

**Umweltforschungsplan
des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit**

Anlagenbezogener Immissionsschutz

Förderkennzeichen (UFOPLAN) 203 43 256

**Weiterentwicklung eines diagnostischen
Windfeldmodells für den anlagenbezogenen
Immissionsschutz (TA Luft)**

von

Dr. Ulf Janicke

Dr. Lutz Janicke

Ingenieurbüro Janicke, Dunum

Im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin

Oktober 2004

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
2 Aufgabenstellung	6
3 Modellierung	7
3.1 Naher Nachlauf	8
3.2 Prandtl-Schicht und Frontwirbel	10
3.3 Gebäudeinduzierte Zusatzturbulenz	10
4 Verifikation und Validierung	13
4.1 Verifikationen	15
4.1.1 Aufteilung in Teilflächen	15
4.1.2 Aufrasterung eines Gebäudes mit rechteckigem Grundriß	17
4.1.3 Aufrasterung eines Turms	21
4.1.4 Drehung des Rechengitters, Einfluß auf das Windfeld	23
4.1.5 Drehung des Rechengitters, Einfluß auf die Konzentrationsverteilung	26
4.2 Validierung des Windfeldes	27
4.2.1 Datensätze des Entwurfs VDI 3783 Blatt 9	27
4.2.2 U-förmiges Gebäude	36
4.2.3 Straßenkreuzung	41
4.2.4 Bonnerstraße und Venloerstraße	45
4.3 Validierung der Geschwindigkeitsfluktuationen	47
4.3.1 CEDVAL-Datensätze A1-1, A1-4, A1-6	47
4.3.2 Kühlurm (KKW Emsland)	54
4.4 Validierung der Konzentrationsverteilungen	56
4.4.1 U-förmiges Gebäude	56
4.4.2 Kühlurm (KKW Emsland)	67
4.4.3 CEDVAL-Datensatz D1-4 (Uttenweiler)	69
4.4.4 Vergleich mit MISKAM	73
5 Übergang zu hohen Quellen	77
6 Zusammenfassung	85
7 Literaturverzeichnis	86
Anhang	88
A Mathematische Berechnung des diagnostischen Windfeldes	88
B Parametervariationen	93

Abbildungsverzeichnis

1	Bestimmung des diagnostischen Windfeldes.	11
2	Test Aufteilung in Teilflächen (horizontaler Schnitt).	15
3	Test Aufteilung in Teilflächen (vertikaler Schnitt).	16
4	Test Gebäudeaufrasterung (Anströmrichtung 225 Grad, Horizontalschnitt).	18
5	Test Gebäudeaufrasterung (Anströmrichtung 270 Grad, Horizontalschnitt).	19
6	Test Gebäudeaufrasterung (Anströmrichtung 290 Grad, Horizontalschnitt).	20
7	Test Gebäudeaufrasterung (Horizontalschnitt).	21
8	Test Gebäudeaufrasterung (Vertikalschnitt).	22
9	Test Drehung des Rechengitters. Beispiel-Windfelder für zwei Ausrichtungen.	24
10	Test Drehung des Rechengitters. Geschwindigkeitskomponente in Windrichtung im zentralen Lee des Quaders für verschiedene Abstände und Ausrichtungen des Rechengitters.	25
11	Test Drehung des Rechengitters. Über eine isotrope Windrose gemittelte bodennahe Konzentrationsverteilung für zwei Ausrichtungen von Quelle und Gebäude zum Rechengitter.	26
12	Entwurf VDI 3783 Blatt 9, Datensatz c1 (Quasi-2D-Gebäude) in senkrechter Anströmung.	31
13	Entwurf VDI 3783 Blatt 9, Datensatz c3, Würfel in senkrechter Anströmung.	32
14	Entwurf VDI 3783 Blatt 9, Datensatz c4, Würfel in diagonaler Anströmung.	33
15	Entwurf VDI 3783 Blatt 9, Datensatz c5, Quader in senkrechter Anströmung.	34
16	Entwurf VDI 3783 Blatt 9, Datensatz c6, 3 mal 7 Quader in senkrechter Anströmung.	35
17	U-förmiges Gebäude ($H = 28$ m), Horizontalschnitte.	37
18	U-förmiges Gebäude ($H = 28$ m), Vertikalschnitte.	38
19	U-förmiges Gebäude ($H = 40$ m), Horizontalschnitte.	39
20	U-förmiges Gebäude ($H = 40$ m), Vertikalschnitt.	40
21	Straßenkreuzung (Anströmrichtung $r = 270$ Grad, Horizontalschnitt bei $z = 4,5$ m, $\tau = 1$ s).	42
22	Straßenkreuzung (Anströmrichtung $r = 270$ Grad, Horizontalschnitt bei $z = 15$ m, $\tau = 1$ s).	42
23	Straßenkreuzung (Anströmrichtung $r = 225$ Grad, Horizontalschnitt bei $z = 4,5$ m, $\tau = 1$ s).	43
24	Straßenkreuzung (Anströmrichtung $r = 225$ Grad, Horizontalschnitt bei $z = 15$ m, $\tau = 1$ s).	43
25	Straßenkreuzung (Anströmrichtung $r = 240$ Grad, Horizontalschnitt bei $z = 4,5$ m, $\tau = 1$ s).	44
26	Straßenkreuzung (Anströmrichtung $r = 240$ Grad, Horizontalschnitt bei $z = 15$ m, $\tau = 1$ s).	44
27	Messungen in der Bonnerstraße und Venloerstraße.	46
28	Datensatz A1-1, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes.	48

29	Datensatz A1-1, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes. In jeder Spalte zeigen die oberen drei Teilbilder die gemessenen Werte, das unterste Teilbild das Modellergebnis.	49
30	Datensatz A1-4, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes.	50
31	Datensatz A1-4, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes.	51
32	Datensatz A1-6, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes.	52
33	Datensatz A1-6, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes.	53
34	Windkanalversuche zum KKW Emsland. Modellierte Erhöhung der Geschwindigkeitsfluktuationen.	55
35	Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen.	58
36	Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen.	59
37	Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen.	60
38	Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude (oben: $H = 16\text{ m}$, Mitte und unten: $H = 40\text{ m}$).	61
39	Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude (oben: $H = 16\text{ m}$, Mitte und unten: $H = 40\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen.	62
40	Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude (oben: $H = 16\text{ m}$, Mitte und unten: $H = 40\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen.	63
41	Testrechnung ohne Zusatzturbulenz: Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen.	64
42	Testrechnung ohne Zusatzturbulenz: Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen.	65
43	Testrechnung ohne Zusatzturbulenz: Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen.	66
44	KKW Emsland, Konzentrationsverteilung für eine Anströmrichtung von 120 Grad.	68
45	KKW Emsland, Konzentrationsverteilung für eine Anströmrichtung von 295 Grad.	68
46	Lage der Gebäude und Quellen für die Ausbreitungsrechnung zum Datensatz D1-4 (Uttenweiler).	69
47	Konzentrationsvergleich von Windkanalmessung (Rauten) und Ausbreitungsrechnung (Balken) für drei Entfernung von der Quelle SII.	71
48	Wie Bild 47, aber mit den Standard-Grenzschichtprofilen von LASAT anstelle der Profile aus VDI 3783 Blatt 8.	72
49	Bodennahe Konzentrationsverteilung für den Nullfall ohne Gebäude und konstante Windrichtung bei Verwendung der Profile nach VDI 3783 Blatt 8 (links) und bei Verwendung der MISKAM-Profile (rechts).	74

50	Aufgerasterte Gebäudeumrisse für den Vergleich mit MISKAM.	74
51	Bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose, Quelle im Mittelpunkt des Rechengebietes. Links: Verwendung der Felder des vorliegenden Modellansatzes. Rechts: Verwendung der Felder von MISKAM.	75
52	Bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose, Quelle im Bereich der südwestlichen Straßenschlucht. Links: Verwendung der Felder des vorliegenden Modellansatzes. Rechts: Verwendung der Felder von MISKAM.	76
53	Übergang zu hohen Quellen. Isotrope Windrose, dicht bebautes Gebiet, Quellhöhe 35 m (1,7-fache der Gebäudehöhen).	80
54	Übergang zu hohen Quellen. Isotrope Windrose, Quellhöhe 34 m (1,7-fache der Gebäudehöhe).	81
55	Übergang zu hohen Quellen. Isotrope Windrose, Quellhöhe 40 m (2-fache der Gebäudehöhe).	82
56	Übergang zu hohen Quellen. Isotrope Windrose, Quellhöhe 50 m (2,5-fache der Gebäudehöhe).	83
57	Übergang zu hohen Quellen. AKS anonym.aks, Quellhöhe 34 m (1,7-fache der Gebäudehöhe).	84
58	Parametervariationen, Parameter a_1 und a_3	95
59	Parametervariationen, Parameter a_2	96
60	Parametervariationen, Parameter a_5	97
61	Parametervariationen, Parameter h_s	98
62	Parametervariationen, Parameter f_s	99
63	Parametervariationen, Parameter f_k	100

1 Einleitung

Das Programmsystem AUSTAL2000¹ beinhaltet ein diagnostisches Windfeldmodell (*TALdiames*), das für den Einsatz in orographisch gegliedertem Gelände ohne Gebäude konzipiert ist. Die Anforderungen der Praxis machen eine Erweiterung auf Bebauungsstrukturen notwendig. Für ein solches Windfeldmodell, das den Arbeitstitel DMK (Diagnostisches Mikroskaliges Windfeldmodell) erhält, gelten eine Reihe von Randbedingungen:

- Es muß im Rahmen von AUSTAL2000 und damit als Standardwerkzeug einsetzbar sein. Das bedeutet zum Beispiel, daß sich Windfeldbibliotheken mit vertretbarem Zeitaufwand berechnen lassen müssen.
- Es muß sich in die TA Luft und das Modellkonzept von AUSTAL2000 einfügen. So muß das Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit im ungestörten Fall konform mit VDI 3783 Blatt 8 sein, und für Quellhöhen oberhalb des 1,7-fachen der Gebäudehöhen sollte sich ein möglichst geringer Unterschied in der berechneten Konzentrationsverteilung ergeben, wenn man statt des Windfeldmodells eine erhöhte Bodenrauhigkeit verwendet, wie es in der TA Luft vorgesehen ist.
- Das erzeugte Windfeld sollte weitgehend unabhängig von der Art der Gebäudevorgabe sein (beispielsweise exakte Umrisse oder Aufrasterung auf einem Gitter) und es sollte möglichst unabhängig von der Wahl der Orientierung des Rechengitters bezüglich der Gebäude sein.
- Die mit dem Modell berechneten Wind- und Turbulenzfelder und die in Kombination mit AUSTAL2000 berechneten Konzentrationsfelder sollten eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit experimentellen Vergleichsdaten zeigen.

Bislang wurden in der Praxis vor allem aufgrund der erstgenannten Randbedingung bevorzugt diagnostische Windfeldmodelle eingesetzt. Im Vorfeld der Erstellung von AUSTAL2000 war der Einsatz des diagnostischen Windfeldmodells DMW nach VDI 3783 Blatt 10 diskutiert worden, er wurde jedoch aufgrund von Problemen bezüglich der drittgenannten Randbedingung zurückgestellt.

In diesem Projekt wurde das in AUSTAL2000 eingesetzte Modell *TALdiames* auf die Berücksichtigung von Bebauungsstrukturen erweitert. Hierbei wurde neben den geänderten Randbedingungen auch der nahe Gebäudenachlauf und die Änderungen der Turbulenzeigenschaften der Strömung berücksichtigt.

Dabei war im Auge zu behalten, daß nach TA Luft, Anhang 3, Absatz 10 eine Behandlung über ein diagnostisches Windfeldmodell nur für Situationen in Betracht kommt, in denen die Bauhöhe der Emissionsquellen mindestens das 1,2-fache der Höhe der umliegenden Gebäude ist. Das Nachlaufgebiet der Gebäude ist für die Ausbreitungsrechnung also erst im

¹Beispielhafte Umsetzung der Rechenvorschriften des Anhang 3 der TA Luft, siehe Internet-Seite www.austal2000.de.

Verlauf der Fahnenaufweitung wirksam und ist damit nicht so entscheidend für die Berechnung der Konzentrationswerte wie bei niedrigeren Quellen. Für diese Situationen lagen jedoch praktisch keine experimentellen Datensätze für eine Validierung vor, so daß entweder auf Datensätze für niedrigere Quellhöhen oder auf Ergebnisse anderer Modellrechnungen zurückgegriffen werden mußte.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde das Nachlaufgebiet daher sehr sorgfältig diskutiert und auch für niedrige Quellen getestet. Dies ist auch vor dem Hintergrund sinnvoll, daß im Anwendungsbereich der TA Luft diffuse Emissionen vorkommen können, welche die vorgeschriebene Emissionshöhe nicht einhalten. Im übrigen festigt eine akzeptable Modellierung bei niedrigen Quellen auch das Vertrauen in eine brauchbare Behandlung erhöhter Quellen.

Die Erweiterung von *TALdiames* erfolgte in folgenden Schritten:

1. Entwicklung eines Modellansatzes, mit dem die Gebäudeeinflüsse in ebenem Gelände berücksichtigt werden. Er wurde auf Grundlage des diagnostischen Windfeldmodells erstellt, das im Ausbreitungssystem LASAT eingesetzt wird. Zur besseren Übersicht wurde das Windfeldmodell zuerst in der Programmiersprache JAVA implementiert.
2. Kalibrierung und Vergleichsrechnungen.
3. Verwendung der Modelfelder in Ausbreitungsrechnungen mit AUSTAL2000 (bzw. LASAT im AUSTAL2000-Modus) und Vergleich mit gemessenen Konzentrationswerten.
4. Umsetzung in die Programmiersprache C und Einbindung in *TALdiames*.

In diesem Bericht sind die ersten drei Schritte erläutert und dokumentiert.

2 Aufgabenstellung

In einem diagnostischen Windfeldmodell werden Teilinformationen über das Windfeld benutzt, um mit empirischen Relationen unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen das gesamte Feld zu konstruieren. Im vorliegenden Fall besteht die Teilinformation aus den Charakteristika des anströmenden Windes, wie sie von einem ebenen Grenzschichtmodell oder, in gegliedertem Gelände, von einem (diagnostischen) mesoskaligen Modell zur Verfügung gestellt werden.

Empirische Relationen werden über die Form des Windfeldes im nahen Nachlaufgebiet eines Hindernisses verwendet. Die Randbedingungen sind, daß die Strömung parallel zu den Randflächen und divergenzfrei erfolgt. Damit ergibt sich folgende Aufgabenstellung:

1. Nehme ein Windfeld, das die Strömung ohne Gebäudeeinfluß beschreibt (Nullfeld \mathbf{u}_0).

2. Addiere ein Rezirkulationsfeld \mathbf{R} hinzu, das die in Windkanalexperimenten beobachteten Rezirkulationszonen vereinfacht darstellt (empirisches Windfeld $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \mathbf{R}$).
3. Suche das Windfeld, das vom empirischen Windfeld \mathbf{u} möglichst wenig abweicht, aber die vorgeschriebenen Rand- und Nebenbedingungen erfüllt (diagnostisches Windfeld \mathbf{v}).
4. Bestimme Zusatzfelder, die es erlauben, die gebäudeinduzierte Zusatzturbulenz in der Ausbreitungsrechnung zu berücksichtigen.

Der dritte Schritt lässt sich mathematisch als Variationsproblem formulieren, dessen Lösung in Anhang A beschrieben ist.

3 Modellierung

Die im nahen Nachlauf der Gebäude beobachteten Rezirkulationszonen stellen im mathematischen Sinne eine Rotation des Windfeldes dar. Da bei der Bildung des diagnostischen Windfeldes \mathbf{v} aus dem empirischen Windfeld \mathbf{u} die Rotation nicht verändert wird, sie aber auch nicht im Nullfeld \mathbf{u}_0 vorhanden ist,² muß sie vom Rezirkulationsfeld \mathbf{R} beigesteuert werden. Zusätzlich werden an das Rezirkulationsfeld folgende Bedingungen gestellt:

- Das Rezirkulationsfeld (und das diagnostische Windfeld) sollte unabhängig von der Orientierung des Koordinatensystems sein, da man im allgemeinen nicht die Freiheit hat, die Koordinatenachsen entlang der Gebäudeachsen auszurichten.
- Das Rezirkulationsfeld sollte unabhängig davon sein, ob und in welcher Weise eine komplexe Gebäudestruktur durch einfache Teilelemente dargestellt wird. Daher darf die Bestimmung des Nachlaufes nicht auf Basis charakteristischer Gebäudeformen oder Gebäudeausdehnungen erfolgen,³ zumal in komplexen Situation eine eindeutige Zuordnung nicht immer möglich ist.
- Damit Gebäude auch in aufgerasterter Form vorgegeben werden können, sollte das Rezirkulationsfeld in größerer Entfernung unabhängig davon sein, ob eine Gebäudewand als glatte Fläche oder in Form gewinkelter Teilflächen festgelegt wird.
- Das diagnostische Windfeld sollte eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit im Windkanal vermessenen Standardsituationen liefern. Das gleiche gilt für die mit dem Windfeld und Zusatz-Turbulenzfeld in Kombination mit einem Ausbreitungsmodell bestimmten Konzentrationsverteilungen.
- In komplexen Situationen (z.B. bei dichter Bebauung) sollte im Zweifel eher ohne Rezirkulation gerechnet werden als mit einer, die mit großer Wahrscheinlichkeit nicht den realen Verhältnissen entspricht.

²Abgesehen von der Rotation, die durch das Vertikalprofil der Prandtl-Schicht erzeugt wird.

³Dieser Ansatz wird im Modell DMW (VDI 3783 Blatt 10) gewählt.

Die ersten drei Forderungen sind für die Integration in ein standardisiertes Ausbreitungsmo dell wie AUSTAL2000 wichtig, da so das Ergebnis weitgehend unabhängig von der Darstellungsart der Gebäude ist. Zum anderen ermöglichen sie eine programminterne Aufrasterung der Gebäude mit dem Vorteil, daß Ungenauigkeiten in der Gebäudefestlegung (z.B. Überlappungen oder kleine Lücken) automatisch behoben werden und nicht mit Hilfe komplexer Algorithmen korrigiert werden müssen.

3.1 Naher Nachlauf

In Anlehnung an die Vorgehensweise in LASAT wird das Rezirkulationsfeld mit Hilfe eines Feldes erzeugt, das dem elektrischen Feld einer auf der leeseitigen Gebäudewand angebrachten homogenen Flächenladung entspricht. Die Verwendung eines elektrischen Feldes als Hilfsmittel hat den Vorteil, daß so eine Reihe der genannten Randbedingungen ganz automatisch erfüllt werden.

Es werden nur Wandflächen betrachtet, die im Lee eines Gebäudes liegen, für die also $\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{u}_0 > 0$ ist, wobei \mathbf{u}_0 das vorgegebene Nullfeld (z.B. ein homogenes Feld) und \mathbf{n}_i die aus dem Gebäude heraus gerichtete Normale der Teilfläche mit Index i ist. Die Teilfläche erhält eine homogene Ladungsdichte vom Wert $\rho_i = 2(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{u}_0)/|\mathbf{u}_0|$. Das von der Flächenladung erzeugte Feld wird mit \mathbf{g}_i bezeichnet. Das Gesamtfeld \mathbf{E} ergibt sich aus der Überlagerung der Teilfelder \mathbf{g}_i ,

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_i \mathbf{g}_i(\mathbf{r}) \quad \text{mit} \quad \mathbf{g}_i(\mathbf{r}) = \frac{\rho_i}{4\pi} \int_{\mathcal{A}_i} \frac{\mathbf{r} - \mathbf{a}}{|\mathbf{r} - \mathbf{a}|^3} d^2a. \quad (1)$$

Das Integral läuft über alle Punkte \mathbf{a} auf der Teilfläche \mathcal{A}_i . Um zu gewährleisten, daß die Normalkomponente von \mathbf{E} am Erdboden verschwindet, umfaßt die Summe auch die Felder der am Erdboden gespiegelten Teilflächen \mathcal{A}'_i .

Das Feld \mathbf{E} hat folgende Eigenschaften:

- Es ist rotationsfrei.
- Im Zentrum vor einer (isolierten) Wand steht es senkrecht auf der Wandfläche und sein Betrag nähert sich zur Wand hin dem Wert 1 an.
- Seine Ausdehnung skaliert mit der Gesamtgröße der Wandfläche.
- Es ist unabhängig davon, ob und auf welche Art die Wandfläche in mehrere Teilflächen unterteilt wird (Superpositionsprinzip).
- In einiger Entfernung von der Wand ist seine Form unabhängig davon, ob die Wandfläche exakt oder in aufgerasterter Form vorgegeben wird.

Zur Festlegung des Rezirkulationsfeldes \mathbf{R} wird \mathbf{E} zurechtgeschnitten:

Schritt 1: Herabsetzung der z -Komponente,⁴

$$\mathbf{E}_1 = (\mathbf{I} - a_5 z \mathbf{z}) \cdot \mathbf{E} . \quad (2)$$

Schritt 2: Verstärkung der Komponente in Richtung des ungestörten Windes,

$$\mathbf{E}_2 = \left(\frac{\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{u}_0}{|\mathbf{E}_1| |\mathbf{u}_0|} \right)^{\frac{a_2}{|\mathbf{E}_1|}} \mathbf{E}_1 . \quad (3)$$

Schritt 3: Beschränkung des Betrages,

$$\mathbf{E}_3 = \min(a_3, |\mathbf{E}_2|) \frac{\mathbf{E}_2}{|\mathbf{E}_2|} \quad \text{und} \quad \mathbf{E}_3 = 0 \quad \text{für} \quad \mathbf{E}_2 < a_4 . \quad (4)$$

Schritt 4: Skalierung mit der mittleren Anströmgeschwindigkeit,

$$\mathbf{R} = -a_1 \bar{u}_0 \mathbf{E}_3 . \quad (5)$$

Der Betrag der mittleren Anströmgeschwindigkeit, \bar{u}_0 , im letzten Schritt ergibt sich aus dem lokalen, vertikal über $|\mathbf{E}_3|$ gemittelten Nullfeld.

Mit den ersten beiden Schritten wird eine Rotation in das Feld eingeführt, so daß sich im diagnostischen Feld ein Leewirbel ausbilden kann. Durch die Wichtung wird das Feld entlang der Anströmrichtung gestreckt. Die Herabsetzung der z -Komponente verhindert hierbei eine zu starke Unterdrückung des Feldes im Bereich der Gebäudeoberkante. Die Faktoren a_1 und a_3 in den letzten beiden Schritten bestimmen die Ausdehnung und Stärke der Rezirkulation.⁵ Die Faktoren (im wesentlichen das Produkt $a_1 a_3$ sowie a_2 und a_5) wurden anhand von Vergleichsdatensätzen festgelegt.

Um die Robustheit des Modellansatzes in der Praxis zu erhöhen und um zu verhindern, daß in komplexen Bebauungssituationen Artefakte auftreten, wurden folgende zusätzliche Sicherungen eingeführt:

1. Für eine zuverlässige Korrektur ungenauer Gebäudevorgaben (z.B. Überlappungen oder kleine Lücken) werden die Gebäude intern auf dem Rechengitter aufgerastert, die einzelnen Teilflächen \mathcal{A}_i haben also immer die Ausdehnung und Orientierung der Gittermaschenwände.⁶ Dieser Schritt ist möglich, da in der Verifikation gezeigt wird, daß

⁴Vektoren, die ohne Operatorsymbol nebeneinander stehen, bilden einen Tensor. Die Komponenten von \mathbf{ab} sind $[\mathbf{ab}]_{ij} = a_i b_j$, das Skalarprodukt ist $[\mathbf{ab} \cdot \mathbf{cd}]_{ij} = \sum_k a_i b_k c_k d_j$ und das doppelte Skalarprodukt $\mathbf{ab} \cdot \cdot \mathbf{cd} = \sum_{i,j} a_i b_j c_i d_j$. \mathbf{I} ist der Einheitstensor, also $\mathbf{I}_{ij} = \delta_{ij}$.

⁵Der Abschneideparameter a_4 hat keinen entscheidenden Einfluß auf das Ergebnis, solange er klein genug ist.

⁶Aus Konsistenzgründen wird auch bei der Berücksichtigung der exakten Gebäudeumrisse in einigen Verifikationstests eine Unterteilung in Teilflächen von der Ausdehnung einer Gittermasche vorgenommen.

sich mit exakten und aufgerasterten Gebäudeumrissen praktisch die gleichen Windfelder ergeben.

2. Zur Berücksichtigung der Gebäudeabschattung wirkt das Feld einer Teilfläche \mathcal{A}_i nur auf die Gitterzellen, die von der Teilfläche aus sichtbar sind.⁷
3. Das Gesamtfeld \mathbf{R} wird auf die Raumbereiche beschränkt, die in dem durch das Nullfeld gebildeten (geometrischen) Windschatten liegen.

Die einzelnen Schritte der Bestimmung des diagnostischen Windfeldes \mathbf{v} sind noch einmal schematisch in Bild 1 dargestellt.

3.2 Prandtl-Schicht und Frontwirbel

Das vorgegebene Nullfeld enthält in der Regel bereits die Prandtl-Schicht. Strömt ein solches Windfeld eine Gebäudewand an, bildet sich im Luv der Wand ein Frontwirbel aus. Ursache des Wirbels ist der vertikale Druckgradient, der von der vertikal inhomogenen Anströmung aufgebaut wird; eine homogene Anströmung erzeugt keinen Frontwirbel (siehe HOSKER, 1984). Unmittelbar an der Wand reicht der Frontwirbel bis zu einer Höhe von etwa 50% bis 60% der Wandhöhe, weiter davor hängt seine vertikale Ausdehung von dem Vertikalprofil der Anströmung ab. Die horizontale Ausdehnung des Frontwirbels wird von der Höhe der Wand und ihrer Ausdehung quer zur Windrichtung bestimmt.

Ein vertikal inhomogenes Nullfeld ist nicht rotationsfrei, seine Rotation bleibt bei der Erzeugung des diagnostischen Windfeldes erhalten. Im nahen Nachlauf muß diese Anfangsrotation kompensiert werden, da sich sonst unmittelbar oberhalb der Erdoberfläche ein künstlicher Fluß in Anströmrichtung ausbildet. Im Luv der Gebäudewand erzeugt diese Anfangsrotation dagegen im diagnostischen Windfeld – ähnlich zur Natur – einen Frontwirbel, dessen Ausdehung und Stärke näherungsweise mit den Beobachtungen übereinstimmt.

Daher wird bei der Addition des Rezirkulationsfeldes überall dort, wo das Rezirkulationsfeld einen Wert ungleich null hat (also im wesentlichen im Lee der Gebäude), das Nullfeld durch das vertikal über das Rezirkulationsfeld gemittelte Nullfeld $\bar{\mathbf{u}}_0$ ersetzt.

3.3 Gebäudeinduzierte Zusatzturbulenz

Die Überströmung eines Gebäudes führt zu einer erhöhten Turbulenz und Diffusion im Lee, die in der Ausbreitungsrechnung mit AUSTAL2000 durch Zusatzfelder für Windfluktuationen und Diffusionskoeffizienten berücksichtigt werden können. In Anlehnung an das Vorgehen

⁷Hierzu wird für jede Gitterzelle geprüft, ob die Verbindungsgeraden zwischen ihrem Mittelpunkt und dem Aufpunkt vor der Teilfläche irgendwo eine Gitterzelle schneidet, die einem Gebäude zugeordnet ist. Als Aufpunkt wird der um eine halbe Maschenweite in Windrichtung verschobene Mittelpunkt der Teilfläche gewählt.

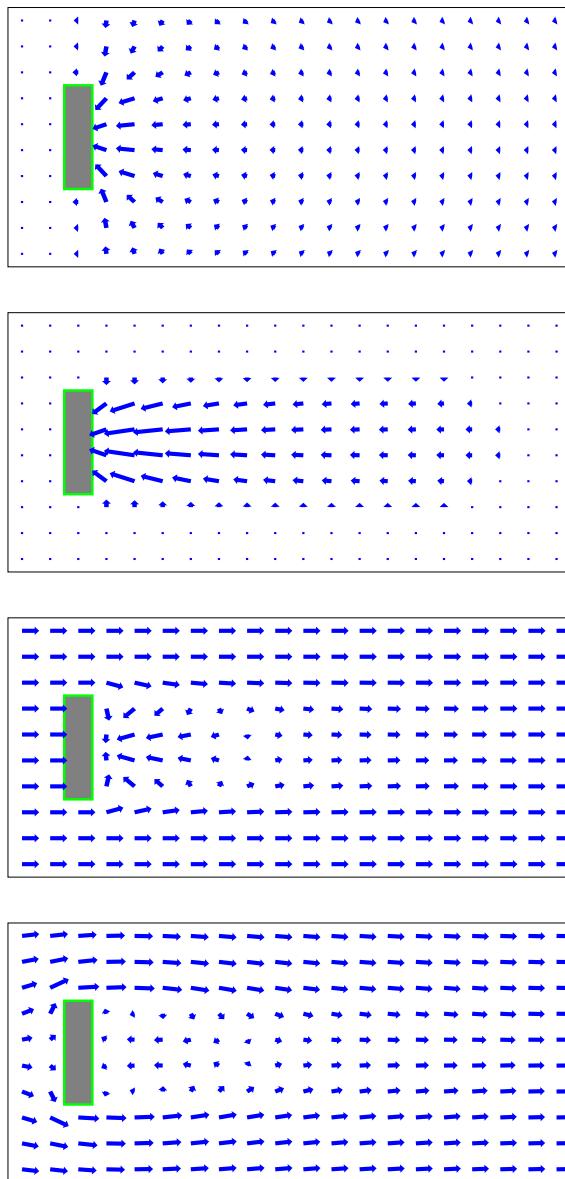


ABBILDUNG 1: Bestimmung des diagnostischen Windfeldes für ein von der linken Seite senkrecht angeströmtes Hindernis (Horizontalschnitte).

in LASAT werden die Zusatzfelder anhand des Rezirkulationsfeldes parametrisiert. Für die Windfluktuationen wird der Ansatz

$$\hat{\sigma}_{u,v,w}(\mathbf{r}) = \sqrt{|E_2(\mathbf{r})|} f_s \bar{u}_0(\mathbf{r}), \quad (6)$$

für die Diffusionskoeffizienten der Ansatz

$$\hat{K}_{h,v}(\mathbf{r}) = f_k \bar{h} \hat{\sigma}_u(\mathbf{r}) \quad (7)$$

gemacht; hierbei ist \bar{u}_0 wieder das vertikal gemittelte Nullfeld, f_s und f_k sind Koeffizienten von der Größenordnung 1 und \bar{h} ist die mittlere Höhe der Gebäude.

Analog zur Bestimmung des Rezirkulationsfeldes wird die Wurzel aus $|E_2|$ auf Werte kleiner a_3 beschränkt und für Werte kleiner a_4 auf null gesetzt. Der Maximalwert von $\hat{\sigma}_{u,v,w}$ ist damit $a_3 f_s \bar{u}_0$, der von $\hat{K}_{h,v}$ ist $a_3 f_s f_k \bar{h} \bar{u}_0$.

Ebenso wie die Rezirkulationsfelder werden auch die Zusatzfelder auf den Windschatten im Nullfeld beschränkt. Für eine bessere Übereinstimmung mit Messungen werden sie jedoch ab der Gebäudeoberkante⁸ linear bis zum Wert null in der h_s -fachen Gebäudehöhe fortgesetzt und seitwärts wird der gültige Raumbereich auf einen Öffnungswinkel von a_s Grad erweitert.

⁸Genauer: Lokal ab der Oberkante des aus der Summe aller Gebäude gebildeten (geometrischen) Windschattens.

4 Verifikation und Validierung

In der Verifikation wird geprüft, ob das Modell die Eigenschaften erfüllt, die bei seiner Konstruktion vorgesehen waren. Im vorliegenden Fall gehört hierzu vor allem die Unabhängigkeit der Modellergebnisse von der Art der Gebäudefestlegung (Unterteilung in Flächenelemente, Aufrasterung) und ihre Invarianz bezüglich der Orientierung des Rechennetzes.

In der Validierung wird die Übereinstimmung der Modellrechnungen mit Messungen aufgezeigt. Hierbei wurden sowohl die Windfelder als auch die mit Hilfe der Wind- und Turbulenzfelder und dem Ausbreitungsmodell bestimmten Konzentrationsverteilungen betrachtet. Da für den geplanten Anwendungsbereich (Quellhöhen zwischen dem 1,2-fachen und 1,7-fachen der Gebäudehöhen) keine experimentellen Vergleichsdatensätze vorlagen, wurde für diesen Bereich ersatzweise ein Vergleich mit Ergebnissen des prognostischen Windfeldmodells MISKAM vorgenommen.

Alle im folgenden aufgeführten Rechnungen wurden mit folgendem Wertesatz durchgeführt, der im Vorfeld durch Testrechnungen bestimmt worden war:

a_1	6
a_2	1
a_3	0,3
a_4	0,05
a_5	0,7
f_s	0,5
f_k	0,3
h_s	1,2
a_s	15

Im Anhang B wird gezeigt, daß die bodennahen Konzentrationsverteilungen, die sich mit den Modelfeldern und AUSTAL2000 ergeben, nicht sehr sensibel von dem genauen Zahlenwert eines Parameters abhängen.

Für die Beschreibung der Testrechnungen werden folgende Bezeichnungen verwendet:

h_A	Anemometerhöhe (m)
H	Gebäudehöhe (m)
H_Q	Quellhöhe (m)
r	Windrichtung der Anströmung (Grad)
u_A	Windgeschwindigkeit des Initialfeldes in der Höhe h_A (m/s)
u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit (m/s)
Δx	Horizontale Maschenweite (m)
Δz	Vertikale Maschenweite im bodennahen Bereich (m)
z_0	Rauhigkeitslänge (m)
d_0	Verdrängungshöhe (m)

Außer in den ersten Verifikationstests wurden die Gebäude immer auf dem Rechengitter

aufgelöst. In den Testrechnungen in Abschnitt 4.1.2 und Abschnitt 4.1.3 wird demonstriert, daß sich bei nicht zu groben Maschenweiten hiermit praktisch die gleichen Windfelder wie bei Berücksichtigung der exakten Gebäudeumrisse ergeben.

Die Initialfelder wurden entsprechend TA Luft, Anhang 3, Abschnitt 8.1 nach VDI 3783 Blatt 8 bestimmt. Für die Vergleiche mit Windkanalmessungen wurde mit indifferenter Schichtung (Klug/Manier-Klasse III/1) und ohne Drehung der Windrichtung mit der Höhe gerechnet.

In den grafischen Darstellungen der Windfelder spiegeln blaue Pfeile das berechnete diagnostische Windfeld und rote Pfeile die Meßergebnisse wider. Gitterzellen, die einem Gebäude zugerechnet werden, sind grau, die exakten Gebäudeumrisse grün dargestellt. Die Bilder zeigen meist nur einen Ausschnitt des Rechengebietes, bei symmetrischen Konfigurationen ist zur besseren Darstellung nur ein Halbraum vollständig eingezeichnet. In einigen Bildunterschriften ist der Zeitschritt τ angegeben, aus dem die Länge des Windpfeils bestimmt wurde (τv , wobei v die horizontale bzw. vertikale Projektion des Windvektors darstellt).

Für die Ausbreitungsrechnungen wurden, wenn nicht explizit anders angegeben, passive Quellen angenommen, Quellhöhe und Bauhöhe sind in diesem Fall identisch.⁹

⁹In der Natur besitzt die von einer gefaßten Quelle freigesetzte Abluftfahne meist eine mechanische oder thermische Überhöhung, so daß die effektive Quellhöhe hier in der Regel größer als die Bauhöhe ist.

4.1 Verifikationen

4.1.1 Aufteilung in Teilflächen

Es wird geprüft, ob das diagnostische Windfeld unabhängig von der Aufteilung eines Gebäudekomplexes in einfache Teilelemente ist.

Hierzu werden zwei aneinanderstoßende Gebäude einmal in der Form von 2 Quadern und einmal als Ensemble von 8 neben- und übereinanderliegenden Quader definiert, das Rezirkulationfeld wird jeweils anhand der exakten Gebäudeumrisse bestimmt. Wie in den Bildern 2 und 3 zu erkennen ist, stimmen die beiden diagnostischen Windfelder exakt überein.

($H = 25$ m, $\Delta z = 2$ m, $\Delta x = 5$ m, $u_A = 5$ m/s, $r = 250$ Grad, vertikal homogene Anströmung)

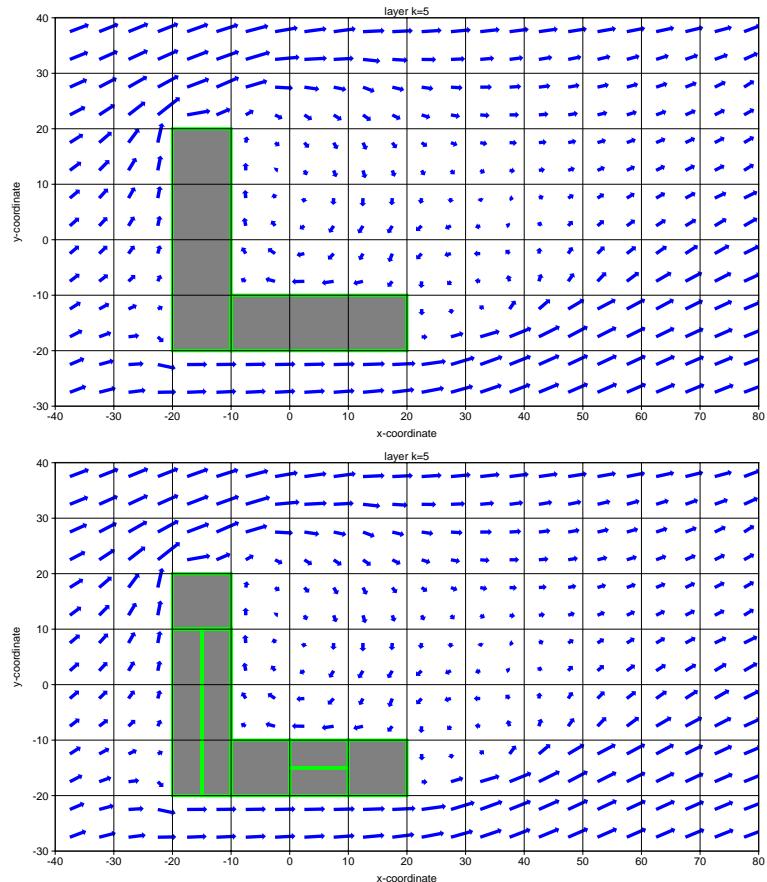


ABBILDUNG 2: Test Aufteilung in Teilflächen (horizontaler Schnitt bei $z = 9$ m). Oben: Aufteilung in 2 Quadern. Unten: Aufteilung in 8 Quadern (in dieser Schnittebene sind nur 7 Quadern sichtbar).

