

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3712 43 241
UBA-FB-00 [trägt die UBA-Bibliothek ein]

Referenzimplementierung eines prognostischen mesoskaligen Windfeldmodells für die Ausbrei- tungsrechnung nach Anhang 3 der TA Luft zur Berücksichtigung von Geländeunebenheiten bei Steigungen 1:5

von

K. Heinke Schlünzen, David Grawe, Ronny Petrik, Eleonore Schenk, Oliver Weiner
Meteorologisches Institut, Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit,
Universität Hamburg, Hamburg Meteorologisches Institut, Centrum für Erdsystemforschung
und Nachhaltigkeit,
Universität Hamburg, Bundesstr. 55, 20146 Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Abschlussdatum April 2018

Kurzbeschreibung

Dieses FuE-Vorhaben realisierte eine Referenzimplementierung eines prognostischen mesoskaligen Windfeldmodells für die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft, das die Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 erfüllt. Die Basis bilden das bereits zuvor bestehende Anwendermodell METRAS-PC und das wissenschaftliche Modell METRAS. Darauf aufbauend ist in diesem Forschungsvorhaben das Modell METRAS-PCL für Anwendungen nach TA-Luft entwickelt worden. METRAS-PCL erfüllt die Vorgaben von Richtlinie VDI 3783 Blatt 7. Insbesondere ist METRAS-PCL für Anwendung in hoch komplexem Gelände für Steigungen größer 1:5 geeignet, besitzt alle notwendigen Modelleigenschaften und erfüllt alle Testfälle. Das Modell ist entsprechend Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 evaluiert. Die Turbulenzparametrisierung des Windfeldmodells rechnet über komplexem Gelände. Die Turbulenzparametrisierung aus VDI 3783 Blatt 8 ist für homogenes Gelände geeignet. In Hinblick auf eine Harmonisierung beider Ansätze sind Ergebnisse beider mit Messdaten des Hamburger Wettermastes verglichen worden. Die Windprofile weisen bei sehr gut angepassten Anfangsdaten (Schichtung) und homogenem Gelände geringe Unterschiede zu den Messungen auf. Die Turbulenzparametrisierung aus VDI 3783 Blatt 8 ist für Windfeldmodelle nicht geeignet, da sie die Verhältnisse über komplexem Gelände und bei vertikal unterschiedlicher Schichtung nicht abbildet.

Für die Bereitstellung aller Daten, die für die Modellgittererzeugung und Topographie nötig sind, sind LBM-DE2012 Datensätze so aufgearbeitet worden, dass diese Daten zu den in METRAS-PCL verwendeten Oberflächenbedeckungen passen. Für Modellanwenderinnen und Modellanwender werden sie zur Erzeugung der Modellgitter einfach und gleichartig nutzbar sein und durch das UBA bereit gestellt. Die Softwareumgebung der Entwicklergruppe ist nun so gestaltet, dass die Referenzimplementierung des Windfeldmodells und das Gittererzeugungsprogram aus der Entwicklungsversion leicht generierbar und evaluierbar sind und bereitgestellt werden können. Für die Modellnutzer sind zwei Workshops im Rahmen des FuE Projektes durchgeführt worden.

Abstract

This R&D project realised a reference implementation of a prognostic mesoscale wind field model for dispersion calculations based on TA Luft, which fulfils the requirements of the standard VDI 3783 part 7. The development is based on the existing user model METRAS-PC and the scientific version of model METRAS. Based on both, the user model METRAS-PCL was developed in this research project for applications based on TA Luft. METRAS-PCL complies with the specifications for model characteristics and documentation specified in standard VDI 3783 part 7. In particular, METRAS-PCL is applicable in highly complex terrain with terrain slopes greater 1:5, includes all necessary model qualities and fulfils all test cases. The model is evaluated following VDI 3783 part 7. The turbulence parameterisation used in the wind field model covers complex terrain. The turbulence parameterisation of VDI 3783 part 8 is developed for homogeneous terrain. In order to harmonise both approaches calculated wind profiles have been compared with measurements taken at the Hamburg weather mast. The calculated wind profiles agree well with measurements for well adjusted initial data (stratification) and homogeneous terrain. The turbulence parameterisation of VDI 3783 part 8 is not suitable for wind field models, because it does not the relations over complex terrain and for vertically heterogeneous stratifications,

For supplying the input data necessary for creating a model grid and topography, LBM-DE2012 data have been processed to fit to the METRAS-PCL used surface covers. These data will be usable by model users to simplify and harmonise the creation of the model grids; the data will be made available by the UBA. The software management at the model developer group is restructured to easy the generation of the reference implementation and of the grid creation program from the scientific version, ensuring its evaluation and ability to become available. Two workshops have been performed in the R&D project for model users.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis und Glossar	11
Symbolverzeichnis	12
Zusammenfassung.....	14
Summary.....	28
1 Einführung	42
2 Automatisierte Erstellung der Referenzimplementierung des Windfeldmodells	43
2.1 Zusammenführung von Modellinitialisierung und Simulation	43
2.2 MAKE-Umgebung für die automatisierte Auskopplung.....	45
2.3 Rückführbarkeit von Modellergebnissen.....	45
3 Evaluierung der Referenzimplementierung des Windfeldmodells	46
3.1 Evaluierungsprogramm.....	46
3.2 Ergebnisse der einzelnen Evaluierungsrechnungen	47
3.2.1 Testfall E1: Quasi-2-D glockenförmiger Rücken.....	47
3.2.1.1 Modellcharakteristiken	47
3.2.1.2 Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter	
3.2.1.3 Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit	48
3.2.1.4 Ergebnisprüfung	48
3.2.2 Testfall E2: Quasi-2-D glockenförmiger Rücken – Windgeschwindigkeitseinfluss.....	49
3.2.3 Testfall E3: Gaußförmiger Berg – Einfluss der Gitterweite	49
3.2.3.1 Modellcharakteristiken	50
3.2.3.2 Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter	50
3.2.3.3 Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit	50
3.2.3.4 Ergebnisprüfung	50
3.2.4 Testfall E4: Gaußförmiger Berg – Abschattungseffekt und Kaltluftabflüsse.....	51
3.2.4.1 Modellcharakteristiken, Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter	51
3.2.4.2 Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit	51
3.2.4.3 Ergebnisprüfung	52
3.2.5 Testfall E5: Gaußförmiger Berg – Einfluss der Anströmrichtung, numerische Genauigkeit.....	52
3.2.5.1 Modellcharakteristiken, Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter	53

3.2.5.2	Ergebnisprüfung	53
3.2.6	Testfall E6: Sophienhöhe – Umströmung und Überströmung eines steilen Hügels	53
3.2.6.1	Modellcharakteristiken	54
3.2.6.2	Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter	54
3.2.6.3	Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit	54
3.2.6.4	Ergebnisprüfung	54
3.2.7	Testfall E7: Grazer Becken – Gegenströmung	55
3.2.7.1	Modellcharakteristiken	55
3.2.7.2	Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter	55
3.2.7.3	Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit	55
3.2.7.4	Ergebnisprüfung	55
3.2.8	Testfall E8: Stuttgarter Talkessel – Strömungskanalisation, Kaltluftabflüsse	57
3.2.8.1	Modellcharakteristiken	57
3.2.8.2	Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter	57
3.2.8.3	Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit	58
3.2.8.4	Ergebnisprüfung	58
3.3	Zusammenfassendes Evaluierungsprotokoll	60
4	Turbulenzparametrisierung nach VDI 3783 Blatt 8	61
4.1	Prüfung der Turbulenzparametrisierung in VDI 3783 Blatt 8	62
4.2	Gegenüberstellung der Turbulenzparametrisierung in VDI 3783 Blatt 8 und im Referenzmodell	66
4.3	Anwendung von Turbulenzparametrisierung in VDI 3783 Blatt 8	68
4.4	Untersuchungen zur Harmonisierung der Profile	71
4.4.1	Harmonisierung nach VDI Blatt 16	72
4.4.2	Möglichkeiten und Grenzen eines Präprozessor für das Windfeldmodell	73
4.4.3	Ergebnisse von „VDI-TurbPre“	76
4.4.4	Übergang von stabiler zu neutraler Schichtung	79
4.4.5	Möglichkeiten und Grenzen der Harmonisierung	79
5	Berücksichtigung detaillierter Oberflächendaten	80
5.1	Oberflächenbedeckungsdaten in METRAS-PCL	80
5.2	Zuordnung der CLC Daten zu METRAS-50 Oberflächenbedeckungen	81
5.2.1	CLC Daten in MeMi Klassen	82
5.2.2	MeMi Klassen in LB Klassen	84
5.2.3	LB Klassen in METRAS-50 Klassen	85
5.3	Geländehöhen für METRAS-PCL	87

5.4	Erstellung der Topographiedatei für METRAS-PCL – Programm GRITOP-L.....	87
6	Modelldokumentation und Schulung der Anwenderinnen und Anwender	89
6.1	Dokumentation von Modellläufen	89
6.2	Modelldokumentation.....	89
6.3	Schulung der Anwenderinnen und Anwender	90
6.4	Bereitstellung von Referenzimplementierung, Daten und Datenaufbereitungsprogrammen.....	91
7	Schlussbemerkungen und Ausblick	91
8	Anhänge	91
8.1	Eigenschaften Oberflächenbedeckungsklassen.....	91
8.2	CLC Klassen und deren Zuordnung zu MeMi Klassen	93
8.3	Anteile CLC Klassen in Deutschland.....	95
8.4	Anteil verschiedenen Landbedeckungen (LB) an den CLC Klassen.....	97
8.5	Anteil verschiedenen METRAS-50 Oberflächenbedeckungsklassen an den Landbedeckungen (LB) in LBM-DE2012.....	102
	Quellenverzeichnis	105

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispielhafte Steuerdatei für die Anwenderversion METRAS-PCL.....	44
Abbildung 2:	Testfall E4 mit Kaltluftabflüssen um 20:30 h (links) und Hangaufwinden am Osthang um 7:30 h (rechts).....	52
Abbildung 3:	Mittlerer absoluter Fehler und Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler für die Windrichtung im Testfall Graz	56
Abbildung 4:	Windfeld in etwa 10 m über der Erdoberfläche für den Testfall Graz im Prognosegebiet.....	57
Abbildung 5:	Orographie für den Testfall Stuttgart	58
Abbildung 6:	Mit dem Modell METRAS-PCL simuliertes Strömungsfeld im Prognosegebiet.....	59
Abbildung 7:	Profile am Standort Stuttgart-Planetarium für 21 UTC am 01.04.1997. Dargestellt sind die Simulationsergebnisse mit METRAS-PCL (grün) und zwei weiteren prognostischen Modellen sowie die Messdaten aus den Fesselballonaufstiegen (grau und schwarz)	60
Abbildung 8:	Evaluierungsprotokoll übernommen aus VDI 3783 Blatt 7, Anhang F (VDI 2017a)	60
Abbildung 9:	Vergleich des nach VDI 3783 Blatt 8 errechneten Windprofils „VDI- Turbnum“ (blau) mit adaptierten METRAS Ergebnissen (rot)	65
Abbildung 10:	Grenzschichtprofile der Windgeschwindigkeit (links) und der Windrichtung (rechts) von METRAS-PCL mit den Lösungen nach VDI 3783 Blatt für den Testfall von Cuxart et al. (2006)	69
Abbildung 11:	Vergleich der Profile des Diffusionskoeffizienten für den Testfall von Cuxart et al. (2006)	70
Abbildung 12:	Grenzschichtprofile des Windfeldmodells und von VDI 3783 Blatt 8 mit Harmonisierungsansatz „Turb-Blatt16“	73
Abbildung 13:	Schema der Harmonisierungsmethode „VDI-TurbPre“	76
Abbildung 14:	Vergleich von Windfeldmodell mit Harmonisierungsansatz „VDI- TurbPre“, VDI 3783 Blatt 8 und Naturdaten.....	77
Abbildung 15:	Ergebnisse der Windprofile für Windfeldmodell und „VDI-TurbPre“ für Klug-Manier-Klassen I-N, II-N, II-M, III2-H, IV-H und V-H.....	78
Abbildung 16:	Ablauf zur Erstellung von GA-Dateien aus CLC und EU-DEM als Eingabe für METRAS-PCL	82
Abbildung 17:	Anteile unterschiedlicher CLC Klassen an der Flächennutzung Deutschlands für CLC Klassen mit wenigstens 1 % Anteil (gerundet) an der Gesamtfläche Deutschlands.....	84
Abbildung 18:	Anteile unterschiedlicher LB Klassen an der Landbedeckung Deutschlands für LB Klassen mit wenigstens 1 % Anteil an der Gesamtfläche Deutschlands	85
Abbildung 19:	Anteile unterschiedlicher METRAS-50 Klassen mit wenigstens 1 % Anteil an der Oberflächenbedeckung der Gesamtfläche Deutschlands	87

Abbildung 20:	Beispielhafte Steuerdatei für die GRITOP-L.....	88
---------------	---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Trefferquote H für Testfall E1	49
Tabelle 2:	Trefferquote H für Testfall E3, gerechnet mit Gitterweiten 100 m (E3a) und 75 m (E3b)	51
Tabelle 3:	Trefferquote H für Testfall E5	53
Tabelle 4:	Vergleich zwischen Annahmen für die VDI Turbulenzparametrisierung und METRAS	67
Tabelle 5:	Oberflächenbedeckungsklassen METRAS-50 in METRAS-PCL.....	81
Tabelle 6:	Anteile verschiedener METRAS-50 Klassen an der CLC Klasse 112 (nicht durchgängig städtisch)	86
Tabelle 7:	In METRAS-PCL berücksichtigten Oberflächenbedeckungsklassen und deren Eigenschaften	92
Tabelle 8:	Zuordnung der CLC Klassen zu den MeMi Klassen	93
Tabelle 9:	Anteile der CLC Klassen in Prozent an der Gesamtfläche Deutschlands	95
Tabelle 10:	Anteile der Landbedeckungen (LB) an den CLC bzw. MeMi Klassen.....	97
Tabelle 11:	Anteile der METRAS-50 Klassen an den Landbedeckungen (LB)	102

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

CEN	Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit
CLC	CORINE Land Cover Data (Flächennutzungsdaten gemischt mit Oberflächenbedeckungen)
CORINE	Coordination of information on the environment
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum
DWD	Deutscher Wetterdienst
EU-DEM	Digitales Oberflächenmodell
Git	Freie Software zur verteilten Versionsverwaltung von Dateien
GRIGAU	Programm zur Erzeugung idealisierter Topographiedaten für METRAS
GRITOP	Programm zur Erzeugung idealisierter Topographiedaten auf Basis verschiedener Topographiedaten für METRAS
GRITOP-L	Programm zur Erzeugung von Topographiedaten für METRAS-PCL auf Basis der durch das UBA Bereit gestellten MeMi Daten
LB	Landbedeckungsinformation in LBM-DE2012
LBM-DE2012	Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland
LES	Grobstruktursimulation (Large-Eddy Simulation)
LST	Lokale Sonnenzeit (Zeit in der METRAS-PCL rechnet, bezogen auf den Koordinatenursprung)
MeMi Klasse	CLC Klassen mit veränderter Nummerierung
METRAS	Mesoskaliges Transport- und Strömungsmodell (Wissenschaftsversion)
METRAS-PC	Windows lauffähige Version der Anwenderversion von METRAS (Stand 2007)
METRAS-PCL	Linux lauffähige Version der Anwenderversion von METRAS
METRAS-50 Klassen	Oberflächenbedeckungsklassen im Modell METRAS
MOS	Monin-Obukhov Ähnlichkeitstheorie
MOST	Statistische Zusammenhänge Modellergebnis-Messungen Model Output Statistics
N	Nord
NCAR	National Centre for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NHN	Normalhöhennull; NHN-Höhen sind in m oder km über Normalhöhennull angegeben (m NHN).
Turbnum	Numerisch gelöster Ansatz aus VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b)
UTC	Koordinierte Weltzeit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Symbolverzeichnis

A_0	Albedo
c_p	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck
D	Zulässige relative Abweichung
D_i	Differenz von zu prüfendem Wert P_i und Vergleichswert O_i
DD	Windrichtung
f	Coriolisparameter
FF	Windgeschwindigkeit
g	Schwerebeschleunigung der Erde
h_m	Mischungsschichthöhe
h_1	Referenzhöhe für das Turbulenzprofil
H	Trefferquote
k_s	Thermische Diffusivität
K	Konstanter vertikaler Diffusionskoeffizient für Impuls
K_m	Höhenabhängiger vertikaler Diffusionskoeffizient für Impuls
I_q	Verfügbarkeit von Bodenwasser
L	Obukhov-Länge
L_{xb}	Halbwertsbreite glockenförmiger Bergrücken
L_{zb}	Maximale Höhe des Geländes
L_{xg}	Standardabweichung Gaußberg
MAE	Mittlerer absoluter Fehler
n	Anzahl der Werte, bei denen Modellergebnisse und Referenzwerte als übereinstimmend angesehen werden
N_R	Anzahl der Vergleichswerte
O_i	Vergleichswerte
p	Druck
p_0	Bezugsdruck von 1000 hPa für die Berechnung der potentiellen Temperatur θ
p_s	Druck in Meeresniveau (NHN)
P_i	Zu prüfende Werte
q_v	Spezifische Feuchte der Luft
q_{v0}	Spezifische Feuchte der Luft in Bodennähe
q^*	Skalengröße für Feuchte
R	Gaskonstante für trockene Luft
R_1	Gaskonstante für Wasserdampf
$RMSE$	Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler

t	Zeit
T	Temperatur
T_s	Temperatur nahe des Erdbodens
u	Komponente des Windvektors parallel zur x -Achse
u_g	Komponente des geostrophischen Windes parallel zur x -Achse
$u_{\sim}$	Windgeschwindigkeit in x -Richtung im größten Höhenniveau ($z=g$) berechnet mit Programm „VDI-Turbnum“
u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit
v	Komponente des Windvektors parallel zur y -Achse
v_g	Komponente des geostrophischen Windes parallel zur y -Achse
$v_{\sim}$	Windgeschwindigkeit in y -Richtung im größten Höhenniveau ($z=g$) berechnet mit Programm „VDI-Turbnum“
w	Komponente des Windvektors parallel zur z -Achse
W	Zulässige Abweichung (Absolutwert)
W_k	Bodenwassersättigung
x	Achse des METRAS-PCL Koordinatensystems, die mit der u -Komponente des Windes verbunden ist. Diese Achse ist bei nicht-rotiertem Koordinatensystem in Breite φ_0 parallel zur West-Ost-Richtung. Die Angaben sind in m.
x_0	Koordinatenursprung des METRAS-PCL Koordinatensystems in x -Richtung (0 m)
y	Achse des METRAS-PCL Koordinatensystems, die mit der v -Komponente des Windes verbunden ist. Diese Achse ist bei nicht-rotiertem Koordinatensystem in Länge λ_0 parallel zur Süd-Nord-Richtung. Die Angaben sind in m.
y_0	Koordinatenursprung des METRAS-PCL Koordinatensystems in y -Richtung (0 m)
z	Vertikale Achse des METRAS-PCL Koordinatensystems. Die Angaben sind in m über z_s .
z_0	Rauigkeitslänge
z_s	Höhe des Geländes in m NHN
z_t	Oberrand des Modells
θ	Potentielle Temperatur
θ_0	Potentielle Temperatur in Bodennähe
θ_*	Skalierungsgröße für die potentielle Temperatur
κ	von Karman Konstante
λ_0	Länge des Koordinatenursprungs. Hier ist $x_0 = 0$ m
ν_s	Thermische Leitfähigkeit
ρ	Dichte der Luft
φ_0	Breite des Koordinatenursprungs. Hier ist $y_0 = 0$ m
ϕ_h	Stabilitätsfunktion für Wärme

Zusammenfassung

a) Motivation des Vorhabens

Die TA Luft (2002) regelt in Anhang 3 die Ausbreitungsrechnung für die immissionsschutzrechtliche Anlagengenehmigung. Für das Ausbreitungsmodell verweist TA Luft (2002) auf Partikelmodelle, wie sie in der Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (VDI 2000) spezifiziert sind. TA Luft (2002) fordert auch die Berücksichtigung von Geländeunebenheiten bei Steigungen über 1:5, ohne die Vorgehensweise abschließend zu regeln. Aus fachlichen Gründen erfordert die Modellierung des Windfeldes in steilerem Gelände die Anwendung eines prognostischen Windfeldmodells. Für diesen Zweck wird häufig das Modell METRAS-PCL (bzw. die vorherige Version METRAS-PC) angewandt um eine Windfeldbibliothek zu erstellen. Diese Windfeldbibliothek wird anschließend für die Ausbreitungsrechnung herangezogen. Das Verfahren zur Erstellung einer solchen Windfeldbibliothek ist in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 16 (VDI 2015) konkretisiert.

METRAS-PCL ist in diesem FuE Projekt als Referenzimplementierung eines Windfeldmodells entwickelt worden. Die Modellcharakteristiken entsprechen den in VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) beschriebenen. Insbesondere sind die bei Projektbeginn getrennten Modelle METRAS (Wissenschaftsversion) und das Anwendermodell METRAS-PC zusammen geführt worden; es besteht nur noch ein gemeinsamer Programmcode, der nachfolgend METRAS genannt wird. Durch das Zusammenführen konnte der erhebliche manuelle Aufwand für die Einbindung von Weiterentwicklungen des wissenschaftlich genutzten METRAS in METRAS-PCL deutlich reduziert werden. Eine automatische Auskopplung soll zukünftig ermöglichen, zeitnah das Wissenschaftsmodell auf das Anwendermodell auf Basis des METRAS Programmcodes zu aktualisieren. Einzelheiten sind zu finden im Abschnitt b). Durch die automatisierte Erstellung können Modellerweiterungen und Fehlerkorrekturen zeitnäher an Anwender weitergegeben werden.

TA Luft (2002) fordert, dass die Eignung des verwendeten Modells entweder nach VDI Richtlinie oder gegenüber einer Landesbehörde nachgewiesen wird. Dieser Nachweis wurde bis 2016 nicht geführt, da noch keine allgemein anerkannte Bewertungsmethodik verfügbar war. Inzwischen ist diese mit der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) verfügbar. Mit der Entwicklung der Richtlinie entstand der Bedarf, die in VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) eingesetzten Methoden wissenschaftlich zu prüfen bzw. weiterzuentwickeln. Darüber hinaus ergab sich die Notwendigkeit, die für Gutachten verwendeten Modelle und damit auch die Modellversionen von METRAS-PCL kontinuierlich zu evaluieren. Einzelheiten hierzu sind weiter unten zu finden im Abschnitt c). Die Referenzimplementierung wurde umfassend dokumentiert und Anwender in der Nutzung geschult. Einzelheiten hierzu sind im Abschnitt g) zu finden.

TA Luft (2002) fordert neben der Nutzung von Windfeldmodellen bei Steigungen über 1:5, dass Wind- und Turbulenzprofile sonst nach einer Konvention aus der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2002) bestimmt werden. Diese Richtlinie ist auf Basis neu ausgewerteter Messdaten in den vergangenen Jahren grundlegend überarbeitet worden, insbesondere in Bezug auf die Parametrisierung der bodennahen Turbulenz. Anhand von Messdaten ist die neue Turbulenzparametrisierung in diesem FuE Projekt mit entwickelt und evaluiert worden. Mit der Referenzimplementierung des Windfeldmodells sind Vergleichsrechnungen zu VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) erfolgt und die Unterschiede bewertet worden. Weitere Einzelheiten hierzu sind weiter unten zu finden im Abschnitt e).

Eine weitere Forderung der TA Luft (2002) ist, dass im Untersuchungsgebiet um die Emissionsquelle herum Geländeunebenheiten (beispielsweise Steigungen von mehr als 1:20) und die aktuelle, räumliche Verteilung der Landnutzungen für die Ausbreitungsrechnungen berücksichtigt werden müssen. Somit folgt die Notwendigkeit, für die in der gutachterlichen Praxis eingesetzten Modelle qualitativ hochwertige und hoch aufgelöste topographische Eingangsdaten zu verwenden. Dies erfordert zum

Einen, dass im Modell eine feine Differenzierung verschiedener Oberflächentypen möglich ist und deren physikalische Eigenschaften subskalig berücksichtigt werden können. Zum anderen müssen realitätsnahe Topographiedaten genutzt werden. Erwartet werden kann, dass die Verwendung neuester Topographiedaten zu belastbareren Ergebnissen bei Windfeldprognosen und meteorologischen Modellvorhersagen führt. Zudem wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Referenzimplementierung des Windfeldmodells durch Nutzung identischer Topographiedaten erhöht. Diese einheitlichen Datensätze können zur Harmonisierung der gutachterlichen Vorgehensweise beitragen, da sie einheitlich aufbereitet sind, für alle nutzbar sind, eine große Realitätsnähe aufweisen aber auch unterschiedliche Oberflächenbedeckungen aufweisen und somit positive Auswirkungen auf Flora-Fauna-Habitat und andere Umwelt-Verträglichkeitsprüfungen haben. Eine Methodik zur Aufbereitung der Datensätze in einheitlicher Form für ganz Deutschland ist entwickelt worden. Die entstehenden Topographiedaten sind bewertet und die Methodik dokumentiert worden. Einzelheiten hierzu sind im Abschnitt f) zu finden. Zur Nutzung der Daten und Erstellung von Topographiedaten wurde ein Workshop durchgeführt. Einzelheiten hierzu sind im Abschnitt g) zu finden.

METRAS-PCL ist über die metras-pcl Web-Seite <https://www.mi.uni-hamburg.de/metraspcl> der Universität Hamburg als Referenzimplementierung des Windfeldmodells allgemein verfügbar. Auch das Topographiedatenaufbereitungsprogramm wird dort bereitgestellt. Die notwendigen Topographiedaten sowie das Programm für die Topographieaufbereitung sowie METRAS-PCL werden unter Einschluss der Dokumentationen über das UBA allgemein unter <https://www.umweltbundesamt.de/metraspcl> bereitgestellt. Einzelheiten sind im Abschnitt h) ausgeführt.

Das FuE Projekt erforderte eine enge Zusammenarbeit nicht nur mit dem Umweltbundesamt, sondern auch den Arbeitsgruppen des VDI und den dort mitarbeitenden Vertretern von Gutachterbüros und Landesbehörden. Näheres ist Abschnitt i) zu entnehmen.

b) Automatisierte Erstellung der Referenzimplementierung des Windfeldmodells

Zu Projektbeginn waren das wissenschaftliche Modell METRAS und das Anwendermodell METRAS-PC auf Programm-Ebene voneinander getrennt. Fortentwicklungen des wissenschaftlichen Modells METRAS konnten nur mit erheblichem Aufwand in die Anwenderversion METRAS-PC übertragen werden. Die Anpassung der separaten Programme musste manuell erfolgen. Ein Verfahren sollte entwickelt werden, das die Auskopplung des unter Linux lauffähigen METRAS-PCL aus METRAS automatisch und möglichst wartungsarm erlaubt, wobei die anwenderfreundliche Bedienung von METRAS-PCL garantiert sein muss. Neue Entwicklungen und Korrekturen sollten so auch zeitnah in die Anwenderversion übertragbar werden. Zudem sollten verschiedene Methoden geprüft werden, die eine Rückführbarkeit von Modellrechnungen ermöglichen, um gegebenenfalls eine für gutachterliche Zwecke genutzte Modellrechnung überprüfen und nachvollziehen zu können.

Hinsichtlich des Ziels, ein möglichst wartungsarmes automatisiertes reproduzierbares System zur Auskopplung der Anwenderversion METRAS-PCL aus METRAS zu erreichen, wurden folgende wesentliche Ergebnisse erzielt:

- Die Quellcodes von METRAS-PCL und METRAS wurden harmonisiert. Dabei wurde der Ansatz gewählt, das Modell METRAS derart weiterzuentwickeln, dass ähnlich anwenderfreundliche Eingabe- und Ausgabestrukturen entstehen wie bisher für METRAS-PC. Eine vorher vorhandene Unterscheidung zwischen verschiedenen Quellcodes von METRAS-1D (Initialisierung), METRAS- 3D (Simulation) und METRAS-PCL ist nicht mehr vorhanden. Die Harmonisierung des Programmcodes erleichtert die Aktualisierung des Programmcodes der Referenzimplementierung des Windfeldmodells, aber auch den Einsatz des Modells für wissenschaftliche oder anwendungsorientierte Fragestellungen.

- ▶ Die Eingabesteuerung ist nun harmonisiert, indem eine NAMELIST-Steuerung eingeführt wurde (Adams et al. 2008), wie sie in atmosphärischen Modellsystemen häufiger eingesetzt wird. Eine selektive Steuerung wurde unter Verwendung von NAMELIST-Gruppen entwickelt, so dass eine Unterscheidung zwischen den umfangreichen Steuermöglichkeiten der wissenschaftlich eingesetzten Version und den eingeschränkten Steuermöglichkeiten der Anwenderversion möglich wird. Von METRAS-PCL und von METRAS wird nun eine Steuerdatei mit demselben Namen gelesen, welche mehrere NAMELIST-Gruppen mit unterschiedlichen Steuerparametern enthält. Durch die NAMELIST-Gruppen wird nicht nur eine thematische Trennung bei der Steuerung erreicht. Zusätzlich lässt sich durch den Einsatz von Präprozessordirektiven bestimmen, ob das übersetzte, ausführbare Programm nur die Standard- Steuerparameter einliest (Anwenderversion) oder zusätzlich die erweiterten Steuerparameter (Wissenschaftsversion). Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass sich die Nutzung tatsächlich im Rahmen der Steuerung der Referenzimplementierung des Windfeldmodells bewegt. Wird ein nicht für die Anwenderversion vorgesehener Steuerparameter verwendet, wird diese Nutzung mit einer Fehlermeldung abgewiesen.
- ▶ Der komplette Quellcode wurde in das Versionsverwaltungssystem Git eingepflegt, auf welches über einen Internetbrowser mit entsprechenden Rechten zugegriffen werden kann und welches gesichert wird. Da jede einzelne, auf dem Server abgelegte Version dokumentiert werden muss, können die Entwicklungen von METRAS sowie METRAS-PCL nun leicht nachvollzogen werden. Das Git Versionsverwaltungssystem protokolliert platzsparend die Änderungen im Quellcode und erlaubt durch die Nutzung von sogenannten tags, eine Version eineindeutig zu markieren (z.B. durch Version 1.5.1). Dieses tag kann genutzt werden, um auch nach längerer Zeit eindeutig eine bestimmte Programmversion zu generieren.
- ▶ Ein automatisches System zum Auskoppeln von METRAS-PCL aus dem gesamten METRAS Code wurde entwickelt und ist erfolgreich auf den in der Universität Hamburg genutzten Rechnern im Einsatz. Dies konnte durch eine umfängliche Veränderung der Versionsverwaltung für den Programmcode sowie eine komplett veränderte MAKE-Umgebung erreicht werden. Letztere erlaubt über Präcompiler-Direktiven Teile des Modells separat zu kompilieren und auf Wunsch zusammenzuführen. Sogenannte GOALS im MAKEFILE und einige Präcompiler-Direktiven im Quellcode erlauben die automatische Auskopplung der gewünschten Version und deren Übersetzung.
- ▶ In der aktuellen Version kann über zwei GOALS entschieden werden, ob die Anwenderversion oder die Wissenschaftsversion von METRAS ausgekoppelt wird. Ein entsprechendes ausführbares Programm wird für Linux Systeme automatisch erstellt. Beispielsweise fallen die Kontrollausgaben in der Anwenderversion wesentlich kompakter und leserlicher aus und nur die Standard-Parameter werden von den Leseroutinen ausgewertet.
- ▶ Die Anwenderversion METRAS-PC (vom März 2007) wurde bezüglich der Kompiliervorgänge der aktuellen technischen Infrastruktur der Universität Hamburg angepasst und ist auf den Rechnersystemen inklusiv eines Linux Notebooks übersetzbar. Damit konnten die Ergebnisse der Anwenderversion von 2007 mit dem wissenschaftlich genutzten METRAS von 2017 verglichen werden. Die Vergleichbarkeit bezieht sich auf die Programmstrukturen, Ein- und Ausgaberroutinen und die Simulationsergebnisse.
- ▶ Für jeden Modelllauf erstellt das Programm eine Protokolldatei, in der für die verwendete Modellversion sowie die vom Nutzer verwendeten Steuerparameter dokumentiert sind. Eine Protokolldatei wird erstellt, die protokolliert. Damit wird auch die Unterstützung der Anwenderinnen und Anwender bei Modell-Problemen erleichtert. Checksummen der Modellergebnisse werden in diese Protokolldatei ausgegeben. Die Checksummen sind so berechnet worden, dass sie möglichst rechnerunabhängig sind. Diese Methode erlaubt zu überprüfen, ob mit der gegebenen Modellversion und den protokollierten Steuerparametern in einem neuen Lauf die gleiche Lösung erzielt werden kann. Die Protokollierung ließ sich allerdings nicht gegen jeden Fäl-

schungsversuch sicher erstellen, so dass im Zweifel eine erneute Rechnung der begutachteten Situation auf Basis der Protokolldatei nötig ist, um die Konformität des verwendeten Programms mit den Referenzmodell zu prüfen.

Weitere Details sind in Kapitel 2 zu finden.

c) Evaluierung der Referenzimplementierung des Windfeldmodells

Zum Ende des Jahres 2015 ist der Gründruck der Richtlinie 3783 Blatt-7, 2017 der Weißdruck erschienen (VDI 2017a). In der Richtlinie sind in Bezug auf die Modellevaluierung viele Aspekte enthalten, die durch Arbeiten innerhalb dieses FuE Projektes entwickelt und getestet wurden. Ein Ziel dieses Projektes war eine weitgehend automatisierte Evaluierung anhand der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a).

Ein Ziel der automatisierten Evaluierung von METRAS-PCL ist sicherzustellen, dass die jeweils aktuelle Version von METRAS-PCL im Rahmen zulässiger Abweichungen mit vorgegebenen Referenzlösungen übereinstimmt. Damit wird die Eignung des Windfeldmodells für die Berücksichtigung von Geländeunebenheiten nachgewiesen. Außerdem können verschiedene Versionen der wissenschaftlichen Version auf ihre Qualität hin geprüft und verglichen werden, auch um eine Entscheidung zu treffen, welche der wissenschaftlichen Neuerungen auch in der Anwenderversion zum Einsatz kommen und dementsprechend mit in METRAS-PCL ausgekoppelt werden sollten.

Die der Evaluierung zugrundeliegenden Testfälle sind zum einen idealisierte Testfälle zur Prüfung programminterner Fehler, zum anderen realitätsnahe Testfälle, für die Vergleiche mit Naturdaten erfolgen. Alle Testfälle der Evaluierungsrichtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) werden berücksichtigt. Die automatisierte Evaluierung gliedert sich inhaltlich in die folgenden Bereiche:

1. Definition aller Testfälle in Bezug auf Modellgebiet, topographische Daten, meteorologische Eingangsgrößen und Modellsteuerung.
2. Erstellen der Verzeichnisstruktur, Laden der Programmcodes aus dem Versionskontrollsystem für die Erstellung des Modellgitters und für die Modellsimulation.
3. Für jeden zu evaluierenden Testfall:
 - a. Vorbereiten der Steuerungsdateien für die Erzeugung des Modellgitters unter Einschluss der Topographie und der Eingabedaten für alle zu evaluierenden Testfälle.
 - b. Erstellung der Gittertopographie durch Ausführen von GRITOP oder GRIGAU für alle zu evaluierenden Testfälle.
 - c. Simulation der zu evaluierenden Testfälle durch Ausführen von METRAS-PCL.
 - d. Visualisierung der Modellergebnisse für alle zu evaluierenden Testfälle.
 - e. Berechnung der Fehler anhand vorgegebener Fehlermaße und Prüfen der objektiven Evaluierungskriterien für alle zu evaluierenden Testfälle.
4. Summarische Auflistung der Evaluierungsergebnisse, um ein Protokoll nach Anhang F von VDI3783 Blatt 7 zu erstellen.

Das automatisierte Evaluationssystem stellt hohe Ansprüche an die Programmierung, da die unterschiedlichsten Präprozessoren, Simulationsmodelle und Postprozessoren zum Einsatz kommen, welche zusätzlich noch versionsabhängig gesteuert werden müssen. In diesem Zusammenhang sind beispielsweise durch die Umstellung der genutzten Rechnersysteme und infolge der Entwicklung der auskoppelbaren Modellversion diverse Anpassungen notwendig, die für die vorhandenen Rechnerkonfigurationen erfolgt sind. Dadurch lassen sich die Punkte 1 bis 3c unter Einschluss der Modellrechnungen entsprechend Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) ohne manuelle Eingriffe durchführen. Die Punkte 3d, e und 4 erfolgen computerunterstützt, erfordern aber auch manuelle Eingriffe.

d) Evaluierungsergebnisse

Die Evaluierung des Modells METRAS-PCL, Version 5.0.0 mit Veröffentlichungsdatum 3. Februar 2017, ist in Übereinstimmung mit Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 erfolgt. Das Modell ist beim Meteorologischen Institut, CEN, Universität Hamburg verfügbar. Die für das Modell verantwortlichen Personen sind K. Heinke Schlünzen und David Grawe, die Evaluierung erfolgte durch David Grawe. METRAS-PCL erfüllt das Kriterium der Nachvollziehbarkeit und besitzt eine ausführliche Modellbeschreibung (Schlünzen et al. 2012a). Ein spezielles Handbuch für METRAS-PCL (Schlünzen et al. 2017) und ein Evaluierungsbericht liegen vor (Kapitel 3 dieses Berichtes). Für wissenschaftliche Nutzer, die auch den Quellcode von METRAS verwenden, ist eine Technische Referenz verfügbar (Schlünzen et al. 2012b).

Die verwendeten Gleichungen sind Reynolds gemittelt und alle drei Windkomponenten sowie die potentielle Temperatur und die Feuchte werden prognostisch gerechnet. Die Corioliskraft wird berücksichtigt. Die Kontinuitätsgleichung wird in anelastischer Näherung gelöst, Auftriebskräfte sind berücksichtigt. Die Parametrisierung der Turbulenz erfolgt stabilitätsabhängig, wobei die Flüsse stetig als Funktion des Orts und der Schichtung sind. Zur Berechnung der bodennahen Flüsse wird die Monin-Obukhov-Theorie genutzt und bei instabiler Schichtung die subskalige Konvektion in der Grenzschicht parametrisiert (Counter-Gradient Ansatz, Lüpkes und Schlünzen 1996). Unterschiedliche Landnutzungseigenschaften werden realisiert über Unterschiede in der Albedo, der thermischen Diffusivität, der thermischen Leitfähigkeit, der Verfügbarkeit von Bodenwasser, der Bodenwassersättigung und der Rauheitslänge. Die bodennahen Flüsse werden über eine Flussmittlungsmethode errechnet (von Salzen et al. 1996). Falls die Temperatur zeitabhängig gerechnet werden soll, wird die Oberflächenenergiebilanz über die „Force-Restore-Methode“ gelöst (Schlünzen et al. 2012a). Die Verdunstungs- und Niederschlagseinflüsse werden in einer Feuchtebilanz am Boden berücksichtigt (Schlünzen et al. 2012a). Geneigte Oberflächen und Abschattung durch Berge werden in der Einstrahlung berücksichtigt.

