

# Evaluierung des prognostischen mesoskaligen Modells ProWiMo auf der Basis der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7

## Teil 2

T. Flassak

**Zusammenfassung** Die Prognose der Immissionen von Schad- oder Geruchsstoffen erfordert in der Regel Ausbreitungsrechnungen. Für den Fall, dass im Beurteilungsgebiet Steigungen des Geländes überwiegend den Wert 1 : 5 überschreiten oder Steigungen größer 1 : 5 maßgeblichen Einfluss auf die Immissionsprognose an Beurteilungspunkten haben, beschreibt die Richtlinie VDI 3783 Blatt 16 ein Verfahren zur sachgerechten Berücksichtigung von steilem Gelände in der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft und GIRL. Es beruht auf Windfeldberechnungen mit mesoskaligen prognostischen nicht hydrostatischen Modellen gemäß der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7. Im ersten Teil dieses Beitrags wurde bereits der Entwurf dieser Richtlinie sowie ein Teil der Testfallresultate (synthetische Fälle mit zum Teil analytischen Lösungen, Testfälle E1 bis E5), die mit dem prognostischen mesoskaligen Modell ProWiMo erzielt worden sind, vorgestellt. Die verbleibenden Testfälle mit realen Geländeprofilen, bei denen Messdaten vorlagen, werden im Teil 2 beschrieben und die Ergebnisse diskutiert. Das Modell ProWiMo erfüllt die Vorgaben für alle in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 enthaltenen Testfälle sowie die weiteren in der Richtlinie genannten Vorgaben. Somit ist das Modell ProWiMo nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 validiert.

## Evaluation of the prognostic mesoscale model ProWiMo on the basis of the Guideline VDI 3783 Part 7 – Part 2

**Abstract** Predicting the ambient concentration of pollutants or odorous substances usually requires dispersion calculations. If, in the calculation a terrain slope above 1 : 5 occurs extensively or a terrain slope above 1 : 5 has significant effect on the air quality conditions at the receptor points the Guideline VDI 3783 Part 16 describes a method for the proper consideration of steep terrain in the dispersion calculation according to TA Luft and GIRL. It is based on wind field calculations with meso-scale prognostic non-hydrostatic models according to the Guideline VDI 3783 Part 7. In the first part of this article already the draft of the Guideline VDI 3783 Part 7 as well as parts of the test case results (synthetic cases with partly analytical solutions, Test cases E1 to E5) have been presented achieved with the prognostic mesoscale model ProWiMo. The remaining test cases with real terrain profiles, where measured data were available, are described in part 2 and the results are discussed. ProWiMo meets the specifications for all test cases contained in the Guideline VDI 3783 Part 7 as well as the other requirements specified in that guideline. Therefore, ProWiMo is validated according to the Guideline VDI 3783 Part 7.

### 1 Einleitung

Die Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 [1] ist im Mai 2017 erschienen. In [2] wurden der Inhalt der damals noch als Entwurf vorliegenden Richtlinie und die darin für die Modellvalidierung beschriebenen Testfälle vorgestellt, ebenso wie ein

Teil der Testfallresultate (synthetische Fälle mit zum Teil analytischen Lösungen, Testfälle E1 bis E5), die mit dem im Ingenieurbüro Lohmeyer eingesetzten prognostischen mesoskaligen Modell ProWiMo erzielt wurden. Die verbleibenden Testfälle mit realen Geländeprofilen, bei denen Messdaten vorlagen, werden hier beschrieben und die Ergebnisse diskutiert:

- Testfall E6 „Sophienhöhe – Umströmung und Überströmung eines steilen Hügels“,
- Testfall E7 „Grazer Becken – Gegenströmung“ und
- Testfall E8 „Stuttgarter Talkessel – Strömungskanalisation, Kaltluftabflüsse“.

Die Eingangsdaten für diese Testfälle können unter [www.vdi.de/vdi\\_3783-7](http://www.vdi.de/vdi_3783-7) heruntergeladen werden.

### 2 Bedeutung der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7

Die Prognose der Immissionen von Schad- oder Geruchsstoffen erfordert in der Regel Ausbreitungsrechnungen. Im Bereich des anlagenbezogenen Immissionsschutzes trifft die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft, [3]) hierzu Vorgaben und Vorschriften, insbesondere in ihrem Anhang 3. Für die Ermittlung von Geruchsimmissionen ist die Geruchsimmissions-Richtlinie (GIRL [4]) heranzuziehen, deren Anforderungen an eine Ausbreitungsrechnung sich auf das Berechnungsverfahren nach TA Luft stützen.

Mit dem im Anhang 3 der TA Luft angegebenen Berechnungsverfahren können Geländeunebenheiten in der Regel mithilfe eines mesoskaligen diagnostischen Windfeldmodells berücksichtigt werden, wenn die Steigung des Geländes den Wert 1 : 5 nicht überschreitet und wesentliche Einflüsse von lokalen Windsystemen oder anderen meteorologischen Besonderheiten ausgeschlossen werden können. Für den Fall, dass im Beurteilungsgebiet Steigungen des Geländes verbreitet den Wert 1 : 5 überschreiten oder Steigungen größer 1 : 5 maßgeblichen Einfluss auf die Immissionsprognose an Beurteilungspunkten haben, beschreibt die Richtlinie VDI 3783 Blatt 16 [5] ein Verfahren zur sachgerechten Berücksichtigung von steilem Gelände in der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft und GIRL. Es beruht auf Windfeldberechnungen mit mesoskaligen prognostischen, nicht hydrostatischen Modellen gemäß der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 [1]. Dies bedeutet, dass für die Erstellung von prognostischen mesoskaligen Windfeldbibliotheken nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 16 nur Modelle eingesetzt werden dürfen, die nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 evaluiert und qualitätsgesichert [6] sind.

### 3 Testfall E6 „Sophienhöhe – Umströmung und Überströmung eines steilen Hügels“

Im Testfall E6 wird das Modell hinsichtlich seiner Fähigkeit getestet, Um- und Überströmung im orografisch gegliederten Gelände realitätsnah wiederzugeben.

Dr.-Ing. Thomas Flassak,  
Ingenieurbüro Lohmeyer, Karlsruhe.

Tabelle 1. Messwerte und Simulationsergebnisse für Testfall E6 (Sophienhöhe) und mittlere absolute (MAE) und quadratische Fehler (RMSE).

Station	Messhöhe in m	Beobachtung				Simulation		Fehler	
		FF in m/s		DD in Grad		FF in m/s	DD in Grad	FF in m/s	DD in Grad
		von	bis	von	bis				
N-E6-1	10	1,7	2,2	280	282	2,6	276,3	0,4	4
N-E6-2	7,5	0,1	0,5	keine Messung		0,5	284,3	0,0	
N-E6-2	15	0,2	0,6	zu schwachwindig		0,8	269,3	0,2	
N-E6-3	10	1,9	2,2	158	172	1,8	184,8	0,1	13
N-E6-4	7,5	3,3	3,4	keine Messung		2,9	201,9	0,4	
N-E6-4	15	4,4	4,7	220	240	3,9	210,5	0,5	10
N-E6-5	15	3,5	4,1	226	234	2,6	237,4	0,9	3
N-E6-FZ1	50	2,5	3,1	218	225	1,9	231,2	0,6	6
N-E6-FZ2	80	3,6	4,4	keine Messung		3,3	235,5	0,3	
N-E6-FZ3	100	4,2	4,9	keine Messung		4,0	238,4	0,2	
N-E6-FZ4	120	4,4	5,3	235	244	4,5	241,6	0,0	0
							<b>MAE</b>	<b>0,33</b>	<b>5,9</b>
							<b>RMSE</b>	<b>0,41</b>	<b>7,3</b>