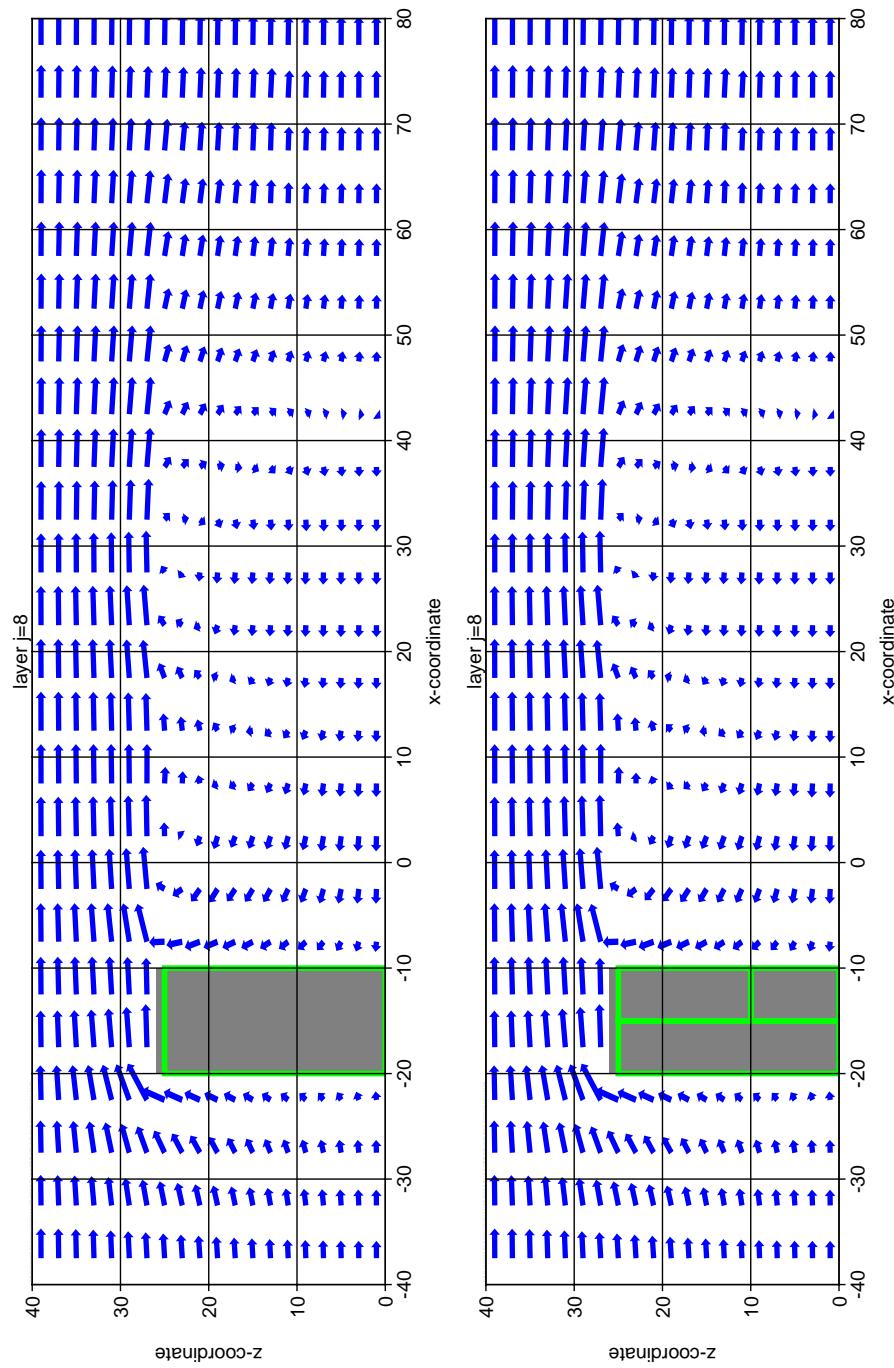


ABBILDUNG 3: Test Aufteilung in Teilflächen (vertikaler Schnitt bei $y = 7.5$ m). Links: Aufteilung in 2 Quader. Rechts: Aufteilung in 8 Quader (in dieser Schnittebene sind nur 3 Quader sichtbar).

4.1.2 Aufrasterung eines Gebäudes mit rechteckigem Grundriß

Es wird geprüft, ob das diagnostische Windfeld weitgehend unabhängig davon ist, ob ein quaderförmiges Gebäude in seinen exakten Umrissen oder in aufgerasterter Form berücksichtigt wird.

Eine schräg zum Koordinatensystem verlaufende Gebäuderieihe wird für die Berechnung des Rezirkulationsfeldes einmal in seinen exakten Ausmaßen und einmal in aufgerasterter Form berücksichtigt. Um die Grenzen der Aufrasterung zu testen, wurde die Maschenweite so groß gewählt, daß die Breite der Gebäuderieihe nur noch durch eine Masche repräsentiert wird. Es werden eine senkrechte Anströmung (225 Grad) und zwei schräge Anströmungen (270 Grad und 290 Grad) betrachtet.

Die Rücklaufgebiete, Bild 4 bis 6, stimmen bis auf den Bereich unmittelbar an der Lee-seitigen Gebäudewand gut überein. Nur für die sehr schräge Anströmung 290 Grad zeigen sich größere Unterschiede, die aber aufgrund der deutlich zu grob gewählten Maschenweite nicht praxisrelevant sind.

($H = 25$ m, $\Delta z = 2$ m, $\Delta x = 5$ m, $u_A = 5$ m/s, homogene Anströmung)

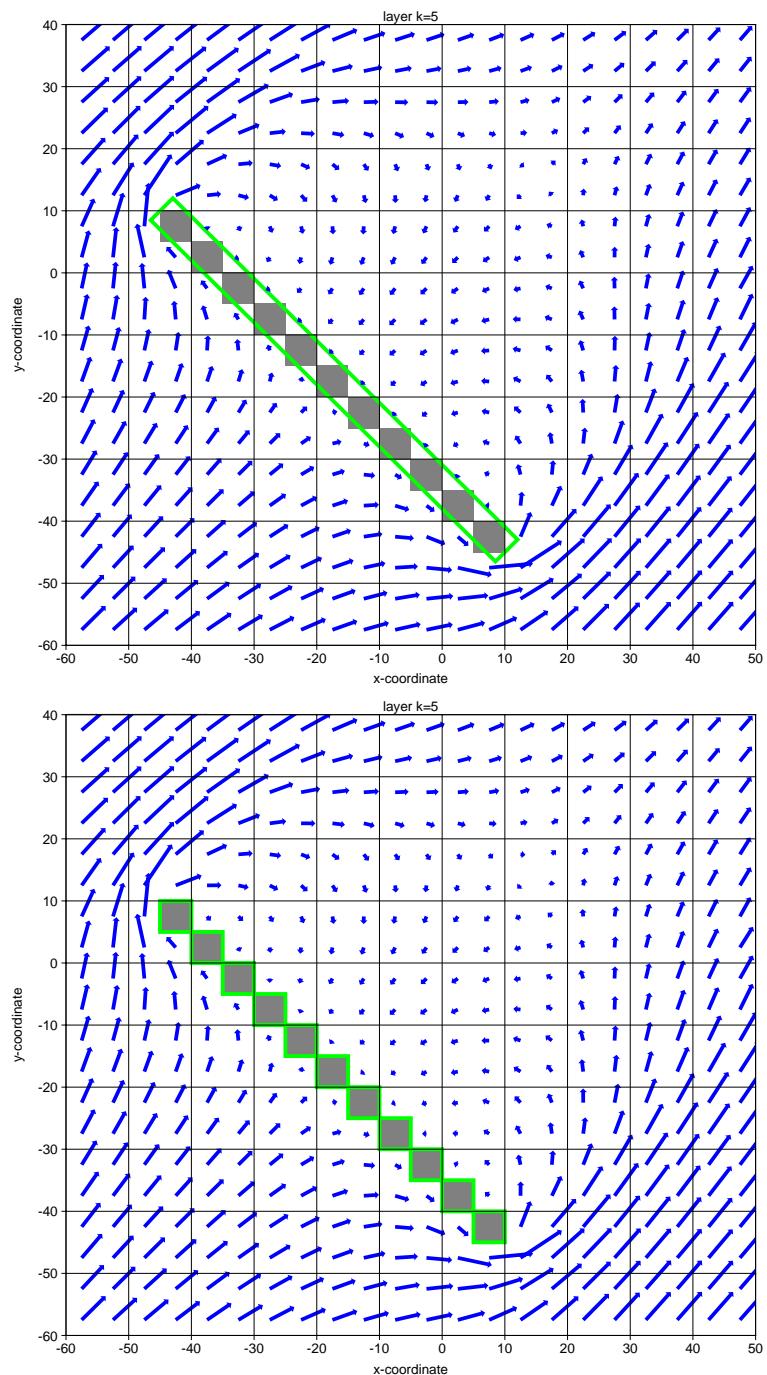


ABBILDUNG 4: Test Gebäudeaufrasterung (Anströmrichtung 225 Grad, Horizontalschnitt bei $z = 9$ m). Oben: Windfeld für die exakte Grundfläche. Unten: Windfeld für die aufgerasterzte Grundfläche.

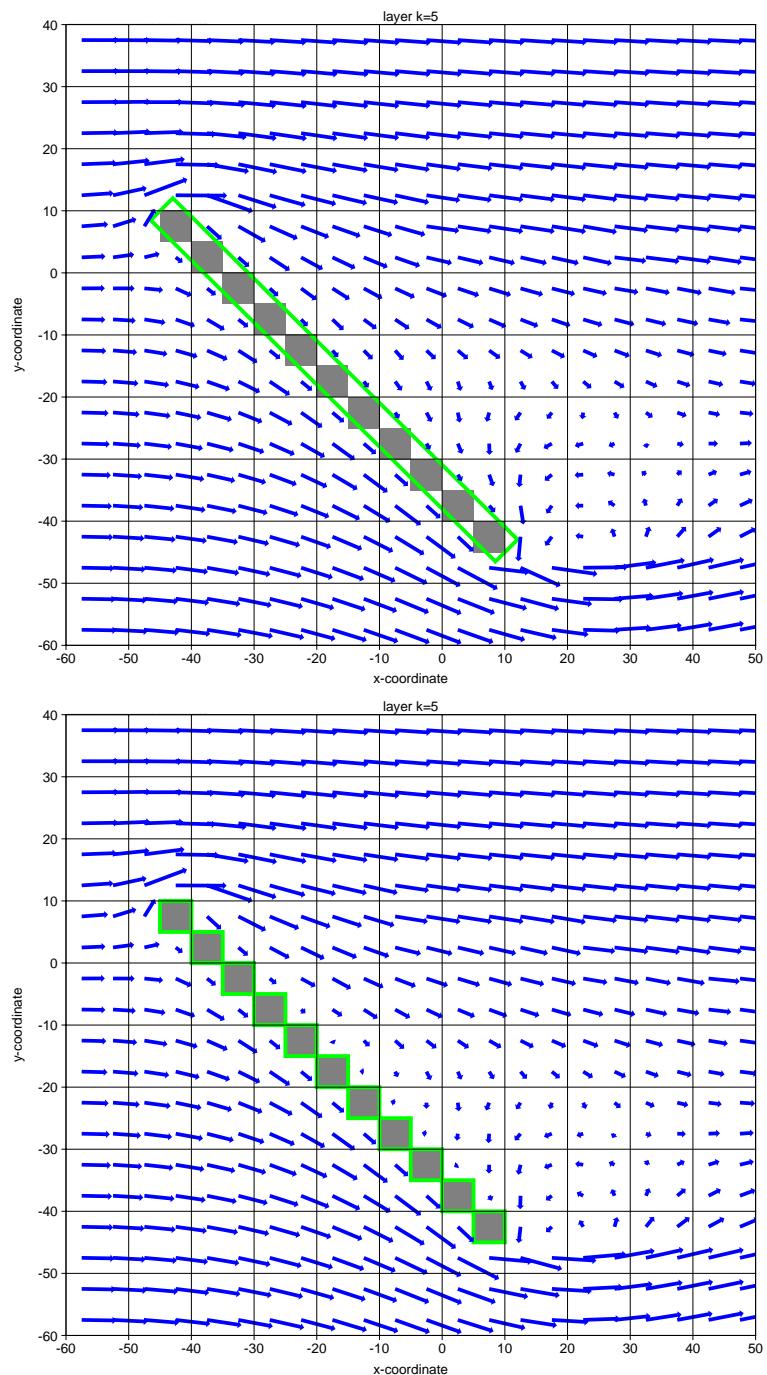


ABBILDUNG 5: Test Gebäudeaufrasterung (Anströmrichtung 270 Grad, Horizontalschnitt bei $z = 9$ m). Oben: Windfeld für die exakte Grundfläche. Unten: Windfeld für die aufgerasterzte Grundfläche.

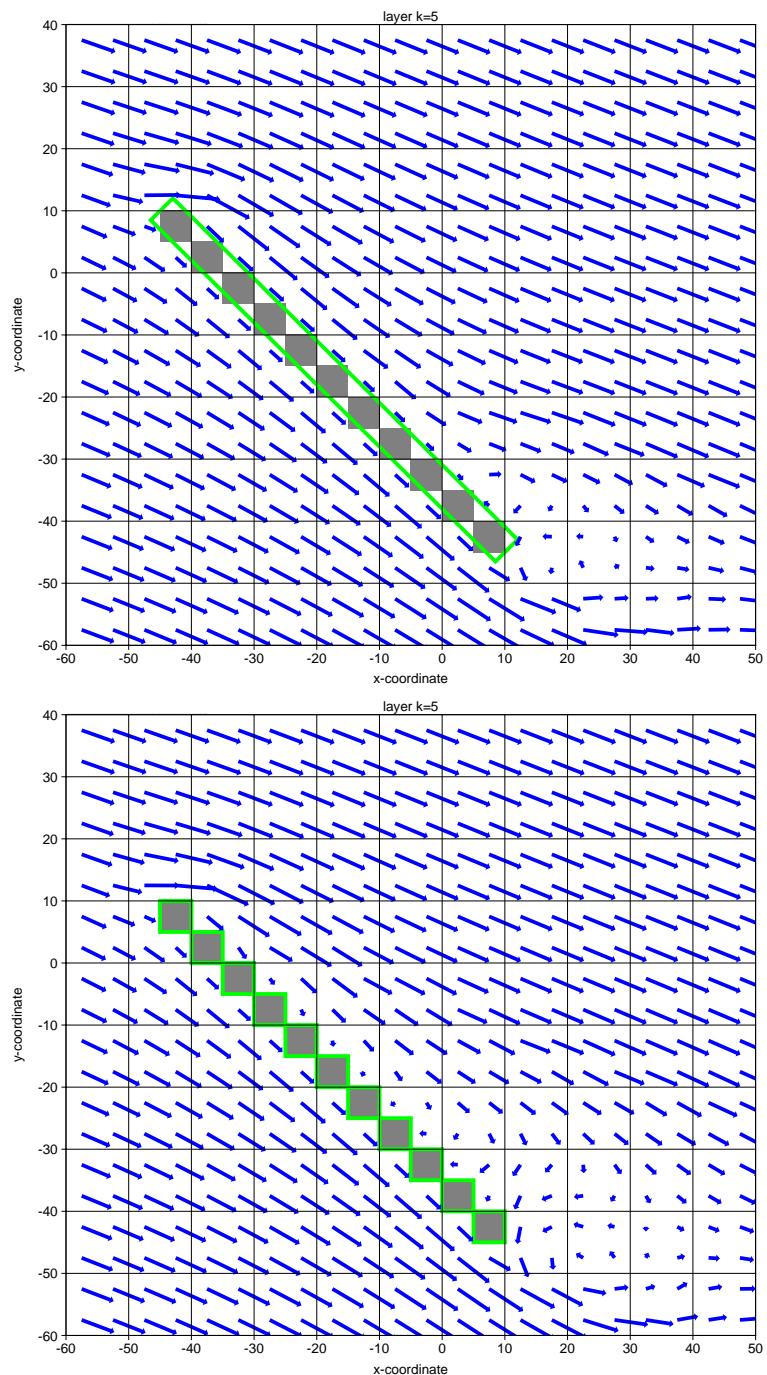


ABBILDUNG 6: Test Gebäudeaufrasterung (Anströmrichtung 290 Grad, Horizontalschnitt bei $z = 9$ m). Oben: Windfeld für die exakte Grundfläche. Unten: Windfeld für die aufgeraster- te Grundfläche.

4.1.3 Aufrasterung eines Turms

Es wird geprüft, ob das diagnostische Windfeld weitgehend unabhängig davon ist, ob ein zylinderförmiges Gebäude in seinen exakten Umrissen oder in aufgerasterter Form berücksichtigt wird.

Eine Turm wird für die Berechnung des Rezirkulationsfeldes einmal in seinen exakten Ausmaßen und einmal in relativ grob aufgerasterter Form berücksichtigt. Die berechneten Windfelder (Bild 7 und Bild 8) stimmen weitgehend überein.

(Turmdurchmesser 80 m, $H = 160$ m, $\Delta z = 20$ m, $\Delta x = 20$ m, $u_A = 5$ m/s, $h_A = 13$ m, $z_0 = 0,5$ m, $d_0 = 3$ m)

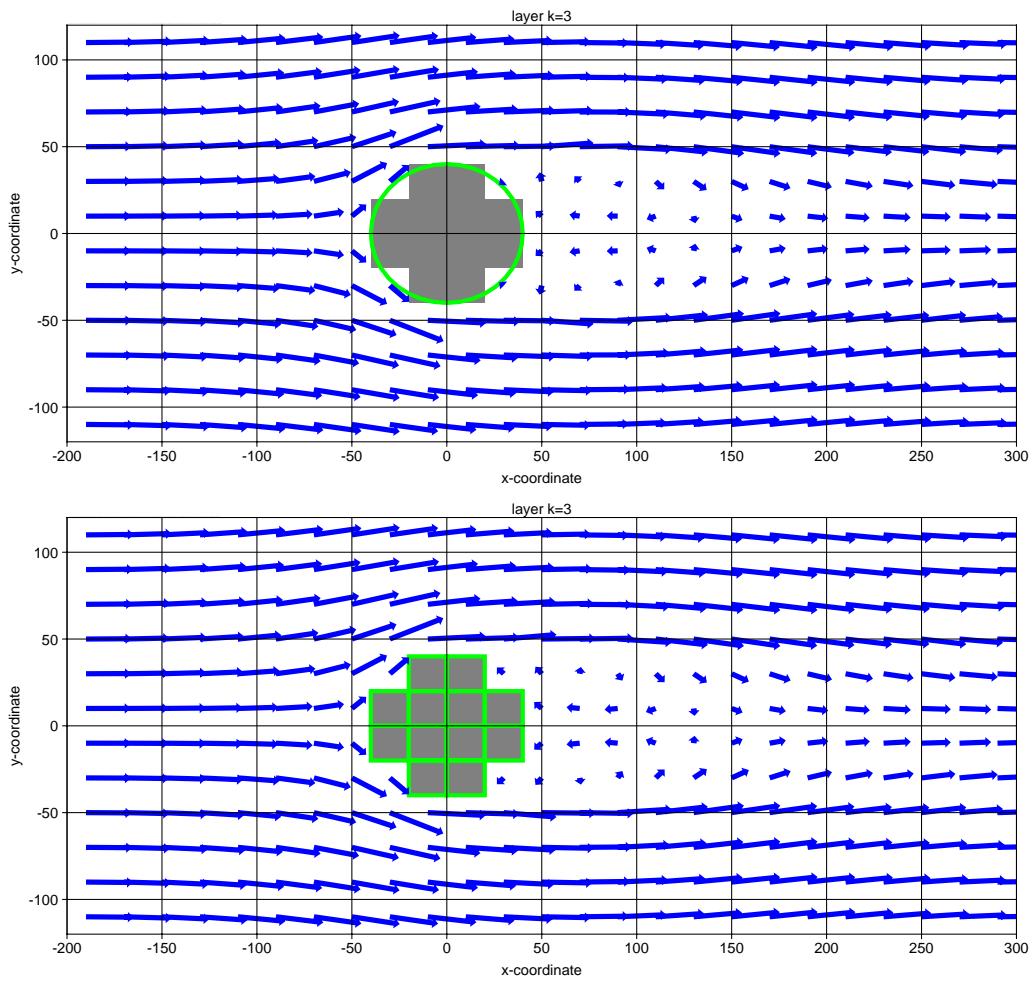


ABBILDUNG 7: Test Gebäudeaufrasterung (Horizontalschnitt bei $z = 50$ m). Links: Windfeld für die exakte Grundfläche. Rechts: Windfeld für die aufgerasterte Grundfläche.

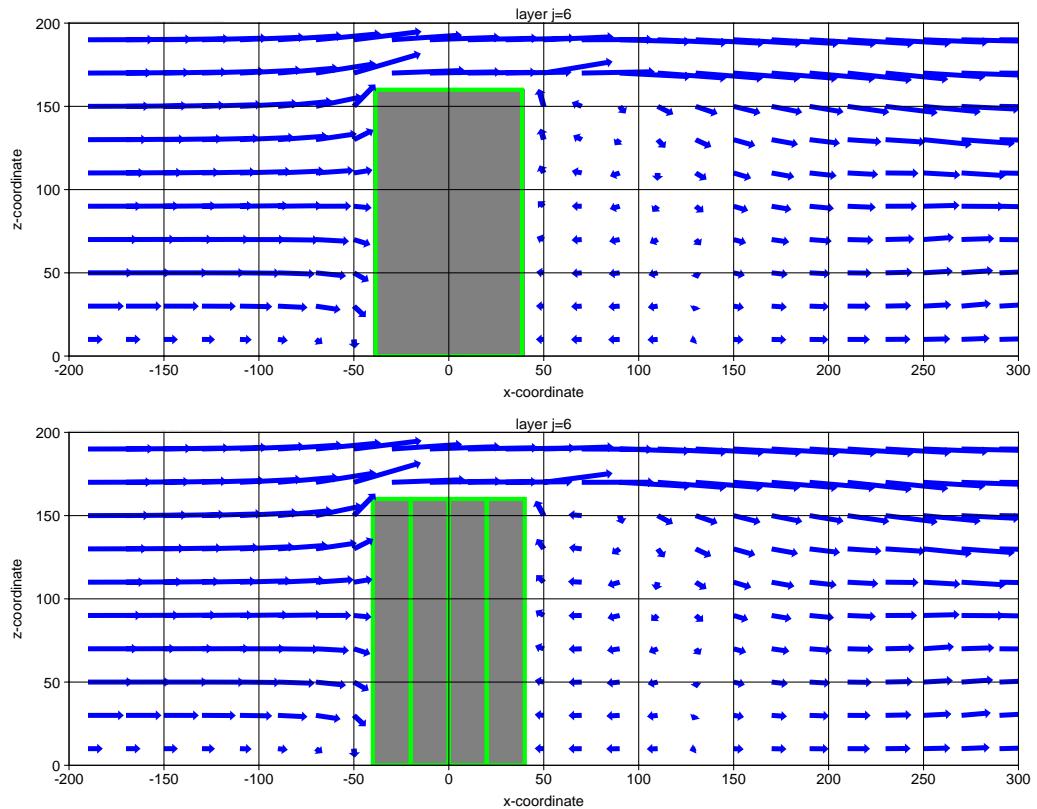


ABBILDUNG 8: Test Gebäudeaufrasterung (Vertikalschnitt bei $y = -10$ m). Links: Windfeld für die exakte Grundfläche. Rechts: Windfeld für die aufgerasterte Grundfläche.

4.1.4 Drehung des Rechengitters, Einfluß auf das Windfeld

Es wird geprüft, ob das diagnostische Windfeld unabhängig von der Orientierung des Rechengitters relativ zur Gebäudeausrichtung ist.

Das Windfeld im Lee eines senkrecht angeströmten Quaders wird für verschiedene Ausrichtungen des Rechennetzes bestimmt. Bild 9 zeigt als Beispiel das Windfeld für zwei verschiedene Ausrichtungen. Die Geschwindigkeitskomponente in Windrichtung in 10 m Höhe im zentralen Lee des Quaders wird in den Abständen 20 m, 40 m 60 m, 80 m 100 m und 120 m von der leeseitigen Wand bestimmt. Das Koordinatensystem wird in Schritten von 5 Grad von 0 Grad (Wind in Richtung der x -Achse) bis 90 Grad (Wind in Richtung der y -Achse) gedreht.

Das Ergebnis in Bild 10 zeigt, daß das Rücklaufgebiet im Lee des Gebäudes unabhängig von der Ausrichtung des Rechennetzes ist. Es gibt zwar Schwankungen, sie sind aber nur klein und zeigen keine systematische Tendenz.¹⁰

(Quadergrundfläche 63 m mal 63 m, $H = 30$ m, $\Delta z = 3$ m, $\Delta x = 3$ m, $u_A = 2$ m/s, $h_A = 10$ m, $z_0 = 0,1$ m)

¹⁰Ein negatives Ergebnis dieses Tests ist der Hauptgrund, warum das VDI-Modell DMW nicht für AUSTAL2000 verwendet wird, siehe Abschlußbericht zu AUSTAL2000.

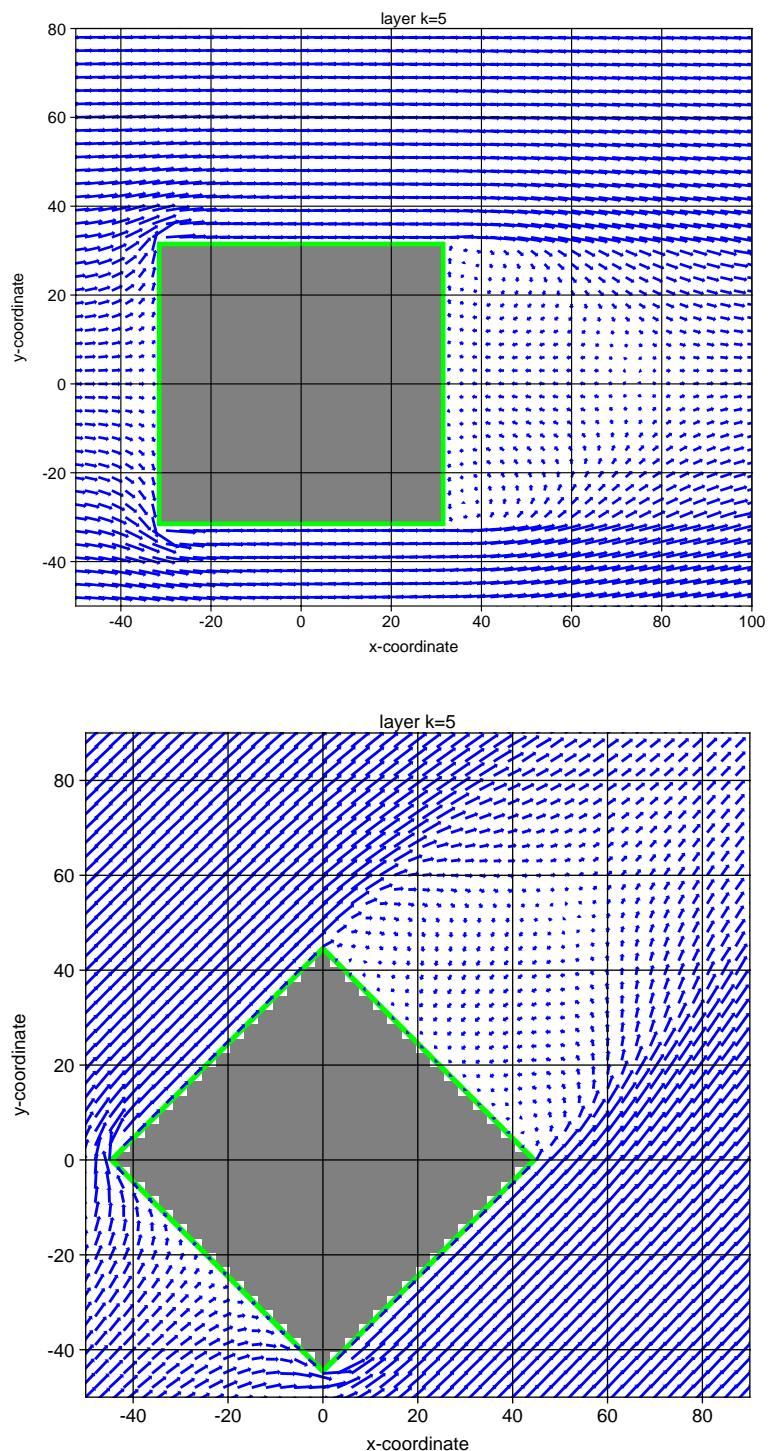


ABBILDUNG 9: Test Drehung des Rechengitters. Beispiel-Windfelder für zwei Ausrichtungen (0 Grad und 45 Grad) des Rechennetzes (Horizontalschnitt bei $z = 13,5$ m).

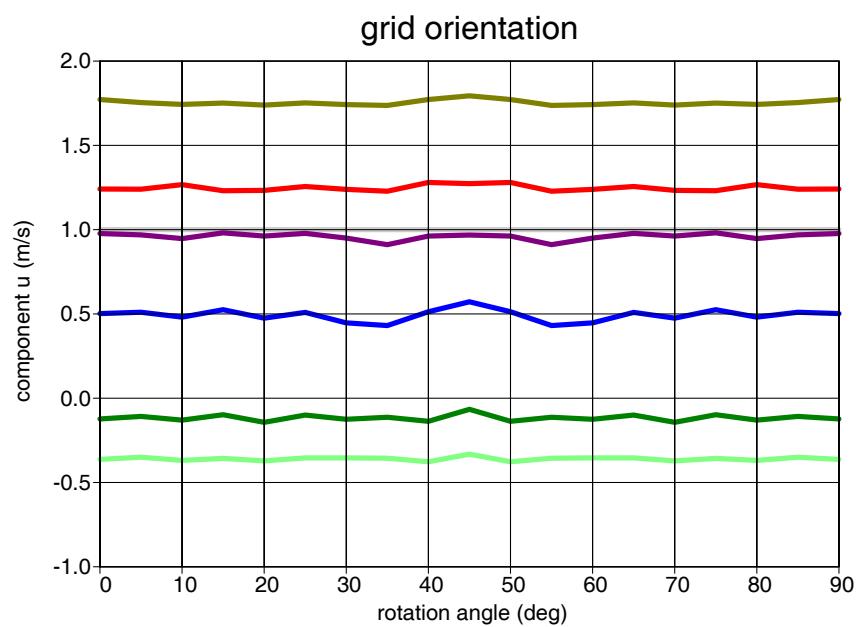


ABBILDUNG 10: Test Drehung des Rechengitters. Geschwindigkeitskomponente in Windrichtung in 10 m Höhe im zentralen Lee des Quaders in den Abständen (von unten nach oben) 20 m, 40 m, 60 m, 80 m, 100 m und 120 m von der Lee-seitigen Wand für verschiedene Drehwinkel des Rechengitters gegen die Windrichtung.

4.1.5 Drehung des Rechengitters, Einfluß auf die Konzentrationsverteilung

Es wird geprüft, ob auch die mit dem Modellfeldern bestimmte Konzentrationsverteilung unabhängig von der Orientierung des Rechengitters relativ zur Gebäudeausrichtung ist.

Es wird die über eine isotrope Windrose gemittelte Konzentrationsverteilung für eine Quelle bestimmt, die sich neben einem quaderförmigen Gebäude befindet. Quelle und Gebäude sind einmal parallel und einmal schräg zum Rechengitter ausgerichtet.

Bild 11 zeigt, daß die Konzentrationsverteilung praktisch unabhängig von der Ausrichtung der Objekte zum Rechengitter ist. Unterschiede liegen zumeist im Rahmen der statistischen Unsicherheit (je nach Ort 1 % bis 4 %).

(Gebäudeseiten 12 m und 44 m, $H = 30$ m, $H_Q = 36$ m, $\Delta z = 3$ m, $\Delta x = 4$ m, $u_A = 3$ m/s, $h_A = 13$ m, $z_0 = 0,5$ m, $d_0 = 3,0$ m)

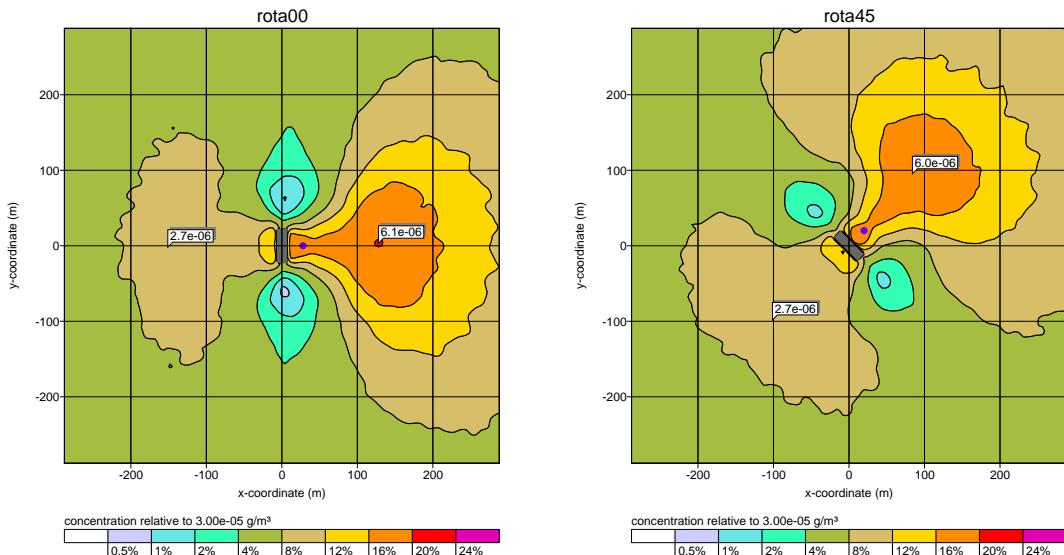


ABBILDUNG 11: Test Drehung des Rechengitters. Über eine isotrope Windrose gemittelte bodennahe Konzentrationsverteilung für zwei Ausrichtungen von Quelle und Gebäude zum Rechengitter. Die Quellposition ist als blauer Punkt markiert.

4.2 Validierung des Windfeldes

4.2.1 Datensätze des Entwurfs VDI 3783 Blatt 9

Im Entwurf VDI 3783 Blatt 9, *Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle, Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung*, werden Testdatensätze zur Validierung prognostischer Windfeldmodelle aufgeführt. Sie lassen sich auch auf ein diagnostisches Windfeldmodell anwenden.

Für einen Vergleich von gemessenen und berechneten Windfeldern sieht der Entwurf die Bestimmung von Trefferquoten als Maß für die Übereinstimmung der kartesischen Komponenten der Windvektoren innerhalb bestimmter Raumbereiche vor. Die Trefferquote wird für das gesamte Rechengebiet und für das im Entwurf festgelegte Nahfeld bestimmt.

In der Praxis hat der Ansatz folgende Schwächen gezeigt:

- Es werden nicht die Originalfelder, sondern die mit der Windgeschwindigkeit an einem vorgegebenen Referenzpunkt skalierten Felder betrachtet, so daß sich systematische Abweichung unter Umständen nicht in der Trefferquote niederschlagen.
- Da die kartesischen Komponenten unabhängig voneinander betrachtet werden, kann es vorkommen, daß hohe Trefferquoten ausgewiesen werden, obwohl es offensichtliche qualitative Unterschiede zwischen den Windfeldern gibt.
- Die Trefferquoten hängen von der Anordnung der Meßpunkte innerhalb des Beurteilungsraumes ab, der in Form eines rechtwinkligen Quaders vorgegeben wird.
- Die Trefferquoten können nur für die im Entwurf aufgeführten Testdatensätze berechnet werden, da nur für diese die notwendigen Bestimmungsparameter angegeben sind.

Als zusätzlicher oder alternativer Vergleich kann auch die Korrelation zwischen den Windfeldern betrachtet werden. Für die Bewertung, wie gut zwei Meßreihen von skalaren Werten x_i und y_i übereinstimmen, wird häufig der Korrelationskoeffizient k herangezogen,

$$k = \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2}}. \quad (8)$$

Auch bei guter Korrelation können sich die Werte der Meßreihen systematisch unterscheiden. Nimmt man an, daß die Werte x_i mit dem Faktor s skalieren, dann ergibt sich der Wert von s , für den im quadratischen Mittel die beste Übereinstimmung der beiden Meßreihen erreicht wird, zu

$$s = \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{\sum x_i^2}}. \quad (9)$$

Ein Wert $s < 1$ bedeutet beispielsweise, daß die Betragswerte von x_i systematisch größer sind als die von y_i .

Diese Kenngrößen können auf Meßreihen von vektoriellen Größen, hier die gemessenen Windvektoren \mathbf{o}_i und die berechneten Windvektoren \mathbf{v}_i , erweitert werden. Um automatisch zwischen den gestörten Gebieten (Nahbereich) und den ungestörten Gebieten (Fernbereich) unterscheiden zu können, wird zusätzlich ein Gewichtungsfaktor w_i eingeführt, der von der mittleren Anströmrichtung \mathbf{U} und den gemessenen Werten \mathbf{o}_i abhängt:

$$w_i = \begin{cases} 1 - \frac{\mathbf{o}_i \cdot \mathbf{U}}{|\mathbf{o}_i||\mathbf{U}|} & \text{zur Auswahl der gestörten Bereiche} \\ 1 + \frac{\mathbf{o}_i \cdot \mathbf{U}}{|\mathbf{o}_i||\mathbf{U}|} & \text{zur Auswahl der ungestörten Bereiche} \end{cases} \quad (10)$$

Die verallgemeinerten Koeffizienten k und s lauten damit:

$$k = \frac{\sum \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{o}_i w_i}{\sqrt{\sum |\mathbf{v}_i|^2 w_i \sum |\mathbf{o}_i|^2 w_i}} \quad (11)$$

$$s = \frac{\sum \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{o}_i w_i}{\sum |\mathbf{v}_i|^2 w_i} \quad (12)$$

Der Entwurf VDI 3783 Blatt 9 enthält die in folgender Tabelle aufgeführten Testdatensätze. Sie basieren auf den CEDVAL-Datensätzen, die im Windkanal des meteorologischen Instituts der Universität Hamburg erstellt wurden (CEDVAL, 2004).¹¹

Datensatz	Beschreibung	CEDVAL-Quelle
c1	Quasi-2D-Gebäude in senkrechter Anströmung	A1-3
c3	Würfel in senkrechter Anströmung	A1-4
c4	Würfel in diagonaler Anströmung	A1-6
c5	Quader in senkrechter Anströmung	A1-1
c6	Anordnung aus 3 mal 7 Quadern	B1-1

Diese Testfälle wurden mit dem Windfeldmodell nachgerechnet. Die folgende Tabelle zeigt die nach dem Entwurf bestimmten Trefferquoten für den Nahbereich (sie sollen laut Entwurf mindestens 66% betragen) und die vorher definierten Korrelationskoeffizienten für die ungestörten und gestörten Bereiche.

¹¹Bei der Herleitung der Testdatensätze wurden u.a. Meßpunkte aussortiert und die Windvektoren mit der Windgeschwindigkeit an einem vorgegebenen Referenzpunkt skaliert.

