programme for Air Pollution Prevention Measures, Kernforschungszentrum Karlsruhe

KLEIN, P., RAU, M., RÖCKLE, R., PLATE, E.J. (1994)

Concentration estimation around point sources located in the vicinity of U-shape buildings.
Air Pollution II, Vol. 2: Pollution Control and Monitoring, Editors: J.M. Baldasano, C.A. Brebbia,, H. Power, P. Zanetti. Computational Mechanics Publications.

LILLY (1962)

On the numerical simulation of buoyant convection. TELLUS 14, p. 148-172.

RÖCKLE, R. (1990)

Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen.
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.

RÖCKLE, R., RICHTER, C.-J., 1995

Berechnung der Kfz-bedingten Immissionen im innerstädtischen Bereich.
Umwelt Kommunal, Nr. 244, 24.10.1995, Umwelt Archiv I-IV.

RÖCKLE, R., KOST, W., JANICKE, L., 1995

Modeling of motor vehicle immissions in a street system by combination of lagrange models and surface wind field simulation in complex city structures.
In Wind Climate in Cities, Kluwer Academic Publishers, Series E: Applied Sciences,
Vol. 277, Ed. Cermak, Davenport, Plate, Viegas, p. 547-553.

RÖCKLE, R., RICHTER, C.-J., 1996

Ausbreitung aus niedrigen Quellen – Einsatz 3dimensionaler Strömungs- und Diffusionsmodelle.
Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 6/1996, S.203 - 208

RÖCKLE, R., RICHTER, C.-J. (1995)

Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen – Modellrechnungen –. Forschungsbericht FZKA-PEF 136. Forschungszentrum Karlsruhe.

SASAKI, Y. (1970)

Some basic formalisms in numerical variational analysis. Mon Weather Rev. 98,44-59.

SCHÄDLER, G., BÄCHLIN, W., LOHMEYER, A., VAN WEES, T. (1996)

Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. Forschungsbericht FZKA-PEF 138. Forschungszentrum Karlsruhe.

SCHENK, R. (1995)

IBS-Verkehr - Numerisches Verfahren zur Modellierung der Strömungsverhältnisse in Straßenschluchten sowie zur Berechnung der Ausbreitung von Verkehrsschadstoffen. Modellbeschreibung. IBS Prof. Schenk GmbH Halle.

SHERMAN, C.A. (1978)

A mass-consistent model for wind fields over complex terrain. J.Appl.Met. 17, 312-319.

SHIR, C.C., BORNSTEIN, R.D. (1977)

Eddy exchange coefficients in numerical models of the planetary boundary layer. Bound.Layer Met. 11, 171-185.

SIEVERS, U., MAYER, I., ZDUNKOWSKI, W. (1987)

Numerische Simulation des urbanen Klimas mit einem zweidimensionalen Modell. Meteorologische Rundschau 40, 40-52.

SIEVERS, U. (1990)

Dreidimensionale Simulation in Stadtgebieten.

In Umweltmeteorologie, Schriftenreihe Band 15 der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN. Düsseldorf. 36-43.

SIEVERS, U. (1995)

Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen.

Meteorol. Zeitschrift N.F. 4, 3-15

TREPTE, S. (1994)

Windverhältnisse und Schadstoffausbreitung im Einflußbereich einzelner Gebäude - Numerische Simulationen -. Diplomarbeit im Fach Meteorologie, Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover.

Literatur

8 Anhang – Abbildungen

ABC

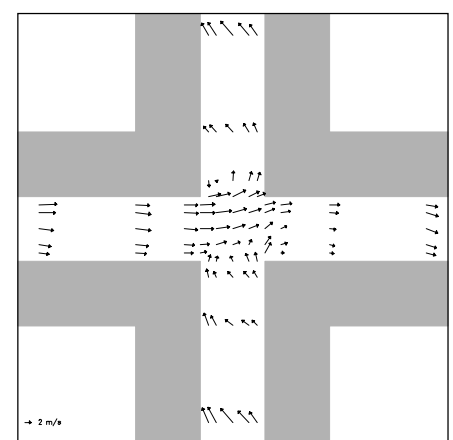
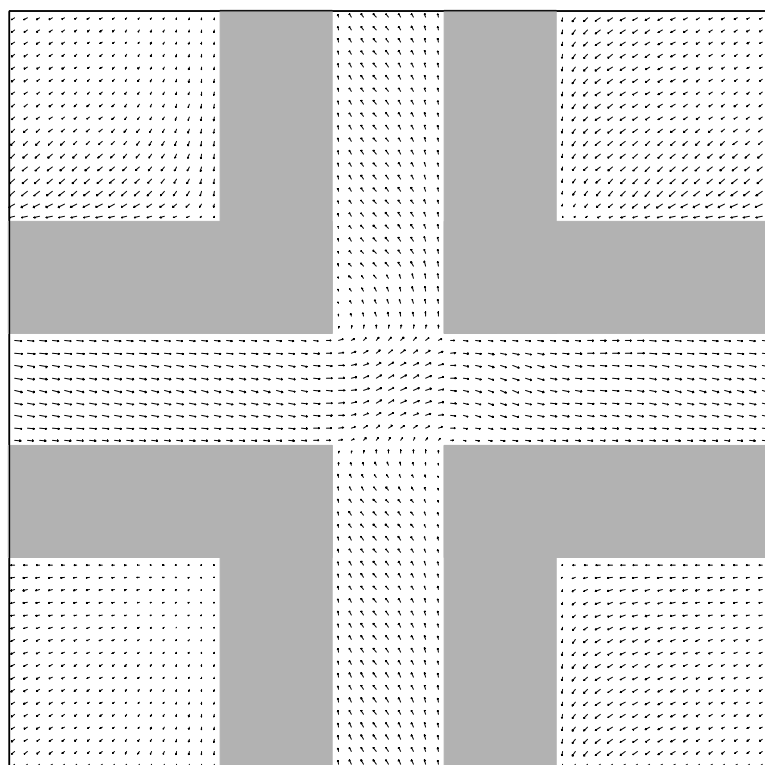
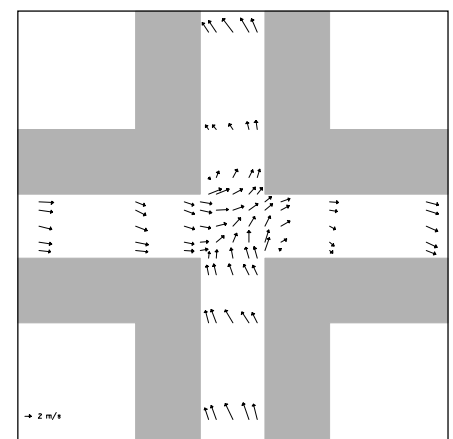
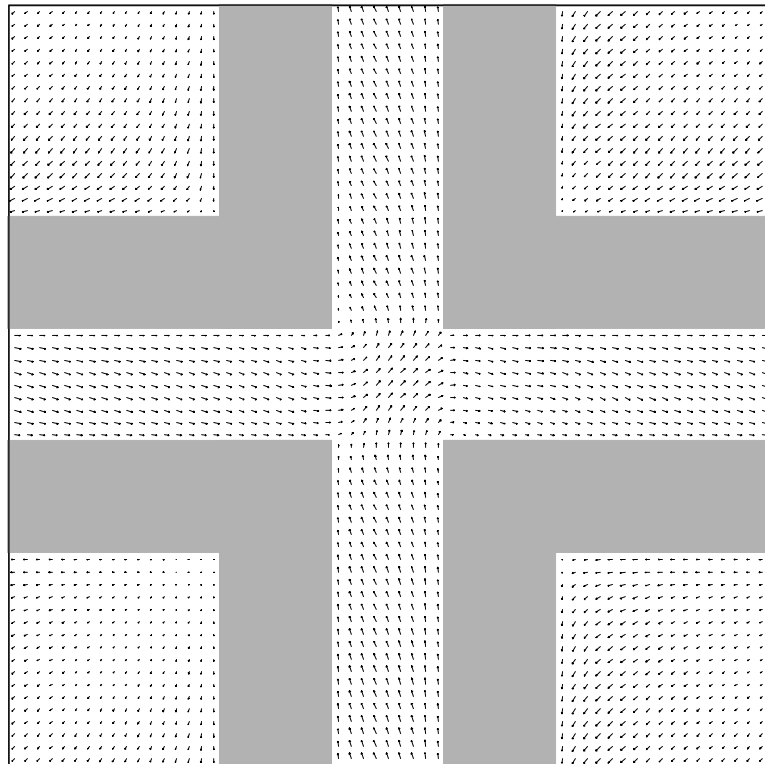


Abbildung A1: Bodennahe Strömungsverhältnisse bei Anströmung aus 225° (oben) und 240° (unten) Modell ABC, Fall 0

AIRPOL

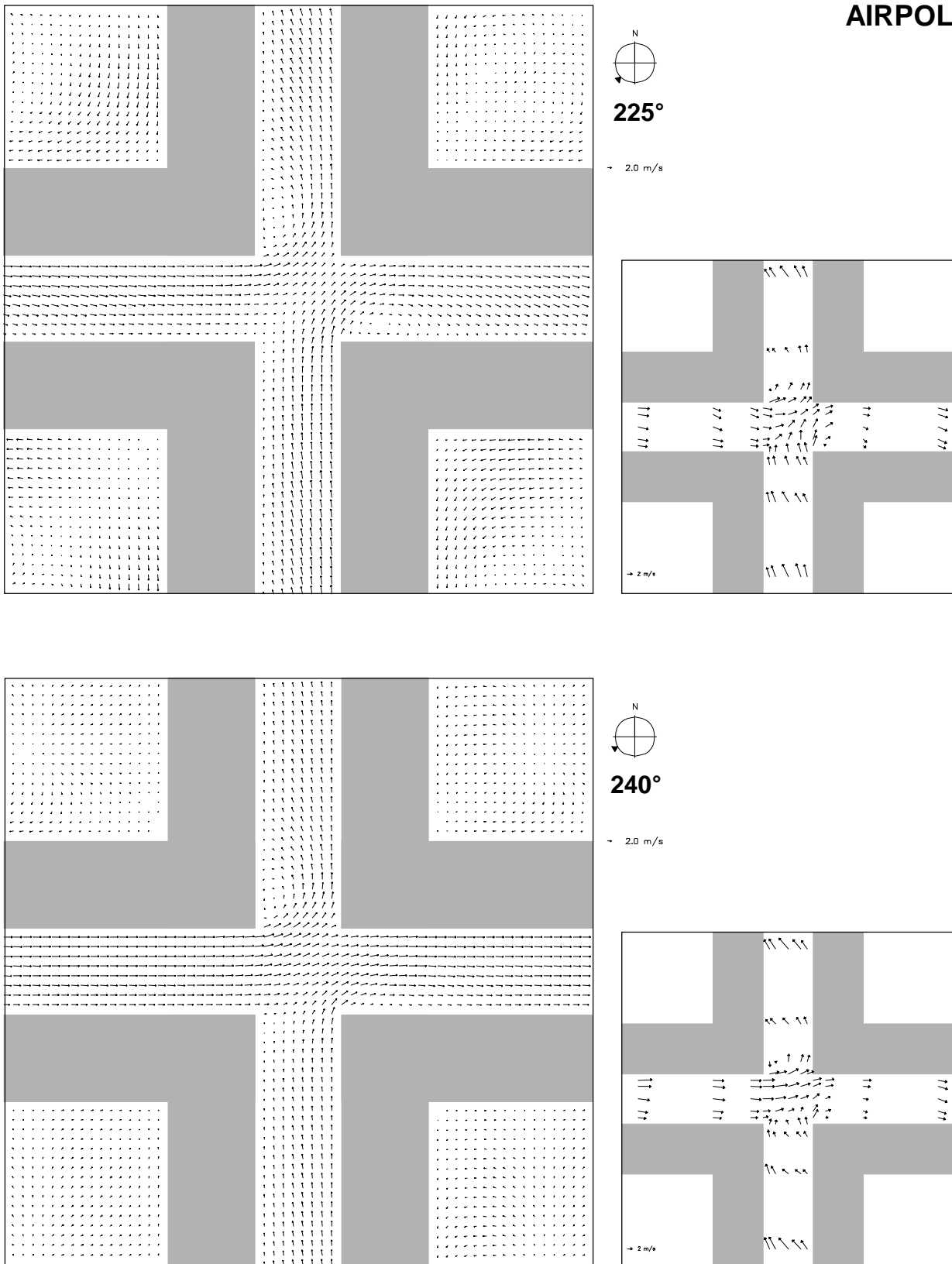


Abbildung A2: Bodennahe Strömungsverhältnisse bei Anströmung aus 225° (oben) und 240° (unten) Modell AIRPOL, Fall 0