DD = Windrichtung  
FF = Windgeschwindigkeit

### 3.1 Allgemeines zum Referenzdatensatz

Die Sophienhöhe ist eine durch den Abbau von Braunkohleflözen des Tagebaus Hambach entstandene rekultivierte Abraumhalde, die bei Jülich im Kreis Düren (Nordrhein-Westfalen) gelegen etwa 13 km<sup>2</sup> Fläche bedeckt und deren höchste Stelle auf 302 m über NN liegt. Experimente im Bereich der Halde Sophienhöhe und der daneben befindlichen Tagebaugrube wurden unter Leitung des Forschungszentrums Jülich und mit nationaler und internationaler Beteiligung u. a. im Jahr 1989 durchgeführt [7]. Die verschiedenen Experimente fanden mit dem Ziel statt, Evaluierungsdaten für mesoskalige atmosphärische Modelle und Ausbreitungsmodelle zur Verfügung zu stellen. Ein Datensatz wurde als besonders geeignet identifiziert und wird in [1] für die Evaluierung herangezogen. Aus einem halbstündigen Messintervall am 19. September 1989, 21:00 bis 21:30 Uhr, wurden Spannbreiten für Windgeschwindigkeit und Windrichtung an den verschiedenen Messorten ermittelt (Tabelle 1). Diese können mit den Ergebnissen von Modellläufen verglichen werden.

### 3.2 Modelleingangsdaten

Für die Simulation mit dem Modell ProWiMo wurde entsprechend der Vorgabe der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 ein

Modellgebiet mit einer horizontalen Gebietsausdehnung von 16,5 km in x-Richtung und 17,4 km in y-Richtung gewählt. Das Prognosegebiet, d. h. das Gebiet, in dem die Modellergebnisse für die Untersuchung verwendet werden, soll eine Größe von 5,5 km in x-Richtung und 5,8 km in y-Richtung haben. Das Geländeprofil für diesen Testfall mit der horizontalen Ausdehnung des Modellgebiets und des Prognosegebiets zeigt Bild 1.

Die Rauigkeitslängen in Abhängigkeit der in ProWiMo auswählbaren Landnutzungsclassen wurden aus [8] übernommen. In Erweiterung hiervon wurde nach der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 für Abbauflächen bzw. Jungwald ein Wert von  $z_0 = 0,1$  m bzw. 0,5 m verwendet.

Die Modellgebietsobergrenze befindet sich in einer Höhe von  $H = 11\ 545$  m. Im Prognosegebiet beträgt die horizontale Maschenweite 100 m. Außerhalb davon nimmt die Maschenweite um den Faktor ca. 1,2 zu bis zu einer maximalen horizontalen Maschenweite von 300 m in x- und y-Richtung. Vom Boden bis zu einer Höhe von 120 m beträgt die vertikale Gitterweite 10 m. Darüber nimmt die Maschenweite um den Faktor ca. 1,2 zu bis zu einer maximalen vertikalen Maschenweite von 1 000 m. Dies ergibt 100 x 108 x 43 Gitterpunkte in x-, y- und z-Richtung. Die Ergebnisse werden nach einer Simulationsdauer von einer Stunde ausgewertet.

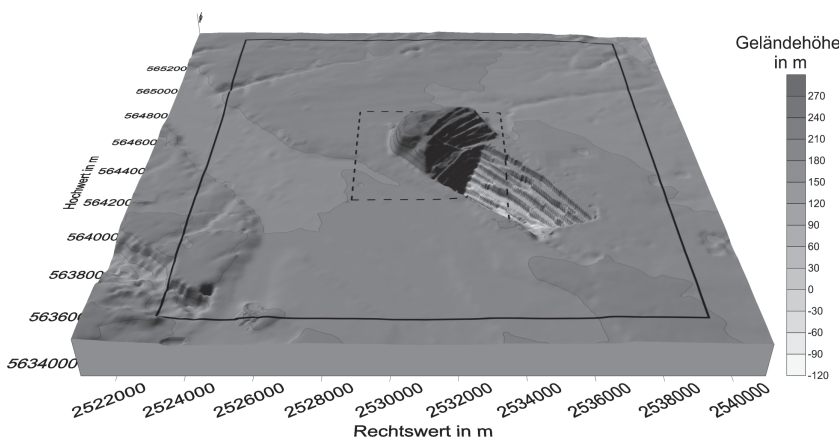


Bild 1. Geländeprofil für den Testfall E6 im Modellgebiet (durchgezogene Linie) und im Prognosegebiet (gestrichelte Linie).

Bild 2 zeigt die für die Simulation zu verwendenden Profile der meteorologischen Anfangswerte für die potenzielle Temperatur, die Windgeschwindigkeit und -richtung bis zu einer Höhe von 1 000 m über Grund. Bis zu einer Höhe von ca. 100 m über Grund herrscht eine stark stabile und darüber eine stabile Schichtung. Die Windgeschwindigkeit hat in einer Höhe von 120 m ein lokales Maximum von 5,5 m/s. Darüber liegt die Windgeschwindigkeit im Bereich von 3,7 bis 15,9 m/s. Der Wind weht bodennah aus südwestlichen Richtungen und dreht mit zunehmender Höhe auf West bis Nordwest. Die Profile sind aus der Sondierung der Gruppe vom Risø DTU (Dänische Technische Univer-

sität) mit dem Fesselballon nordwestlich der Sophienhöhe, dem Radiosondenaufstieg des Deutschen Wetterdienstes (DWD) am Forschungszentrum und dem Radiosondenaufstieg des DWD in Essen abgeleitet worden.

### 3.3 Ergebnisse

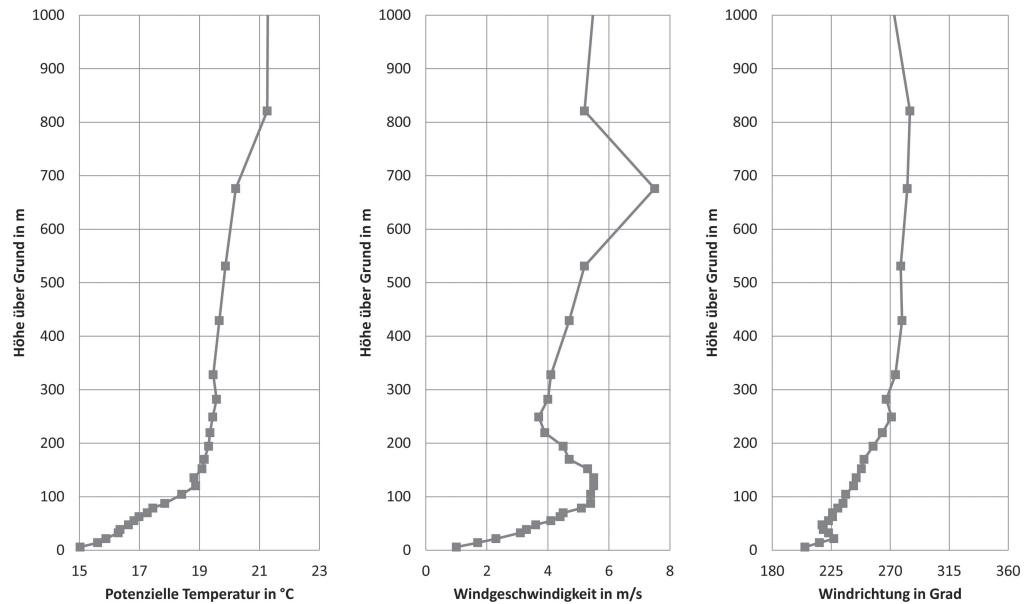
**Bild 3** zeigt die berechnete Bodenwindverteilung in 10 m über Grund für den Testfall E6 im Prognosegebiet nach einer Simulationszeit von einer Stunde. In diesem Bild sind auch die gemessenen Windvektoren (Pfeile mit weißer Füllung) außer für die Messorte E6-N-FZ1 bis E6-N-FZ4 und den Messort E6-N-2 eingetragen. Grund

