

Verbesserung der AUSTAL2000-Ergebnisse durch Strömungs- und Turbulenzübernahme aus MISKAM

M. O. Letzel, T. Flassak, D. Angel

Zusammenfassung In der vorliegenden Studie wird gezeigt, dass bei Ausbreitungsrechnungen mit AUSTAL2000 in Gebäudenähe die Strömungs- und Turbulenzübernahme aus MISKAM zu einer deutlichen Verbesserung im Vergleich zu den in AUSTAL2000 integrierten Verfahren und Modellen führt. Letztere führen in vielen Fällen zu einer Unterschätzung der Konzentrationen in Gebäudenähe. Bei Ausbreitungsrechnungen mit aufgelösten Gebäuden überlagert AUSTAL2000 gebäudeinduzierte Zusatz-turbulenz der schichtungsabhängigen atmosphärischen Turbulenz. Die Zusatz-turbulenz wird auf der Basis von Windkanaluntersuchungen in allgemeiner Form parametrisiert. Dieser Überlagerungsansatz wurde für die Strömungs- und Turbulenzübernahme aus dem prognostischen mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungsmodell MISKAM aufgegriffen und sinngemäß umgesetzt. AUSTAL2000 übernimmt neben dem Windfeld nun auch die gebäudeinduzierte Zusatz-turbulenz aus MISKAM. Die neue MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung vereint die Stärken beider Modelle, sie wurde anhand von Windkanalexperimenten erfolgreich validiert.

Improvement of AUSTAL2000 results due to flow and turbulence input from MISKAM

Abstract This study shows that flow and turbulence input from MISKAM substantially improves AUSTAL2000 dispersion calculations near buildings compared to those schemes and models that are included in AUSTAL2000. In many cases, the latter underestimate the concentration near buildings. For dispersion calculations with resolved buildings, AUSTAL2000 superposes building-induced extra turbulence on stratification-dependent atmospheric turbulence. The extra turbulence is parameterized in a general way based on wind tunnel studies. This study adopts and implements this superposition for flow and turbulence input from the prognostic, microscale flow and dispersion model MISKAM. Besides the wind field, AUSTAL2000 now also takes the building-induced extra turbulence from MISKAM as input. The new MISKAM-AUSTAL2000 coupling combines the strengths of both models, it has been successfully validated based on wind tunnel experiments.

1 Die Modelle MISKAM und AUSTAL2000

Das dreidimensionale prognostische Strömungs- und Ausbreitungsmodell MISKAM [1 bis 4] löst die nach *Reynolds* gemittelten Erhaltungsgleichungen für Impuls und Masse auf einem nicht-äquidistanten kartesischen Rechengitter. Als Schließungsansatz ist ein modifiziertes k - ϵ -Turbulenzmodell implementiert. Am Modellunterrand können Gebäudestrukturen explizit als Strömungshindernisse aufgelöst werden. MISKAM ist somit geeignet, die Strömungs- und Ausbreitungsprozesse in bebautem Gelände realitätsnah zu simulieren. Aktuelle MISKAM-Validierungsuntersuchungen sind in [5 bis 8] zu finden.

Dr. rer. nat. Marcus Oliver Letzel,
Dr.-Ing. Thomas Flassak, Dorothee Angel,
Ingenieurbüro Lohmeyer, Karlsruhe.

Das Programm AUSTAL2000 wurde vom Ingenieurbüro Janicke, Dunum, im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin erstellt. Das in AUSTAL2000 enthaltene diagnostische Windfeldmodell TALDIA kann Schichtungs-, Topografie- und Gebäudeinflüsse berücksichtigen. Windfeld- und Ausbreitungsrechnungen werden auf einem kartesischen Koordinatensystem mit horizontal konstanter Maschenweite durchgeführt. Rechengitter können ineinander genestet werden.

2 Kopplung der Modelle MISKAM und AUSTAL2000

2.1 AUSTAL2000 ohne Kopplung

Wird das Modell AUSTAL2000 alleinstehend, d. h. ohne Kopplung, für Ausbreitungsrechnungen mit Auflösung der Bebauung betrieben, wird das Windfeld über ein diagnostisches Windfeldmodell berechnet und die Turbulenz als eine Kombination aus schichtungsabhängigen, horizontal homogenen 1D-Turbulenzprofilen und einer gebäudeinduzierten Zusatz-turbulenz parametrisiert. Das diagnostische Windfeldmodell fordert lediglich die Divergenzfreiheit der Strömung. Es entspricht dem Stand der Technik, physikalische Prozesse und Phänomene wie z. B. Wirbelablösung und Nachlaufzonen müssen im Gegensatz zu prognostischen Modellen parametrisiert werden. Die gebäudeinduzierte Zusatz-turbulenz wird auf der Basis von Windkanal-daten allgemein parametrisiert. Dieser einfache Ansatz kann individuelle Gebäudekonfigurationen nur eingeschränkt berücksichtigen.