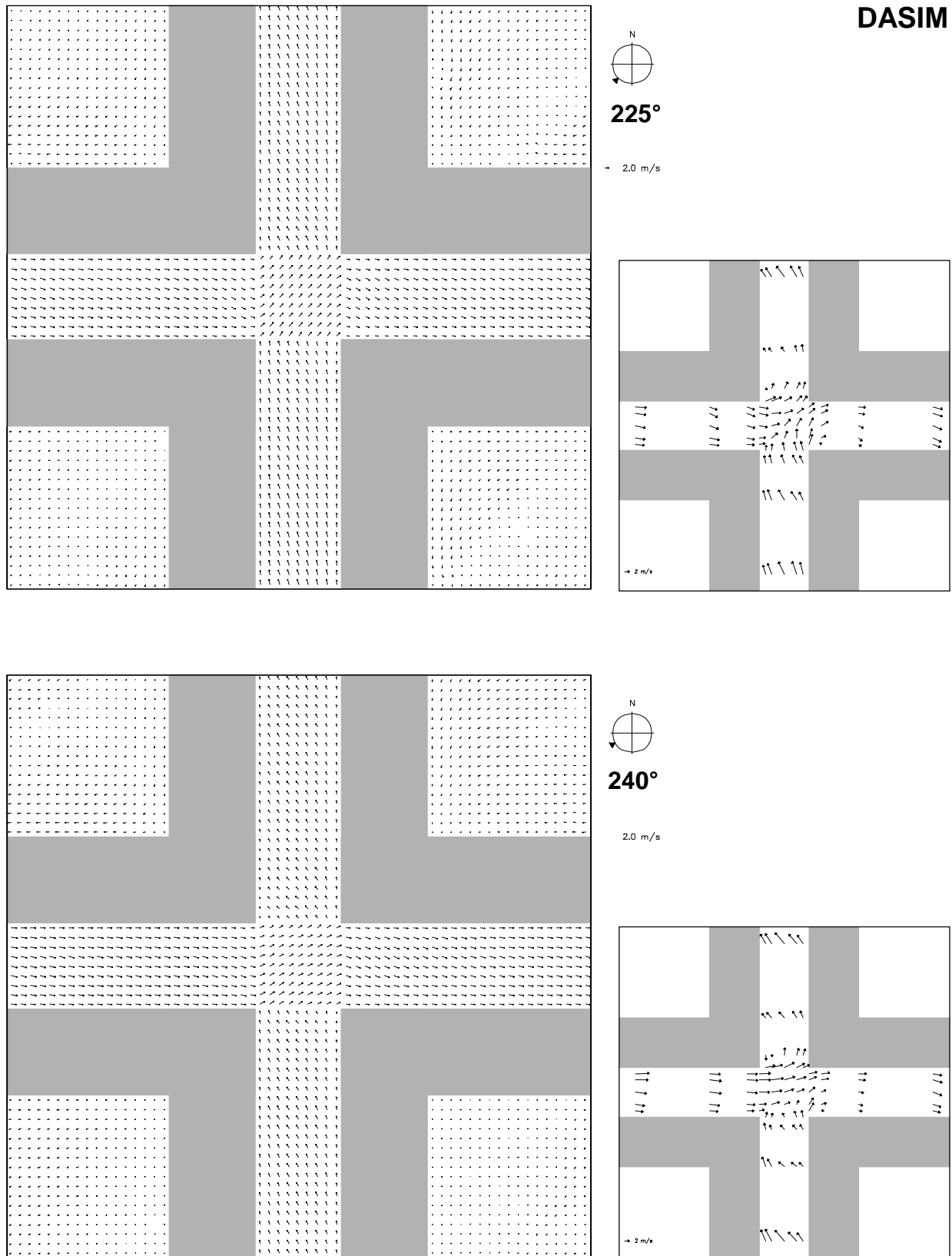


Abbildung A3: Bodennahe Strömungsverhältnisse bei Anströmung aus 225° (oben) und 240° (unten) Modell DASIM, Fall 0

IBS

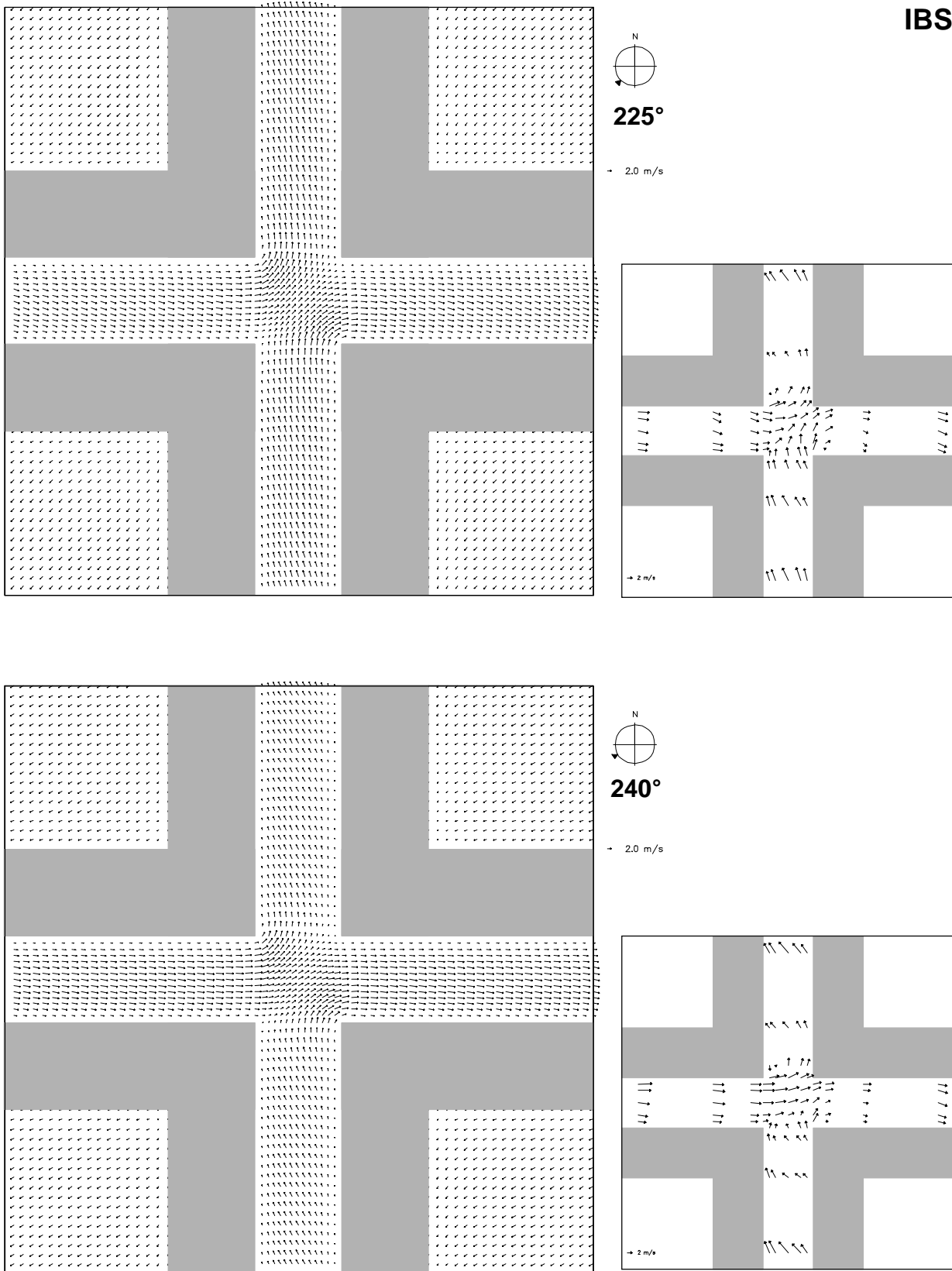


Abbildung A4: Bodennahe Strömungsverhältnisse bei Anströmung aus 225° (oben) und 240° (unten) Modell IBS, Fall 0

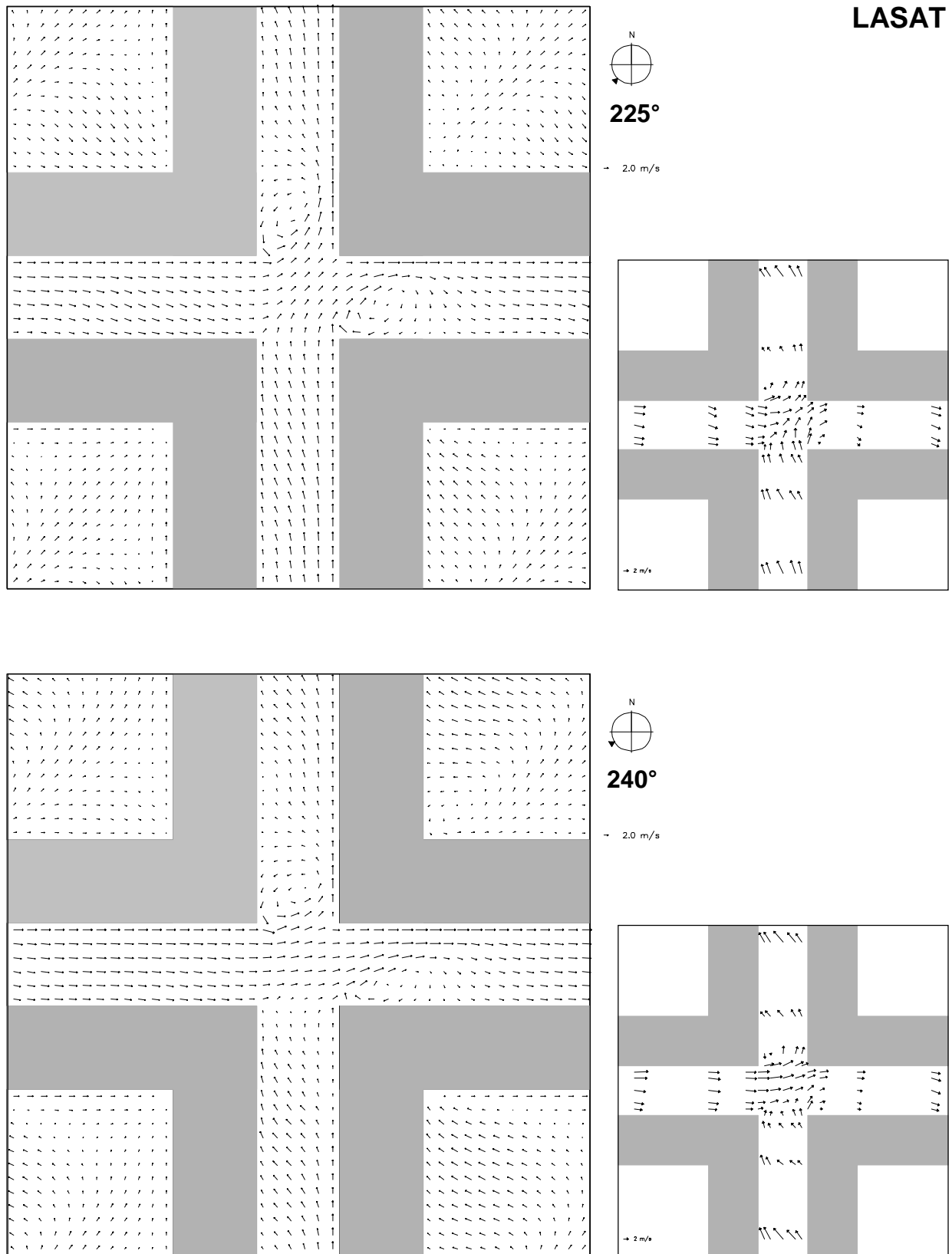


Abbildung A5: Bodennahe Strömungsverhältnisse bei Anströmung aus 225° (oben) und 240° (unten) Modell LASAT, Fall 0

MISKAM

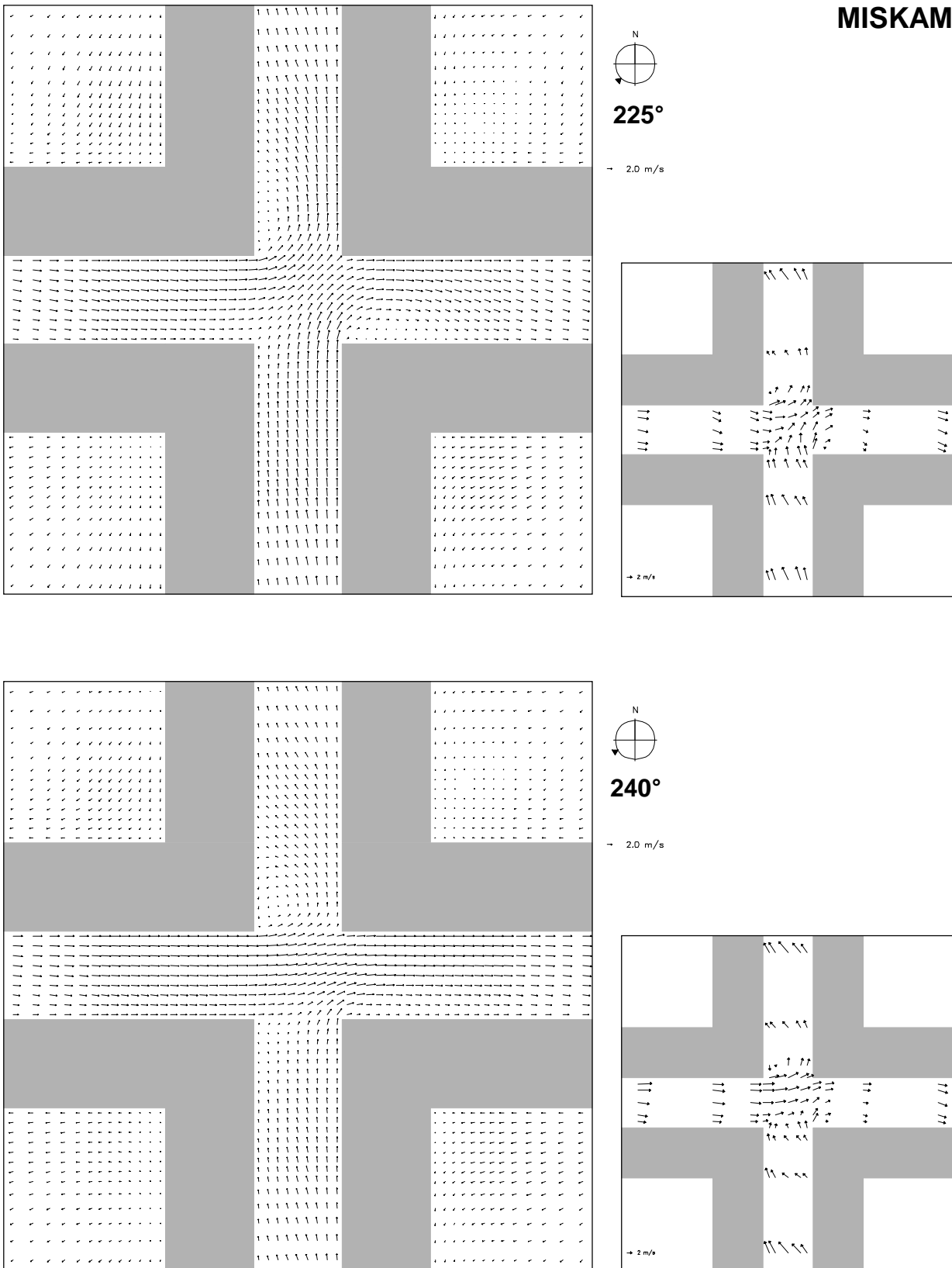


Abbildung A6: Bodennahe Strömungsverhältnisse bei Anströmung aus 225° (oben) und 240° (unten) Modell MISKAM, Fall 0