Datensatz	q_u (%)	q_v (%)	q_w (%)	k_u	s_u	k_g	s_g
c1 (Quasi-2D-Gebäude)	46	-	72	-	-	-	-
c3 (Würfel)	81	85	74	0,99	0,95	0,88	0,83
c4 (schräger Würfel)	63	69	58	0,97	0,98	0,37	0,29
c5 (Quader)	75	82	75	0,98	1,04	0,93	1,16
c6 (3 mal 7 Quader)	37	71	66	0,96	0,48	0,54	0,41

Bilder 12 bis 16 zeigen eine grafische Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Windfelder:

- Für das Quasi-2D-Gebäude (Fall c1, Bild 12) erstreckt sich die gemessene Störzone weiter über die Gebäudeoberkante hinaus (bis etwa 2-fache Gebäudehöhe) als in der Rechnung (bis etwa 1,5-fache Gebäudehöhe) und die Ausdehnung der Rezirkulation in Anströmrichtung ist etwas größer (Messung: etwa 4,5 Gebäudehöhen nach der Gebäuderückseite, Rechnung: etwa 3,5 Gebäudehöhen). Im nahen Lee und im Luv wird der Verlauf und die Stärke der Rezirkulation bis zur Gebäudeoberkante vom Modell richtig getroffen.
- Für den Würfel in senkrechter Anströmung (Fall c3, Bild 13) ist die Übereinstimmung der Windfelder gut, lediglich unmittelbar an der Oberkante der Würfelrückseite schießt das berechnete Windfeld etwas zu stark über die Oberkante hinaus (Bild 13, unten).
- Beim Würfel in diagonaler Anströmung (Fall c4, Bild 14) werden die beiden Seitencken des Würfels ($x = -12,5 \text{ m}/y = 12,5 \text{ m}$ bzw. $x = 12,5 \text{ m}/y = -12,5 \text{ m}$) vom berechneten Windfeld erst relativ glatt umströmt, bevor sich im weiteren Verlauf eine Rezirkulation ausbildet. In der Messung erfolgt die Ablösung unmittelbar an den Seitenecken. Dies führt in der Rechnung auf ein Rücklaufgebiet, dessen horizontale Ausdehnung quer zur Windrichtung etwa 25% kleiner als in der Messung ist. Entsprechend ergeben sich niedrigere Trefferquoten und Korrelationskoeffizienten im quantitativen Vergleich. Die Ausdehnung des Rücklaufes längst der Windrichtung stimmt in beiden Fällen überein, seine Stärke fällt in der Rechnung etwas kleiner aus.
- Die Übereinstimmung der Felder beim senkrecht angeströmten Quader (Fall c5, Bild 15) ist etwa gleich gut wie beim Würfel in senkrechter Anströmung. Die größere Anzahl und räumliche Dichte der Messpunkte ermöglicht hier einen besseren quantitativen Vergleich über Trefferquote und Korrelationskoeffizient.
- Bei den Quaderreihen (Fall c6, Bild 16) verläuft die berechnete Strömung konstruktionsbedingt praktisch ungestört entlang der zur Anströmrichtung parallelen Straßen schlucht, die skalierte Geschwindigkeitskomponente der Meßwerte ist hier dagegen nur etwa halb so groß (Bild 16, oben). Entsprechend gering fällt die Trefferquote für die u -Komponente und der Koeffizienten s_u aus. Der Übergang zu einer rückläufigen Strömung in der Seitenstraße erfolgt in der berechneten Strömung abrupter als in der Messung: Während in der Rechnung die rückläufige Strömung wie bei den Einzelgebäuden in den Tests c3 und c5 unmittelbar an der Gebäudekante bei $y = 15 \text{ m}$ einsetzt,

erfolgt dies in der Messung erst im Bereich der Wandmitte bei $y = 0$ m. Das erklärt auch die Unterschiede im vertikalen Verlauf der Strömung (Bild 16, unten): Da in der Messung ein größerer Anteil der Strömung in den Lee-seitigen Bereich des Gebäudes eingebracht wird, muß auch entsprechend mehr nach oben abgeführt werden, so daß der Bereich mit aufwärts gerichteter Strömung im Lee in der Messung größer ist als in der Rechnung, wo nur unmittelbar hinter der Lee-seitigen Gebäudewand eine positive Vertikalkomponente des Windfeldes auftritt.

Bis auf das etwas zu schmale Rezirkulationsgebiet im Testfall c4 und die Unterschiede im komplexeren Testfall c6 ist die Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem Windfeld gut, die Trefferquoten liegen meist über den im Richtlinien-Entwurf für prognostische Modelle geforderten 66%.

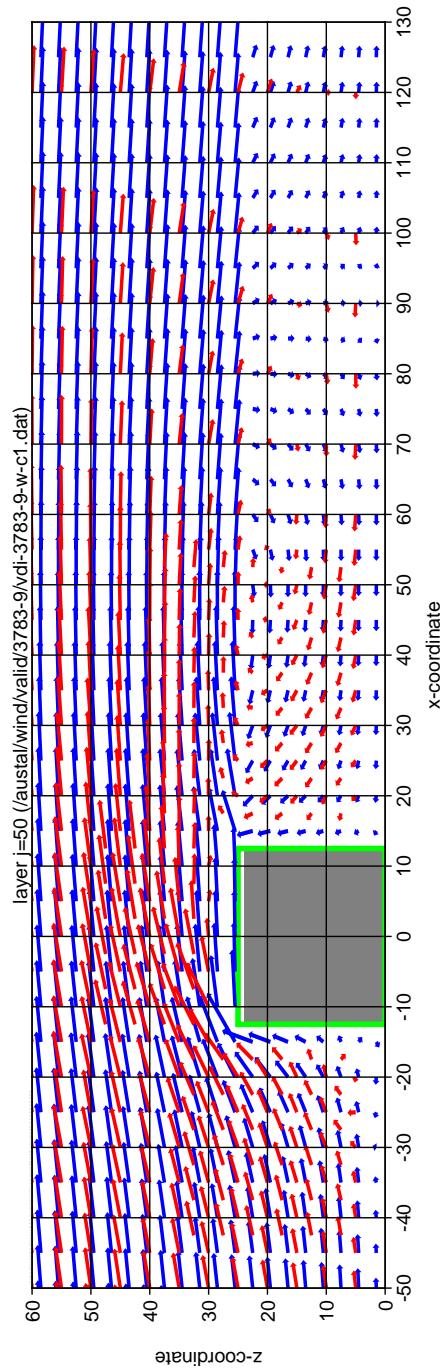


ABBILDUNG 12: Entwurf VDI 3783 Blatt 9, Datensatz c1, quasi-2D-Gebäude in senkrechter Anströmung (Vertikalschnitt bei $y = 0$ m).

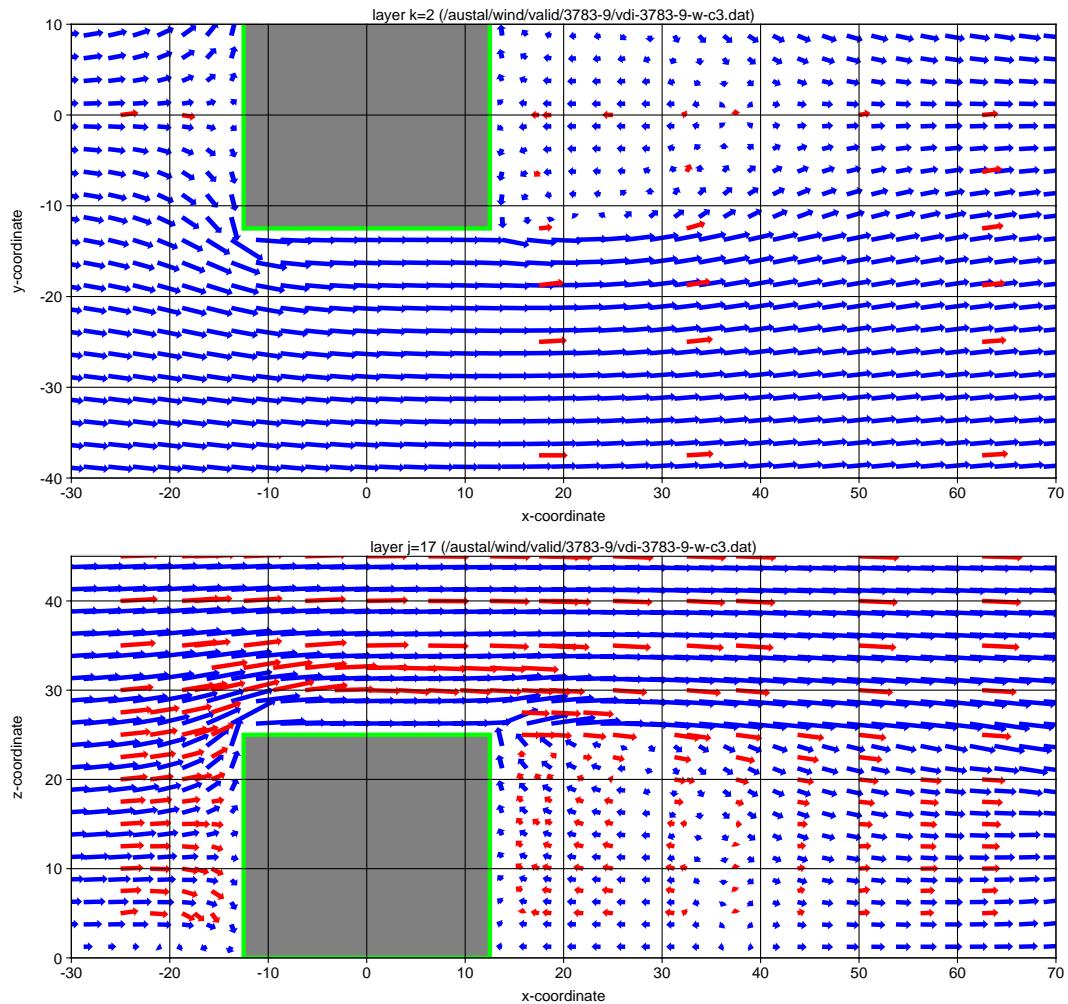


ABBILDUNG 13: Entwurf VDI 3783 Blatt 9, Datensatz c3, Würfel in senkrechter Anströmung.
Oben: Horizontalschnitt bei $z = 5$ m. Unten: Vertikalschnitt bei $y = 0$ m.

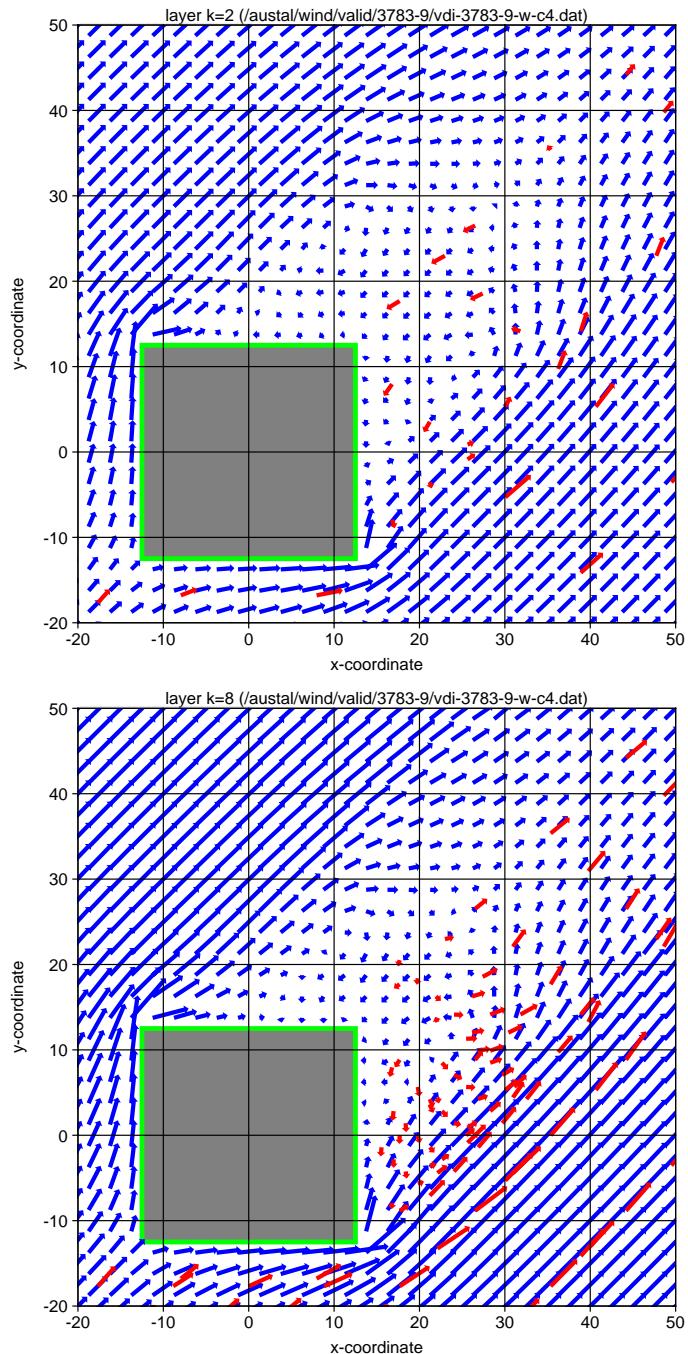


ABBILDUNG 14: Entwurf VDI 3783 Blatt 9, Datensatz c4, Würfel in diagonaler Anströmung. Oben: Horizontalschnitt bei $z = 5$ m. Unten: Horizontalschnitt bei $z = 20$ m.

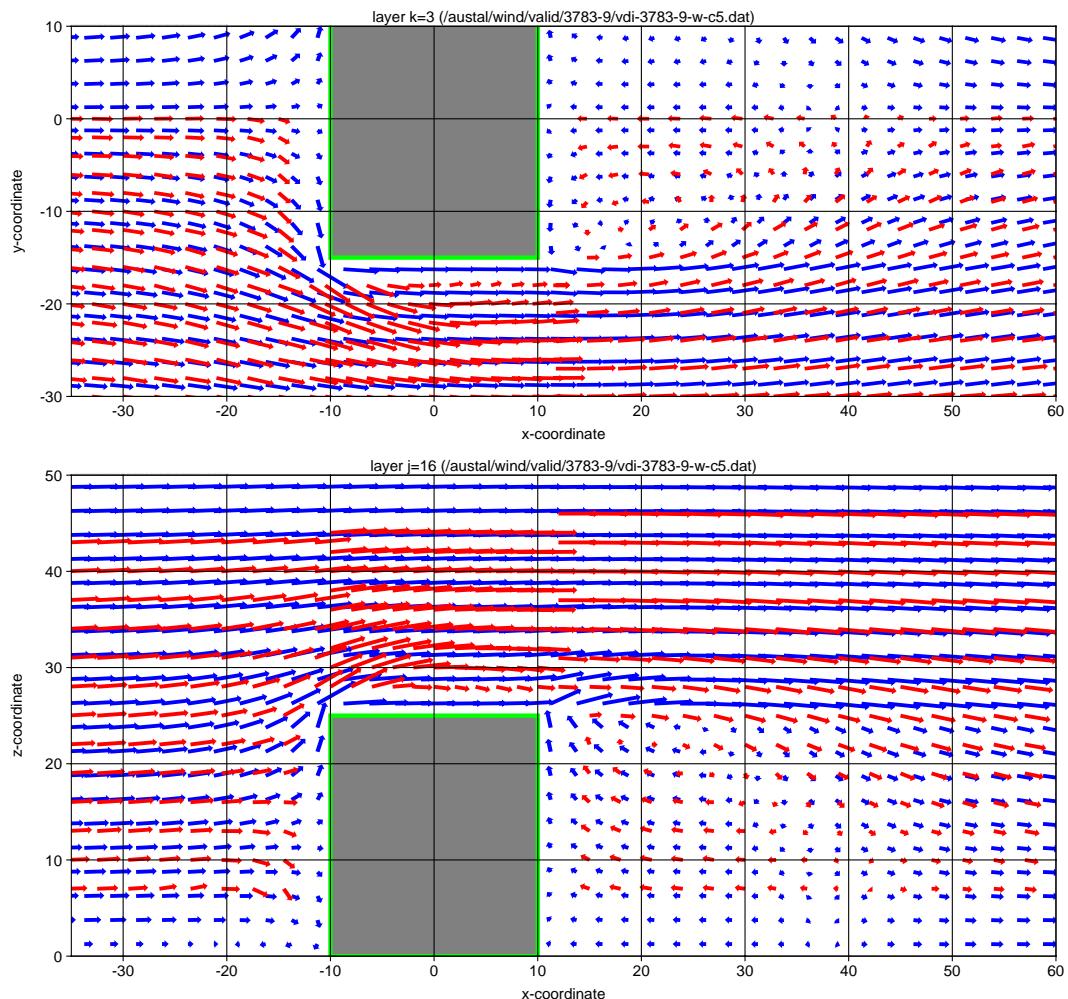


ABBILDUNG 15: Entwurf VDI 3783 Blatt 9, Datensatz c5, Quader in senkrechter Anströmung. Oben: Horizontalschnitt bei $z = 7$ m. Unten: Vertikalschnitt bei $y = 0$ m.

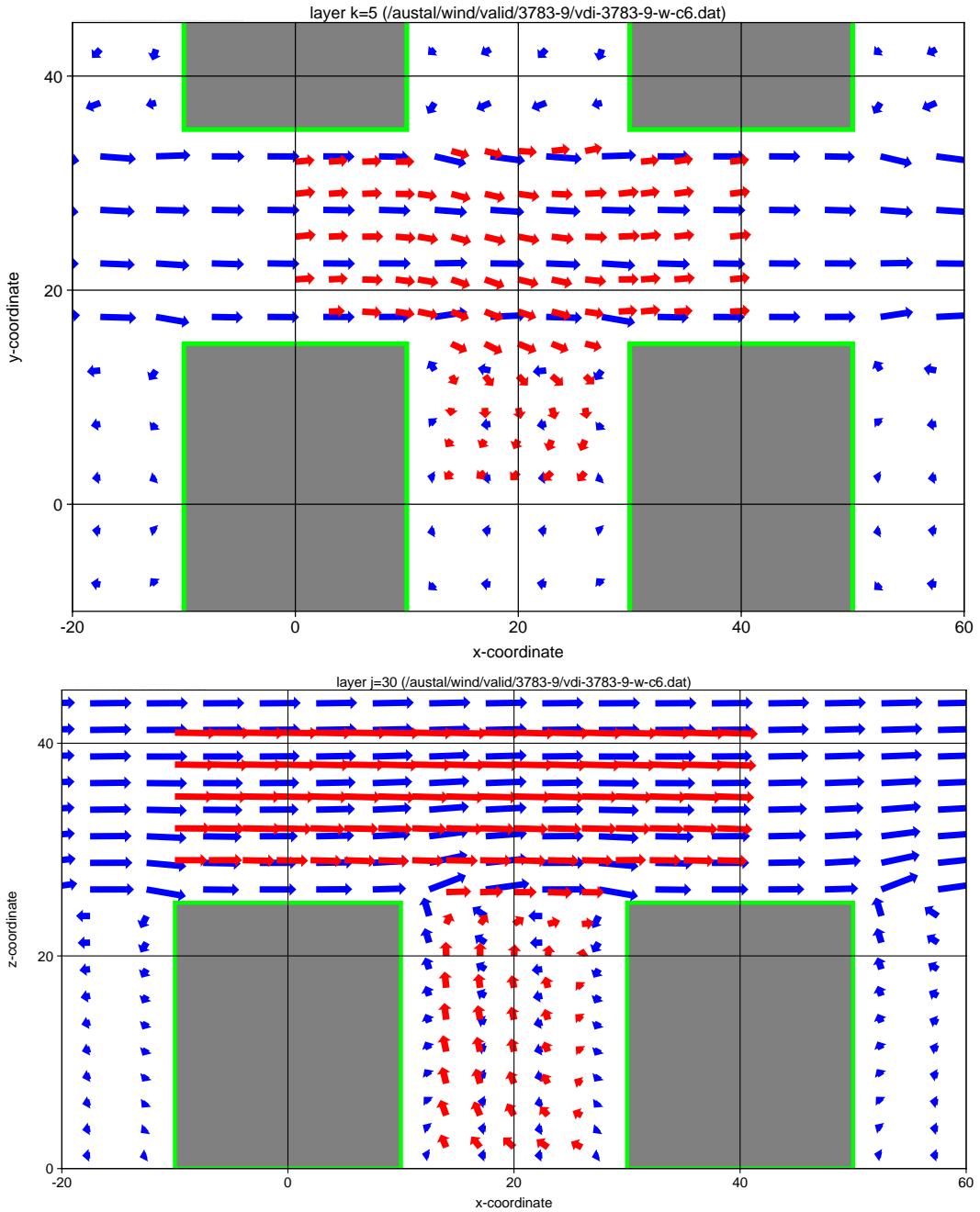


ABBILDUNG 16: Entwurf VDI 3783 Blatt 9, Datensatz c6, 3 mal 7 Quader in senkrechter Anströmung. Oben: Horizontalschnitt bei $z = 12,5$ m. Unten: Vertikalschnitt bei $y = 0$ m.

4.2.2 U-förmiges Gebäude

Im Windkanal des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe wurde das Windfeld für ein U-förmiges Gebäude, das senkrecht zu seiner Grundseite angeströmt wird, für zwei Gebäudehöhen vermessen (PEF, 1992). Die Höhe des Gebäudes betrug 28 m und 40 m, die Länge der Grundseite 54 m, die Länge der Schenkel 40 m, die Breite der Schenkel und der Grundseite 12 m ($\Delta z = 3$ m, $\Delta x = 3$ m, $u_A = 5$ m/s, $h_A = 10$ m, $z_0 = 0,4$ m, $d_0 = 0$ m).

Die grafische Gegenüberstellung in Bild 17 links, Bild 18 links, Bild 19 links und Bild 20 zeigt, daß die gemessene Abbremsung der Strömung vor dem Gebäude und die Stärke des Rücklaufes im Lee des Gebäudes vom Erdboden bis etwa zur halben Gebäudehöhe vom Modell reproduziert wird, die Ausdehnung in Anströmrichtung ist etwas zu kurz. In der oberen Hälfte der Lee-Zone endet der Rücklauf des berechneten Windfeldes bereits in einer Entfernung von etwa einer Gebäudehöhe, während er in den Messungen auch noch in größerer Entfernung bis unmittelbar unter der Gebäudeoberkante erhalten bleibt. Ursache für das frühere Abklingen der Rezirkulation zur Gebäudeoberkante hin in der Rechnung ist vermutlich der Umstand, daß die beiden Seitenwände praktisch keinen Einfluß auf die Konstruktion des Rezirkulationsfeldes \mathbf{R} im Innenhof des Gebäudes haben. Kurz oberhalb des Gebäudes stimmen gemessenes und berechnetes Windfeld wieder gut überein, siehe Bild 17 rechts, Bild 18, Bild 19 rechts und Bild 20.

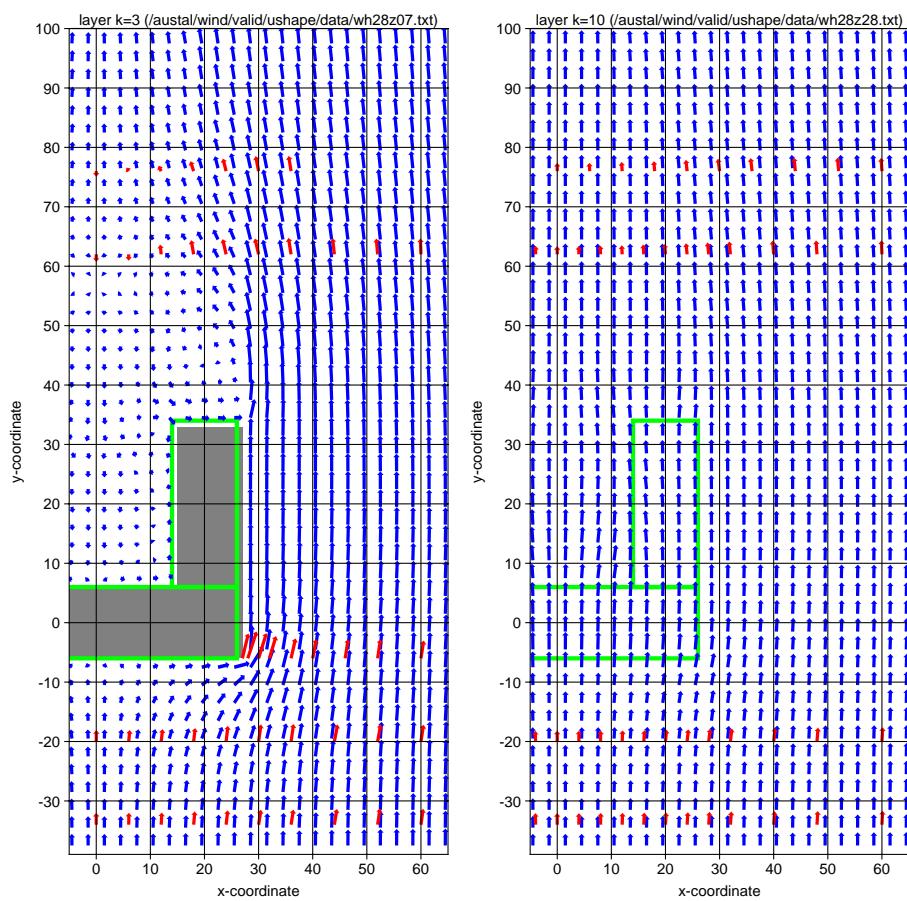


ABBILDUNG 17: U-förmiges Gebäude ($H = 28$ m). Links: Horizontalschnitt bei $z = 7$ m ($\tau = 0,5$ s). Rechts: Horizontalschnitt bei $z = 28$ m ($\tau = 0,25$ s).

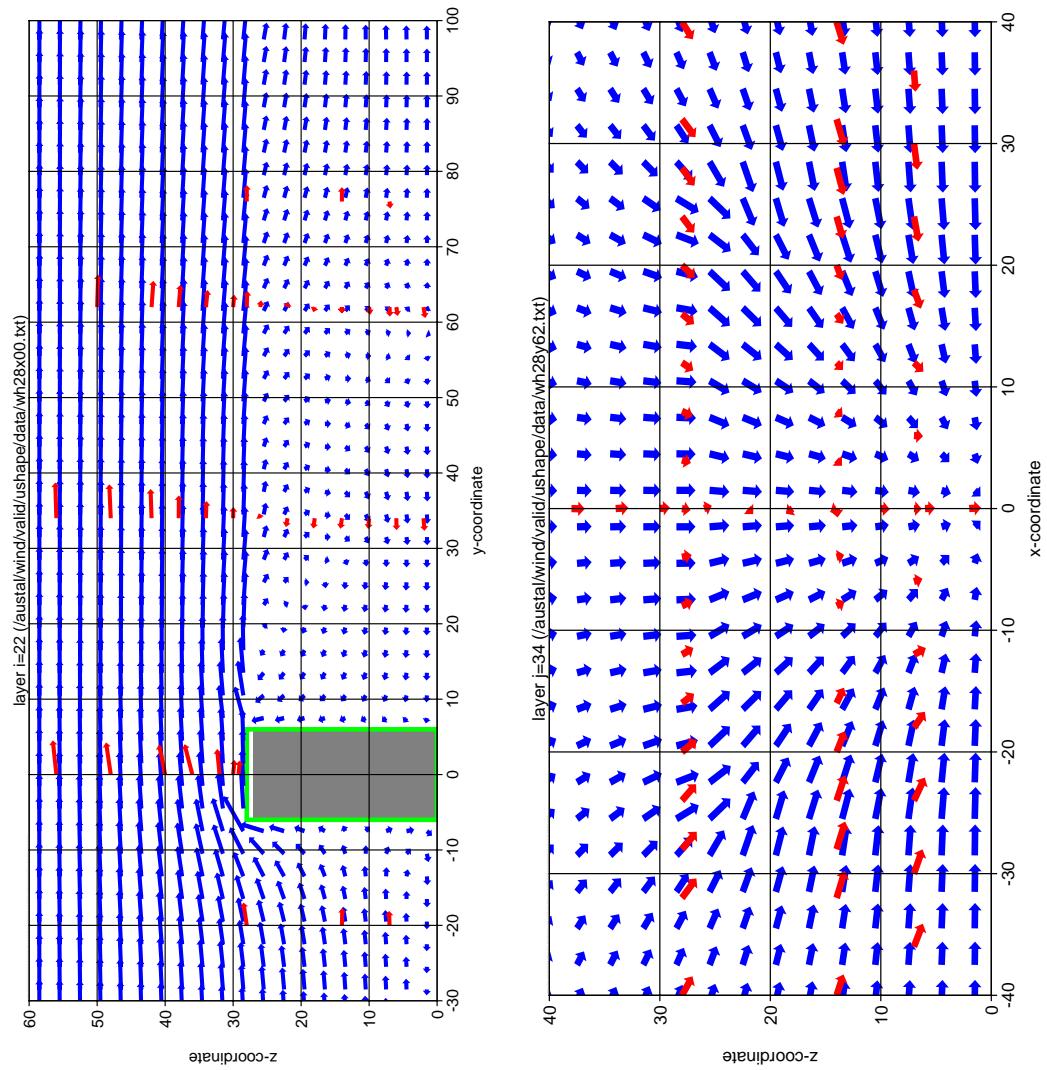


ABBILDUNG 18: U-förmiges Gebäude ($H = 28$ m). Links: Vertikalschnitt bei $x = 0$ m ($\tau = 0,5$ s). Rechts: Vertikalschnitt bei $y = 62$ m ($\tau = 1,5$ s).

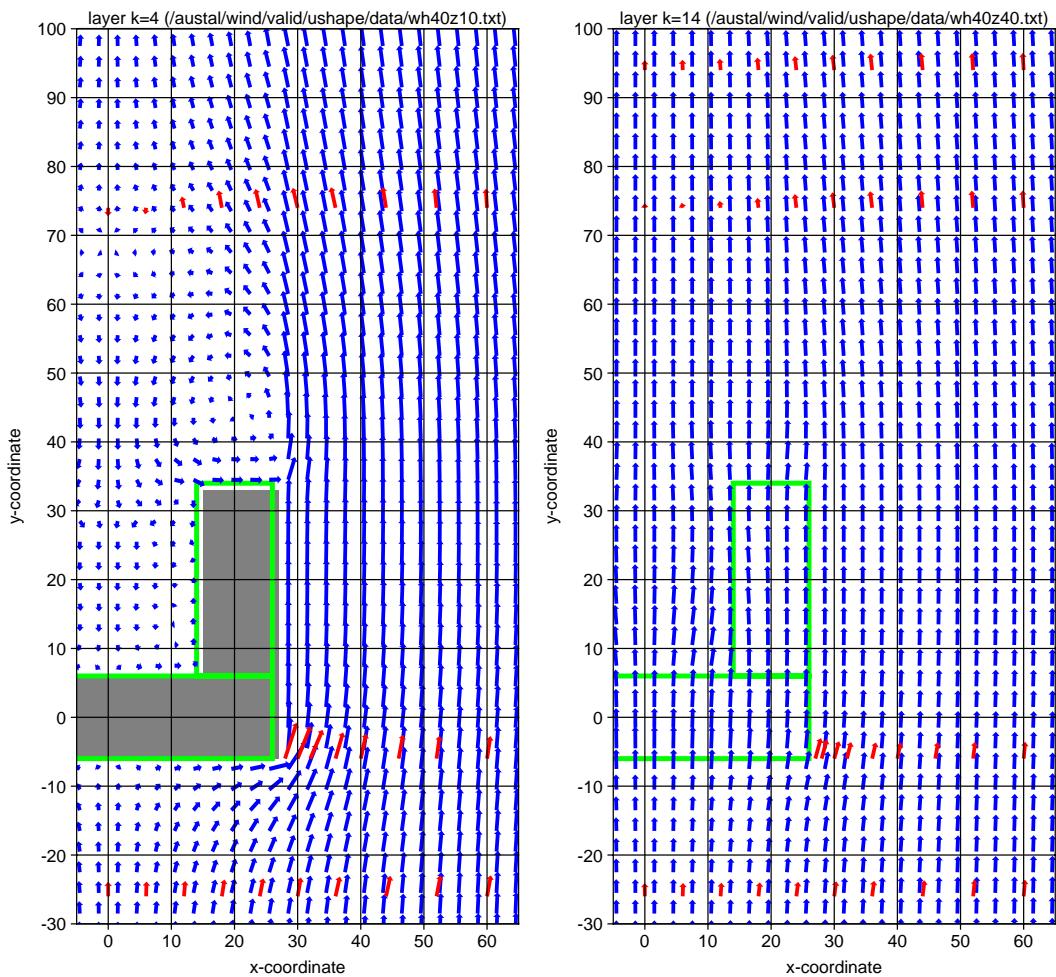


ABBILDUNG 19: U-förmiges Gebäude ($H = 40$ m). Links: Horizontalschnitt bei $z = 10$ m ($\tau = 0,5$ s). Rechts: Horizontalschnitt bei $z = 40$ m ($\tau = 0,25$ s).

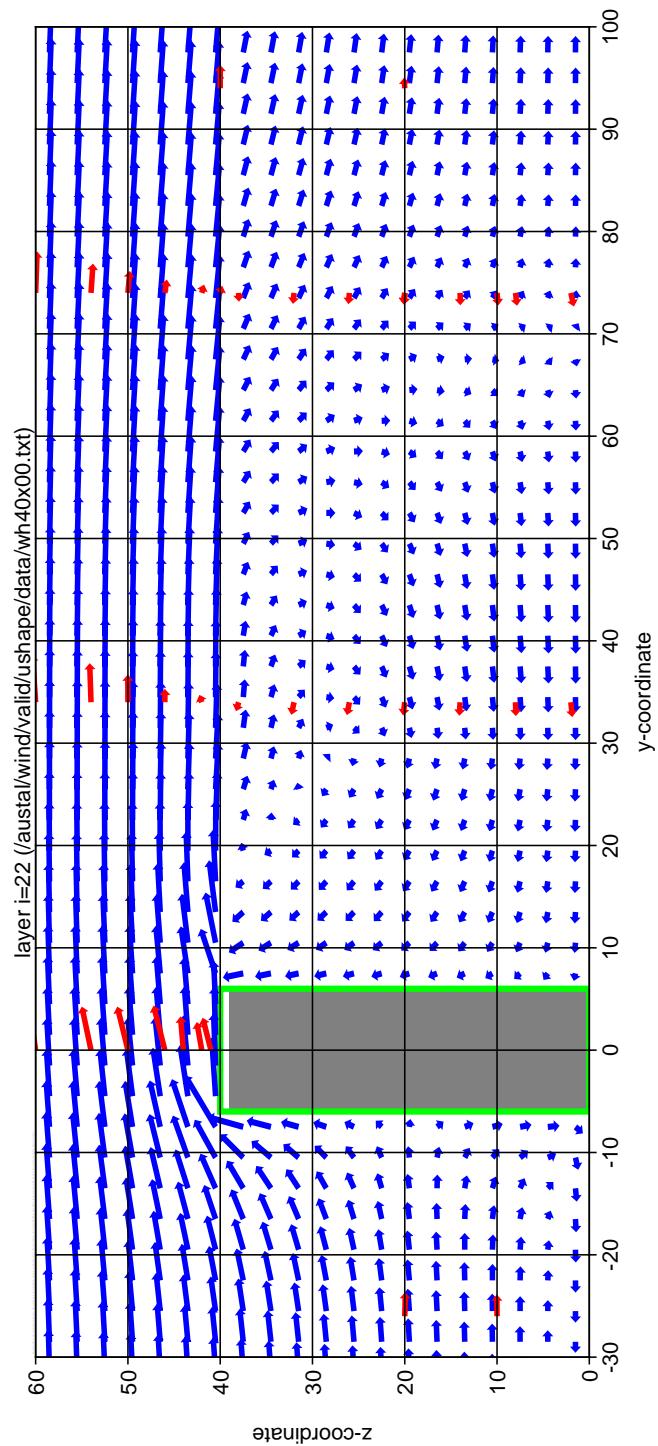


ABBILDUNG 20: U-förmiges Gebäude ($H = 40$ m, Vertikalschnitt bei $x = 0$ m, $\tau = 0,5$ s).

4.2.3 Straßenkreuzung

Im Windkanal des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe wurde das Windfeld in einer Straßenkreuzung, die von vier ringförmigen Gebäudeblöcken gebildet wird, für verschiedene Anströmrichtungen vermessen (PEF, 1994).

Die Höhe der Gebäude betrug 18 m, die Länge der Außenseiten 90 m, die Gebäude- und Straßenbreite 18 m ($\Delta z = 3$ m, $\Delta x = 4,5$ m, $u_A = 5$ m/s, $h_A = 10$ m, $z_0 = 0,1$ m, $d_0 = 0$ m).

Bei Anströmung aus Westen ($r = 270$ Grad) ergibt sich sowohl in den Messungen als auch in den Rechnungen eine fast ungestörte Strömung im Bereich der Kreuzung, siehe Bild 21 und Bild 22. Bild 22 zeigt, daß bei den Messungen in der Seitenstraße in einer Höhe von $z = 15$ m, also noch deutlich unterhalb der Gebäudeoberkante von 18 m, die rückläufige Strömung bereits abgeklungen ist, im Gegensatz zur Rechnung. Die gemessene Strömung steht hier in einem gewissen Kontrast zum Testfall c6 des Richtlinienentwurfs VDI 3783 Blatt 9, wo die rückläufige Strömung in der Seitenstraße (Bild 16 unten) wie bei den Einzelgebäuden der anderen Testfälle auch bis unmittelbar unter die Gebäudeoberkante reicht.

Bei schräger Anströmung aus Südwest ($r = 225$ Grad, Bild 23 und Bild 24) und Westsüdwest ($r = 240$ Grad, Bild 25 und Bild 26)) wird die berechnete Strömung in Bodennähe unmittelbar auf der Kreuzung etwas zu stark abgebremst.

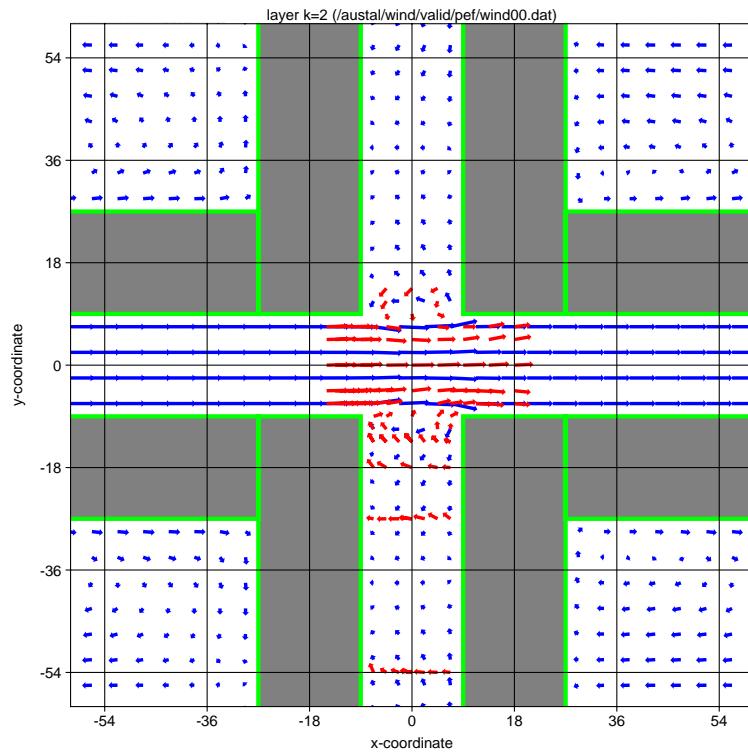


ABBILDUNG 21: Straßenkreuzung
(Anströmrichtung $r = 270$ Grad,
Horizontalschnitt bei $z = 4,5$ m,
 $\tau = 1$ s).

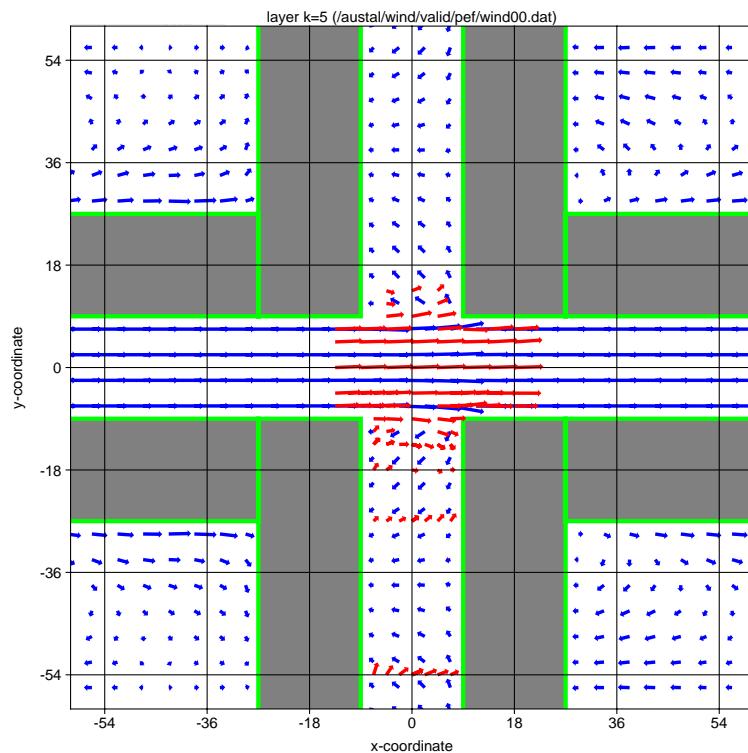


ABBILDUNG 22: Straßenkreuzung
(Anströmrichtung $r = 270$ Grad,
Horizontalschnitt bei $z = 15$ m,
 $\tau = 1$ s).