hierfür ist, dass für die vier Messorte E6-N-FZ1 bis E6-N-FZ4 die Messhöhen in 50 m und darüber liegen und am Messort E6-N-2 in der Messhöhe von 7,5 m keine Messung der Windrichtung vorliegt bzw. in der Messhöhe von 15 m die Windgeschwindigkeit schwachwindig ist, sodass nach [1] die Windrichtung nicht in die Auswertung einzubeziehen ist.

Das simulierte bodennahe Windfeld zeigt einen Staupunkt in der Nähe von Messort E6-N-2. Dies korrespondiert mit den sehr niedrigen gemessenen Windgeschwindigkeiten in 7,5 und in 15 m Höhe an diesem Messort. Die Messungen zeigen an den Messorten E6-N-1 und E6-N-3 eine Umströmung der Sophienhöhe. Dies wird im simulierten Windfeld ebenfalls gut wiedergegeben.

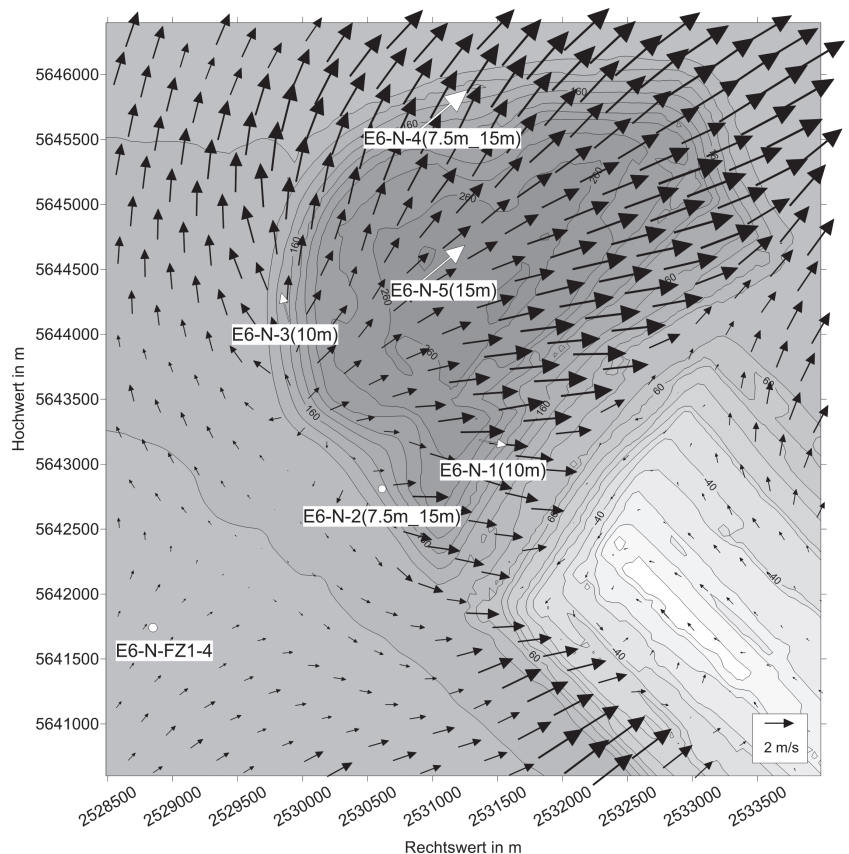
Tabelle 1 gibt für alle Messorte die berechnete Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie die Abweichung von der Spannbreite der Messungen an. Für die Evaluierung können aus den in Tabelle 1 angegebenen Größen der mittlere absolute Fehler *MAE* (vgl. [1]: Gl. (3)) sowie der mittlere quadratische Fehler *RMSE* (vgl. [1]: Gl. (4)) bestimmt werden. Um den Testfall zu bestehen, darf der *MAE* nicht mehr als 0,6 m/s bzw. 13 Grad und der *RMSE* nicht mehr als 0,9 m/s bzw. 19 Grad betragen. Der *MAE* und der *RMSE* betragen 0,33 und 0,41 m/s für die Windgeschwindigkeit und 5,9 und 7,3 Grad für die Windrichtung (vgl. Tabelle 1). Alle vier Werte sind niedriger als die zulässigen Fehlerobergrenzen.

Nach [1] muss als weiteres Kriterium der Windrichtungsunterschied zwischen den Standorten E6-M-1 und E6-M-3 in 15 m über Grund mindestens 60 Grad betragen. ProWiMo berechnet eine Differenz von 72 Grad. Somit erfüllt das Modell ProWiMo den Testfall E6.



**Bild 2.** Anfangsprofil der potenziellen Temperatur, der Windgeschwindigkeit und -richtung für den Testfall E6 bis zu einer Höhe von 1 000 m über Grund.

Im Vergleich dazu werden in [9] für denselben Testfall E6 für den *MAE* 0,42 m/s für die Windgeschwindigkeit und 8,8 Grad für die Windrichtung sowie für den *RMSE* 0,58 m/s für die Windgeschwindigkeit und 12,4 Grad für die Windrichtung berichtet. Somit sind die Fehlerkenngrößen dieses Modells geringfügig höher als die mit dem Modell ProWiMo berechneten.



**Bild 3.** Bodenwindverteilung in 10 m über Grund für den Testfall E6 im Prognosegebiet nach einer Simulationszeit von einer Stunde mit gemessenen Windvektoren (Pfeile mit weißer Füllung), Lage des Messstandorts E6-N-FZ1-4 ist nur informativ eingetragen.

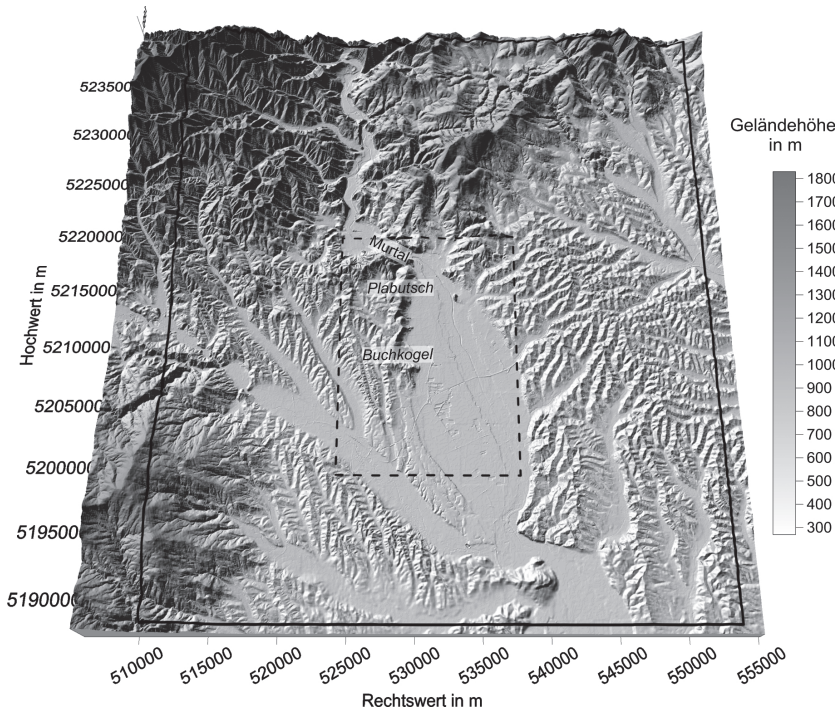


Bild 4. Geländeprofil für den Testfall E7 im Modellgebiet (durchgezogene Linie) und im Prognosegebiet (gestrichelte Linie).

sowie zusätzlich orografisch bedingte Rückströmungen in orografisch komplex gegliedertem Gelände realitätsnah wiederzugeben.