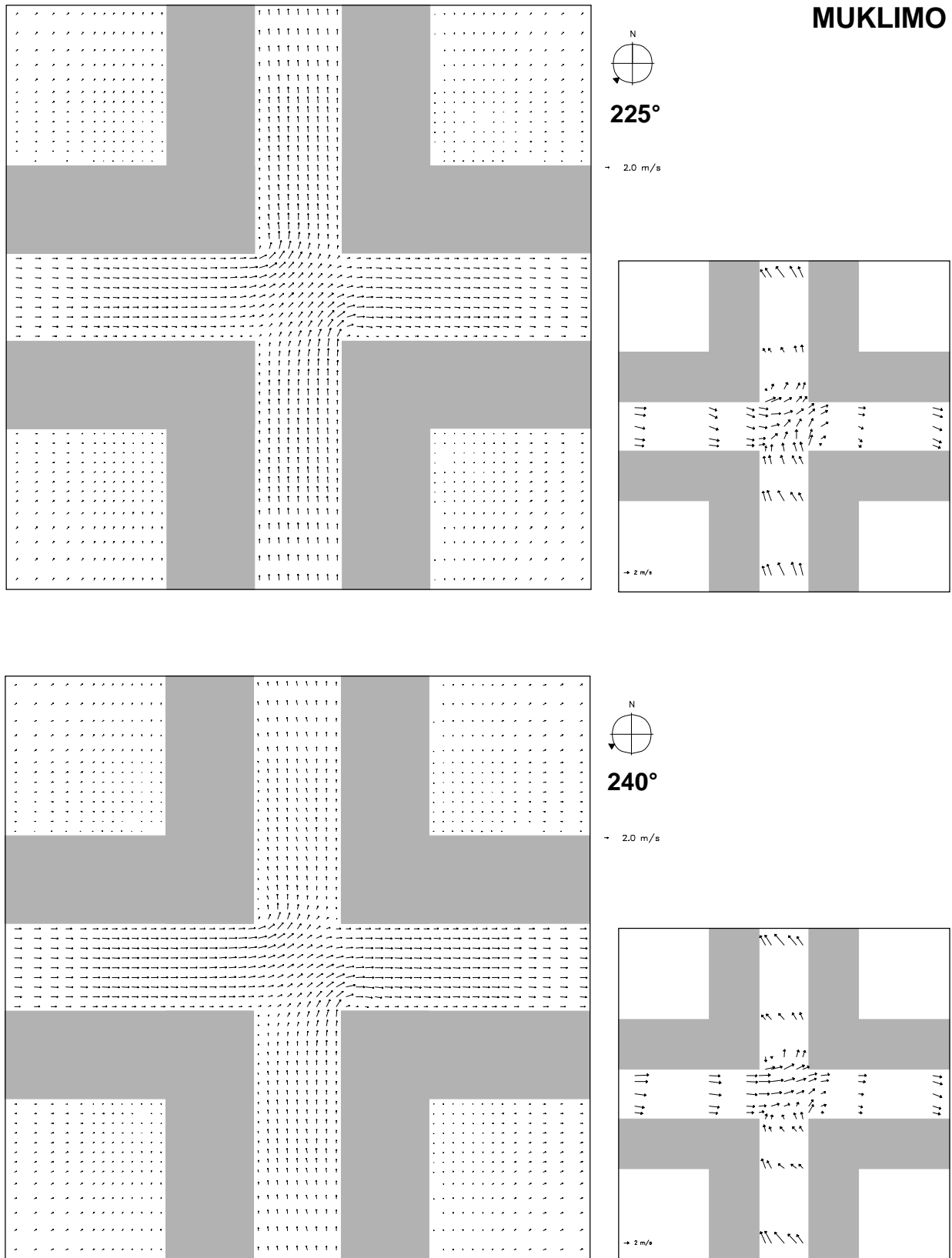


Abbildung A7: Bodennahe Strömungsverhältnisse bei Anströmung aus 225° (oben) und 240° (unten) Modell MUKLIMO, Fall 0

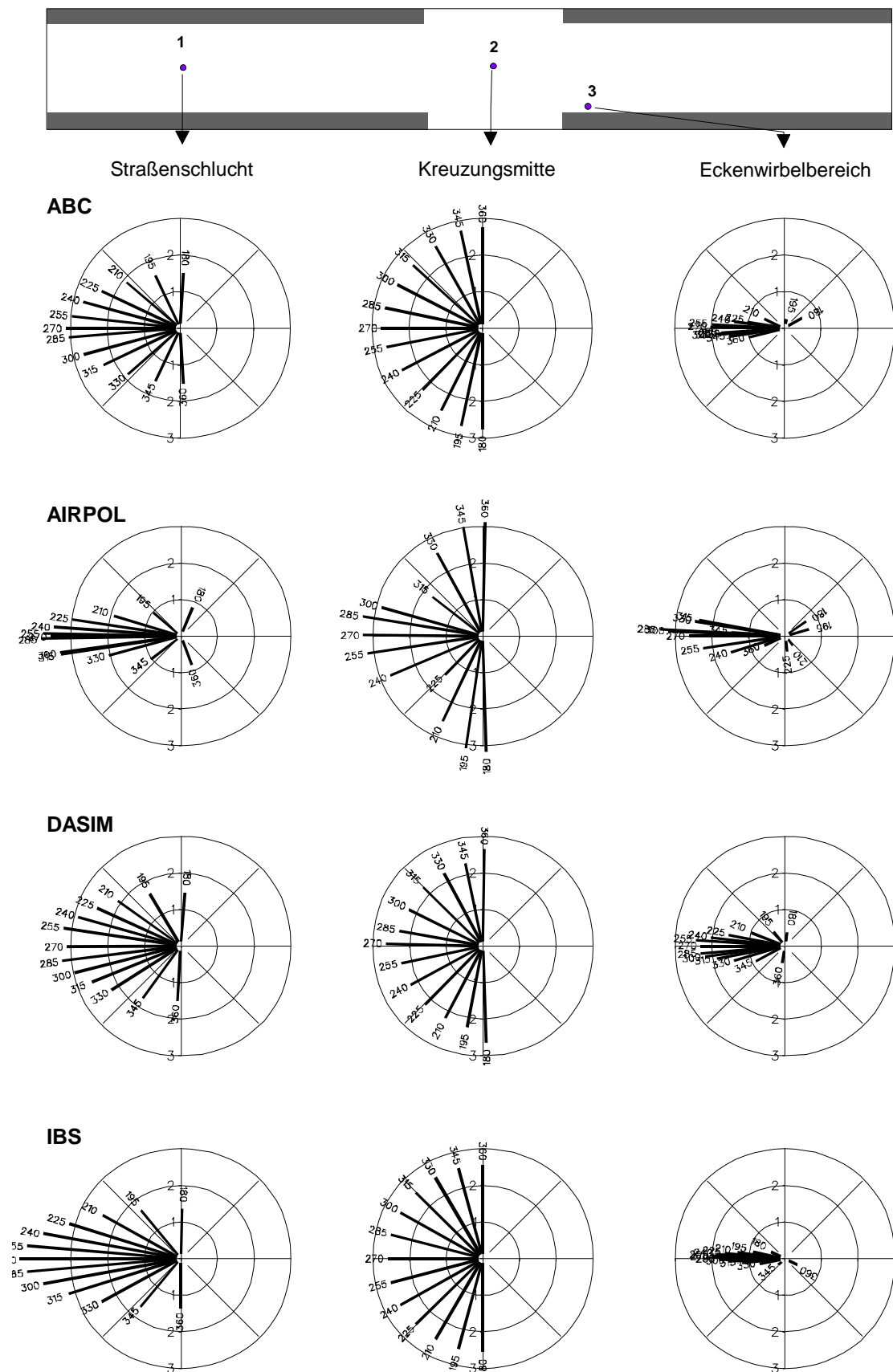


Abbildung A8a: Bodennahe Strömungsgeschwindigkeiten in der Straßenschlucht, in der Kreuzungsmitte und im Eckenwirbelbereich in m/s für die 13 untersuchten Anströmrichtungen, Fall 0

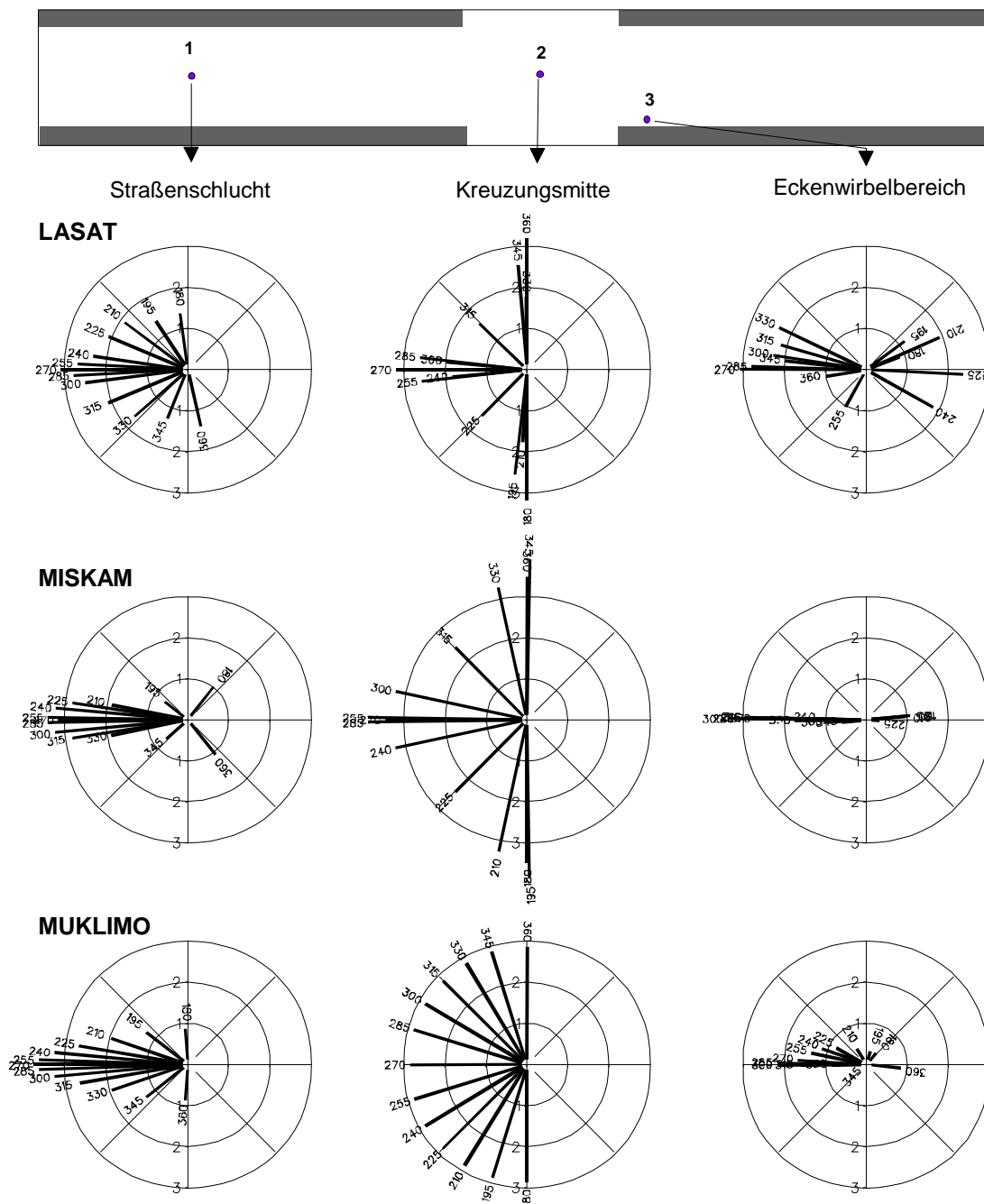


Abbildung A8b: Bodennahe Strömungsgeschwindigkeiten in der Straßenschlucht, in der Kreuzungsmitte und im Eckenwirbelbereich in m/s für die 13 untersuchten Anströmrichtungen, Fall 0