Alle acht Testfälle aus VDI3783 Blatt 7 (VDI 2017a) sind erfolgreich durchgeführt und evaluiert worden. Tabelle Z1 zeigt die Evaluierungsergebnisse (hier Trefferquoten H , Gleichung Z1) für die idealisierten Testfälle E1 und E3.

$$H = \frac{n}{N_R} = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{i=N_R} n_i \quad \text{mit } n_i = \begin{cases} 1 & \text{falls } |P_i - O_i| \leq W \text{ oder } \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \leq D \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{Z1})$$

Tabelle Z1: Trefferquote H für Testfälle E1 und E3

Parameter	W	D	$H(\text{E1})$	$H(\text{E3a})$	$H(\text{E3b})$	$H(\text{E3a,E3b})$
u	$0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %	99 %	99 %	96 %
v	$0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %	99 %	99 %	97 %
w	$0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %	99 %	99 %	100 %
FF	$0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %	99 %	99 %	97 %
T	0.5 K	0.2 %	100 %	100 %	99 %	100 %

Die Werte für W und D sind Tabelle 2 aus VDI (2017a) entnommen. Die Werte für FF sind zur Information ergänzt und nicht in VDI 3783 Blatt 7 gefordert.

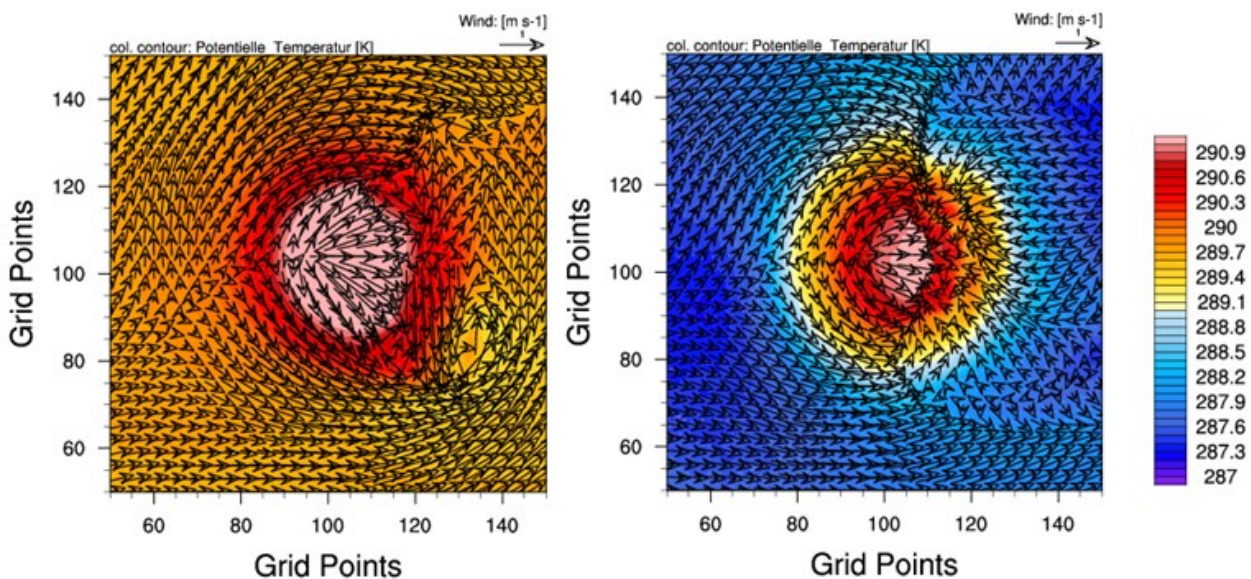
E3 besteht aus zwei Teilttests, E3a ist mit 100 m Auflösung gerechnet, E3b mit 75 m. Die Unabhängigkeit vom Rechengitter soll geprüft werden ($H(\text{E3a}, \text{E3b})$). Dafür werden die mit 100 m Gitterweite erzielten Modellergebnisse (E3-M-a) mit den auf 75 m erzielten Modellergebnissen (E3-M-b) im Prognosegebiet verglichen. Die Interpolation erfolgt wie in Abschnitt 6.1.2.3 von VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) für Vergleiche mit Messungen ausgeführt. Die Modellergebnisse E3-M-a werden auf die Gitter-

punkte von E3-M-b vertikal und horizontal interpoliert, wobei das in METRAS-PCL genutzte Arakawa-C Gitter berücksichtigt wird. Bei einer Vorgegebenen zu errechnenden Trefferquote von 95 % erfüllen die Testfälle die Anforderungen aus VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a).

Mit gleicher Topographie wie in Testfall E1 ist in Testfall E2 geprüft worden, ob die Wellenlänge der stationären Schwerewelle sich im Prognosegebiet mit der gegenüber Testfall E1 in Testfall E2 halbierten Windgeschwindigkeit etwa halbiert und in einem vorgegebenen Rahmen der analytischen Lösung liegt. Beides ist der Fall, die Wellenlänge ist von 3465 m (Testfall E1) auf 1898 m (Testfall E2) gefallen und liegt im anzustrebenden Zielbereich (3000 m bis 4000 m für Testfall E1, 1500 m bis 2000 m für Testfall E2; VDI 2017a).

Ein weiterer idealisierter Testfall (E4) betrachtet Kaltluftabflüsse, die sich in der Nacht über einem Berg bilden und am Morgen durch die Einstrahlung beendet werden. Die nächtlichen Kaltluftabflüsse verstärken die schwache westliche Anströmung (östliche Hänge) bzw. behindern sie (westliche Hänge). Infolge der Abschattung des Osthangs am frühen Abend (bei Sonnenuntergang) setzen die Kaltluftabflüsse zuerst am Osthang ein (Abbildung Z1 links). Die Abbildung zeigt Werte für die potentielle Temperatur und Windvektoren, sie beziehen sich auf 20:30. Durch die Kaltluftabflüsse am Osthang und die gleichzeitig bei der stabilen Schichtung verstärkte Bergumströmung bilden sich östlich des Berges Wirbel aus.

Abbildung Z1: Testfall E4 mit Kaltluftabflüssen um 20:30 h (links) und Hangaufwinden am Osthang um 7:30 h (rechts)



Quelle: Universität Hamburg

Nach Sonnenaufgang um ca. 4 Uhr wird zunächst der östliche Hang beschienen, sodass hier die Kaltluftabflüsse früher aufhören als am westlichen Hang. Ab etwa sieben Uhr bildet sich am Fuß der Berge eine leichte Hangaufströmung aus östlicher Richtung aus. Ihr entgegengesetzt sind die durch die Bergüberströmung und Kaltluftabflüsse noch starken westlichen Hangabflüsse. Dies führt zu einer Konvergenzzone im Windfeld die quer über den östlichen Hang verläuft (Abbildung Z1 rechts). Das Verhalten des Modells ist qualitativ richtig und entspricht somit dem nach VDI (2017a) für Testfall E4 zu erwartenden. Das Modell hat diese Prüfung bestanden.

In Testfall E5 wird in einem ebenfalls idealisierten Test die Abhängigkeit der Modellergebnisse von der Anströmrichtung geprüft. Tabelle Z2 fasst die Ergebnisse zusammen. Die zu erreichende Trefferquote von 95 % (VDI 2017a) wird für Windrichtung und Windgeschwindigkeit übertroffen.

Tabelle Z2: Trefferquote H für Testfall E5

Parameter	W	D	H
FF	$0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	10 %	98.3 %
DD	10° für $FF > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	entfällt	99.2 %

Die Werte für W und D sind den Angaben zu Testfall E5 in VDI (2017a) entnommen.

Die Testfälle E6 und E7 ziehen Naturmessungen zum Vergleich heran. Daher sind für diese Testfälle größere Abweichungen zulässig als bei den idealisierten Testfällen und es werden andere Fehlermaße verwendet. Herangezogen wird der mittlere absolute Fehler MAE (Gleichung 2) und der mittlere quadratische Fehler $RMSE$ (Gleichung 3), berechnet jeweils getrennt für die Horizontalwindgeschwindigkeit FF und Windrichtung DD . Sofern die Windgeschwindigkeit FF unterhalb von $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Testfall E6) bzw. $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Testfall E7) liegt, wird die zugehörige Windrichtung nicht in die Berechnung einbezogen.

$$MAE = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{i=N_R} D_i \text{ mit } D_i = \begin{cases} |P_i - O_{i,min}| & \text{falls } P_i < O_{i,min} \\ |P_i - O_{i,max}| & \text{falls } P_i > O_{i,max} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (Z2)$$

Als Spannbreite $O_{i,min}$ bis $O_{i,max}$ werden für Windgeschwindigkeit und Windrichtung in VDI (2017a) für jeden der N_R Messorte Werte angegeben, die für die Berechnung verwendet werden.

$$RMSE = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{i=N_R} \sqrt{D_i^2} \quad (Z3)$$

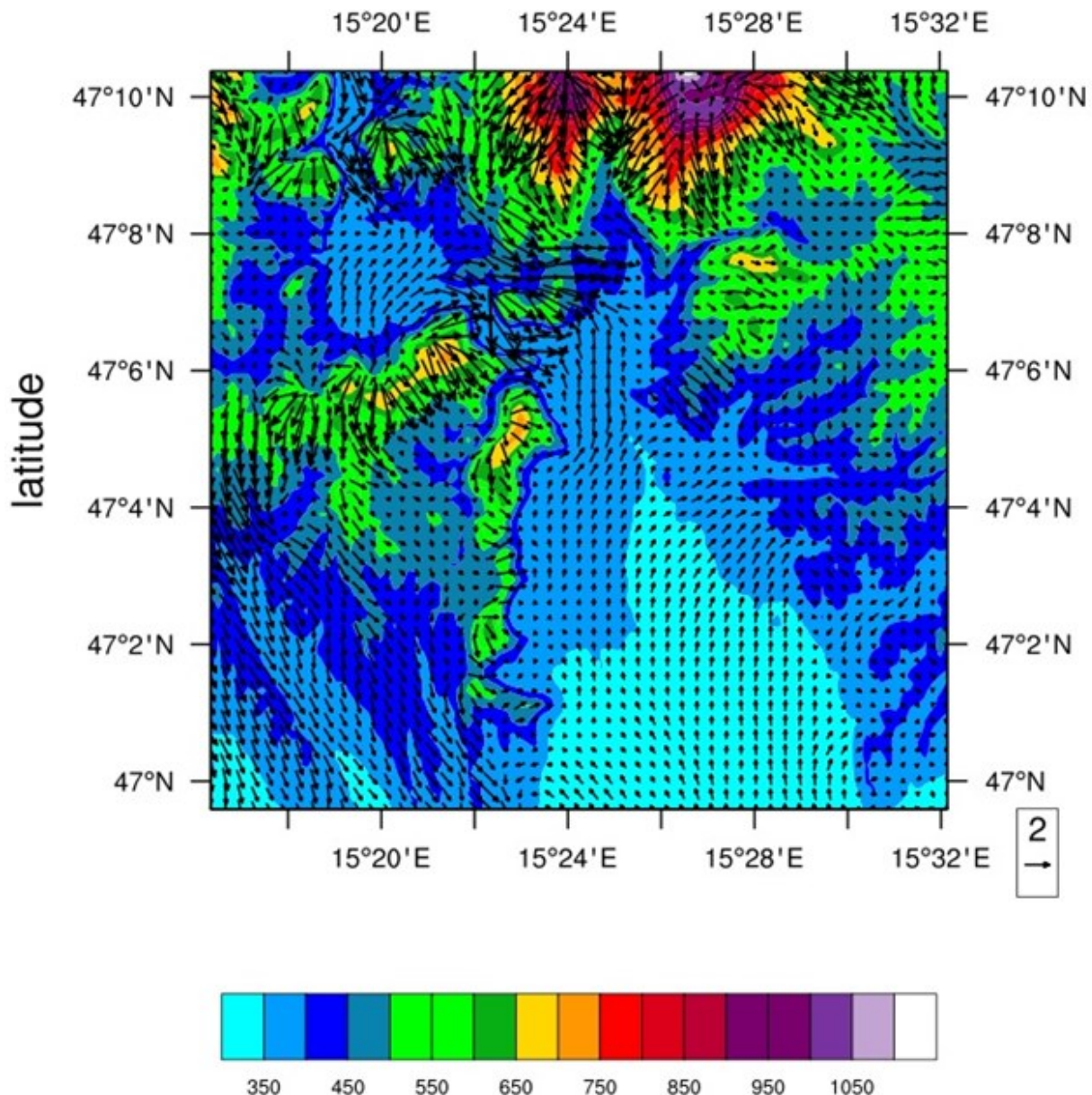
In Gleichung (Z3) wird D_i wie in Gleichung (Z2) angegeben berechnet. Die Modellergebnisse werden für die in VDI (2017a) spezifizierten Orte ausgegeben bzw. auf diese zunächst vertikal und dann horizontal interpoliert.

Für Testfall E6 ergeben sich MAE zu $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. 6° und $RMSE$ zu $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. 9° . Alle Werte sind geringer als die in VDI (2017a) vorgegebenen maximalen Werte für MAE von nicht mehr als $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. 13° und für $RMSE$ von nicht mehr als $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. 19° . Ein zweites Kriterium besteht in der Prüfung des Windrichtungsunterschiedes zwischen zwei Standorten (E6-N-1 und E6-N-3) in 15 m über Grund. Dieser Unterschied muss mindestens 60° betragen und wird berechnet als Differenz von Windrichtung bei E6-N-1 minus Windrichtung an E6-N-3. Er beträgt in METRAS-PCL Ergebnissen 62° . Das Kriterium und letztlich der Testfall sind damit erfüllt.

Zielgrößen des Testfalles E7 sind die Windgeschwindigkeit und -richtung. Geprüft wird die Fähigkeit des Modells, orographische bedingte Einflüsse wie Über- und Umströmungen sowie orographisch bedingte Rückströmungen zu simulieren. Für MAE ergibt sich $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. 10° , für $RMSE$ $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. 20° . Alle Werte sind geringer als die in VDI (2017a) vorgegebenen maximalen Werte für MAE von nicht mehr als $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. 18° und für $RMSE$ von nicht mehr als $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. 25° . Das Kriterium ist damit erfüllt. Darüber hinaus ist geprüft worden, ob die simulierte Windrichtung am Standort der Messung E7-N-3 an allen Gitterpunkten im Höhenbereich zwischen 10 m und 60 m über Grund zwischen 110° und 250° liegen. Zudem müssen die berechneten Windgeschwindigkeiten alle weniger als $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ betragen. Dieses Kriterium ist erfüllt, die Windrichtungen liegen mit 132° ($z = 10 \text{ m}$) und 140° ($z = 30 \text{ m}$) in dem Bereich. Die Windgeschwindigkeiten betragen $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($z = 10 \text{ m}$), $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($z = 30 \text{ m}$) und $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($z = 50 \text{ m}$). Die letztgenannte Geschwindigkeit liegt unterhalb von $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, so dass eine Berechnung der Windrichtung in dieser Höhe nicht sinnvoll ist. Darüber hinaus soll die Windrichtung in $z = 10 \text{ m}$ und $z = 30 \text{ m}$ zwischen 90° und 270° liegen, was mit 132° ($z = 10 \text{ m}$) und 140° ($z = 30 \text{ m}$) erfüllt ist. In größerer Höhe (145 m und 165 m) soll die Windrichtung zwischen 270° und 360° liegen, die simulierten Werte liegen bei 354° ($z = 145 \text{ m}$), 356° ($z = 165 \text{ m}$). Damit ist auch dieses Kriterium erfüllt.

Für Testfall E7 soll auch eine optische Auswertung erfolgen: Bodennah sollte eine Strömung aus südlichen Richtungen an den Gitterpunkten in der Umgebung des Standorts E7-N-3 simuliert werden. Abbildung Z2 zeigt das Modellergebnis 90 Minuten nach Simulationsbeginn. Die Farben symbolisieren die Höhe des Geländes in m NHN. Die Windpfeile sind auf 2 m/s normiert, wobei der Referenzpfeil unten rechts dargestellt ist. Die südliche Strömung ist gut zu erkennen. In der Umgebung von E7-N-3 muss in größerer Höhe, also ab 150 m über Grund, die Strömung aus dem Nordwestsektor kommen und damit der übergeordneten, initialisierten Strömung) entsprechen. Auch dieses wurde von METRAS-PCL simuliert (nicht in der Abbildung zu sehen).

Abbildung Z2: Windfeld in etwa 10 m über der Erdoberfläche für den Testfall Graz im Prognosegebiet

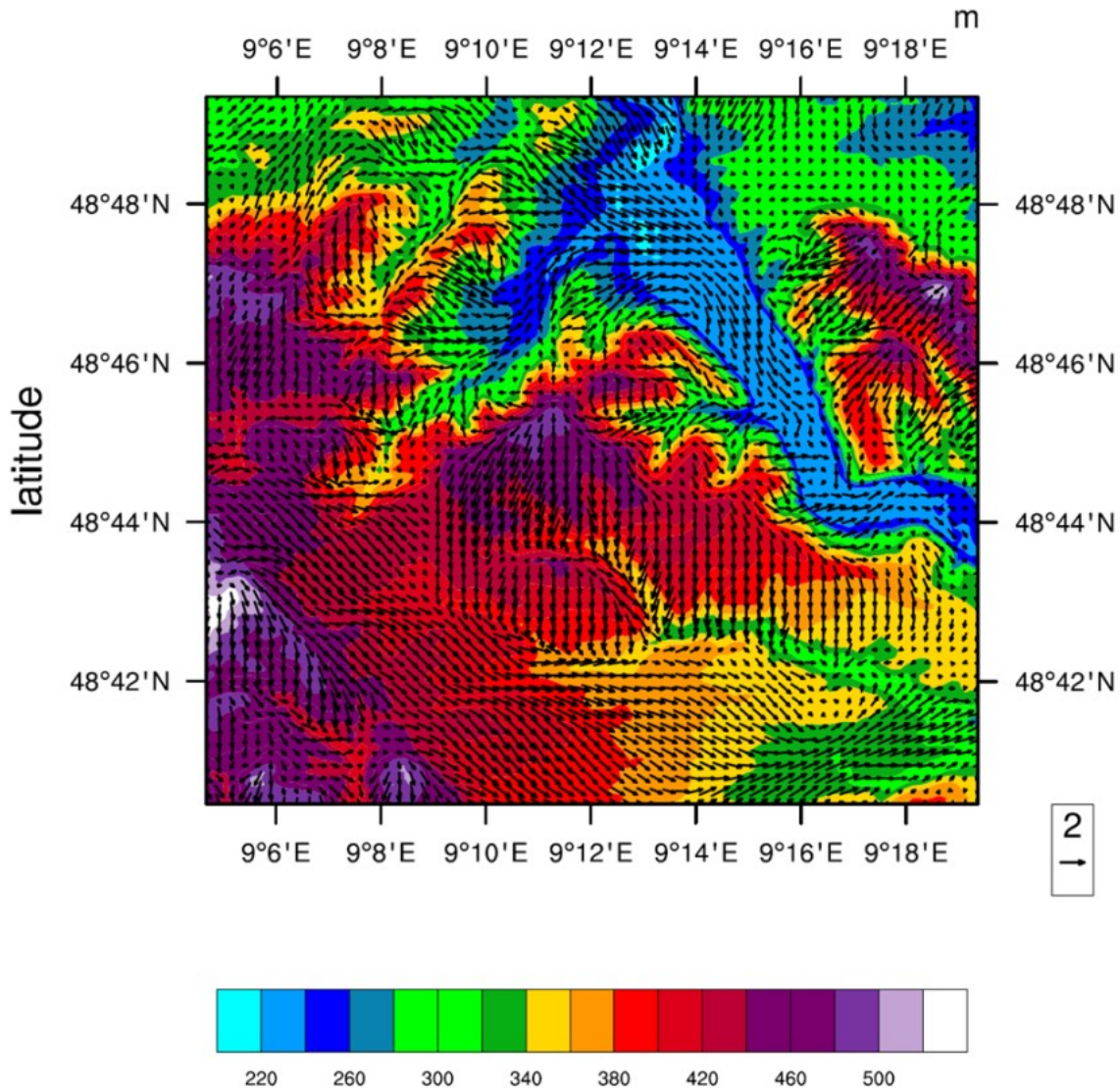


Quelle: Universität Hamburg

In Testfall E8 werden Windgeschwindigkeit und -richtung bei orographisch bedingten Kaltluftabflüssen geprüft. Das von METRAS-PCL für den Zeitpunkt 21 UTC simulierte Windfeld ist in Abbildung Z3 dargestellt. Die Geländehöhen sind farbig dargestellt. Der zur Normierung der Windpfeile herangezogene Wert von 2 m s^{-1} findet sich rechts unten in Abbildung Z3. Deutlich sind die entlang der Berghänge der Wartbergklinge (nordöstlich des Stadtzentrums von Stuttgart) und der Hänge südlich des

Stadtzentrams entstehenden Hangabflüsse zu erkennen, welche in das Nesenbachtal einströmen und die Stadt Stuttgart von Süd-Westen her durchströmen. Am Ausgang des Nesenbachtals fließt die Luft dann in das Neckertal und stromaufwärts nach Süd-Osten. Letzteres Phänomen wurde von mehreren mesoskaligen Modellen simuliert, kann mangels Messdaten aber nicht evaluiert werden. Die Strömung aus Süd-Westen im Stuttgarter Stadtbereich entspricht gemessenen Werten für diesen Testfall. Darüber hinaus ist METRAS-PCL auch in der Lage, die Strömung aus Nord-Westen am Killesberg (48°48'30" Nord und 9°11' Ost) zu simulieren, welche durch eine entlang des Höhenzuges Wartbergklinge auftretende Talenge strömt.

Abbildung Z3: Mit dem Modell METRAS-PCL simuliertes Strömungsfeld im Prognosegebiet



Quelle: Universität Hamburg

Geprüft wird die simulierte vertikale Mächtigkeit des Kaltluftstroms. Sie wird aus den zeitlich gemittelten (20:30 LST bis 21:20 LST) vertikalen Windrichtungsprofilen für den Ort Planetarium ermittelt, in dem die Höhe der Modellschicht unmittelbar unterhalb des Sprungs in der Windrichtung (von südlicher Richtung bodennah auf nordöstlicher Richtung darüber) bestimmt wird. Der Windsprung liegt in etwa 120 m über Grund. Dieser Wert ist oberhalb von 85 m und unterhalb von 160 m, so dass dieses Kriterium erfüllt ist. Wie in VDI 3783 Blatt 7 gefordert, fällt der simulierte Sprung in der Windrichtung mit einem Minimum der Windgeschwindigkeit zusammen. Die Stärke des Kaltluftvolumenstromes wird ebenfalls aus dem Profil der Windgeschwindigkeit abgeleitet. In etwa 50 Meter über

Grund befindet sich ein Maximum der Windgeschwindigkeit mit rund 1.6 m/s. Darüber und darunter ist die Strömung schwächer ausgeprägt. Eine Integration der Windgeschwindigkeit und der Schichtdicke über den Einflussbereich des Kaltluftstroms liefert eine Volumenstromdichte von $116 \text{ m}^3/(\text{m s})$. Auch dieser Wert erfüllt die Kriterien der Richtlinie (Volumenstrom zwischen 90 und $195 \text{ m}^3/(\text{m s})$; VDI 2017a). Die Richtung der Kaltluftströmung soll laut VDI (2017a) für den Standort Planetarium zwischen 174° und 221° betragen. Dabei sind mittlere Windrichtungen für den Höhenbereich 25 m bis 65 m und zeitlich von 20 UTC bis 21 UTC zu betrachten. Mit einer Windrichtung von 200° ist auch dieses Kriterium erfüllt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das mesoskalige Modell METRAS-PCL (Version 5.0.0) in Übereinstimmung mit Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) erfolgreich evaluiert ist. Einzelheiten zu Modellevaluierung sind Kapitel 3 zu entnehmen.

e) Turbulenzparametrisierung nach VDI 3783 Blatt 8

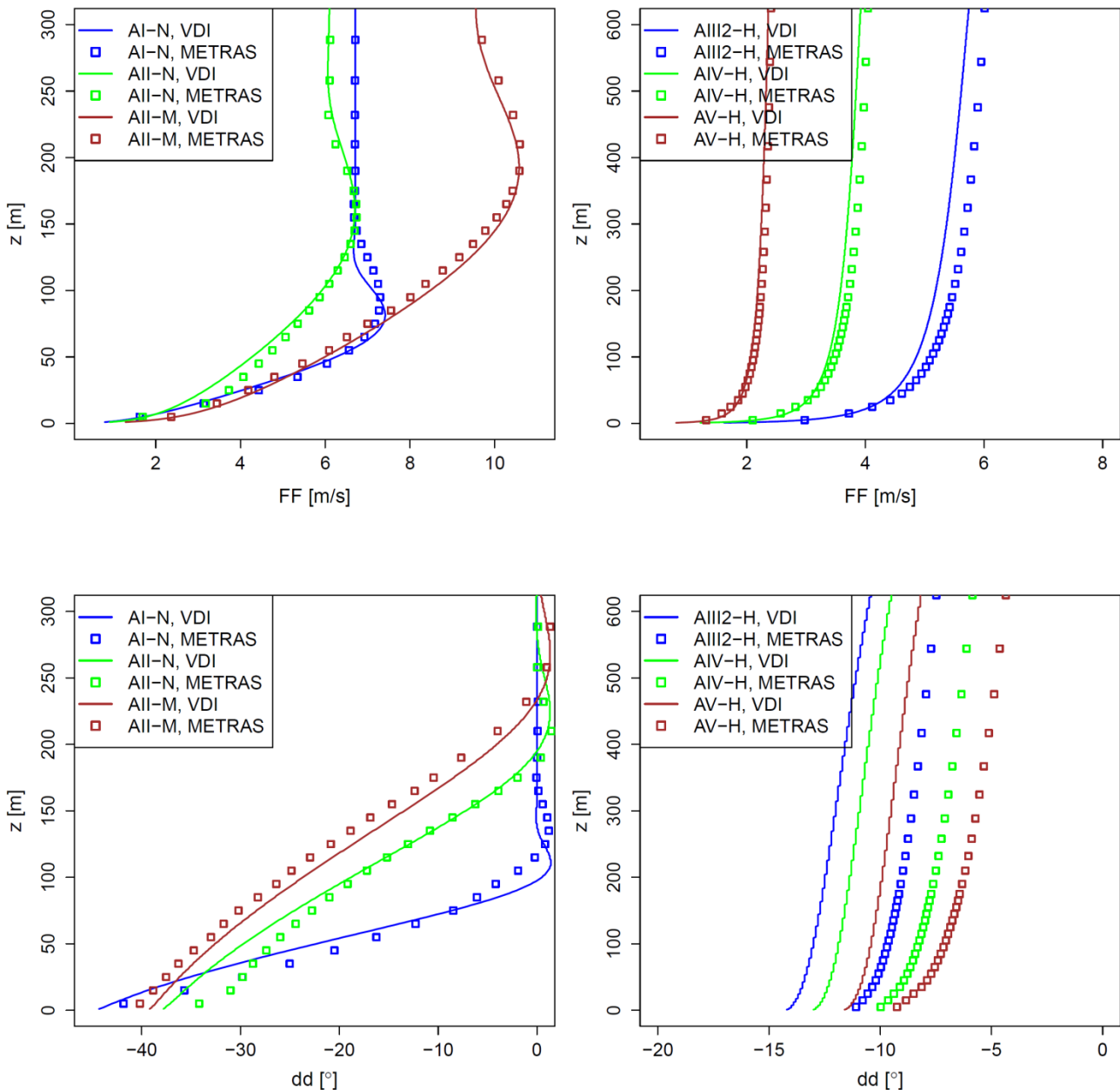
Innerhalb der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) wurde in den vergangenen Jahren eine neue messwertgestützte Turbulenzparametrisierung ausgearbeitet, um physikalisch plausible turbulente Diffusionskoeffizienten und realitätsnahe Windprofile innerhalb der bodennahen Grenzschicht zu verwenden. Dieser Ansatz wurde für horizontal homogenes Gelände entwickelt. Ein Ziel dieses FuE Projektes war es, diese Parametrisierung anhand von Messdaten zu prüfen, sie falls sinnvoll auch in der Anwenderversion von METRAS, also in METRAS-PCL, verfügbar zu machen, und festzustellen, ob ein konsistenten Übergang zwischen den mesoskaligen Windfeldsimulationen und den Ausbreitungsrechnungen über homogenem Gelände zu erreichen ist.

Die in der Turbulenzrichtlinie VDI 3783 Blatt 8 entwickelte Parametrisierung zur Beschreibung turbulenter Windprofile wurde eingehend geprüft und numerisch validiert. Die in der Parametrisierung verwendete numerische Integration führt in vereinfachten Fällen (horizontale und vertikale Homogenität, stationäre Lösung) zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie die in der Referenzimplementierung des Windfeldmodells eingesetzte Parametrisierung. Die Richtlinienparametrisierung und die Grenzschichtparametrisierungen der Referenzimplementierung des Windfeldmodells wurden evaluiert anhand in der Literatur definierter Testfälle und anhand von Messdaten meteorologischer Masten (Wettermast).

Mit dem Präprozessor „VDI-TurbPre“ sind die Ergebnisse der numerischen Lösung nach VDI 3783 Blatt 8 und von METRAS-PCL für fast alle Schichtungen sehr ähnlich. Bei neutraler Schichtung (III-1M) ergeben sich Unterschiede, weil der Grenzbereich zwischen stabil und neutral erreicht wird. Die Berechnung der Profilkoeffizienten wechselt beim Schichtungswechsel und damit auch die Bestimmung der turbulenten Diffusionskoeffizienten. Weil in METRAS-PCL auch noch die Feuchtigkeitsschichtung und nichtlokale Austauschprozesse berücksichtigt werden, sind im Grenzbereich zur leicht labilen Schichtung deutliche Unterschiede zur numerischen Lösung von VDI 3783 Blatt 8 vorhanden.

Die Windprofile von METRAS-PCL sind denen einer stabilen Schichtung ähnlicher als die von „VDI-TurbNum“, die ein weniger stabiles Profil zeigen. Vergleiche mit den Literaturwerten von Cuxart et al. (2006), die hier nachgerechnet worden sind, deuten auf eine eher stabilere Schichtung zwischen 150 m und 300 m über Grund. Beispielhaft werden in Abbildung Z4 Windprofile für den Sektor A des Wettermastes für verschiedene Stabilitätsklassen dargestellt. Die atmosphärischen Bedingungen reichen von niedrigen Grenzschichthöhen ($z_i < 260 \text{ m}$, Kennzeichnung „N“), über mittlere Grenzschichthöhen ($260 \text{ m} < z_i < 790 \text{ m}$, Kennzeichnung „M“) bis hin zu großen Grenzschichthöhen $z_i > 790 \text{ m}$ („H“). Die jeweiligen Lösungen der VDI Turbulenz-Parametrisierung (durchgezogene Linien) und des Windfeldmodells METRAS mit harmonisierten Eingangsdaten (Methode „VDI-TurbPre“; Rechtecke) sind in Abbildung Z4 gezeigt.

Abbildung Z4: Ergebnisse der Windprofile für Windfeldmodell und „VDI-TurbPre“ für Klug-Manier-Klassen I-N, II-N, II-M, III2-H, IV-H und V-H



Quelle: Universität Hamburg

Die Profile für Windgeschwindigkeiten und auch Windrichtungen sind sehr ähnlich. Die errechneten Lösungen beider Ansätze weisen dieselben Charakteristika auf. Abweichungen im Bereich weniger Grad ergeben sich in der Windrichtung bei den labilen Klassen (III2-H, IV-H und V-H). Als Grund können die unterschiedlichen Parametrisierungsansätze für die vertikalen Diffusionskoeffizienten, unterschiedliche Modellgitter und die verwendeten Profilfunktionen angeführt werden. Abweichungen von wenigen Grad sollten allerdings im Falle gutachterlicher Anwendungen kaum ins Gewicht fallen.

Bisher ist das für den Präprozessor verwendete Verfahren nur für die durch den Wettermast vorgegebenen Spannbreiten getestet worden. Anzumerken ist zudem, dass im Präprozessor Feuchteeffekte vernachlässigt sind, die insbesondere bei neutraler Schichtung ($\partial\theta/\partial z = 0.0 \text{ K/m}$) wie oben angemerkt zu einer labilen Schichtung führen. „VDI_TurbPre“ ist als Präprozessor für die hier untersuchten Fälle nutzbar und zeigt bessere Ergebnisse als Vergleiche der Profile bei wenig angepassten Anfangs-

werten. Daher ist eine Harmonisierung der Profile über einen entsprechend erweiterten Präprozessor erreichbar.

Die stark labilen Stabilitätsklassen IV-H und V-H müssen in Turbulenzmodellen besonders behandelt werden, da die entsprechenden bodennahen Gradienten der Temperatur stark überadiabatisch sind. Diese Schichtung ist in Bodennähe möglich. Für die gesamte Grenzschicht ist sie unrealistisch, da die Atmosphäre bei stark labiler Schichtung oberhalb der Prandtlschicht sehr gut durchmischt wird und innerhalb der Grenzschicht quasi ohne vertikale Wärmefluss-Gradienten nahezu neutral geschichtet ist. Damit derartige Vermischungen in mesoskaligen Windfeldmodellen realitätsnah modelliert werden, können beispielsweise Counter-Gradient Ansätze genutzt werden, wie dieses z.B. in METRAS geschieht. Vergleiche mit Messungen haben ergeben, dass dann nicht nur Vertikalprofile sondern auch Mischungsschichthöhen realitätsnäher simuliert werden als mit anderen Turbulenzansätzen (Lüpkes und Schlünzen 1996).

Die direkte Verwendung der Profile der VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) in prognostischen Modellen, die VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) genügen, ist nicht möglich, da in den Windfeldmodellen zeitabhängige Lösungen in heterogenen und komplexen Gelände betrachtet werden müssen und die subskaligen turbulenten Prozesse hierfür dreidimensional zu parametrisieren sind. VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) betrachtet nur stationäre und homogene Atmosphärenprofile für Wind- und Temperaturschichtung. Daher sind für Windfeldmodelle von der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) abweichende Ansätze zur Turbulenzparametrisierung erforderlich, für die grundsätzliche Anforderungen in VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) aufgeführt sind.

Einzelheiten zu den Projektergebnissen sind Kapitel 0 zu entnehmen.

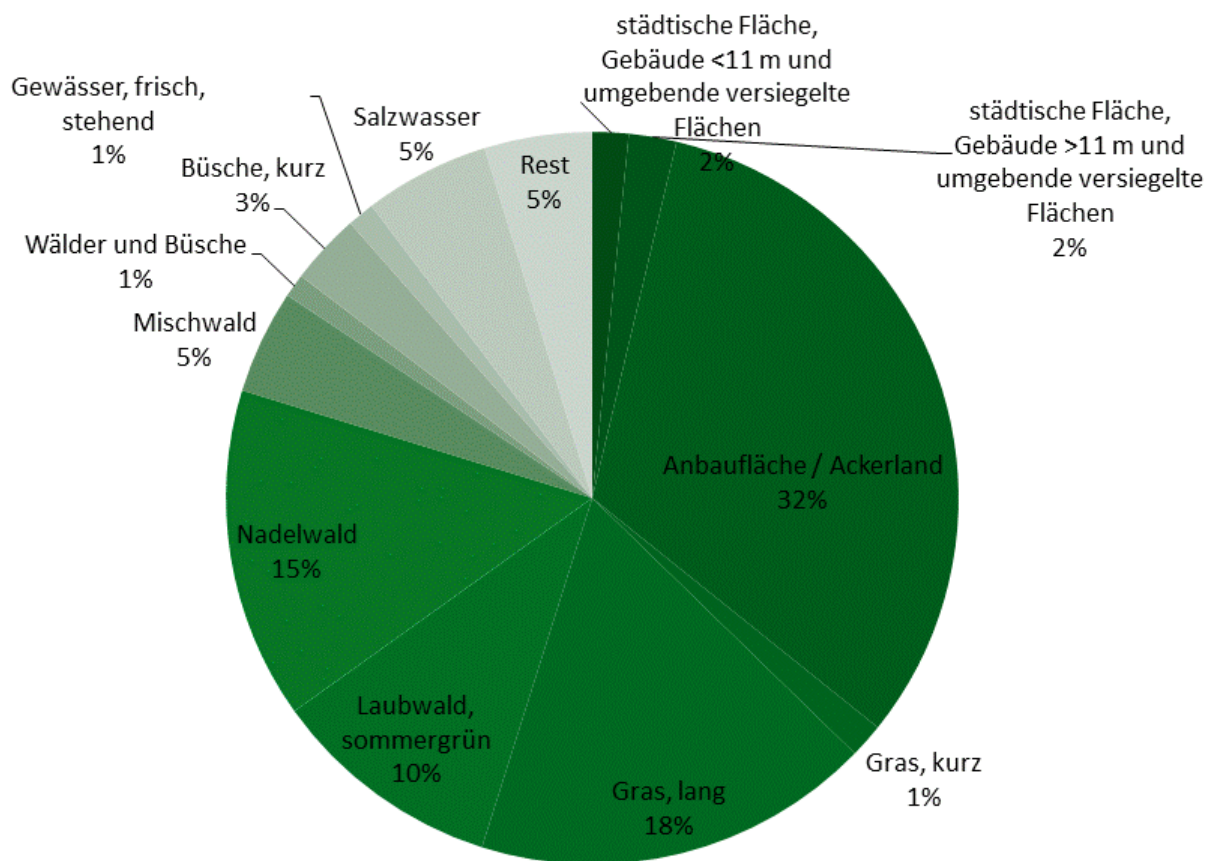
f) Berücksichtigung detaillierterer Oberflächendaten

Im Hinblick auf Flora-Fauna-Habitat- und andere Umweltverträglichkeitsprüfungen und Anforderungen verschiedener Modellanwendungen im Bereich Ausbreitungsrechnungen wird eine hochaufgelöste und subskalige Klassifizierung von Oberflächeneigenschaften notwendig. Im Projekt ist die für die wissenschaftliche Version von METRAS entwickelte Methodik zur feineren Klassifizierung der Oberflächenbedeckungen in METRAS-PCL integriert worden. Über die Materialeigenschaften werden die unterschiedlichen Oberflächenbedeckungen unterschieden. Das Programm GRITOP-L ist auf Basis vorhandener Programme zur Erzeugung der Modellgitter für METRAS-PCL weiter entwickelt worden. Dabei ist eine Schnittstelle zur Oberflächenbedeckungsdaten und Höhendaten geschaffen worden. Der Datensatz der Oberflächenbedeckungsdaten ist in diesem Projekt auf Basis von LBM-DE2012 Daten, den nationalen Basisdaten für den europäischen CORINE Datensatz erstellt worden, wobei eine neu entwickelte Relation von Flächennutzungsdaten zu Oberflächenbedeckungsdaten genutzt wurde. Der LBM-DE2012 Datensatz ist auf 10 m gerastert und die CORINE Klassen in MeMi Klassen überführt worden. Eine etwas gröbere Rasterung (30 m) ist für den orographischen Datensatz EU-DEM erfolgt. Beide Datensätze werden bereitgestellt.