2.2 „Alte“ MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung

Für die Kopplung der Modelle MISKAM und AUSTAL2000 existiert seit dem Jahr 2005 eine Schnittstelle zur Übernahme des MISKAM-Windfelds nach AUSTAL2000. Die Übernahme der MISKAM-Gesamt-turbulenz war optional und wurde i. d. R. nicht genutzt, sodass die Turbulenz dann weiterhin von AUSTAL2000 stammte. Der Vorteil dieser Schnittstelle ist, dass das mit dem prognostischen Modell MISKAM berechnete Windfeld aufgrund der besseren Modellphysik realitätsnäher ist als das Windfeld des diagnostischen Windfeldmodells in AUSTAL2000. Damit wird auch die Ausbreitungsrechnung realitätsnäher.

2.3 Neue MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung

Dieser Beitrag beschreibt die Weiterentwicklung der bisherigen Schnittstelle. Der beschriebene, in AUSTAL2000 verwendete Überlagerungsansatz für Turbulenz wurde für die Kopplung von AUSTAL2000 mit dem Turbulenzfeld aus MISKAM aufgegriffen und sinngemäß umgesetzt. AUSTAL2000 übernimmt nun zusätzlich zum MISKAM-Windfeld die gebäudeinduzierte Zusatz-turbulenz aus dem MISKAM-Turbulenzfeld. Diese wird den schichtungsabhängigen horizontal homogenen 1D-Turbulenzprofilen von AUSTAL2000 überlagert. Somit verbindet die Schnittstelle die Stärken beider Modelle miteinander.

Voraussetzung für die Kopplung ist wie bei der bisherigen Schnittstelle ein gleiches horizontal äquidistantes Gitter in beiden Modellen. Eine etwaige vertikale Gitterstreckung muss ebenfalls in beiden Modellen identisch sein. Außerhalb dieses Gebiets ist in MISKAM eine horizontale Gitterstreckung nun zulässig. Dieser zusätzliche „Rechengebietskragen“ in MISKAM sollte unbedingt verwendet werden, um eine realistische Anströmung zu erhalten.

Die drei Komponenten u , v und w des MISKAM-Windfelds sowie der turbulente Diffusionskoeffizient werden direkt nach AUSTAL2000 übernommen. Darüber hinaus ist für die Turbulenzkopplung eine Konvertierung der MISKAM-Zusatzturbulenz ΔE in die Geschwindigkeitsfluktuationen σ_u , σ_v , σ_w erforderlich. Nachfolgend werden dazu verschiedene Ansätze vorgestellt und anhand von Messdaten verglichen. Die Berechnung der turbulenten Fluktuationen bzw. Standardabweichungen der Geschwindigkeitskomponenten geschieht wie folgt:

$$\sigma_u = \sqrt{2 \cdot m_1 \cdot \Delta E \cdot kf + \sigma_{u,1D}^2}$$

$$\sigma_v = \sqrt{2 \cdot m_2 \cdot \Delta E \cdot kf + \sigma_{v,1D}^2}$$

$$\sigma_w = \sqrt{2 \cdot m_3 \cdot \Delta E \cdot kf + \sigma_{w,1D}^2}$$

mit

- ΔE TKE(MISKAM) – TKE_{Eim,1D}(MISKAM)
- $\sigma_{u,1D}$ σ_u aus 1D-AUSTAL-Profil
- $\sigma_{v,1D}$ σ_v aus 1D-AUSTAL-Profil
- $\sigma_{w,1D}$ σ_w aus 1D-AUSTAL-Profil

Dabei ist der TKE (MISKAM) die Gesamtturbulenzenergie aus MISKAM, TKE_{Eim,1D}(MISKAM) ist das eindimensionale Einströmprofil der TKE aus MISKAM ohne Gebäudeeinfluss. Der „Umweg“ über die Gesamtturbulenzenergie ist nötig, weil AUSTAL2000 aus technischen Gründen keine negative Zusatzturbulenz akzeptiert, die im Nachlaufbereich von Gebäuden jedoch durchaus vorkommen kann.