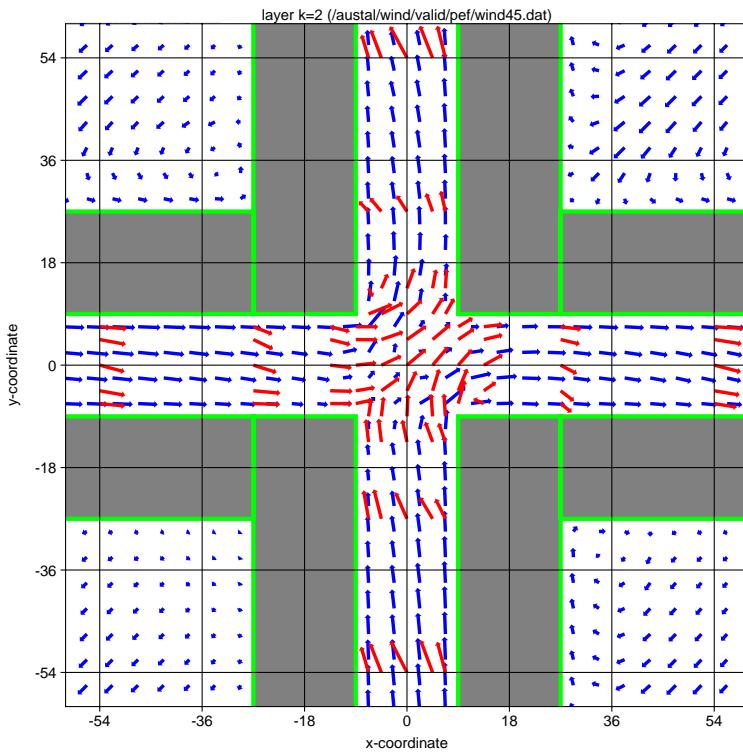


ABBILDUNG 23: Straßenkreuzung
(Anströmrichtung $r = 225$ Grad,
Horizontalschnitt bei $z = 4,5$ m,
 $\tau = 1$ s).

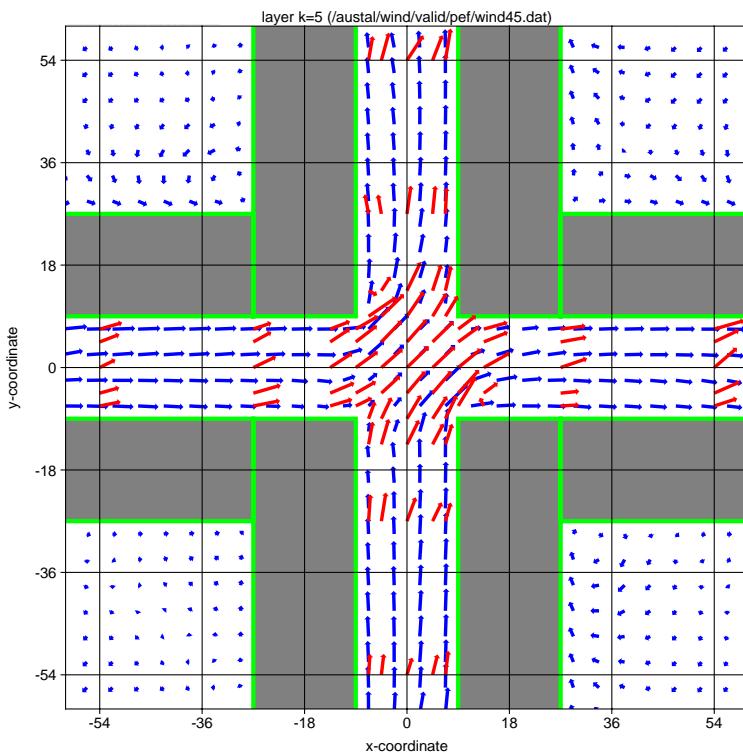


ABBILDUNG 24: Straßenkreuzung
(Anströmrichtung $r = 225$ Grad,
Horizontalschnitt bei $z = 15$ m,
 $\tau = 1$ s).

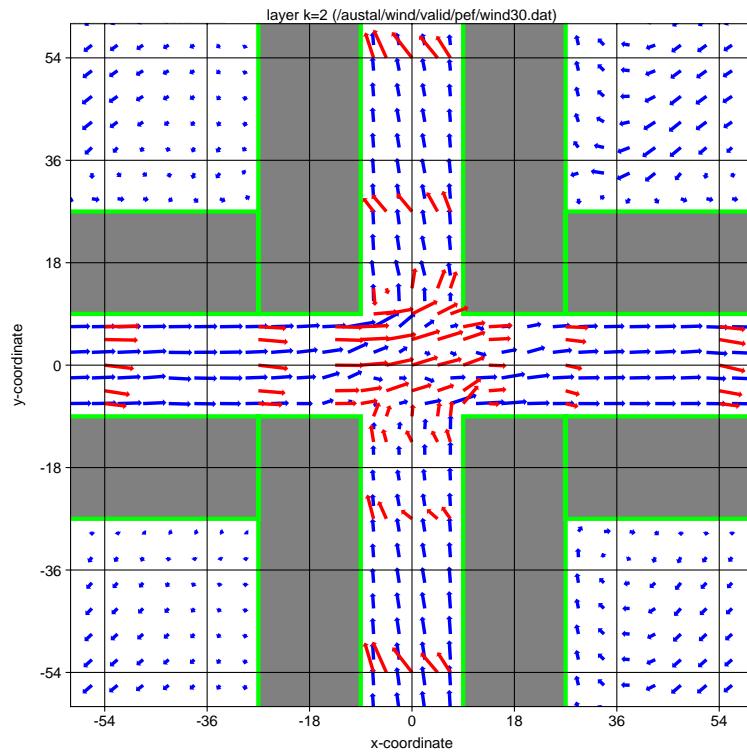


ABBILDUNG 25: Straßenkreuzung
(Anströmrichtung $r = 240$ Grad,
Horizontalschnitt bei $z = 4,5$ m,
 $\tau = 1$ s).

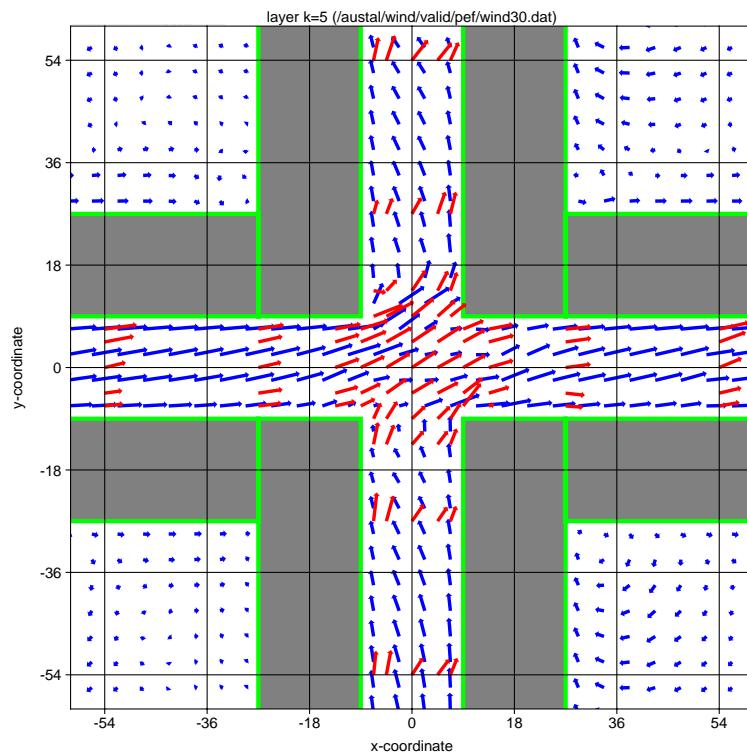


ABBILDUNG 26: Straßenkreuzung
(Anströmrichtung $r = 240$ Grad,
Horizontalschnitt bei $z = 15$ m,
 $\tau = 1$ s).

4.2.4 Bonnerstraße und Venloerstraße

In der Richtlinie VDI 3783 Blatt 10 werden Datensätze zu Freilandmessungen aufgeführt, die vom TÜV Rheinland durchgeführt worden sind. In der Bonnerstraße und Venloerstraße wurden jeweils an 4 Meßpositionen die Komponenten des Windvektors für verschiedene Windrichtungen bestimmt (Meßpositionen 1 und 3 im Bereich der Gebäudeoberkante an den Seiten der Straße, Meßpositionen 2 und 4 in 4 m Höhe am Straßenrand). Die Windvektoren waren für Vergleiche mit Modellrechnungen mit der Windgeschwindigkeit an einem vorgegebenen Referenzpunkt normiert worden.

Für die Rauhigkeitslänge z_0 und die Verdrängungshöhe d_0 werden in der Richtlinie als Parameter für das Anströmprofil für die Bonnerstraße $z_0 = 0,4$ m und $d_0 = 9,8$ m und für die Venloerstraße $z_0 = 0,5$ m und $d_0 = 7,9$ m angegeben. Bei expliziter Berücksichtigung der Bebauung erscheinen diese Werte jedoch zu hoch, stattdessen wurde für beide Fälle $z_0 = 0,2$ m und $d_0 = 1,2$ m verwendet.

Die Modellrechnungen wurden für eine Windrose in Schritten von 10 Grad durchgeführt, Bild 27 zeigt den Vergleich von berechneten und gemessenen skalierten Windkomponenten. Die Symbole zeigen die Meßwerte, die Linien die berechneten Werte. Die Horizontalkomponente parallel zur Straße (v) ist blau, die Horizontalkomponente senkrecht zur Straße (u) ist rot und die Vertikalkomponente (w) ist grün dargestellt. Die Anordnung der 4 Teilbilder entspricht der Anordnung der Meßpunkte quer zur Straße.

Die Horizontalkomponente parallel zur Straße (blau) wird sehr gut vom Modell wiedergegeben. Für die Strömungsrichtungen parallel zur Straße zeigt dies zum einen, daß die gemessene Strömung wie die modellierte Strömung in der Straßenschlucht im wesentlichen ungestört verläuft, und zum anderen, daß das gemessene Vertikalprofil gut mit den gewählten Werten von Rauhigkeitslänge und Verdrängungshöhe getroffen wird.

Die Horizontalkomponente quer zur Straße (rot) und die Vertikalkomponente (grün) werden in Bodennähe (Meßpunkte 2 und 4) vom Modell unterschätzt, der tendenzielle Verlauf wird meist richtig wiedergegeben. An der Gebäudeoberkante stimmen die abgedeckten Wertebereiche etwa überein, im qualitativen Verhalten zeigen sich zum Teil größere Unterschiede. Möglicherweise spielen in diesem Bereich, wo die rückläufige Strömung in die ungestörte Strömung übergeht, Details wie die Dachform der Gebäude eine Rolle, die im Modell nicht berücksichtigt werden.

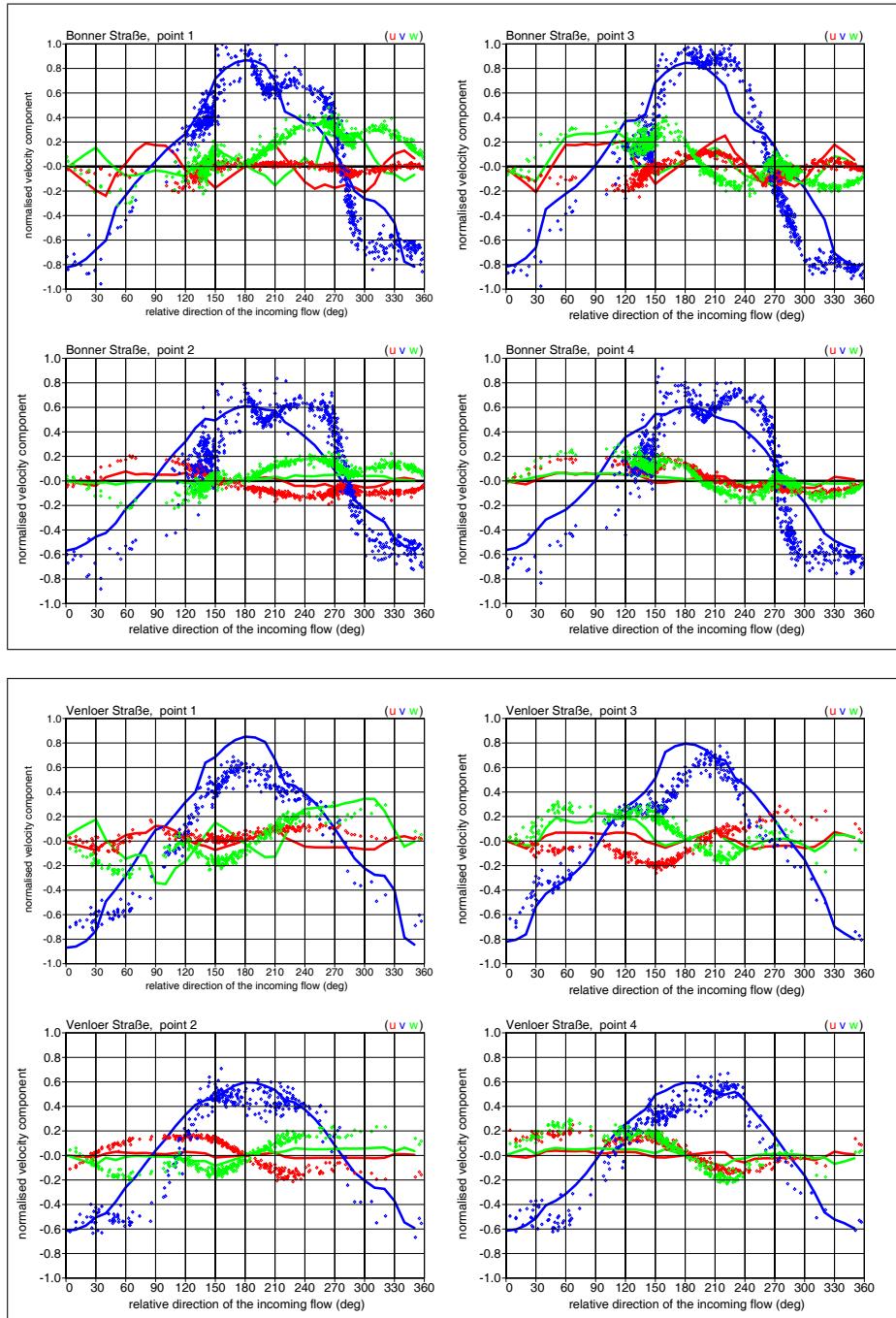


ABBILDUNG 27: Messungen in der Bonnerstraße (oben) und Venloerstraße (unten). Dargestellt sind die normierten Windkomponenten parallel zur Straße (v, blau), quer zur Straße (u, rot) und vertikal (w, grün) für jeweils 4 Meßpunkte für verschiedene Anströmrichtungen ($z_0 = 0,2$ m, $d_0 = 1,2$ m, $\Delta x = 3$ m, $\Delta z = 3$ m). Die Anordnung der Bilder entspricht jeweils der Anordnung der Meßpunkte im Straßenquerschnitt.

4.3 Validierung der Geschwindigkeitsfluktuationen

Neben dem mittleren Windfeld beeinflußt ein Gebäude insbesondere in seinem Lee die Geschwindigkeitsfluktuationen und Diffusionseigenschaften des Strömungsfeldes. Die gebäudeinduzierte Zusatzturbulenz kann in einem Lagrangeschen Ausbreitungsmodell durch entsprechende Zusatzfelder berücksichtigt werden.¹² Im vorliegenden Modellansatz werden die Zusatzfelder anhand des Rezirkulationsfeldes parametrisiert, siehe Abschnitt 3.3.

Während das Zusatzfeld der Geschwindigkeitsfluktuationen direkt mit Messungen verglichen werden kann, ist dies beim Zusatzfeld für die Diffusionskoeffizienten nur indirekt über einen Vergleich der hiermit erzielten Konzentrationsverteilungen möglich, siehe Abschnitt 4.4.

In den folgenden Vergleichen wird die Ausdehnung und Stärke des Zusatzfeldes der Geschwindigkeitsfluktuationen geprüft. Mit dem hier gewählten einfachen Ansatz können räumliche Details der Fluktuationen nicht wiedergegeben werden, dies sollte aber für den betrachteten Anwendungsbereich von Quellhöhen oberhalb des 1,2-fachen der Gebäudehöhen auch nicht erforderlich sein.

4.3.1 CEDVAL-Datensätze A1-1, A1-4, A1-6

In den CEDVAL-Datensätzen (CEDVAL, 2004), die im Windkanal des meteorologischen Instituts der Universität Hamburg gemessen wurden, finden sich auch Angaben zur Turbulenzintensität für das Anströmfeld und das gestörte Windfeld. Die Werte sind insbesondere in Bodennähe mit einer relativ großen Unsicherheit behaftet, in den Datensätzen werden an identischen Orten zum Teil um bis zu einen Faktor 2 voneinander abweichende Werte ausgewiesen.

Für die Datensätze A1-1, A1-4 und A1-6 sind die Fluktuationen grafisch in den Bildern 28 bis 33 aufgeführt. Dargestellt ist die Differenz der Fluktuationen bezüglich des Anströmfeldes für die drei kartesischen Windkomponenten u (in Anströmrichtung), v (horizontal quer zur Anströmrichtung) und w (vertikal) für verschiedene Höhen (angegeben in Einheiten der Gebäudehöhe $H = 25$ m). Unter den Grafiken sind jeweils die isotropen Geschwindigkeitsfluktuationen, die sich mit dem vorliegenden Modellansatz ergeben, dargestellt.

Die allgemeine Ausdehnung und Stärke der modellierten Felder stimmt mit den Messungen etwa überein, detaillierte Strukturen werden nicht reproduziert.¹³

¹²In kleinen Raumbereichen in der Nähe der Grenzflächen kann es auch zu einer Herabsetzung der Turbulenz kommen, dieser Effekt wird hier nicht weiter berücksichtigt.

¹³Die berechneten Fluktuationen sind kurz oberhalb des h_s -fachen der Gebäudehöhe noch nicht exakt auf null abgefallen, da die auf den Mittelpunkten der Gitterzellen berechneten Werte auf die Knotenpunkte des Rechengitters abgebildet werden.

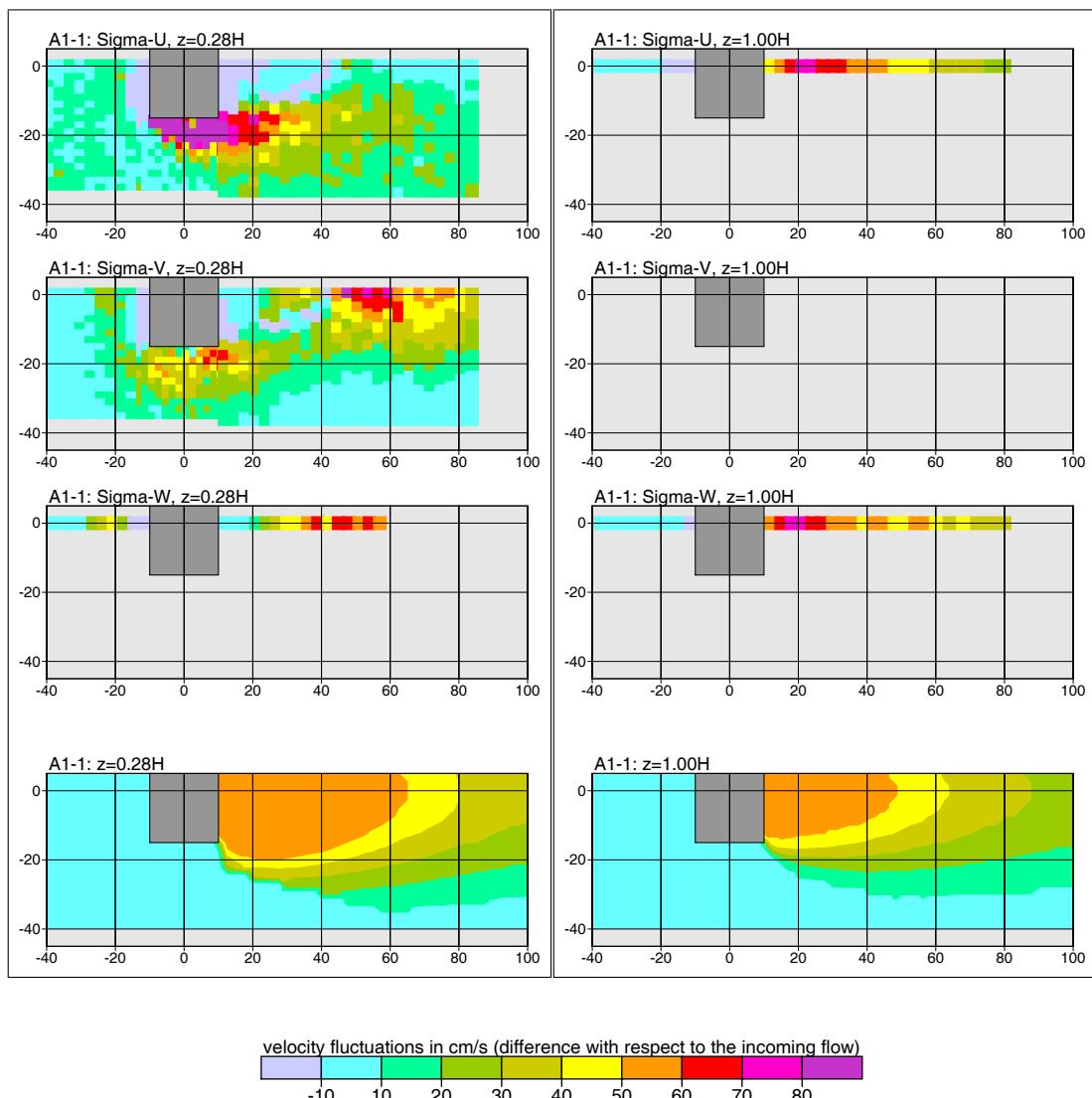


ABBILDUNG 28: Datensatz A1-1, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes. In jeder Spalte zeigen die oberen drei Teilbilder die gemessenen Werte, das unterste Teilbild das Modellergebnis.

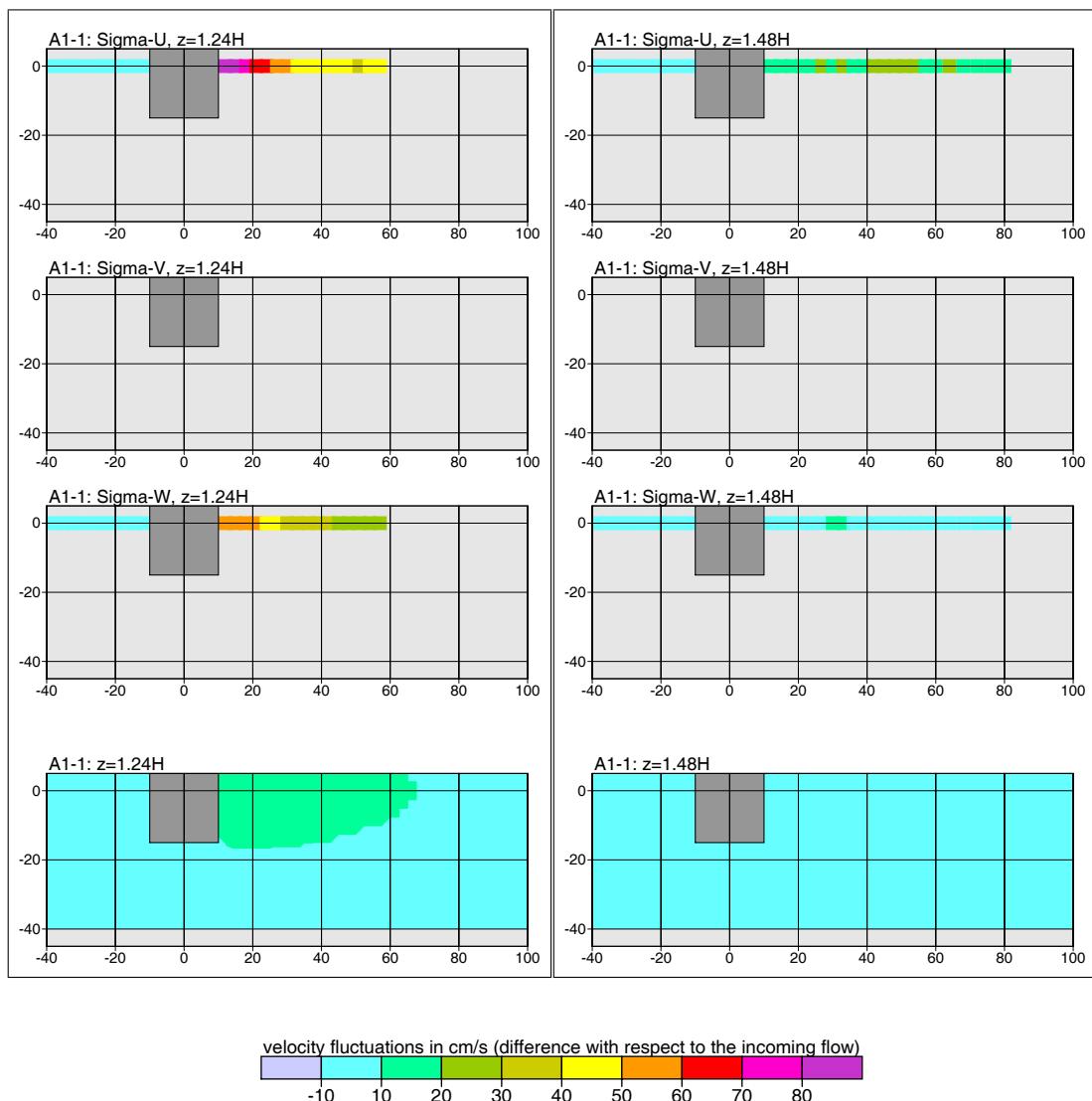


ABBILDUNG 29: Datensatz A1-1, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes. In jeder Spalte zeigen die oberen drei Teilbilder die gemessenen Werte, das unterste Teilbild das Modellergebnis.

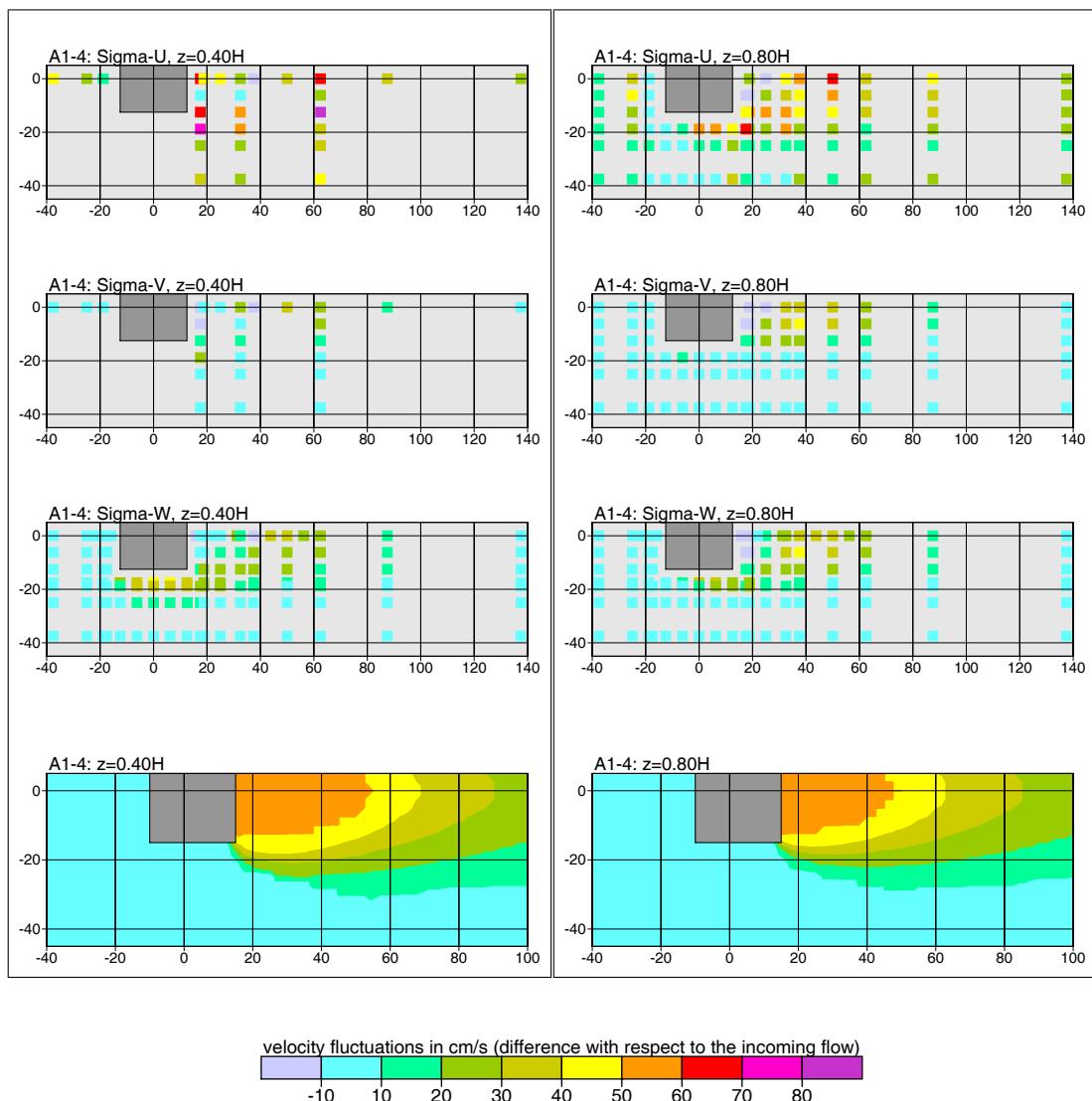


ABBILDUNG 30: Datensatz A1-4, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes. In jeder Spalte zeigen die oberen drei Teilbilder die gemessenen Werte, das unterste Teilbild das Modellergebnis.

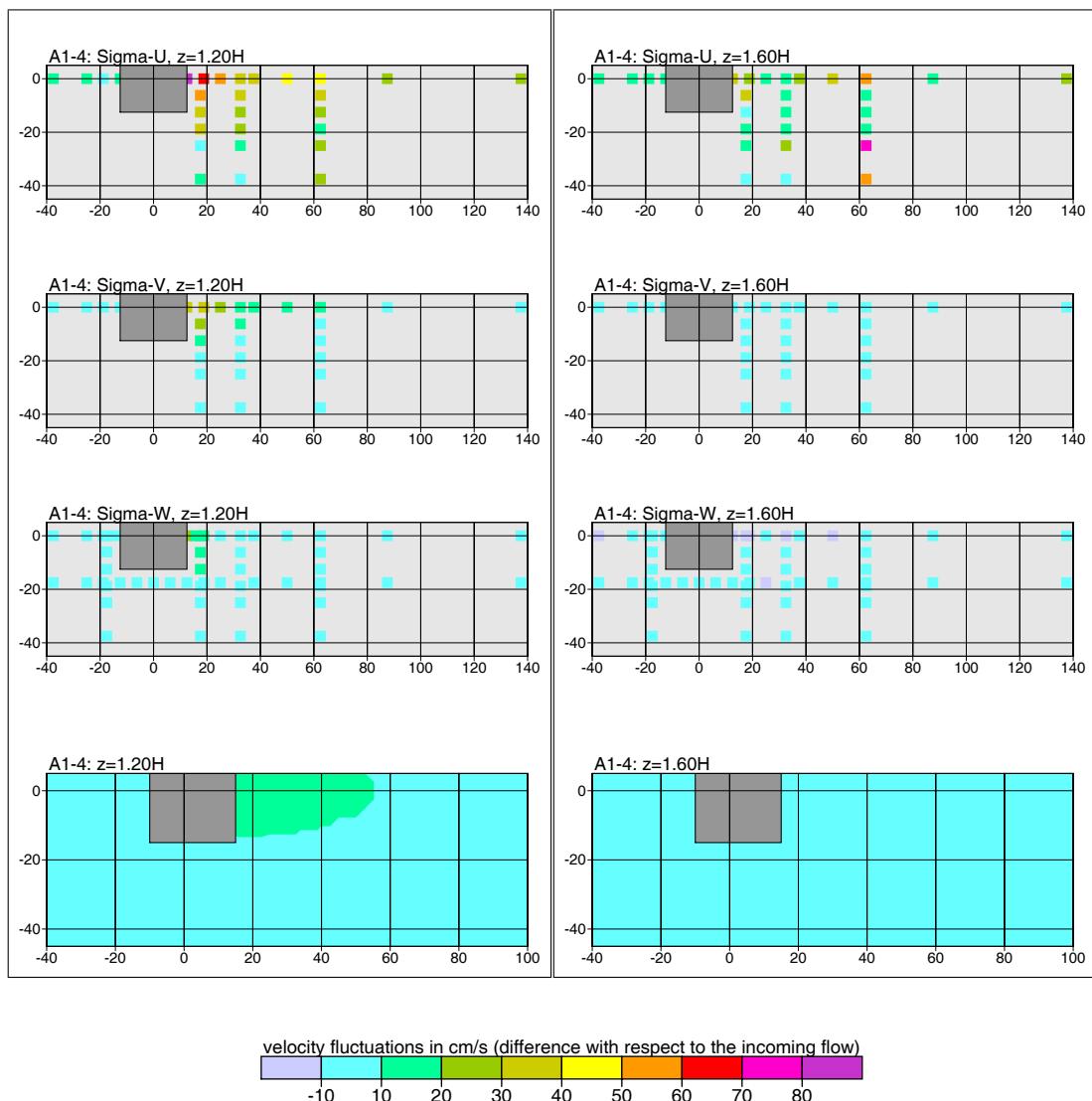


ABBILDUNG 31: Datensatz A1-4, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes. In jeder Spalte zeigen die oberen drei Teilbilder die gemessenen Werte, das unterste Teilbild das Modellergebnis.

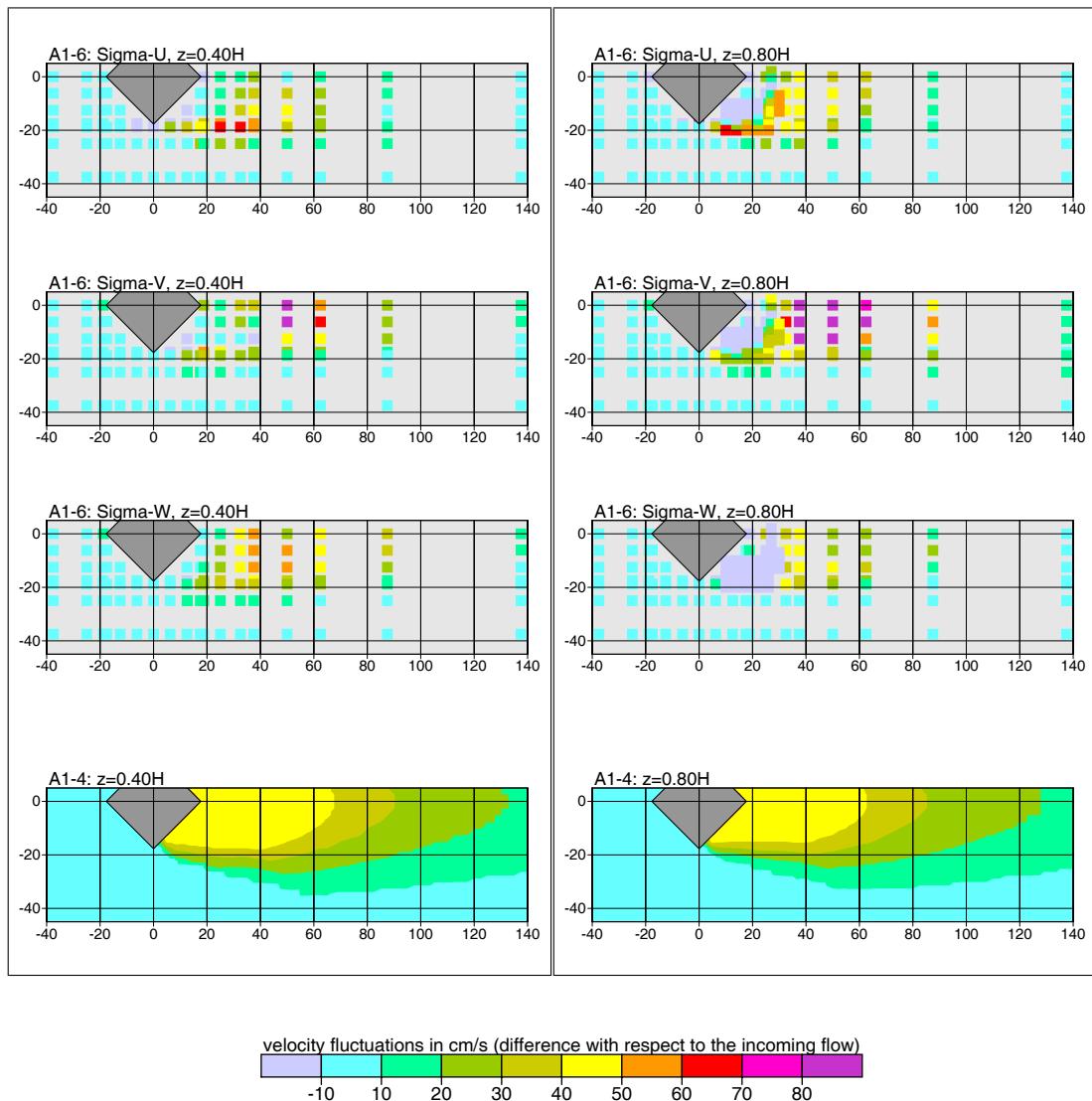


ABBILDUNG 32: Datensatz A1-6, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes. In jeder Spalte zeigen die oberen drei Teilbilder die gemessenen Werte, das unterste Teilbild das Modellergebnis.