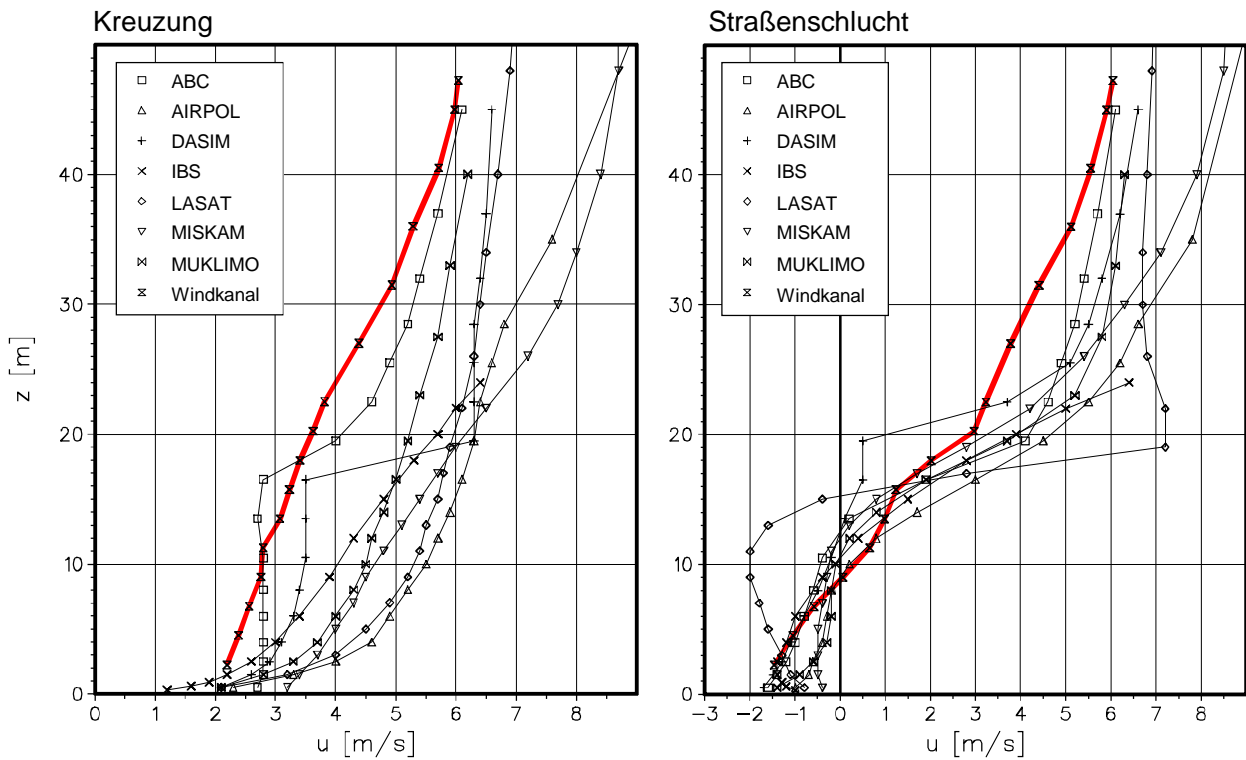


Abbildung A 9: Vertikalprofile der West-Ost-Strömungskomponente auf der Kreuzung und in der Straßenschlucht bei Anströmung aus 270°, Fall 0

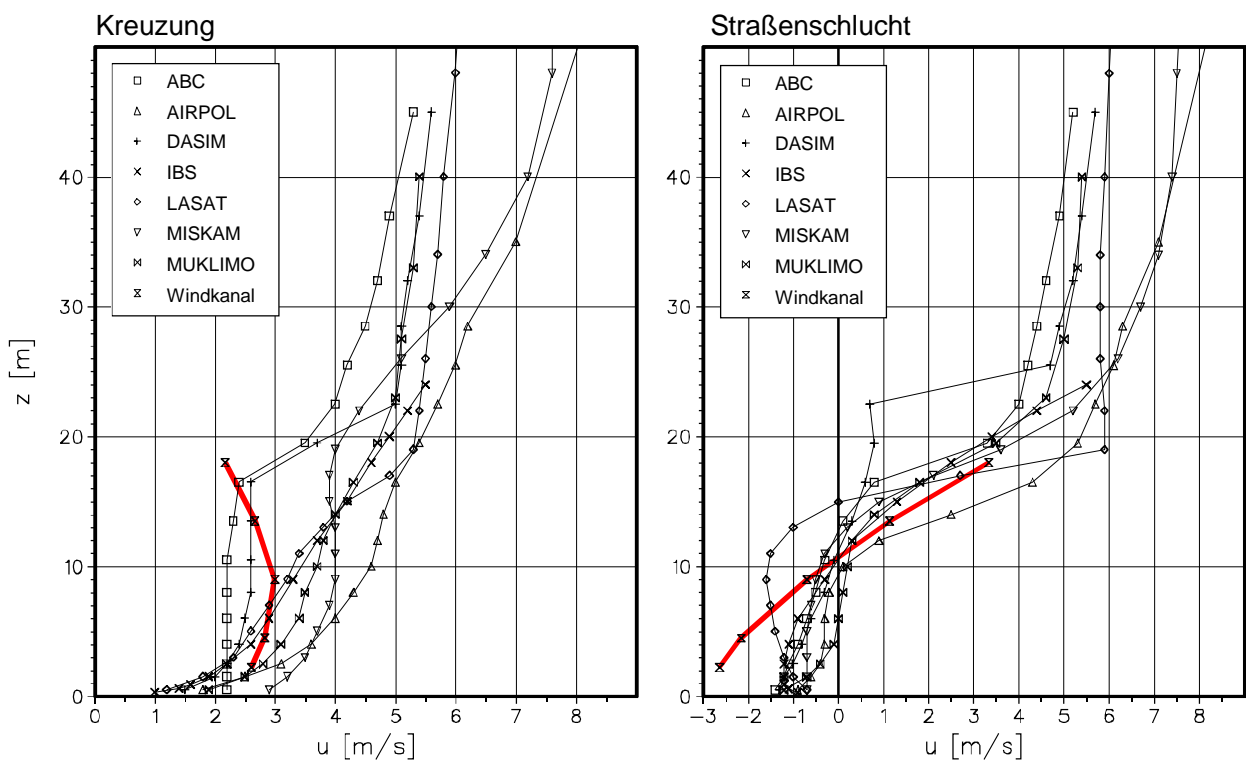


Abbildung A 10: Vertikalprofile der West-Ost-Strömungskomponente auf der Kreuzung und in der Straßenschlucht bei Anströmung aus 240°, Fall 0

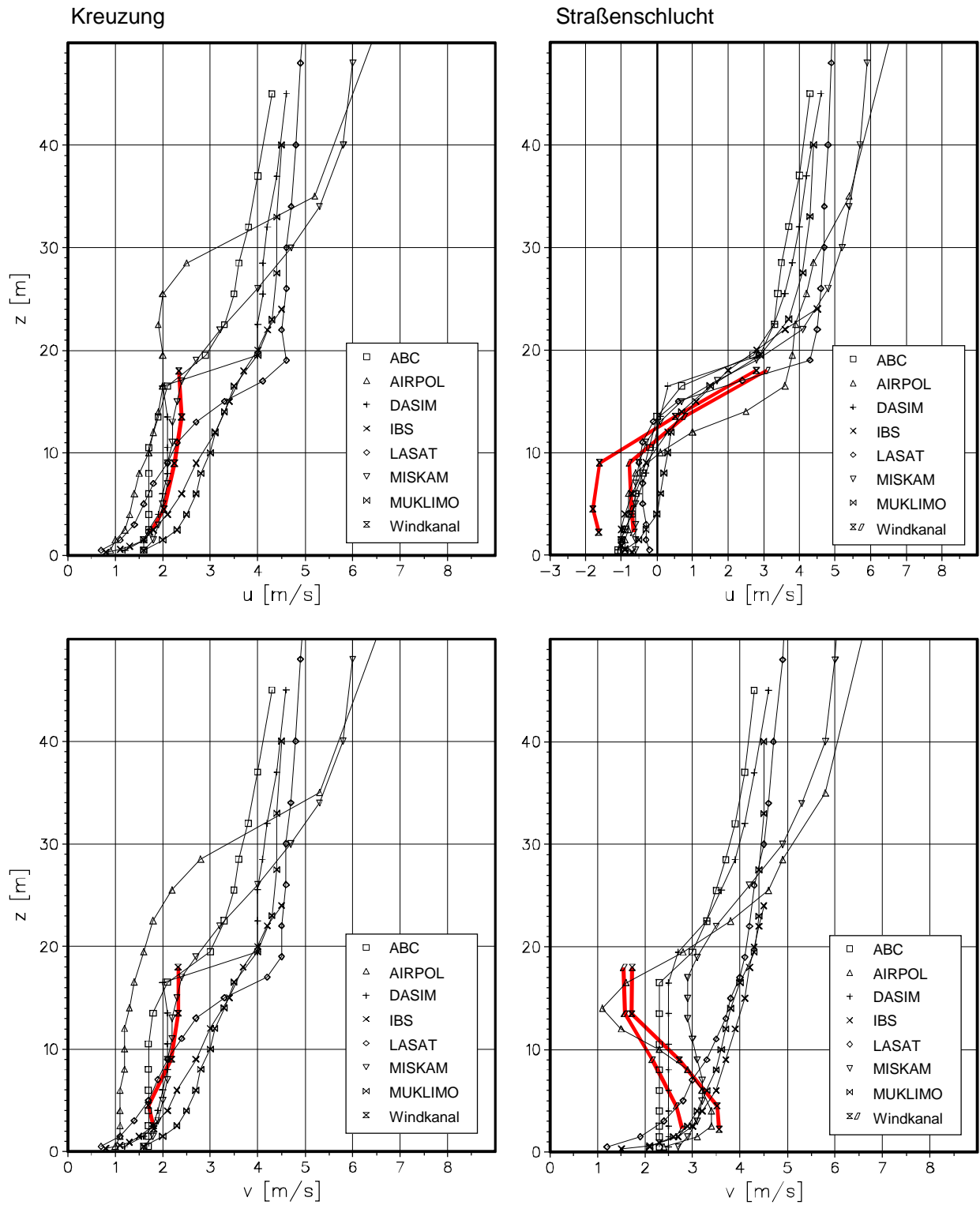
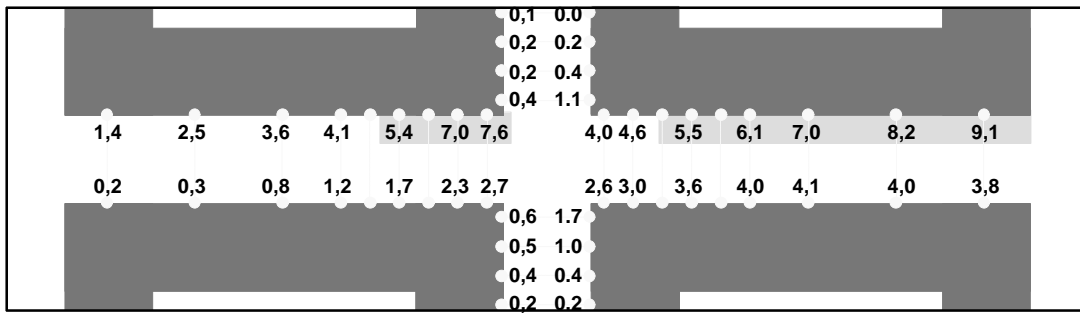
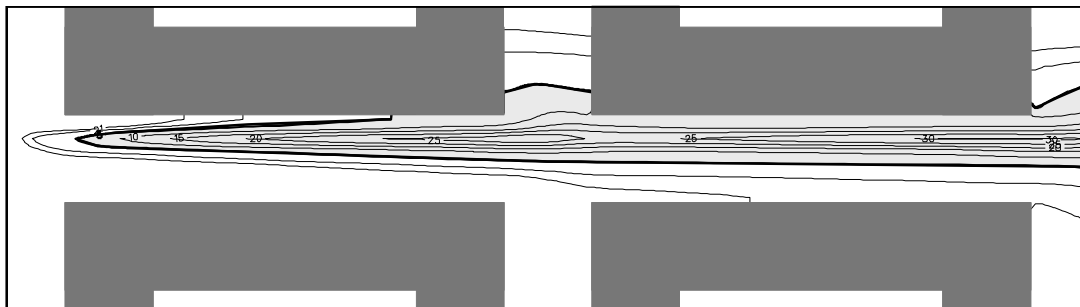


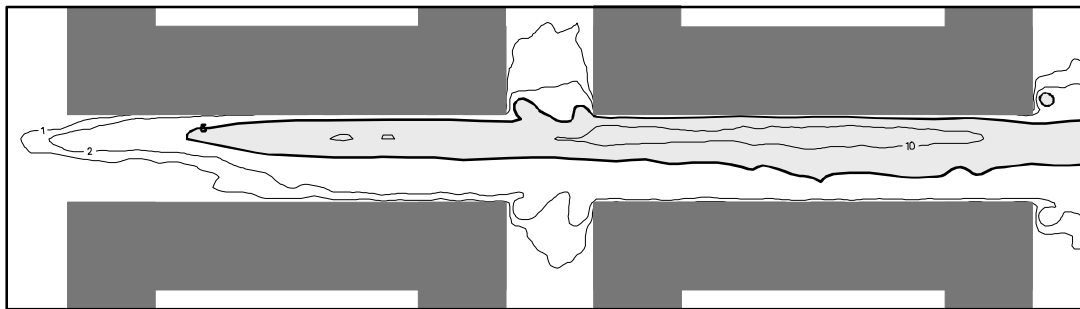
Abbildung A 11: Vertikalprofile der West-Ost-Strömungskomponente (oben) und der Süd-Nord-Strömungskomponente (unten) auf der Kreuzung und in der Straßenschlucht bei Anströmung aus 225°, Fall 0



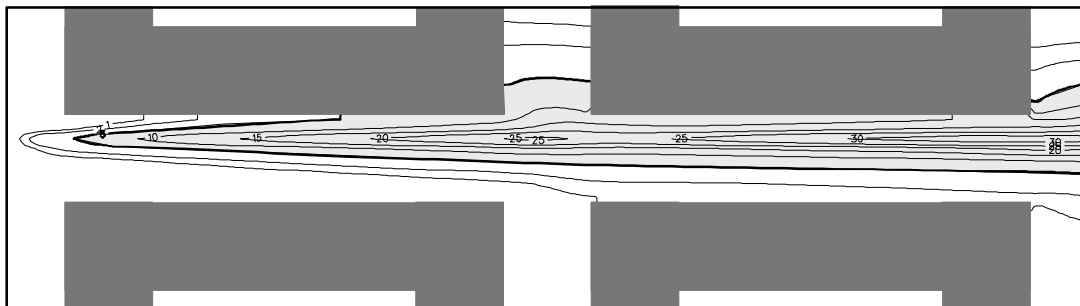
Windkanal



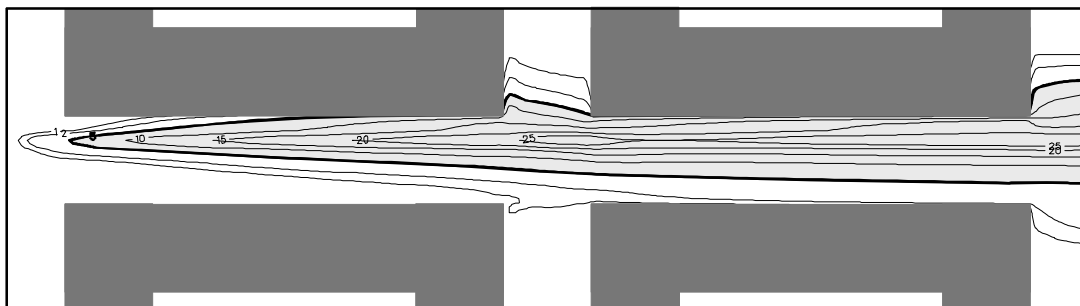
ABC



AIRPOL



ASMUS



DASIM

Abbildung A 12a: Bodennahe Konzentrationsverteilung bei Anströmung aus 270°, Fall 0
Normierte Konzentrationen [10^{-3} 1/m^2]