Darüber hinaus wird das Programm GRITOP-L bereit gestellt, in dem eine Konvertierung der MeMi Klassen in Oberflächenbedeckungsklassen erfolgt und subskalige Oberflächenbedeckungsanteile ermittelt werden. Für die Zuweisung sind für jede CORINE Klasse die Zusammenhänge zu Landbedeckungen ermittelt worden. Dazu sind LBM-DE2012 Daten genutzt worden. Beispielsweise ergeben sich für städtisch geprägte Flächen (CLC 111 (MeMi 6112; Durchgängig städtische Prägung)) durch diese Analyse Flächenanteile von 76.4 % für LB 111 (Häuser; Versiegelung > 80 %), von 21.7 % für LB 121 (Hallen und andere Anlagen) sowie von 1.9 % LB 122 (Versiegelte gebäudelose Flächen). Für jede CORINE Klasse sind entsprechende Untersuchungen erfolgt, die zu einer Zuweisungstabelle von Anteilen unterschiedlicher Landbedeckungen (LB Klasse) in einer Flächennutzungsklasse (CLC) führen.

Für jede Landbedeckung ist dann der Zusammenhang zu den Oberflächenbedeckungsdaten abgeleitet worden. Diese Oberflächenbedeckung wird über die sogenannten METRAS-50 Klassen abgebildet und in METRAS-PCL genutzt. Der Anteil einzelner METRAS-50 Klassen an der Oberflächenbedeckung als Mittel über ganz Deutschland ist in Abbildung Z5 dargestellt. Die METRAS-50 Anteile sind gerundet angegeben. Alle Oberflächenbedeckungen, die einen Anteil von weniger als 1 % an der Gesamtfläche aufweisen sind nicht dargestellt sondern in „Rest“ aufgenommen. Gegenüber den Anteilen bei der CLC Flächennutzung zeigen sich in den METRAS-50 Klassen Änderungen in den Vegetationsklassen. So hat der Anteil von Wiesen und Weiden von 18% in CLC und ähnlichem Anteil in LB (Grasland und Bäume 1%, homogenes Grünland 17%) auf 19% in METRAS-50 zugenommen (18% Gras, lang; 1% Gras, kurz). Die Zunahme ist darin begründet, dass die städtischen Flächen teilweise auch grün sind und dieses ist der entsprechenden Grünklasse auch im deutschlandweiten Mittel sichtbar. Dementsprechend sind die Anteile für z.B. auch Mischwald höher, während der Anteil bebauter und umliegender versiegelter Flächen auf insgesamt 4% zurückgegangen ist. In den LBM-DE2012 Daten sind in der CLC Klasse städtisch und industriell geprägter Flächen (8%) allerdings auch Parkanlagen, Friedhöfe, Straßen usw. enthalten.

Abbildung Z5: Anteile unterschiedlicher METRAS-50 Klassen mit wenigstens 1 % Anteil an der Oberflächenbedeckung der Gesamtfläche Deutschlands



Quelle: Universität Hamburg

Die Oberflächenbedeckungsdaten werden in MeMi Klassen in einem 10 x 10 m² Raster bereitgestellt. Sie bilden gemeinsam mit den gerasterten Höhendaten die Eingabe für GRITOP-L und sind für Gitterweiten um die 100 m, wie sie in der gutachterlichen Praxis vorkommen, gut geeignet. Durch die hohe Auflösung der Oberflächenbedeckungsdaten werden jedem Gitterpunkt etwa 100 MeMi Rasterpunkt zugeordnet, so dass sich die subskalige Oberflächenbedeckung gut ermitteln lässt.

Einzelheiten zu den Projektergebnissen sind Kapitel 5 zu entnehmen.

g) Modelldokumentation und Schulung der Anwenderinnen und Anwender

Die bestehende wissenschaftliche und technische Dokumentation des Modells ist aktualisiert und deutlich erweitert worden, so dass sie dem im Projekt erreichten Stand des Modells METRAS-PCL entspricht. Für das Programm GRITOP-L zur Erzeugung der Modellgitter und der darauf aufbereiteten Topographiedaten wurde ein eigenes Benutzerhandbuch erstellt. Auch eine Dokumentation der Topographiedatenerzeugung erfolgte.

An der Universität Hamburg wurde ein dreitägiger Workshop zu METRAS-PCL und ein zweitägiger zur Erstellung von Modellgittern und Topographiedaten sowie zur Beantwortung von Fragen fortgeschrittener Anwenderinnen und Anwender durchgeführt, um diese in der Verwendung von METRAS-PCL und der Modellgittererzeugung, sowie der Bewertung von Modellergebnissen zu schulen. Einzelheiten zu diesen Projektergebnissen sind Kapitel 6 zu entnehmen.

h) Bereitstellung von Referenzimplementierung, Daten und Datenaufbereitungsprogrammen

METRAS-PCL und das Topographiedatenaufbereitungsprogramm GRITOP-L sind als ausführbare Dateien von den Seiten des Umweltbundesamtes (unter <https://www.umweltbundesamt.de/metraspcl>) sowie denen der Universität Hamburg ladbar (<https://www.mi.uni-hamburg.de/metraspcl>). Die Nutzungsbedingungen liegen den Programmen bei. Auch die Dokumentation des Modells des Programms zur Gittererzeugung und Topographiedatenaufbereitung sind dort zu finden. Auch die harmonisierten topographischen Daten sind auf den Internetseiten des Umweltbundesamtes und der Universität Hamburg zu finden.

i) Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des FuE-Vorhabens war die Kommunikation mit unterschiedlichen Einrichtungen und Firmen essentiell, um das Projekt erfolgreich durchführen zu können. Enger Kontakt wurde mit dem Umweltbundesamt gehalten. Insbesondere für die Entwicklung der Richtlinien war der Kontakt zu METCON Umweltmeteorologische Beratung Dr. Klaus Bigalke, zu Dr. Dietmar Öttl im Amt der Steiermärkischen Landesregierung, zu Dr. Thomas Flassak im Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, zu Dr. Lutz Janicke im Ingenieurbüro Janicke, zu Dr. Michael Moellmann-Coers im Forschungszentrum Jülich und zu Dr. Ralf Petrich in IfU GmbH, Dr. Kristina Trusilova beim Deutschen Wetterdienst von entscheidender Bedeutung. Anfängliche Kontakte bestanden zu Prof. Dr. Günter Gross, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Hannover.

Für einige Teilaspekte der Arbeit wurden vorhandene Kontakte zum Deutschen Klima-Rechenzentrum (DKRZ), dem Max-Planck-Institut für Meteorologie (Hamburg) und zum Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory des National Centre for Atmospheric Research (NCAR) genutzt.

Modellrechnungen sind vor allem auf den Rechnern der Universität Hamburg sowie des DKRZ durchgeführt worden. Modellrechnungen erfolgten auch auf Linux Notebooks.

Summary

a) Project Motivation

The TA Luft (2002) regulates in Appendix 3 the dispersion calculation for ambient air in consistence with the permit procedure. For the dispersion model TA Luft (2002) names particle models, as specified in standard VDI 3945 part 3 (VDI 2000). TA Luft (2002) also demands the consideration of heterogeneous terrain and slopes with gradients larger than 1:5, though without regulating the approach. For technical reasons, the modelling of the wind field in more steep terrain requires the use of a prognostic wind field model. For this purpose the model METRAS-PCL (or the previous version METRAS-PC) is often applied to provide a wind field library. Afterwards this wind field library is employed for the dispersion calculation. The procedure for the production of such a wind field library is substantiated in the directive VDI 3783 part 16 (VDI 2015).

In this R&D project, METRAS-PCL is developed as a reference implementation model for calculating wind fields. The model characteristics conform to VDI 3783 part 7 (VDI 2017a). In particular, the models METRAS (science version) and the user model METRAS-PC, that have been separate at the start of the project, have been merged. There is only one joint program code, hereafter referred to as METRAS. By merging the programs, the considerable manual expenditure for the integration of advancements within the academically used METRAS in METRAS-PCL are clearly reduced. An automatic extraction should allow for a timely update of the user model from the science model on the basis of the program code METRAS (Section b). Model extensions and corrections can be transferred directly to the user version.

TA Luft (2002) demands that the suitability of the used model for wind field calculations is evaluated either by a VDI standard or established by a federal state authority. This proof of suitability was not possible till 2016, because no generally approved assessment methodology was available. Meanwhile, this is provided by the standard VDI 3783 a part 7 (VDI 2017a). The development of the standard created the need to assess the methods used in VDI 3783 part 7 and to further develop them. In addition, the need arose to evaluate the models used for regulatory assessments and with it also METRAS-PCL (Section c). This model was documented extensively and users were trained in the application (Section g).

Beside the use of wind field models for terrain slopes of more than 1:5, TA Luft (2002) demands that wind and turbulence profiles are determined generally according to standard VDI 3783 part 8 (VDI 2002). This earlier standard has completely been updated on the basis of measuring data and evaluated during the past years, in particular concerning the parametrisation of the turbulence close to the ground. On the basis of measuring data the development of the new turbulence parametrisation has been supported by the R&D project and it has been evaluated. With the reference implementation of the wind field model comparative calculations to VDI 3783 part 8 (VDI 2017b) have been made and the differences assessed (Section d).

An additional demand of TA Luft (2002) is that for assessments around an emission source the terrain heterogeneity (for example, gradients larger than 1:20) and the spatial distribution of the land use must be considered for dispersion calculations. This results in the necessity to use high-quality and up-to-date topographic data for dispersion modelling as used in the assessments by experts. On the one hand this requires that in the model a fine differentiation of different surface types is possible and their physical properties can be considered on the subgrid-scale. On the other hand, topography data close to reality must be used. It can be expected that the use of the newest topography data leads to more reliable results with wind field models and meteorological model calculations. Besides, the comparability of the results of the reference implementation of the wind field model is increased by the use of identical topography data. These uniformed inputs can contribute to the harmonisation of the

assessment approach, because they are uniformly prepared, usable for everybody and the surface covers show a good agreement with reality. They will also have positive effects on flora-fauna-habitat and other assessments of environmental effects. A methodology to the processing of the information in a unified way for the whole of Germany was developed, the originating topography data were assessed and the methodology was documented (Section f). Data use and production of topography data for METRAS-PCL were trained with users at a second Workshop (Section g).

METRAS-PCL is generally available via the METRAS-PCL web page <https://www.mi.uni-hamburg.de/metraspcl> of the Universität Hamburg. This is the reference implementing of the wind field model. Also the topography data and a processing program are provided there. The necessary topography data as well as the programme for the topography processing as well as METRAS-PCL including the documentations are available via UBA web page under <https://www.umweltbundesamt.de/metraspcl>. Details are given in Section h).

The R&D project required a close collaboration not only with the Umweltbundesamt, but also with the working groups of the VDI and the representatives of consultant's offices and federal agencies (Section i).

b) Automated creation of the reference implementation of the wind field model

The scientific version of the model METRAS and the user model METRAS-PC were separate at program level at the start of the project. Developments of the scientific version of METRAS could be transferred into the user version METRAS-PC only with considerable efforts, the adaptation of the separate programmes had to be done by hand. A procedure had been developed which permits to extract METRAS-PCL from METRAS automatically and produces Linux executable with little manual work, thereby keeping the user friendly input of METRAS-PC. These new developments and corrections should become transferable to the user version in a reasonable amount of time so that it can be updated more frequently. Different methods have been analysed to allow for a reproducibility of model calculations. This shall allow checking for the confirmability of model results used for assessment purposes by consultants.

Concerning the aim to reach an automated system with little manual support needed to extract the user version METRAS-PCL from METRAS, the following relevant results were achieved:

- ▶ The source codes of METRAS-PC and METRAS were harmonised. The scientific model version of METRAS was further developed to use a similarly user-friendly input and structures as previously only used in METRAS-PC. A former differentiation between different source codes of METRAS-1D (initialization), METRAS-3D (simulation) and METRAS-PC does not exist any more. The code harmonisation makes it easier to update the program code of the reference implementation of the wind field model METRAS-PCL. However, also the application of the model for scientific questions was simplified.
- ▶ The input control was harmonised by introducing a NAMELIST control (Adam et al. 2008) as it is often used in atmospheric model systems. A selective control was developed using NAMELIST groups, so that a differentiation becomes possible between the extensive control possibilities of the academically used version and the limited control possibilities of the user version. Now a control file with the same name which contains several NAMELIST groups with different control parameters is read by METRAS-PCL and by METRAS. Not only is a thematic separation reached by the NAMELIST groups. In addition, by pre-processor directives it can be determined if the translated model version is able to read only the standard control parameter (user version) or, in addition the enlarged control parameters of the science version. This will ensure that the user really stays within the scope of the control foreseen for the user of the reference implementation of the wind field model. If a control parameter is set that is not intended for the user version, the input is rejected with an error message.

- ▶ The complete source code was transferred to the version management system Git, which can be accessed via an Internet browser if the user has suitable rights. The source code is regularly saved. Because every single version stored on the server must be documented in Git, the developments of METRAS as well as of METRAS-PCL can now be understood easily. The Git version management system downloads the changes in the source code in order to save space and allows for identifying a certain version by the use of a tag (e. g. tag version 1.5.1). This tag can be used to generate a certain program version even after a longer period of time.
- ▶ An automated system for downloading only METRAS-PCL from the whole source code of METRAS was developed and is quite successfully applied and in use on the university computers. This was reached by an extensive change of the version management for the program code (see above) as well as by a completely changed MAKEFILE structure. The latter allows to compile parts of the model separately by employing pre-compiler directives and to bring together parts of the program if requested. So-called GOALS in the MAKEFILE and some pre-compiler directives in the source code permit the automated extraction of the desired version and its compilation.
- ▶ In the current version it can be decided via two different GOALS whether the user version or the science version of METRAS is extracted. The corresponding executable for Linux systems is automatically built. For example, in the user version the control values are substantially more compact and more legible than in the scientific version. In addition, only the standard parameters are used by the reading routines
- ▶ The user version METRAS-PC (from March 2007) was adapted with regard to being compliable on the technical computer infrastructure of the Universität Hamburg. It also compiles on smaller computers including Linux notebooks. With the program adaptation the results of the user version of 2007 can be compared with the scientifically used METRAS of 2017. The comparability refers to the program structures, input and output routines and the simulation results.
- ▶ For every model run, the program creates a log file which includes information on the used model version as well as the control parameters that are applied by the model user. This facilitates the support of the users in case of model problems. Check sums of the model results are given in this protocol file. These check sums are calculated in such a way that they are independent of the used computer. This method allows checking whether the same solution can be achieved in a new run with the given model version and logged parameters. However, the protocol itself is not completely safe against forgery attempts, so that in doubt a recalculation of the examined situation is necessary. This conformity check can be done using the information from the log file.

Further details can be found in chapter 2.

c) Evaluation of the reference implementation of the wind field model

At the end of 2015, the draft of the standard 3783 Blatt-7 (Gründruck) was accepted and appeared in white printing (VDI 2017a). The standard includes many aspects of model evaluation that have been developed and tested through work within this R & D project. A goal of this project was a largely automated evaluation based on the standard VDI 3783 Part 7 (VDI 2017a).

The aim of an automated evaluation of METRAS-PCL is to ensure that the current version of METRAS-PCL complies with specified reference solutions within permissible deviations. Thus, the suitability of the wind field model for the consideration of terrain heterogeneities is demonstrated. In addition, various versions of the scientific version can be tested for their quality and be compared, also to make a decision as to which of the scientific innovations in the user version are used and should be used in METRAS-PCL accordingly.

The test cases underlying the evaluation are, on the one hand, idealized test cases for testing internal program errors and, on the other hand, realistic test cases for which comparisons are made with observed data. All test cases of the evaluation standard VDI 3783 Part 7 (VDI 2017a) are considered. The automated evaluation is divided into the following areas:

1. Definition of all test cases in relation to model area, topography data, meteorological input variables and model control.
2. Creation of directory structure, loading of program code from the version control system for creating the model grid and for the model simulation.
3. For each test case to be evaluated:
 - a. Preparation of the control files for model grid generation, including the topography and input data for all test cases to be evaluated.
 - b. Creation of the grid topography by executing GRITOP or GRIGAU for all test cases to be evaluated.
 - c. Simulation of the test cases to be evaluated by performing METRAS-PCL.
 - d. Visualization of the model results for all test cases to be evaluated.
 - e. Calculation of errors based on given error measures and checking the objective evaluation criteria for all test cases to be evaluated.
4. Summary of the evaluation results to produce a protocol according to Annex F of VDI3783 Part 7.

The automated evaluation system has high demands on the programming, since various pre-processors, simulation models and post-processors are used, which additionally have to be controlled depending on the version. In this context, for example, due to the installation of new computers and as a result of the development of the model version to be extracted from the main code, various adjustments were necessary for the different computer configurations. As a result, points 1 to 3c, including model calculations in accordance with standard VDI 3783 Part 7 (VDI 2017a), can be carried out without manual intervention. Points 3d, e and 4 are computer-aided, but also require manual intervention.

d) Evaluation results

The evaluation of the model METRAS-PCL, version 5.0.0 with release date 3 February 2017, has been carried out in accordance with standard VDI 3783 Part 7. The model is available at the Meteorologisches Institut, CEN, Universität Hamburg. The persons responsible for the model are K. Heinke Schlünzen and David Grawe, the evaluation was carried out by David Grawe. METRAS-PCL fulfils the criterion of traceability and has a detailed model description (Schlünzen et al. 2012a). A special manual for METRAS-PCL (Schlünzen et al. 2017) and an evaluation report are available (Chapter 3 of this report). For technical users, who also use the source code of METRAS, a Technical Reference is available (Schlünzen et al. 2012b).

The equations used are Reynolds averaged and all three wind components as well as the potential temperature and the humidity are calculated with prognostic equations. The Coriolis force is taken into account. The continuity equation is solved using the anelastic approximation, buoyancy is considered. The parameterization of the turbulence is stability-dependent, whereby the fluxes are continuous as a function of the location and the stratification. For the calculation of ground-level flows, the Monin-Obukhov theory is used and, in the case of unstable stratification, subgrid-scale convection in the boundary layer is parameterized (Counter-gradient approach, Lüpkes and Schlünzen 1996). Different land use properties are realised through differences in albedo, thermal diffusivity, thermal conductivity, soil water availability, soil water saturation and roughness length. The ground-level flows are calculated by a flux averaging method (von Salzen et al. 1996). If the temperature is to be calculated as a function of time, the surface energy budget is solved using the force-restore method (Schlünzen et al. 2012a). The evapotranspiration and precipitation effects are taken into account in a humidity

budget at the ground (Schlünzen et al. 2012a). Inclined surfaces and shading by mountains are taken into account in the incoming short wave radiation.

All eight test cases from VDI3783 Part 7 (VDI 2017a) have been successfully carried out and evaluated. By way of example, Table 1 shows the evaluation results (here hit rates H , equation S1) for the idealised test cases E1 and E3

$$H = \frac{n}{N_R} = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{i=N_R} n_i \text{ with } n_i = \begin{cases} 1 & \text{for } |P_i - O_i| \leq W \text{ or } \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \leq D \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (\text{S1})$$

E3 consists of two sub-tests; E3a is calculated with 100 m resolution, E3b with 75 m. The independence from the computational grid is checked ($H(\text{E3a}, \text{E3b})$). For this purpose, the model results (E3-M-a) achieved with 100 m grid size are compared with the model results (E3-M-b) achieved in the prediction domain with a resolution of 75 m. The interpolation is performed as described in Section 6.1.2.3 of VDI 3783 Part 7 (VDI 2017a) for comparisons with measurements. The model results E3-M-a are interpolated vertically and horizontally to the grid points of E3-M-b, taking into account the Arakawa-C grid used in METRAS-PCL. With the predefined hit rate of 95 %, the test cases meet the requirements of VDI 3783 Part 7 (VDI 2017a).

Table 1: Hit rate H for test cases E1 and E3

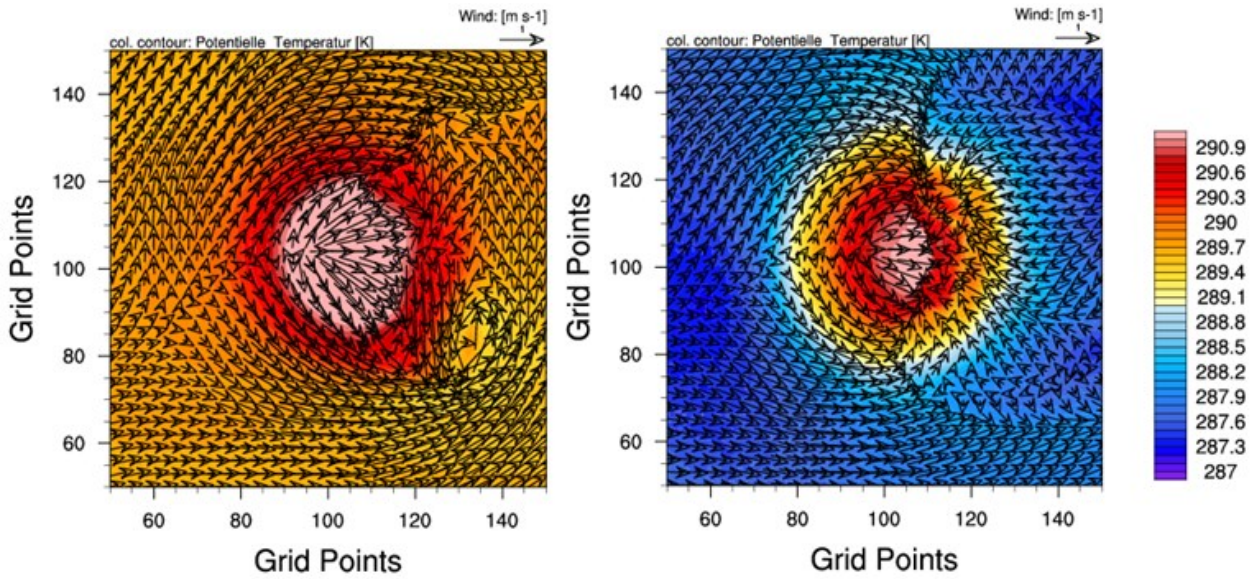
Parameter	W	D	$H(\text{E1})$	$H(\text{E3a})$	$H(\text{E3b})$	$H(\text{E3a}, \text{E3b})$
u	$0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %	99 %	99 %	96 %
v	$0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %	99 %	99 %	97 %
w	$0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %	99 %	99 %	100 %
FF	$0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %	99 %	99 %	97 %
T	0.5 K	0.2 %	100 %	100 %	99 %	100 %

The values for W and D are taken from Table 2 of VDI (2017a). The values for FF are provided for information and not required in VDI 3783 Part 7.

With the same topography as in test case E1, it has been tested in test case E2 whether the wavelength of the stationary gravity wave is approximately halved in the prediction area with the wind speed halved compared to test case E1. In test case E2 and E1 the wavelength has to be within the range of the analytical solution. Both demands are fulfilled, the wavelength has dropped from 3465 m (test case E1) to 1898 m (test case E2) and is within the targeted range (3000 m to 4000 m for test case E1, 1500 m to 2000 m for test case E2; VDI 2017a),

Another idealised test case (E4) assesses cold air drainage flows that form over a mountain during the night and are terminated in the morning by the radiation. The nocturnal cold air drainage flows reinforce the weak western incoming flow (eastern slopes) or obstruct them (western slopes). In the early evening (at sunset), the cold air drainage flows first set on at the eastern slope as a result of the shading of this eastern slope (Figure 1). The figure shows values for the potential temperature and wind vectors. They refer to 20:30. Due to the cold air drainage flows at the eastern slope and a strengthened flow around the mountain in the stable stratification, a vortex forms east of the mountain.

Figure 1: Test case E4 with cold air drainage flows at 20:30 h (left) and upslope winds at the east slope at 7:30 h (right)



Source: Universität Hamburg

After sunrise, at around 4 LST, the eastern slope is illuminated first, so that the cold air drainage flows stop here earlier than at the western slope. From about 7 LST a slight upslope flow from the east is formed at the foot of the mountain. In the opposite direction westerly cold air drainage flows are still strong at this eastern slope. This leads to a convergence zone in the wind field that is oriented across the eastern slope (Figure 1 right). This behaviour of the model is qualitatively correct and corresponds to the expected one for test case E4 according to VDI (2017a). The model has passed this test.

In test case E5, the dependence of the model results on the direction of flow is tested in an again idealized test case. Table 2 summarizes the results. The hit rate of 95 % that is to be achieved (VDI; 2017a) is exceeded for wind direction and wind speed.

Table 2: Hit rate H for test case E5

Parameter	W	D	H
FF	$0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	10 %	98.3 %
DD	10° for $FF > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	inapplicable	99.2 %

The values for W and D are taken from the information on test case E5 in VDI (2017a).

The test cases E6 and E7 use observed values for comparison. Therefore, larger deviations are allowed for these test cases than in the idealized test cases and other error measures are used. The average absolute error, MAE (Equation S2), and the square root of the mean quadratic error, $RMSE$ (Equation S3), are calculated separately for the horizontal wind speed FF and wind direction DD . If the wind speed FF is below $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (test case E6) or $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (test case E7), the associated wind direction is not included in the calculation.

$$MAE = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{i=N_R} D_i \text{ with } D_i = \begin{cases} |P_i - O_{i,min}| & \text{for } P_i < O_{i,min} \\ |P_i - O_{i,max}| & \text{for } P_i > O_{i,max} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (S2)$$

For each of the N_R measurement points, the range $O_{i,min}$ to $O_{i,max}$ is specified in VDI (2017a). The ranges are given for wind speed and wind direction and used for the error calculation.

$$RMSE = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{i=N_R} \sqrt{D_i^2} \quad (S3)$$

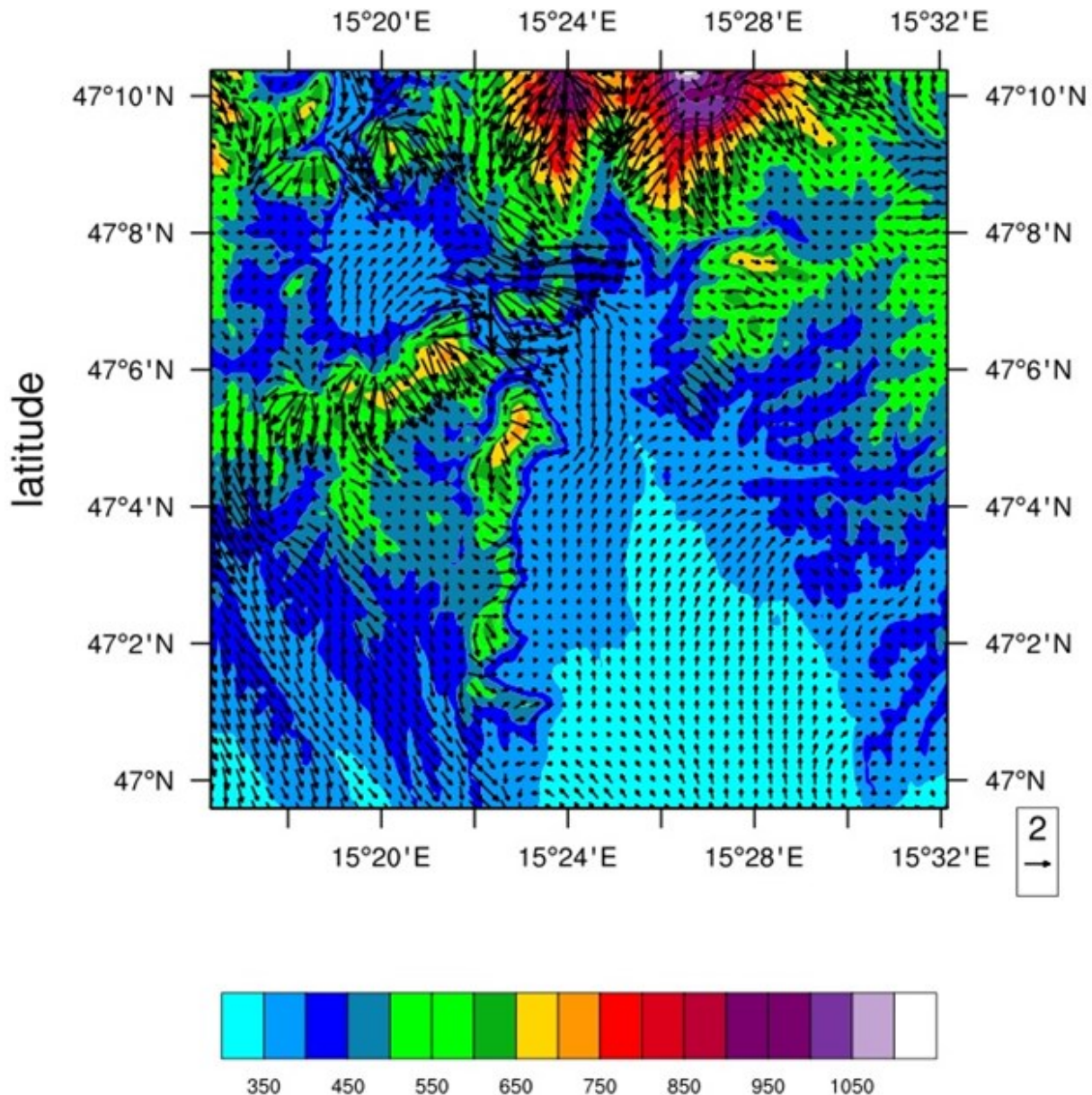
In equation (S3), D_i is calculated as indicated in equation (S2). The model results are stored for the locations specified in VDI (2017a) or interpolated first vertically and then horizontally to these sides.

For test case E6 MAE results to 0.2 m s^{-1} or 6° and $RMSE$ at 0.3 m s^{-1} and 9° . All values are lower than the maximum values given in VDI (2017a) for MAE of not more than 0.6 m s^{-1} or 13° and for $RMSE$ of not more than 0.9 m s^{-1} or 19° . A second criterion is the examination of the wind direction difference between two locations (E6-N-1 and E6-N-3) at 15 m above ground. This difference must be at least 60° and is calculated as the difference of wind direction at E6-N-1 minus wind direction at E6-N-3. It is 62° in METRAS-PCL results. The criterion and ultimately the test case are fulfilled.

The target variables of test case E7 are the wind speed and direction. It examines the ability of the model to simulate orographic influences such as flow above and around orography. For MAE the result is 0.6 m s^{-1} or 10° , for $RMSE$ 1.0 m s^{-1} or 20° . All values are lower than the maximum values given in VDI (2017a) for MAE of not more than 0.9 m s^{-1} or 18° and for $RMSE$ of not more than 1.3 m s^{-1} or 25° . The criterion is fulfilled. In addition, it was examined whether the simulated wind direction is in the range between 110° and 250° at the location of the measurement E7-N-3 at all grid points in the heights between 10 m and 60 m above ground. The calculated wind speeds need to be below 1.5 m s^{-1} . This criterion is met; the wind directions are 132° ($z = 10 \text{ m}$) and 140° ($z = 30 \text{ m}$). The wind speeds are 0.7 m s^{-1} ($z = 10 \text{ m}$), 0.9 m s^{-1} ($z = 30 \text{ m}$) und 0.4 m s^{-1} ($z = 50 \text{ m}$). The latter speed is below 0.5 m s^{-1} , so that a calculation of the wind direction at this altitude is not meaningful. In addition, the wind direction in $z = 10 \text{ m}$ and $z = 30 \text{ m}$ has to be between 90° and 270° , which is satisfied with 132° ($z = 10 \text{ m}$) and 140° ($z = 30 \text{ m}$) by the model. At a higher altitude (145 m and 165 m) the wind direction should be between 270° and 360° , the simulated values are 354° ($z = 145 \text{ m}$), 356° ($z = 165 \text{ m}$). This criterion is also fulfilled.

For test case E7, an optical evaluation is also to be carried out: Near the ground, a flow from southern directions should be simulated at the grid points in the vicinity of the location E7-N-3. Figure 2 shows the model result 90 minutes after the start of the simulation. The colours symbolize the height of the terrain in m NHN. The wind arrows are normalized to 2 m/s , the reference arrow is shown on the bottom right. The southern current is easy to recognize. In the vicinity of E7-N-3, the flow must come from the northwest sector at a higher altitude (150 m above ground and higher) and thus correspond to the higher, initialized flow. This too was simulated by METRAS-PCL (not shown in the figure).

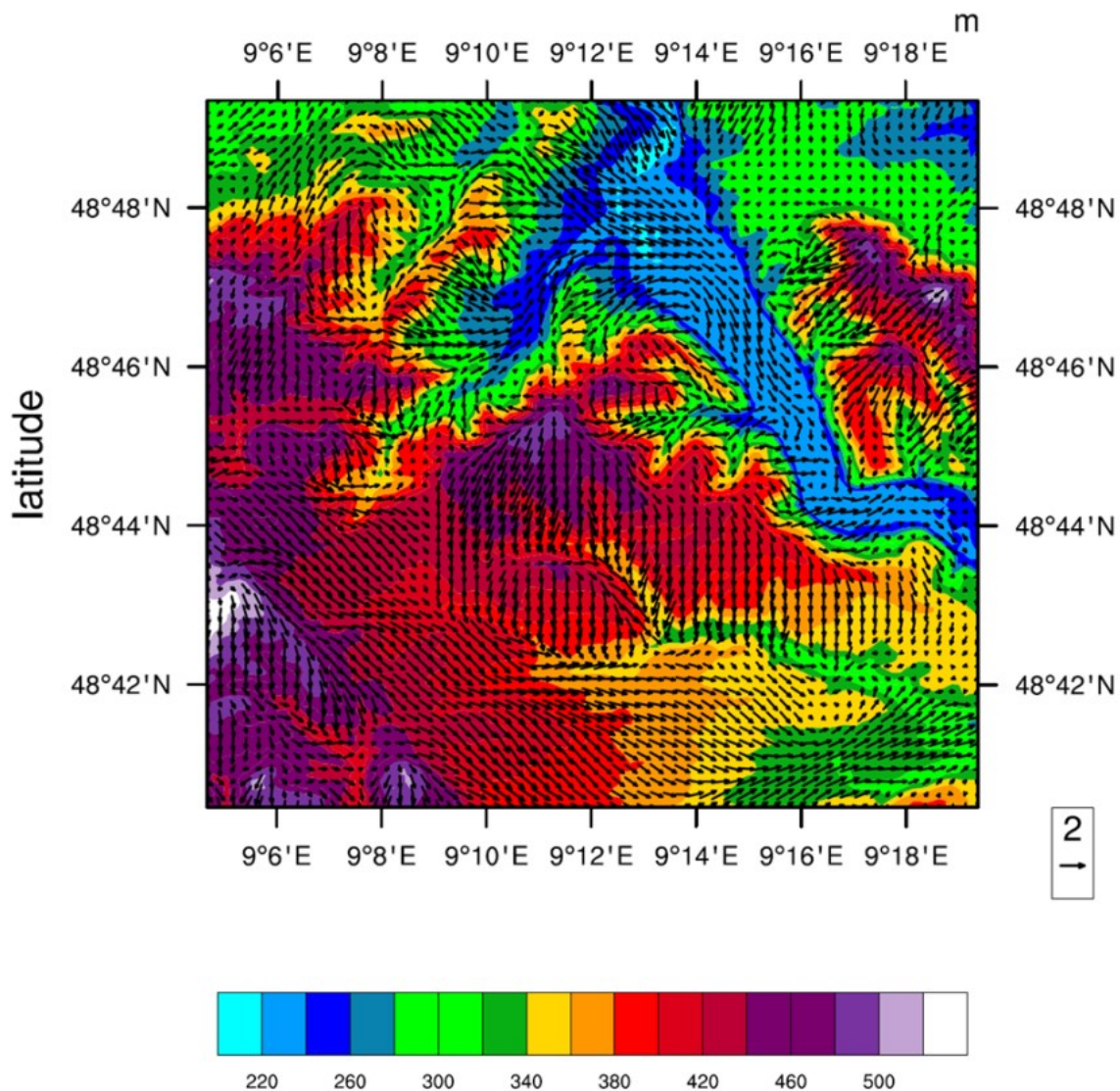
Figure 2: Wind field about 10 m above the earth's surface for the test case Graz in the prediction domain



Source: Universität Hamburg

In test case E8, wind speed and direction are checked for cold air drainage flows induced by orography. The wind field simulated by METRAS-PCL at 21 UTC is shown in Figure 3. The terrain heights are shown in colour. The value of 2 m s^{-1} , which is used to standardize the wind arrows, can be found on the bottom right in Figure 3. Clearly visible are the downslope winds along the slopes of the Wartbergklinge (northeast of the city centre of Stuttgart) and the slopes south of the city centre, which flow into the Nesenbachtal and flow through the city of Stuttgart from the south-west. At the exit of the Nesenbachtal the air then flows into the Neckertal and upstream to the south-east. The latter phenomenon was simulated by several mesoscale models, but can not be evaluated due to a lack of observed data. The flow from south-west in the Stuttgart city area corresponds to measured values for this test case. In addition, METRAS-PCL is also able to simulate the flow from north-west on Killesberg ($48^\circ 48'30''$ north and $9^\circ 11'$ east), which flows through a gap occurring along the ridge Wartbergklinge.

Figure 3: Flow field simulated in the prediction domain using the METRAS-PCL model



Source: Universität Hamburg

The simulated vertical thickness of the cold air drainage flow is tested. It is determined from the time-averaged (20:30 LST to 21:20 LST) vertical wind direction profiles for the planetarium location. It is the height of the model layer just below the change in wind direction (from south at ground to north-east direction above). The wind direction change is about 120 m above ground. This value is above 85 m and below 160 m, so this criterion is met. As required in VDI 3783 Part 7, the simulated change in the wind direction coincides with a minimum of the wind speed. The strength of the cold air volume flow is also derived from the profile of the wind speed. At about 50 meters above ground there is a maximum wind speed of around 1.6 m/s. Above 50 m and below, the flow is weaker. An integration of the wind speed and the layer thickness over the influence range of the cold air drainage flow provides a volume flow density of $116 \text{ m}^3/(\text{m s})$. This value also meets the criteria of the VDI standard (volume flow between 90 and $195 \text{ m}^3/(\text{m s})$, VDI 2017a). According to VDI (2017a), the direction of the cold air flow should be between 174° and 221° for the planetarium location. Average wind directions for the altitude range of 25 m to 65 m and the time from 20 UTC to 21 UTC are to be considered. With a wind direction of 200° this criterion is fulfilled.