**4.1 Allgemeines zum Referenzdatensatz**

Im Rahmen des DATE-Graz-Projekts (Dispersion of Atmospheric Trace Elements, taking the City of Graz as an Example) wurden zwischen 1997 und 1999 umfangreiche Windmessungen (Fesselballonsondierungen, SODAR, Mast- und Punktmessungen) im Grazer Becken durchgeführt. Auf der Basis der Messergebnisse und idealisierter Strömungssimulationen konnte nachgewiesen werden, dass die nächtlichen südlichen Windrichtungen im südlichen Grazer Becken als dynamischer Effekt erklärbar sind [10]. Generell wird das Grazer Becken während autochthoner Wetterlagen, bei geringem Bedeckungsgrad in den Nachtstunden, durch einen Talwind aus dem Murtal (vgl. Bild 4), der mit nordwestlichen Richtungen verbunden ist, dominiert. Für diesen stellt der Nord-Süd ausgerichtete Plabutsch-Buchkogel-Höhenzug im Westen des Grazer Beckens (Bild 4) eine Barriere dar, mit einer Erhöhung von

**4 Testfall E7 „Grazer Becken – Gegenströmung“**

Im Testfall E7 wird das Modell hinsichtlich seiner Fähigkeit getestet, wie im Testfall E6 Um- und Überströmungen

400 m gegenüber dem Talbecken. Dabei kommt es teilweise zum Überströmen dieses Höhenzugs in den oberen Bereichen und teilweise zum Umströmen mit einer leeseitigen Winddrehung im Grazer Becken von nordwestlichen

Tabelle 2. Messwerte und Simulationsergebnisse für Testfall E7 (Grazer Becken) und mittlere absolute (MAE) und quadratische Fehler (RMSE).

Station	Messhöhe in m	Beobachtung				Gew.-faktor	Simulation		Fehler	
		FF in m/s		DD in Grad			FF in m/s	DD in Grad	FF in m/s	DD in Grad
		von	bis	von	bis					
E7-N-1	60	3,6	3,8	296	319	1/3	1,97	325	1,63	6
E7-N-1	90	4,4	4,5	251	256		2,57	328	1,83	72
E7-N-1	140	4,2	4,6	295	306		3,07	327	1,13	21
E7-N-3	20	0,3	0,7	120	208	1/6	0,72	162	0,02	0
E7-N-3	40	0,7	1,3	104	194		0,76	162	0,00	0
E7-N-3	65	0,9	1,3	47	161		0,46	174	0,44	13
E7-N-3	145	1,9	3,3	305	320		1,44	312	0,46	0
E7-N-3	215	5,6	6,7	315	325		1,99	315	3,61	0
E7-N-3	285	3,6	4,9	301	321	2,15	311	1,45	0	
E7-N-4	20	0,5	1,0	241	298	1/7	1,04	258	0,04	0
E7-N-4	40	1,0	1,3	272	326		1,06	252	0,00	20
E7-N-4	60	1,1	1,5	289	335		1,09	252	0,01	37
E7-N-4	80	0,8	1,4	301	354		1,19	259	0,00	42
E7-N-4	100	0,9	1,6	255	343		1,26	261	0,00	0
E7-N-4	145	1,3	1,8	271	319		1,22	259	0,08	12
E7-N-4	295	3,3	3,6	296	330		2,04	331	1,26	1
E7-N-5	15	0,0	0,5	-	-	1	0,59	160	0,09	-
E7-N-7	72	0,2	1,5	169	199	1	0,47	175	0,00	0
E7-N-8	35	2,1	3,3	293	316	1	2,52	291	0,00	2
E7-N-9	60	0,0	0,5	-	-	1	0,42	146	0,00	-
E7-N-10	10	0,4	1,0	199	309	1	0,91	264	0,00	0
E7-N-11	12	4,7	5,7	258	270	1	2,05	214	2,65	44
E7-N-12	30	1,2	1,4	116	142	1	0,91	156	0,29	14
								<b>MAE</b>	<b>0,58</b>	<b>13,8</b>
								<b>RMSE</b>	<b>1,11</b>	<b>23,8</b>

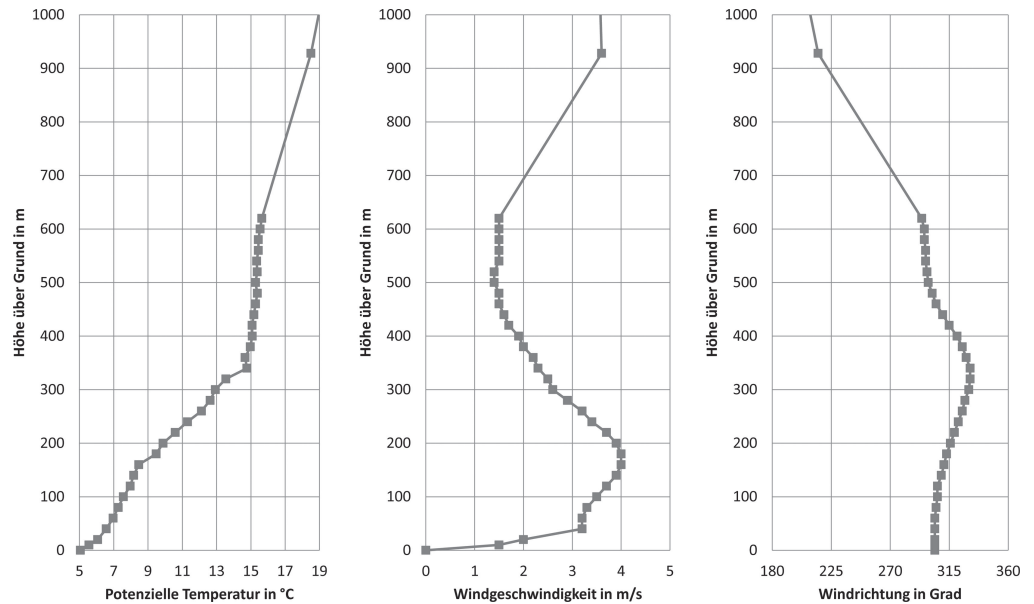
auf südliche Richtungen, verbunden mit sehr geringen Windgeschwindigkeiten. Die Simulation dieses Strömungseffekts ist das Ziel dieser Modellevaluierung. Aus den Messungen wurden Spannbreiten für Windgeschwindigkeit und -richtung an den verschiedenen Messorten ermittelt (vgl. **Tabelle 2**). Diese können mit den Ergebnissen von Modellläufen verglichen werden.