Aus der Kombination von je zwei Varianten für die Vorfaktoren m_1 , m_2 und m_3 und dem Korrekturfaktor kf ergeben sich insgesamt vier Konvertierungsansätze (Tabelle 1). Diese kombinieren immer Variante 1 oder 2 mit Variante a oder b.

In den nachfolgenden Vergleichen mit Messdaten wird zusätzlich eine „Variante 0“ dargestellt, bei der lediglich das MISKAM-Windfeld, aber keine MISKAM-Turbulenzgrößen nach AUSTAL2000 übernommen werden (alte Kopplung).

Die Vorfaktoren für Variante 1 stammen von [9], die Vorfaktoren für Variante 2 waren die Standardwerte der alten MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung für die MISKAM-Gesamtturbulenz.

Der Korrekturfaktor kf ist bei Variante a) ohne Wirkung ($kf = 1,0$), bei Variante b) gilt $kf = 5,345/3,333 = 1,6$. Der Korrekturfaktor für b) lässt sich aus den unterschiedlichen Definitionen der Turbulenzenergie im Eulermodell MISKAM und dem im Lagrangemodell AUSTAL2000 verwendeten Grenzschichtmodell herleiten. Für Eulermodelle wird als Bodenrandbedingung verwendet

$$E = \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}} = 3,333 \cdot u_*^2$$

Für das in AUSTAL2000 realisierte Grenzschichtmodell gilt unter den Voraussetzungen bodennah bei neutraler Schichtung

Tabelle 1. Übersicht über die Varianten für die Vorfaktoren m_1 , m_2 und m_3 und den Korrekturfaktor kf .

Vorfaktoren	Variante 1	Variante 2
m_1	0,54	0,375
m_2	0,30	0,375
m_3	0,16	0,25
Korrekturfaktor	Variante a)	Variante b)
kf	1,0	1,6

$$E = \frac{1}{2} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) = \frac{1}{2} (2,4^2 + 1,8^2 + 1,3^2) \cdot u_*^2 = 5,345 \cdot u_*^2$$

Somit sind die Geschwindigkeitsfluktuationen – berechnet aus der MISKAM-Turbulenzenergie – zu klein, als Ausgleich dient der Korrekturfaktor $kf = 5,345/3,333 = 1,6$ in Variante b).

Der technische Ablauf der Kopplung besteht aus zwei Arbeitsschritten. Im ersten Schritt wird in WinMISKAM die Schnittstelle „Wind- und Turbulenzfelder für AUSTAL2000“ aufgerufen. Diese startet die notwendigen MISKAM-Strömungsrechnungen und führt die Konvertierung der MISKAM-Wind- und Turbulenzfelder in ein in AUSTAL2000 lesbares Format durch. Intern wird dabei eine kurze homogene AUSTAL2000-Rechnung gestartet, aus der die benötigten 1D-Profile der schichtungsabhängigen atmosphärischen Turbulenz ausgelesen werden. Im zweiten Schritt sind die AUSTAL2000-Ausbreitungsrechnungen durchzuführen.

3 Evaluierung: Windkanalreferenzexperimente und Vergleichsrechnungen

3.1 Untersuchungsgebiet: Gebäudestruktur und Messpunkte

Mit den Modellen MISKAM und AUSTAL2000 werden das Strömungsfeld und die Ausbreitung von Emissionen einer punktförmigen Quelle berechnet, die sich im Umfeld eines U-förmigen Gebäudes befindet, und mit Windkanalkonzent-

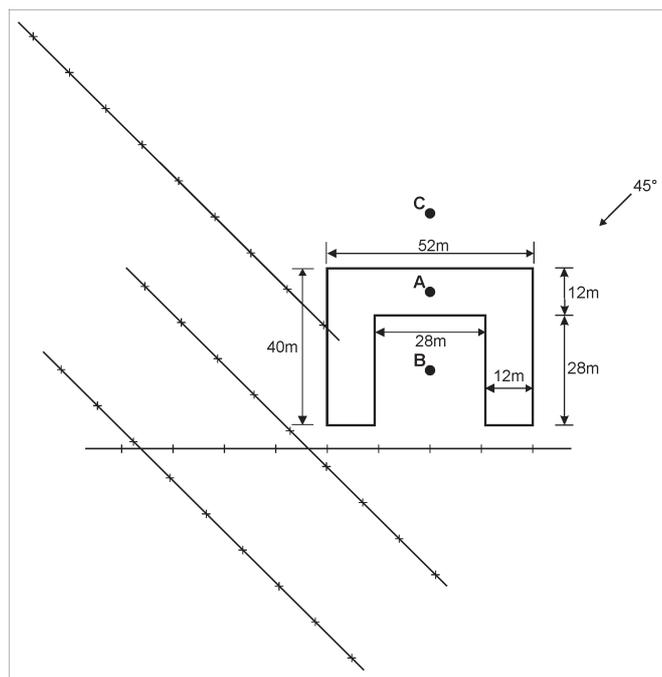


Bild 1. U-förmiges Gebäude mit Anströmrichtung, Quellpositionen und Beispiel für Anordnung der Messpunkte (siehe Text).