In summary, the mesoscale model METRAS-PCL (version 5.0.0) has been successfully evaluated in accordance with standard VDI 3783 Part 7 (VDI 2017a). For details on the model evaluation see chapter 3.

e) Turbulence parametrisation using VDI 3783 Part 8

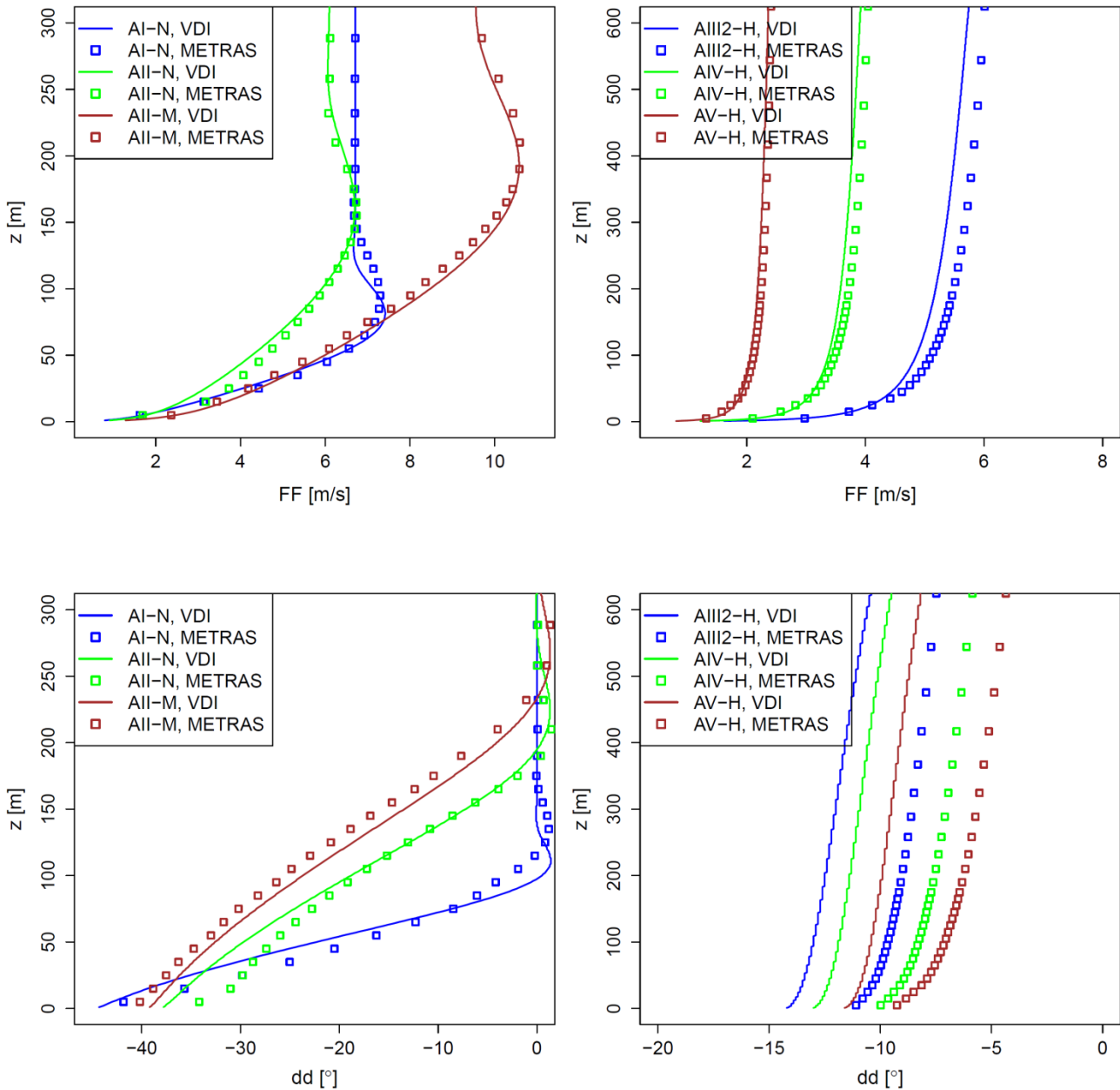
In recent years, a new measurement based turbulence parameterization has been developed within the standard VDI 3783 Part 8 (VDI 2017b) in order to use physically plausible turbulent exchange coefficients and realistic wind profiles within the lower boundary layer. This approach was developed for horizontally homogeneous terrain. One aim of this R & D project was to examine this parameterization with the help of measurement data and, if appropriate, to make it available in the user version of METRAS, i.e. in METRAS-PCL, and to determine whether a consistent transition between the mesoscale wind field simulations and the dispersion calculations of homogeneous terrain can be achieved.

The parameterization for the description of turbulent wind profiles, which was developed in the turbulence standard VDI 3783 Part 8, was thoroughly tested and numerically validated. The numerical integration used in the parameterization leads in simplified cases (horizontal and vertical homogeneity, stationary solution) to very similar results as the parameterization used in the reference implementation of the wind field model. The parameterization in the standard and the boundary layer parameterization of the reference implementation of the wind field model were evaluated using test cases defined in the literature and, in addition, measured data from meteorological masts (weather mast).

With the pre-processor "VDI-TurbPre" the results of the numerical solution according to VDI 3783 part 8 and of METRAS-PCL are very similar for almost all stratifications. Neutral stratification (III-1M) results in differences because the transition between stable and neutral is reached. The calculation of the profile functions changes at the stratification change and thus also the determination of the turbulent exchange coefficients. Because METRAS-PCL also takes into account moisture effects on stratification and non-local exchange processes, there are clear differences from the numerical solution of VDI 3783 part 8 in the transition to the slightly unstable stratification.

The wind profiles of METRAS-PCL are more similar to those of a stable stratification than those of "VDI-TurbNum", which show a less stable profile. Comparisons with the literature values of Cuxart et al. (2006), which have been recalculated here, indicate a stable stratification between 150 m and 300 m above ground. As an example, Figure 4 shows wind profiles for sector A of the weather mast for different stability classes. The atmospheric conditions range from low boundary layer heights ($z_i < 260$ m, marked "N"), over average boundary layer heights Kennzeichnung „N“), ($260 \text{ m} < z_i < 790$ m, marked "M") up to large boundary layer heights $z_i > 790$ m („H“). The respective solutions of the VDI turbulence parameterization (solid lines) and the wind field model METRAS with harmonized input data (method "VDI-TurbPre", rectangles) are shown in Figure 4.

Figure 4: Results of wind profiles for wind field model and "VDI-TurbPre" for Klug-Manier stability classes I-N, II-N, II-M, III2-H, IV-H and V-H



Source: Universität Hamburg

The profiles for wind speeds and wind directions are very similar. The calculated solutions of both approaches have the same characteristics. Deviations in the range of a few degrees are found in the wind direction in the unstable classes (III2-H, IV-H and V-H). As a reason, the different parameterization approaches for the vertical exchange coefficients, different model grids and the profile functions used, can be cited. Deviations of a few degrees should, however, hardly be significant in the case of assessment reports.

So far, the method used for the pre-processor has been tested only for the ranges specified by the weather mast. It should also be noted that moisture effects are neglected in the pre-processor, which lead to unstable stratification, especially in the case of neutral stratification $\partial\theta/\partial z = 0.0$ K/m), as noted above. "VDI_TurbPre" can be used as a pre-processor for the cases examined here and shows better

results than comparisons of the profiles with little adjusted initial values. It is therefore possible to harmonize the profiles via a correspondingly extended pre-processor.

The highly unstable stability classes IV-H and V-H must be specially treated in turbulence models, since the corresponding ground-level gradients of temperature are strongly over-adiabatic. This stability is only frequently observed near the ground. For the entire boundary layer it is unrealistic, since the atmosphere is very well mixed above the surface layer with highly unstable stratification at the ground. The atmosphere is almost neutral stratified within the boundary layer and virtually without vertical heat flux gradients. In order to simulate realistically such exchanges in mesoscale wind field models, it is possible, for example, to use counter-gradient approaches, as used in METRAS. Comparisons with measurements have shown that not only vertical profiles but also mixing layer heights are simulated more realistically than with other turbulence approaches (Lüpkes and Schlünzen 1996).

The direct use of the profiles of VDI 3783 Part 8 (VDI 2017b) in prognostic models that comply with VDI 3783 Part 7 (VDI 2017a) is not possible, since in the wind field models time-dependent solutions in heterogeneous and complex terrain must be considered and the 3-dimensional subgrid-scale turbulent processes are parameterized for this purpose. VDI 3783 Part 8 (VDI 2017b) only considers stationary and homogeneous atmospheric profiles for wind and temperature stratification. Therefore, for wind field models deviations from the standard VDI 3783 Part 8 (VDI 2017b) for turbulence parameterization are required, for which basic requirements are listed in VDI 3783 Part 7 (VDI 2017a).

Details of the project results can be found in Chapter 4.

f) Consideration of more detailed surface data

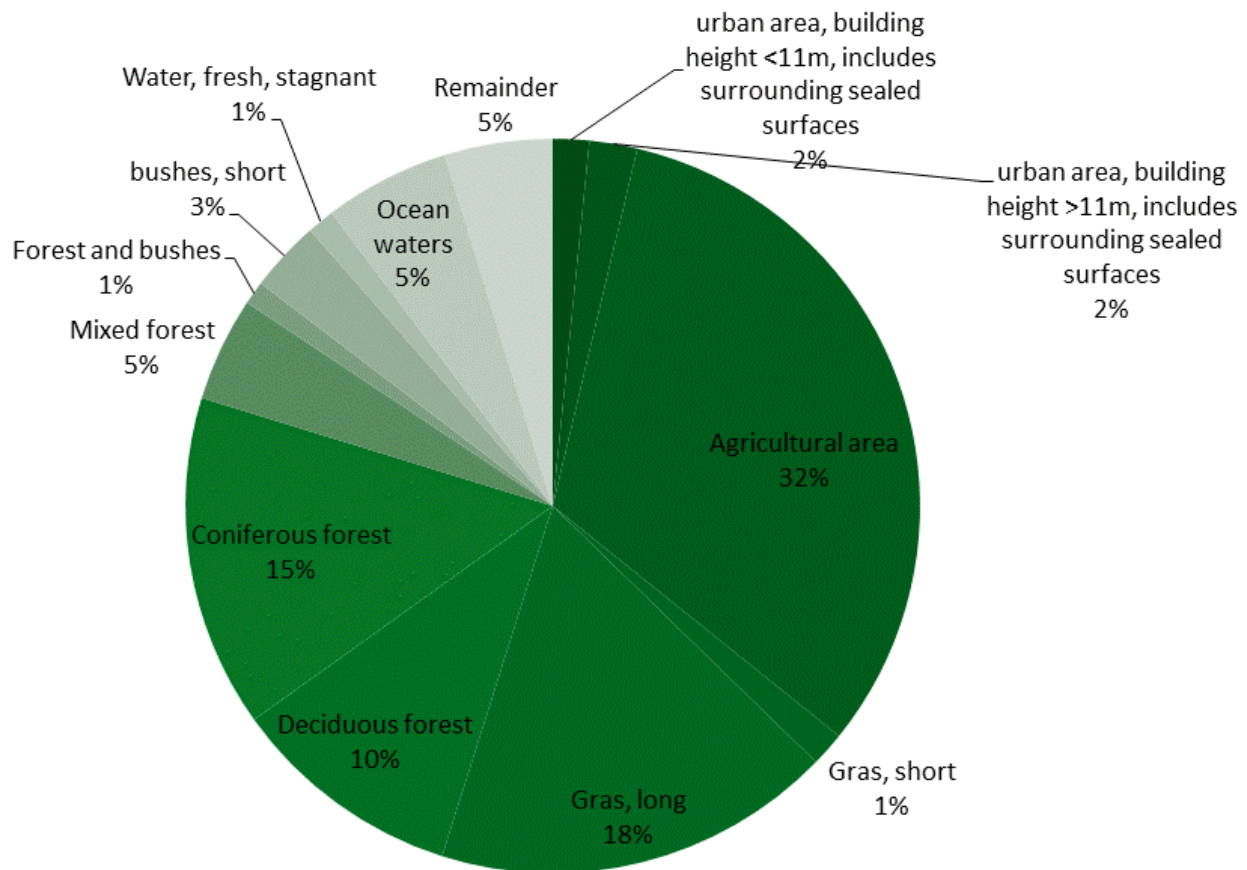
With regard to flora-fauna-habitat and other environmental impact assessments and requirements of various model applications in the field of dispersion calculations, a high-resolution and subgrid-scale classification of surface properties becomes necessary. The project integrates METRAS' scientific methodology for finer classification of surface coverages in METRAS-PCL. The material properties are used to differentiate the different surface covers. The program GRITOP-L has been further developed on the basis of existing programs for the generation of model grids for METRAS-PCL. An interface to surface cover data and elevation data has been created. The surface cover data have been created in this project based on LBM-DE2012 data, the national data set for the European CORINE data. A newly developed relation to surface covers is used. The LBM-DE2012 dataset has been gridded to a 10 m grid, and the CORINE classes have been transferred to MeMi classes. A slightly coarser grid (30 m) is used for gridding the orography data set EU-DEM. Both data sets are provided.

In addition, the GRITOP-L program is provided, which converts the MeMi classes into surface cover classes and determines subgrid-scale surface covers. For the assignment, the relationships to land cover have been determined for each CORINE class. LBM-DE2012 data have been used for this purpose. For example, for urban areas (CLC 111 (MeMi 6112)), this analysis gives a surface fraction of 76.4 % for LB 111 (houses, sealing > 80%), 21.7 % for LB 121 (halls and other facilities) as well as 1.9 % for LB 122 (sealed building-free areas). For each CORINE class, appropriate assessments have been performed leading to an allocation table between different land cover classes (LB) in a land use class (CLC).

For each land cover class, the relationship to the surface cover data has been deduced. This surface cover is mapped using the so-called METRAS-50 classes and these are used in METRAS-PCL. The share of individual METRAS-50 classes in the surface coverage as a means across Germany is shown in Figure 5. The METRAS-50 shares are rounded. All surface coverages, which account for less than 1 % of the total area, are not shown but included in the "remainder". Compared to the shares in the CLC land use, changes in the vegetation classes are evident in the METRAS-50 classes. Thus, the proportion of pastures and pastures of 18% in CLC and similar in LB (grasslands and trees 1%, homogeneous grassland 17%) increased to 19% in METRAS-50 (18% grass, long, 1% grass, short). The increase is due to

the fact that the urban areas are partly also green and this is visible to the corresponding green class in the Germany-wide means. Accordingly, the proportions for e.g. mixed forest increased, while the proportion of built and surrounding sealed land decreased to 4%. In the LBM-DE2012data, however, the CLC class of urban and industrial areas (8%) also includes parks, cemeteries, streets, etc.

Figure 5: Shares of different METRAS-50 classes with at least 1% share of surface coverage of the total area of Germany



Source: Universität Hamburg

Surface cover data are provided in MeMi classes in a 10 x 10 m² grid. Together with the gridded height data, they form the input for GRITOP-L. They are well suited for grid sizes of around 100 m, as they are often used in the expert's assessments. Due to the high resolution of the surface cover data, each grid point is assigned about 100 MeMi grid points, so that the subgrid-scale surface cover can be well determined.

Details of the project results can be found in Chapter 5.

g) Model documentation and training of users

The existing scientific and technical documentation of the model have been updated and expanded to document the status of the METRAS-PCL model as achieved in the project. For the program GRITOP-L used for the generation of the model grid and for preparing topography data an own user manual was created. The topography data creation was documented.

At the Universität Hamburg, a three-day workshop on METRAS-PCL and a two-day workshop on grid and topography data creation, as well as on advanced user questions were conducted. By this users of

METRAS-PCL were trained in model grid generation, as well as in the evaluation of model results. Details of these project results can be found in Chapter 6.

h) Provision of reference implementation, data and data preparation programs

METRAS-PCL and the topography data processing program GRITOP-L can be downloaded as executable files from the Federal Environment Agency (Umweltbundesamt; <https://www.umweltbundesamt.de/metraspcl>) and from the Universität Hamburg (<https://www.mi.uni-hamburg.de/metraspcl>). The conditions of use are enclosed with the programs. The documentation of the grid generation and topography data preparation program can also be found there. The harmonized topography data can also be found on the websites of the Umweltbundesamt and the Universität Hamburg.

i) Cooperation with other bodies

During the R & D project, communication and cooperation with different institutions and companies was essential to successfully complete the project. Close contact was kept with the Federal Environment Agency. In particular for the development of the standards, the contact to METCON Umweltmeteorologische Beratung Dr. Klaus Bigalke, to Dr. Dietmar Öttl in the Amt der Steiermärkischen Landesregierung, to Dr. Thomas Flassak at Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Dr. Ing. Lutz Janicke in the Ingenieurbüro Janicke, to Dr. Michael Moellmann-Coers at Forschungszentrum Jülich and Dr. Ralf Petrich in IfU GmbH, Dr. Kristina Trusilova at the Deutsche Wetterdienst is of crucial importance. Initial contacts existed to Prof. Dr. Günter Gross, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Hannover.

Existing contacts with the German Climate Computing Center (DKRZ), the Max Planck Institute for Meteorology (Hamburg) and the Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory of the National Center for Atmospheric Research (NCAR) were used for some aspects of the work.

Model calculations have been carried out mainly on the computers of the Universität Hamburg and the DKRZ. Model calculations were also carried out on Linux notebooks.

1 Einführung

Die TA Luft (2002) regelt in Anhang 3 die Ausbreitungsrechnung für die immissionsschutzrechtliche Anlagengenehmigung. Für das Ausbreitungsmodell verweist TA Luft (2002) auf Partikelmodelle, wie sie in der Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (VDI 2000) spezifiziert sind. TA Luft (2002) fordert auch die Berücksichtigung von Geländeunebenheiten bei Steigungen über 1:5, ohne die Vorgehensweise abschließend zu regeln. Aus fachlichen Gründen erfordert die Modellierung des Windfeldes in steilerem Gelände die Anwendung eines prognostischen Windfeldmodells. Für diesen Zweck wird häufig das Modell METRAS-PCL (bzw. die vorherige Version METRAS-PC) angewandt um eine Windfeldbibliothek zu erstellen. Diese Windfeldbibliothek wird anschließend für die Ausbreitungsrechnung herangezogen. Das Verfahren zur Erstellung einer solchen Windfeldbibliothek ist in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 16 (VDI 2015) konkretisiert.

METRAS-PCL ist in diesem FuE Projekt zu einer Referenzimplementierung des Windfeldmodells entwickelt worden. Die Modellcharakteristiken entsprechen den in VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) beschriebenen. Insbesondere sind die bei Projektbeginn getrennten Modelle METRAS (wissenschaftliche weiterentwickelte Version) und das Anwendermodell METRAS-PC zusammen geführt worden. Dadurch konnte der erhebliche manuelle Aufwand für die Einbindung von Weiterentwicklungen des wissenschaftlichen Modells METRAS in die Anwenderversion deutlich reduziert werden. Eine automatische Auskopplung soll zukünftig ermöglichen, zeitnah das wissenschaftliche Modell auf das Anwendermodell zu aktualisieren (Kapitel 2), so dass Modellerweiterungen und Fehlerkorrekturen direkt an Anwenderinnen und Anwender weitergegeben werden können. Das hier entstandene, unter Linux lauffähige METRAS-PCL ist über das Umweltbundesamt als Referenzimplementierung des Windfeldmodells allgemein verfügbar (Kapitel 7).

TA Luft (2002) fordert, dass die Eignung des verwendeten Modells entweder nach VDI Richtlinie oder gegenüber einer Landesbehörde nachgewiesen wird. Dieser Nachweis wurde bis 2016 nicht geführt, da noch keine allgemein anerkannte Bewertungsmethodik verfügbar war. Inzwischen ist diese mit der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) verfügbar. Mit der Entwicklung der Richtlinie entstand der Bedarf, die in VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) eingesetzten Methoden wissenschaftlich zu prüfen bzw. weiterzuentwickeln. Darüber hinaus ergab sich die Notwendigkeit, die für Gutachten verwendeten Modelle und damit auch die Modellversionen von METRAS-PCL kontinuierlich zu evaluieren (Kapitel 3). Dieses Modell wurde umfassend dokumentiert und Anwenderinnen und Anwender in der Nutzung geschult (Kapitel 6).

TA Luft (2002) fordert neben der Nutzung von Windfeldmodellen bei Steigungen über 1:5, dass Wind- und Turbulenzprofile sonst nach einer Konvention aus der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2002) bestimmt werden. Diese Richtlinie ist auf Basis neu ausgewerteter Messdaten in den vergangenen Jahren grundlegend überarbeitet worden, insbesondere in Bezug auf die Parametrisierung der bodennahen Turbulenz. Anhand von Messdaten ist die neue Turbulenzparametrisierung in diesem FuE Projekt mit entwickelt und evaluiert worden. Mit der Referenzimplementierung des Windfeldmodells sind Vergleichsrechnungen zu VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) erfolgt und die Unterschiede bewertet worden (Kapitel 4).

Eine weitere Forderung der TA Luft (2002) ist, dass im Untersuchungsgebiet um die Emissionsquelle herum Geländeunebenheiten (beispielsweise Steigungen von mehr als 1:20) und die aktuelle, räumliche Verteilung der Landnutzungen für die Ausbreitungsrechnungen berücksichtigt werden müssen. Somit folgt die Notwendigkeit, für die in der gutachterlichen Praxis eingesetzten Modelle qualitativ hochwertige und hoch aufgelöste topographische Eingangsdaten zu verwenden. Dies erfordert zum einen, dass im Modell eine feine Differenzierung verschiedener Oberflächentypen möglich ist und deren physikalische Eigenschaften subskalig berücksichtigt werden können. Zum anderen müssen realitätsnahe Topographiedaten genutzt werden. Erwartet werden kann, dass die Verwendung neuester Topographiedaten zu belastbareren Ergebnissen bei Windfeldprognosen und meteorologischen Mo-

dellvorhersagen führt. Zudem wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Referenzimplementierung des Windfeldmodells durch Nutzung identischer Topographiedaten erhöht. Diese einheitlichen Datensätze können zur Harmonisierung der gutachterlichen Vorgehensweise beitragen, da sie einheitlich aufbereitet sind, für alle nutzbar sind, eine große Realitätsnähe aufweisen aber auch unterschiedliche Oberflächenbedeckungen aufweisen und somit positive Auswirkungen auf Flora-Fauna-Habitat und andere Umwelt-Verträglichkeitsprüfungen haben. Eine Methodik zur Aufbereitung der Datensätze in einheitlicher Form für ganz Deutschland wurde entwickelt, die entstehenden Topographiedaten bewertet und die Methodik dokumentiert (Kapitel 5). Zur Nutzung der Daten und Erstellung von Topographiedaten wurde ein Workshop durchgeführt (Kapitel 6). Programm und Daten werden über das UBA allgemein bereitgestellt (Kapitel 7).

2 Automatisierte Erstellung der Referenzimplementierung des Windfeldmodells

Zu Projektbeginn waren das wissenschaftliche Modell METRAS und das Anwendermodell METRAS-PCL auf Programm-Ebene voneinander getrennt. Fortentwicklungen des wissenschaftlichen Modells METRAS konnten nur mit erheblichem Aufwand in die Anwenderversion METRAS-PCL übertragen werden. Die Anpassung der separaten Programme musste manuell erfolgen. Ein Verfahren sollte entwickelt werden, das die Auskopplung von METRAS-PCL aus METRAS automatisch und möglichst wartungsarm erlaubt, wobei die anwenderfreundliche Bedienung von METRAS-PCL garantiert sein muss. Damit wird es möglich, neue Entwicklungen und Korrekturen zeitnah in die Anwenderversion zu übertragen. Zudem sollten verschiedene Methoden geprüft werden, die eine Rückführbarkeit von Modellrechnungen ermöglichen, um gegebenenfalls eine für gutachterliche Zwecke genutzte Modellrechnung auf Konformität mit dem Referenzmodell zu überprüfen und die Modellrechnung nachvollziehen zu können.

2.1 Zusammenführung von Modellinitialisierung und Simulation

Zu Projektbeginn bestand die Herausforderung darin, die Vorteile von METRAS-PC und METRAS in einer Version ohne voneinander getrennte Quellcodes zu vereinen. Die Vorteile der Anwenderversion METRAS-PC sind die anwenderfreundliche Steuerung, wohingegen in der Wissenschaftsversion METRAS neuere physikalische Parametrisierungen und numerische Lösungsverfahren zum Einsatz kommen. Demzufolge wurde die Steuerung von METRAS derart weiterentwickelt, dass eine gleiche, anwenderfreundliche Ein- und Ausgabe wie in METRAS-PC möglich ist. Die Programmcodes sollten gleichzeitig zusammengeführt und harmonisiert werden. Diese Code-Harmonisierung erleichtert die Aktualisierung des Programmcodes der Referenzimplementierung des Windfeldmodells, aber auch den Einsatz des Modells für wissenschaftliche oder anwendungsorientierte Fragestellungen.

METRAS und METRAS-PCL wurden derart weiterentwickelt, dass beide ähnliche, anwenderfreundliche Eingabe- und Ausgabestrukturen besitzen, die am bisherigen METRAS-PC angelehnt sind. Die zuvor vorhandene Unterscheidung zwischen den Quellcodes von METRAS-1D (Initialisierung), METRAS-3D (Simulation) und METRAS-PC ist nicht mehr vorhanden. Die Eingabesteuerung beider Programme wurde harmonisiert, indem eine NAMELIST-Steuerung eingeführt wurde (Adams et al. 2008), wie sie in atmosphärischen Modellsystemen häufiger eingesetzt wird (Skamarock et al. 2005; Baldauf et al. 2011). Durch NAMELIST-Gruppen kann zwischen den umfangreichen Steuermöglichkeiten der wissenschaftlich eingesetzten Version und den eingeschränkten Steuermöglichkeiten der Anwenderversion unterschieden werden, auch wenn von METRAS-PCL und von METRAS eine Steuerdatei mit demselben Namen gelesen wird. Diese Steuerdatei enthält dazu mehrere NAMELIST-Gruppen mit jeweils mehreren Steuerparametern. Unterschieden wird zwischen den standardmäßig Steuerparametern, welche in den Gruppen CONTROL und METEO zusammengefasst sind, und den erweiterten Steuerparametern, die in der wissenschaftlichen Version angewählt werden können (NAMELIST-Gruppen AD-

VANCED, ADVANCED_1D, ADVANCED_3D). Die erweiterten Steuerungen in der wissenschaftlichen Version erlauben beispielsweise bestimmte Randbedingungen für das Modell zu wählen oder eine Simulationen mit Randdaten eines größeren Modells zu forcieren (Modellverfeinerung).

Beispielhaft sind die beiden NAMELIST-Gruppen CONTROL und METEO in Abbildung 1 dargestellt. Sie enthalten die wichtigsten Zeitsteuerungsparameter und Ein-/Ausgabeparameter sowie die meteorologischen Eingangsdaten. Nähere Erläuterungen zur Bedeutung einzelner Steuergrößen finden sich in der im Rahmen des FuE-Vorhabens erstellten Dokumentation, dem METRAS-PCL Handbuch (Schlünzen et al. 2017).

Abbildung 1: Beispielhafte Steuerdatei für die Anwenderversion METRAS-PCL

```
&CONTROL
casename = 'dummy',
topo_file = './GA_Testcase_E1_and_E2_100m',
outputdir = './SUITE-out_E1',
start_datetime = '2016-05-17T00:00:00',
end_time = 'day00T05:00',
firstoutput_time = 'day00T00:30',
output_interval = 'day00T00:10',
diurnal_cycle = 0
topogrow_time = 3,
ntimeseries = 3,
timeseries_lon = '6.3700 7.0060',
timeseries_lat = '51.3930 51.2710',
timeseries_height = '100. 100.',
timestep_factor = 1.0E0,
/
&METEO
ini_lon = -200,
ini_lat = -200,
sur_pressure = 100000.0,
wind_kanz = 1,
wind_height = '0.0',
u_value = '6.0',
v_value = '0',
treal_kanz = 1,
treal_heigt = '0.0',
treal_value = '290.0',
dtpotdz_kanz = 1,
dtpotdz_height = '0.0',
dtpotdz_value = '0.0035',
rh_kanz = 1,
rh_height = '0.0',
rh_value = '5.0',
treal_insoil = -999,
treal_water = -999,
/
```

Quelle: Universität Hamburg

Durch die NAMELIST-Gruppen wird nicht nur eine thematische Trennung bei der Steuerung erreicht. Zusätzlich lässt sich durch den Einsatz von Präprozessordirektiven bestimmen, ob das übersetzte, ausführbare Programm nur die Standard-Steuerparameter einliest (Anwenderversion) oder zusätzlich die erweiterten Steuerparameter (Wissenschaftsversion). Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die Modellanwendung tatsächlich im Rahmen der festgelegten Steuerung der Referenzimplemen-

tierung des Windfeldmodells erfolgt. Werden nicht vorgesehene Steuerparameter genutzt, erzeugt das Programm eine darauf hinweisende Fehlermeldung.

Der komplette Quellcode von METRAS und METRAS-PCL wurde in eine gemeinsame Verwaltungsbibliothek unter Git eingepflegt, auf welche über einen Internetbrowser mit entsprechenden Rechten zugegriffen werden kann und welches gesichert wird. Da jede einzelne, auf dem Server unter Git abgelegte Version dokumentiert werden muss, können die Entwicklungen von METRAS sowie METRAS-PCL nun leicht nachvollzogen werden. Das Git Versionsverwaltungssystem protokolliert platzsparend die Änderungen im Quellcode und erlaubt durch die Nutzung von sogenannten tags, also Etiketten, eine Version uneindeutig zu markieren (z.B. Version 1.5.1). Dieses tag kann genutzt werden, um auch nach längerer Zeit eindeutig eine bestimmte Programmversion zu generieren.

Durch das Zusammenführen der Programmcodes können relativ leicht Neuentwicklungen der wissenschaftlichen Version für den gutachterlichen Bereich übernommen werden, wenn sie eine sinnvolle Erweiterung darstellen. Dabei hilft auch die automatisierte Qualitätskontrolle (Kapitel 3) entsprechend Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a). Ist diese erfolgreich, kann die neue Modelleigenschaft von METRAS auch in METRAS-PCL übernommen werden. Falls hierfür zusätzliche Steuerparameter erforderlich sind, wird aus einem Steuerparameter für die wissenschaftliche Version ggf. ein Standard-Steuerparameter, d. h. der Parameter wird von einer NAMELIST-Gruppe in die andere verschoben. Dann können auch die Anwenderinnen und Anwender im gutachterlichen Bereich auf die Neuentwicklungen zurückgreifen.

2.2 MAKE-Umgebung für die automatisierte Auskopplung

Die in METRAS verwendete MAKEFILE-Umgebung wurde so weiterentwickelt, dass ein automatisches System zum Auskoppeln von METRAS-PCL aus dem METRAS Code möglich ist; das System ist erfolgreich auf den in der Universität Hamburg genutzten Rechnern im Einsatz. Diese gezielte Codeauswahl konnte durch die Veränderungen der Versionsverwaltung für den Programmcode (siehe Abschnitt 2.1) sowie eine komplett veränderte MAKE-Umgebung erreicht werden. Letztere erlaubt über Präcompiler-Direktiven Teile des Modells separat zu übersetzen und auf Wunsch zusammenzuführen. Sogenannte GOALS im MAKEFILE und einige Präcompiler-Direktiven im Quellcode erlauben die automatische Auskopplung der gewünschten Version und deren Übersetzung. In der aktuellen Version kann über zwei GOALS entschieden werden, ob die Anwenderversion oder die Wissenschaftsversion von METRAS ausgekoppelt wird. Ein entsprechendes ausführbares Programm wird automatisch erstellt. Beispielsweise fallen die Kontrollausgaben in der Anwenderversion wesentlich kompakter und leserlicher aus und nur die Standard-Parameter werden von den Leseroutinen ausgewertet.

Zur Qualitätsprüfung aller Änderungen wurde die Anwenderversion METRAS-PC (vom März 2007) bezüglich der Kompilervorgänge der aktuellen technischen Infrastruktur der Universität Hamburg angepasst und ist auf den Rechnersystemen inklusiv eines Linux Notebooks übersetzbar. Damit konnten die Ergebnisse der Anwenderversion von 2007 mit dem wissenschaftlich genutzten METRAS von 2017 verglichen werden. Die Vergleichbarkeit bezieht sich auf die Programmstrukturen, Ein- und Ausgaberroutinen und die Simulationsergebnisse.

2.3 Rückführbarkeit von Modellergebnissen

Zur Rückführbarkeit der Modellergebnisse wird eine Protokolldatei erstellt, die für jeden Modelllauf die verwendete Modellversion sowie die vom Nutzer verwendeten Steuerparameter und deren Werte protokolliert. Damit wird auch die Unterstützung der Anwenderinnen und Anwender bei Modellproblemen erleichtert. Insgesamt werden folgende Verfahren in der Referenzimplementierung des Windfeldmodells eingesetzt, um eine Rückführbarkeit der Modellergebnisse zu ermöglichen bzw. zu erleichtern:

1. Durch entsprechende Konfiguration des MAKEFILE und des Quellcodes wird in der für jeden Modelllauf ausgegebenen Kontrolldatei automatisch die Modellversion des ausgeführten Programms METRAS-PCL eingetragen.
2. Die für jeden Modelllauf verwendeten Steuerparameter werden in der für jeden Modelllauf ausgegebenen Kontrolldatei protokolliert. In der Anwenderversion bezieht sich diese ausschließlich auf die Standard-Parameter. In der wissenschaftlichen Version werden zusätzlich die erweiterten Steuerparameter ausgegeben.
3. Checksummen der Modellergebnisse werden in der Protokolldatei ausgegeben. Die Checksummen sind so berechnet worden, dass sie möglichst rechnerunabhängig sind.

In Tests mit METRAS-PCL haben sich die ersten beiden Methoden als sehr effizient erwiesen, um Modellrechnungen im Nachhinein zu reproduzieren. Die zu jeder Simulation erstellten und protokollierten Daten bieten die Möglichkeit, die Konformität mit dem Referenzmodell eines gutachterlich durchgeführten Laufs zu überprüfen. Dies kann dadurch geprüft werden, dass eine neue Rechnung auf Basis der protokollierten Modellversion, Eingangsdaten und Steuerparameter durchgeführt wird. Die Checksummen erlauben dann eine schnelle Überprüfung, ob mit der gegebenen Modellversion und den protokollierten Steuerparametern in einem neuen Lauf die gleiche Lösung erzielt werden kann. Eine absolute Fälschungssicherheit jeglicher Protokollierungsdaten kann allerdings nicht gewährleistet werden und ist höchstwahrscheinlich auch nicht möglich.

Für jeden Modelllauf erstellt das Programm eine Protokolldatei, in der für die verwendete Modellversion sowie die vom Nutzer verwendeten Steuerparameter dokumentiert sind.

3 Evaluierung der Referenzimplementierung des Windfeldmodells

Zum Ende des Jahres 2015 ist der Gründruck der Richtlinie 3783 Blatt-7, 2017 der Weißdruck erschienen (VDI 2017a). In der Richtlinie sind in Bezug auf die Modellevaluierung viele Aspekte enthalten, die durch Arbeiten innerhalb dieses UFOPLAN-Projektes entwickelt und getestet wurden. Ein Ziel dieses Projektes war die automatisierte Evaluierung anhand der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a).

Die Referenzimplementierung des Windfeldmodells wurde in der im Projekt vorliegenden Form evaluiert (Abschnitt 3.2). Damit auch Aktualisierungen des Programmcodes, die den Anwenderinnen und Anwendern zugutekommen zukünftig zeitnah diesen verfügbar gemacht werden können, ist die Evaluierung so weit wie möglich automatisiert worden (Abschnitt 3.1): ein Ziel dieser automatisierten Evaluierung von METRAS-PCL ist sicherzustellen, dass die jeweils aktuelle Version von METRAS-PCL im Rahmen zulässiger Abweichungen mit vorgegebenen Referenzlösungen übereinstimmt. Damit wird die Eignung des Windfeldmodells für die Berücksichtigung von Geländeunebenheiten entsprechend der Evaluierungsrichtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) nachgewiesen. Außerdem können verschiedene Versionen der Anwenderversion sowie der wissenschaftlichen Version auf ihre Qualität hin geprüft und verglichen werden. Dieses hilft auch eine Entscheidung zu treffen, welche der wissenschaftlichen Neuerungen auch in der Anwenderversion zum Einsatz kommen und dementsprechend mit ausgekoppelt werden sollten.

Die der Evaluierung zugrundeliegenden Testfälle sind zum einen idealisierte Testfälle zur Prüfung programminterner Fehler, zum anderen realitätsnahe Testfälle, für die Vergleiche mit Naturdaten erfolgen. Alle Testfälle der Evaluierungsrichtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) werden berücksichtigt.

3.1 Evaluierungsprogramm

Das Evaluierungsprogramm gliedert sich inhaltlich in die folgenden Bereiche:

1. Definition aller Testfälle in Bezug auf Modellgebiet, topographische Daten, meteorologische Eingangsgrößen und Modellsteuerung.
2. Erstellen der Verzeichnisstruktur, Laden der Programmcodes aus dem Versionskontrollsystem für die Erstellung des Modellgitters und für die Modellsimulation
3. Für jeden zu evaluierenden Testfall:
 - a. Vorbereiten der Steuerungsdateien für die Erzeugung des Modellgitters unter Einschluss der Topographie und der Eingabedaten für alle zu evaluierenden Testfälle.
 - b. Erstellung der Gittertopographie durch Ausführen von GRITOP oder GRIGAU für alle zu evaluierenden Testfälle.
 - c. Simulation der zu evaluierenden Testfälle durch Ausführen von METRAS-PCL.
 - d. Visualisierung der Modellergebnisse für alle zu evaluierenden Testfälle.
 - e. Berechnung der Fehler anhand vorgegebener Fehlermaße und Prüfen der objektiven Evaluierungskriterien für alle zu evaluierenden Testfälle.
4. Summarische Auflistung der Evaluierungsergebnisse, um ein Protokoll nach Anhang F von VDI3783 Blatt 7 zu erstellen.

Das automatisierte Evaluationssystem stellt hohe Ansprüche an die Programmierung, da die unterschiedlichsten Präprozessoren, Simulationsmodelle und Postprozessoren zum Einsatz kommen, welche zusätzlich noch versionsabhängig gesteuert werden müssen. In diesem Zusammenhang sind beispielsweise durch die Umstellung der genutzten Rechnersysteme und infolge der Entwicklung der auskoppelbaren Modellversionen diverse Anpassungen notwendig geworden. Dadurch lassen sich die Punkte 1 bis 3c unter Einschluss der Modellrechnungen entsprechend VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) ohne manuelle Eingriffe durchführen. Die Punkte 3d,e und 4 erfolgen computerunterstützt, erfordern aber zusätzlich manuelle Eingriffe.

3.2 Ergebnisse der einzelnen Evaluierungsrechnungen

Im Rahmen der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) wurden verschiedene Testfälle für eine Modellevaluation spezifiziert. Dort sind detaillierte Informationen enthalten, wie einzelne Testfälle von der Modellanwenderin oder dem Modellanwender aufzusetzen sind und wie sie zu bewerten sind (Anhang E in VDI 2017a); nachfolgend werden diese Informationen zur besseren Nachvollziehbarkeit zusammengefasst wiedergegeben. Bei der Modellevaluation sind die in Kapitel 6 von VDI (2017a) festgelegten Regeln der Modellanwendung eingehalten worden. Für alle Modellrechnungen ist METRAS-PCL, Version 5.0.0 verwendet worden. Nachfolgend sind die Ergebnisse für die einzelnen Testfälle aufgeführt.