**4.2 Modelleingangsdaten**

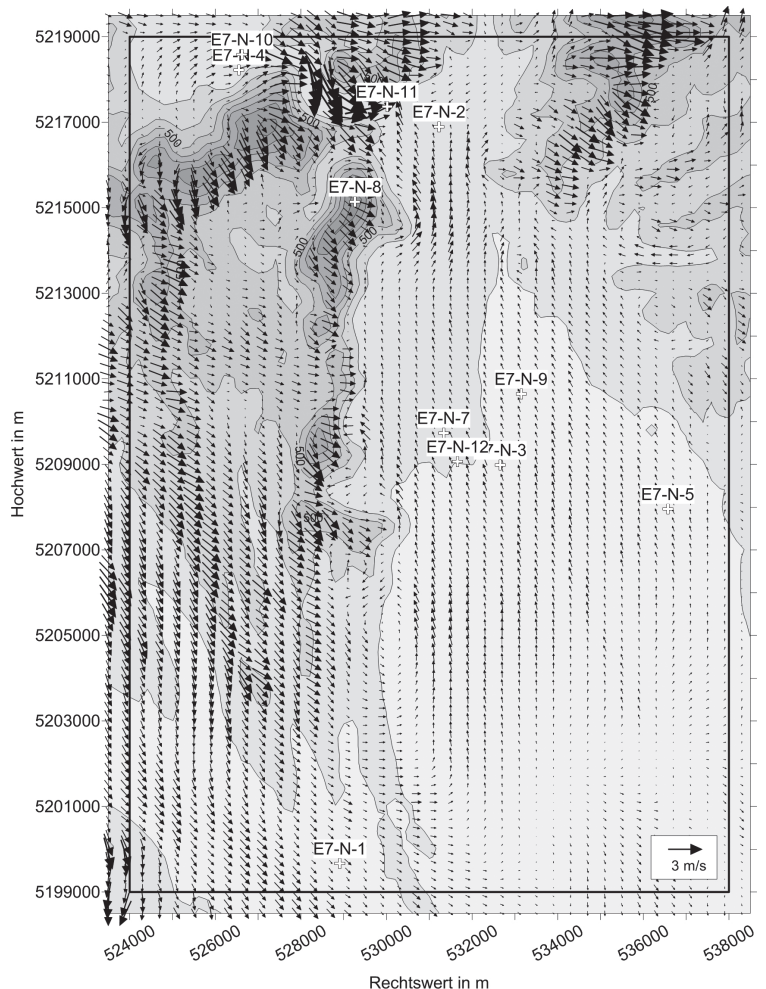
Für die Simulation mit dem Modell ProWiMo wurde ein Modellgebiet mit einer horizontalen Gebietsausdehnung von 44 km in x-Richtung und 50 km in y-Richtung gewählt. Die Modellgebietsgröße erfüllt somit die in der Richtlinie VDI 3785 Blatt 7 angegebene horizontale Mindestmodellgebietsgröße. Das Prognosegebiet, d. h. das Gebiet, in dem die Modellergebnisse für die Untersuchung verwendet werden, soll eine Größe von 14 km in x-Richtung und 20 km in y-Richtung haben. Bild 4 zeigt das Geländeprofil für diesen Testfall mit der horizontalen Ausdehnung des Modellgebiets und des Prognosegebiets. Im Prognosegebiet treten topografische Höhen von ca. 308 bis 717 m auf.

Im Modellgebiet beträgt die horizontale Maschenweite konstant 200 m. Die Modellgebietsobergrenze befindet sich in einer Höhe von  $H = 11\,545$  m. Vom Boden bis zu einer Höhe von 120 m beträgt die vertikale Gitterweite 20 m. Darüber nimmt die Maschenweite um den Faktor ca. 1,2 zu, bis zu einer maximalen vertikalen Maschenweite von 1 000 m. Dies ergibt  $220 \times 250 \times 33$  Gitterpunkte in x-, y- und z-Richtung. Die Ergebnisse werden nach einer Simulationsdauer von einer Stunde ausgewertet.

**Bild 5** zeigt die für die Simulation zu verwendenden Profile der meteorologischen Anfangswerte für die potenzielle Temperatur, die Windgeschwindigkeit und -richtung bis zu einer Höhe von 1 000 m über Grund. Bis zu einer Höhe von ca. 350 m über Grund herrscht eine stark stabile und darüber eine stabile Schichtung. Die Windgeschwindigkeit hat in einer Höhe von 170 m ein lokales Maximum von 4 m/s. Darüber liegt die Windgeschwindigkeit im Bereich von 1,4 bis 7,2 m/s. Der Wind weht bodennah aus nordwestlichen Richtungen und dreht mit zunehmender Höhe entgegen dem Uhrzeigersinn auf Nord. Die Profile sind aus der Sondierung mit dem SODAR beim Wasserwerk (Messort E7-N-2, vgl. **Bild 6**), der bei Graz-Thalerhof gestarteten Radiosonde, dem Fesselballonaufstieg beim Wasserwerk und dem Radiosondenaufstieg an der hohen Warte in Wien abgeleitet worden.



**Bild 5.** Anfangsprofil der potenziellen Temperatur, der Windgeschwindigkeit und -richtung für den Testfall E7 bis zu einer Höhe von 1 000 m über Grund.



**Bild 6.** Bodenwindverteilung in 10 m über Grund für den Testfall E7 im Prognosegebiet nach einer Simulationszeit von einer Stunde mit der Lage der Messstandorte E7-N-1 bis E7-N-11.

**4.3 Ergebnisse**

**Bild 6** zeigt die berechnete Bodenwindverteilung in 10 m über Grund für den Testfall E7 im Prognosegebiet nach einer Simulationszeit von einer Stunde. In diesem Bild sind

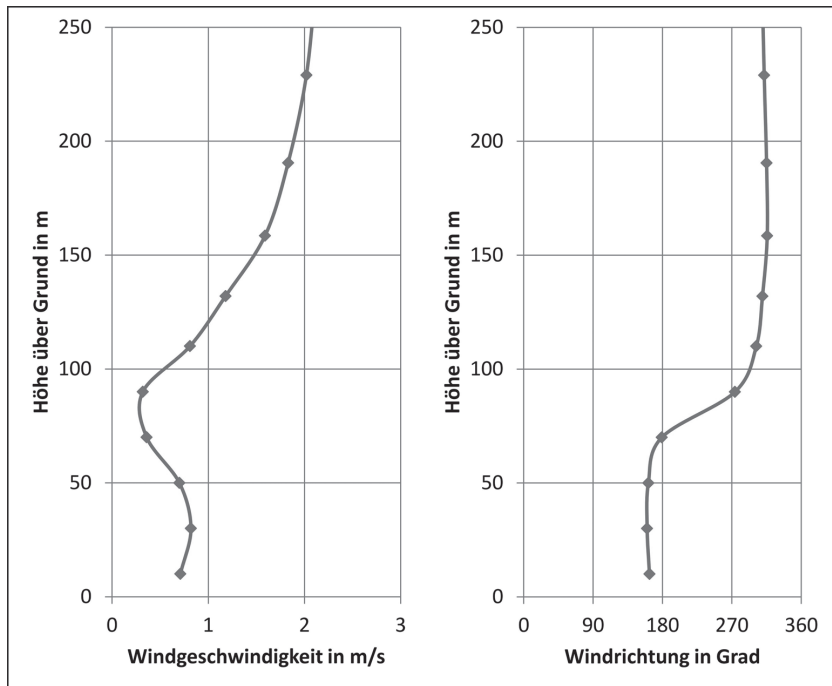


Bild 7. Profil der Windgeschwindigkeit und -richtung nach einer Simulationszeit von einer Stunde am Messort E7-N-3.