Tabelle 2. Übersicht über die behandelten elf Strömungsfälle bzw. 33 Ausbreitungsfälle.

Strömungsfall	Gebäudehöhe in m	Anströmrichtung in °	Ausbreitungsfall	Quellname
1	16	45	1A, 1B, 1C	A, B, C
2	28	45	2A, 2B, 2C	A, B, C
3	40	0	3A, 3B, 3C	A, B, C
4	16	180	4A, 4B, 4C	A, B, C
5	28	0	5A, 5B, 5C	A, B, C
6	28	90	6A, 6B, 6C	A, B, C
7	28	120	7A, 7B, 7C	A, B, C
8	28	135	8A, 8B, 8C	A, B, C
9	28	180	9A, 9B, 9C	A, B, C
10	40	45	10A, 10B, 10C	A, B, C
11	40	180	11A, 11B, 11C	A, B, C

trationsmessungen [10] verglichen. In [11] werden bereits die mit AUSTAL2000 berechneten Konzentrationen mit den im Windkanal gemessenen verglichen. Unterschiede zu den hier gezeigten Ergebnissen liegen in der Modellversion von AUSTAL2000 und der gewählten horizontalen Maschenweite. Modellvergleiche basierend auf Windkanalergebnissen für ein U-förmiges Gebäude sind z. B. auch in [12 bis 13] zu finden.

Die Grundseite des U-förmigen Gebäudes beträgt 52 m, die Schenkel haben eine Länge von 40 m (siehe **Bild 1**). Die Gebäudebreite ist für alle Seiten auf 12 m festgelegt. Analog zu [10] werden die in **Tabelle 2** aufgeführten elf Strömungsfälle betrachtet.

Die Anströmungsgeschwindigkeit beträgt jeweils 5 m/s in 10 m über Grund (ü. G.). Die von [13] bereits mit MISKAM (Version 5.02) und AUSTAL2000 (Version 2.4.4) untersuchten Strömungsfälle 1 bis 3 werden in der vorliegenden Studie um die Fälle 4 bis 11 ergänzt.

Für jeden der elf behandelten Strömungsfälle unterschiedlicher Gebäudehöhe und Anströmrichtung werden drei unterschiedliche Quellpositionen (Quelle A, B bzw. C) betrachtet. Somit basiert diese Studie auf 33 Ausbreitungsfällen mit unterschiedlichen Randbedingungen (vgl. **Tabelle 2**).

Quelle A befindet sich zentral auf der Gebäudegrundseite 2 m oberhalb des Gebäudes. Quelle B und Quelle C befinden sich 2 m ü. G. in der Mitte des Innenhofes bzw. vor der Gebäudegrundseite. Die Quellen B und C haben von Quelle A einen horizontalen Abstand von 20 m. Die Positionen von Quelle A, B und C sind in **Bild 1** eingetragen.

Die Anordnung der Messpunkte hängt von der Gebäudehöhe, der Anströmrichtung und der Quelle ab. Messpunkte befinden sich

- in halber Gebäudehöhe,
- in Gebäudehöhe,
- in anderthalbfacher Gebäudehöhe und
- am Boden.

Die Messpunkte liegen auf Geraden im Lee des Gebäudes orthogonal zur Anströmwindrichtung. **Bild 1** zeigt die Position der Messpunkte in 25, 50 und 80 m Entfernung von Quelle A für den Fall 1A (16 m Gebäudehöhe; 45° Anströmung). Für Fälle mit 45° Anströmung befinden sich weitere Messpunkte auf einer zusätzlichen Geraden parallel zur Grundseite des Gebäudes. Der Abstand der Geraden variiert je nach Fall und Quellposition.