3.2.1 Testfall E1: Quasi-2-D glockenförmiger Rücken

Zielgrößen dieses Testfalles sind die Komponenten des Windes sowie die Temperatur. Die Feuchte wird mitgerechnet aber nicht bewertet. Geprüft wird die Fähigkeit des Modells, orographische bedingte Einflüsse zu berücksichtigen und bei in Süd-Nordrichtung (y -Richtung) homogenem Gelände eine in Süd-Nord-Richtung homogene, also zweidimensionale Lösung zu erzielen. Diese darf dann nur in vertikaler Richtung (z -Richtung) und in West-Ostrichtung (x -Richtung) variieren. Dafür wird ein Zweidimensionaler Bergrücken überströmt.

3.2.1.1 Modellcharakteristiken

Wind, potentielle Temperatur und spezifische Feuchte werden prognostisch errechnet bei zeitlich konstanten Oberflächentemperaturen und -feuchten in Höhe $z = 0$ m NHN. Darüber hinaus wird die Haftbedingung genutzt und es werden offene seitliche Ränder vorausgesetzt.

3.2.1.2 Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter

Das Modellgebiet reicht in x -Richtung von -30.2 km bis 30.2 km und vertikal bis in etwa 14.2 km NHN. Darin eingebettet befindet sich das Prognosegebiet mit 8 km Ausdehnung in x -Richtung und 400 m in y -Richtung (VDI 2017a). Vertikal soll die Lösung bis in 5000 m NHN ausgewertet werden (Vertikalerstreckung des Prognosegebietes).

Der geographische Bezugspunkt liegt in einer Breite von $\varphi_0 = 30^\circ N$ und liegt im Mittelpunkt des Prognosegebietes. Die Länge des Bezugspunktes, λ_0 , ist für den Testfall irrelevant. Das Gebiet ist homogen in Süd-Nord-Richtung, d.h. die Höhe des Geländes wurde am Süd- und Nordrand nicht gefiltert. Die Gitterweite beträgt horizontal äquidistant 100 m im Bereich -10 km bis 10 km um den Mittelpunkt in x -Richtung. Weiter vom Mittelpunkt entfernt nimmt die Gitterweite je Gitterzelle um 7.5 % zu bis zu einer Gitterweite von 500 m. In y -Richtung beträgt die Gitterweite äquidistant 100 m. Die bodennahe vertikale Gitterweite beträgt 20 m bis in eine Höhe von 140 m, darüber nimmt die Gitterweite pro Gitterzelle um 7.5 % zu mit einer maximalen Gitterweite von 800 m.

Die Oberflächenbedeckung ist homogen (Oberflächenbedeckungsklasse 2106 – Sand; Tabelle 7) mit einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 0.0003$ m. Als Geländehöhe wird ebenfalls in Übereinstimmung mit VDI (2017a) ein in y -Richtung homogener Rücken in Form einer Glockenkurve symmetrisch um den Koordinatenursprung x_0 verwendet, so dass die Höhen des Geländes, z_s , in y -Richtung für ein festes x konstant sind: $z_s(x) = L_{zb} L_{xb}^2 / (L_{xb}^2 + (x - x_0)^2)$. Dabei bezeichnet $L_{zb} = 300$ m die Berghöhe und $L_{xb} = 2000$ m die Halbwertsbreite des Berges.

3.2.1.3 Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit

Ein reibungsfreier höhenkonstanter Westwind von $U = 6$ m s⁻¹ wird vorgegeben (VDI 2017a). Oberhalb des Bodens, an dem die potentielle Lufttemperatur $\theta = 290$ K und der Bodendruck $p_s = 1000$ hPa beträgt, ist die Atmosphäre stabil geschichtet. Der vertikale Gradient der potentiellen Temperatur beträgt $\partial\theta/\partial z = 0.0035$ K/m. Die relative Feuchte beträgt vom Boden bis zum Modellober- rand 5 %.

METRAS-PCL errechnet ein eindimensionales Grenzschichtprofil. Durch die reibungsbedingte Abbremsung des bodennahen Winds und die durch die Erdrotation bedingte Winddrehung mit der Höhe in 30° entsteht eine Ekmanspirale.

Das balancierte eindimensionale Profil wird zur Initialisierung des dreidimensionalen Windfeldmodells verwendet. Die Modellrechnung wird für 20 LST gestartet; der Zeitpunkt ist aber irrelevant, da es sich um eine stationäre Modellrechnung handelt. In METRAS-PCL wird anfänglich ohne Topographie gerechnet, diese erhöht sich innerhalb von 3 Minuten auf die in den Topographiedaten vorgegebenen Höhen (Diastrophie). Die Modellgleichungen werden danach für eine Simulationsdauer von 6 h integriert und die Ergebnisse für eine Simulationsdauer von 5 h ausgewertet.

3.2.1.4 Ergebnisprüfung

Die **Wellenlänge** der stationären Schwerewelle im Prognosegebiet beträgt 3499 m, berechnet aus der Abweichung der Werte der potentiellen Temperatur über dem geographischen Bezugspunkt x_0 von den Werten der potentiellen Temperatur in gleicher Höhe über Normalhöhennull ohne den Bergrücken. Im Vergleich zum Wert der analytischen Lösung (3465 m) und in Anbetracht des anzustrebenden Zielbereiches einer Wellenlänge zwischen 3000 m und 4000 m (VDI 2017a), besteht METRAS-PCL dieses Kriterium.

Zur Prüfung der **Homogenität** werden die Wind- und Temperaturfelder im West-Ost Vertikalschnitt am Südrand des Modellgebietes von denen am Nordrand bis in 5000 m NHN subtrahiert. Verglichen werden entsprechend VDI (2017a) Wind- und Temperaturfelder. Dazu werden die mit METRAS-PCL errechneten potentiellen Temperaturen unter Nutzung von Gleichung (1) in die Realtemperaturen umgerechnet.

$$\theta = T \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R/c_p} \text{ mit } p_0 = 1000 \text{ hPa}, R = 287.04 \text{ J/(kg K)}, c_p = 1006 \text{ J/(kg K)} \quad (1)$$

Für die Bewertung der Modellergebnisse soll die Trefferquote H entsprechend Abschnitt 5.3.2 von VDI (2017a) berechnet werden:

$$H = \frac{n}{N_R} = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{N_R} n_i \text{ mit } n_i = \begin{cases} 1 & \text{falls } |P_i - O_i| \leq W \text{ oder } \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \leq D \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2)$$

Dabei bezeichnen P_i die zu prüfenden Werte und O_i die Vergleichswerte. Die Werte für die zulässigen absoluten Abweichungen W und relativen Abweichungen D sind in Tabelle 1 für die meteorologischen Parameter Wind mit seinen Komponenten u, v, w , die Windgeschwindigkeit (FF) und die Temperatur (T) aufgeführt. Die erzielte Trefferquote H ist für den hier betrachteten Testfall E1 als $H(E1)$ in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Trefferquote H für Testfall E1

Parameter	W	D	$H(E1)$
u	$0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %
v	$0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %
w	$0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %
FF	$0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10 %	100 %
T	0.5 K	0.2 %	100 %

Die Werte für W und D sind Tabelle 2 aus VDI (2017a) entnommen. Die Werte für FF sind zur Information ergänzt.

Die Trefferquote H beträgt sowohl für die Komponenten des Windes, als auch für den Betrag und die Temperatur, errechnet nach Gleichung (1), für Testfall E1 100 % und erfüllt damit das Homogenitätskriterium aus VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a), das bei 95 % liegt.

3.2.2 Testfall E2: Quasi-2-D glockenförmiger Rücken – Windgeschwindigkeitseinfluss

Zielgrößen dieses Testfalles sind die Komponenten des Windvektors sowie die Temperatur. Die Feuchte wird mitgerechnet aber nicht bewertet. Geprüft wird die Fähigkeit des Modells, über orographisch gegliedertem Gelände auf eine veränderte Windgeschwindigkeit realitätsnah zu reagieren. Dieser Testfall gleicht Testfall E1 (Abschnitt 3.2.1); Modell- und Prognosegebiet, Topographie, Rechengitter und Eingabedaten sind identisch. Lediglich die Windgeschwindigkeit ist vermindert (auf 3 m/s). Das eindimensionale Grenzschichtprofil weist dementsprechend geringere Werte auf.

Die Wellenlänge der stationären Schwerewelle im Prognosegebiet beträgt 1898 m, ermittelt auf gleiche Weise wie in Testfall E1. Im Vergleich zum Wert der analytischen Lösung (1732 m) und in Anbetracht des anzustrebenden Zielbereiches einer Wellenlänge zwischen 1500 m und 2000 m (VDI 2017a), besteht METRAS-PCL dieses Kriterium.

3.2.3 Testfall E3: Gaußförmiger Berg – Einfluss der Gitterweite

Zielgrößen dieses Testfalles sind die horizontalen Komponenten des Windvektors sowie die Temperatur. Geprüft werden die Quasistationarität der Lösung sowie die Abhängigkeit der Lösung von der Gitterweite, so dass dieser Testfall mit zwei verschiedenen Gitterweiten gerechnet wird. Modellergebnisse werden als quasistationär bezeichnet, wenn „...sich die Berechnungsgrößen näherungsweise ... einem stationären und somit unveränderlichen Gleichgewichtszustand an[nähern]. ... Ein solcher Gleichgewichtszustand, in dem sich sowohl die Strukturen als auch die Geschwindigkeiten der Windfelder nicht mehr wesentlich ändern, wird hier als „quasistationär“ bezeichnet.“ (VDI 2017a, Abschnitt 6.2.1).

3.2.3.1 Modellcharakteristiken

Wind, potentielle Temperatur und spezifische Feuchte werden prognostisch errechnet bei zeitlich konstanten Oberflächentemperaturen und -feuchten in Höhe $z = 0$ m NHN. Darüber hinaus wird die Haftbedingung genutzt und offene seitliche Ränder werden vorausgesetzt.

3.2.3.2 Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter

Das Modellgebiet reicht horizontal in x -Richtung von -20 km bis 20 km, in y -Richtung von -20 km bis 20 km und vertikal bis in 14.2 km NHN. Darin eingebettet befindet sich das Prognosegebiet mit 5 km Ausdehnung sowohl in x -Richtung als auch in y -Richtung und einer Vertikalerstreckung von 3000 m (VDI 2017a). Der geographische Bezugspunkt liegt bei einer geographischen Länge von 10°O und einer geographischen Breite von $\varphi_0 = 50^\circ\text{N}$. Dieser Bezugspunkt liegt im Mittelpunkt des Gittergebietes ($x_0 = 0$ m, $y_0 = 0$ m). Die bodennahe vertikale Gitterweite beträgt 20 m bis in eine Höhe von 140 m, darüber nimmt die Gitterweite pro Gitterzelle um 7.5 % zu mit einer maximalen Gitterweite von 800 m. Der Testfall wird mit zwei verschiedenen horizontalen Gitterauflösungen gerechnet:

- E3a: Horizontale Gitterweite $\Delta x = \Delta y = 100$ m
- E3b: Horizontale Gitterweite $\Delta x = \Delta y = 75$ m

Die Oberflächenbedeckung ist homogen mit einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 0.01$ m (METRAS-50 Oberflächenbedeckungsklasse 3100 – kurzes Gras; Tabelle 7). Als Höhe des Geländes wird in Übereinstimmung mit VDI (2017a) ein gaußförmiger Berg verwendet (Gleichung 3):

$$z_s(x) = L_{zb} e^{-((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)/L_{xg}^2} \quad (3)$$

Die maximale Höhe des Bergs beträgt $L_{zb} = 500$ m und die Standardabweichung $L_{xg} = 2000$ m. Die Berghöhen werden symmetrisch um den Koordinatenursprung (x_0, y_0) berechnet.

3.2.3.3 Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit

Ein reibungsfreier höhenkonstanter Westwind von $U = 4$ m s⁻¹ wird vorgegeben (VDI 2017a). Oberhalb des Bodens, der eine potentielle Temperatur von 290 K und einen Bodendruck von 1000 hPa aufweist, ist die Atmosphäre stabil geschichtet. Der Gradient der potentiellen Temperatur beträgt $\partial\theta/\partial z = 0.0035$ K/m. Die relative Feuchte beträgt vom Boden bis zum Modelloberrand 1 %.

METRAS-PCL errechnet ein eindimensionales Grenzschichtprofil. Durch die reibungsbedingte Abbremsung des bodennahen Winds und die durch die Erdrotation bedingte Winddrehung in 50°N entsteht eine Ekmanspirale. Das balancierte eindimensionale Profil wird automatisch in METRAS-PCL zur Initialisierung des dreidimensionalen Windfeldmodells auf dem jeweiligen Modellgitter (100 m und 75 m Gitterweite) verwendet. Die Modellrechnung wird für 00:00 LST gestartet; der Zeitpunkt ist aber irrelevant, da es sich um eine stationäre Modellrechnung handelt. Initial wird in METRAS-PCL ohne Topographie gerechnet, die dann innerhalb von 3 Minuten auf die in den Topographiedaten vorgegebene Höhe anwächst (Diastrophie, dynamische Initialisierung). Die Modellgleichungen werden danach für eine Simulationsdauer von 5 Stunden integriert und die Ergebnisse für diesen Zeitpunkt und eine Stunde zuvor ausgewertet.

3.2.3.4 Ergebnisprüfung

Zur Prüfung der **Quasistationarität** werden für Modellergebnis E3-M-a (100 m Gitterweite) die Lösungen im Prognosegebiet für das unterste Modellniveau in etwa 10 m über Grund nach vier Stunden neben die nach fünf Stunden erzielten gestellt. Analog wird für Testfall E3-M-b (75 m Gitterweite) vorgegangen. Die Lösungen unterscheiden sich optisch im Prognosegebiet nicht. Die Trefferquoten (Gleichung 2) werden jeweils berechnet unter Nutzung der in Tabelle 1 gegebenen Abweichungen D und W , die auch für diesen Testfall zu verwenden sind (VDI 2017a). Die Trefferquoten für Testfall E3a (100 m

Gitterweite) und E3b (75 m Gitterweite) erreichen die in VDI (2017a) angegebene zu erreichende Trefferquote von 95 % (Tabelle 2). Das Modell hat diese Prüfung bestanden.

Tabelle 2: Trefferquote H für Testfall E3, gerechnet mit Gitterweiten 100 m (E3a) und 75 m (E3b)

Parameter	$H(E3a)$	$H(E3b)$	$H(E3a,E3b)$
u	99 %	99 %	96 %
v	99 %	99 %	97 %
w	99 %	99 %	100 %
FF	99 %	99 %	97 %
T	100 %	99 %	100 %

Für die Prüfung der **Unabhängigkeit vom Rechengitter** werden die mit 100 m Gitterweite erzielten Modellergebnisse (E3-M-a) mit den auf 75 m erzielten Modellergebnissen (E3-M-b) im Prognosegebiet verglichen. Die Interpolation erfolgt wie in Abschnitt 6.1.2.3 von VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) für Vergleiche mit Messungen ausgeführt. Die Modellergebnisse E3-M-a werden zunächst vertikal linear auf die (fiktive) Gitterhöhe von Testfall E3-M-b am horizontal gleichen Ort interpoliert. Die Höhenunterschiede zwischen beiden Testfällen sind minimal, so dass die Gitterhöhen nahezu identisch sind. Würde die Höhe unterhalb der niedrigsten Rechenfläche liegen, würde zur vertikalen Interpolation die logarithmischen Profilfunktionen für die Prandtlschicht für neutrale Schichtung verwendet werden; dieser Fall tritt in diesem Testfall aber nicht auf. Die auf dem fiktiven Gitter entstandenen Werte werden dann horizontal auf die Gitterpunkte von E3-M-b linear interpoliert. Sowohl bei der vertikalen als auch bei der horizontalen Interpolation ist berücksichtigt worden, dass METRAS-PCL ein Arakawa-C Gitter nutzt. Daher sind zunächst die Windkomponenten interpoliert worden und dann aus diesen die Beträge des Windes an den skalaren Gitterpunkten errechnet worden. Die Berechnung der Trefferquoten zeigt eine die Zielgröße aus VDI (2017a) von 95 % überschreitende gute Übereinstimmung (Tabelle 2, letzte Spalte).

3.2.4 Testfall E4: Gaußförmiger Berg – Abschattungseffekt und Kaltluftabflüsse

Zielgrößen dieses Testfalles sind die Komponenten des Windes sowie die Temperatur. Geprüft wird die Fähigkeit des Modells, im Tagesgang zeitlich veränderliche orographische Einflüsse zu berücksichtigen.

3.2.4.1 Modellcharakteristiken, Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter

Wind, potentielle Temperatur und spezifische Feuchte werden prognostisch errechnet bei zeitabhängigen Oberflächentemperaturen und -feuchten in Höhe $z = 0$ m NHN. Darüber hinaus wird die Haftbedingung genutzt und es werden offene seitliche Ränder vorausgesetzt. Die Modellrechnungen erfolgen instationär. Das Modellgitter ist identisch mit dem in Abschnitt 3.2.3.2 beschriebenen bei 100 m Gitterweite.

3.2.4.2 Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit

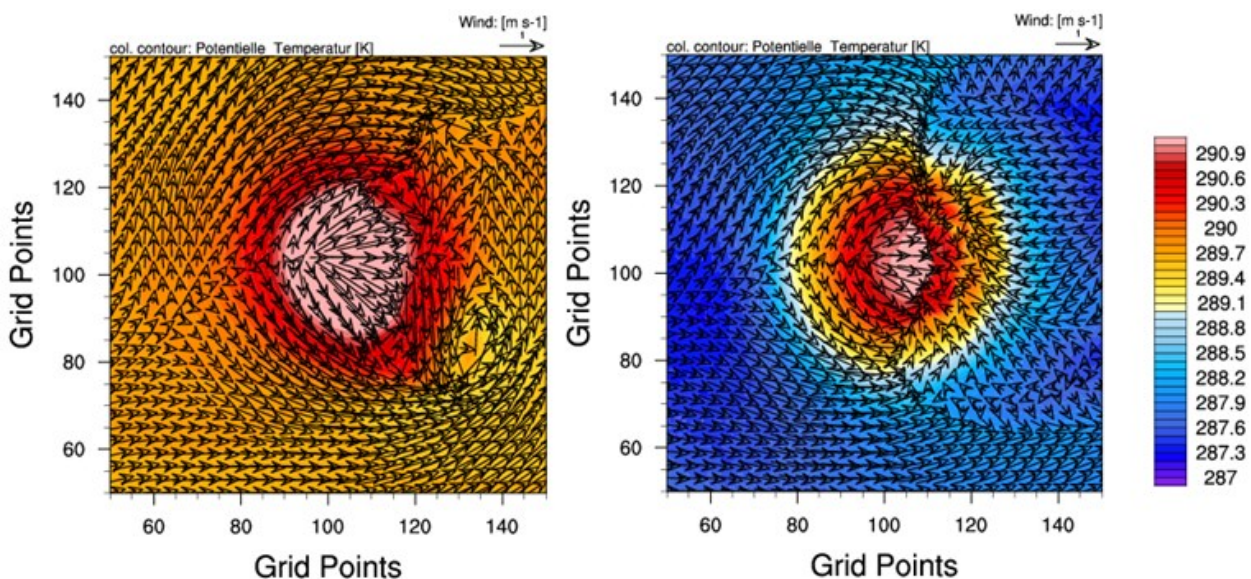
Ein reibungsfreier höhenkonstanter geostrophischer Wind von $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ aus West wird vorgegeben (VDI 2017a). In 0 m NHN beträgt die initiale potentielle Temperatur 290 K und der Bodendruck 1000 hPa. Darüber ist die Atmosphäre stabil geschichtet. Der Gradient der potentiellen Temperatur beträgt $\partial\theta/\partial z = 0.0035 \text{ K/m}$. In der obersten Bodenschicht (etwa 2 cm bis 10 cm) hat die Temperatur dieselben Werte wie initial in der untersten Luftschicht. Die Höhenabhängigkeit im Boden wird berechnet entsprechend dem der Lufttemperatur (0.0035 K/m). In der untersten Bodenschicht (etwa 1 m bis 2.5 m Tiefe) wird eine Referenztemperatur von 13°C verwendet. Die relative Feuchte beträgt bodennah 40 % und fällt bis in 10 km Höhe linear auf einen Wert von 5 % ab. Darüber beträgt sie konstant 5 %.

METRAS-PCL errechnet für die Initialisierung aus den genannten Anfangswerten ein eindimensionales Grenzschichtprofil (Schlünzen et al. 2017). Durch die reibungsbedingte Abbremsung des bodennahen Windes und die durch die Erdrotation in 50° N bedingte Winddrehung mit der Höhe entsteht eine Ekmanspirale. Das balancierte eindimensionale Profil wird zur Initialisierung des dreidimensionalen Windfeldmodells verwendet. Die Modellrechnung erfolgt für den 21./22.06.2014 mit einer Startzeit für 18:40 h. Dieses entspricht wie in VDI (2017a) ausgeführt 1 ½ Stunden vor Sonnenuntergang (20:10 h). Bei Initialisierung wird die Topographie auf 0 m gesetzt, sie wächst innerhalb von 3 Minuten auf die in den Topographiedaten vorgegebene Höhe an (Diastrophie, dynamische Initialisierung). Bei einer Simulationsdauer von 16 h endet die Modellrechnung für 10:40 h.

3.2.4.3 Ergebnisprüfung

In der Nacht bilden sich Kaltluftabflüsse, welche die schwache westliche Anströmung verstärken (östliche Hänge) bzw. behindern (westliche Hänge). Infolge der Abschattung des Osthangs am frühen Abend (bei Sonnenuntergang) setzen die Kaltluftabflüsse zuerst am Osthang ein (Abbildung 2 links). Die Abbildung zeigt Werte für die potentielle Temperatur und Windvektoren, sie beziehen sich auf 20:30. Durch die Kaltluftabflüsse am Osthang und die gleichzeitig bei der stabilen Schichtung verstärkte Bergumströmung bilden sich östlich des Berges Wirbel aus.

Abbildung 2: Testfall E4 mit Kaltluftabflüssen um 20:30 h (links) und Hangaufwinden am Osthang um 7:30 h (rechts)



Quelle: Universität Hamburg

Nach Sonnenaufgang um ca. 4 Uhr wird zunächst der östliche Hang beschienen, sodass hier die Kaltluftabflüsse früher aufhören als am westlichen Hang. Ab etwa sieben Uhr bildet sich am Fuß der Berge eine leichte Hangaufströmung aus östlicher Richtung aus. Ihr entgegengesetzt sind die durch die Bergüberströmung und Kaltluftabflüsse noch starken westlichen Hangabflüsse. Dies führt zu einer Konvergenzzone im Windfeld die quer über den östlichen Hang verläuft (Abbildung 2 rechts).

Das Verhalten des Modells ist qualitativ richtig und entspricht somit dem nach VDI (2017a) für Testfall E4 zu erwartenden. Das Modell hat diese Prüfung bestanden.

3.2.5 Testfall E5: Gaußförmiger Berg – Einfluss der Anströmrichtung, numerische Genauigkeit

Zielgrößen dieses Testfalles sind die Komponenten des Windes. Geprüft wird die Fähigkeit des Modells, von der Anströmrichtung unabhängige Ergebnisse zu erhalten (Prüfung auf Implementierungs-

fehler und Prüfung der numerischen Genauigkeit). Dazu wird dieser Testfall mit zwei verschiedenen Anströmrichtungen gerechnet.

3.2.5.1 Modellcharakteristiken, Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter

Der Testfall entspricht dem in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen bei 100 m Gitterweite und 4 m s^{-1} reibungsfreier Anströmgeschwindigkeit (Testfall E3-a). Die Anströmrichtung beträgt hier aber 315° (E5-M-a) und 45° (E5-M-b). Dementsprechend ist auch das Initialisierungsprofil innerhalb der Grenzschicht angepasst. Durch die reibungsbedingte Abbremsung des bodennahen Winds und die durch die Erdrotation in 50° N bedingte Winddrehung mit der Höhe entsteht eine Ekmanspirale. Das balancierte eindimensionale Profil wird zur Initialisierung des dreidimensionalen Windfeldmodells verwendet (Diastrophie, dynamische Initialisierung).

3.2.5.2 Ergebnisprüfung

Wie in allen anderen Testfällen erfolgt die Prüfung im Prognosegebiet. Die Ergebnisse von E5-M-b (45° Anströmrichtung) werden um $\alpha = -90^\circ$, also entgegen dem Uhrzeigersinn, um den Drehpunkt (x_0, y_0) gedreht (Hilfskoordinaten $x' = (x \cos \alpha + y \sin \alpha) = -y$, $y' = (-x \sin \alpha + y \cos \alpha) = x$. Unter Beachtung des Arakawa-C Gitters werden die u - und v -Komponente des gedrehten Geschwindigkeitsfeldes auf das Gitter von E5-M-a (315° Anströmrichtung) so interpoliert, dass u von E5-M-b auf einem v -Punkt von E5-M-a liegt, und dass v von E5-M-b auf einem u -Punkt von E5-M-a liegt. Die Drehung muss auf einem Modellgitter erfolgen, das ein entfernungs-basiertes Koordinatensystem (x -, y -Koordinatensystem) hat und nicht ein breiten- und längengradabhängiges. Anderenfalls würden bei der Drehung keine längentreuen Abbildungen generiert werden und Deformationen wären die Folge.

Nach der Drehung werden Betrag und Richtung am skalaren Punkt berechnet und von den gedrehten und zu den interpolierten Daten der Windrichtung der Wert 270° addiert. Diese Windrichtungen werden mit denen von E5-M-a gitterpunktweise verglichen. Zulässige absolute Abweichung W und relative Abweichungen D , die zur Prüfung der Übereinstimmung von Modellergebnissen mit Referenzwerten für die meteorologischen Parameter Wind mit Windgeschwindigkeit (FF) und Windrichtung (DD) genutzt werden sind in Tabelle 3 angegeben. Die dort für den Testfall E5 vermerkten zu erzielenden Trefferquoten ergeben sich aus den Differenzen der Windrichtungen und Horizontalwindgeschwindigkeiten von E5-M-b und E5-M-a.

Tabelle 3: Trefferquote H für Testfall E5

Parameter	W	D	H
FF	0.5 m s^{-1}	10 %	98.3 %
DD	10° für $FF > 1 \text{ m s}^{-1}$	entfällt	99.2 %

Die Werte für W und D sind den Angaben zu Testfall E5 in VDI (2017a) entnommen.

Die Ergebnisse dürfen nach VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) an 95 % der Gitterpunkte in der Windrichtung nur um $\pm 10^\circ$ differieren, vorausgesetzt die Windgeschwindigkeit beträgt wenigstens 1 m s^{-1} . Für den Betrag des Winds müssen 95 % der Werte auf $\pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ übereinstimmen. Für beide Größen liegt die Trefferquote im Prognosegebiet bei mindestens 95 %. Damit hat das Modell auch diesen Testfall bestanden.

3.2.6 Testfall E6: Sophienhöhe – Umströmung und Überströmung eines steilen Hügels

Zielgrößen dieses Testfalles sind Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Geprüft wird die Fähigkeit des Modells, Um- und Überströmung im orographisch gegliederten Gelände realitätsnah wiederzugeben.

3.2.6.1 Modellcharakteristiken

Wind, potentielle Temperatur und spezifische Feuchte werden bei zeitlich festen bodennahen Randwerten und offenen seitlichen Rändern prognostisch errechnet.

3.2.6.2 Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter

Das Modellgebiet beträgt horizontal $16.5 \text{ km} \times 17.4 \text{ km}$ und reicht vertikal bis in 12.2 km NHN in etwa 51° N . Darin eingebettet befindet sich das Prognosegebiet mit $5.5 \text{ km} \times 5.8 \text{ km}$ Ausdehnung und einer Vertikalerstreckung von 3000 m (VDI 2017a). Die horizontale Gitterweite beträgt 100 m . Orographien und Landnutzung sind www.vdi.de/vdi_3783-7, Datei E6-topo.dat entnommen worden. Die Geländehöhen sind im Randbereich (15 Zellen) 50-mal gefiltert worden. Diese Filterung ist nach VDI (2017a) möglich. Außerdem wurden zur Geländehöhe jeweils 200 m addiert, um negative Werte zu vermeiden. Diese entstehen in diesem Testfall durch die Tagebaugrube neben der Sophienhöhe. METRAS kann negative Geländehöhen aber nicht verarbeiten.

3.2.6.3 Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit

Die unter www.vdi.de/vdi_3783-7 in Datei E6-iniprof.dat vorgegebenen Profile von Temperatur, Luftdruck, Feuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit sind für die Initialisierung genutzt worden. Da METRAS-PCL in der Initialisierung selbst das Grenzschichtprofil erstellt, ist darauf geachtet worden, dass die bodennahen Profile vom Modell selbst errechnet werden können. Daher sind die Windprofile nur oberhalb von 160 m übernommen worden. Für die Feuchte wurden nur 6 Stützstellen des Profils verwendet. Als Bodendruck wird wie in VDI (2017a) vorgegeben 1024.5 hPa verwendet. METRAS-PCL errechnet ein eindimensionales Grenzschichtprofil. Durch die reibungsbedingte Abbremsung des bodennahen Winds und die durch die Erdrotation in etwa 51° N bedingte Winddrehung mit der Höhe entsteht eine Ekmanspirale in Übereinstimmung mit Datei E6-iniprof.dat auf www.vdi.de/vdi_3783-7. Das errechnete Temperaturprofil weicht in der zweiten Nachkommastelle von den Eingabevorgaben ab.

Das balancierte eindimensionale Profil wird zur Initialisierung des dreidimensionalen Windfeldmodells verwendet. Die Modellrechnung wird für $21:00 \text{ LST}$ gestartet; der Zeitpunkt ist aber irrelevant, da es sich um eine stationäre Modellrechnung handelt. In METRAS-PCL wird anfänglich mit konstanter Geländehöhe gerechnet, diese erhöht sich innerhalb von 3 Minuten auf die in den Topographiedaten vorgegebenen Höhen (Diastrophie, dynamische Initialisierung). Die Modellgleichungen werden danach für eine Simulationsdauer von 1.5 h integriert und die Ergebnisse wie in VDI (2017a) vorgegeben nach 1 Stunde ausgewertet.

3.2.6.4 Ergebnisprüfung

Die Modellergebnisse werden für die in VDI (2017a) spezifizierten Orte ausgegeben bzw. auf diese zunächst vertikal und dann horizontal interpoliert. Die Vergleichsdaten sind VDI (2017a) aus der dortigen Tabelle E6 entnommen.

Zur Bewertung der Modellergebnisse im Vergleich zu den Naturdaten wird der mittlere absolute Fehler *MAE* (Gleichung 4) und der mittlere quadratische Fehler *RMSE* (Gleichung 5) getrennt für die Horizontalwindgeschwindigkeit *FF* und Windrichtung *DD* bestimmt. Sofern die Windgeschwindigkeit *FF* unterhalb von 1 m s^{-1} liegt, wird die zugehörige Windrichtung nicht in die Berechnung einbezogen.

$$MAE = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{i=N_R} D_i \text{ mit } D_i = \begin{cases} |P_i - O_{i,min}| & \text{falls } P_i < O_{i,min} \\ |P_i - O_{i,max}| & \text{falls } P_i > O_{i,max} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4)$$

Die Spannbreite $O_{i,min}$ bis $O_{i,max}$ wird für Windgeschwindigkeit und Windrichtung in Tabelle 6 von VDI (2017a) für jeden der N_R Messorte angegeben und hier verwendet.

$$RMSE = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{i=N_R} \sqrt{D_i^2} \quad (5)$$

In Gleichung (5) wird D_i wie in Gleichung (4) angegeben berechnet.

Für MAE ergibt sich 0.2 m s^{-1} bzw. 6° , für $RMSE$ 0.3 m s^{-1} bzw. 9° . Alle Werte sind geringer als die in VDI (2017a) vorgegebenen maximalen Werte für MAE von nicht mehr als 0.6 m s^{-1} bzw. 13° und für $RMSE$ von nicht mehr als 0.9 m s^{-1} bzw. 19° . Das Kriterium ist damit erfüllt.

Ein zweites Kriterium besteht in der Prüfung des Windrichtungsunterschiedes zwischen den Standorten E6-N-1 und E6-N-3 in 15 m über Grund. Dieser Unterschied muss mindestens 60° betragen und wird berechnet als Differenz von Windrichtung bei E6-N-1 *minus* Windrichtung an E6-N-3. Er beträgt in METRAS-PCL Ergebnissen 62° . Das Kriterium und letztlich der Testfall ist damit erfüllt.

3.2.7 Testfall E7: Grazer Becken – Gegenströmung

Zielgrößen dieses Testfalles sind die Windgeschwindigkeit und -richtung. Geprüft wird die Fähigkeit des Modells, orographische bedingte Einflüsse wie Über- und Umströmungen sowie orographisch bedingte Rückströmungen zu simulieren.

3.2.7.1 Modellcharakteristiken

Wind, potentielle Temperatur und spezifische Feuchte werden prognostisch gerechnet, wobei zeitlich konstante bodennahe Randwerte für die Temperatur und die spezifische Feuchte vorgegeben werden. Die seitlichen Ränder sind offen.

3.2.7.2 Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter

Das Modellgebiet reicht horizontal von $15^\circ 00' \text{ O}$ bis $15^\circ 45' \text{ O}$ und $46^\circ 51' \text{ N}$ bis $47^\circ 21' \text{ N}$ und vertikal bis in 12000 m NHN. Das Modellgebiet beträgt etwa $56 \times 56 \text{ km}^2$. Das Prognosegebiet ist deutlich kleiner und umfasst in West-Ost-Richtung 14 km und in Süd-Nord-Richtung 20 km. Die Gitterweite beträgt äquidistant 200 m. Die Höhe des Geländes wird 50-fach über 15 Zellen parallel zum Rand gefiltert.

3.2.7.3 Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit

Profile der potentiellen Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit werden wie in VDI 3783 Blatt7 beschrieben vorgegeben (www.vdi.de/vdi_3783-7, Datei E7-iniprof.dat). Dabei sind die Werte innerhalb der Grenzschicht nicht verwendet wurden, da METRAS-PCL in der Initialisierung ein eigenes Windprofil errechnet. Der Initialisierungspunkt liegt in 360 m NHN bei den Koordinaten ($15^\circ 25' \text{ O}$ und $47^\circ 06' \text{ N}$). Die Simulationsdauer beträgt 1 Stunde bei zeitlich konstanten Oberflächentemperaturen und -feuchten.

3.2.7.4 Ergebnisprüfung

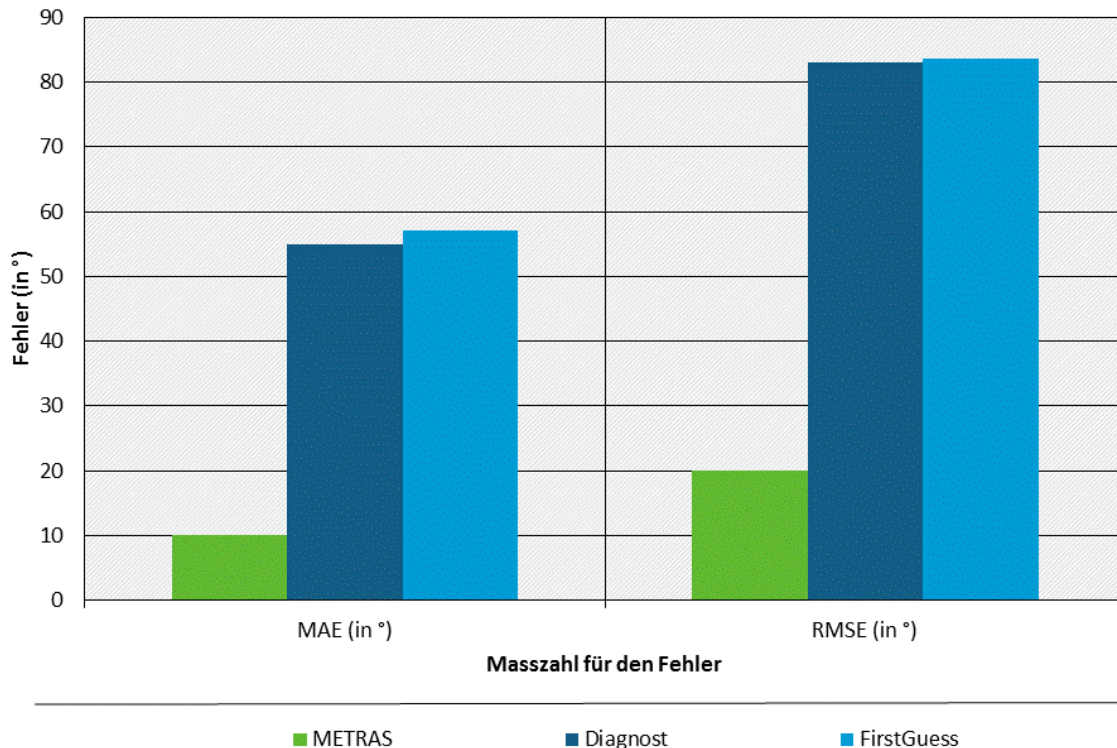
Für **quantitative Vergleiche** werden für die in VDI 3783 Blatt7 in der dortigen Tabelle E7 angegebenen Messstandorte und Messhöhen inklusive der Profile (Messorte E7-N-1 bis E7-N-4) die Modellergebnisse ausgegeben und mit den Messwerten aus Tabelle E8 (VDI 2017a) wie dort spezifiziert gewichtet verglichen. Die Modellergebnisse werden aus den benachbarten Gitterpunkten vertikal und dann horizontal auf die Messorte interpoliert. Die Daten am SODAR-Standort E7-N-2 werden, wie in VDI (2017a) angegeben, nicht zur Evaluierung herangezogen, da hieraus das Initialisierungsprofil abgeleitet wurde. Die Spannweiten der Messungen ($O_{i,min}$ und $O_{i,max}$) sind in Tabelle E8 (VDI 2017a) für jeden Messort angegeben und werden für die Ermittlung von MAE und $RMSE$ berücksichtigt.

Für MAE ergibt sich 0.6 m s^{-1} bzw. 10° , für $RMSE$ 1.0 m s^{-1} bzw. 20° . Alle Werte sind geringer als die in VDI (2017a) vorgegebenen maximalen Werte für MAE von nicht mehr als 0.9 m s^{-1} bzw. 18° und für $RMSE$ von nicht mehr als 1.3 m s^{-1} bzw. 25° . Das Kriterium ist damit erfüllt.

Abbildung 3 zeigt für METRAS-PCL und unterschiedlich komplexe Vergleichsmodelle die Fehler für die Windgeschwindigkeit. Die Vergleichsmodelle sind das diagnostische Windfeldmodell (Diagnost) und

die Weiternutzung der Initialisierungsprofile („FirstGuess“). Diese beiden einfachen Ansätze sind für eine adäquate Errechnung der Windrichtung nicht ausreichend.