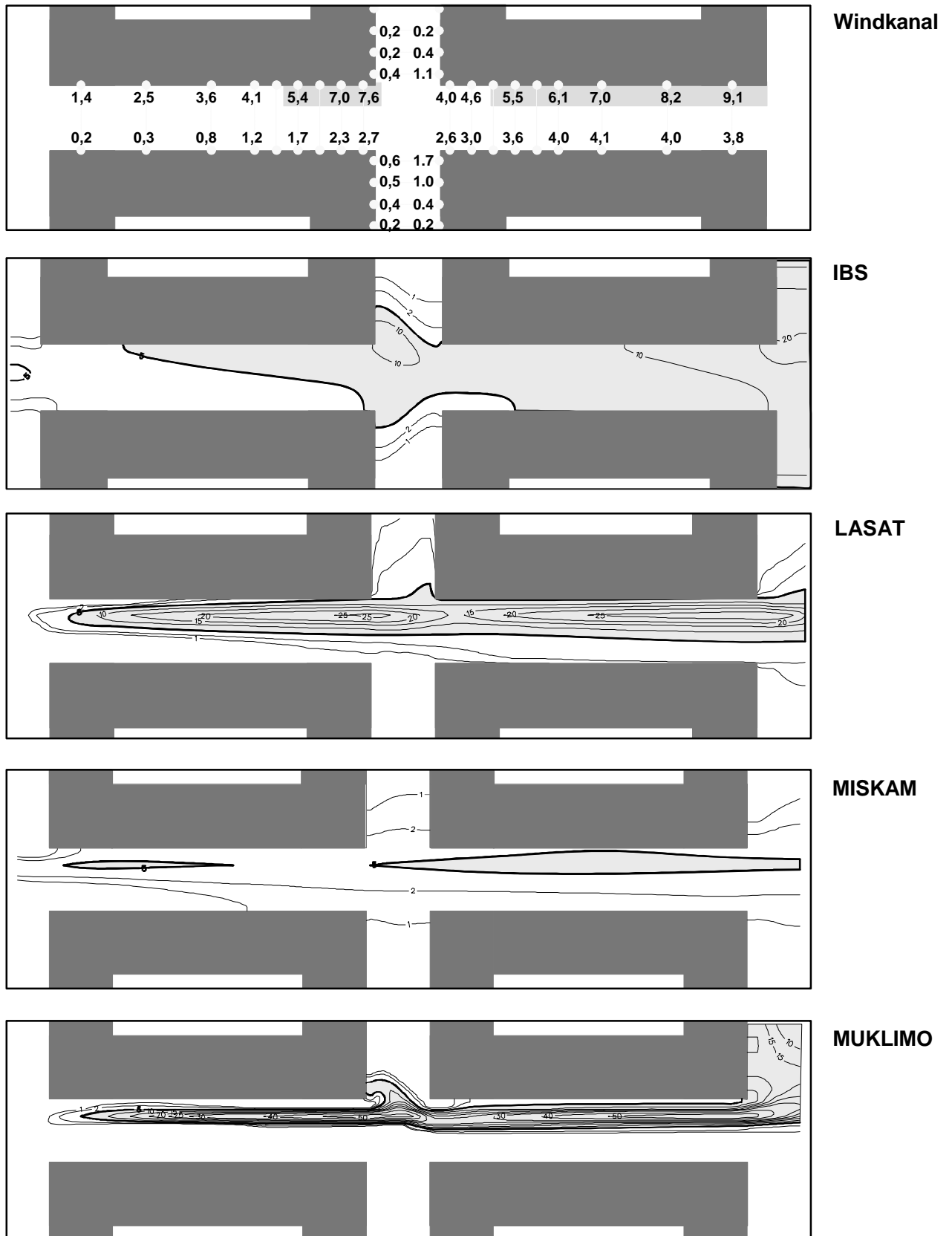
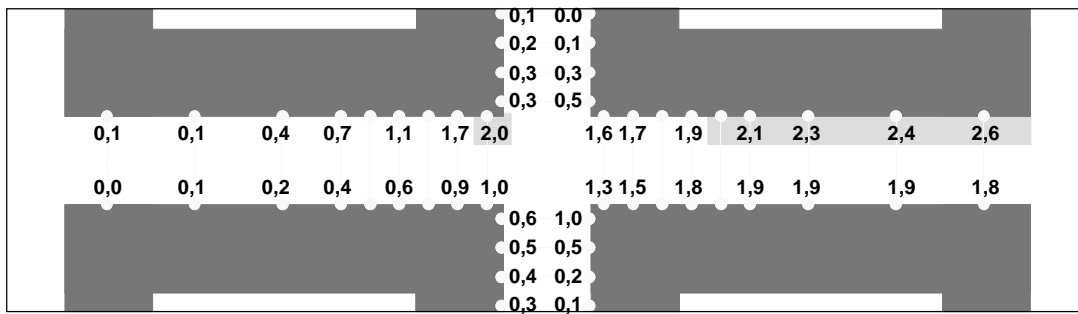
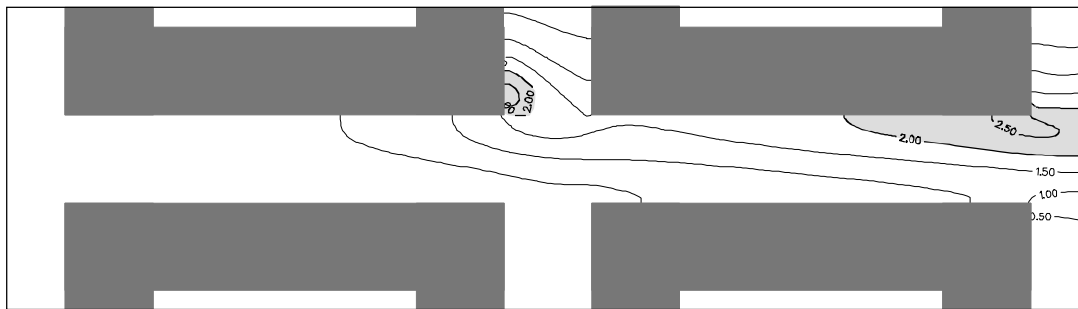


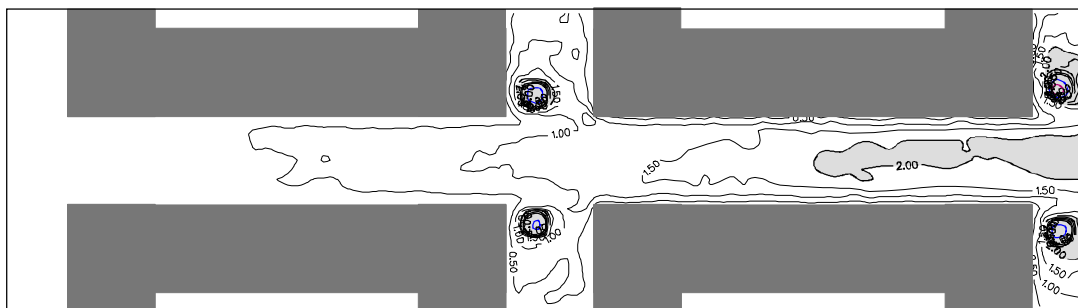
Abbildung A 12b: Bodennahe Konzentrationsverteilung bei Anströmung aus 270°, Fall 0.
 Normierte Konzentrationen [10^{-3} 1/m²]



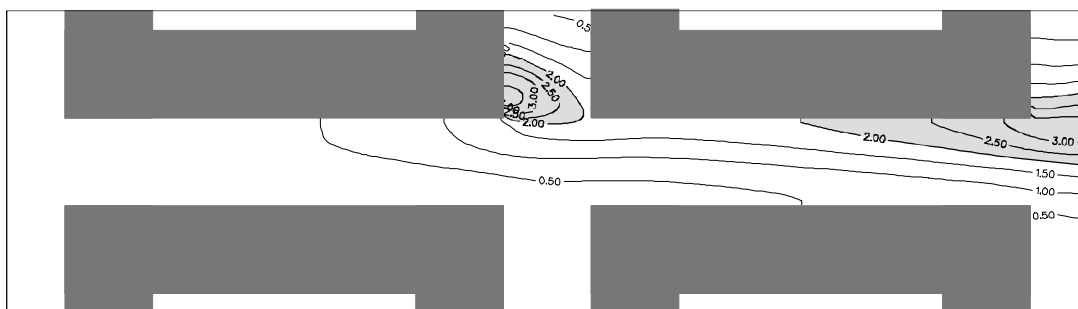
Windkanal



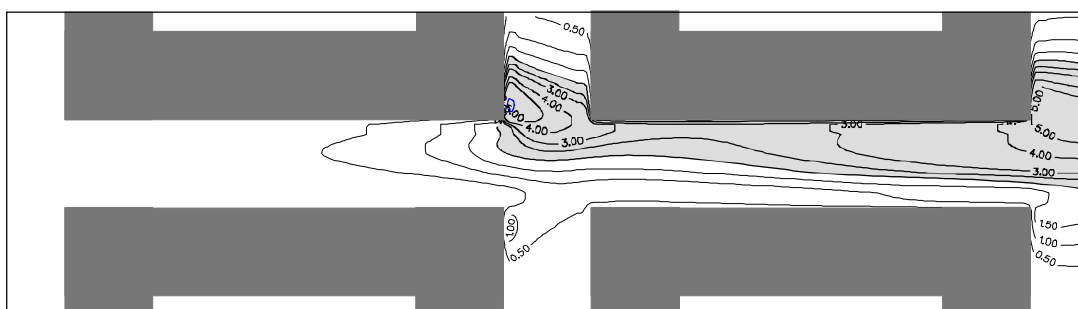
ABC



AIRPOL



ASMUS



DASIM

Abbildung A 13a: Konzentrationsverteilung in 12 m über Grund bei Anströmung aus 270°. Fall 0. Normierte Konzentrationen [$10^{-3} 1/m^2$]

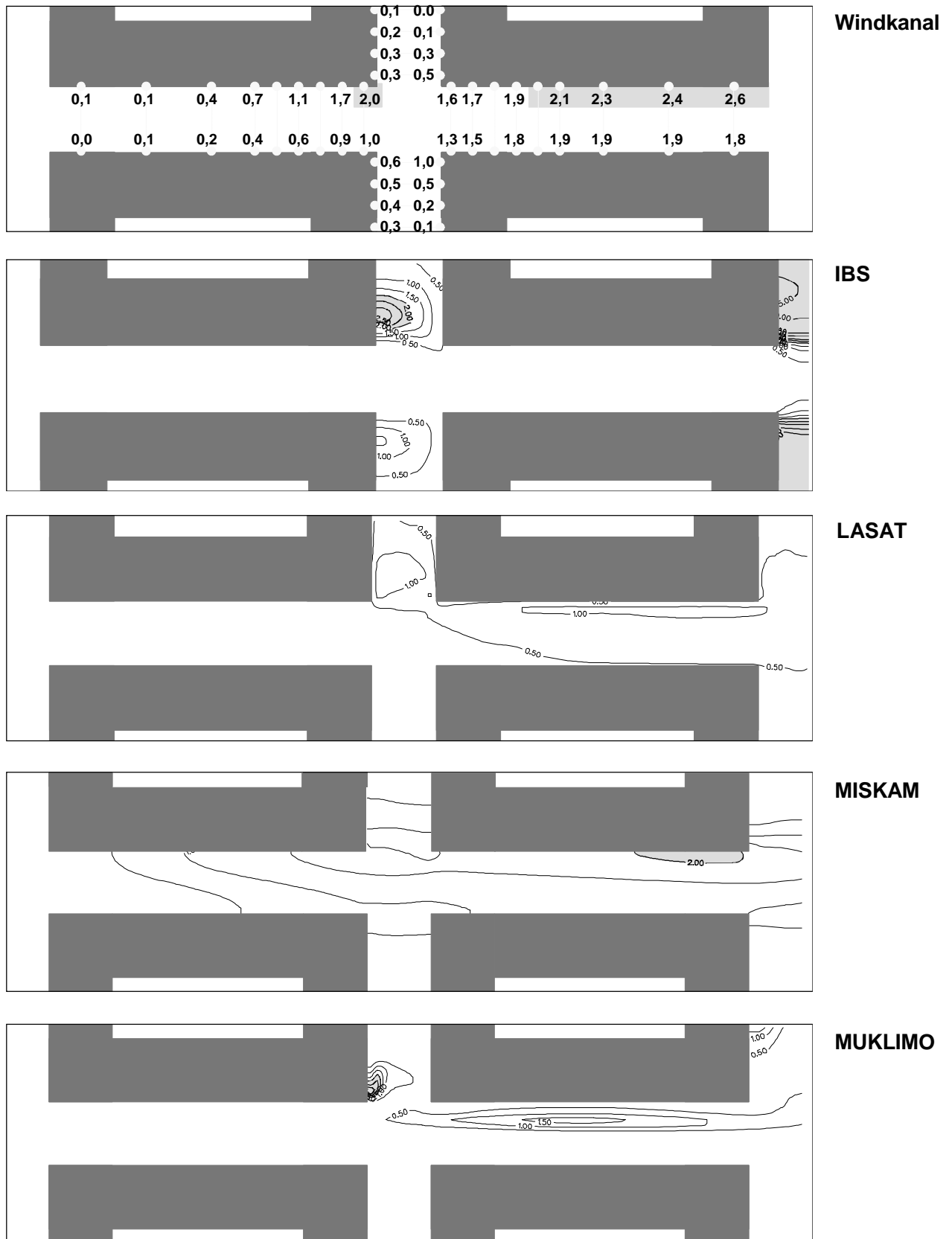


Abbildung A 13b: Konzentrationsverteilung in 12 m über Grund bei Anströmung aus 270°. Fall 0. Normierte Konzentrationen [10^{-3} 1/m^2]