4 Modellparameter

Die Simulationen mit MISKAM (Versionen 5.02 und 6.0) wurden in einem Rechengebiet mit 200 x 200 x 64 Gitterpunkten für Fälle 1, 2 und 4 bis 9 bzw. mit 200 x 200 x 76 Gitterpunkten für Fälle 3, 10 und 11 durchgeführt. Insgesamt bildet das Rechengebiet einen Bereich von 400 m x 400 m x 500 m ab. Die horizontale Maschenweite ist äquidistant 2 m. Die vertikale Maschenweite ist äquidistant 1 m bis in eine Höhe von 40 m für die Fälle 1, 2 und 4 bis 9 bzw. bis in eine Höhe von 52 m für die Fälle 3, 10 und 11. Für die Bodenrauigkeit wurde derselbe Wert wie für die AUSTAL2000-Rechnungen verwendet. Die Rechenzeit für die Berechnung eines stationären Strömungsfelds (d. h. für eine meteorologische Situation) liegt je nach Gebäudehöhe im Bereich von 2,5 bis 6 h. Für die Berechnungen mit AUSTAL2000 (Version 2.4.4) wurden horizontal 198 x 198 Gitterpunkte bei einer Maschenweite von 2 m gewählt (im Gegensatz zu 60 x 60 Gitterpunkten bei 4 m Maschenweite in [11]). Das vertikale Gitter wurde wie in MISKAM gewählt. Bodenrauigkeit und Versatzhöhe wurden aus [11] mit 0,2 m und 1,2 m übernommen. Die Rechenzeit für die Berechnung eines Strömungsfelds (d. h. für eine meteorologische Situation) liegt je nach Gebäudehöhe im Bereich von 15 bis 20 min und ist somit bei dieser Gebäudekonstellation und diesem Rechengitter signifikant niedriger als die Rechenzeit für MISKAM.

5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit der Software BOOT durchgeführt (www.harmo.org/kit/), die ein Teil des „Model Validation Kit“ zur Evaluation von atmosphärischen Ausbreitungsmodellen ist. Zur Datenanalyse kann auf die mittlere Abweichung *FB* (fractional bias), den normierten mittleren quadratischen Fehler *NMSE* (normalized mean square error) und die Trefferquote *FAC2* (Bruchteil der Daten, die weniger als Faktor 2 vom Messwert abweichen) zurückgegriffen werden [14]. *FB*, *NMSE* und *FAC2* sind definiert als:

$$FB = \frac{(\bar{C}_0 - \bar{C}_p)}{0,5(\bar{C}_0 + \bar{C}_p)}$$

$$NMSE = \frac{(C_0 - C_p)^2}{\bar{C}_0 \bar{C}_p}$$

FAC2 = Bruchteil der Daten, die der Bedingung $0,5 \leq \frac{C_p}{C_0} \leq 2,0$ genügen.

Dabei ist C_0 die Konzentration der Messungen im Windkanal, C_p die Konzentration der Modellsimulation und \bar{C} das Mittel aus dem jeweiligen Datensatz. Theoretisch, d. h. unter der Annahme, dass die Windkanalmessungen fehlerfrei sind, ist das perfekte Modell bei der statistischen Auswertung durch $FB = NMSE = 0$ und $FAC2 = 1$ gekennzeichnet. Für *FB* ergeben sich positive (bzw. negative) Werte, wenn das Modell verglichen mit den Messwerten tendenziell niedrigere (bzw. höhere) Werte ausgibt (Hinweis: Dies gilt nicht für die Beträge der *FB*-Werte in **Tabelle 4**). *FB* kann auch direkt als Verhältnis von mittlerer modellierter zu mittlerer gemessener Konzentration interpretiert werden:

$$\frac{\bar{C}_p}{\bar{C}_0} = \frac{1 - 0,5FB}{1 + 0,5FB}$$

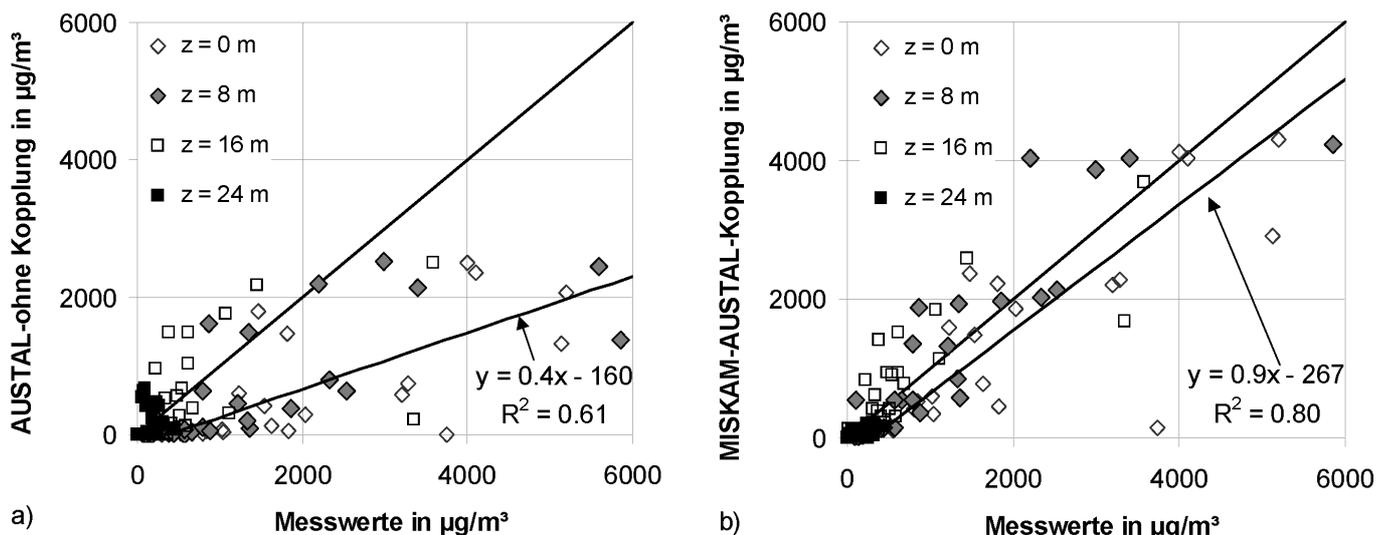


Bild 2. Korrelation mit Messergebnissen, a) nur AUSTAL2000 (ohne Kopplung), b) neue MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung (Variante 1a).

Während *FB* und *NMSE* stark von unregelmäßig auftretenden hohen gemessenen und modellierten Konzentrationen beeinflusst werden, stellt *FAC2* eine sehr robuste Kennzahl dar [14].

6 Ergebnisse

Als Voruntersuchung zur statistischen Auswertung wurden zunächst die mit den verschiedenen Modellen/Kopplungsvarianten modellierten Konzentrationen jeweils einzeln den gemessenen Windkanalkonzentrationen für jeden der 33 Ausbreitungsfälle direkt gegenübergestellt. Insgesamt wurden Streudiagramme für $17 \times 33 = 561$ Simulationsergebnisse erstellt.

Bild 2 zeigt als typisches Beispiel zwei Streudiagramme für den Fall 1B (Gebäudehöhe 16 m, 45° Anströmung, Quelle B im Innenhof), in denen modellierte Konzentrationen gegen gemessene Windkanalkonzentrationen aufgetragen sind. Bild 2a zeigt deutlich, dass AUSTAL2000 (ohne Kopplung) die Konzentrationen in Gebäudenähe insgesamt unterschätzt. Diese Beobachtung gilt in der Summe für alle untersuchten 33 Fälle (hier nicht gezeigt), denn der Mittelwert aller 33 *FB*-Werte für AUSTAL2000 (ohne Kopplung) ist positiv, d. h. AUSTAL2000 unterschätzt im Mittel die Konzentration.

Dies bestätigt das Ergebnis einer früheren Untersuchung [8], dass AUSTAL2000 bei Ausbreitungsrechnungen in Gebäudenähe nicht konservativ ist.

Bild 2b zeigt, dass die neue MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung (Variante 1a) die Korrelation zwischen modellierten und gemessenen Konzentrationen gegenüber AUSTAL2000 (ohne Kopplung) deutlich verbessert. Auch diese Beobachtung gilt in der Summe für alle 33 Fälle (hier nicht gezeigt).

Die nachfolgende statistische Auswertung dient der zusammenfassenden Bewertung aller 561 Simulationsergebnisse. Im ersten Schritt erfolgt eine detaillierte Auswertung auf Fallebene (Tabelle 5), im zweiten Schritt folgt eine komprimierte Gesamtbewertung (Tabelle 4).

Als Beispiel für die detaillierte Auswertung stellt Tabelle 3 die Trefferquote *FAC2* für alle elf Strömungsfälle jeweils für Quelle B (im Innenhof) dar. Der Idealwert ist *FAC2* = 1,0. Zu erkennen ist, dass die neue MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung bessere Kennwerte erzielt als AUSTAL2000 ohne Kopplung; die Modellgüte ist insgesamt vergleichbar mit der reinen MISKAM-Lösung, in Einzelfällen sogar besser. Einschränkung sei darauf hingewiesen, dass die Kennwerte der reinen MISKAM-Lösung nicht direkt vergleichbar sind, da diese Simulationen noch mit der alten MISKAM-Version 5.02 durchgeführt wurden.