Abbildung 3: Mittlerer absoluter Fehler und Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler für die Windrichtung im Testfall Graz

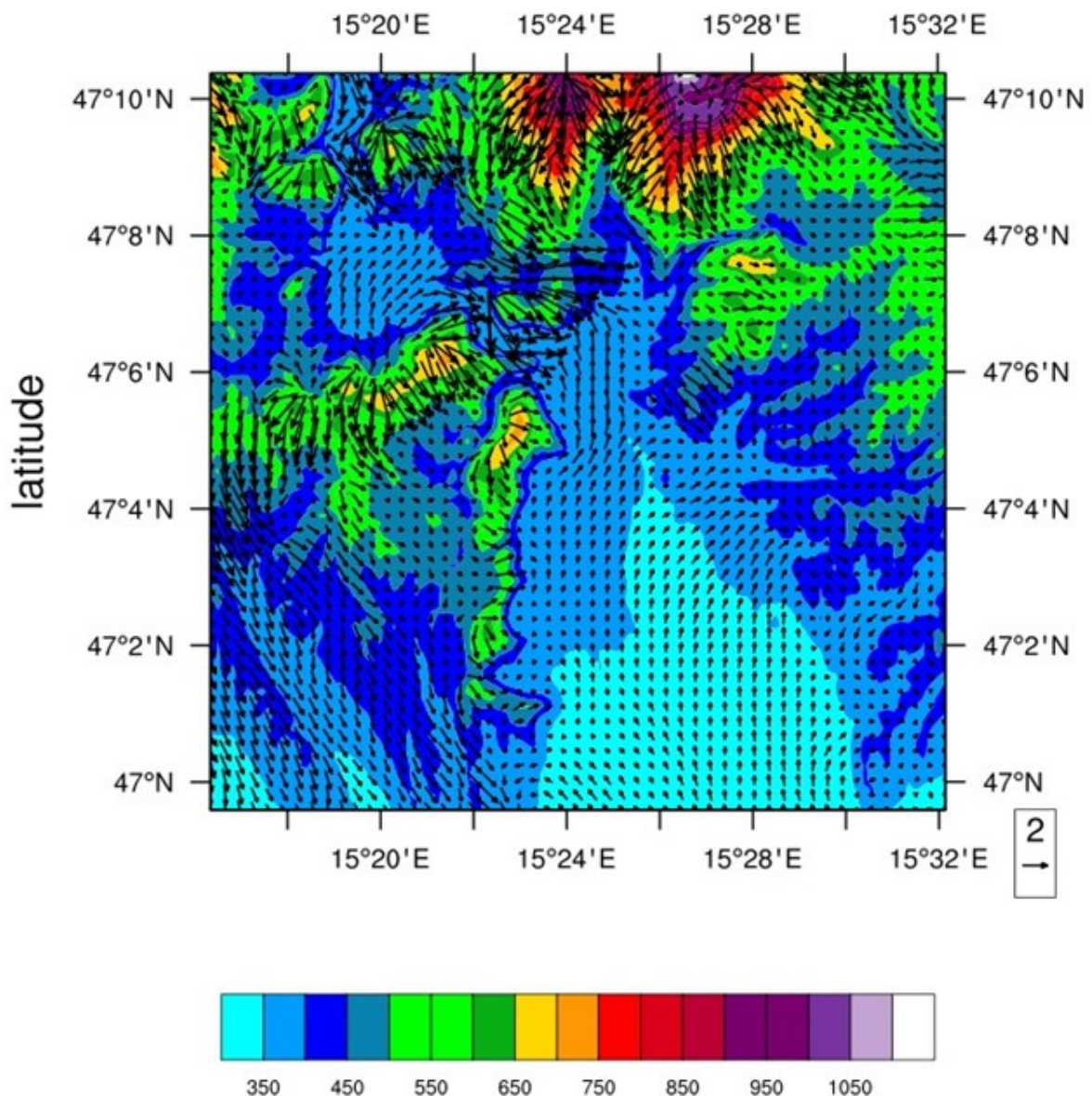


Quelle: Universität Hamburg

Für **qualitative Vergleiche** wird die simulierte Windrichtung am Standort der Messung E7-N-3 betrachtet: sie muss an allen Gitterpunkten im Höhenbereich zwischen 10 m und 60 m über Grund zwischen 110° und 250° liegen. Zudem müssen die berechneten Windgeschwindigkeiten alle weniger als $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ betragen. Dieses Kriterium ist erfüllt, die Windrichtungen liegen mit 132° ($z = 10 \text{ m}$) und 140° ($z = 30 \text{ m}$) in dem Bereich. Die Windgeschwindigkeiten betragen $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($z = 10 \text{ m}$), $0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($z = 30 \text{ m}$) und $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($z = 50 \text{ m}$). Die letztgenannte Geschwindigkeit liegt unterhalb von $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, so dass eine Berechnung der Windrichtung in dieser Höhe nicht sinnvoll ist. Darüber hinaus soll die Windrichtung in $z = 10 \text{ m}$ und $z = 30 \text{ m}$ zwischen 90° und 270° liegen, was mit 132° ($z = 10 \text{ m}$) und 140° ($z = 30 \text{ m}$) erfüllt ist. In größerer Höhe (145 m und 165 m) soll die Windrichtung zwischen 270° und 360° liegen, die simulierten Werte liegen bei 354° ($z = 145 \text{ m}$), 356° ($z = 165 \text{ m}$). Damit ist auch dieses Kriterium erfüllt.

Auch eine optische Auswertung erfolgt: Bodennah sollte eine Strömung aus südlichen Richtungen an den Gitterpunkten in der Umgebung des Standorts E7-N-3 simuliert werden. Abbildung 4 zeigt das Modellergebnis 90 Minuten nach Simulationsbeginn. Die Farben symbolisieren die Höhe des Geländes in m NHN. Die Windpfeile sind auf 2 m/s normiert, wobei der Referenzpfeil unten rechts dargestellt ist. Die südliche Strömung ist gut zu erkennen. In der Umgebung von E7-N-3 muss in größerer Höhe, also ab 150 m über Grund, die Strömung aus dem Nordwestsektor kommen und damit der übergeordneten, initialisierten Strömung entsprechen. Auch dieses wurde von METRAS-PCL simuliert.

Abbildung 4: Windfeld in etwa 10 m über der Erdoberfläche für den Testfall Graz im Prognosegebiet



Quelle: Universität Hamburg

3.2.8 Testfall E8: Stuttgarter Talkessel – Strömungskanalisation, Kaltluftabflüsse

Zielgrößen dieses Testfalles sind die Windgeschwindigkeit und -richtung. Geprüft wird die Fähigkeit des Modells, orographische bedingte Kaltluftabflüsse zu simulieren und die kalte Luft im Tal zu sammeln.

3.2.8.1 Modellcharakteristiken

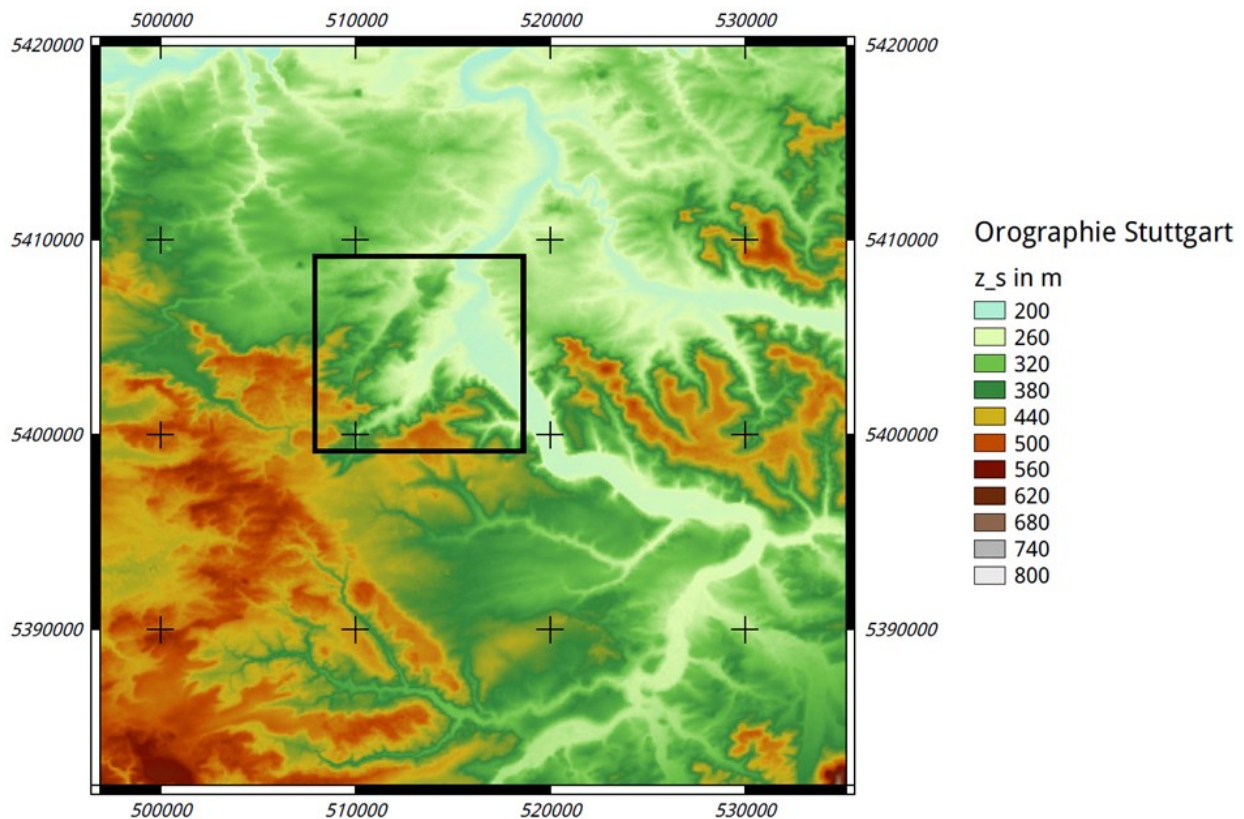
Wind, potentielle Temperatur und spezifische Feuchte werden prognostisch errechnet bei offenen seitlichen Rändern. Am Boden wird die Haftbedingung genutzt.

3.2.8.2 Modell- und Prognosegebiet, Topographie sowie Rechengitter

Das Modellgebiet beträgt horizontal etwa 30 km × 30 km und reicht von 48°30' N bis 48°58' N und von 8°54' O bis 9°33' O. Die vertikale Erstreckung reicht bis in 12000 m NHN. Darin eingebettet befindet sich das Prognosegebiet mit 10 km × 10 km Ausdehnung und einer Vertikalerstreckung von 200 m über Grund (VDI 2017a). Die horizontale Gitterweite beträgt im Prognosegebiet äquidistant 100 m.

Außerhalb nimmt die horizontale Gitterweite um maximal 15 % von einem zu nächsten Gitterpunkt zu. Die maximale horizontale Gitterweite beträgt 500 m. Geländehöhen und Landnutzung sind www.vdi.de/vdi_3783-7, Datei E8-topo.dat entnommen worden. Die Geländehöhen sind parallel zu den seitlichen Rändern des Modellgebietes bis zu 50-mal gefiltert worden. Diese häufige Filterung wird direkt an den seitlichen Rändern des Modellgebietes angewendet und vermindert sich in Richtung Prognosegebiet. Abbildung 5 stellt das Gelände mit minimalen Höhen von 200 m und maximalen Höhen von 740 m dar. Der Rahmen im Inneren von Abbildung 5 bezieht sich auf das prognosegebiet. Die Koordinaten beziehen sich auf eine UTM-Projektion (Zone 32). Bezugssystem ist WGS84.

Abbildung 5: Orographie für den Testfall Stuttgart



Quelle: Universität Hamburg

3.2.8.3 Eingabedaten, Initialisierung und Simulationszeit

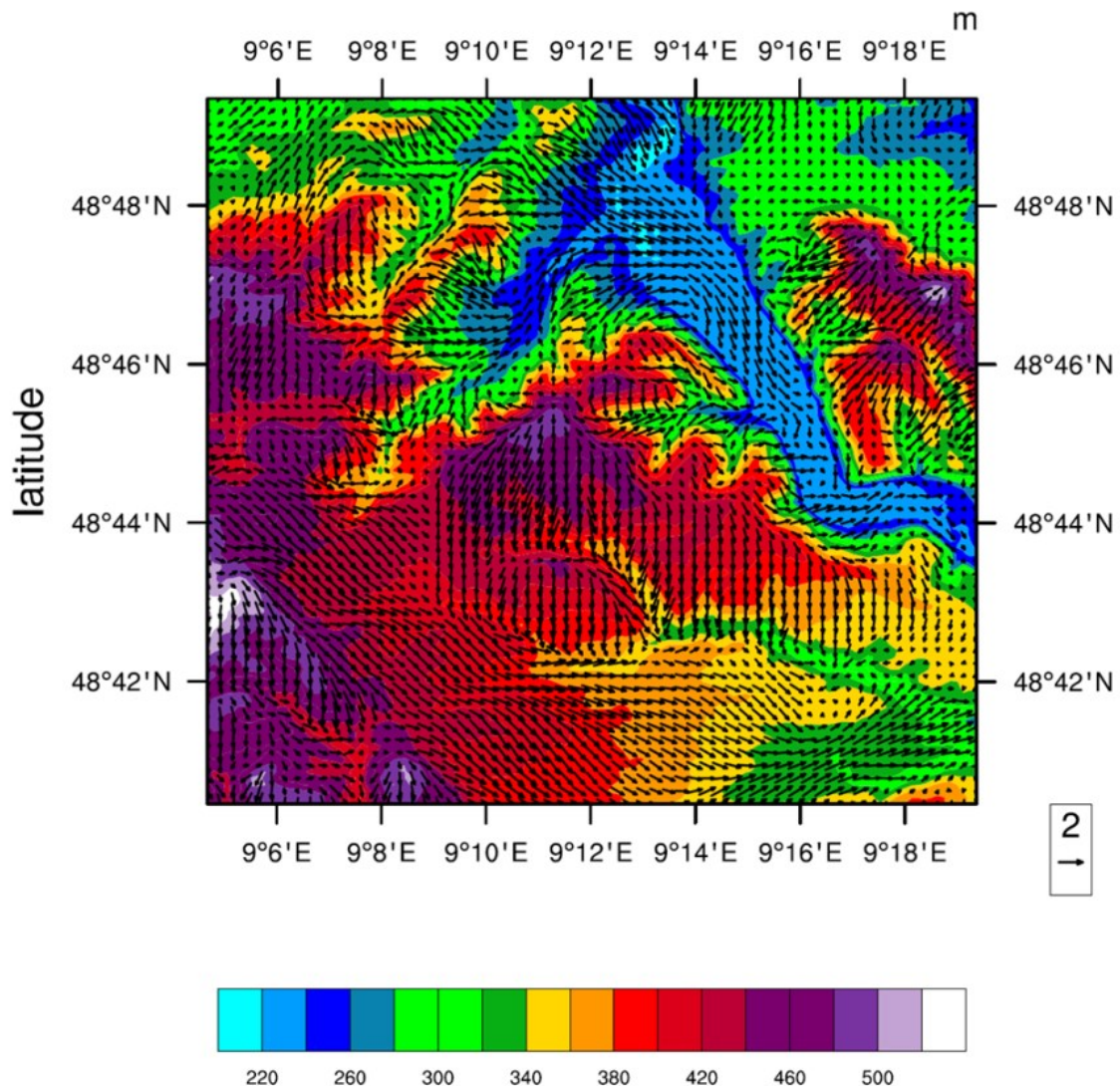
Profile der potentiellen Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit werden wie in VDI 3783 Blatt7 beschrieben vorgegeben (www.vdi.de/vdi_3783-7, Datei E8-iniprof.dat). Der Initialisierungspunkt liegt in 180 m NHN bei den Koordinaten 9°15'O und 48°51' N. Bezogen auf NHN beträgt der Druck 1019 hPa. Die Bodentemperatur am Initialisierungspunkt beträgt 7.4°C. Die Modellrechnung wird für 15:30 UTC am 01.04.1997 (etwa zwei Stunden vor Sonnenuntergang, 16:00 LST) mit einem reibungsfreien Nordostwind von etwa 3 m/s in 1500 Meter Höhe gestartet. Danach werden die Modellgleichungen bis 21 UTC integriert und die für die letzte Stunde berechneten Werte werden zur Evaluierung herangezogen.

3.2.8.4 Ergebnisprüfung

Das von METRAS-PCL für den Zeitpunkt 21 UTC simulierte Windfeld ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Geländehöhen sind farbig dargestellt. Der zur Normierung der Windpfeile herangezogene Wert von 2 m s^{-1} findet sich rechts unten in Abbildung 6. Deutlich sind die entlang der Berghänge der Wartbergklinge (nordöstlich des Stadtzentrums von Stuttgart) und der Hänge südlich des Stadtzentrums ent-

stehenden Hangabflüsse zu erkennen, welche in das Nesenbachtal einströmen und die Stadt Stuttgart von Süd-Westen her durchströmen. Am Ausgang des Nesenbachtals fließt die Luft dann in das Neckertal und stromaufwärts nach Süd-Osten. Letzteres Phänomen wurde von mehreren mesoskaligen Modellen simuliert, kann mangels Messdaten aber nicht evaluiert werden. Die Strömung aus Süd-Westen im Stuttgarter Stadtbereich entspricht gemessenen Werten für diesen Testfall. Darüber hinaus ist METRAS-PCL auch in der Lage, die Strömung aus Nord-Westen am Killesberg (48°48'30" Nord und 9°11' Ost) zu simulieren, welche durch eine entlang des Höhenzuges Wartbergklinge auftretende Talenge strömt. Eine quantitative Evaluierung ist für den Killesberg in VDI (2017a) jedoch auf Grund der starken Variabilität in den Messwerten und der kleinräumigen Strömungsprozesse verworfen worden.

Abbildung 6: Mit dem Modell METRAS-PCL simuliertes Strömungsfeld im Prognosegebiet

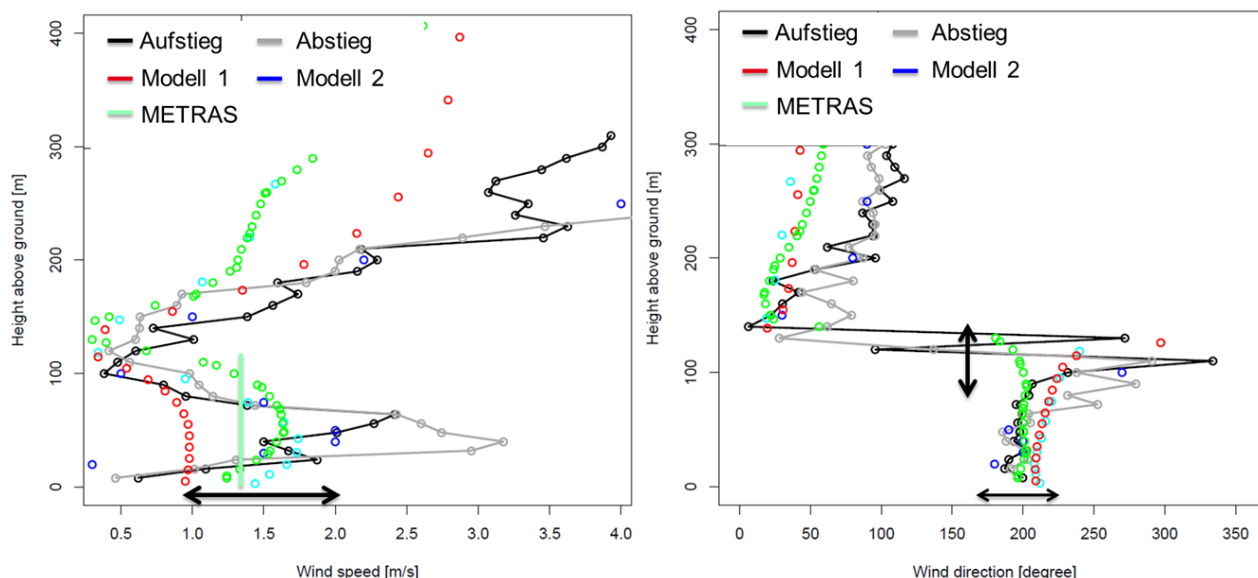


Quelle: Universität Hamburg

Die simulierte **vertikale Mächtigkeit des Kaltluftstroms** wird aus den zeitlich gemittelten (20:30 LST bis 21:20 LST) vertikalen Windrichtungsprofilen für den Ort Planetarium ermittelt, in dem die Höhe der Modellschicht unmittelbar unterhalb des Sprungs in der Windrichtung (von südlicher Richtung bodennah auf nordöstlicher Richtung darüber) bestimmt wird. Abbildung 7 zeigt links die Windgeschwindigkeiten und rechts die Windrichtung. Deutlich wird der Windsprung in etwa 120 m über Grund. Dieser Wert ist oberhalb von 85 m und unterhalb von 160 m, so dass dieses Kriterium erfüllt

ist. Wie in VDI 3783 Blatt 7 gefordert, fällt der simulierte Sprung in der Windrichtung mit einem Minimum der Windgeschwindigkeit zusammen.

Abbildung 7: Profile am Standort Stuttgart-Planetarium für 21 UTC am 01.04.1997. Dargestellt sind die Simulationsergebnisse mit METRAS-PCL (grün) und zwei weiteren prognostischen Modellen sowie die Messdaten aus den Fesselballonaufstiegen (grau und schwarz)



Quelle: Universität Hamburg

Die **Stärke des Kaltluftvolumenstromes** kann aus dem Profil der Windgeschwindigkeit abgeleitet werden (Abbildung 7, links). In etwa 50 Meter über Grund findet sich ein Maximum der Windgeschwindigkeit mit rund 1.6 m/s. Darüber und darunter ist die Strömung schwächer ausgeprägt. Eine Integration der Windgeschwindigkeit und der Schichtdicke über den Einflussbereich des Kaltluftstroms liefert eine Volumenstromdichte von $116 \text{ m}^3/(\text{m s})$. Auch dieser Wert erfüllt die Kriterien der Richtlinie (Volumenstrom zwischen 90 und $195 \text{ m}^3/(\text{m s})$).

Die Richtung der Kaltluftströmung soll laut VDI (2017a) für den Standort Planetarium zwischen 174° und 221° betragen. Dabei sind mittlere Windrichtungen für den Höhenbereich 25 m bis 65 m und zeitlich von 20 UTC bis 21 UTC zu betrachten. Mit einer Windrichtung von 200° (Abbildung 7) ist auch dieses Kriterium erfüllt.

3.3 Zusammenfassendes Evaluierungsprotokoll

Die Ergebnisse der Evaluierung sind zusammengefasst in Abbildung 8. Alle erfüllten Kriterien sind mit „JA“ gekennzeichnet.

Abbildung 8: Evaluierungsprotokoll übernommen aus VDI 3783 Blatt 7, Anhang F (VDI 2017a)

Modell-Evaluierungsprotokoll in Übereinstimmung mit Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 Prüfungen durch den Modellentwickler (Abschnitt 5 der Richtlinie)	
Dieses Dokument bestätigt die Evaluierung eines prognostischen mesoskaligen Windfeldmodells. Das Zertifikat stimmt mit den Vorgaben der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7, Abschnitt 5 überein. Zahlen in Klammern [] verweisen auf den entsprechenden Abschnitt der Richtlinie. Bitte ergänzen und Nichtzutreffendes streichen .	
0. Informationen zum mesoskaligen Modell METRAS-PCL.....	Version 5.0.0.....
Veröffentlichungsdatum.....: Jahr.2017...Monat.Februar...Tag.03.....	

Verantwortliche Person für das Modell.....: K. Heinke Schlünzen, David Grawe.....		
Verantwortliche Person für die Evaluierung: David Grawe.....		
deren Adresse.....: Meteorologisches Institut, CEN, Univ. Hamburg, Bundesstr. 55, 20146 Hamburg.....		
E-Mail, Telefon.....: david.grawe@uni-hamburg.de, +49 40 42838 4917.....		

1. Allgemeine Bewertung:	[5.1]	
Nachvollziehbarkeit	[5.1.1]	JA / NEIN
Kurzbeschreibung	[5.1.2.1]	JA / NEIN
ausführliche Modellbeschreibung	[5.1.2.2]	JA / NEIN
Handbuch	[5.1.2.3]	JA / NEIN
Evaluierungsbericht	[5.1.2.4]	JA / NEIN
Technische Referenz (nur nötig bei Quellcodeweitergabe)	[5.1.2.5]	JA / NEIN

2. Wissenschaftliche Bewertung:	[5.2]	
Gleichungen sind Reynolds gemittelt	[5.2]	JA / NEIN
alle drei Windkomponenten prognostisch	[5.2]	JA / NEIN
(potenzielle) Temperatur prognostisch	[5.2]	JA / NEIN
Corioliskraft berücksichtigt	[5.2]	JA / NEIN
Kontinuitätsgleichung vollständig oder anelastische Approximation	[5.2]	JA / NEIN
Auftriebskräfte berücksichtigt	[5.2]	JA / NEIN
Turbulenzparametrisierung stabilitätsabhängig	[5.2]	JA / NEIN
Flüsse stetig als Funktion des Orts	[5.2]	JA / NEIN
Flüsse stetig als Funktion der Schichtung	[5.2]	JA / NEIN
direkte Berechnung der bodennahen Flüsse oder Monin-Obukhov-Theorie	[5.2]	JA / NEIN
instabile Schichtung: Parametrisierung subskaliger Grenzschicht Konvektion	[5.2]	JA / NEIN
Landnutzungseigenschaften (z.B. über Rauigkeit) berücksichtigt	[5.2]	JA / NEIN
Oberflächenwärmebilanz zumindest „Force-Restore-Methode“	[5.2]	JA / NEIN
geneigte Oberflächen und Abschattung in Einstrahlung berücksichtigt	[5.2]	JA / NEIN
spezifische Feuchte prognostisch	[5.2]	JA / NEIN
Oberflächenfeuchtebilanz ist zu lösen	[5.2]	JA / NEIN

3. Validierung:	[5.3, Anhang E]	
Testfall E1 - Quasi-2-D glockenförmiger Rücken - Zweidimensionalität	[E.1]	JA / NEIN
Testfall E2 - Quasi-2-D glockenförmiger Rücken - Windgeschwindigkeit	[E.2]	JA / NEIN
Testfall E3 - gaußförmiger Berg - Gitterweite	[E.3]	JA / NEIN
Testfall E4 - gaußförmiger Berg - Abschattung, Kaltluft	[E.4]	JA / NEIN
Testfall E5 - gaußförmiger Berg - Anströmrichtung	[E.5]	JA / NEIN
Testfall E6 - Sophienhöhe, Umströmung	[E.6]	JA / NEIN
Testfall E7 - Grazer Becken, Gegenströmung	[E.7]	JA / NEIN
Testfall E8 - Stuttgarter Talkessel, Strömungskanalisation, Kaltluft	[E.8]	JA / NEIN

4. Modellinterne Kontrollen:	[5.3.4]	JA / NEIN

***** EVALUIERUNG SERGEBNIS: *****		
Das mesoskalige Modell METRAS-PCL (Version 5.0.0) ist		
***** EVALUIERT / NICHT EVALUIERT *****		
in Übereinstimmung mit Richtlinie VDI 3783 Blatt 7.		
Das Modell gilt nach VDI 3783 Blatt 7 als evaluiert, wenn alle Prüfpunkte mit „JA“ beantwortet werden konnten.		
Ich versichere, dass alle in diesem Zertifikat enthaltenen Informationen nach bestem Wissen und Gewissen gegeben sind. Es wurden keine Versuche unternommen, das Modell für einzelne Testfälle zu verändern, um eine bessere Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Referenzdaten zu erreichen.		
Hamburg, 20.01.2018	David Grawe	
-----	-----	
(Ort und Datum)	(Unterschrift)	

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf VDI (2017a)

4 Turbulenzparametrisierung nach VDI 3783 Blatt 8

Die in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) verwendete Parametrisierung der Turbulenz wurde hinsichtlich des Windfeldes und der Turbulenzprofile mit den Ergebnissen der Referenzimplementierung des Windfeldmodells verglichen. Folgende wesentliche Ergebnisse wurden erzielt:

- Die Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 konnte mithilfe der Zuarbeiten aus diesem Forschungsvorhaben erfolgreich zum Gründruck verabschiedet werden und ist inzwischen als Weißdruck erschienen (VDI 2017b). Viele Arbeiten sind während dieser Entwicklungsarbeit erfolgt.
- Die in VDI 3783 Blatt 8 entwickelte Turbulenzparametrisierung wurde auf ihre mathematische Formulierung und den physikalischen Sinngehalt hin geprüft und numerisch validiert (Abschnitt 4.1).
- Die in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 entwickelte Turbulenzparametrisierung wurde mit den in mesoskaligen, atmosphärischen Modellen eingesetzten Parametrisierungen verglichen (Abschnitt 4.2). Der Vergleich wurde durch Evaluation mit Naturdaten und Referenzdaten gestützt. Beim Vergleich wurden zwei Turbulenzparametrisierungen von METRAS und die Turbulenzparametrisierung in der aus METRAS ausgekoppelten Referenzimplementierung METRAS-PCL einbezogen. Der Vergleich verdeutlicht, dass die Parametrisierung nach Blatt 8 für prognostische mesoskalige Modelle und damit für die Referenzimplementierung des Windfeldmodells gemäß Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) ungeeignet ist.
- Die Ergebnissen der in VDI 3783 Blatt 8 vorgestellten Turbulenzparametrisierung und der in METRAS eingesetzten Turbulenzparametrisierung (ähnlich zu denen sonstiger mesoskaliger Atmosphärenmodelle) können nicht im Allgemeinen ineinander überführt werden (Abschnitt 4.4). Bei Betrachtung stationärer Lösungen in homogenem Gelände unterscheiden sich bei stabiler Schichtung die Windprofile und die turbulenten Diffusionskoeffizienten, die mit der numerischen Lösung von Blatt 8 berechnet werden, nur wenig von den Lösungen von METRAS. Vorausgesetzt werden muss ein ausbalancierter Grundzustand in einer gleichmäßig geschichteten vertikalen Säule ohne horizontalen Austausch mit der Umgebung. Nur durch die Verwendung eines in diesem Vorhaben entwickelten Präprozessors können die Unterschiede zwischen den Windprofilen für einige Schichtungen minimiert werden (Abschnitt 4.4.4).

4.1 Prüfung der Turbulenzparametrisierung in VDI 3783 Blatt 8

In der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) werden zwei Parametrisierungen des Windprofils vorgeschlagen: eine analytische und eine numerische Lösung. Um das bodennahe Windprofil in der Grenzschicht zu bestimmen, wird im Falle der numerischen Lösung ein vereinfachtes, Reynolds-gemittelttes Bewegungsgleichungssystem

$$-f(v - v_g) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$f(u - u_g) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m(z) \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (7)$$

mit dem Coriolisparameter f , den mittleren stationären horizontalen Windvektoren u (West- Ost-Komponente) und v (Süd-Nord-Komponente) sowie den Komponenten u_g und v_g des geostrophischen Windes gelöst. Die infolge der Reynolds-Mittelung entstehenden turbulenten Spannungen werden in der numerischen Lösung proportional der vertikalen Scherung der mittleren horizontalen Strömung gesetzt (NEWTONscher Ansatz, Pichler (1997) Kapitel 10). Als Proportionalitätsfaktor wird der turbulente vertikale Diffusionskoeffizient für Impuls $K_m(z)$ verwendet. Die molekularen Reibungskräfte werden vernachlässigt.

Die numerische Lösung wird bei Vorgabe eines turbulenten Diffusionskoeffizienten ermittelt,

$$K_m(z) = \kappa u_* z \begin{cases} \frac{1}{1+5z/L} e^{-6\alpha z/h_m} & \text{für } z/L \geq 0 \\ \left[e^{-24\alpha z/h_m} - 15 \frac{z}{L} \left(1 - 0.8 \frac{z}{h_m} \right)^8 \right]^{0.25} & \text{für } z/L < 0 \end{cases} \quad (8)$$

wobei als Eingabegrößen die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* , die Rauigkeitslänge z_0 , die Obukhov-Länge L und der Parameter $\alpha = 0.3$ sowie zusätzlich der Coriolisparameter f vorgegeben werden müssen. Die Mischungsschichthöhe h_m wird während der numerischen Integration diagnostiziert. Die Integration erfolgt unter Anwendung des Runge-Kutta-Verfahrens.

Die Vorgabe des turbulenten Diffusionskoeffizienten ist physikalisch-heuristischer Natur. Bei stabiler Schichtung orientiert sich der Diffusionskoeffizient in der bodennahen Prandtl-Schicht an der Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie (MOS). In den höheren Niveaus wird von einem exponentiellen Abfall des Diffusionskoeffizienten ausgegangen. Dies ergibt sich durch die Tatsache, dass insbesondere die thermisch bedingte Turbulenz in den höheren Luftschichten geringer wird. Ebenso verliert die mechanisch bedingte Turbulenz in den höheren Luftschichten an Bedeutung, sofern nicht synoptische oder konvektive Schichtungen betrachtet werden.

Eine zweite in VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) vorgeschlagene Parametrisierung ist eine analytische Lösung. Diese Lösung basiert grundsätzlich auf der Lösung einer Differentialgleichung. Sie lässt sich außer in der in VDI (2017b) angegebenen Weise mit Hilfe einer komplexen Variablen $\mu = u + iv - u_g - iv_g$ aus den Bewegungsgleichungen (6, 7) ableiten. Normalerweise wird in Lehrbüchern für den Diffusionskoeffizienten $K_m(z)$ bei der analytischen Lösung eine Konstante angesetzt. In VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) wird der Ansatz verfolgt, innerhalb einer bodennahen Schicht (Prandtl-Schicht) bis zu einer Referenzhöhe h_1 ein Standard-Windgeschwindigkeitsprofil anzusetzen. Dieses kann der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2002) entnommen werden. Oberhalb der Referenzhöhe h_1 wird eine Ekman-Lösung mit einem konstanten turbulenten Diffusionskoeffizienten K berechnet. K wird festgelegt als Wert von $K_m(z)$ in Referenzhöhe h_1 . h_1 wird heuristisch approximiert als die Höhe für die gilt: $K_2(h_1) = \max(K_m(z))$. Als Nebenbedingung wird gefordert, dass in der Höhe h_1 ein steter Übergang zwischen der Prandtl-Lösung und der Ekman-Lösung erfolgt, d. h. dass der imaginäre und reale Anteile der Geschwindigkeitsvariablen μ und dessen Ableitung übereinstimmen und dass der Geschwindigkeitsvektor für $z \rightarrow \infty$ gegen den Vektor des geostrophischen Windes strebt.

Die analytische Lösung wurde aufgrund ihrer Komplexität nicht komplett auf ihre Struktur und Ableitung hin überprüft. Dennoch ist kritisch anzumerken:

- ▶ Das Implementieren der Lösung ist für eigene Anwendungen extrem aufwändig.
- ▶ Selbst innerhalb der Prandtl-Schicht wird entgegen dem sonst üblichen logarithmischen Windprofil eine konstante Winddrehung angenommen, um stetige Übergänge zur Ekman-Lösung zu erreichen. Oftmals wird der Windrichtungsänderung mit der Höhe nur eine untergeordnete Rolle zugesprochen (beispielsweise Mölders und Kramm (2014)). In der Richtlinie wird angemerkt, dass Messbefunde eine Winddrehung aufzeigen würden.
- ▶ Sehr viele Eingangsgrößen müssen festgelegt werden, die nicht leicht aus Messungen extrahiert werden können.
- ▶ Wie auch bei der numerischen Lösung werden Näherungen gemacht, die die Anwendung der Turbulenzparametrisierung auf stationäre Situationen in homogenem Gelände bei homogener Oberflächenbedeckung und einheitlicher thermischer Schichtung beschränken. Demzufolge ist diese Parametrisierung für prognostische mesoskalige Modelle und damit für die Referenzimplementierung des Windfeldmodells ungeeignet (Abschnitt 4.4).

Numerische und analytische Parametrisierungsansätze (im Folgenden „VDI-Turbnum“ und „VDI-Turbana“) wurden in der Programmiersprache Java beim Ingenieurbüro Janicke umgesetzt und dem Projekt zur Verfügung gestellt. Die beiden Java Programme wurden im Projekt so angepasst, dass sie

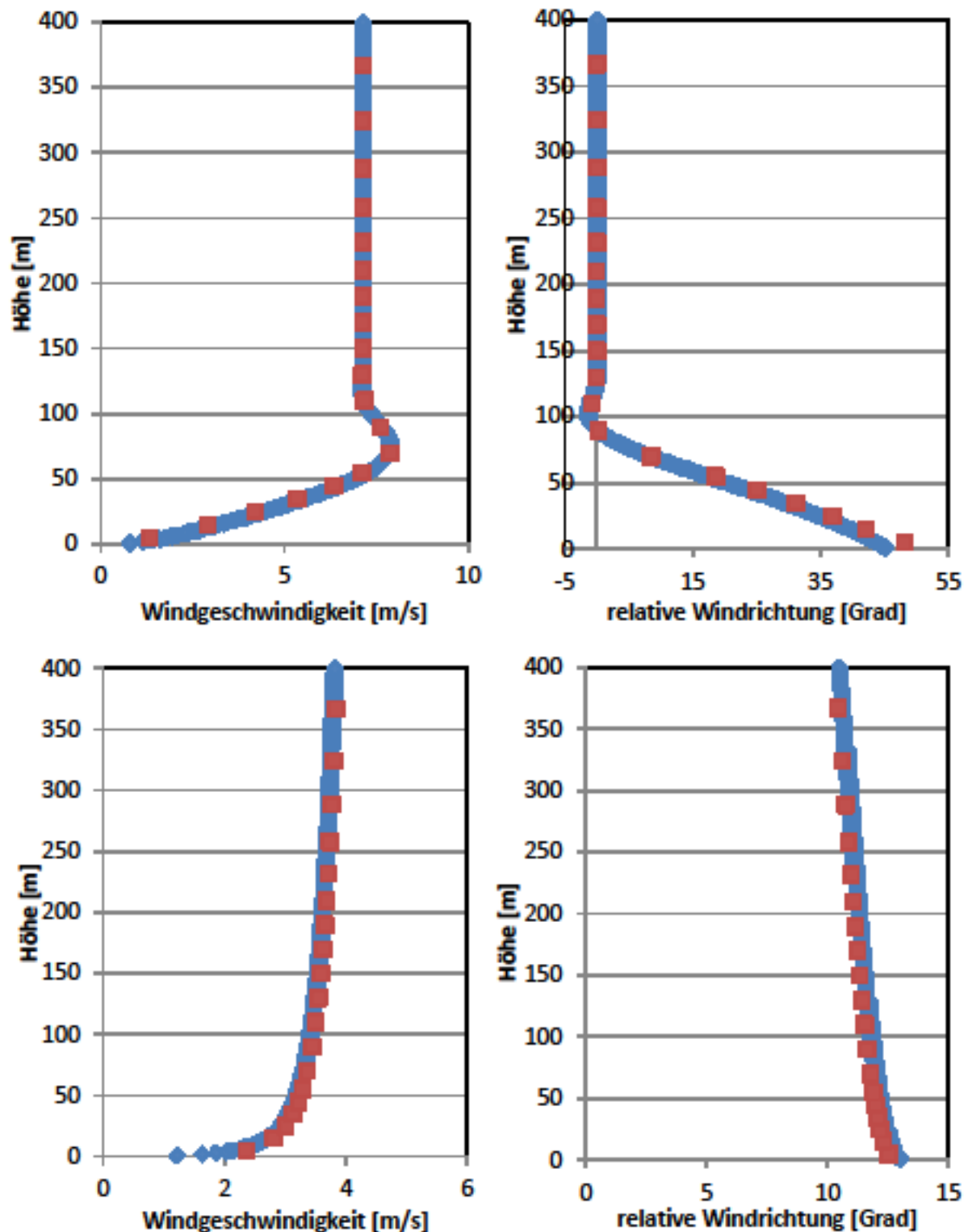
für die im Forschungsvorhaben durchgeführten Untersuchungen einen Vergleich mit den Ergebnissen des Modells METRAS zulassen.