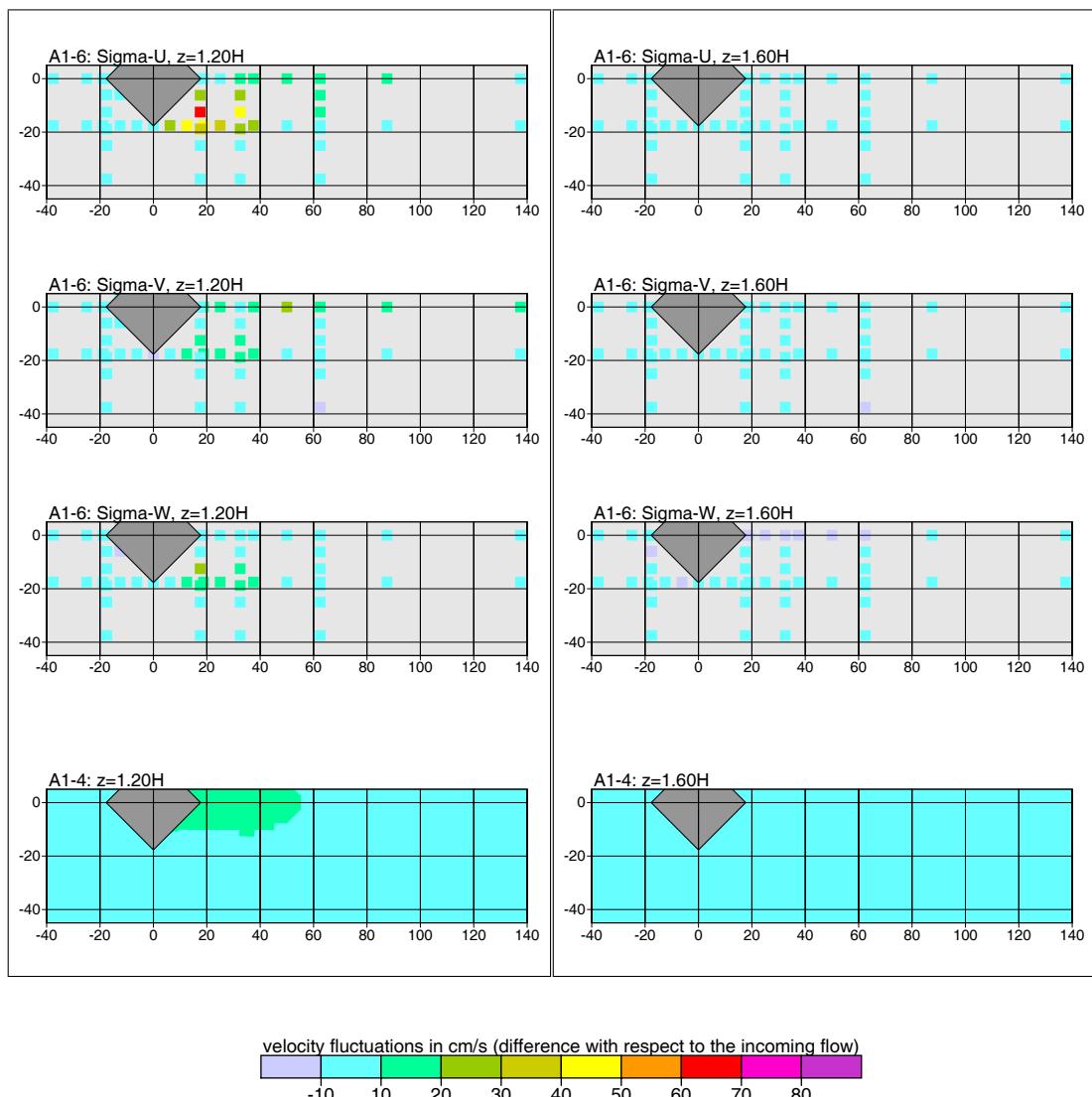


ABBILDUNG 33: Datensatz A1-6, Differenz der Geschwindigkeitsfluktuationen bezüglich des Anströmfeldes. In jeder Spalte zeigen die oberen drei Teilbilder die gemessenen Werte, das unterste Teilbild das Modellergebnis.

4.3.2 Kühlurm (KKW Emsland)

In einem Projekt zur Prüfung des Kühlurmefusses beim Kernkraftwerk Emsland (SCHATZMANN & LOHMEYER, 1991) wurden im Windkanal Windfeldmessungen und Ausbreitungsexperimente für einen 152 m hohen Kühlurm mit 80 m Durchmesser und einen etwa 340 m hiervon entfernten Kamin mit einer Höhe von 160 m durchgeführt. Es wurden auch die Geschwindigkeitsfluktuationen mit und ohne Kühlurm bestimmt.

Tabelle 1 zeigt die Änderungen der Fluktuationen im Vergleich zum Nullfall ohne Kühlurm. Die Anströmgeschwindigkeit beträgt 23 m/s in 80 m Höhe.¹⁴ Dargestellt sind die Fluktuationen für verschiedene Entferungen x vom Kamin, der im Ursprung des Koordinatensystems liegt (die Entfernung vom Kühlurm ist jeweils $\hat{x} = x - 340$ m), Abstände y von der Mittelachse (-200 m, -100 m, 0 m, 100 m, 200 m) und Höhen z über dem Erdboden.

Vergleiche mit entsprechenden Modellergebnissen sind in Bild 34 dargestellt für die Höhen 40 m und 120 m, in der Höhe 200 m sind die modellierten Fluktuationen auf 0 abgefallen. So weit es sich angesichts der starken Meßwertschwankungen beurteilen lässt, sind die Ausdehnung von gemessener und modellierter Verteilung von der gleichen Größe. In Gebäudenähe ($\hat{x} = 160$ m) werden vom Modell höhere Werte ausgewiesen.

¹⁴Die Zahlenwerte wurden aus den Angaben im Bericht JANICKE (1992) für eine Anströmrichtung von 120 Grad bestimmt.

TABELLE 1: Windkanalversuche zum KKW Emsland. Gemessene Veränderung der Geschwindigkeitsfluktuationen gegenüber dem Nullfall in cm/s für verschiedene Entferungen \hat{x} vom Kühlurm, Abstände von der Mittelachse (-200 m bis 200 m) und Höhen über Grund (z).

$x = 500 \text{ m}, \hat{x} = 160 \text{ m}$															
$z \text{ (m)}$	$\Delta\sigma_u$					$\Delta\sigma_v$					$\Delta\sigma_w$				
	-200	-100	0	100	200	-200	-100	0	100	200	-200	-100	0	100	200
400	-30	6	6	8	18	15	8	6	8	-5	5	13	3	11	6
200	19	10	28	17	2	13	-2	21	27	26	13	3	8	24	3
120	-14	17	175	100	25	2	17	259	30	7	2	20	171	70	6
80	19	86	148	102	10	12	8	121	73	29	5	30	72	81	23
40	24	65	121	136	33	11	15	84	43	-6	25	75	87	96	21
$x = 1000 \text{ m}, \hat{x} = 660 \text{ m}$															
$z \text{ (m)}$	$\Delta\sigma_u$					$\Delta\sigma_v$					$\Delta\sigma_w$				
	-200	-100	0	100	200	-200	-100	0	100	200	-200	-100	0	100	200
400	2	11	5	-2	-11	-18	9	-2	4	7	-6	1	4	6	0
200	12	-6	20	27	12	-5	17	39	20	-6	-10	23	4	13	14
120	-10	97	19	28	19	-17	36	77	51	9	-13	45	77	62	13
80	56	68	19	-4	19	-1	37	70	53	11	6	59	85	59	16
40	25	10	-1	-49	-6	16	19	28	7	14	-2	19	33	2	22
$x = 1500 \text{ m}, \hat{x} = 1160 \text{ m}$															
$z \text{ (m)}$	$\Delta\sigma_u$					$\Delta\sigma_v$					$\Delta\sigma_w$				
	-200	-100	0	100	200	-200	-100	0	100	200	-200	-100	0	100	200
400	33	11	0	24	23	16	5	8	11	9	15	9	-1	7	14
200	25	21	15	58	27	10	12	58	56	26	17	18	26	30	26
120	96	29	4	20	39	13	34	50	75	33	22	37	54	58	22
80	65	-11	-7	-53	52	24	56	31	42	16	26	40	33	31	38
40	35	-3	14	-21	9	23	28	27	2	7	11	17	19	7	10

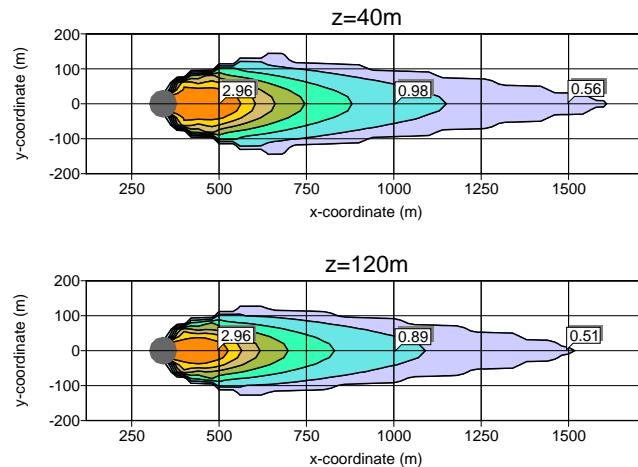


ABBILDUNG 34: Windkanalversuche zum KKW Emsland. Modellierte Erhöhung der Geschwindigkeitsfluktuationen aufgrund des Kühlurms in den Höhen 40 m und 120 m. Die Lage des Kühlurms ist als grauer Kreis gekennzeichnet ($z_0 = 1,5 \text{ m}$, $d_0 = 9 \text{ m}$, $u_A = 23 \text{ m/s}$, $h_A = 80 \text{ m}$, $\Delta x = 20 \text{ m}$, $\Delta z = 10 \text{ m}$).

4.4 Validierung der Konzentrationsverteilungen

4.4.1 U-förmiges Gebäude

Für das U-förmige Gebäude (siehe Abschnitt 4.2.2) wurden für verschiedene Anströmrichtungen r_a und Gebäudehöhen H Konzentrationsmessungen durchgeführt. Die Quelle befand sich jeweils an drei unterschiedlichen Positionen:

Position	x (m)	y (m)	z
A (auf dem Dach)	0	0	$H + 2$ m
B (im Innenhof)	20	0	2 m
C (vor der Grundseite)	-20	0	2 m

Es wurden folgende Fälle nachgerechnet ($u_A = 5$ m/s, $h_A = 10$ m, $z_0 = 0,2$ m, $d_0 = 1,2$ m, $\Delta x = 4$ m, $\Delta z = 3$ m, indifferente Schichtung, Quellstärke $Q = 5$ g/s):

Gebäudehöhe H (m)	Anströmrichtung r (Grad)	Originalkennung (Quelle A)
28	180	ch28qaw000
28	225	ch28qaw045
28	270	ch28qaw090
28	300	ch28qaw120
28	315	ch28qaw135
16	225	ch28qaw045
16	0	ch28qaw180
40	180	ch28qaw000
40	225	ch28qaw045
40	0	ch28qaw180

In den Bildern 35 bis 40 werden die gemessenen Konzentrationsverteilungen (farbige Kästchen) den berechneten (Hintergrund) gegenübergestellt. Dargestellt ist die normierte Konzentration $C = cu_A/Q$ in der bodennahen Schicht.

Der Vergleich von gemessenen und berechneten Konzentrationen zeigt meist keine grund-sätzlichen Unterschiede in den Verteilungen, im Mittel wird die gemessene Konzentration vom Modell eher leicht überschätzt. Eine Ausnahme bildet die Dachquelle bei hohen Gebäuden und einer Anströmrichtung von 225 Grad, hier wird die Fahne im Experiment bereits im Bereich des Innenhofes zum Boden transportiert, während sie in der Modellrechnung erst in größerer Entfernung und größerer Verdünnung zum Boden gelangt. Bei schräger Anströmung wird die modellierte Fahne zum Teil nicht genügend in den Rezirkulationsbereich eingemischt (siehe z.B. Bild 36 links unten), was auf ein zu schmales Rezirkulationsfeld zurückgeführt werden kann (vgl. Bild 14).

Um den Einfluß der Zusatzfelder von Geschwindigkeitsfluktuationen und Diffusionskoeffizienten auf die Konzentrationsverteilung zu demonstrieren, wurden in einem getrennten Lauf die Rechnungen für die Gebäudehöhe 28 m ohne Zusatzfelder durchgeführt, die Ergebnisse sind in Bild 41 bis Bild 43 dargestellt. Die kleinere Gesamtturbulenz führt auf eine geringere horizontale und vertikale Durchmischung der Konzentrationsfahne mit der Umgebungsluft, so daß sich schmalere Konzentrationsfahnen ergeben. Für die Dachquelle führt dies auf niedrigere, für die bodennahe Quelle auf höhere Konzentrationswerte. Die Übereinstimmung mit den Meßwerten fällt ohne Berücksichtigung der Zusatzfelder schlechter aus.

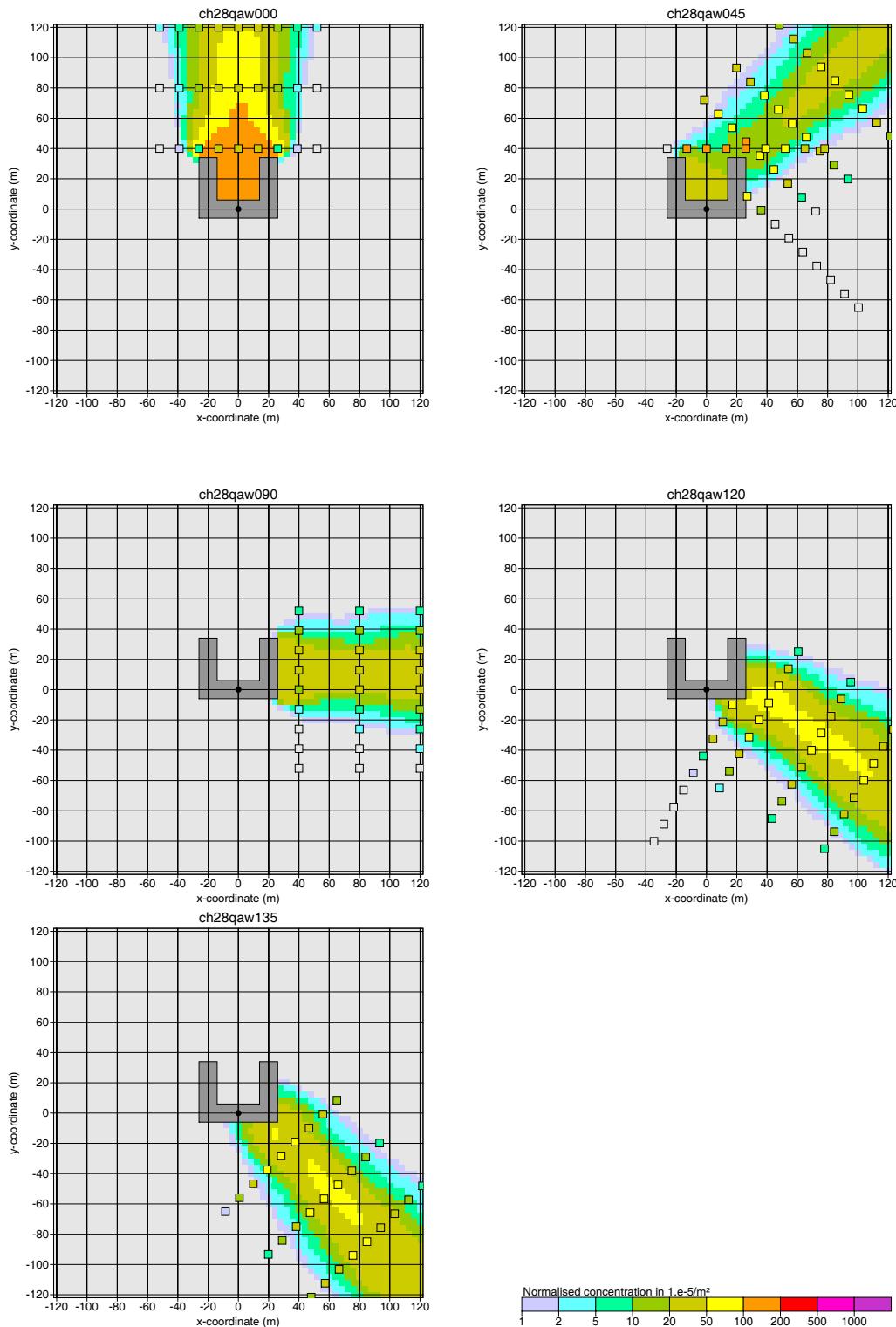


ABBILDUNG 35: Bodennah Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28$ m) und verschiedene Anströmrichtungen (Hintergrund: Modellrechnung, Kästchen: Windkanal-messung). Quelle A (grauer Punkt).

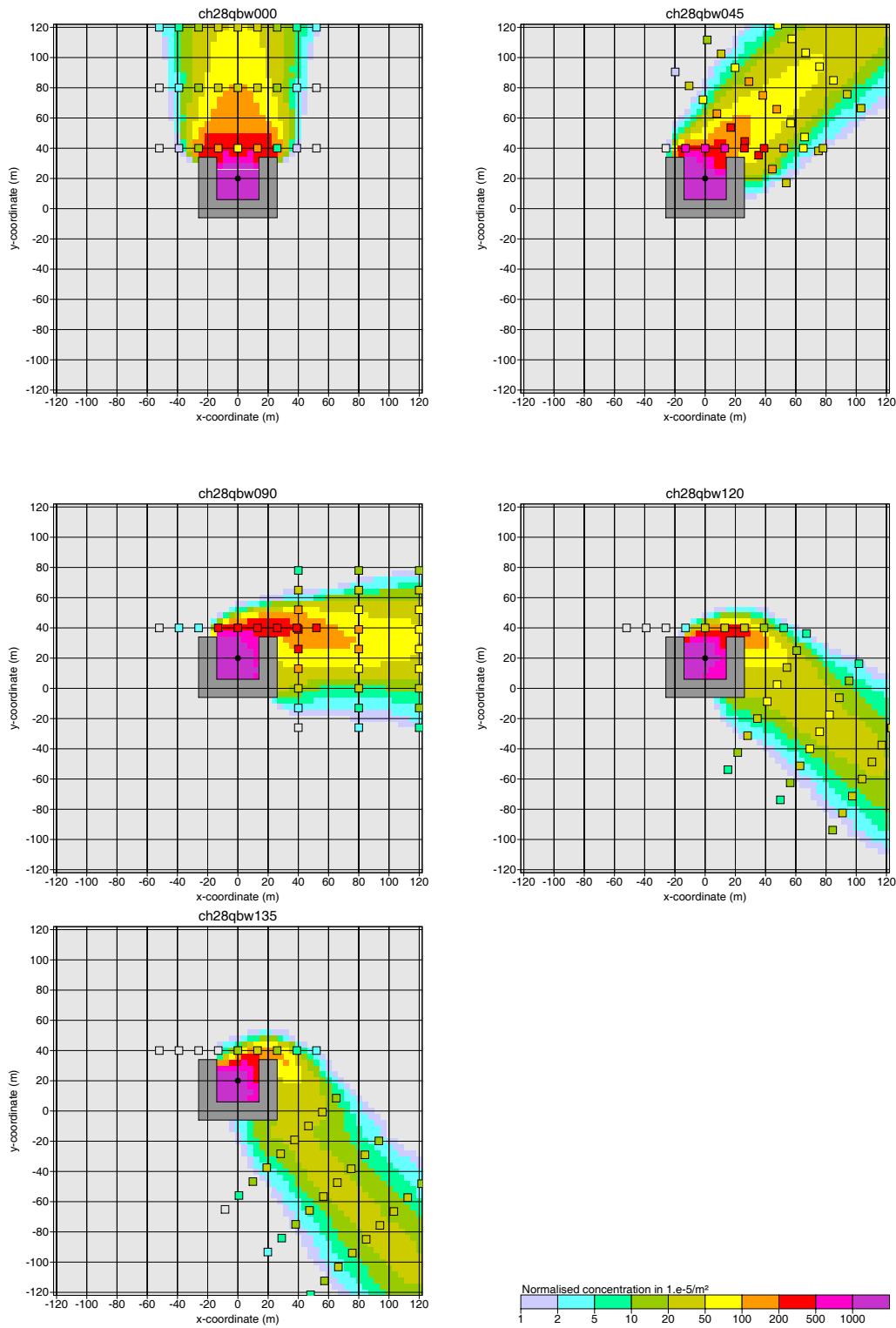


ABBILDUNG 36: Bodennähe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28 \text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen (Hintergrund: Modellrechnung, Kästchen: Windkanal-messung). Quelle B (grauer Punkt).

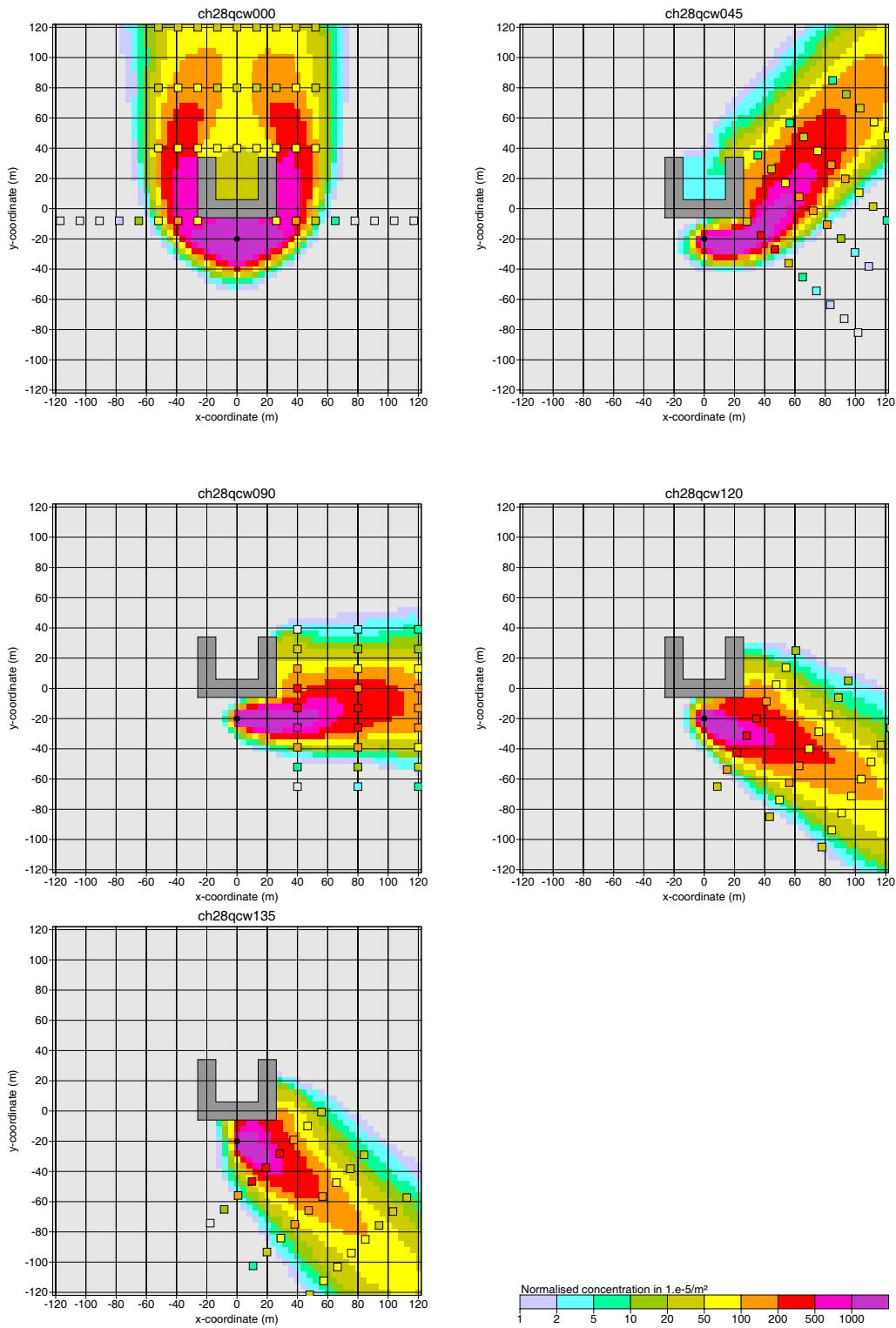


ABBILDUNG 37: Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28$ m) und verschiedene Anströmrichtungen (Hintergrund: Modellrechnung, Kästchen: Windkanal-messung). Quelle C (grauer Punkt).

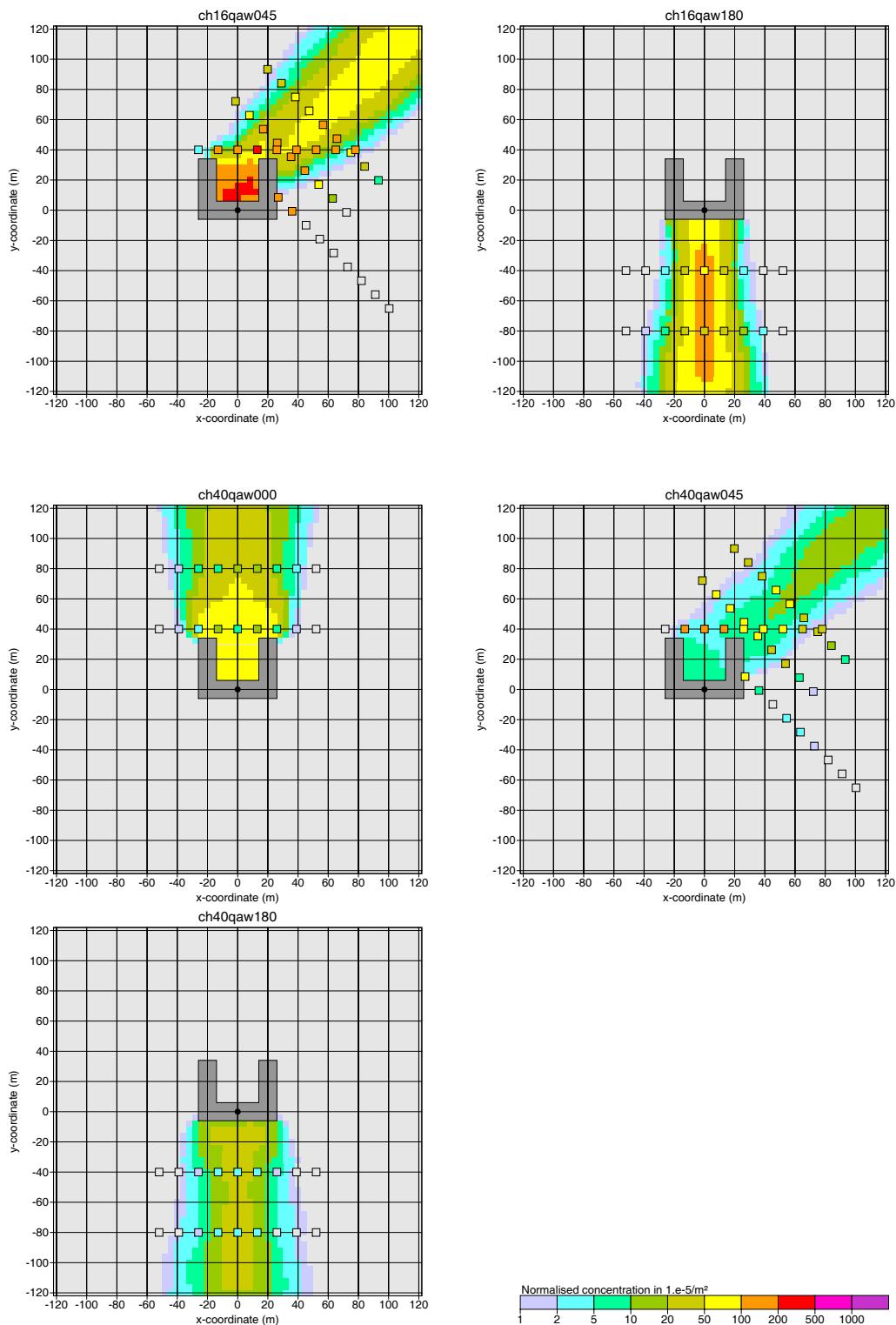


ABBILDUNG 38: Bodennähe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude (oben: $H = 16\text{ m}$, Mitte und unten: $H = 40\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen (Hintergrund: Modellrechnung, Kästchen: Windkanalmessung). Quelle A (grauer Punkt).

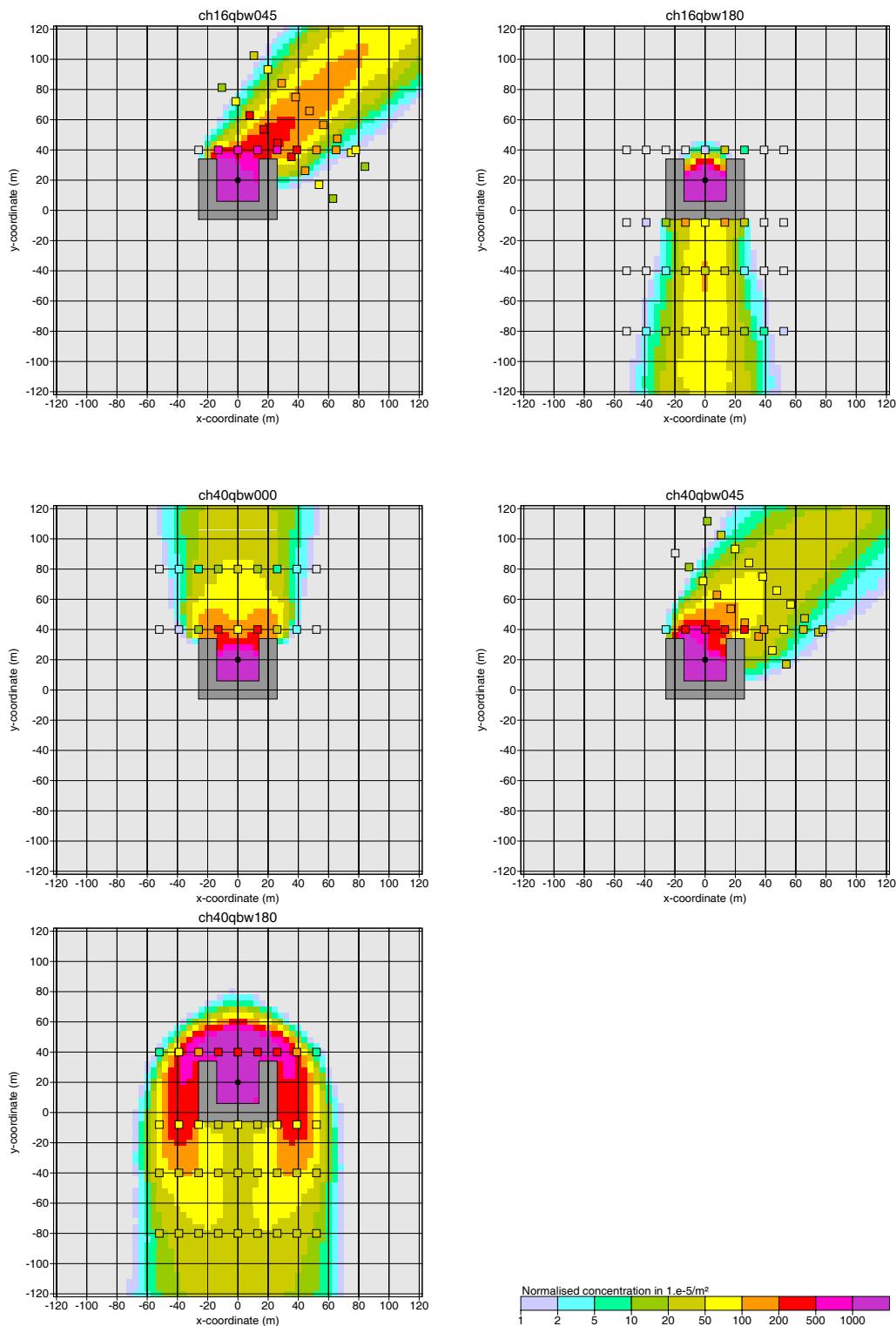


ABBILDUNG 39: Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude (oben: $H = 16\text{ m}$, Mitte und unten: $H = 40\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen (Hintergrund: Modellrechnung, Kästchen: Windkanalmessung). Quelle B (grauer Punkt).

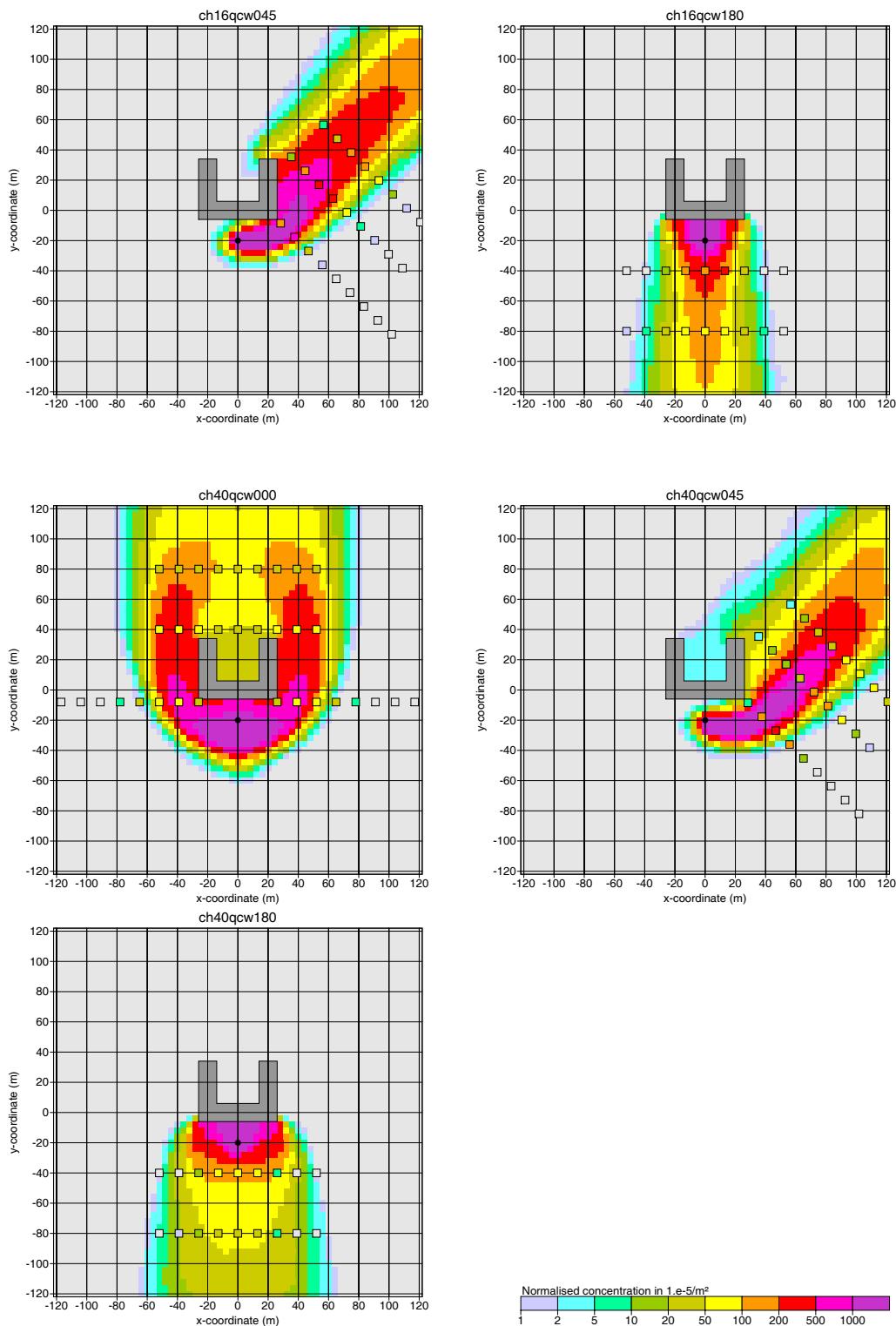


ABBILDUNG 40: Bodennähe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude (oben: $H = 16\text{ m}$, Mitte und unten: $H = 40\text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen (Hintergrund: Modellrechnung, Kästchen: Windkanalmessung). Quelle C (grauer Punkt).

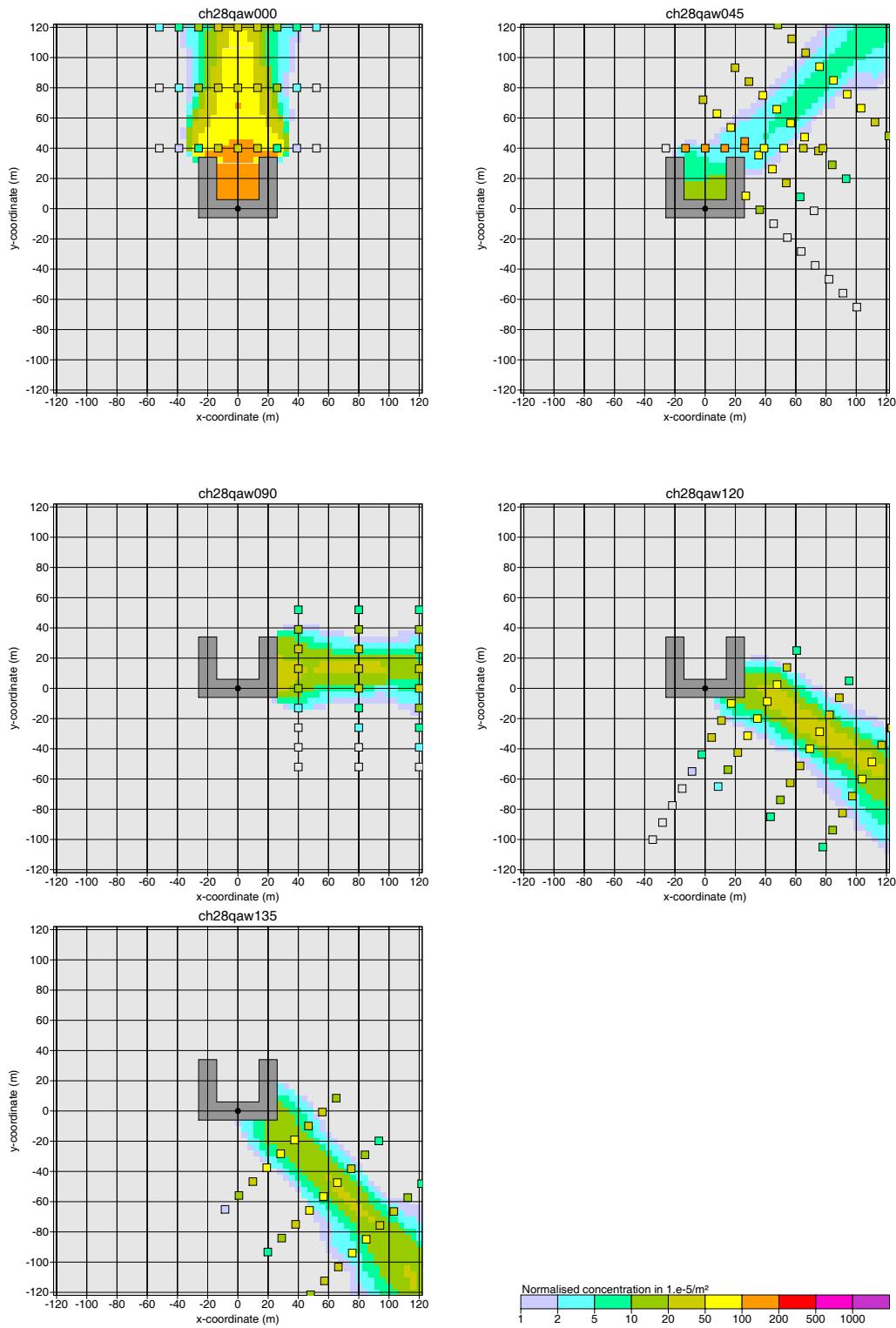


ABBILDUNG 41: Testrechnung ohne Zusatzturbulenz: Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28$ m) und verschiedene Anströmrichtungen (Hintergrund: Modellrechnung, Kästchen: Windkanalmessung). Quelle A (grauer Punkt).