Tabelle 3. *FAC2*-Detailauswertung für Quellposition B (Innenhof).

Fall	Nur MISKAM ¹	Nur AUSTAL	Turbulenzkopplung ² Variante 1a	Turbulenzkopplung ² Variante 1b
1B	0,67	0,24	0,55	0,55
2B	0,27	0,25	0,39	0,36
3B	0,43	0,28	0,48	0,46
4B	0,61	0,29	0,48	0,51
5B	0,51	0,40	0,54	0,41
6B	0,67	0,42	0,47	0,47
7B	0,67	0,35	0,61	0,54
8B	0,30	0,33	0,41	0,29
9B	0,35	0,20	0,40	0,28
10B	0,55	0,21	0,37	0,49
11B	0,36	0,23	0,52	0,42
Ø	0,49	0,29	0,47	0,43

¹ MISKAM 5.02 für Strömung und Ausbreitung

² MISKAM 6.0 (Advektion: Upstream)

Eine Übersicht zur Gesamtbewertung aller untersuchten Fälle ist in Tabelle 4 dargestellt. Unabhängig von der MISKAM-Version (5.02 oder 6.0), von den Vorfaktoren (Variante 1 oder 2) und vom Korrekturfaktor (Variante a oder b) liefert die neue MISKAM-AUSTAL2000-Turbulenzkopplung eine deutliche Verbesserung

- gegenüber der reinen AUSTAL2000-Lösung (ohne Kopplung)
- gegenüber der alten MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung (Variante 0, nur Windfeldkopplung).

Bewertet man vorrangig den robusten Parameter *FAC2*, so werden die besten Ergebnisse der Turbulenzkopplung mit MISKAM 6.0, neuen Advektionsverfahren (Impuls: *MacCormack*, Turbulenz:

Tabelle 4. Gesamtübersicht, gemittelt über die Beträge aller untersuchten Fälle.

Mittelwerte über alle elf Fälle, alle drei Quellen	FAC2	FB	NSME
Idealwert (perfektes Modell, fehlerfreie Messung)	1,0	0,0	0,0
Nur MISKAM (Version 5.02)	0,51	0,31	8,42
Nur AUSTAL	0,26	0,51	10,71
Kopplung (5.02, Variante 0)	0,41	0,47	12,82
Turbulenzkopplung (5.02, Variante 1a)	0,49	0,35	8,88
Turbulenzkopplung (5.02, Variante 1b)	0,47	0,36	8,79
Turbulenzkopplung (5.02, Variante 2a)	0,51	0,35	9,01
Turbulenzkopplung (5.02, Variante 2b)	0,51	0,35	9,68
Kopplung ¹ (6.0, Variante 0)	0,40	0,43	13,15
Turbulenzkopplung ¹ (6.0, Variante 1a)	0,51	0,36	8,84
Turbulenzkopplung ¹ (6.0, Variante 1b)	0,47	0,34	8,71
Turbulenzkopplung ¹ (6.0, Variante 2a)	0,51	0,36	8,83
Turbulenzkopplung ¹ (6.0, Variante 2b)	0,51	0,37	9,60
Kopplung ² (6.0, Variante 0)	0,41	0,42	13,03
Turbulenzkopplung ² (6.0, Variante 1a)	0,52	0,38	8,67
Turbulenzkopplung ² (6.0, Variante 1b)	0,48	0,34	8,48
Turbulenzkopplung ² (6.0, Variante 2a)	0,52	0,38	8,64
Turbulenzkopplung ² (6.0, Variante 2b)	0,53	0,39	9,38

¹ Advektion: Upstream

² Advektion: Impuls: MacCormack, Turbulenz: Smolarkiewicz

Smolarkiewicz) und Variante 1a oder 2a erzielt – die Varianten 0 und auch 1b scheiden wegen deutlich schlechterer FAC2- Werte aus, Variante 2b aufgrund schlechter NSME-Werte ebenfalls. Da Variante 2a in einzelnen Extremfällen etwas schlechtere FAC2- Werte aufweist als Variante 1a, wird Variante 1a zum Einsatz empfohlen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die neue MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung mit Vorfaktoren gemäß [9] (Variante 1a) eine deutliche Verbesserung bei Ausbreitungs-

rechnungen in Gebäudenähe erzielt. Die neue MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung bietet damit eine Lösung für das Problem, dass AUSTAL2000 (ohne Kopplung) dort im Mittel nicht konservativ ist.