0,9 m/s bzw. 18 Grad und der *RMSE* nicht mehr als 1,3 m/s bzw. 25 Grad betragen. *MAE* und *RMSE* betragen 0,58 und 1,11 m/s für die Windgeschwindigkeit und 13,8 und 23,8 Grad für die Windrichtung. (vgl. Tabelle 2). Alle vier Werte sind niedriger als die zulässigen Fehlerobergrenzen.

Nach [1] muss am Messort E7-N-3 im Höhenbereich zwischen 10 und 60 m die Windrichtung zwischen 110 und 250 Grad liegen und die Windgeschwindigkeit weniger als 1,5 m/s betragen. Über 150 m über Grund muss eine Strömung aus dem Nordwestsektor simuliert werden. Bild 7 zeigt das berechnete Profil der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung nach einer Simulationszeit von einer Stunde am Messort E7-N-3. Aus dem Bild ist zu erkennen, dass die geforderten Kriterien in Bezug auf Windgeschwindigkeit und -richtung eingehalten werden. Somit erfüllt das Modell ProWiMo den Testfall E7.

Im Vergleich hierzu werden in [9] für denselben Testfall E7 für den *MAE* 0,57 m/s für die Windgeschwindigkeit und 13,6 Grad für die Windrichtung sowie für den *RMSE* 1,01 m/s für die Windgeschwindigkeit und 23,1 Grad für die Windrichtung berichtet. Somit sind die Fehlerkenngrößen dieses Modells geringfügig niedriger als die mit dem Modell ProWiMo berechneten.

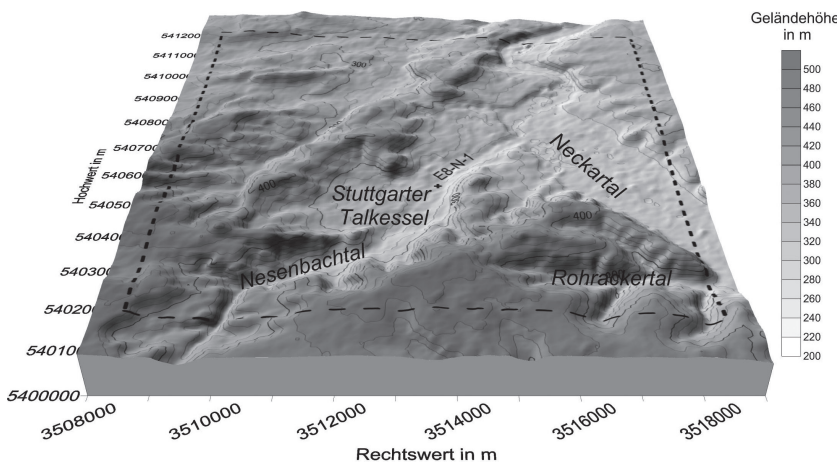


Bild 8. Geländeprofil für den Testfall E8 im Prognosegebiet (gestrichelte Linie).

### 5 Testfall E8 „Stuttgarter Talkessel – Strömungskanalisation, Kaltluftabflüsse“

Bei diesem Testfall wird das Modell auf seine Fähigkeit getestet, in einem Tal gesammelte Kaltluftströmungen bei übergeordnetem großräumigem Wind quantitativ korrekt zu beschreiben.

#### 5.1 Allgemeines zum Referenzdatensatz

Ein geeigneter Testdatensatz ist anlässlich der Planungen von Stuttgart 21 entstanden. Hierzu wurden umfangreiche Messpro-

gramme durchgeführt, u. a. auch zu Kaltluftabflüssen und deren Einfluss auf die Schadstoffausbreitung [11]. Während dieser Messkampagne wurden zwischen dem 1. und 3. April 1997 zwei Fesselballone im Raum Stuttgart zum Einsatz gebracht, um die Kaltluftströmungen im Nesenbachtal (siehe Messort E8-N-1 in Bild 8 – liegt im Mittleren Schlossgarten in der Nähe des Carl-Zeiss-Planetariums Stuttgart) und am Höhenpark Killesberg quantitativ zu erfassen.

In der Messnacht des 1. April 1997 bestand im Stuttgarter Kessel ein zweigeteiltes, d. h. ein „oberes“ und ein „unteres“, voneinander entkoppeltes Windsystem: Am Standort E8-N-1 herrschte vom Erdboden bis in eine Höhe von ca. 100 m Süd- bis Südwestwind. Bei dieser bodennahen Luftströmung handelte es sich um Kaltluftflüsse aus dem Nesenbachtal über den Stuttgarter Talkessel ins Neckartal. Darüber drehte der Wind scharf abgegrenzt auf östliche Richtung, was der überörtlichen Windrichtung entsprach.

auch die Messorte E7-N-1 bis E7-N-11 eingetragen. In den Höhenlagen, wie zum Beispiel im Bereich des Plabutsch-Buchkogel-Höhenzugs im Westen des Grazer Beckens, ist zu beobachten, dass die berechnete Bodenwindverteilung erwartungsgemäß die vorherrschende Strömung aus nordwestlicher Richtung widerspiegelt. Im Bereich des Murtal-durchbruchs in das Grazer Becken zeigt das simulierte bodennahe Windfeld eine kanalisierte, d. h. talparallele Strömungsrichtung mit einer erhöhten Windgeschwindigkeit von über 3 m/s. Südlich des Plabutsch-Buchkogel-Höhenzugs kommt es zum Umströmen mit einer leeseitigen Winddrehung im Grazer Becken von nordwestlichen auf südliche Richtungen, verbunden mit sehr geringen Windgeschwindigkeiten. Tabelle 2 gibt für alle Messorte die berechnete Windgeschwindigkeit und -richtung sowie die Abweichung von der Spannbreite der Messungen an. Für die Evaluierung können aus den in Tabelle 2 angegebenen Größen der *MAE* sowie der *RMSE* bestimmt werden. Um den Testfall zu bestehen, darf der *MAE* nicht mehr als

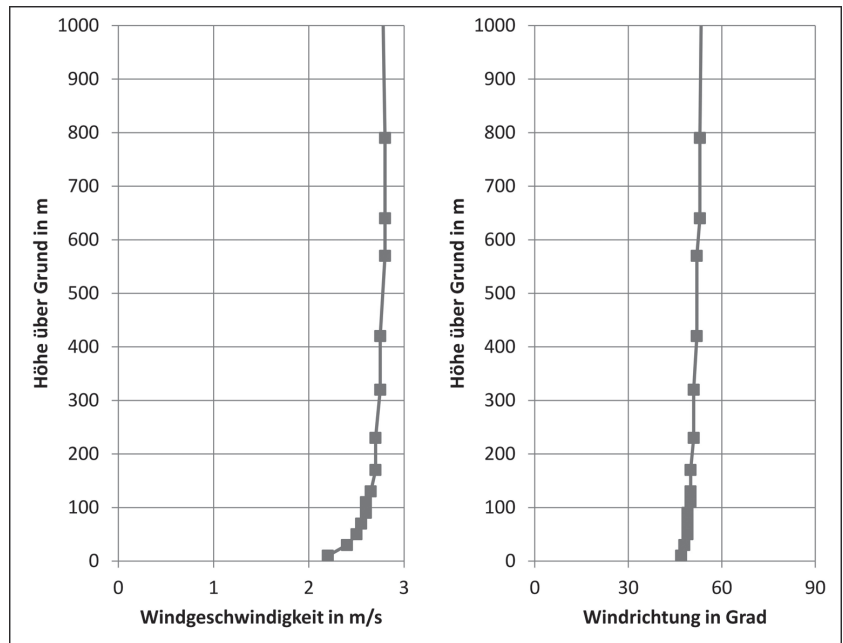
Beim Testfall E8 handelt es sich im Vergleich zu den anderen Testfällen der Richtlinie VDI 3785 Blatt 7 um eine Strömungssimulation mit zeitabhängigen Randbedingungen, in diesem Fall am Modellunterrand. Die Oberflächentemperaturen und -feuchten werden zu jedem Zeitpunkt berechnet und ändern sich während der Simulation. Hierfür muss zusätzlich zu den anderen prognostischen Variablen die Bodentemperatur im Boden berechnet werden.