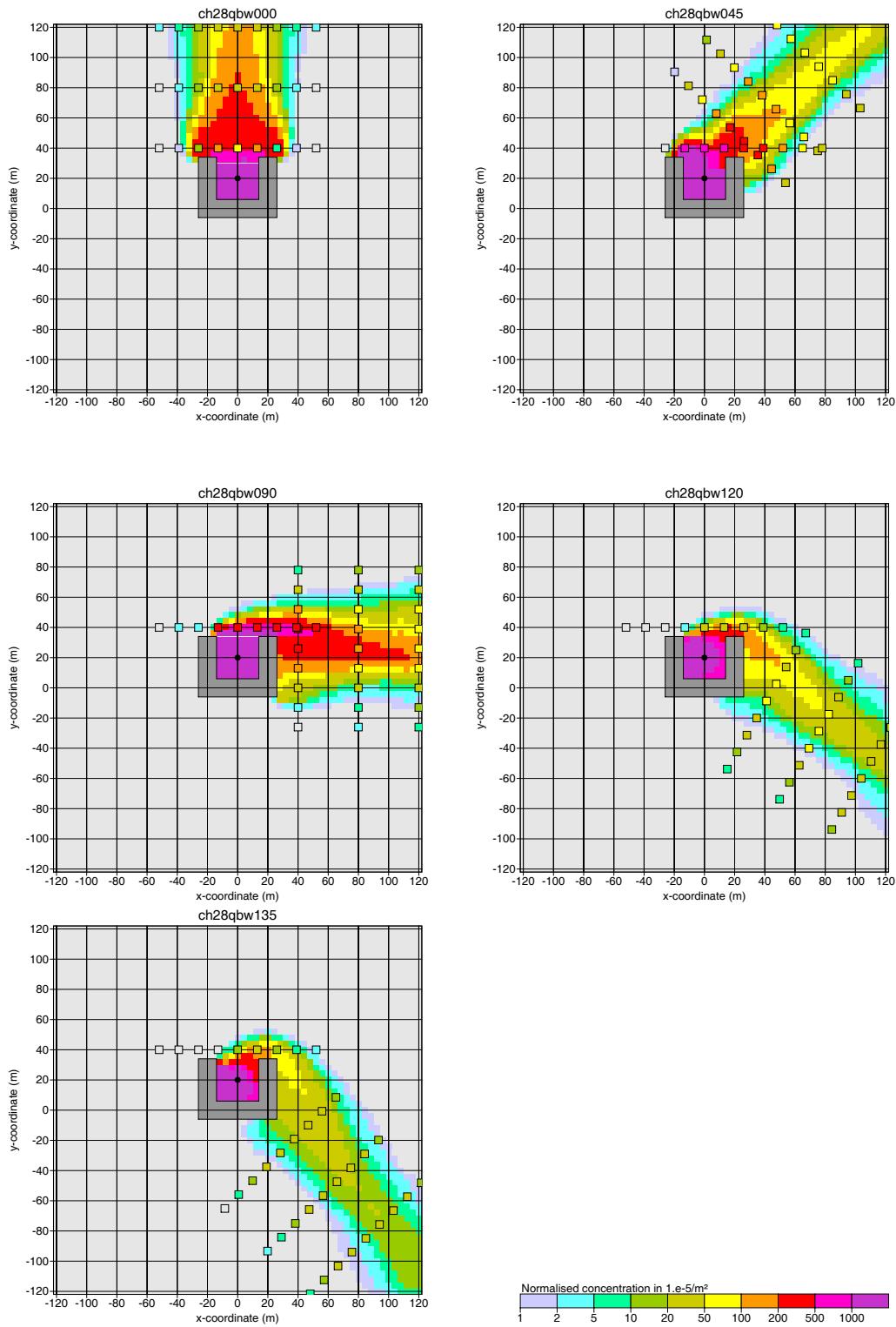


ABBILDUNG 42: Testrechnung ohne Zusatzturbulenz: Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28$ m) und verschiedene Anströmrichtungen (Hintergrund: Modellrechnung, Kästchen: Windkanalmessung). Quelle B (grauer Punkt).

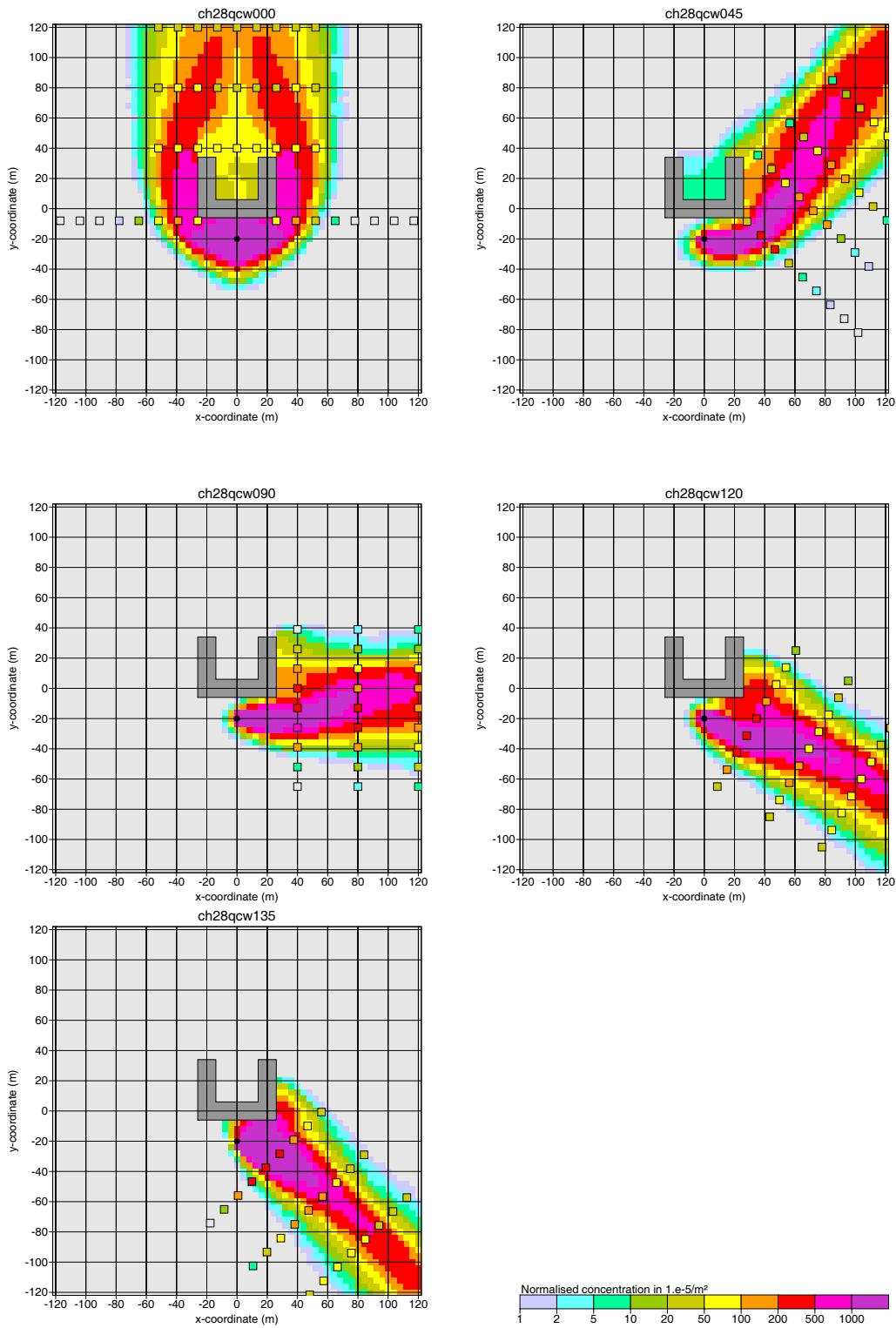


ABBILDUNG 43: Testrechnung ohne Zusatzturbulenz: Bodennahe Konzentrationsverteilung für ein U-förmiges Gebäude ($H = 28 \text{ m}$) und verschiedene Anströmrichtungen (Hintergrund: Modellrechnung, Kästchen: Windkanalmessung). Quelle C (grauer Punkt).

4.4.2 Kühlerturm (KKW Emsland)

Aus den Konzentrationsmessungen im Windkanal zum KKW Emsland (siehe Abschnitt 4.3.2) ergaben sich folgende Hauptresultate (SCHATZMANN & LOHMEYER, 1991):

- Im Nullfall (ohne Gebäude oder Kühlerturm) tritt das bodennahe Konzentrationsmaximum der 160 m hohen Quelle in einer Entfernung von etwa 1700 m auf.
- Bei Anwesenheit eines Kühlerturms mit der Höhe 152 m und dem Durchmesser 80 m ist das bodennahe Konzentrationsmaximum, wenn die Quelle etwa im Luv des Kühlerturms steht (Windrichtung 120 Grad), um einen Faktor 1,5 erhöht und um einen Faktor 1,7, wenn die Quelle im Lee des Kühlerturms steht (Windrichtung etwa 295 Grad). Das Konzentrationsmaximum am Erdboden tritt in beiden Fällen in einer Quellentfernung von 1000 m bis 1100 m auf.

Bei einem Vergleich mit den Windkanaldaten sollte beachtet werden, daß bereits im Nullfall ohne Gebäude in den Messungen ein nicht verstandener vertikaler Fahnenversatz auftrat (Janicke, 1992), der sich in den Modellrechnungen durch eine Reduktion der Quellhöhe berücksichtigen ließ (130 m statt 160 m). Diese angepaßte Quellhöhe wurde auch in den folgenden Vergleichsrechnungen verwendet. Außerdem wurden die Standard-Grenzschichtprofile benutzt, ohne weiter auf die Besonderheiten des Windkanals einzugehen (Janicke, 1992).

Bild 44 und Bild 45 zeigt die bodennahe Konzentrationsverteilung für die Anströmrichtungen 120 Grad und 295 Grad, einmal ohne und einmal mit Kühlerturm. Die Quelle befindet sich in 340 m Entfernung vom Kühlerturm. Die x -Achse verläuft entlang der Windrichtung von 116 Grad, bei der der Kühlerturm genau im Lee der Quelle liegt. Der blaue Punkt gibt die Quellposition, der graue Kreis die Lage des Kühlerturms an. Mit eingetragen ist der Wert und die Lage der bodennahen Konzentrationsmaxima ($u_A = 2,4 \text{ m/s}$, $h_A = 80 \text{ m}$, $z_0 = 1,5 \text{ m}$, $d_0 = 9 \text{ m}$, $\Delta x = 20 \text{ m}$, $\Delta z = 20 \text{ m}$).¹⁵

In guter Übereinstimmung mit den Windkanalmessungen liegt das bodennahe Konzentrationsmaximum im Nullfall in einer Quellentfernung von etwa 2000 m, im Fall mit Kühlerturm in einer von etwa 1000 m und der Verstärkungsfaktor liegt für die Anströmungsrichtungen 120 Grad und 295 Grad bei 1,4 bzw. 1,6.

Ohne Berücksichtigung der Zusatzfelder für Diffusion und Geschwindigkeitsfluktuationen liegt der Verstärkungsfaktor bei etwa 1, die Erhöhung der Maximalkonzentration am Erdboden wird für die betrachtete Situation also in erster Linie von der erhöhten Turbulenz im Lee des Kühlerturms verursacht.

¹⁵Im Prinzip ergeben sich im Nullfall für beide Anströmrichtungen identische Verteilungen. Die etwas unterschiedliche Lage und Höhe der Maximalkonzentration ist auf die statistische Unsicherheit der Ergebnisse zurückzuführen (etwa 2 %).

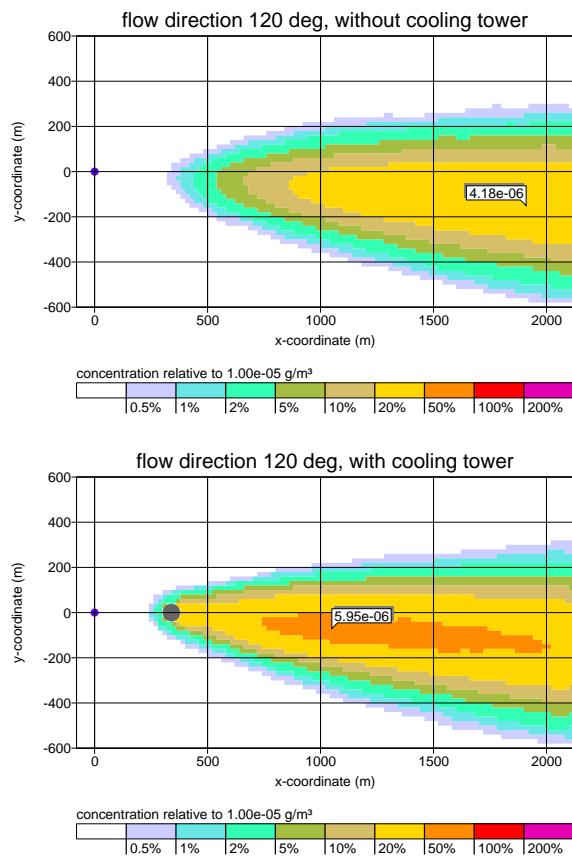


ABBILDUNG 44: KKW Emsland, Konzentrationsverteilung für die Anströmrichtung 120 Grad. Oben: Nullfall ohne Kühlurm. Unten: Mit Kühlurm. Die Textfelder kennzeichnen die jeweiligen Konzentrationsmaxima.

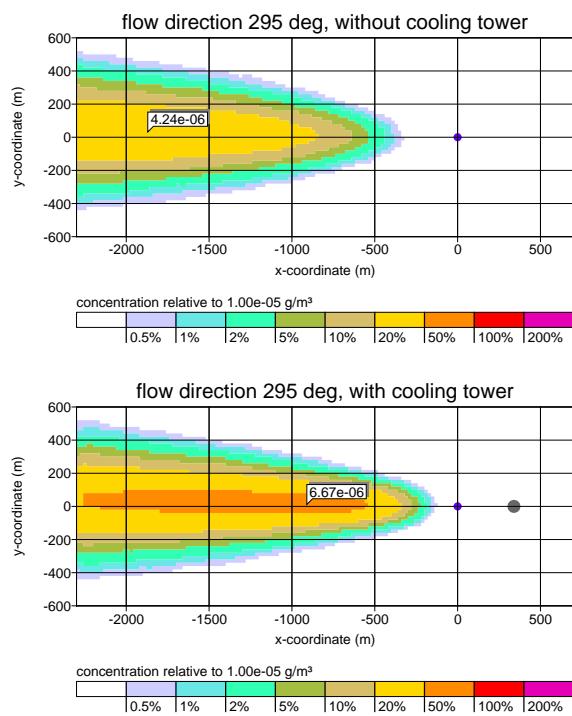


ABBILDUNG 45: KKW Emsland, Konzentrationsverteilung für die Anströmrichtung 295 Grad. Oben: Nullfall ohne Kühlurm. Unten: Mit Kühlurm. Die Textfelder kennzeichnen die jeweiligen Konzentrationsmaxima.

4.4.3 CEDVAL-Datensatz D1-4 (Uttenweiler)

Der CEDVAL-Datensatz D1-4 enthält Daten zu Konzentrationsmessungen, die im Windkanal der Universität Hamburg im Rahmen eines BWPLUS-Projektes (Geruchsbegehung an einer Stallanlage in Uttenweiler) durchgeführt wurden (BÄCHLIN ET AL., 2002; LEITL ET AL., 2002).

Im Windkanal wurde die Konzentrationsverteilung eines Spurengases bestimmt, das aus zwei Abluftkaminen SI und SII auf dem Dach eines Schweinestalls freigesetzt wurde. An einer Seite des Schweinestalls befand sich ein etwas höheres Futterlagerhaus. Die Lage der Gebäude, der Quellen und des Koordinatensystems sind in Bild 46 dargestellt. Für die Ausbreitungsrechnungen wurde eine Quellhöhe von 8,5 m angenommen, die Höhen der Gebäude wurden gleich der Firsthöhen gesetzt (in gerundeten Werten 8 m für den Schweinestall und 10 m für das Futterhaus).¹⁶

Für eine senkrechte Anströmung aus Richtung des Futterhauses wurde im Lee des Schweinestalls in den Entferungen $x = 50$ m und $x = 100$ m von Quelle SII die Maximalkonzentration quer zur Fahne für verschiedene Höhen gemessen, wobei einmal die Quelle SI, einmal die Quelle SII und einmal beide Quellen mit gleicher Quellstärke eingeschaltet waren.

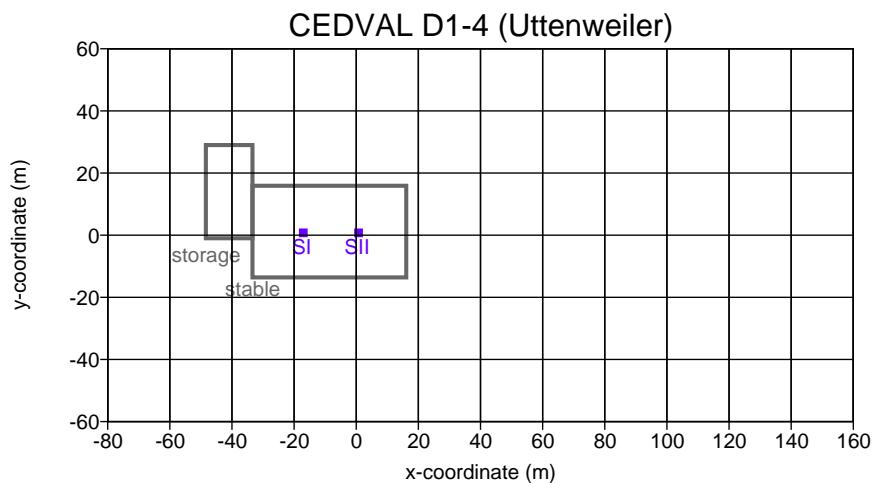


ABBILDUNG 46: Lage der Gebäude und Quellen für die Ausbreitungsrechnung zum Datensatz D1-4 (Uttenweiler).

Bild 47 zeigt die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung ($u_A = 3$ m/s, $h_A = 10$ m, $z_0 = 0,06$ m, $d_0 = 0$ m, $\Delta x = 3$ m, $\Delta z = 2$ m, Austrittsgeschwindigkeit 3 m/s, Quelldurchmesser 1,5 m). Zusätzlich aufgeführt sind in der mittleren Grafik die Modellergebnisse für die Entfernung $x = 75$ m. Die Rauten zeigen die Windkanalmessungen, die Balken die Modellergebnisse

¹⁶Die Angaben zu den Quell- und Firsthöhen unterscheiden sich in den beiden aufgeführten Forschungsberichten. Die hier gewählten Werte sind konsistent mit dem Bericht des meteorologischen Instituts der Universität Hamburg, der nach Rückfrage die korrekten Werte enthält. In dem Bericht sind andererseits die Zuordnungen der Kaminbezeichnungen SI und SII nicht konsistent mit den Dokumentationen und Werten im CEDVAL-Datensatz D1-4. Nach Rückfrage sind die Angaben im CEDVAL-Datensatz korrekt, sie wurden hier übernommen.

(rot: Quelle SI, grün: Quelle SII, blau: beide Quellen). Aufgetragen ist die mit der Konzentration an der Quellöffnung (C_s) normierte Maximalkonzentration (C_m). C_s wurde in der Ausbreitungsrechnung aus den vorgegebenen Werten von Quellstärke, Austrittsgeschwindigkeit und Quelldurchmesser bestimmt.

In den Windkanal-Messungen erreicht die Konzentration am Boden ihr Maximum in einer Entfernung von etwa 50 m, in der Modellrechnung in etwa 80 m Entfernung. Sowohl im Windkanal als auch in der Modellrechnung liefert die Lee-seitige Quelle SII etwas höhere Konzentrationswerte. Für die Unterschiede zwischen Messung und Rechnung können folgende Aspekte eine Rolle spielen:

- Es ist nicht klar, wie genau die verwendeten Überhöhungsformeln nach VDI 3782 Blatt 3 den betrachteten Fall einer kalten Quelle beschreiben. Mit dem detaillierteren Überhöhungsmodell PLURIS ergibt sich ein etwas anderer Verlauf der Fahnenachse. Daneben wird in der Rechnung die Überhöhung unabhängig vom lokalen Wind- und Turbulenzfeld behandelt.
- In der Rechnung werden die Dachneigungen vernachlässigt.
- Das Grenzschichtprofil nach VDI 3783 Blatt 8 liefert für den betrachteten Fall (niedrige Quellhöhe, kleine Rauhigkeitslänge) bekanntermaßen zu schmale Fahnen.

Da der letzte Aspekt vermutlich den größten Einfluß auf die Konzentrationsverteilung hat, wurde zum Vergleich eine Rechnung mit dem Standard-Grenzschichtprofil von LASAT durchgeführt, das für den betrachteten Fall realistischere Fahnenbreiten liefert.¹⁷ Die Ergebnisse in Bild 48 zeigen, daß in Kombination mit diesem Grenzschichtprofil die Ergebnisse von Messung und Rechnung in 100 m Entfernung fast genau übereinstimmen.

¹⁷Siehe Vergleich mit den Prairie-Grass-Experimenten in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 und dem BZU-Bericht Nr. 2 (JANICKE, L., JANICKE, U., 2000).

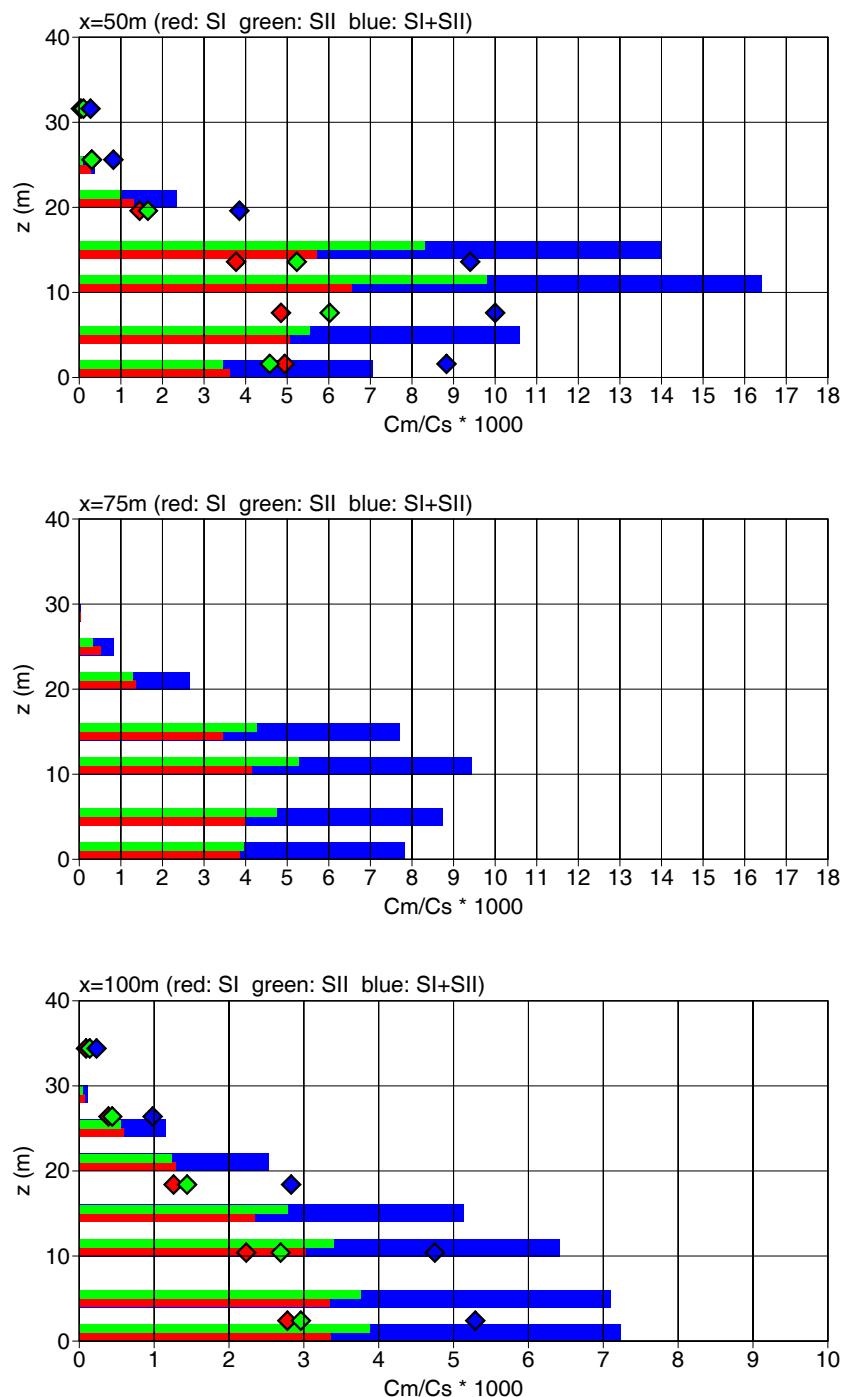


ABBILDUNG 47: Konzentrationsvergleich von Windkanalmessung (Rauten) und Ausbreitungsrechnung (Balken) für drei Entfernung von der Quelle SII.

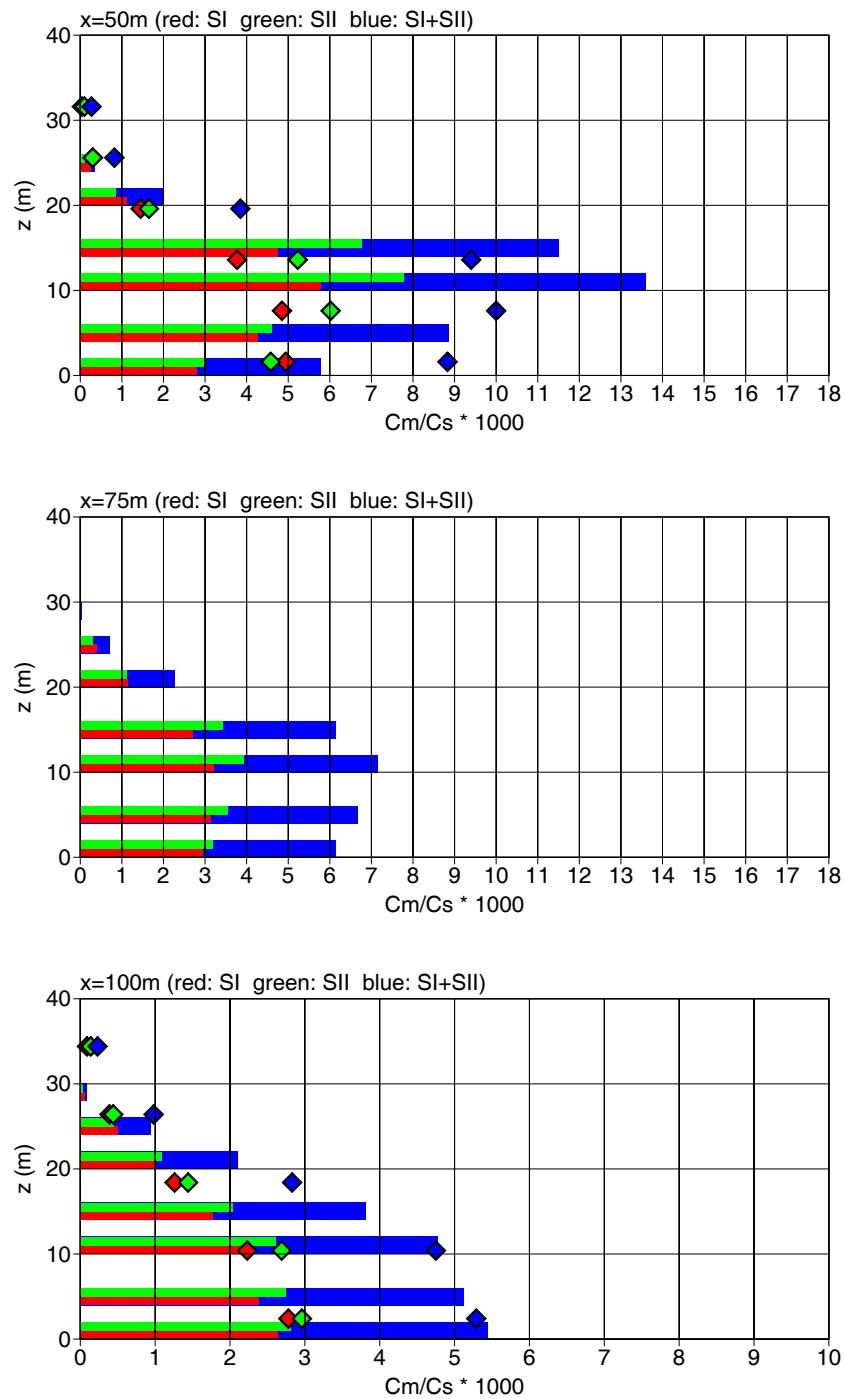


ABBILDUNG 48: Wie Bild 47, aber mit den Standard-Grenzschichtprofilen von LASAT anstelle der Profile aus VDI 3783 Blatt 8.

4.4.4 Vergleich mit MISKAM

Die bisherigen Konzentrationsvergleiche wurden für Quellhöhen durchgeführt, die außerhalb oder an der Grenze des vorgesehenen Anwendungsbereiches liegen. Für den eigentlichen Anwendungsbereich, also Quellhöhen zwischen dem 1,2-fachen und 1,7-fachen der Gebäudehöhen, standen keine experimentellen Validierungsdaten zur Verfügung. Um diese Lücke etwas auszufüllen, wurde eine Vergleichsrechnung mit dem prognostischen Windfeldmodell MISKAM (Version 4.22) durchgeführt.¹⁸ Die MISKAM-Felder wurden von Herrn Hartmann (LUA Essen) berechnet und zur Verfügung gestellt.

MISKAM bestimmt neben dem Windfeld auch das vollständige Feld der Diffusionskoeffizienten, das für die Ausbreitungsrechnung ebenfalls übernommen wurde. Angaben zu den Geschwindigkeitsfluktuationen werden von MISKAM nicht gemacht, hier wurde das ungestörte Grenzschichtprofil nach VDI 3783 Blatt 8 benutzt. Für den Vergleich wurden also folgende Turbulenzfelder verwendet:

Größe	MISKAM	DMK
Diffusionskoeffizienten	MISKAM	VDI 3783 Blatt 8 plus DMK-Zusatzfelder bei Gebäuden
Geschwindigkeitsfluktuationen	VDI 3783 Blatt 8	VDI 3783 Blatt 8 plus DMK-Zusatzfelder bei Gebäuden

Bereits ohne Gebäude (Nullfall) verwendet MISKAM etwas andere Diffusionskoeffizienten als die Richtlinie VDI 3783 Blatt 8. Bild 49 zeigt die bodennahe Konzentrationsverteilung, die sich für eine 25 m hohe Quelle mit den Grenzschichtprofilen von MISKAM und denen nach VDI 3783 Blatt 8 ergibt ($z_0 = 0,2 \text{ m}$, $d_0 = 0 \text{ m}$, $h_A = 50 \text{ m}$, $u_A = 5,17 \text{ m}$, $\Delta x = 5 \text{ m}$, $\Delta z = 3 \text{ m}$). Mit den Profilen von MISKAM erhält man eine schmalere Fahne, die quer zur Fahne integrierte bodennahe Konzentration stimmt in beiden Fällen etwa überein.

Für eine Ausbreitungsrechnung mit Gebäuden wurde eine komplexe Bebauungsstruktur betrachtet, die durch Zweifachspiegelung aus den Gebäudeangaben zur Venloerstraße (siehe Abschnitt 4.2.4) erzeugt wurde, siehe Bild 50. Die Höhen der aufgerasterten Gebäude liegen zwischen 3 m und 21 m, die mittlere Gebäudehöhe beträgt 9 m. Eine passive Quelle befindet sich einmal im Symmetriepunkt (175 m/175 m) und einmal im Bereich der südwestlichen Straßenschlucht (85 m/110 m), die Quellhöhe beträgt 25 m. Die maximale Gebäudehöhe in einem Umkreis von 6 Quellhöhen ist 21 m, die Quellhöhe beträgt damit gerade das 1,2-fache dieser Gebäudehöhe.

Die Wind- und Turbulenzfelder wurden jeweils für eine isotrope Windrose in 10-Grad-Schritten bestimmt und in der Ausbreitungsrechnung verwendet. In den Bildern 51 und 52 sind die Ergebnisse gegenübergestellt (Parameter wie im Nullfall). Für die Quelle im Symmetriezentrum liefern beide Modelle vergleichbare Maximalkonzentrationen, die hohen Konzentrationswerte sind in beiden Fällen vorwiegend im Bereich der Straßenschlucht loka-

¹⁸Jeweils ohne Drehung der Windrichtung mit der Höhe.

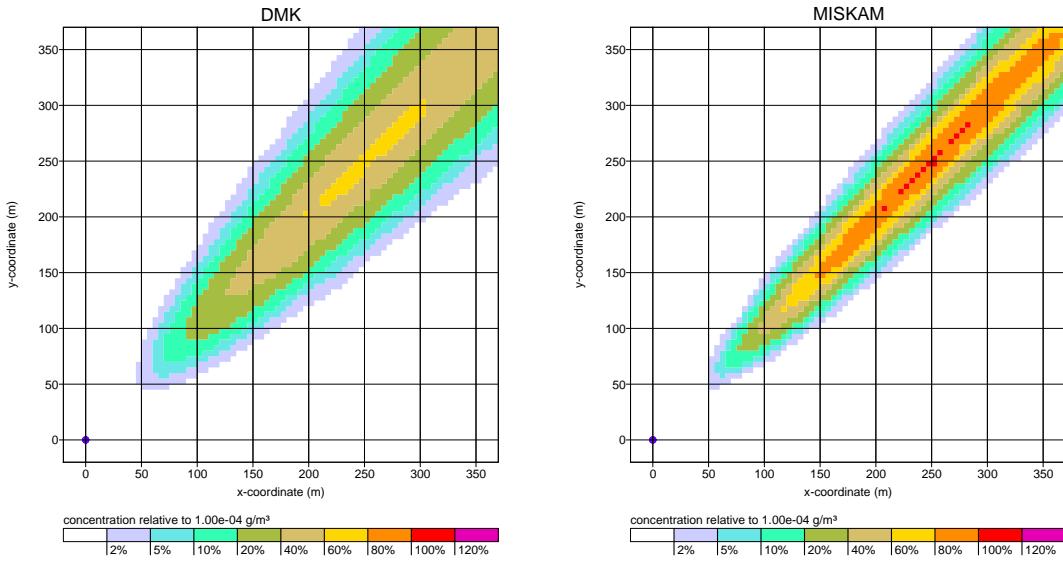


ABBILDUNG 49: Bodennahe Konzentrationsverteilung für den Nullfall ohne Gebäude und konstante Windrichtung bei Verwendung der Profile nach VDI 3783 Blatt 8 (links) und bei Verwendung der MISKAM-Profile (rechts).

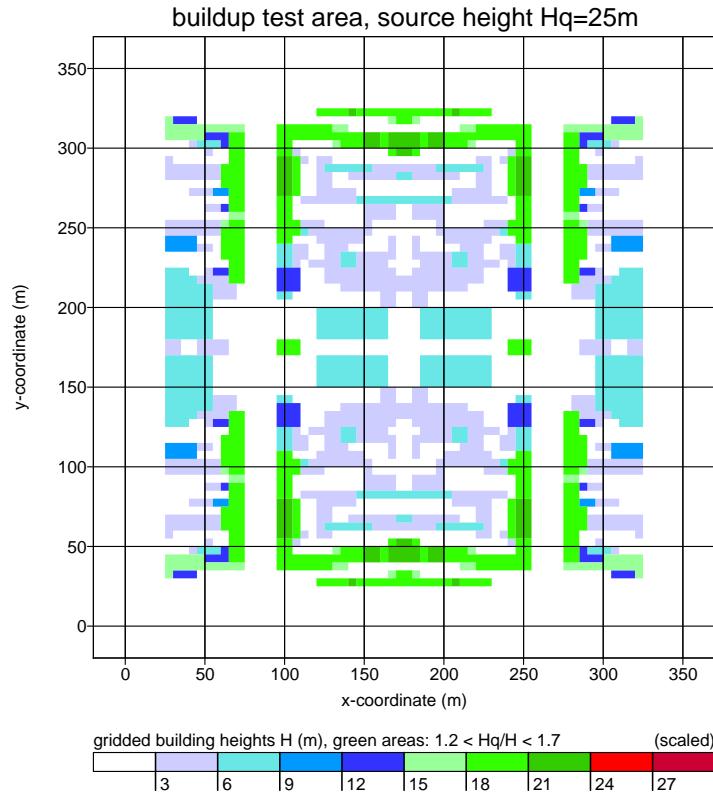


ABBILDUNG 50: Aufgerasterte Gebäudeumrisse für den Vergleich mit MISKAM ($\Delta x = 5$ m, $\Delta z = 3$ m).

lisiert. Im Detail zeigen die Konzentrationsverteilungen zum Teil unterschiedliche Strukturen.¹⁹ Für die Quelle in der südwestlichen Straßenschlucht ergibt sich mit dem vorliegenden Modell eine etwa 30 % höhere Maximalkonzentration als bei Verwendung der MISKAM-Felder; die hohen Konzentrationswerte befinden sich etwa im gleichen Raumbereich, auch wenn sich im Detail Unterschiede zeigen.

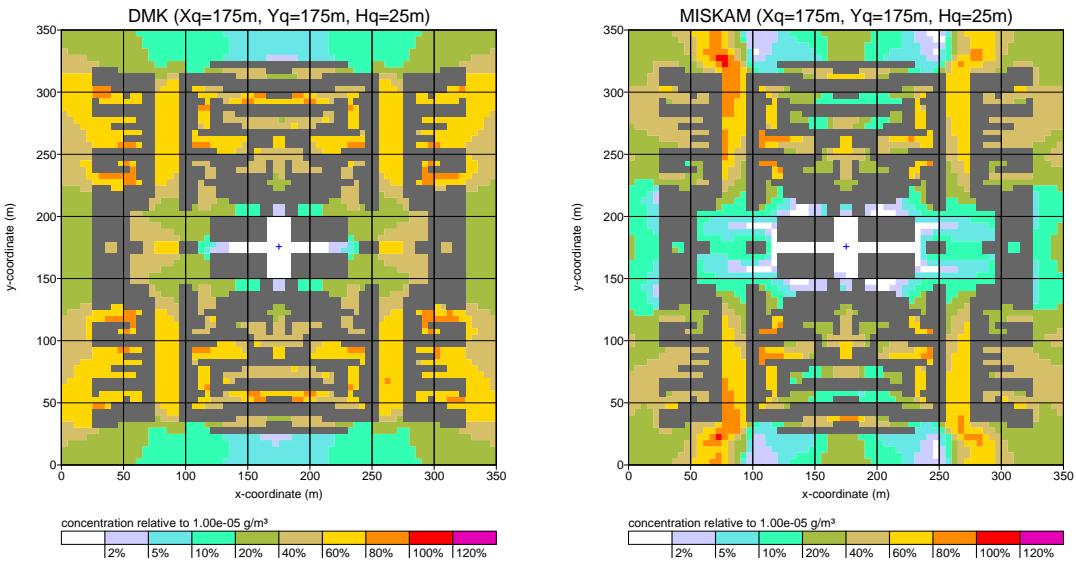


ABBILDUNG 51: Bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose, Quelle im Mittelpunkt des Rechengebietes. Links: Verwendung der Felder des vorliegenden Modellsatzes. Rechts: Verwendung der Felder von MISKAM.

¹⁹ Auffallend bei der Verwendung der MISKAM-Felder ist, daß sich trotz der symmetrischen Eingangssituation systematisch höhere Konzentrationswerte in der westlichen Straßenschlucht ergeben. Die Ursache hierfür wird noch untersucht.