7 Schlussfolgerung

Mit der neuen MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung liegt nun ein Werkzeug für Ausbreitungsrechnungen vor, das die Stärken beider Modelle vereint:

MISKAM:

- prognostische Modellierung der Gebäudeumströmung,
- AUSTAL2000:
- schichtungsabhängige atmosphärische Turbulenz,
- zeitabhängige Meteorologie,
- mehr Quelleigenschaften: z. B. Überhöhung, zeitlicher Verlauf der Quellstärken.

Durch die MISKAM-AUSTAL2000-Kopplung wird erwartungsgemäß eine

deutliche Verbesserung erreicht gegenüber den Ergebnissen von AUSTAL2000 a) ohne Kopplung oder b) nur mit bisheriger MISKAM-Windfeldkopplung (ohne Übernahme der Turbulenz). Der Quellort wirkt sich auf die Modellgüte aus. Bei der Bewertung der festgestellten Modellabweichungen ist zu beachten, dass es sich hier um meteorologische Einzelsituationen handelt. Auf die Modellabweichung bei der Berechnung von z. B. Jahresmittelwerten kann daraus nicht direkt geschlossen werden.

Literatur

- [1] Eichhorn, J.: Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modells. Dissertation Universität Mainz 1989.
- [2] Eichhorn, J.: Validation of a microscale pollution dispersal model. – In: Gryning, S. E.; Schiermeier, F. A. (Hrsg.): Air pollution modeling and its application XI. New York: Plenum Publishing 1996.
- [3] Eichhorn, J.; Kniffka, A.; Lohmeyer, A.; Flassak, T.: Recent advances of the flow and dispersal model MISKAM: model development and evaluation. 10th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Sissi, Greece 2005.
- [4] Eichhorn, J.; Kniffka, A.: The numerical flow model MISKAM: State of development and evaluation of the basic version. Meteorol. Z. 19 (2010) Nr. 1, S. 81-90.
- [5] Balczó, M.; Gromke, C.; Ruck, B.: Numerical modeling of flow and pollutant dispersion in street canyons with tree planting. Meteorol. Z. 18 (2009) Nr. 2, S. 197-206.
- [6] Donnelly, R. P.; Lyons, T. J.; Flassak, T.: Evaluation of results of a numerical simulation of dispersion in an idealised urban area for emergency response modelling. Atmos. Environ. (2009). doi:10.1016/j.atmosenv.2009.05.038.
- [7] Olesen, H. R.; Berkowicz, R.; Ketzel, M.; Lofstrom, P.: Validation of OML, AERMOD/PRIME and MISKAM using the Thompson Wind-Tunnel Dataset for simple Stack-Building Configurations. Bound. Lay. Meteorol. 131 (2009) S. 73-83.
- [8] Flassak, T.; Janicke, U.; Ketzel, M.: Comparison of ground-level centreline concentrations calculated with the models OML, AERMOD/PRIME, MISKAM and AUSTAL2000 against the Thompson wind tunnel data set for simple stack-building configurations. In: 13th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Paris, 1.-4. Juni 2010.
- [9] Panitz, H. J.; Vogel, B.; Vogel, H.: The Lagrangian particle model traveling, Version 92/3. Hrsg.: Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 4995. Karlsruhe 1994.
- [10] Klein, P.; Rau, M.; Wang, Z.; Plate, E. J.: Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen (Experimente). Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF). Hrsg.: Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-PEF 124, 1994.
- [11] Janicke, U.; Janicke, L.: Weiterentwicklung eines diagnostischen Windfeldmodells für den anlagenbezogenen Immissionsschutz (TA Luft). Umweltforschungsplan des Bundes-

ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Förderkennzeichen (UFOPLAN) 20343256, 2004.

- [12] Röckle, R.; Richter, C.-J.: Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen – Modellrechnungen. Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF), 1995.

- [13] Flassak, T.; Blessing, C.: Vergleich der Modelle MISKAM und AUSTAL2000 am Anwendungsfall eines U-förmigen Gebäudes. Immissionsschutz (2009) Nr. 4, S. 184-188.

- [14] Chang, J. C.; Hanna, S. R.: Technical descriptions and user's guide for the BOOT statistical model evaluation software package, Version 2.0, 2005.