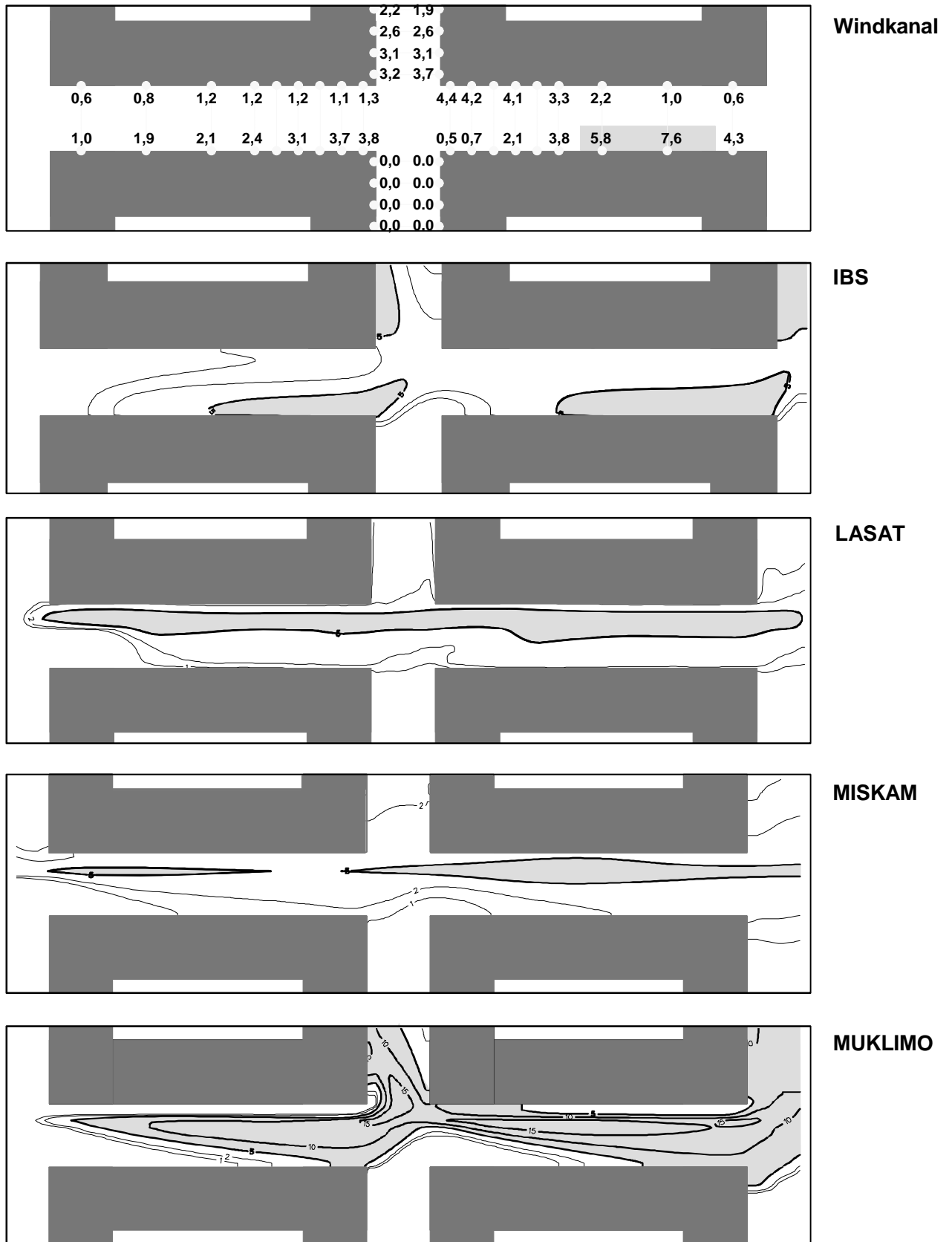
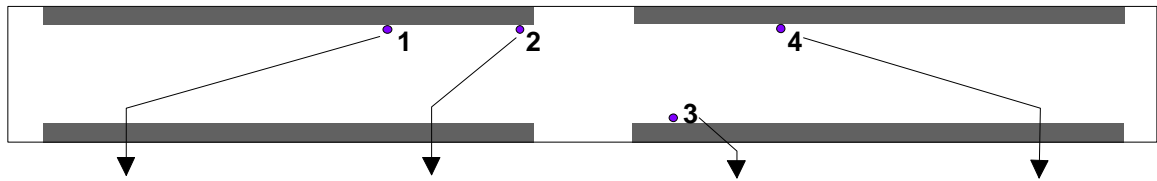
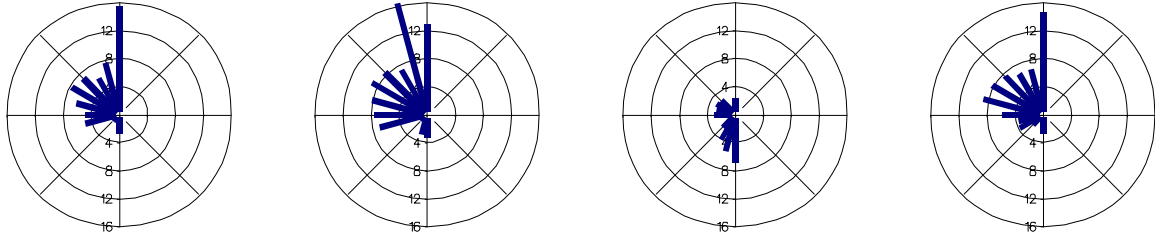


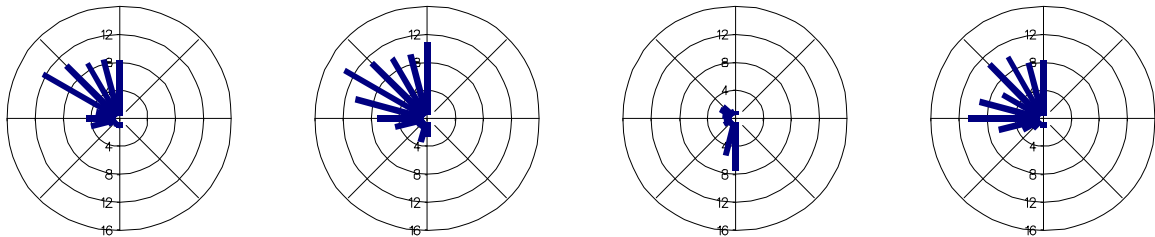
Abbildung A 14b: Bodennahe Konzentrationsverteilung bei Anströmung aus 240°, Fall 0. Normierte Konzentrationen [10^{-3} 1/m^2]



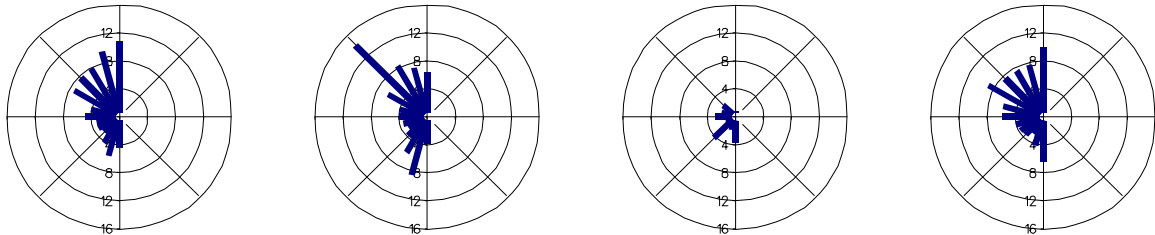
Windkanal



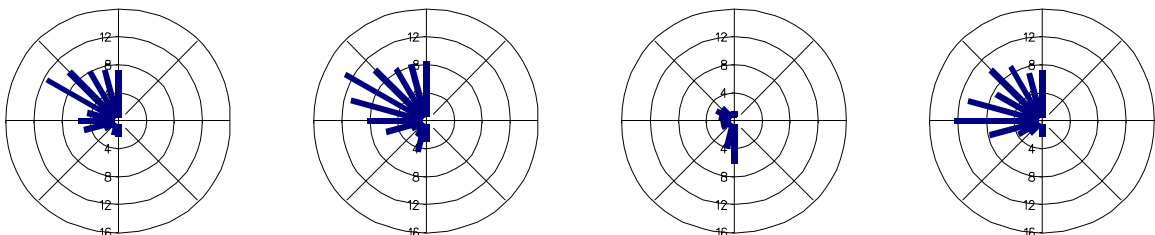
ABC



AIRPOL



ASMUS



DASIM

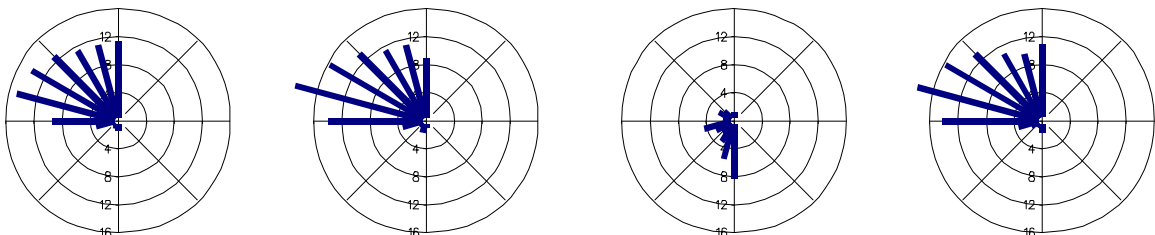
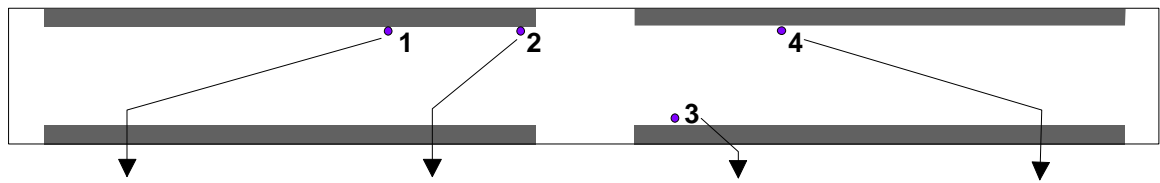
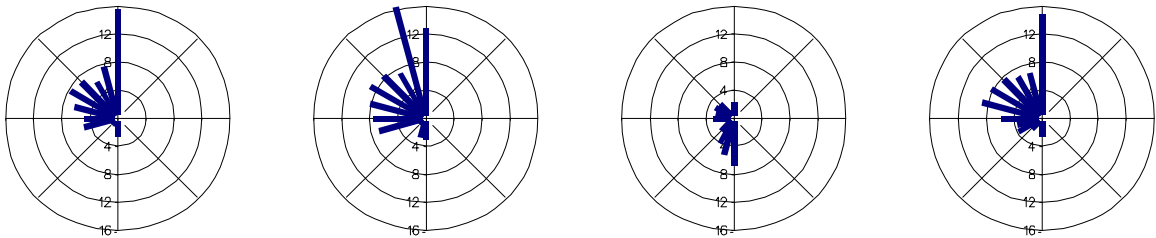


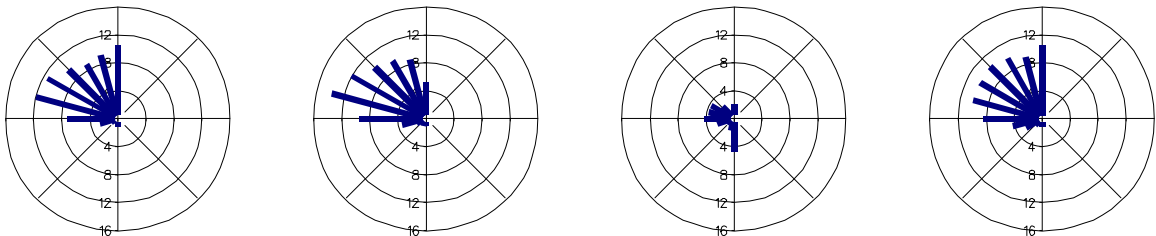
Abbildung A 15a: Normierte Konzentrationen [10^{-3} l/m^2] in Abhängigkeit von der Anströmrichtung an 4 Untersuchungspunkten (s.o.), Fall 0