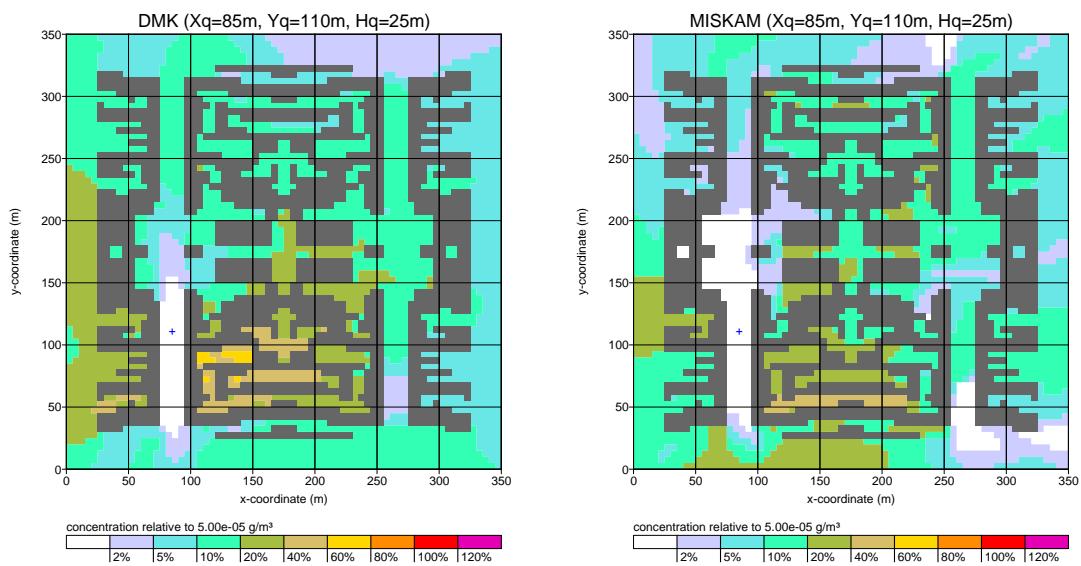


ABBILDUNG 52: Bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose, Quelle im Bereich der südwestlichen Straßenschlucht. Links: Verwendung der Felder des vorliegenden Modellansatzes. Rechts: Verwendung der Felder von MISKAM.

5 Übergang zu hohen Quellen

Die TA Luft gibt an, daß für eine Quellhöhe oberhalb des 1,7-fachen der Gebäudehöhen die Berücksichtigung der Bebauung durch Rauhigkeitslänge und Verdrängungshöhe anstelle der Verwendung eines diagnostischen Windfeldmodells ausreichend ist. Diesem Ansatz liegt die Vorstellung zugrunde, daß bei Freisetzungen deutlich oberhalb der Gebäude der Haupteinfluß der Bebauung auf die bodennahe Konzentration in einer verstärkten vertikalen Durchmischung liegt, die auch über eine erhöhte Bodenrauhigkeit erzeugt werden kann.

Betrachtet man Emissionen in der Nähe von einzelnen Gebäuden, dann ist der Einfluß der Bebauung umso kleiner, je weiter der Emissionsort oberhalb der Gebäude liegt, da die Fahnenaufweitung so immer stärker in dem nicht von den Gebäuden beeinflußten Raumbereichen stattfindet. Bei ausgedehnten Bebauungsstrukturen oder größeren Entfernungen zwischen Emissionsort und Gebäuden ist der Einfluß der Bebauung umso geringer, je homogener die ungestörte Abgasfahne innerhalb des Einflußgebietes der Gebäude verteilt ist. Schließlich ist der Einfluß der verstärkten Durchmischung aufgrund von Bebauung umso kleiner, je größer die bereits vorhandene Verdünnungsfähigkeit der Atmosphäre ist; sie ist umso größer, je instabiler die atmosphärische Schichtung und je größer die Bodenrauhigkeit ist.

Um diese Zusammenhänge und den Übergang vom Einsatz des diagnostischen Modells zur Berücksichtigung der Bebauung über Rauhigkeitslänge und Verdrängungshöhe näher zu untersuchen, wurden drei Testfälle betrachtet:

1. *Ausgedehnte Bebauungsstruktur aus dem Vergleich mit MISKAM, Quelle in 1,7-facher Gebäudehöhe (höchstes Gebäude), isotrope Windrose.*

Die bodennahe Konzentrationsverteilung bei expliziter Berücksichtigung der ausgedehnten Bebauungsstruktur und $z_0 = 0,2$ m und $d_0 = 0$ m aus Abschnitt 4.4.4 wird einer Rechnung ohne Gebäude und $z_0 = 1,5$ m und $d_0 = 7,2$ m (entsprechend TA Luft das 0,8-fache der mittleren Gebäudehöhe) gegenübergestellt. Der Wert $z_0 = 0,2$ m bei expliziter Berücksichtigung der dichten Bebauung steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Windfeldmessungen zur Bonnerstraße und Venloerstraße (siehe Abschnitt 4.2.4).

2. *Einzelnes Gebäude, Quellen in 1,7-, 2,0- und 2,5-facher Gebäudehöhe, verschiedene Bodenrauhigkeiten, isotrope Windrose.*

Das Gebäude hat eine Höhe von 20 m, die Quelle befindet sich einmal über dem Gebäude und einmal 40 m vor dem Gebäude. Mit den Rauhigkeitslängen aus der Klassierung nach TA Luft von 0,2 m, 0,5 m, 1 m und 1,5 m wird die Rechnung einmal mit und einmal ohne Gebäude durchgeführt. Zusätzlich wird eine Rechnung ohne Gebäude bei einer Rauhigkeitslänge von 2 m betrachtet. Die Verdrängungshöhe wird nach TA Luft auf das 6-fache der Rauhigkeitslänge gesetzt.

3. *Einzelnes Gebäude, Quelle in 1,7-facher Gebäudehöhe, verschiedene Rauhigkeitslängen.*

gen, *Ausbreitungsklassenstatistik anonym.aks*.²⁰

Das Gebäude ist das gleiche wie im Testfall 2, die Quelle befindet sich über dem Gebäude. Es werden die Rauhigkeitslängen 0,2 m, 0,5 m, 1 m und 1,5 m betrachtet, einmal mit und einmal ohne Einfluß des Gebäudes. Zusätzlich wird eine Rechnung ohne Gebäude bei einer Rauhigkeitslänge von 2 m durchgeführt. Die Verdrängungshöhe wird gemäß TA Luft auf das 6-fache der Rauhigkeitslänge gesetzt.

Im Testfall 3 wurden die vom DWD angegebenen effektiven Anemometerhöhen verwendet (14,4 m für $z_0 = 0,5$ m, 24,4 m für $z_0 = 1,5$ m, 28,3 m für $z_0 = 2$ m). Sie ergeben sich aus der Forderung, daß die Windgeschwindigkeit in 60 m Höhe für ein logarithmisches Windprofil unabhängig von der Rauhigkeitslänge sein soll. Analog zu dieser Vorgehensweise wurde in den ersten zwei Testfällen die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 60 m vorgegeben (Testfall 1 mit 5,17 m/s, Testfall 2 mit 5,0 m/s). Für die Testfälle 1 und 2 wurde indifferenten Schichtung ($L_M = 99999$ m, $h_M = 800$ m) angenommen.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen sind in den Bildern 53 (Testfall 1), 54 bis 56 (Testfall 2) und 57 (Testfall 3) dargestellt.²¹

Bei dichter Bebauung (Testfall 1) sind die Maximalwerte, die sich bei expliziter Berücksichtigung der Gebäude und $z_0 = 0,2$ m ergeben, vergleichbar mit denen der Rechnung ohne Bebauung und $z_0 = 1,5$ m.

Bei den Rechnungen für ein Gebäude (Testfall 2 und 3) und Quellhöhen vom 1,7-fachen der Gebäudehöhe sind die Maximalwerte bei expliziter Berücksichtigung des Gebäudes vergleichbar oder größer als die, die sich bei Rechnung ohne Gebäude und eine um zwei Klassen erhöhte Rauhigkeitslänge ergeben. Für eine Quelle in 2,5-facher Gebäudehöhe (Testfall 2) ist für eine konservative Schätzung der Maximalkonzentration eine Rechnung ohne Gebäude und eine um eine Klasse erhöhte Rauhigkeitslänge ausreichend.

Für die Anwendung der TA Luft auf Quellhöhen oberhalb des 1,7-fachen der Gebäudehöhen und Rauhigkeitslängen zwischen 0,2 m und 1,5 m können auf dieser Grundlage folgende Richtwerte angegeben werden:

- Bei dichter Bebauung und expliziter Berücksichtigung der Bebauung über ein diagnostisches Windfeldmodell sollte standardmäßig $z_0 = 0,2$ m und $d_0 = 0$ m verwendet werden. Bei Berücksichtigung der Bebauung über Rauhigkeitslänge und Verdrängungshöhe sollte für eine Abschätzung des maximalen bodennahen Langzeitmittels z_0 auf mindestens 1,5 m und d_0 entsprechend TA Luft auf das 0,8-fache der mittleren Gebäudehöhe gesetzt werden.
- Bei einer Quelle in der Nähe eines einzelnen Gebäudekomplexes kann das maximale bodennahe Langzeitmittel bei einer Rechnung ohne Windfeldmodell über eine um

²⁰Die Ausbreitungsklassenstatistik anonym.aks ist Teil des Programm Paketes AUSTAL2000 und wird vom DWD für Testzwecke kostenlos zur Verfügung gestellt.

²¹Beim Testfall 2 liegt das absolute bodennahe Konzentrationsmaximum für die Quellhöhe von 50 m und die Rauhigkeitslängen 0,2 m und 0,5 m außerhalb des Rechengebietes.

zwei Klassen erhöhte Rauhigkeitslänge abgeschätzt werden (mit $d_0 = 6z_0$). Für Quellhöhen über dem 2,5-fachen der Gebäudehöhe ist die Erhöhung um eine Klasse ausreichend.

Bei einer Rechnung mit AUSTAL2000 und Quellhöhen oberhalb des 1,7-fachen der Gebäudehöhen darf also nicht die standardmäßig von AUSTAL2000 ausgewiesene mittlere Rauhigkeitslänge übernommen werden, sondern es muß explizit überlegt werden, mit welcher Rauhigkeitslänge zu rechnen ist. Die in diesem Abschnitt angegebenen Empfehlungen bieten dafür eine Hilfestellung, sind aber unter Umständen nicht ausreichend oder zu konservativ. Im Zweifelsfall sollte auf die einfache Näherung verzichtet und die Gebäude explizit über ein Windfeldmodell berücksichtigt werden.

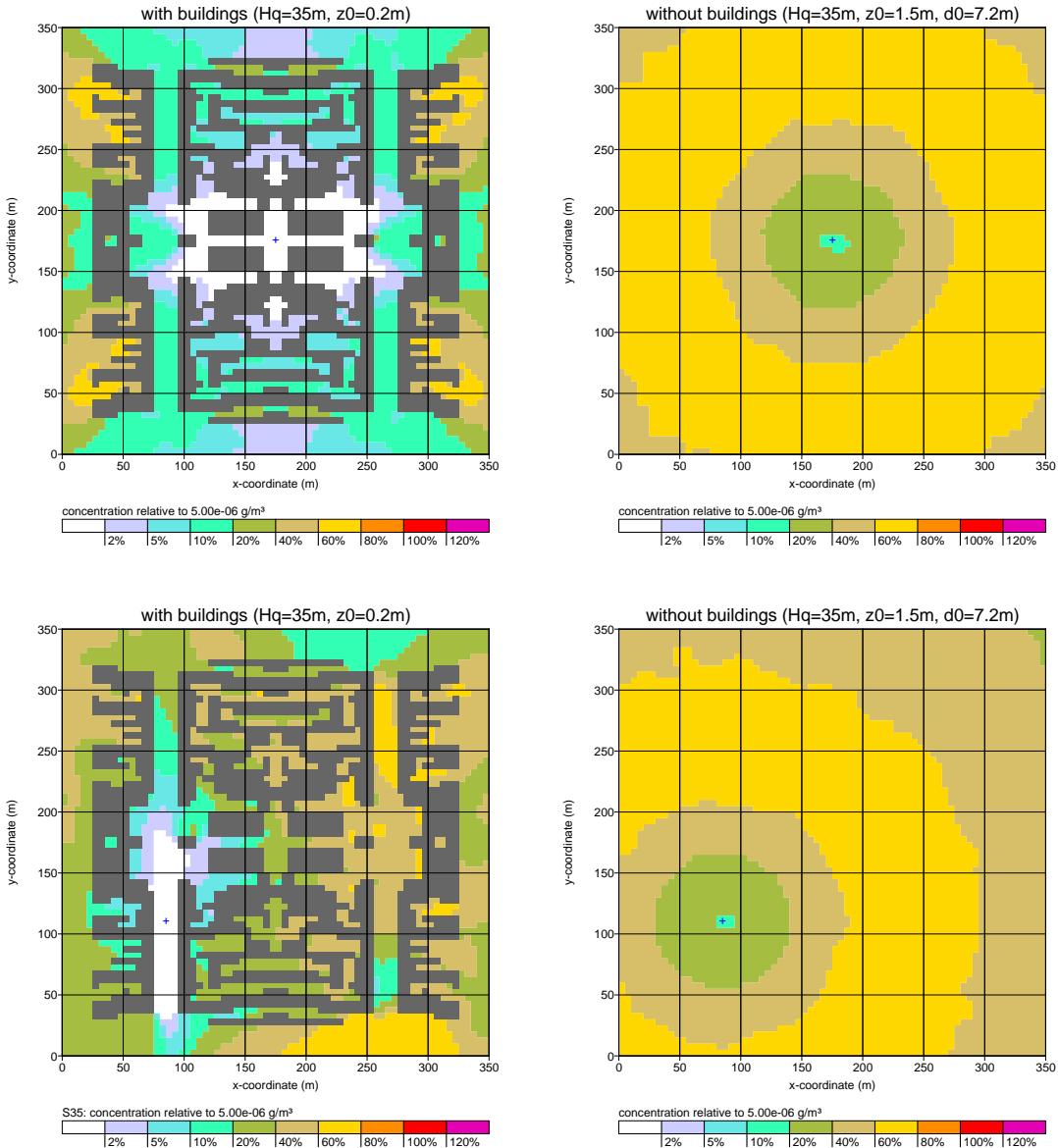


ABBILDUNG 53: Übergang zu hohen Quellen. Isotrope Windrose, dicht bebautes Gebiet, Quellhöhe 35 m (1,7-fache der Gebäudehöhen). Bodennahe Konzentrationsverteilung bei Verwendung des diagnostischen Windfeldmodells (links) und bei Verwendung einer erhöhten Bodenrauhigkeit (rechts). In den beiden oberen Grafiken befindet sich die Quelle (blaues Kreuz) im Symmetriezentrum, in den beiden unteren Grafiken im Bereich der südwestlichen Straßen schlucht.

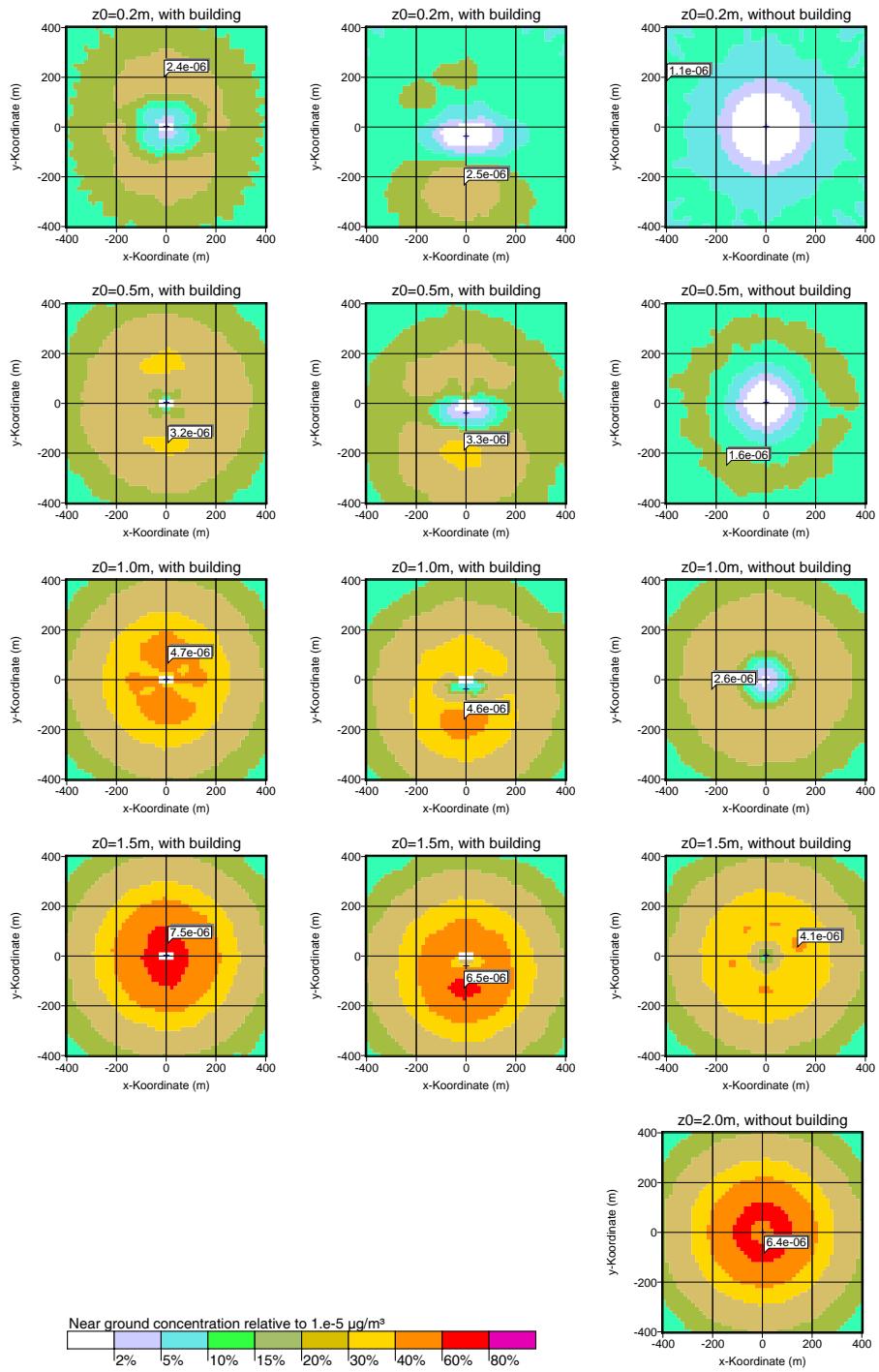


ABBILDUNG 54: Übergang zu hohen Quellen. Isotope Windrose, Quellhöhe 34 m (1,7-fache der Gebäudehöhe). Links: Quelle bei 0 m/0 m mit Gebäude. Mitte: Quelle bei 0 m/-40 m mit Gebäude. Rechts: Quelle bei 0 m/0 m ohne Gebäude. Rauhigkeitslängen von oben nach unten: 0,2 m, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2 m.

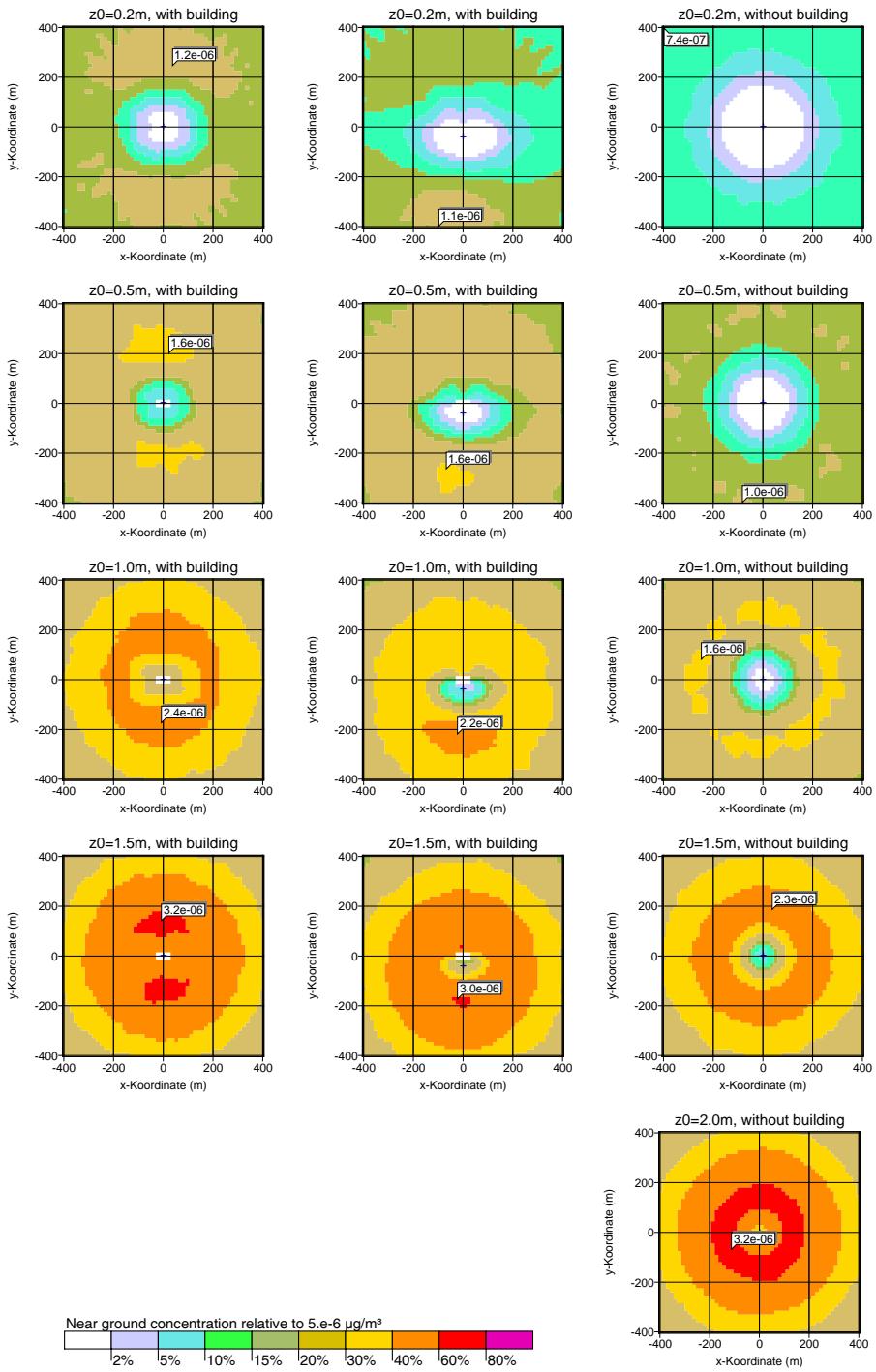


ABBILDUNG 55: Übergang zu hohen Quellen. Isotope Windrose, Quellhöhe 40 m (2-fache der Gebäudehöhe). Links: Quelle bei 0 m/0 m mit Gebäude. Mitte: Quelle bei 0 m/-40 m mit Gebäude. Rechts: Quelle bei 0 m/0 m ohne Gebäude. Rauhigkeitslängen von oben nach unten: 0,2 m, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2 m..

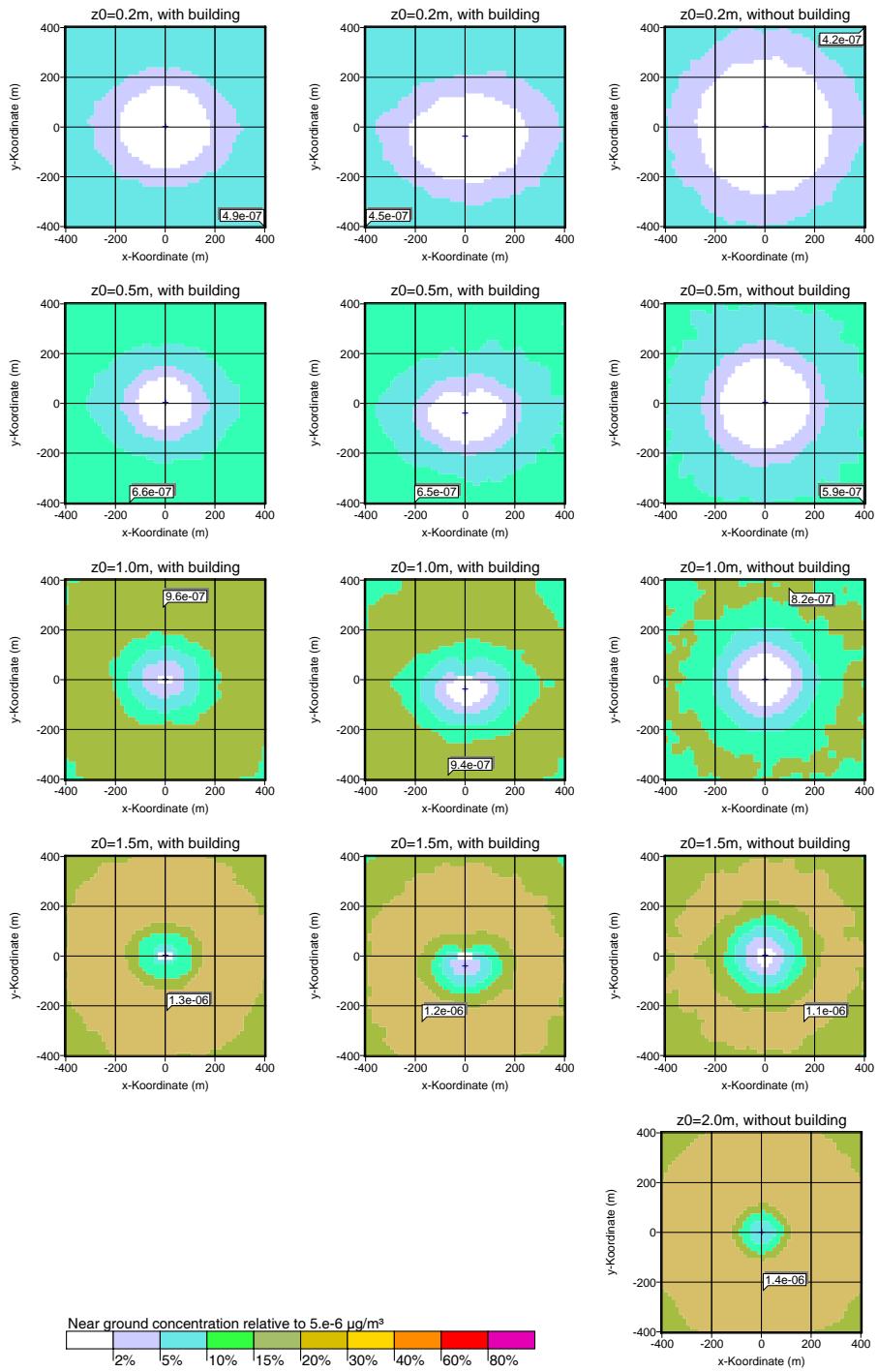


ABBILDUNG 56: Übergang zu hohen Quellen. Isotope Windrose, Quellhöhe 50 m (2,5-fache der Gebäudehöhe). Links: Quelle bei 0 m/0 m mit Gebäude. Mitte: Quelle bei 0 m/-40 m mit Gebäude. Rechts: Quelle bei 0 m/0 m ohne Gebäude. Rauhigkeitslängen von oben nach unten: 0,2 m, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2 m..

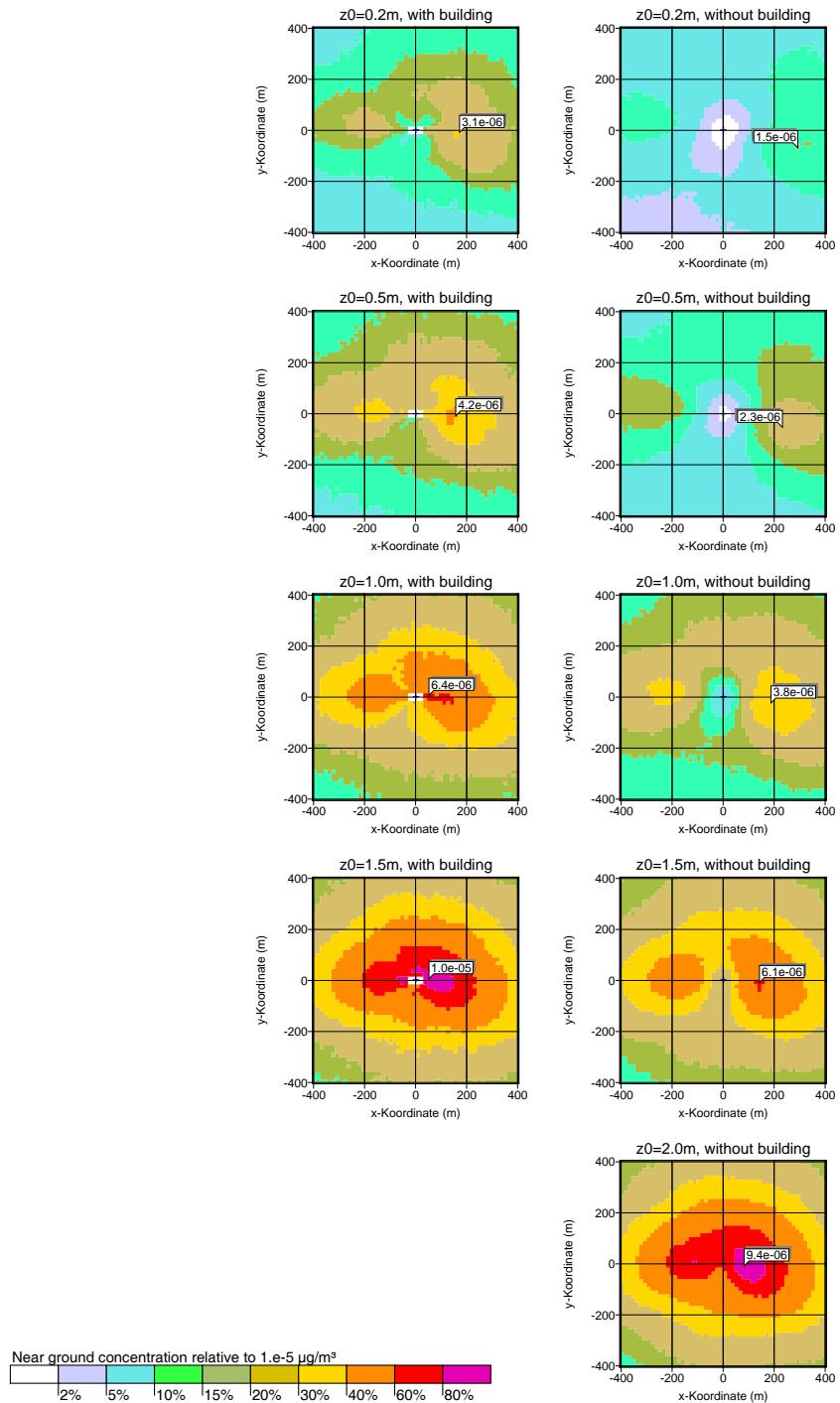


ABBILDUNG 57: Übergang zu hohen Quellen. AKS anonym.aks, Quellhöhe 34 m (1,7-fache der Gebäudehöhe). Links: Mit Gebäude. Rechts: Ohne Gebäude. Rauhigkeitslängen von oben nach unten: 0,2 m, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2 m.

6 Zusammenfassung

Für Quellhöhen zwischen dem 1,2-fachen und 1,7-fachen der Gebäudehöhen sieht die TA Luft den Einsatz eines diagnostischen Windfeldmodells vor. Ein solches Modell war bisher nicht Bestandteil von AUSTAL2000, da das ursprünglich vorgesehene Modell DMW (Modell nach VDI 3783 Blatt 10) nicht geeignet schien. Aufgabe dieses Projektes war die Entwicklung eines diagnostischen mikroskaligen Windfeldmodells (DMK) für den Einsatz in AUSTAL2000, das die Schwächen des Modells DMW überwindet.

In der Verifikation wurde gezeigt, daß die Modellergebnisse wie gefordert weitgehend invariant sind gegenüber der Art der Gebäudefestlegung und ihrer Orientierung relativ zum Rechengitter. Zusätzlich wurde ein einfacher Ansatz entwickelt, mit dem die Erhöhung der Geschwindigkeitsfluktuationen und Diffusionskoeffizienten aufgrund des Gebäudeeinflusses in Ausbreitungsrechnungen berücksichtigt werden kann.

Die Modellfelder und die in Kombination mit AUSTAL2000 erzielten Konzentrationsverteilungen wurden anhand zahlreicher experimenteller Datensätze validiert. Für die Konzentrationsvergleiche lagen experimentelle Vergleichsdaten nur für Quellhöhen unterhalb des 1,2-fachen der Gebäudehöhen vor. Die Validierungen zeigen insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen ohne systematische Über- oder Unterschätzungen.

Die Tests für Quellhöhen oberhalb des 1,7-fachen der Gebäudehöhen zeigen, daß bei der Berechnung von Langzeitmitteln ein relativ glatter Übergang zur Verwendung einer erhöhten Bodenrauhigkeit erzielt werden kann, welche die TA Luft für diesen Bereich vorsieht.

Die Vergleiche mit einem komplexeren Windfeldmodell und die Tests zum Konzeptwechsel bei hohen Quellen zeigen, daß bei der Bestimmung des bodennahen Konzentrationsmaximums für Langzeitmittel mit einer modellbedingten Unsicherheit von bis zu 30 % zu rechnen ist, wenn Gebäudeeinflüsse eine wesentliche Rolle spielen. Für Einzelsituationen kann die Unsicherheit auch größer sein.

7 Literaturverzeichnis

TA LUFT (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24.06.2002. GMBL 2002, Heft 25-29, S. 511-605. Internet: www.bmu.de/files/taluft.pdf.

VDI 3783 BLATT 8 (2002): Umweltmeteorologie; Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3783 BLATT 9 (ENTWURF) (2003): Umweltmeteorologie; Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle; Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3783 BLATT 10 (2001): Umweltmeteorologie; Diagnostische mikroskalige Windfeldmodelle; Gebäude- und Hindernisumströmung. Beuth Verlag, Berlin.

BÄCHLIN, W., RÜHLING, A., LOHMEYER A. (2002): Bereitstellung von Validierungsdaten für Geruchsausbreitungsmodelle – Naturmessungen. Ing.-Büro Lohmeyer, Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Förderkennzeichen BWE 20003.

CEDVAL (2004): Das CEDVAL Projekt (*Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Model*, gefördert durch das Umweltbundesamt (Förderkennzeichen 296 43 831). Internet: <http://www.mi.uni-hamburg.de/cedval>.

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. (1992): Programm zur Prüfung der Kühlturmeinflüsse beim Kernkraftwerk Emsland – Ausbreitungsmodellierung. Ing.-Büro Janicke, im Auftrag des Ing.-Büros Lohmeyer.

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

KASTNER-KLEIN, P., PLATE, E.J. (1998): Windkanalversuche zur Verbesserung der Ermittlung von KFZ-bedingten Konzentrationsverteilungen in Stadtgebieten. Forschungsbericht FZKA-PEF 295001, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe.

KLEIN, P., RAU, M. WANG, Z., PLATE, E.J. (1994): Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen (Experimente). Forschungsbericht KfK-PEF 124, Kernforschungszentrum Karlsruhe.

LEITL, B., AUBRUN, S., SCHATZMANN, M. (2002): Bereitstellung systematischer Vergleichsdaten für die Entwicklung und Validierung numerischer Geruchsausbreitungsmodelle – Windkanalversuche im Verbundprojekt Geruchsfreisetzung und -ausbreitung. Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Förderkennzeichen BWE 20001.

SCHATZMANN, M., LOHMEYER, A. (1991): Programm zur Prüfung der Kühlturmeinflüsse, Kernkraftwerk Emsland, Veränderung der Abluftausbreitung durch Kühlurm und Gebäude. Projekt 172, im Auftrag des NLOE.

A Mathematische Berechnung des diagnostischen Windfeldes

Gesucht wird das diagnostische Windfeld \mathbf{v} , das mit einem vorgegebenen empirischen Windfeld \mathbf{u} möglichst gut übereinstimmt, divergenzfrei ist und die Randbedingung erfüllt, daß die Normalkomponente an den Grenzflächen verschwindet.

Sucht man eine Approximation im quadratischen Mittel, dann erhält man mit dem ortsabhängigen Lagrange-Multiplikator $\lambda(\mathbf{r})$ folgendes Variationsproblem:²²

$$\delta \left\{ \int d^3r \left[\frac{1}{2}(\mathbf{v} - \mathbf{u})^2 - \lambda \nabla \cdot \mathbf{v} \right] \right\} = 0 \quad (13)$$

Die zu diesem Variationsproblem gehörende Lagrange-Gleichung lautet

$$\mathbf{v} = \mathbf{u} - \nabla \lambda \quad (14)$$

mit der Nebenbedingung

$$\delta \left\{ \int d^2f \cdot (\lambda \mathbf{v}) \right\} = 0 \quad (15)$$

Die Nebenbedingung bedeutet, daß dort auf dem Rand des betrachteten Volumens, wo die Normalkomponente von \mathbf{v} nicht vorgegeben ist, $\lambda = 0$ sein muß und λ dort variiert wird, wo die Normalkomponente von \mathbf{v} verschwindet. Aus der Lagrange-Gleichung folgt

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot \nabla \lambda \quad (16)$$

Da das gesuchte Windfeld divergenzfrei ist, folgt hieraus die Poisson-Gleichung

$$\nabla \cdot \nabla \lambda = \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (17)$$

Das diagnostische Windfeld \mathbf{v} erhält man also, indem man zum empirischen Feld \mathbf{u} das Gradientenfeld $\nabla \lambda$ addiert, das durch Gleichung (17) und die Randbedingung (15) festgelegt wird. Die Poisson-Gleichung wird numerisch auf einem kartesischen Gitter mit Hilfe eines Differenzenverfahrens gelöst.

²²In mesoskaligen diagnostischen Modellen werden im Variationsausdruck die Abweichungen der horizontalen Komponenten anders gewichtet als die der vertikalen Komponente, um den Einfluß der atmosphärischen Schichtung zu modellieren. Bei der Gebäudeumströmung kann darauf verzichtet werden.