**5.2 Modelleingangsdaten**

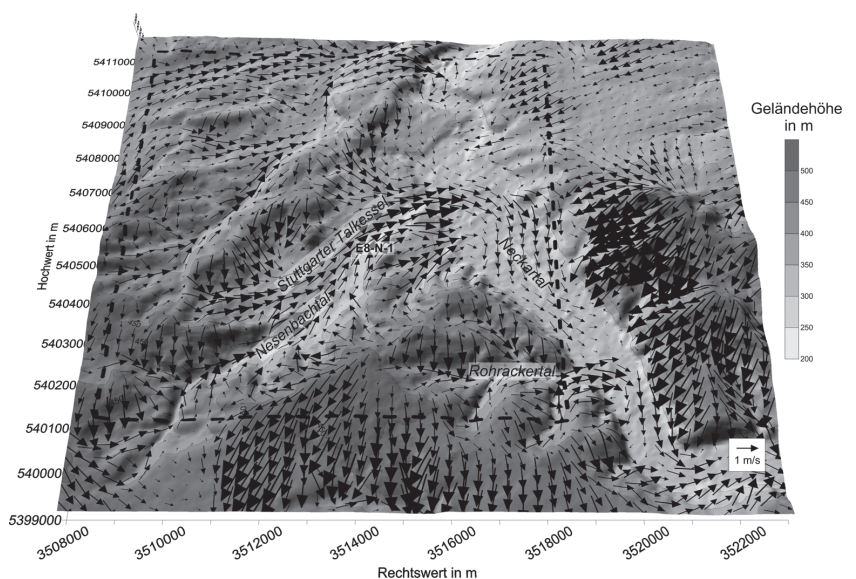
Für den Testfall E8 soll ein Modellgebiet mit einer horizontalen Erstreckung von mindestens 30 km x 30 km gewählt werden, für die Simulation mit ProWiMo betrug die horizontale Gebietsausdehnung 31,1 km x 31,1 km. Die horizontale Erstreckung des Prognosegebiets beträgt 10 km x 10 km und liegt um den Stuttgarter Talkessel. Das Geländeprofil im Prognosegebiet zeigt Bild 8 zusammen mit dem Nesenbach-, Neckar- und Rohrackertal. Im Prognosegebiet treten topografische Höhen von ca. 215 bis 490 m auf.

Die Modellgebietsobergrenze befindet sich in einer Höhe von  $H = 11\,545$  m. In einem Gebiet von 20 km x 20 km, das das Prognosegebiet mittig einschließt, beträgt die horizontale Maschenweite 100 m. Außerhalb des äquidistanten Gebiets nimmt die Maschenweite um den Faktor ca. 1,2 zu bis eine maximale horizontale Maschenweite von 500 m in x- und y-Richtung erreicht ist. Vom Boden bis zu einer Höhe von 120 m beträgt die vertikale Gitterweite 10 m. Darüber nimmt die Maschenweite um den Faktor ca. 1,2 zu bis zu einer maximalen vertikalen Maschenweite von 1 000 m. Das ergibt 242 x 242 x 43 Gitterpunkte in x-, y- und z-Richtung. Die Simulation erfolgt von 17.30 bis 25 Uhr für den 1. April 1997. Sonnenuntergang ist ca. 19.50 Uhr. Es werden die Ergebnisse um 22 und 23 Uhr ausgewertet.

**Bild 9** zeigt die für die Simulation zu verwendenden Profile der meteorologischen Anfangswerte für die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung bis zu einer Höhe von 1 000 m über Grund. Die Windgeschwindigkeit nimmt bis zu einer Höhe von 570 m über Grund bis zu einem Wert von 2,8 m/s zu. Der Wind weht im gesamten Höhenbereich aus nordöstlicher Richtung mit einer leichten bodennahen Drehung der Windrichtung. Für die potenzielle Temperatur wird bis zu einer Höhe von ca. 800 m über Grund eine neutrale Schichtung angesetzt, mit einer potenziellen Temperatur von 16,8 °C und darüber eine stabile Schichtung mit einer Zunahme der potenziellen Temperatur um 3,6 K/km. Die Profile sind aus den Vertikalsondierungen an der DWD-Radiosondestation Stuttgart-Schnarrenberg unter Einbezug bodennaher Messungen an SYNOP-Stationen abgeleitet worden.



**Bild 9.** Anfangsprofil der Windgeschwindigkeit und -richtung für den Testfall E8 bis zu einer Höhe von 1 000 m über Grund.



**Bild 10.** Bodenwindverteilung in 10 m über Grund für den Testfall E8 im Prognosegebiet (gestrichelte Linie) um 22 Uhr.

**5.3 Ergebnisse**

**Bild 10** zeigt die simulierte Verteilung des Windfelds für den 1. April 1997 um 22.00 Uhr in einer Höhe von 10 m über Grund. Die Simulationsergebnisse zeigen die beobachteten Kaltluftflüsse aus dem Nesenbachtal über den Stuttgarter Talkessel ins Neckartal. Auch in anderen Tälern, wie z. B. dem Rohrackertal, folgt die Kaltluftströmung dem Talverlauf und entkoppelt sich von der übergeordneten Strömung. In den Höhenlagen hingegen werden Winde aus östlichen Richtungen berechnet.

**Bild 11** zeigt die simulierten Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und -richtung am Standort E8-N-1 für 22 und 23 Uhr. Aus den Profilen ist zu erkennen, dass das Modell ProWiMo in der Lage ist, das „obere“ und das „untere“, voneinander entkoppelte Windsystem zu simulieren. Der simulierte Sprung in der Windrichtung fällt mit