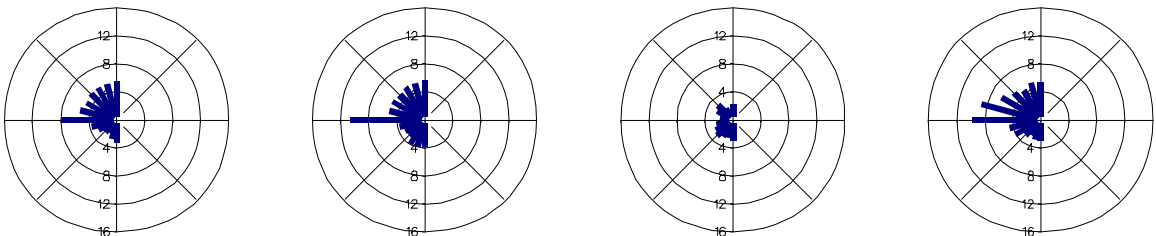
Windkanal



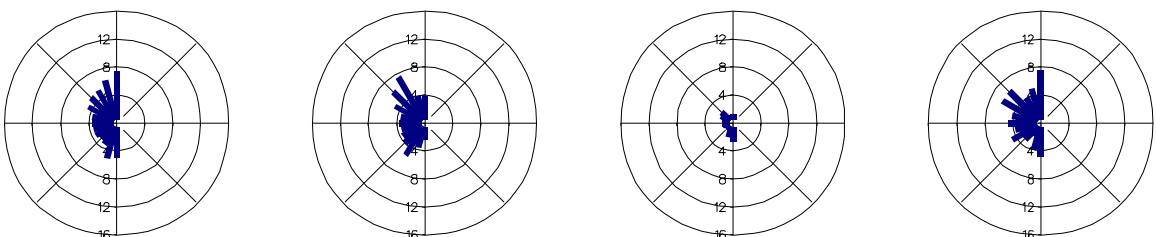
IBS



LASAT



MISKAM



MUKLIMO

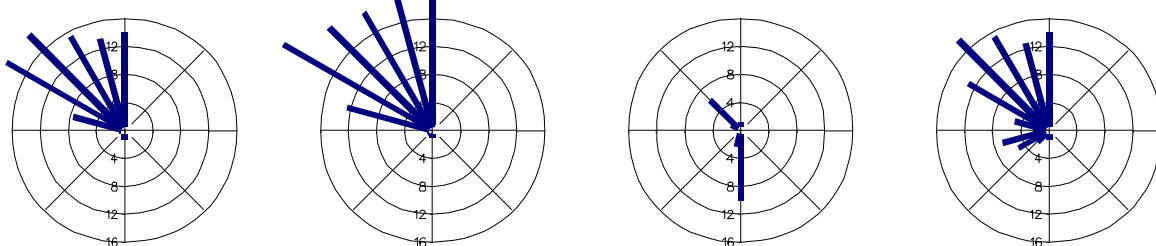


Abbildung A 15b: Normierte Konzentrationen [10^{-3} 1/m^2] in Abhängigkeit von der Anströmrichtung an 4 Untersuchungspunkten (s.o.), Fall 0

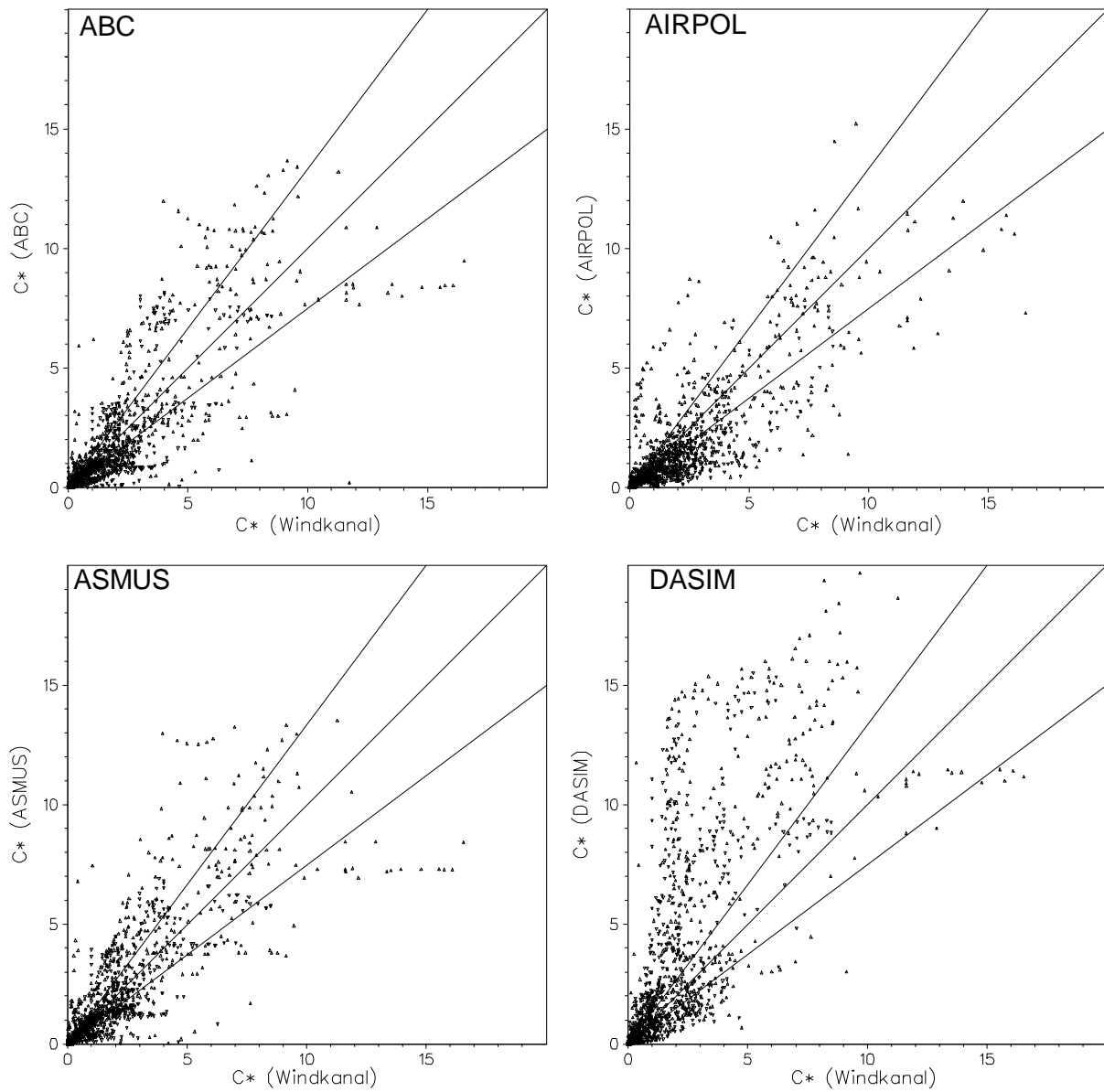


Abbildung A 16a: Scatterdiagramme mit normierten Konzentrationen [10^{-3} l/m^2]. Vergleich zwischen Windkanal und numerischen Modellen für den Fall 0

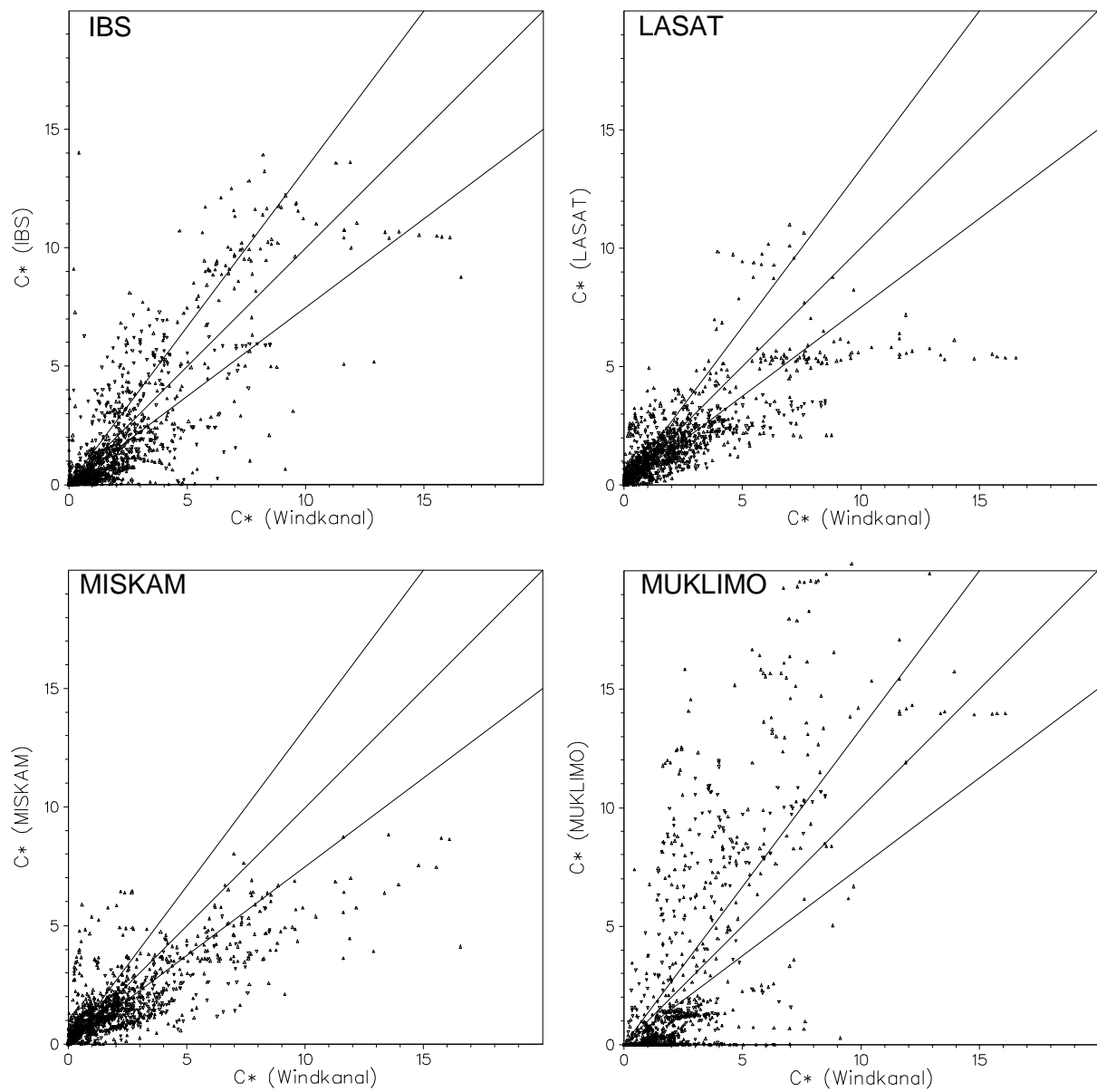
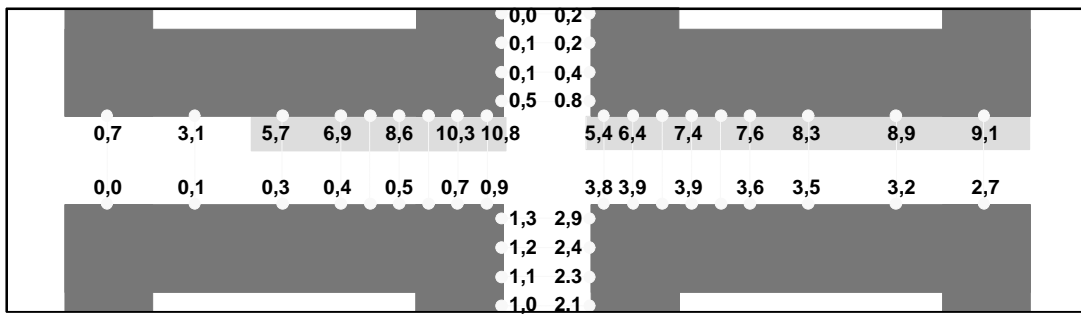
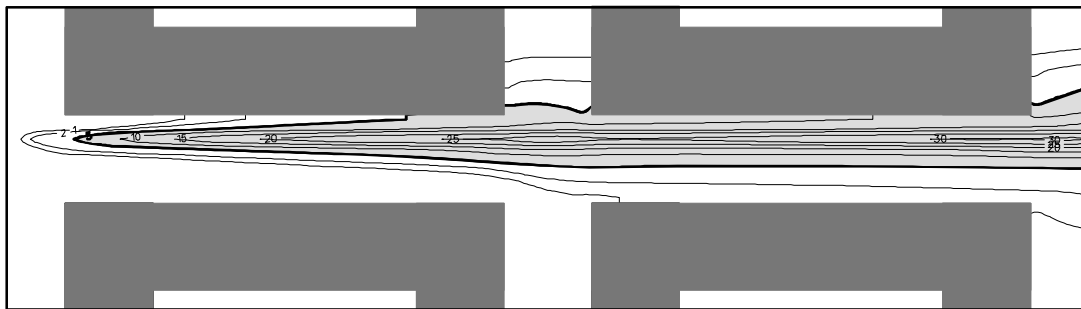


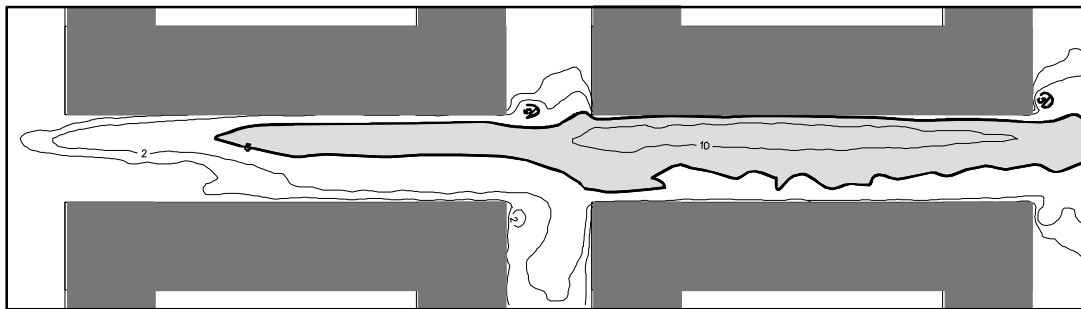
Abbildung A 16b: Scatterdiagramme mit normierten Konzentrationen [10^{-3} 1/m^2]. Vergleich zwischen Windkanal und numerischen Modellen für den Fall 0