Die numerische Lösung „VDI-Turbnum“ wurde mit den Ergebnissen des Modells METRAS verglichen. Damit soll geprüft werden, ob die Algorithmen des Ansatzes mathematisch korrekt sind und die zugehörige numerische Integration auf sinnvolle Art und Weise realisiert wurde. Dies ist gleichbedeutend mit einer Qualitätsprüfung des Grenzschichtprofils für die geplante TA Luft. Die Strategie zur Durchführung der Qualitätsprüfung kann wie folgt skizziert werden:

1. Die im VDI Parametrisierungsansatz enthaltenen Annahmen bei der Ableitung des Grenzschichtprofils werden durch den gewählten Testfall mit dem mesoskaligen Modell METRAS so weit wie möglich erfüllt, d. h. insbesondere wird eine horizontal homogene Atmosphäre mit ausschließlich vertikalen Austauschprozessen und Vernachlässigung thermodynamischer Prozesse vorgegeben.
2. Die turbulenten Austauschprozesse werden im Modell METRAS nicht mit den standardmäßigen, komplexen Grenzschichtparametrisierungen beschrieben und modelliert, sondern mit den vom „VDI-Turbnum“ ermittelten turbulenten Diffusionskoeffizienten. Diese Werte werden anstelle der original berechneten Werte für den Diffusionskoeffizienten in METRAS eingesetzt.
3. Der aus dem „VDI-Turbnum“ bestimmte Grenzwert des Windes für die höheren Niveaus wird zur Initialisierung des reibungsfreien Windes in METRAS verwendet.

Das auf diese Art und Weise adaptierte und initialisierte Modell METRAS wird so lange gerechnet, bis das simulierte Windprofil nahezu stationär ist. Ein derart simuliertes Windprofil und der Vergleich mit dem Richtlinienansatz sind für Daten des Hamburger Wettermastes in Abbildung 9 dargestellt. Hierbei wurden die Daten des Hamburger Wettermastes (Lange 2011) aus dem Sektor A (ländlich geprägte Gebiete) als Eingabedaten für den Parametrisierungsansatz verwendet, um für die zwei Stabilitätsklassen, I-N und IV-H, Profile mit dem Verfahren „VDI-Turbnum“ (blau) zu bestimmen. Anschließend wird mit dem oben beschriebenen, adaptierten Modell METRAS die Lösung für das Windprofil (rot) ermittelt. Beide Lösungen sind nahezu identisch. Sie zeigen eine stärkere Drehung des Windes in der Grenzschicht für die stark stabile Schichtung (obere Abbildungen in Abbildung 9) im Vergleich zur labilen Schichtung (untere Abbildungen in Abbildung 9). Auch die im stabilen Fall sehr niedrige Grenzschicht mit einer Geschwindigkeitserhöhung in etwa 80 m Höhe wird deutlich. Die noch verbleibenden Unterschiede können auf den leicht unterschiedlichen Coriolisparameter und die leicht unterschiedlichen Koeffizienten der verwendeten bodennahen Profilkfunktionen zurückgeführt werden.

Abbildung 9: Vergleich des nach VDI 3783 Blatt 8 errechneten Windprofils „VDI-Turbnum“ (blau) mit adaptierten METRAS Ergebnissen (rot)



Quelle: Universität Hamburg

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die mathematische Umsetzung des Parametrisierungsansatzes der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) und die damit verbundene numerische Integration höchstwahrscheinlich korrekt sind. Nichtsdestotrotz kann dieser Vergleich nicht dazu dienen, um die

vom VDI Algorithmus ausgerechneten, turbulenten Diffusionskoeffizienten als geprüft anzusehen. Eine derartige Bewertung konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht erfolgen.

Kritisch anzumerken bleibt bei der Bewertung der Richtlinienparametrisierung, dass die Obukhov-Länge als charakteristischer Parameter für die atmosphärische Schichtung rein theoretisch alle Werte annehmen kann und als gültig für die gesamte Grenzschicht angenommen wird. Eine Höhenabhängigkeit der Schichtung oder interne Grenzschichten können damit nicht erfasst werden. So beschreiben die Stabilitätsklasse IV und V durchweg, also bis in sehr große Höhen, auch lokal labile atmosphärische Verhältnisse. Dies steht in Widerspruch zu den atmosphärischen Beobachtungen, denn überadiabatische Verhältnisse bleiben oft auf die untersten Meter der Grenzschicht beschränkt.

Schließlich muss darauf hingewiesen werden, dass weitere Turbulenzparametrisierungen in der Literatur diskutiert werden, die das turbulente Windprofil innerhalb der Grenzschicht beschreiben. Gryning et al. (2007) unterteilt die Grenzschicht in drei verschiedene Bereiche, die durch unterschiedliche Eingabeparameter beschrieben werden müssen. Dies führt einerseits zu teilweise sehr guten Übereinstimmungen mit gemessenen Windprofilen, impliziert andererseits aber eine Reihe Parameter, die die atmosphärische Grenzschicht beschreiben. Dies verkompliziert die Berechnung eines Profils an einem Ort, an dem nur bodennahe Messungen vorliegen. Konow (2015) verglich Ergebnisse von Grynings Parametrisierungsansatz und anderer Ansätze mit Messwerten für den Wettermast Hamburg. Die dort durchgeführten Analysen (dortige Abbildung 5.14) zeigen für sehr stabile Schichtungen beim Ansatz von Gryning zu hohe Geschwindigkeiten, die in den Naturmessungen nicht vorhanden waren. Grynings Lösung weist oftmals dieselben Diskrepanzen zu Messungen auf, wie dies auch bei der VDI Turbulenzparametrisierung für sehr stabile Schichtungen der Fall ist.

4.2 Gegenüberstellung der Turbulenzparametrisierung in VDI 3783 Blatt 8 und im Referenzmodell

Wie schon Abschnitt 4.1 erwähnt, werden bei den Parametrisierungsansätzen nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) erhebliche Näherungen gemacht. Im Wesentlichen basiert die entwickelte Parametrisierung auf stark vereinfachten Eingangsgrößen und Randbedingungen. Dahingegen werden in den prognostischen mesoskaligen Modellen aufwändigere Parametrisierungen verwendet, denn hier müssen zeitabhängige Lösungen, heterogenes Gelände und heterogene Oberflächeneigenschaften berücksichtigt werden. In der Tabelle 4 findet sich ein Vergleich zwischen den Parametrisierungen und Methoden, wie sie in METRAS und damit auch in der Referenzimplementierung des Windfeldmodells (METRAS-PCL) verwendet werden, und der Richtlinienparametrisierung. Die hier aufgeführten Eigenschaften für das Windfeldmodell gelten nicht ausschließlich für METRAS, sondern sind so auch in vielen anderen mesoskaligen Modellen zu finden (Review von Cuxart et al. 2006). Eine ausführlich Beschreibung der in METRAS angewendeten, physikalischen Parametrisierungen finden sich in den wissenschaftlichen und technischen Dokumentationen des Modells (Schlünzen et al. 2012a,b). In METRAS-PCL wird der Ansatz von Lüpkes und Schlünzen (1996) verwendet, der bei stabiler Schichtung einen Mischungswegansatz nutzt und bei labiler Schichtung gegen den lokalen Gradienten gerichtete Transporte für die Wärmetransporte berücksichtigt.

Mit der Neufassung von VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) werden physikalische Ansätze verfolgt, die mit den in Atmosphärenmodellen gelösten Grundgleichungen vergleichbar sind. Die Parametrisierungsansätze lösen die Navier-Stokes Gleichung für die horizontalen Windkomponenten unter der Annahme, dass die Atmosphäre absolut trocken und im geostrophischen und hydrostatischen Gleichgewicht ist und diabatische Prozesse vernachlässigt werden können. Dabei werden horizontal homogene und stationäre Verhältnisse vorausgesetzt. Diese Annahmen dürfen in mesoskaligen Windfeldmodellen nicht gemacht werden, da ansonsten keine physikalisch sinnvollen Ergebnisse für atmosphärische Strömungsmuster in orographisch gegliedertem Gelände erzielt würden. Deshalb werden zusätzliche Terme M_u und M_v in den numerisch diskretisierten Bewegungsgleichungen berücksichtigt (Tabelle 4). Diese enthalten horizontale Diffusionsprozesse, die Druckgradientkraft, horizontale und vertikale Dif-

fusion sowie Auftrieb (dritte Bewegungsgleichung). Im Fall horizontal homogener Verhältnisse sind diese zusätzlichen Terme gleich Null. Die Unterschiede zwischen den in VDI 3783 Blatt 8 und METRAS zur Lösung beitragenden Prozessen beruhen dann auf höhenabhängigen Schichtungen, dem Einfluss der Feuchte auf die Schichtung, den subskaligen Oberflächenbedeckungen, sowie diabatischen Prozessen.

In Erweiterung vieler anderer numerischer Modelle werden in METRAS, in Übereinstimmung mit Gleichungen A1-A4 sowie A13) in VDI (2017a), die turbulenten Flüsse unter Einbezug auch horizontaler Windscherungen parametrisiert (Schlünzen et al. 2012a). Dieser Ansatz verbessert die Berücksichtigung der horizontalen turbulenten Vermischung in orographisch gegliedertem Gelände. Der horizontale Diffusionskoeffizient wird in Abhängigkeit vom Wert des Diffusionskoeffizienten in vertikaler Richtung festgelegt; die Proportionalitätskonstante hängt dabei vom Verhältnis der horizontalen und vertikalen Gitterweiten ab (Schlünzen 1994). Dieser Ansatz wird auch in METRAS-PCL genutzt.

Tabelle 4: Vergleich zwischen Annahmen für die VDI Turbulenzparametrisierung und METRAS

Modelleigenschaft	VDI 3783 Blatt 8	METRAS
Gelöste Gleichung	$-f(v - v_g) = \partial_z [K_m(z) \partial_z u]$ $f(u - u_g) = \partial_z [K_m(z) \partial_z v]$	$-f(v - v_g) = \partial_z [K_m(z) \partial_z u] + M_u$ $f(u - u_g) = \partial_z [K_m(z) \partial_z v] + M_v$
Untere Randbedingung	Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie (MOS)	Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie (MOS)
Lösungsverfahren	Analytisch / numerisch	Numerisch
Integrationsverfahren	Runge-Kutta	Adams-Bashforth
Coriolisparameter	Hängt vom Breitengrad ab	Hängt vom Breitengrad ab
Turbulenter Diffusionskoeffizient	Physikalisch-empirisch und stabilitätsabhängig; bodennah Anlehnung an MOS-Theorie (s.o.); Beschreibung der mechanisch bedingten Turbulenzanteile (schwache Abnahme mit der Höhe) und thermisch bedingten Turbulenzanteile (starke Abnahme mit der Höhe)	Physikalisch und stabilitätsabhängig; Beschreibung der Turbulenz für stabile Schichtung mit dem Mischungswegansatz (Herbert und Kramm 1985) und für labile Schichtung Verwendung des sog. „Counter-Gradient“ Ansatzes mit nichtlokaler Schließung (Lüpkes und Schlünzen 1996)
Schichtung feuchtigkeitsabhängig	Nein	Ja
Gelände	Eben	Komplexes Relief
Oberflächenbeschaffenheit, Rauigkeitsklassen	Homogen, 1 Klasse	Heterogen, mehrere Klassen innerhalb einer Gitterzelle (subskalige Oberflächenbedeckungen; von Salzen et al. 1996)
Raumbezug	Eindimensional	Dreidimensional
zeitliche Auflösung	Stationärer Zustand	Zeitabhängige Lösungen
vertikale Schichtung	Einheitlich	Inhomogen mit beliebigen internen Grenzschichten; durch Temperatur und Feuchteprofil festgelegt
Eingangsparameter	L, z_0, u_* und f	$\frac{\partial T}{\partial z}, u_g, v_g, f$, relative Feuchte; Parameter zur Beschreibung der Oberflächenbedeckungsklassen, Flächenanteile der Oberflächenbedeckungsklassen

Die Parametrisierung der turbulenten Flüsse ist in prognostischen mesoskaligen Modellen sehr unterschiedlich, wobei üblicherweise eine Schließung erster Ordnung mit Fluss-Gradient-Beziehung verwendet wird (siehe auch Anhang A in VDI (2017a)). Insbesondere müssen die Parametrisierungen des Diffusionskoeffizienten, die in Modellierungen der Grenzschicht verwendet werden, Feuchteprozesse (teilweise auch diabatische Wolkenwasserprozesse) und komplexe vertikale Schichtungen berücksichtigen. Darüber hinaus können mit prognostischen mesoskaligen Modellen nicht nur stationäre sondern auch instationäre Lösungen (z.B. Kaltluftabflüsse) errechnet werden. Diese Windfeldmodelle zeigen ihre Stärken auch für Simulationen über stark heterogenem, komplex gegliedertem Gelände unter Einschluss horizontaler Austauschprozesse. Diese Aspekte der Windfeldmodelle werden bei der Richtlinienparametrisierung in VDI (2017b) außer Acht gelassen. Daher ist die Richtlinienparametrisierung VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) für den Einsatz in prognostischen mesoskaligen Modellen und damit auch in der Referenzimplementierung des Windfeldmodells nicht geeignet.

Als Eingangsparameter für die in VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) ausgewiesenen Parametrisierungen werden MOS-Parameter verwendet, wodurch ein Übergang zu den Windfeldmodellen ermöglicht ist. Nichtsdestotrotz verbleiben Unterschiede bei der Initialisierung. Wird für den Parametrisierungsansatz nach VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) eine Schichtung als Obukhov-Länge L vorgegeben, so muss im Windfeldmodell die vertikale Schichtung in Form von Gradienten der potentiellen Temperatur (oder der Temperatur) vorgegeben werden. Die Obukhov-Länge wird dann im Windfeldmodell für den bodennahen Bereich berechnet und verwendet, darüber wird die lokale Richardson Zahl genutzt, um den Schichtungseinfluss auf die vertikale Durchmischung zu berücksichtigen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die realistische Simulation von atmosphärischen Prozessen an die in prognostischen mesoskaligen Modellen enthaltenen Parametrisierungen der Turbulenz andere Anforderungen stellt, als dies in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) der Fall ist. Jedoch nähern sich die Ergebnisse des Windfeldmodells der Richtlinie an, wenn stationäre Zustände, homogene Verhältnisse, konstante vertikale Schichtung und die in der Richtlinie vorgegebenen Randbedingungen berücksichtigt werden. In diesem idealisierten Anwendungsfall ergeben sich die größten Unterschiede durch die Unterschiede in der Initialisierung. Dieses Problem wird in Abschnitt 4.4 diskutiert.

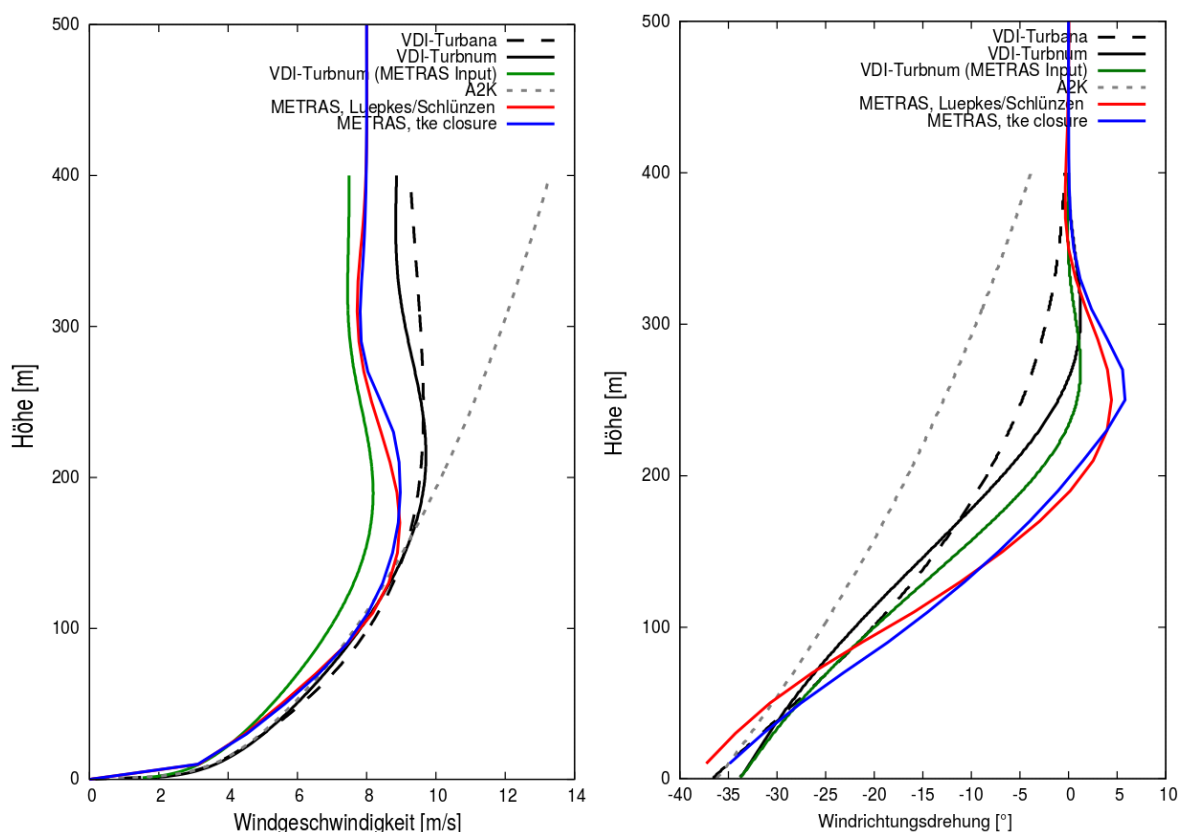
4.3 Anwendung von Turbulenzparametrisierung in VDI 3783 Blatt 8

Anhand realitätsnaher Testfälle lassen sich die Lösungen des Parametrisierungsansatzes aus VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) mit den Lösungen aufgrund der in mesoskaligen Modellen enthaltenen Parametrisierungen der Turbulenz vergleichen. Die jeweiligen Ergebnisse können dann mit einer Referenzlösung verglichen werden. Hierfür sind die Untersuchungen von Cuxart et al. (2006) herangezogen worden.

Cuxart et al. (2006) untersuchten in einer wohldefinierten atmosphärischen Grenzschicht den Einfluss verschiedener Turbulenzparametrisierungen auf Modelllösungen und verglichen diese mit der von Grobstruktursimulationen (LES). Letztere lösen bei ausreichend geringer Gitterweite die energiereichen kleinräumigen turbulenten Wirbel explizit auf, nur der Dissipationsbereich wird parametrisiert. Damit erlauben LES Modelle eine realitätsnahe Beschreibung der Turbulenzstatistik der großen Wirbel. Anzumerken ist, dass sie keine Ensemble-Mittelwerte liefern, sondern viele Modellrechnungen oder mindestens zeitliche Mittelungen erforderlich sind, um dem Ergebnis Reynolds gemittelter Modelle vergleichbare mittlere Werte zu erzielen. Im Testfall von Cuxart et al. (2006) wird die strahlungsbedingte Abkühlung einer arktischen Grenzschicht untersucht. Die in der Studie verglichenen mesoskaligen Modelle werden mit einem bodennah gut durchmischten nachmittäglichen Temperaturprofil initialisiert. In der Folge wird die nächtliche Abkühlung durch Vorgabe einer fest vorgegebenen Abkühlungsrate für den Boden simuliert. Nach einer Integrationsdauer von 9 h wurden von Cuxart et al. (2006) die Ergebnisse der mesoskaligen Modelle miteinander verglichen und anhand der LES-Lösungen evaluiert (Abbildung 8 in Cuxart et al. 2006).

Der Vorteil des Testfalls von Cuxart et al. (2006) liegt darin, dass nicht nur die Eingangsdaten für die Simulation mit dem Grenzschichtmodell der Referenzimplementierung des Windfeldmodells vorliegen, sondern auch Eingangsdaten für die Parametrisierungen nach VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b). In der Veröffentlichung werden Ensemble-Mittelwerte der verschiedenen Modelllösungen für die diagnostischen Größen Schubspannungsgeschwindigkeit und Obukhov-Länge bereitgestellt. Die Ergebnisse für Windgeschwindigkeit und Windrichtung sind in Abbildung 10 für die analytische Lösung der Richtlinie („VDI-Turbana“, schwarz durchgezogene Linie), die numerische Lösung der Richtlinie („VDI-Turbnum“, schwarz gestrichelte Linie) und die Lösung „A2K“ der Turbulenzrichtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2002; grau kurz gestrichelt) dargestellt. Zusätzlich sind Ergebnisse mit zwei verschiedenen Turbulenzparametrisierungen in METRAS dargestellt. Der Ansatz Luepkes/Schlünzen (rote Linie) nutzt eine Schließung 1. Ordnung mit Mischungswegansatz bei stabiler Schichtung; dieser Ansatz wird auch in METRAS-PCL genutzt. Zusätzlich sind in Abbildung 10 in blau die Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bei Nutzung einer Schließung 1.5 Ordnung mit Prandtl-Kolmogorov-Ansatz in METRAS, also einer prognostischen Gleichung für die turbulente kinetische Energie dargestellt. Die grüne Linie in Abbildung 10 entspricht der numerischen Lösung der Richtlinie, nur sind die Eingangsdaten nicht an Cuxart et al. (2006) angelehnt, sondern an die Modellausgaben von METRAS. Die zugehörigen turbulenten Diffusionskoeffizienten sind in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 10: Grenzschichtprofile der Windgeschwindigkeit (links) und der Windrichtung (rechts) von METRAS-PCL mit den Lösungen nach VDI 3783 Blatt für den Testfall von Cuxart et al. (2006)



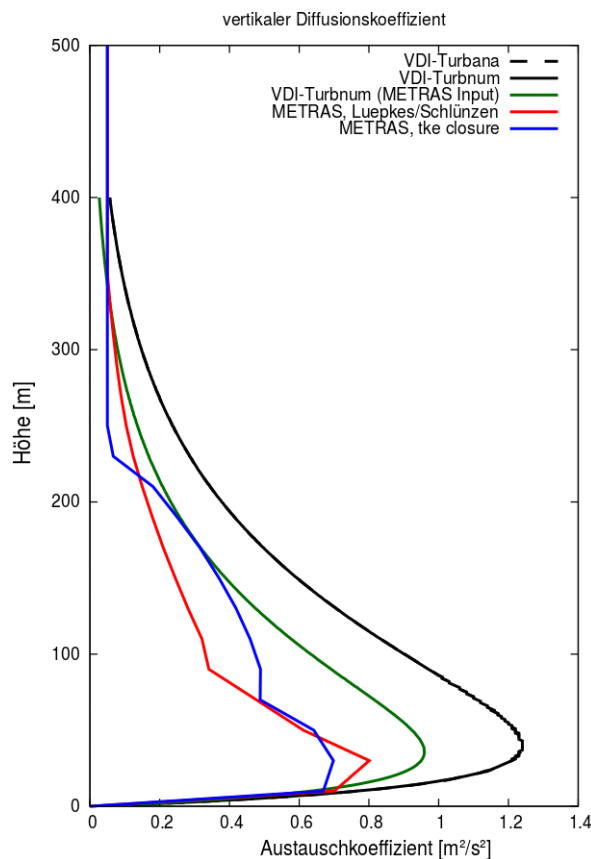
Quelle: Universität Hamburg

Die Ergebnisse des Testfalls zeigen, dass die numerische und die analytische Lösung der Richtlinie wesentlich besser mit dem von METRAS simulierten Grenzschichtprofil übereinstimmt, als dies für den Parametrisierungsansatz der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI (2002), Bezeichnung „A2K“) der Fall ist. Wird der Wind mit zunehmender Höhe im Ansatz „A2K“ immer stärker, so zeigen die neuen Ansätze

ze (schwarze Linien) eine Zunahme der Windgeschwindigkeit bis in etwa 200 m mit einer leichten Abnahme darüber. Das „Überschießen“ der Strömung im Niveau um 200 m wird im numerischen Ansatz gut wieder gegeben (schwarze durchgezogene Linie). Oberhalb der Inversionshöhe werden allerdings in den Parametrisierungsansätzen der Richtlinien (VDI 2017b) höhere Windgeschwindigkeiten erreicht als in METRAS, die in VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) übergeostrophisch sind (vorgegebener geostrophischer Wind von 8 m/s).

Als Referenzprofil gelten die aus LES-Modellen generierten Daten, welche in Abbildung 8 der Veröffentlichung von Cuxart et al. (2006) visualisiert sind. Sie zeigen oberhalb der Inversion in 220 m einen Rückgang der Windgeschwindigkeit auf den im Testfall festgelegten geostrophischen Wind von 8 m/s und Geschwindigkeitsüberhöhungen am oberen Rand der Grenzschicht (175 m) auf circa 8.5 m/s bis 10 m/s. Die Ergebnisse der Referenzimplementierung (METRAS-PCL nutzt Schließung Lüpkes/Schlünzen) stimmen hiermit sehr gut überein.

Abbildung 11: Vergleich der Profile des Diffusionskoeffizienten für den Testfall von Cuxart et al. (2006)



Quelle: Universität Hamburg

Die bei stabiler Schichtung auftretende starke Winddrehung wird insbesondere vom numerischen Parametrisierungsansatz „VDI-Turbnum“ wiedergegeben und ähnelt der Lösung des Windfeldmodells. Der Ansatz „A2K“ unterscheidet sich deutlich von der METRAS-PCL Lösung und weist insbesondere nicht das für die Ekman-Spirale charakteristische Rückdrehen oberhalb der Grenzschicht auf, d. h. eine relativ zur geostrophischen Windrichtung negative Abweichung geht über einen geringen Höhenbereich in eine positive Abweichung über; darüber entspricht die Windrichtung der geostrophischen. Diese Profile der Windrichtung sind allerdings nicht berechnet, sondern für „A2K“ in TA Luft (2002) zusätzlich vorgeschrieben und von dort übernommen worden.

Die Vertikalprofile der turbulenten Diffusionskoeffizienten (Abbildung 11) weisen bei der METRAS-Lösung dieselben Charakteristika auf (Linien in rot und blau) wie bei den Parametrisierungsansätzen

nach VDI 3783 Blatt 8 (schwarze Linien), d. h. turbulente vertikale Austauschprozesse bleiben auf wenige hundert Meter über Grund beschränkt und sind nur unterhalb der Temperaturinversion vorzufinden. Allerdings unterscheiden sich die Diffusionskoeffizienten um bis zu einen Faktor 2. Zudem scheint das Profil aus METRAS eckig. Dieser optische Eindruck entsteht durch die lineare Verbindung der Werte an den wenigen Gitterpunkten in METRAS, die in dieser Modellanwendung verwendet worden sind. Für die METRAS Simulationen ist bis in 250 m über Grund ein äquidistantes Gitter von 20 m verwendet worden, so dass bodennah die typischerweise in Anwendungen genutzte Vertikalstruktur verwendet wird.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Ansätzen fallen geringer aus, wenn als Eingangsdaten für den numerischen und analytischen Ansatz nicht die in Cuxart et al. (2006) gegebenen gemittelten Werte für Schubspannungsgeschwindigkeit und Obukhov-Länge verwendet werden, sondern die diagnostisch ermittelten Größen von METRAS zur Initialisierung von VDI (2017b) genutzt werden. Die Unterschiede zur Lösung der Referenzimplementierung METRAS mit Luepkes/Schlunzen (rote Linien) sind geringer. Insbesondere nimmt der Wind oberhalb der Inversionshöhe (grüne Linien, Abbildung 11) den im Testfall festgelegten geostrophischen Wind von 8 m/s an. Allerdings ist die Geschwindigkeitsüberhöhung im Niveau um 200 m schwächer ausgeprägt. Darüber hinaus sind die Unterschiede in den Diffusionskoeffizienten geringer (grüne Linien, Abbildung 12).

Der Testfall von Cuxart et al. (2006) macht deutlich, dass die Richtlinienparametrisierungen in VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) in Bezug auf stabile Grenzschichten wesentlich näher an der Lösung des Windfeldmodells der Referenzimplementierung und den Referenzlösungen der LES-Modelle liegen als die Parametrisierung „A2K“. Darüber hinaus kann die Referenzimplementierung des Windfeldmodells ein Windgeschwindigkeitsprofil simulieren, das im Bereich der durch die LES-Modelle vorgegebenen Spannbreiten liegt.

4.4 Untersuchungen zur Harmonisierung der Profile

Wie in Abschnitt 4.3 dargestellt, lässt sich eine gute Übereinstimmung zwischen METRAS Windfeld und den Profilen aus VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) erreichen, wenn die jeweiligen Eingangsdaten aufeinander abgestimmt sind. Im Falle des Cuxart et al. (2006) Testfalls sind die Eingangsdaten für das Windfeldmodell wohldefiniert, d. h. das Profil der Temperatur, der Feuchtigkeit und ein reibungsunbeeinflusster und ungestörter Wind oberhalb der Grenzschicht sind vorgegeben. Die Eingangsdaten für die Turbulenzparametrisierungen wurden dann den diagnostischen Ausgaben des Windfeldmodells (hier METRAS) entnommen. Dieses bezieht sich auf die Werte für die Schubspannungsgeschwindigkeit, die Obukhov-Länge und die Rauigkeitslänge. In der Praxis der Ausbreitungsmodellierung nach TA Luft ist eine gute Übereinstimmung zwischen Profilen eines prognostischen mesoskaligen Windfeldmodells mit Profilen aus der Turbulenzparametrisierung von VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) von großer Bedeutung. Stimmen die Profile im idealisierten Fall überein, entsprechen die im Ausbreitungsmodell verwendeten Windprofile in etwa denen eines ausbalancierten, idealisiert rechnenden Windfeldmodells. Anderenfalls würden bei Verwendung von Windfeldern aus prognostischen mesoskaligen Modellen im vom idealen Fall im Rahmen einer Ausbreitungsrechnung Inkonsistenzen auftreten.

Die im Cuxart et al. (2006) Testfall skizzierte Verfahrensweise zur Berechnung des gesamten Grenzschichtprofils ist nicht praktikabel, denn die thermodynamische Schichtung der gesamten Grenzschicht ist oft nicht bekannt bzw. müsste geschätzt werden. Aus diesem Grund beziehen sich die Untersuchungen zur Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) darauf, dass ein turbulentes Profil der atmosphärischen Grenzschicht auf Grundlage weniger bodennah gemessener Parameter abgeleitet werden kann. Damit stellt sich allerdings das Problem, dass zum Zwecke der Harmonisierung von Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) und Windfeldmodell gemäß VDI (2017a) ein Verfahren vorhanden sein müsste, welches den Eingangsparametern der VDI Turbulenzparametrisierung (VDI 2017b) ent-

sprechende Eingangsparameter unter Einschluss von Profilen für die mesoskaligen Windfeldmodelle (VDI 2017a) zuordnet.

In diesem Zusammenhang sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Ansätze der Turbulenzparametrisierungen und damit die Eingangsgrößen nicht auf die Referenzimplementierung METRAS-PCL übertragen werden können, weil eine Reihe physikalischer Prozesse unberücksichtigt bleibt, die jedoch für mesoskalige Simulationen unabdingbar sind: Einflüsse steilen Geländes, variable Temperaturschichtung der Atmosphäre, nichtlokale Effekte der Turbulenz bei labilen Schichtungen, inhomogene Landnutzung, subskalige Oberflächenbedeckung, instationäre Prozesse, usw.

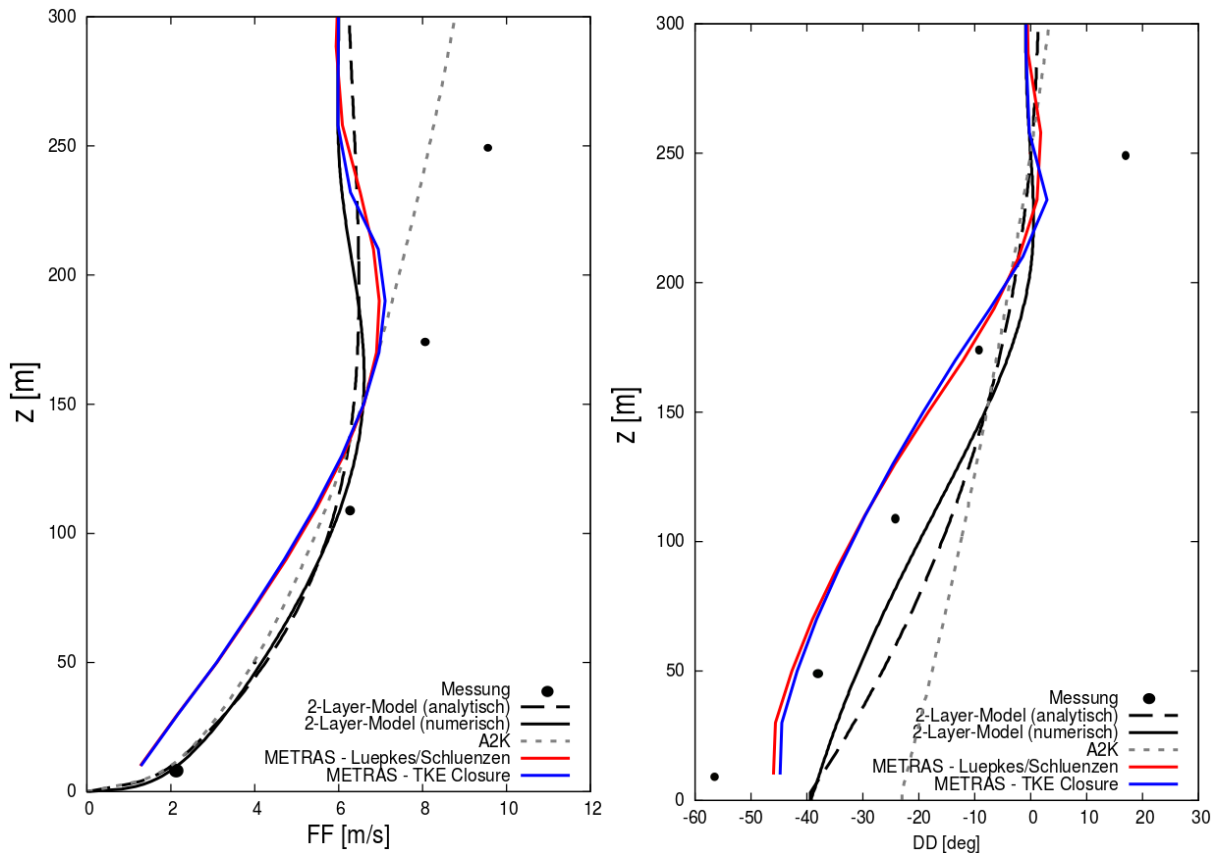
4.4.1 Harmonisierung nach VDI Blatt 16

In einem ersten Schritt zur Harmonisierung wurde für Messdaten des Hamburger Wettermasts (Lange 2011) überprüft, inwiefern für bestimmte Ausbreitungsklassen (Klug-Manier) aufeinander abgestimmte Eingangsdaten zu denselben Profilen mit den Turbulenzparametrisierungen nach VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) und den Turbulenzparametrisierungen im Windfeldmodell (METRAS) führen. Um die Eingangsparameter aufeinander abzustimmen, wurden Werte für den geostrophischen Wind und das Temperaturprofil an die des damaligen Entwurfs der Richtlinie VDI 3783 Blatt 16 (Tabelle 1, VDI 2016a) angelehnt (sogenannte „Turb-Blatt16“-Methode), um die Berechnungen mit METRAS zu initialisieren. Im Rahmen der Ausarbeitung von Blatt 16 wurden von der Arbeitsgruppe die Re-Analysen des National Centers for Environmental Prediction (NCEP) in Bezug auf die verschiedenen Ausbreitungsklassen ausgewertet, indem die NCEP-Temperaturprofile von der Oberfläche bis einige Hundert Meter Höhe gemittelt und der ungestörte, reibungsunbeeinflusste Wind extrahiert wurden.

Für jede Ausbreitungsklasse wurde ein Profil mit dem Modell METRAS wie auch mit der Turbulenzparametrisierung nach VDI 3783 Blatt 8 berechnet, wobei für letztere die Obukhov-Länge der Tabelle 4 aus VDI (2017b) und die Schubspannungsgeschwindigkeiten den Messungen von Lange (2011) entnommen sind. Die Ergebnisse für die analytische Lösung „VDI-Turbana“ (durchgezogene schwarze Linie), die numerische Lösung „VDI-Turbnum“ (gestrichelte schwarze Linie), die Lösung „A2K“ der Turbulenzrichtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2002; schwarz kurz gestrichelt) und METRAS mit zwei verschiedenen Turbulenzparametrisierungen (rot: Schließung 1. Ordnung mit Mischungswegansatz – gleiche Schließung wie METRAS-PCL; blau: Schließung 1.5 Ordnung mit Prandtl-Kolmogorov-Ansatz, also prognostischer Gleichung für die turbulente kinetische Energie) sind zusammen mit den gemittelten Messungen des Hamburger Wettermastes (rote Punkte) aus Sektor B (Windrichtungen aus dem Südsektor von 130° bis 220°) in Abbildung 12 für die Stabilitätsklasse IIN dargestellt.

Der Vergleich der Windprofile macht deutlich, dass der Harmonisierungsansatz „Turb-Blatt16“ für die Erstellung der METRAS-Eingangsparameter nur eingeschränkt geeignet ist, denn die Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen der komplexen Windfeldmodelle (METRAS mit 2 verschiedenen Parametrisierungen) und den Ansätzen nach VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) sind vor allem in der Form des Profils groß. Außerdem wird durch den Vergleich deutlich, dass Modelle und Messungen nicht konsistent zueinander sind. Insbesondere die Abschätzung des geostrophischen Windes aus der VDI Turbulenzparametrisierung (VDI 2017b) verfehlt die Wirklichkeit. Höchstwahrscheinlich würde eine realitätsnahe Vorgabe der geostrophischen Windverhältnisse in METRAS zu einem realitätsnäheren Windgeschwindigkeitsprofil führen (das Profil skaliert bei neutraler Schichtung mit der Windgeschwindigkeit). Nichtsdestotrotz bleibt festzuhalten, dass Unterschiede zwischen den turbulenten Windprofilen auf Grund der für die unterschiedlichen Parametrisierungen unterschiedlichen Eingabegrößen unvermeidlich sind.