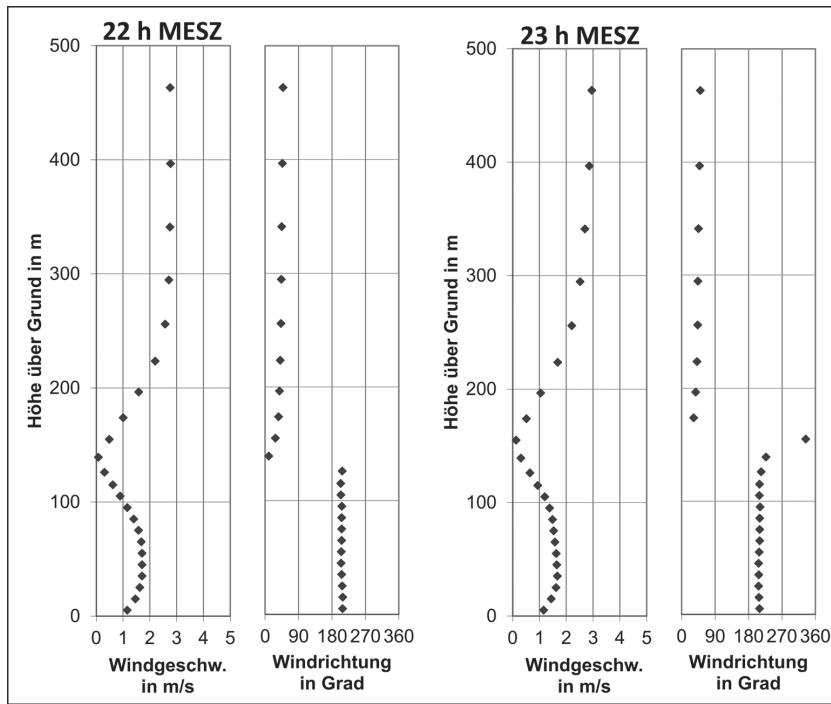


Bild 11. Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung um 22 und 23 Uhr am Standort E8-N-1.

einem simulierten Minimum in der Windgeschwindigkeit zusammen.

Die am 1. April 1997 zwischen 22 und 23 Uhr gemessenen Vertikalprofile des Fesselballons am Standort E8-N-1 (Carl-Zeiss-Planetarium Stuttgart) werden zur quantitativen Modellevaluierung herangezogen. Betrachtet und verglichen werden

- die vertikale Mächtigkeit der Kaltluftschicht,
- die Kaltluftvolumenstromdichte und
- die Richtung der Kaltluftströmung.

Die vertikale Mächtigkeit der Kaltluftschicht wird anhand der Modellausgaben aus den zeitlich gemittelten (22 und 23 Uhr) vertikalen Windrichtungsprofilen extrahiert. Hierzu wird die Höhe der Modellschicht unmittelbar unter-

halb des Sprungs in der Windrichtung (von südliche auf nordöstliche Richtung) bestimmt. Die mittlere Windrichtung wird für den Höhenbereich 25 bis 65 m aus den Modellergebnissen ermittelt und ebenso zeitlich zwischen 22 und 23 Uhr gemittelt.

Ein integrales Maß für den Messwert-Rechenwert-Vergleich stellt die Kaltluftvolumenstromdichte dar. Sie ist der gesamte Kaltluftvolumenstrom durch eine 1 m breite Fläche vom Erdboden bis zur Höhe der Kaltluftschichtdicke (Einheit:  $m^3/(s \cdot m)$ ).

Tabelle 3 zeigt gemessene und für die Evaluierung von Testfall E8 am Standort E8-N-1 erlaubte Spannbreiten sowie simulierte Werte der vertikalen Mächtigkeit der Kaltluftschicht, der Kaltluftvolumenstromdichte und der Richtung der Kaltluftströmung. Die simulierten Werte liegen alle innerhalb der erlaubten Spannbreite. Somit erfüllt das Modell ProWiMo auch den Testfall E8.

### 6 Ausblick

Die Richtlinie VDI 3783 Blatt 16 beschreibt ein Verfahren zur sachgerechten Berücksichtigung von steilem Gelände in der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft und GIRL. Es beruht auf Windfeldberechnungen mit mesoskaligen prognostischen, nicht hydrostatischen Modellen, die nach VDI 3783 Blatt 7 evaluiert und qualitätsgesichert sind, wie z. B. das Modell ProWiMo. Im Bereich der Mikroskala, bei der der Einfluss von Gebäuden auf das Wind- und Turbulenzfeld explizit aufgelöst wird, gibt es analog zur Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 die Richtlinie VDI 3783 Blatt 9 [12] und entsprechende mikroskalige prognostische Modell, die diese Richtlinie erfüllen. Wünschenswert wäre es, wenn in einem nächsten Schritt zwischen den validierten mesoskaligen und mikroskaligen prognostischen Modellen eine Schnittstelle geschaffen wird, um diese zu koppeln.

Tabelle 3. Gemessene und für die Evaluierung von Testfall E8 (Stuttgarter Talkessel) am Standort E8-N-1 erlaubte Spannbreiten sowie simulierte Werte.

	Messwert	Erlaubter Wertebereich	Simulierter Wert
Vertikale Mächtigkeit der Kaltluftschicht in m	95 bis 110	85 bis 160	133
Kaltluftvolumenstromdichte in $m^3/(m \cdot s)$	134 bis 176	90 bis 195	180
Richtung der Kaltluftströmung in Grad		174 bis 221	208

#### Literatur

- [1] VDI 3783 Blatt 7: Umweltmeteorologie – Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. Berlin: Beuth 2017.
- [2] Flassak, T.: Evaluierung des prognostischen mesoskaligen Modells ProWiMo auf der Basis des Entwurfs der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 – Teil 1. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 76 (2016) Nr. 7/8, S. 289-297.
- [3] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). GMBL. (2002) Nr. 25-29, S. 511-605.
- [4] Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen (Geruchsimmissions-Richtlinie – GIRL). www.hlnug.de/fileadmin/downloads/luft/LAI-GIRL\_2008\_mit\_Ergaenzung-10092008.pdf
- [5] VDI 3783 Blatt 16: Umweltmeteorologie – Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle – Verfahren zur Anwendung in Genehmigungsverfahren nach TA Luft. Berlin: Beuth 2015.
- [6] Schlünzen, K. H.; Grawe, D.; Oettl, D.: Qualitätssicherung in der Ausbreitungsrechnung – Evaluierungsrichtlinien für mesoskalige und mikroskalige Windfeldmodelle. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 77 (2017) Nr. 7/8, S. 298-302.



- [7] Zeuner, G.; Heinemann, K: Fourth Field Experiment on Atmospheric Dispersion Around the Isolated Hill, Sophienhöhe in September 1989, Methods – Experiments – Data Bank. Jülich 1993.
- [8] Schlünzen, K. H.; Bigalke, K.: METRAS PC Version 1.0 Benutzerhandbuch, Meteorologisches Institut der Universität Hamburg 1998.
- [9] Oettl, D.: Documentation of the prognostic mesoscale Model GRAMM (Graz Mesoscale Model) Vs. 17.1. Report Lu-02-17. Hrsg.: Amt der Steiermärkischen Landesregierung. Graz 2017. [http://app.luis.steiermark.at/berichte/Download/Fachberichte/Lu\\_05\\_16\\_GRAMM\\_Documentation.pdf](http://app.luis.steiermark.at/berichte/Download/Fachberichte/Lu_05_16_GRAMM_Documentation.pdf)
- [10] Oettl, D.; Almbauer, R. A.; Sturm, P. J.; Piringer, M.; Baumann, K.: Analyzing the nocturnal wind field in the city of Graz. Atmos. Environ. 35 (2000), S. 379-387.
- [11] Vogt, U.; Baumbach, G.; Hansen, S.; Rühling, A.: Messungen der Kaltluftströme und Luftverunreinigungs-Vertikalprofile im Plangebiet „Stuttgart 21“. Untersuchungen zur Umwelt „Stuttgart 21“, Heft 15. Hrsg.: Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, 1999.
- [12] VDI 3783 Blatt 9: Umweltmeteorologie – Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für Gebäude und Hindernisumströmung. Berlin: Beuth 2017.