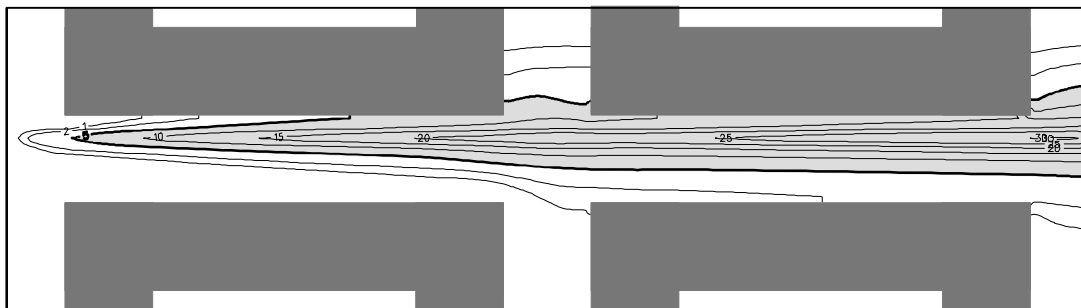
Windkanal



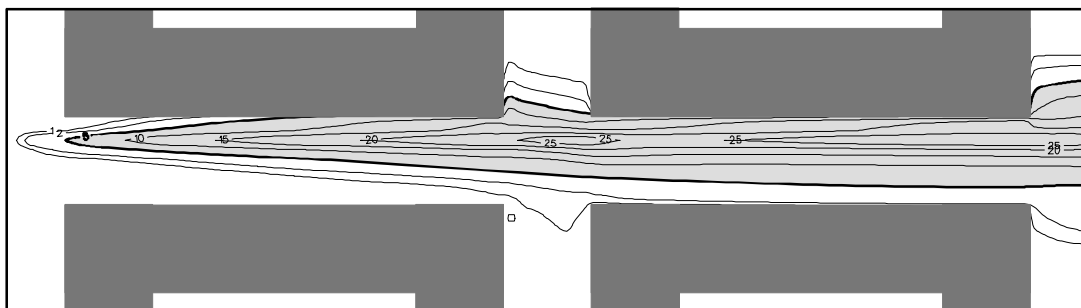
ABC



AIRPOL



ASMUS



DASIM

Abbildung A 17a: Bodennahe Konzentrationsverteilung bei Anströmung aus 270°, Fall 3. Normierte Konzentrationen [10^{-3} 1/m^2]

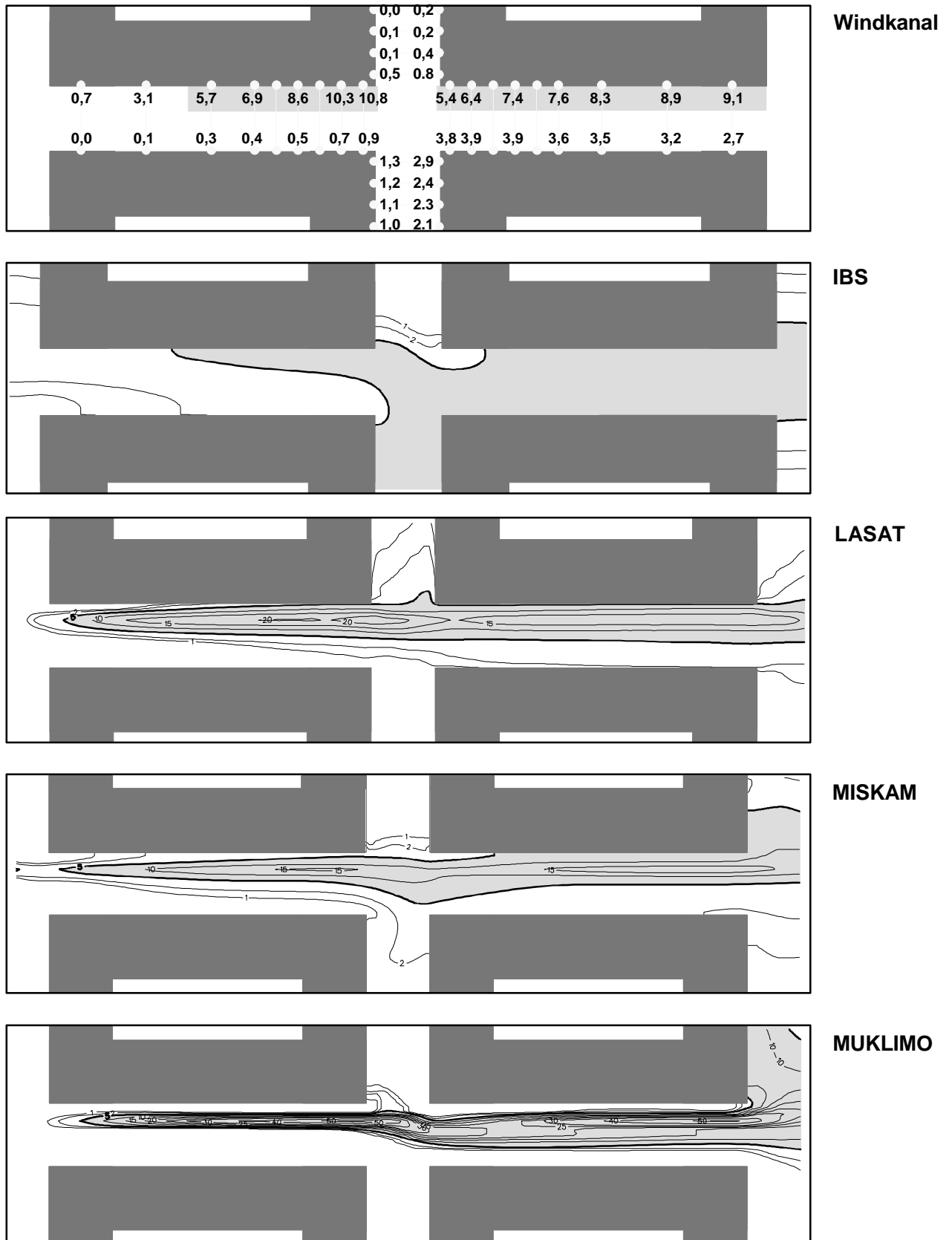


Abbildung A 17b: Bodennahe Konzentrationsverteilung bei Anströmung aus 270°, Fall 3. Normierte Konzentrationen [10^{-3} 1/m^2]

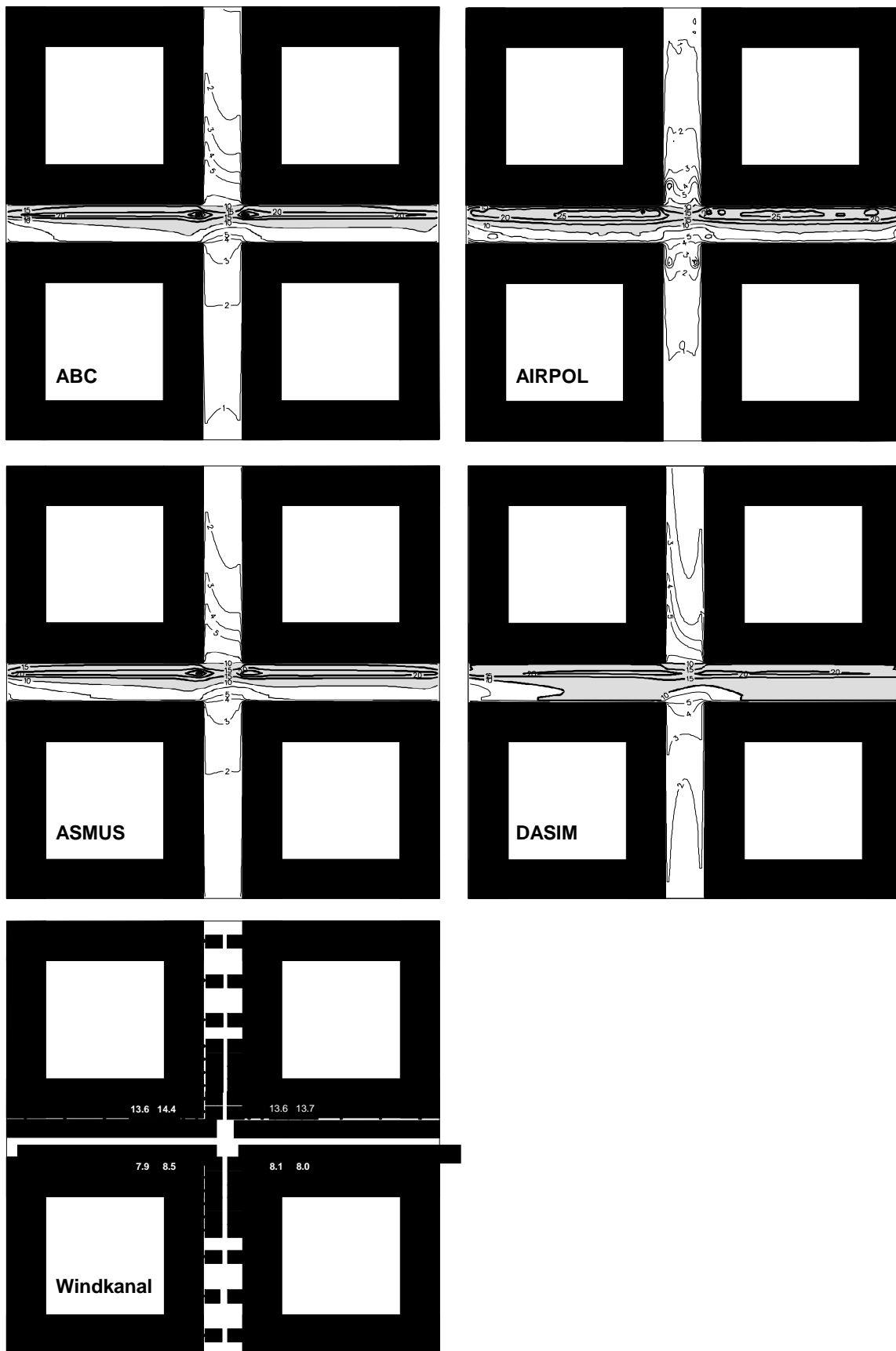


Abbildung A 18a: Bodennahe Konzentrationsverteilung der berechneten Jahresmittelwerte.
 Normierte Konzentrationen [10^{-3} 1/m^2]

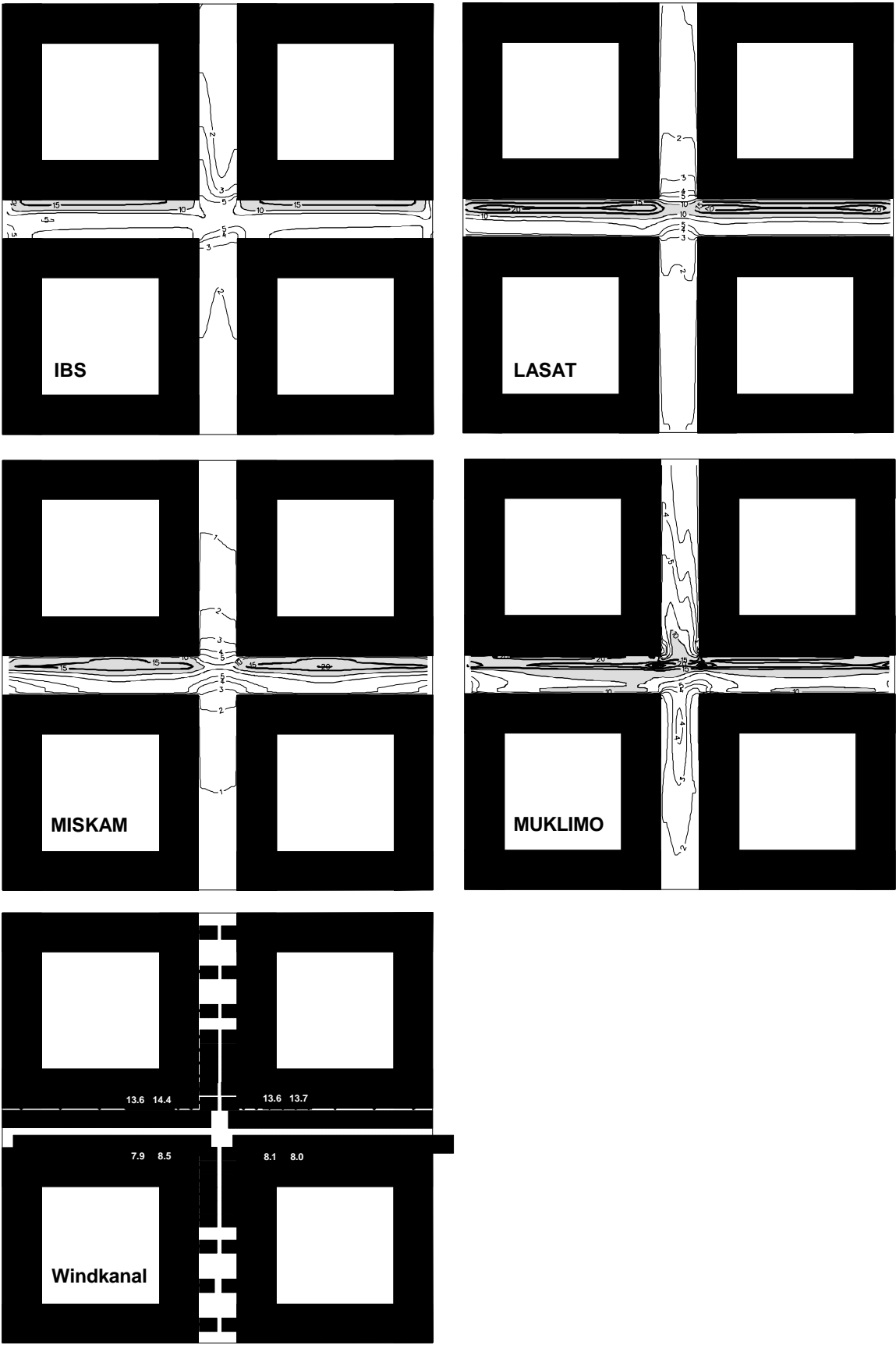


Abbildung A 18b: Bodennahe Konzentrationsverteilung der berechneten Jahresmittelwerte Normierte Konzentrationen [10^{-3} 1/m^2]