Definition des Rechennetzes

Für jede der drei kartesischen Koordinaten x, y, z ist ein Punktraster (x_i, y_j, z_k) definiert:

$$x_i \text{ für } i = 0..n_x$$

$$y_j \text{ für } j = 0..n_y$$

$$z_k \text{ für } k = 0..n_z$$

Die Mittelpunkte der Intervalle dieser Punktraster haben die Koordinaten

$$\hat{x}_i = (x_{i-1} + x_i)/2 \text{ für } i = 1..n_x$$

$$\hat{y}_j = (y_{j-1} + y_j)/2 \text{ für } j = 1..n_y$$

$$\hat{z}_k = (z_{k-1} + z_k)/2 \text{ für } k = 1..n_z$$

Die Intervalle in den 3 Achsenrichtungen, $\mathcal{D}_{x;i}, \mathcal{D}_{y;j}, \mathcal{D}_{z;k}$, haben den gleichen Indexwert wie ihr Mittelpunkt. Beispielsweise enthält $\mathcal{D}_{x;i}$ alle x -Werte zwischen x_{i-1} und x_i , also

$$\mathcal{D}_{x;i} = \{x \mid x_{i-1} \leq x \leq x_i\}$$

Die Längen \hat{d} der Intervalle sind

$$\hat{d}_{x;i} = x_i - x_{i-1} \tag{18}$$

$$\hat{d}_{y;j} = y_j - y_{j-1} \tag{19}$$

$$\hat{d}_{z;k} = z_k - z_{k-1} \tag{20}$$

Die drei Punktraster bilden zusammen ein 3-dimensionales Gitter. Die Zellen \mathcal{V}_{ijk} des 3-dimensionalen Gitters sind so indiziert wie die zugehörigen Achsenintervalle, also

$$\mathcal{V}_{ijk} = \{(x, y, z) \mid x_{i-1} \leq x \leq x_i, y_{j-1} \leq y \leq y_j, z_{k-1} \leq z \leq z_k\}$$

$$\text{für } i = 1..n_x, j = 1..n_y, k = 1..n_z$$

Das Volumen τ der Zellen \mathcal{V} ist

$$\tau_{ijk} = \hat{d}_{x;i} \hat{d}_{y;j} \hat{d}_{z;k} \tag{21}$$

Im folgenden wird angenommen, daß das Gitter horizontal äquidistant ist mit gleicher Maschenweite in beiden Koordinatenrichtungen,

$$\hat{d}_{x;i} = \hat{d}_{y;j} = d \tag{22}$$

Im Arakawa-C-Netz sind die Geschwindigkeitskomponenten in der jeweiligen Achsenrichtung auf Gitterpunkten, in den beiden anderen Richtungen auf Mittelpunkten definiert. Also beispielsweise v_x ist definiert auf den Punkten $(x_i, \hat{y}_j, \hat{z}_k)$. Die Werte von v_x werden genauso indiziert wie die Punkte, auf denen sie definiert sind. Es gilt also:

$v_{x;ijk}$ ist der Wert von v_x bei $(x_i, \hat{y}_j, \hat{z}_k)$ mit $i = 0..n_x$, $j = 1..n_y$, $k = 1..n_z$
 $v_{y;ijk}$ ist der Wert von v_y bei $(\hat{x}_i, y_j, \hat{z}_k)$ mit $i = 1..n_x$, $j = 0..n_y$, $k = 1..n_z$
 $v_{z;ijk}$ ist der Wert von v_z bei $(\hat{x}_i, \hat{y}_j, z_k)$ mit $i = 1..n_x$, $j = 1..n_y$, $k = 0..n_z$

Diskretisierung der Poisson-Gleichung

Das Feld $\lambda(\mathbf{r})$ ist auf den Mittelpunkten der Gitterzellen definiert, der Gradient von λ , $\nabla\lambda = (\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)$, entsprechend der Arakawa-C-Festlegung:

$$\hat{\lambda}_{ijk} = \lambda(\hat{x}_i, \hat{y}_j, \hat{z}_k) \quad (23)$$

$$\lambda_{x;ijk} = (\hat{\lambda}_{i+1,j,k} - \hat{\lambda}_{i,j,k})/d \quad (24)$$

$$\lambda_{y;ijk} = (\hat{\lambda}_{i,j+1,k} - \hat{\lambda}_{i,j,k})/d \quad (25)$$

$$\lambda_{z;ijk} = (\hat{\lambda}_{i,j,k+1} - \hat{\lambda}_{i,j,k})/d_{z;k} \quad (26)$$

$$d_{z;k} = (\hat{d}_{z;k} + \hat{d}_{z;k+1})/2 \quad (27)$$

Die Divergenz eines Vektorfeldes $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ wird für jede Gitterzelle nach dem Gauß'schen Integralsatz berechnet, also als Oberflächenintegral über die Normalkomponente dividiert durch das Zellenvolumen,

$$\hat{D}_{ijk}\{\mathbf{v}\} = \frac{1}{\tau_{ijk}} \left[(v_{x;ijk} - v_{x;i-1,j,k})F_{x;k} + (v_{y;ijk} - v_{y;i,j-1,k})F_{y;k} + (v_{z;ijk} - v_{z;i,j,k-1})F_z \right] \quad (28)$$

$$F_{x;k} = d\hat{d}_{z;k} \quad (29)$$

$$F_{y;k} = d\hat{d}_{z;k} \quad (30)$$

$$F_z = d^2 \quad (31)$$

Entsprechend wird die Divergenz für den Gradienten des skalaren Feldes $\lambda(\mathbf{r})$ definiert. Die Gleichung (17) lautet also in diskretisierter Form

$$\hat{D}_{ijk}\{\lambda\} = \hat{D}_{ijk}\{\mathbf{u}\} \quad (32)$$

für alle Gitterzellen \mathcal{V}_{ijk} , die zum Rechengebiet \mathcal{R} gehören. Da für jede Gitterzelle genau ein Wert von λ zu bestimmen ist, gibt es also genauso viele Gleichungen wie Unbekannte.

Die Berechnung der rechten Seite von Gleichung (32) ist nicht problematisch, da das empirische Windfeld \mathbf{u} im gesamten Rechengebiet und damit auch auf den Randflächen aller Gitterzellen des Rechengebietes definiert ist. Es wird vorausgesetzt, daß \mathbf{u} dabei auch alle Randbedingungen erfüllt, also seine Normalkomponente auf festen, undurchlässigen Rändern verschwindet.

Die linke Seite von Gleichung (32) kann nicht mit Hilfe von Gleichung (24) bis (26) berechnet werden, wenn die Zelle \mathcal{V}_{ijk} den Rand des Rechengebietes berührt, sei es daß hier das gesamte Rechengebiet endet oder daß hier ein Hindernis beginnt. Angenommen, dies sei für die Fläche $x = x_i$ („rechte“ Randfläche von $\mathcal{V}_{i,j,k}$) der Fall. Dann kann $\lambda_{x;ijk}$ nicht nach Gleichung (24) berechnet werden, weil die Größe $\hat{\lambda}_{i+1,j,k}$ nicht definiert ist.

Wenn es sich um einen festen Rand handelt, dann ist die Randbedingung (Fluß durch diese Fläche) schon durch \mathbf{u} erfüllt. Dann darf durch das λ -Feld daran nichts geändert werden und es ist $\lambda_{x;i,j,k} = 0$ zu setzen. Ist der Rand offen, dann muß λ auf dem Rand, entsprechend der Nebenbedingung (15), den Wert 0 annehmen. In diesem Fall ist $\lambda_{x;i,j,k} = -2\hat{\lambda}_{i,j,k}/d$ zu setzen. Entsprechend sind Ränder in y - oder z -Richtung zu behandeln.

Lösung des Gleichungssystems

Gleichung (32) ist ein Gleichungssystem für die unbekannten $\hat{\lambda}_{i,j,k}$ der Form

$$\begin{aligned} R_{i,j,k}\{\lambda\} &\equiv A_{i,j,k}^{(111)}\hat{\lambda}_{i,j,k} + A_{i,j,k}^{(011)}\hat{\lambda}_{i-1,j,k} + A_{i,j,k}^{(211)}\hat{\lambda}_{i+1,j,k} \\ &\quad + A_{i,j,k}^{(101)}\hat{\lambda}_{i,j-1,k} + A_{i,j,k}^{(121)}\hat{\lambda}_{i,j+1,k} + A_{i,j,k}^{(110)}\hat{\lambda}_{i,j,k-1} + A_{i,j,k}^{(112)}\hat{\lambda}_{i,j,k+1} - B_{i,j,k} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (33)$$

Die Größe $R_{i,j,k}\{\lambda\}$ ist das Residuum, also die Divergenz des Feldes $\nabla\lambda - \mathbf{u}$, auf den Zellen des Rechengebietes. Das Gleichungssystem wird iterativ nach dem SOR-Verfahren (*successive overrelaxation*) gelöst.²³ Ist eine Näherungslösung λ^{alt} bekannt, dann wird daraus eine neue Näherungslösung λ^{neu} nach folgendem Verfahren berechnet:

$$\hat{\lambda}_{i,j,k}^{\text{neu}} = \hat{\lambda}_{i,j,k}^{\text{alt}} - \omega \frac{R_{i,j,k}\{\lambda^{\text{alt}}\}}{A_{i,j,k}^{(111)}} \quad (34)$$

Gestartet wird üblicherweise mit dem Wert 0. Der Relaxationsparameter ω ist eine Zahl zwischen 1 und 2. Von der Wahl dieses Zahlenwertes hängt ab, ob und wie gut das Verfahren konvergiert. Die optimale Wahl ist

$$\omega = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \rho_J^2}} \quad (35)$$

Hierbei ist ρ_J der Spektralradius der Jacobi-Iteration. Bei 2-dimensionalen Problemen ist er näherungsweise

$$\rho_J \approx \frac{\cos\left(\frac{\pi}{n_x}\right)/d_x^2 + \cos\left(\frac{\pi}{n_y}\right)/d_y^2}{1/d_x^2 + 1/d_y^2} \quad (36)$$

Eine Erweiterung auf den 3-dimensionalen Fall ist zwar naheliegend, aber insofern problematisch, als bei der vorgesehenen Anwendung in der Vertikalen kein äquidistantes Netz verwendet wird. In der Praxis zeigt sich, daß die entsprechende Erweiterung durchaus brauchbar ist, wenn man im Bereich der Gebäude die vertikale Maschenweite konstant läßt. Wenn viele Windfelder für die gleiche Geometrie zu bestimmen sind (Windfeldbibliothek), ist es aber auf jeden Fall günstiger, in einer Reihe von Testläufen zuerst den Wert von ρ_J zu bestimmen, der zu einer optimalen Konvergenz führt.

²³W.H. PRESS, S.A. TEUKOLSKY, W.T. VETTERLING, B.P. FLANNERY: *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1999.

Der Algorithmus in Gleichung (34) hat die Besonderheit, daß zur Berechnung des neuen Wertes in einer bestimmten Gitterzelle nur der alte Wert und Werte aus Gitterzellen verwendet werden, bei denen ein Indexwert um 1 erhöht oder erniedrigt ist. Wenn man also das gesamte Gitter aufteilt in die Gitterzellen (rotes Gitter), deren Indexsumme $i + j + k$ eine gerade Zahl ergibt, und die anderen Gitterzellen (schwarzes Gitter), deren Indexsumme $i + j + k$ eine ungerade Zahl ergibt, dann kann man die Situation so beschreiben: Wird der Wert für eine rote Zelle neu berechnet, dann werden außer dem alten Wert nur Werte aus schwarzen Zellen benötigt, und umgekehrt.

Es ist also zweckmäßig, in halben Schritten vorzugehen: Zuerst werden alle roten Werte neu berechnet, dann werden alle schwarzen Werte unter Verwendung der neuen roten Werte neu berechnet. Dieses Halbschrittverfahren lässt sich noch verbessern, wenn ω nicht konstant gehalten sondern mit jedem Schritt variiert wird. Der Wert aus Gleichung (35) führt nämlich nur asymptotisch, also für lange Iterationen, zu einer optimalen Konvergenz. In den ersten Iterationsschritten kann es durchaus passieren, daß das Residuum erheblich anwächst. Um dies zu vermeiden, wählt man bei der Chebyshev-Beschleunigung folgende Werte von ω :

$$\begin{aligned}\omega^{(0)} &= 1 \\ \omega^{(1/2)} &= 1/(1 - \rho_j^2/2) \\ \omega^{(n+1/2)} &= 1/(1 - \rho_j^2 \omega^{(n)}/4) \quad \text{für } n = 1/2, 1, 3/2, \dots\end{aligned}\tag{37}$$

Die Iterationen werden so lange durchgeführt, bis eine maximale Iterationszahl erreicht ist oder das Residuum im Mittel oder im Maximum eine vorgegebene Schwelle unterschreitet.

B Parametervariationen

Zur Demonstration, wie sensiv die mit dem Modell erzielten Konzentrationsverteilungen von den einzelnen Modellparametern abhängen, wurde die bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose und eine Quelle vor einem U-förmigen Gebäude in 1,2-facher und 1,7-facher Gebäudehöhe für folgende Parametervarianten bestimmt:²⁴

Variierter Parameter	Funktion des Parameters	Standardwert	Varianten
a_1, a_3	Stärke und Ausdehnung der Rezirkulation	$a_1 = 6, a_3 = 0,3$	$a_1 = 9, a_3 = 0,2;$ $a_1 = 5, a_3 = 0,4$
a_2	Wichtung der Rezirkulation mit der Windrichtung	1	0,5; 1,5
a_5	Herabsetzung der z -Komponente	0,7	0,5; 1
h_s	Ausdehnung der Zusatzturbulenz über die Gebäudeoberkante	1,2	1,0; 1,5
f_s	Faktor zur Bestimmung der zusätzlichen Geschwindigkeitsfluktuationen	0,5	0,25; 1,0 ($f_s f_k = \text{const.}$)
f_k	Faktor zur Bestimmung der zusätzlichen Diffusion	0,3	0,15; 0,6

Die nicht variierten Parameter wurden jeweils auf ihrem Standardwert belassen.

Die Bilder 58 bis 63 zeigen die Ergebnisse und den Vergleich zur Rechnung mit den Standardwerten ($z_0 = 0,2 \text{ m}$, $d_0 = 1,2 \text{ m}$, $h_a = 11,2 \text{ m}$, $u_a = 3 \text{ m/s}$, $\Delta z = 4 \text{ m}$, $\Delta x = 6 \text{ m}$, $H = 20 \text{ m}$).²⁵ Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Änderungen der bodennahen Maximalkonzentration im Vergleich zur Standardrechnung (in Prozent, gerundet auf Einheiten von 10%):

²⁴Bei der Variation von f_s wurde f_k so angepaßt, daß die zusätzliche Diffusion, die von dem Produkt $f_s f_k$ abhängt, unverändert bleibt.

²⁵Da mit einer sehr feinen horizontalen Maschenweite gerechnet wurde, ist die statistische Unsicherheit für die Immissionen der höheren Quelle relativ groß. In größerer Entfernung kann eine Sternstruktur aufgrund der Windrichtungseinteilung in 10-Grad-Schritte auftreten.

Variierter Parameter	$H_Q/H = 1,2$	$H_Q/H = 1,7$
a_1, a_3	+10%; +20%	+10%; +0%
a_2	-10%; +20%	+0%; -0%
a_5	+0%; -0%	-0%; +0%
h_s	-0%; +10%	-10%; +0%
f_s	+10%; +30%	-0%; +0%
f_k	-10%; +20%	-20%; +20%

Wie zu erwarten, ist der Einfluß der Parameter a_1, a_2, a_3 und a_5 , die das Windfeld unmittelbar im Lee des Gebäudes bestimmen, für die niedrige Quelle größer als für die hohe Quelle. Dagegen wirkt sich der Parameter f_k , der die weiterreichende Zusatzdiffusion bestimmt, auch noch auf die hohe Quelle aus.

Die Vergleiche zeigen, daß bei Variation einzelner Parameterwerte um bis zu einen Faktor 2 die Änderungen in den Modellergebnissen deutlich kleiner ausfallen, sie hängen also nicht allzu sensibel von den gewählten Standardwerten ab.

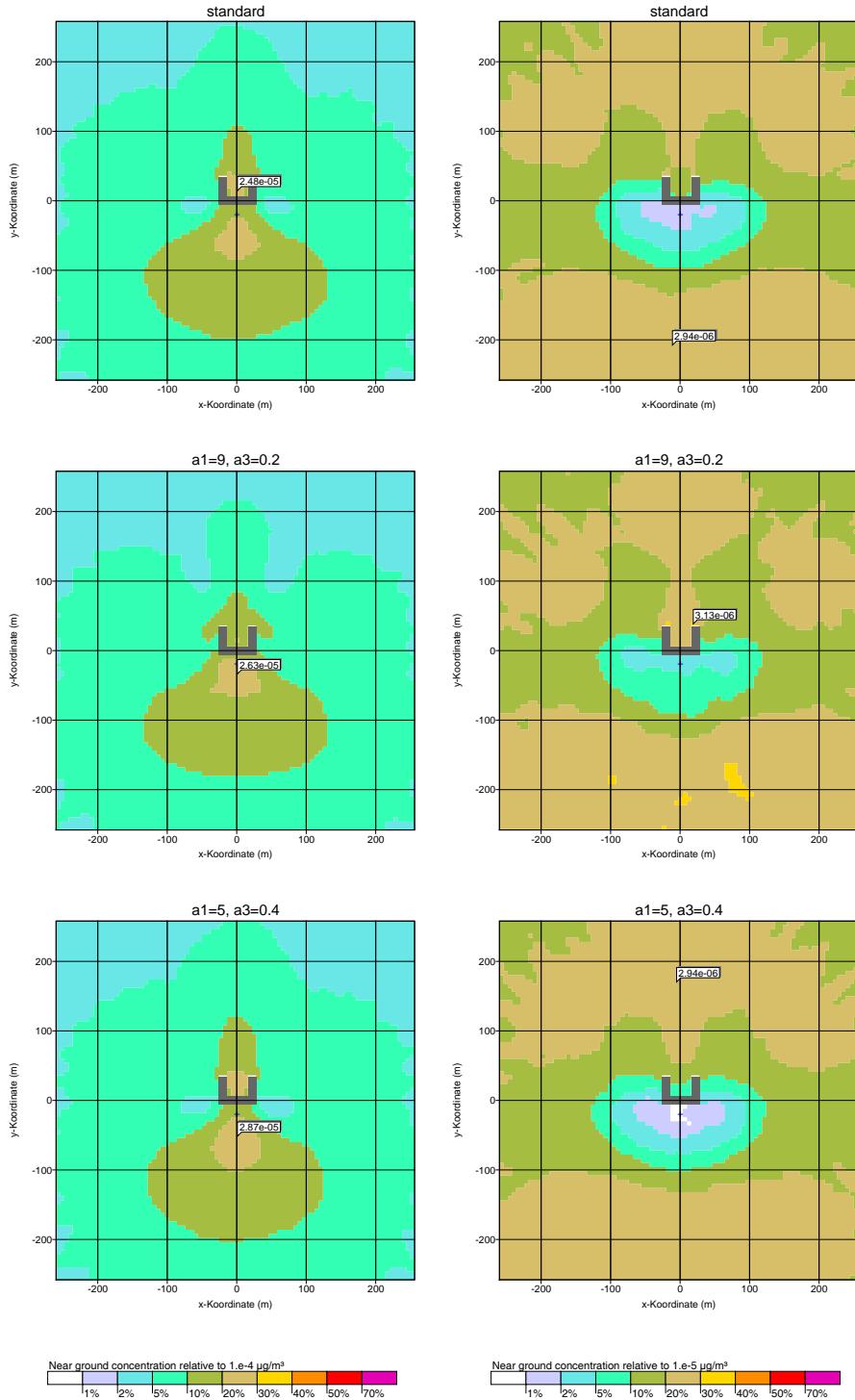


ABBILDUNG 58: Parametervariationen, Parameter a_1 und a_3 . Bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose und eine Quelle in 1,2-facher Gebäudehöhe (linke Spalte) und 1,7-facher Gebäudehöhe (rechte Spalte). Die Bilder jeweils ganz oben zeigen das Ergebnis der Rechnung mit den Standardwerten. Mit eingezeichnet ist jeweils die Position und Größe der Maximalkonzentration.

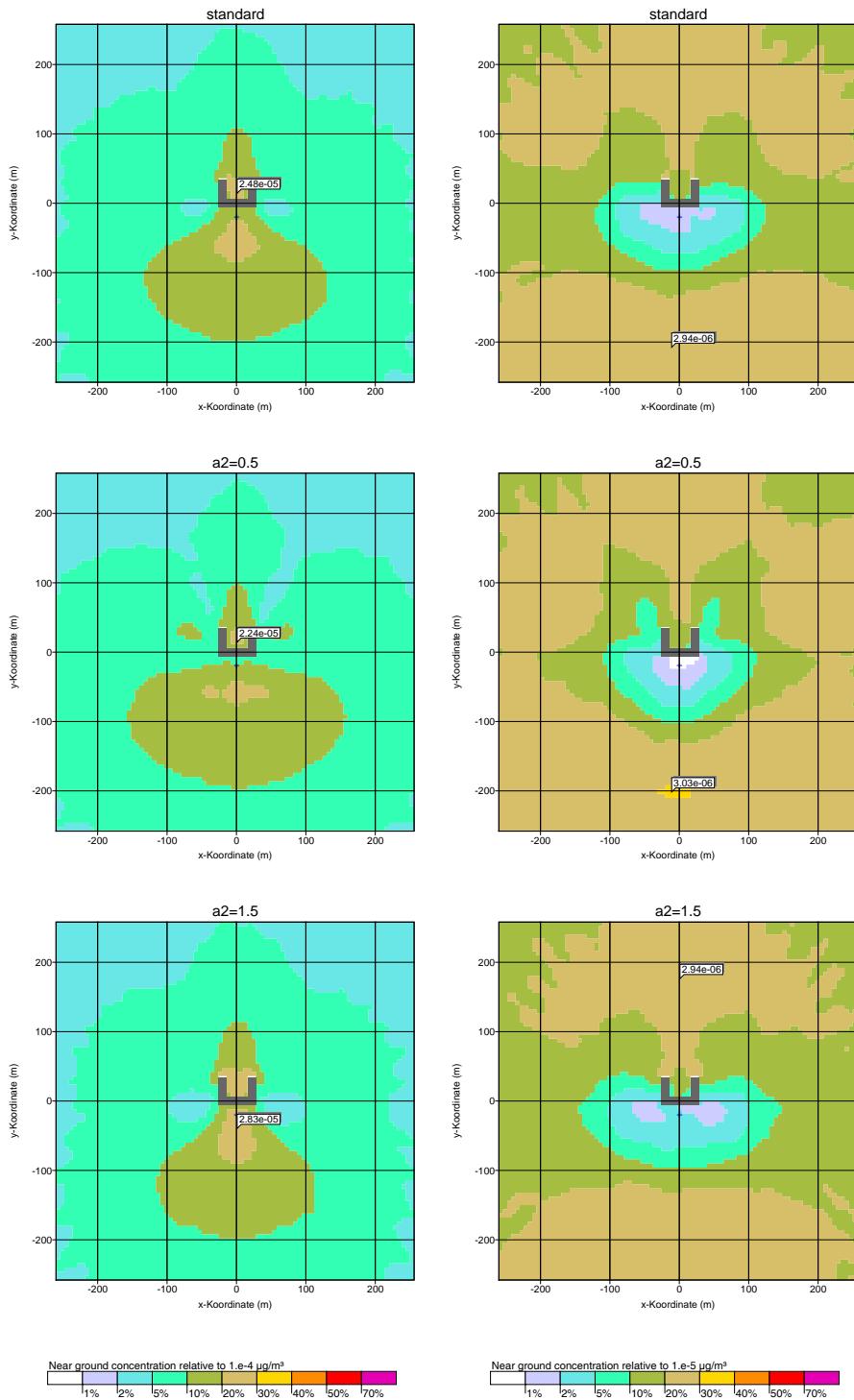


ABBILDUNG 59: Parametervariationen, Parameter a_2 . Bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose und eine Quelle in 1,2-facher Gebäudehöhe (linke Spalte) und 1,7-facher Gebäudehöhe (rechte Spalte). Die Bilder jeweils ganz oben zeigen das Ergebnis der Rechnung mit den Standardwerten. Mit eingezeichnet ist jeweils die Position und Größe der Maximalkonzentration.

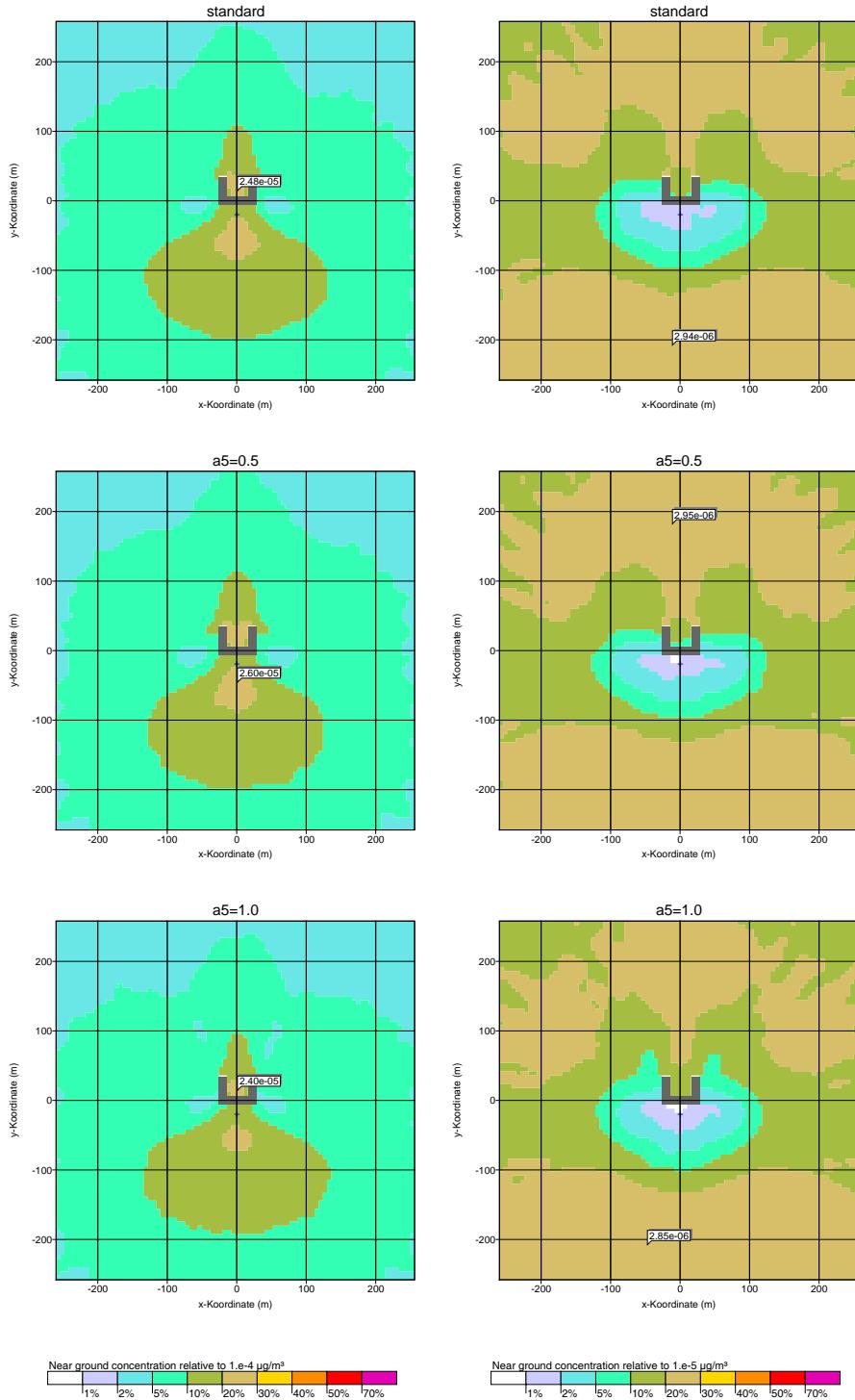


ABBILDUNG 60: Parametervariationen, Parameter a_5 . Bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose und eine Quelle in 1,2-facher Gebäudehöhe (linker Spalte) und 1,7-facher Gebäudehöhe (rechter Spalte). Die Bilder jeweils ganz oben zeigen das Ergebnis der Rechnung mit den Standardwerten. Mit eingezeichnet ist jeweils die Position und Größe der Maximalkonzentration.

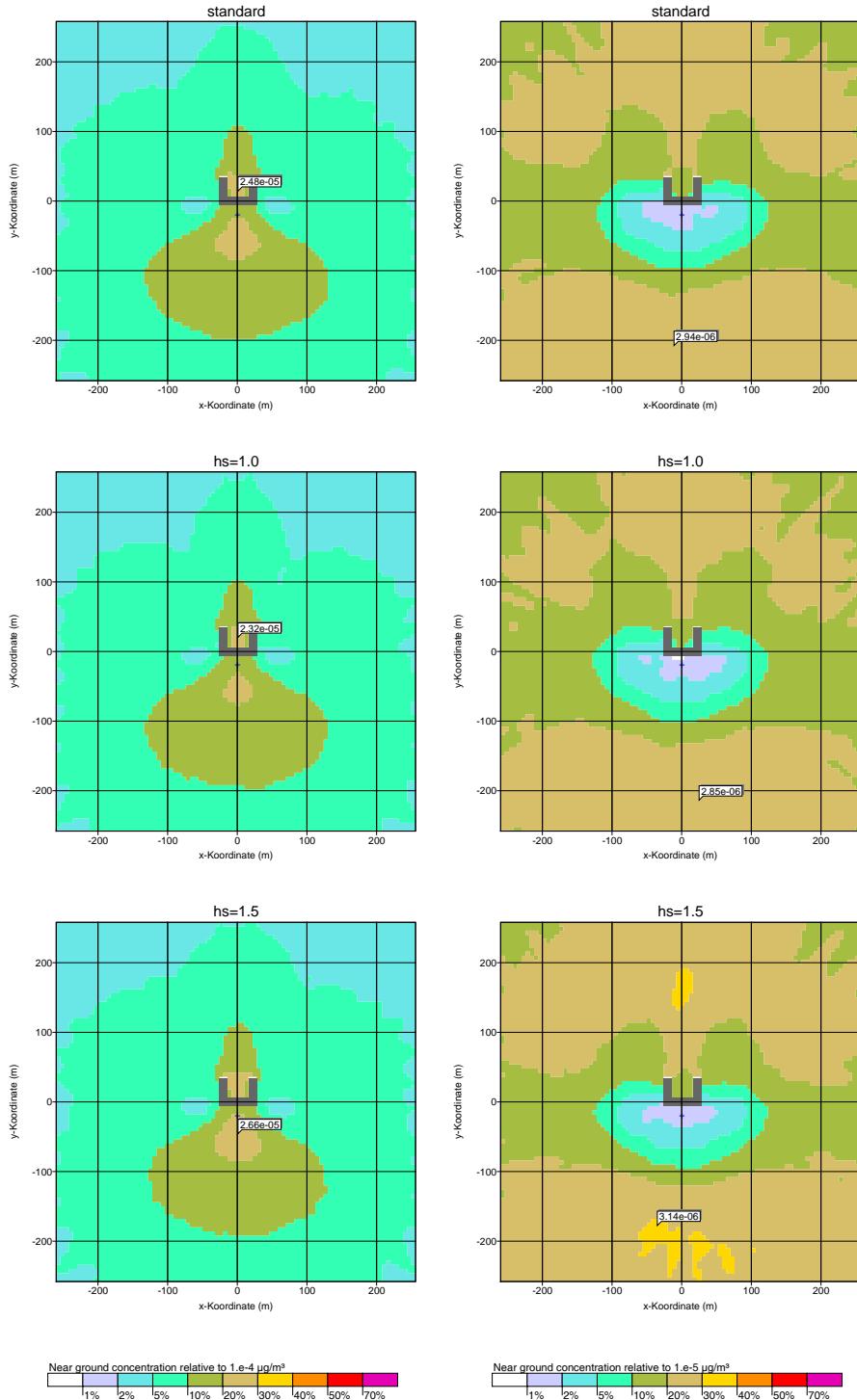


ABBILDUNG 61: Parametervariationen, Parameter h_s . Bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose und eine Quelle in 1,2-facher Gebäudehöhe (linke Spalte) und 1,7-facher Gebäudehöhe (rechte Spalte). Die Bilder jeweils ganz oben zeigen das Ergebnis der Rechnung mit den Standardwerten. Mit eingezeichnet ist jeweils die Position und Größe der Maximalkonzentration.

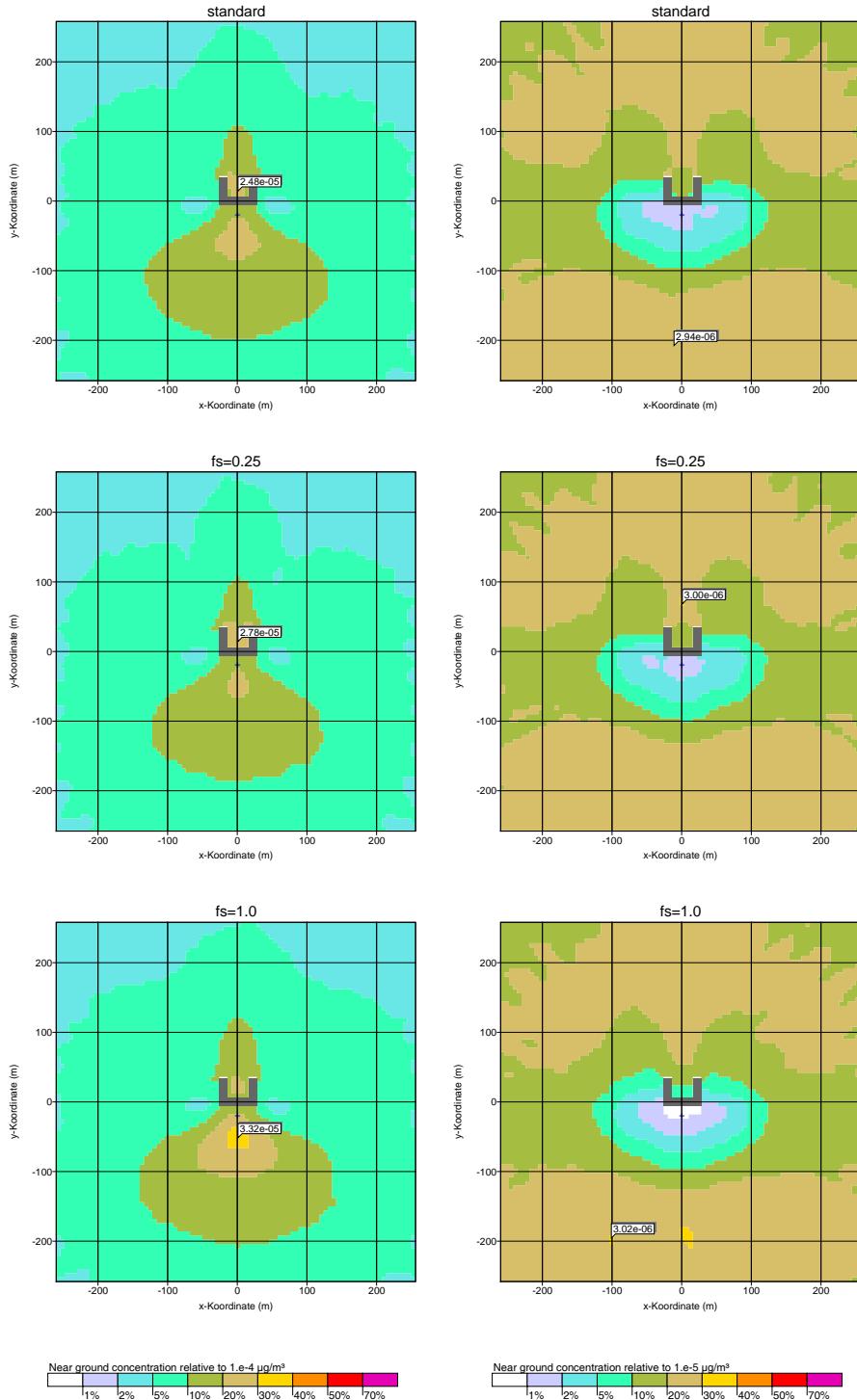


ABBILDUNG 62: Parametervariationen, Parameter f_s . Bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose und eine Quelle in 1,2-facher Gebäudehöhe (linker Spalte) und 1,7-facher Gebäudehöhe (rechter Spalte). Die Bilder jeweils ganz oben zeigen das Ergebnis der Rechnung mit den Standardwerten. Mit eingezeichnet ist jeweils die Position und Größe der Maximalkonzentration.

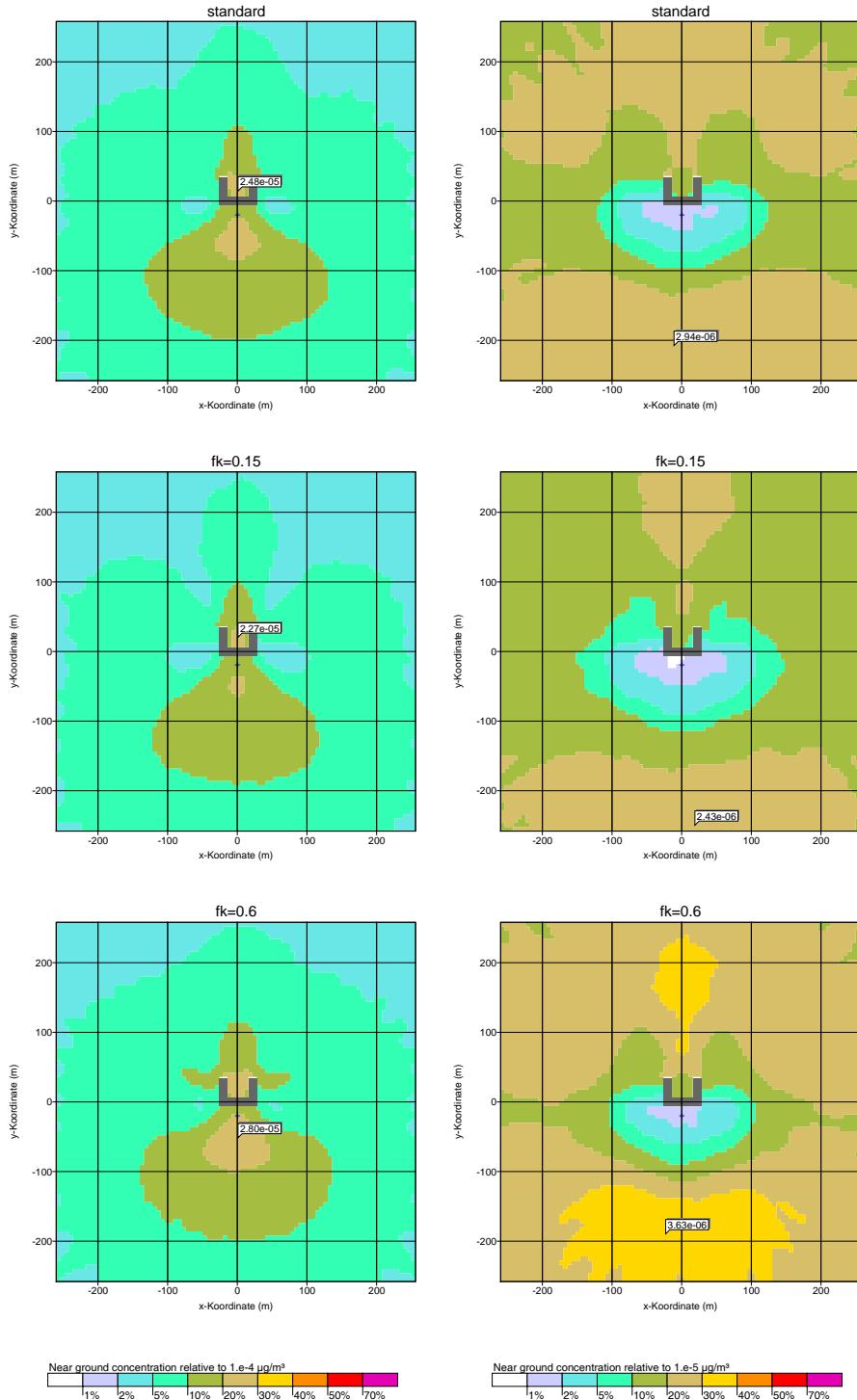


ABBILDUNG 63: Parametervariationen, Parameter f_k . Bodennahe Konzentrationsverteilung für eine isotrope Windrose und eine Quelle in 1,2-facher Gebäudehöhe (linker Spalte) und 1,7-facher Gebäudehöhe (rechter Spalte). Die Bilder jeweils ganz oben zeigen das Ergebnis der Rechnung mit den Standardwerten. Mit eingezeichnet ist jeweils die Position und Größe der Maximalkonzentration.