Abbildung 12: Grenzschichtprofile des Windfeldmodells und von VDI 3783 Blatt 8 mit Harmonisierungsansatz „Turb-Blatt16“



Quelle: Universität Hamburg

4.4.2 Möglichkeiten und Grenzen eines Präprozessor für das Windfeldmodell

Die Harmonisierung nach VDI 3783 Blatt 16 (Abschnitt 4.4.1) führt nicht zu überzeugenden Ergebnissen. Daher wird eine alternative Harmonisierung der Eingabedaten untersucht, die zu einer besseren Konsistenz zwischen den Ergebnissen des Windfeldmodells und denen aus der Turbulenzparametrisierung (VDI 2017b) führen soll. Die Harmonisierungsmethode wurde programmiertechnisch in FORTRAN 90 umgesetzt. Ein Ziel des Präprozessors „VDI-TurbPre“ war, die Ausgaben der VDI Turbulenzparametrisierung zu nutzen, um ein thermodynamisch konsistentes Eingabeprofil für prognostische mesoskalige Modelle zu berechnen. Die Methodik soll möglichst unabhängig vom mesoskaligen Windfeldmodell sein, wurde zunächst jedoch ausschließlich für das Modell METRAS und für ausgewählte Fälle entwickelt, um die Machbarkeit zu prüfen.

Die Harmonisierung basiert auf der Annahme, dass im unteren Bereich der Grenzschicht bis in wenige 100 m Höhe über Grund die Ähnlichkeitsbeziehungen der Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie angewendet werden können, um die thermodynamische Schichtung zu definieren. Auch wenn die Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie nur in der Prandtlschicht anwendbar ist, so ist diese Annahme gewählt worden, da VDI 3783 Blatt 8 nur bodennahe Werte vorgibt. Die schichtungsabhängigen Stabilitätsfunktion $\phi_h(z/L)$ (Gleichungen 10, 11) werden in Beziehung gesetzt zum potentiellen Temperaturgradienten mit der Skalierungsgröße θ_* , einem Parameter der den fühlbaren Wärmefluss am Boden mitbestimmt (Gleichung, 9). Die Stabilitätsfunktionen wie auch die von Karman Konstante κ sind anhand vielfacher Feldmessungen experimentell bestimmt worden und werden in der Literatur besprochen (u.a. Dyer 1974; Hicks 1976; Carson und Richards 1978; Högström 1996). In Anlehnung an die

Untersuchungen von Dyer (1974) und die in METRAS zur Anwendung kommenden physikalischen Parametrisierungen, werden für den Präprozessor die Stabilitätsfunktionen (9), (10) verwendet:

$$\phi_h\left(\frac{z}{L}\right) = \kappa z / \theta_* \cdot (\partial\theta/\partial z) \quad (9)$$

$$\phi_h\left(\frac{z}{L}\right) = 1 + 5 \frac{z}{L} \text{ für } 0 \leq \frac{z}{L} \leq 0.5 \quad (10)$$

$$\phi_h\left(\frac{z}{L}\right) = \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{-0.5} \text{ für } -1 \leq \frac{z}{L} \leq 0 \quad (11)$$

Das Profil der potentiellen Temperatur kann demnach durch Integration der Gleichung (9) und unter Verwendung der Stabilitätsfunktionen in (10, 11) gewonnen werden. Dabei wird die Skalierungsgröße θ_* durch die in der VDI Turbulenzparametrisierung vorzugebenen Größen Obukhov-Länge L (Gleichung 12) und Schubspannungsgeschwindigkeit u_* definiert. Die Obukhov-Länge ist ein Stabilitätsmaß, welches als Verhältnis von mechanisch und thermisch erzeugter Turbulenz berechnet wird:

$$L = \theta_0 u_*^2 / (\kappa g \theta_*) \quad (12)$$

In feuchter Luft muss der Einfluss der Feuchte berücksichtigt werden. In Gleichung (12) bezeichnet θ_0 die bodennahe potentielle Temperatur. Für alle Stabilitätsbetrachtungen muss immer die dimensionslose Kennzahl z/L genutzt werden, also entsprechend Gleichung (12) berechnet werden als $z/L = \kappa z g \theta_* / (\theta_0 u_*^2)$.

Streng genommen darf die MOS-Theorie nur in der bodennahen Prandtl-Schicht angewendet werden, also bis in eine Höhe von etwa 10 % der Grenzschichthöhe. Bis in diese Höhe sind die MOS-Annahmen erfüllt. Das Ableiten der Temperaturprofile oberhalb der Prandtl-Schicht müsste mit anderen Methoden und unter Berücksichtigung der Winddrehung mit der Höhe sowie der dort lokal vorhandenen atmosphärischen Schichtung erfolgen. Durch die VDI Turbulenzparametrisierung wird eine einheitliche Stabilitätsklasse bis in größere Höhe angenommen, also ein mit der Höhe zunehmendes z/L . Diese Annahme wird wie erwähnt auch im Präprozessor „VDI-TurbPre“ verwendet.

Die Integration von Gleichung (9) erfolgt im Präprozessor numerisch, um auch höhenabhängige Schichtungen zulassen zu können. Sonst hätten die Profildfunktionen verwendet werden können (z.B. Gleichung (3.13) und Gleichung (3.18) in Schlünzen et al. 2012a). Zwei verschiedene Verfahren sind für die numerische Integration implementiert und getestet worden. Zum einen ist die Composite Bool's Rule (Abramowitz et al. 1988) verwendet worden. Sie approximiert das Integral der Funktion $f(z)$ durch eine Newton-Cotes ähnliche Formel, wobei das Intervall $[z_a, z_b]$ in M gleich große Teilintervalle zerlegt wird (Composite-Technik) und in jeden Teilintervall $[z_k, z_{k+1}]$ gleichmäßig verteilte Stützstellen der Anzahl $N_z = 5$ für die Näherung verwendet werden. Das zweite implementierte Integrationsverfahren greift auf die Methode der Gauß-Quadratur zurück; die Stützstellen in den Teilintervallen sind nicht mehr gleichmäßig verteilt. Bei Integration einer Funktion $f(z)$ werden fünf Stützstellen und zugehörige Gewichte verwendet. Durch die Unterteilung in Teilintervalle wird die Genauigkeit insbesondere bodennah erhöht. Schließlich bestimmen die bodennahen Gradienten entscheidend die Skalierungsgrößen θ_* , q_* , u_* und damit den Verlauf des gesamten Grenzschichtprofils. Das 5-Punkt-Gauß-Verfahren wird standardmäßig zur Integration im Präprozessor verwendet.

Bei der Integration von Gleichung (9) kann es in den Luftschichten oberhalb der Prandtlschicht vorkommen, dass die Stabilitätsfunktionen aufgrund zu großer Werte für z/L ihre Gültigkeit verlieren. Um dieses Problem zu umgehen, wäre ein Ansatz mit veränderlichem z/L erforderlich, der die lokale Stabilität berücksichtigt. Das würde allerdings der MOS Theorie widersprechen, da L als eine (höhen-unabhängige) Skalierungsgröße für die bodennahe Grenzschicht angenommen wird. Zudem würde die Höhenabhängigkeit den Voraussetzungen von VDI (2017b) widersprechen. Alternativ könnten Stabilitätsfunktionen verwendet werden, die auch für sehr stabile Schichtungen gelten, d.h. für $z/L > 0.5$.

Diese sind beispielsweise in der Richtlinie (VDI 2017b, Abschnitt 6) angegeben. Danach müsste bei sehr stabilen Verhältnissen schichtweise in die Höhe integriert werden, bodennah unter Verwendung der Stabilitätsfunktionen für stabile Schichtungen und darüber für stark-stabile Schichtungen. Für den Präprozessor wurde davon abgesehen, weitere Stabilitätsfunktionen einzuführen, da in METRAS nur eine maximale Stabilität bis $z/L = 0.5$ aufgrund der verwendeten Stabilitätsfunktionen zugelassen ist und die Ähnlichkeitstheorie einschließlich der Stabilitätsfunktionen nur zur Berechnung der Skalierungsgrößen θ_* , q_* , u_* in der untersten Modellschicht verwendet werden. Darüber wird ein Mischungswegansatz verwendet (Tabelle 4). Bei bodennah labiler Schichtung wird der Counter-Gradient Ansatz genutzt. Im Modell werden zur Berechnung der Skalierungsgrößen der Horizontalwind und die thermodynamischen Größen in einer Höhe von 10 m über Grund verwendet. Über die angemerkten Unterschiede hinaus ergaben sich in ersten Untersuchungen kaum Unterschiede zwischen den Rechenwerten für die potentielle Temperatur bei Verwendung der Standard-Profilfunktion für stabile Schichtung (Gleichungen 9, 10) und den erweiterten Funktionen des VDI (2017b). Im Falle sehr stabiler Schichtung sind die Inversionshöhen sehr gering (unterhalb 100 m); so liefert die numerische Lösung des VDI Ansatzes bei Stabilitätsklasse I-N eine Mischungsschichthöhe von 60 m (Abbildung 14).

Von größerer Bedeutung als die Verwendung zusätzlicher Stabilitätsfunktionen ist im oberen Teil der Grenzschicht der Übergang des Temperaturprofils zu einer Schichtung ähnlich der Standardatmosphäre, welche grundsätzlich zu beobachten ist. Diese wird im Präprozessor stabilitätsabhängig berücksichtigt. Die mit der numerischen Integration ermittelten Gradienten werden vom Präprozessor unter folgenden Bedingungen korrigiert:

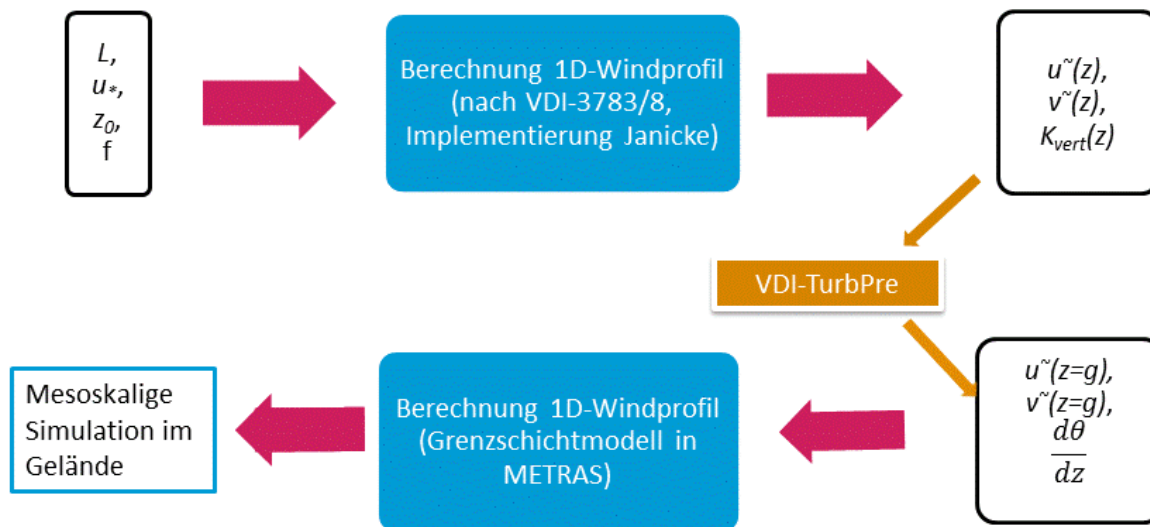
- ▶ Für stabile Schichtung ($L > 0$) wird die numerische Integration nur bis zur zweifachen Obukhov-Länge durchgeführt. Darüber wird vom Präprozessor der Gradient einer Standardatmosphäre verwendet (0.0035 K/m).
- ▶ Für neutrale Schichtung, d. h. $|z/L| \approx 0$, erfolgt die numerische Integration bis 1000 m und darüber wird der Gradient $\partial\theta/\partial z = 0.0035$ K/m angenommen.
- ▶ Für labile Schichtung ($L < 0$) wird die numerische Integration nur in den untersten 100 m über Grund vorgenommen. Darüber wird eine überadiabatische Schichtung als realitätsfern angesehen und durch eine gut durchmischte Grenzschicht, d.h. eine neutrale Schichtung, ersetzt. Ab einer Höhe von etwa 1000 m erfolgt der Übergang zu einer Standard-Atmosphäre (0.0035 K/m).

Der gesamte Prozess der Harmonisierung ist schematisch Abbildung 13 zu entnehmen. Als erster Schritt erfolgt die Berechnung der Grenzschichtprofile nach der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 mit dem Programm „VDI-Turbnum“ auf Grundlage der vier Eingangsparameter Obukhov-Länge L , Schubspannungsgeschwindigkeit u_* , Rauigkeitslänge z_0 und Coriolisparameter f . Als Ergebnis wird ein Grenzschichtprofil konform mit Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) ausgegeben: die Geschwindigkeitskomponenten des horizontalen Windes $u^{\sim}(z)$, $v^{\sim}(z)$ und die vertikalen Diffusionskoeffizienten $K_{vert}(z)$.

Im nächsten Schritt wird der Präprozessor „VDI-TurbPre“ (Abbildung 13) mit den folgenden Eingabeparametern verwendet:

- ▶ Temperatur nahe des Erdbodens (T_s) in der Einheit K,
- ▶ Luftdruck nahe des Erdbodens (p_s) in der Einheit Pa,
- ▶ die für die numerische VDI Lösung verwendete Obukhov-Länge (L) in der Einheit m,
- ▶ die für die numerische VDI Lösung verwendete Schubspannungsgeschwindigkeit (u_*) in der Einheit m/s, und
- ▶ die für die numerische VDI Lösung verwendete Rauigkeitslänge (z_0) in der Einheit m.

Abbildung 13: Schema der Harmonisierungsmethode „VDI-TurbPre“



Quelle: Universität Hamburg

Als Ausgabe liefert der Präprozessor ein Profil der potentiellen Temperatur. Dieses Profil wird zusammen mit der im Präprozessor verwendeten Bodentemperatur, T_s , und der vom Programm „VDI-Turbnum“ im größten Höhenniveau $z = g$) ausgegebenen Komponenten des Windvektors ($u^{\sim}(z = g)$, $v^{\sim}(z = g)$) als Eingabedaten in METRAS verwendet. Der errechnete Gradient der potentiellen Temperatur entspricht einer Schichtung, welche durch die Vorgaben der konstanten Obukhov-Länge mit den oben genannten Anpassungen und der Schubspannungsgeschwindigkeit zu erwarten wäre. Der Wind im größten Höhenniveau wird als höhenkonstanter reibungsfreier Wind (geostrophischer Wind) angenommen.

Über die Initialisierung von METRAS wird zunächst ein hydrostatisch ausbalanciertes, horizontal homogenes, turbulentes Windprofil bestimmt. Dieses balancierte turbulente Windprofil ist dann die Grundlage für dreidimensionale, zeitabhängige Simulationen in topographisch heterogenem und gegliedertem Gelände.

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Harmonisierungsmethode mit dem zugehörigen Präprozessor „VDI-TurbPre“ erzielt eine sehr gute Konsistenz zwischen den Ergebnissen des Windfeldmodells und denen der VDI Turbulenzparametrisierung (VDI 2017b). Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4.4.3 vorgestellt.

4.4.3 Ergebnisse von „VDI-TurbPre“

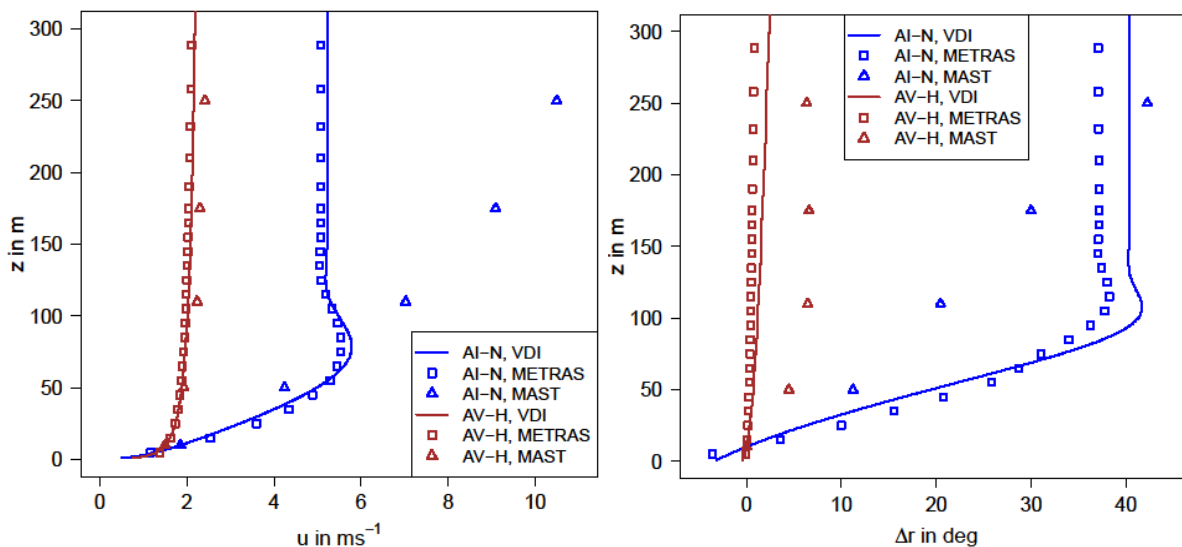
Die Methode „VDI-TurbPre“ wurde wie die Methode „Turb-Blatt16“ anhand des Testfalls „Hamburger Wettermast“ validiert und verifiziert. Lange (2011) untersuchte die Beschaffenheit der atmosphärischen Grenzschicht in Abhängigkeit von der Stabilität (Anlehnung an die Klug- Manier-Klassen) anhand eines mehr als 15 Jahre langen Datensatzes. Für den hier diskutierten Vergleich werden allerdings nur Daten aus dem Sektor A des Wettermastes verwendet (Anströmung: 40° – 130° „Ländliche Gegend“), um Beeinflussungen komplexer und heterogener Oberflächen auf das Windprofil möglichst auszuschließen. Aus den Messreihen wurden jene Stundenprofile extrahiert, welche die folgenden Kriterien erfüllen:

1. Klug-Manier-Klasse V in 10 m über Grund und Klug-Manier-Klasse IV oder V in den Höhen darüber (stark labile Fälle mit hoher Grenzschicht),
2. Klug-Manier-Klasse I in 10 m über Grund und Klug-Manier-Klasse I oder II in den Höhen darüber (stark stabile Fälle mit niedriger Grenzschicht).

Für die so gefilterten stark labilen und stark stabilen stündlichen Profile wurden von Lange zusätzlich die Schubspannungsgeschwindigkeiten bestimmt. Als Rauigkeitslänge wird der für den Sektor A ermittelte Wert von 0.2 m und als Obukhov-Länge das harmonische Mittel der Klasse I und II ($L = 28$ m) bzw. V und VI ($L = -28$ m) verwendet. Die mit der VDI Turbulenzparametrisierung ermittelte Lösung wird mit den Messungen am Wettermast und mit den Ergebnissen durch die Grenzschichtparametrisierung in METRAS verglichen, wobei eine Harmonisierung nach dem Schema „VDI-TurbPre“ (Abbildung 13) erfolgt.

Die Profile der Windgeschwindigkeit und -richtung sind in Abbildung 14 für die Stabilitätsklasse I-N (blau) und V-H (rot) dargestellt. Die Messungen sind als Dreiecke, die numerische Lösung der VDI Turbulenzparametrisierung als durchgezogene Linie und die Lösung von METRAS als Rechtecke gekennzeichnet. Eine Normierung auf die am Mast gemessene Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und auf die in 10 m Höhe gemessene Windrichtung wurde durchgeführt. Die numerische VDI Lösung weist bei der Windgeschwindigkeit kaum Unterschiede zum Windfeldmodell METRAS auf. Die Charakteristiken beider Lösungen sind gleich. Die Mischungsschicht ist allerdings mit ca. 60 Metern zu niedrig, um sie noch ausreichend mit dem in METRAS verwendeten vertikalen Gitter aufzulösen. So liegt der unterste Modellgitterpunkt schon oberhalb der vom numerischen Lösungsverfahren bestimmten Prandtlschicht. Außerdem ist die Anwendung der Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie für solche stark stabilen Verhältnisse eher grenzwertig ($z/L \approx 0.5$, Högström 1996).

Abbildung 14: Vergleich von Windfeldmodell mit Harmonisierungsansatz „VDI-TurbPre“, VDI 3783 Blatt 8 und Naturdaten

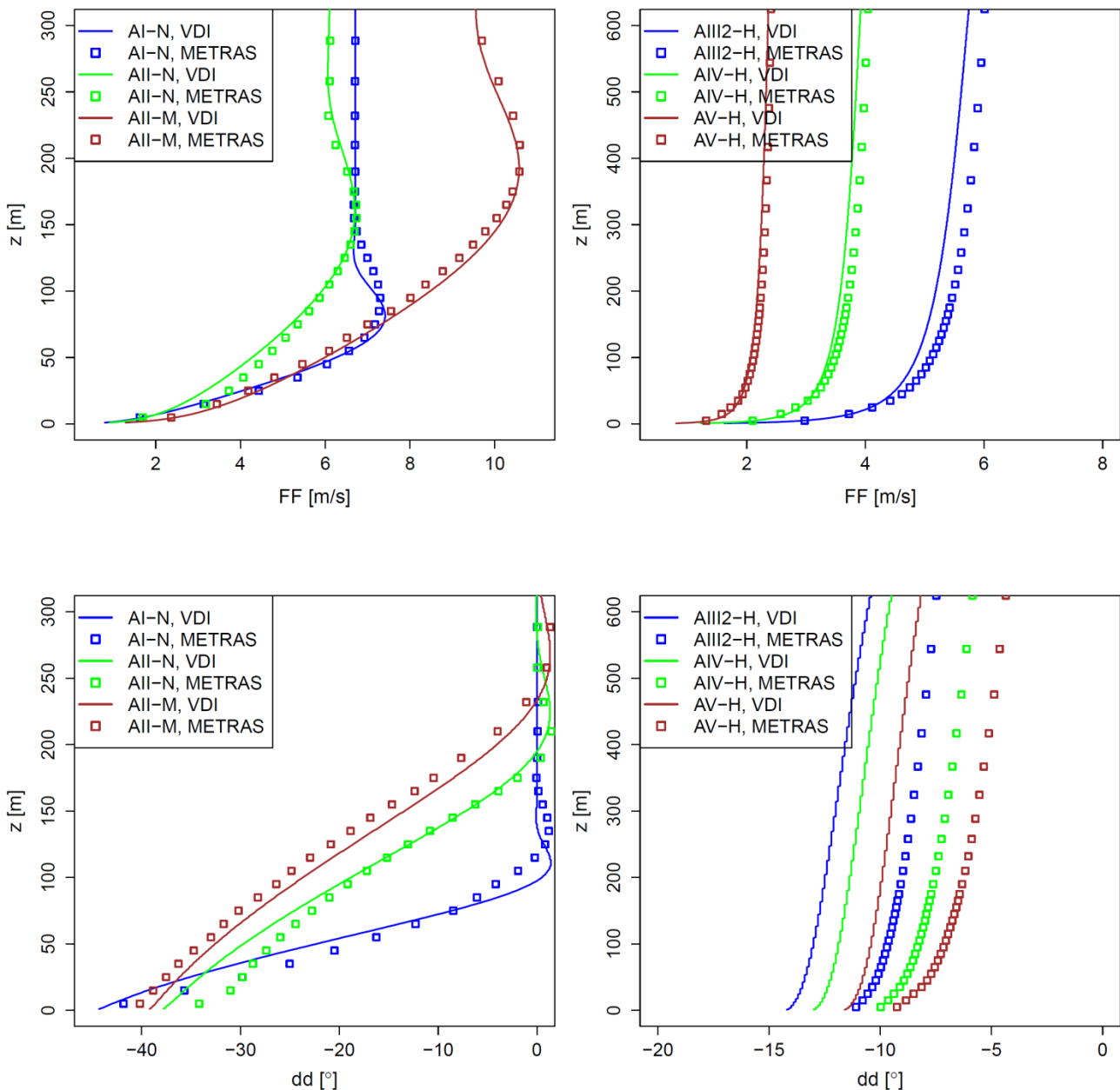


Quelle: Universität Hamburg

Ergänzend sind für den Sektor A des Wettermastes auch die Windprofile für die Stabilitätsklassen zwischen „stark labil“ und „stark stabil“ (Klug-Manier) untersucht worden. Die atmosphärischen Bedingungen reichen von niedrigen Grenzschichthöhen ($z_i < 260$ m, Kennzeichnung „N“), über mittlere Grenzschichthöhen (Kennzeichnung „M“, $260 < z_i < 790$ m) bis hin zu großen Grenzschichthöhen $z_i > 790$ m („H“). Die jeweiligen Lösungen der VDI Turbulenzparametrisierung (durchgezogene Linien) und des Windfeldmodells METRAS mit harmonisierten Eingangsdaten (Methode „VDI-TurbPre“; Rechtecke) sind in Abbildung 15 gezeigt. Die Profile für Windgeschwindigkeiten (links in Abbildung 15) und auch Windrichtungen (rechts in Abbildung 15) sind recht ähnlich. Die errechneten Lösungen beider Ansätze weisen dieselben Charakteristika auf. Abweichungen im Bereich weniger Grad ergeben sich in der Windrichtung bei den stark labilen Klassen (III2-H, IV-H und V-H). Als Grund können die

unterschiedlichen Parametrisierungsansätze für die vertikalen Diffusionskoeffizienten, unterschiedliche Modellgitter und die verwendeten Profelfunktionen angeführt werden. Abweichungen von wenigen Grad sollten allerdings im Falle gutachterlicher Anwendungen kaum ins Gewicht fallen. In Anbetracht der Unterschiede in den Turbulenzparametrisierungen ist dieses Ergebnis ein bemerkenswerter Erfolg in der Harmonisierung der Eingabedaten.

Abbildung 15: Ergebnisse der Windprofile für Windfeldmodell und „VDI-TurbPre“ für Klug-Manier-Klassen I-N, II-N, II-M, III2-H, IV-H und V-H



Quelle: Universität Hamburg

Der Vergleich der Profile lässt den Schluss zu, dass sich bei hinreichender Harmonisierung der Eingangsdaten nach der Methode „VDI-TurbPre“ ein relativ harmonischer Übergang zwischen den Grenzschichtprofilen dieser Richtlinie und denen mesoskaliger prognostischer Modelle erzielen lässt. Die Harmonisierung beruht auf einer erfolgreichen Konvertierung von der Obukhov-Länge hin zu den Gradienten der potentiellen Temperatur. Weiter lässt sich schlussfolgern, dass die Profile für die Klasse „stark labil“ (rote Linien und Symbole in Abbildung 14) eine gute Übereinstimmung zwischen den

Naturdaten und den Modellen zeigen. Bezüglich der „stark stabilen“ Profile (blaue in Abbildung 14) werden größere Differenzen zwischen Messung und Modellen sichtbar: die starke Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe wird nur abgeschwächt wiedergegeben, ein Überschießen der Strömung wird nur in den Modellen aufgelöst und die Windrichtungsänderung weist eine andere Charakteristik auf. Allerdings ist die hier den numerischen Lösungen zugrundeliegende Annahme einer vertikal gleich geschichteten Grenzschicht in der Atmosphäre selten vorzufinden. Bei stark durchmischter Grenzschicht ist dies viel realistischer. An dieser Stelle sei auf die weiterführenden Diskussionen in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (VDI 2017b) verwiesen.

4.4.4 Übergang von stabiler zu neutraler Schichtung

Die Untersuchungen in Bezug auf die Harmonisierung haben für die Stabilitätsklasse III1-M (neutrale Schichtung, $|z/L| \cong 0$) gezeigt, dass die Lösungen aus Windfeldmodell und VDI Turbulenzparametrisierung sich unterscheiden. Im Übergangsbereich zwischen stabiler und durchgehend neutraler Schichtung tritt in METRAS ein sprunghafter Lösungswechsel auf. Im Falle einer gerade noch stabilen Schichtung (0.00001 K/m) wird ein leicht stabiles Grenzschichtprofil mit einer vertikal etwa 300 m mächtigen Grenzschicht simuliert, wohingegen im Falle einer neutralen Schichtung (<0.00001 K/m) eine leicht labile, gut durchmischte Grenzschicht mit einem bodennah nahezu logarithmischen Windprofil simuliert wird. Die Ursachen des sprunghaften Übergangs liegen im Feuchteinfluss und im Einsatz nichtlokaler Schließungen in der Turbulenzparametrisierung, welche bei bodennah labilen Schichtungen aktiv wird.

In einer Studie von Xu und Taylor (1997) wurde das turbulente Grenzschichtprofil für die neutrale Schichtung untersucht. Die Studie bestätigt die Charakteristik eines eher logarithmischen Windprofils bei Simulation mit einem LES-Modell; eine sehr schwach ausgeprägte Geschwindigkeitsüberhöhung ist noch vorhanden (Abbildung 3 in der Veröffentlichung von Xu und Taylor 1997). Ob sich die Windprofilcharakteristik im Übergangsbereich zu den sehr schwach stabilen Schichtungen sprunghaft ändert, konnte den bisherigen Literaturstudien nicht entnommen werden. Jedoch wurde von Xu und Taylor (1997) festgestellt, dass das Verändern der maximalen Mischungsweglänge in den Turbulenzschließungskonzepten einen großen Einfluss auf die Charakteristik des Windprofils bei neutraler Schichtung hat. Somit fungiert dieser Parameter als Tuninggröße im Grenzbereich neutraler Schichtungen.

4.4.5 Möglichkeiten und Grenzen der Harmonisierung

Mit dem Präprozessor „VDI-TurbPre“ sind die Ergebnisse der numerischen Lösung nach VDI 3783 Blatt 8 und von METRAS für fast alle Schichtungen recht ähnlich. Bei neutraler Schichtung (III-1M) ergeben sich Unterschiede, weil der Grenzbereich zwischen stabil und neutral erreicht wird. Die Berechnung der Profilkoeffizienten wechselt beim Schichtungswechsel und damit auch die Bestimmung der turbulenten Diffusionskoeffizienten. Weil in METRAS-PCL auch noch die Feuchtigkeitsschichtung und, bei bodennah instabiler Schichtung, nichtlokale Schließungsprozesse berücksichtigt werden, sind in diesem Grenzbereich deutliche Unterschiede zur numerischen Lösung von Blatt 8 vorhanden. Die Windprofile von METRAS sind charakteristisch der stabilen Schichtung ähnlich, während „VDI-TurbPre“ ein labiles Profil berechnet. Vergleiche mit der Literatur deuten auf den Charakter einer stabilen Schichtung.

Bisher ist das für den Präprozessor verwendete Verfahren nur für die durch den Wettermast vorgegebenen Spannbreiten getestet worden. Anzumerken ist zudem, dass im Präprozessor Feuchteeffekte vernachlässigt sind, die insbesondere bei neutraler Schichtung ($\partial\theta/\partial z = 0.0$ K/m) wie oben angemerkt zu einer labilen Schichtung führen. Für extremere Schichtungen (Abbildung 14, Abbildung 15) entsteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Ergebnissen, wenn die Eingabedaten sehr gut aneinander angepasst sind. Diese Übereinstimmungen sind besser als mit „Turb-Blatt16“ erzielbar (Abbildung 12).

Mit den Untersuchungen ist gezeigt, dass eine Harmonisierung beider Ansätze prinzipiell möglich ist. Bevor ein operationeller Einsatz möglich ist, sind weitere Analysen und Erweiterungen des Präprozessors und der darin enthaltenen Methoden nötig. Nicht überprüft werden konnte beispielsweise, inwiefern der Präprozessor mit dem Windfeldmodell ähnliche Ergebnisse wie VDI 3883 Blatt 8 bei Rauigkeiten liefert, die sich von denen am Wettermast Hamburg unterscheiden. Darüber hinaus sollte sichergestellt werden, dass der hier vorgestellte Präprozessor auch für andere mesoskalige Modelle einsetzbar ist. Schließlich muss auch die Feuchte der Luft in der Stabilitätsberechnung des Präprozessors Berücksichtigung finden.

Noch einmal sei hier auch erwähnt, dass die Verwendung der stark labilen Stabilitätsklassen IV-H und V-H in Turbulenzmodellen besonderer Behandlung bedarf, da die entsprechenden bodennahen Gradienten der Temperatur stark überadiabatisch sind. Diese Schichtung ist insbesondere nahe der Erdoberfläche möglich, für die gesamte Grenzschicht aber unrealistisch, da bei stark labiler Schichtung die Atmosphäre oberhalb der Prandtlschicht sehr gut durchmischt und innerhalb der Grenzschicht quasi ohne vertikale Gradienten nahezu neutral geschichtet ist. Untersuchungen im Rahmen der Arbeitsgruppe VDI 3783 Blatt 16 deuten darauf hin, dass derartige Überadiabaten beispielsweise in den Reanalysen der Globalmodelle nicht aufgelöst werden. Damit derartige Vermischungen in prognostischen mesoskaligen Windfeldmodellen realitätsnah modelliert werden, können beispielsweise Counter-Gradient Ansätze genutzt werden, wie z.B. in METRAS. Vergleiche mit Messungen haben ergeben, dass dann nicht nur Vertikalprofile sondern auch Mischungsschichthöhen realitätsnäher simuliert werden als mit anderen Turbulenzansätzen (Lüpkes und Schlünzen 1996).

5 Berücksichtigung detaillierter Oberflächendaten

Die subskaligen bodennahen turbulenten Flüsse werden in METRAS-PCL über die Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie berechnet. Innerhalb einer Oberflächenzelle können dabei mehrere Oberflächen- und Bewuchstypen vorkommen (z.B. Asphalt, Wasser, Bäume; Tabelle 5). Um deren Effekte in einer Gitterzelle zu berücksichtigen, werden die entstehenden subskaligen Flüsse gemittelt und das Blendhöhenkonzept (Claussen 1991) verwendet (von Salzen et al. 1996). Dieses Verfahren wird auch in der Referenzimplementierung des Windfeldmodells genutzt (Schlünzen et al. 2017). Damit die Informationen zu den subskaligen Oberflächenbedeckungen verfügbar sind, müssen dem Windfeldmodell (hier METRAS-PCL) detaillierte Oberflächenbedeckungsdaten bereit gestellt werden (Abschnitt 5.1). Diese werden aus Flächennutzungsdaten gewonnen, die in physikalisch relevante Materialeigenschaften überführt und neu gruppiert werden (Abschnitt 5.2). Auch Reliefdaten werden benötigt (Abschnitt 0). Um die Erstellung von Topographie-Dateien für METRAS-PCL zu vereinfachen, ist ein Programm hierfür erstellt worden (Abschnitt 5.4), das wie die Eingabedaten für die Gittererzeugung bereit gestellt wird (Abschnitt 6.4).

5.1 Oberflächenbedeckungsdaten in METRAS-PCL

In jeder Gitterzelle können beliebig viele Oberflächenbedeckungsklassen genutzt werden. Jede Gitterzelle muss zu 100 % mit Oberflächen bedeckt sein. Der minimale Anteil einer Oberflächenbedeckungsklasse beträgt 1 % pro Gitterzelle. In METRAS sind insgesamt 56 Oberflächenbedeckungsklassen verfügbar, davon 12 unterschiedliche Meereisklassen. Diese Oberflächenbedeckungsklassen werden METRAS-50-Klassen genannt. Da Meereisbedeckungen in den Landbedeckungsdaten für Deutschland nicht vorhanden sind, sind in den für METRAS-PCL genutzten Datensätzen insgesamt 44 Oberflächenbedeckungsklassen verfügbar (Tabelle 5). Die Klasse bezeichnet in Tabelle 5 die Nummer der Oberflächenbedeckungsklasse, wie sie bei der Zuweisung aus Flächennutzungsdaten verwendet wird (Abschnitt 5.2).

Tabelle 5: Oberflächenbedeckungsklassen METRAS-50 in METRAS-PCL

Klasse	Bezeichnung	Klasse	Bezeichnung
1000	Wasser (allgemein)	3138	Gras, lang
1100	Gewässer, frisch, stehend	3148	Gras, lang, nass
1222	Gewässer, frisch, fließend	3500	Anbaufläche/Ackerland
1300	Salzwasser	3830	Ackerland, bewässert
1411	Watt	3863	Ackerland, Sandboden
1600	Schnee und Eis	4102	Savanne, bewaldet
1810	Gletscher	4103	Savanne
2105	kahler Boden	4210	Heide
2106	Sand	4211	Heide, Sandboden
2107	Kies/Schotter	4314	Büsche, trockene Böden
2108	Fels	4340	Büsche, kurz
2122	Sanddünen mit Gras	5100	Laubwald, sommergrün
2123	Sanddünen mit wenig Vegetation	5200	Nadelwald
2220	Asphalt	5213	Nadelwald, nass
2230	Beton	5300	Mischwald
2240	Ziegel/Backstein/Pflaster	5358	Mischwald, trocken
2250	Stahl	5656	Mischwald, nass
2712	Sträucher, nass	5811	Wälder und Büsche
2715	kahler Boden, nass	6000	Städtisch geprägte Fläche
2911	Salzgrube	6005	städtische Fläche, Gebäude <11 m und umgebende versiegelte Flächen
3100	Gras, kurz	6006	städtische Fläche, Gebäude >11 m und umgebende versiegelte Flächen
3104	Gras, kurz, feucht	7010	Mischflächennutzung

Die Oberflächenbedeckungen unterscheiden sich in ihren Charakteristiken, die abgebildet werden über die Albedo A_0 , die thermische Diffusivität k_s , die thermische Leitfähigkeit ν_s , die Verfügbarkeit von Bodenwasser l_q , die Bodenwassersättigung W_k und die Rauigkeitslänge z_0 .

Die Werte für die verschiedenen Klassen sind in Tabelle 7 (Anhang 8.1) zu finden. Die oberflächennahen Flüsse werden dann unter Berücksichtigung der prozentualen Anteile der verschiedenen Oberflächenbedeckungsklassen in jeder Gitterzelle berechnet. Sehr geringe Flächenanteile sind vor allem dann sinnvoll zu berücksichtigen, wenn sie sich in ihren Charakteristiken erheblich von denen der anderen Klassen unterscheiden. Eine Differenzierung der Oberflächeneigenschaften erlaubt eine realitätsnähere Beschreibung der bodennahen physikalischen Prozesse, wenn die Flussmittelung verwendet wird (Schlünzen und Katzfey 2003). Diese wird in METRAS-PCL genutzt (Schlünzen et al. 2017).

5.2 Zuordnung der CLC Daten zu METRAS-50 Oberflächenbedeckungen

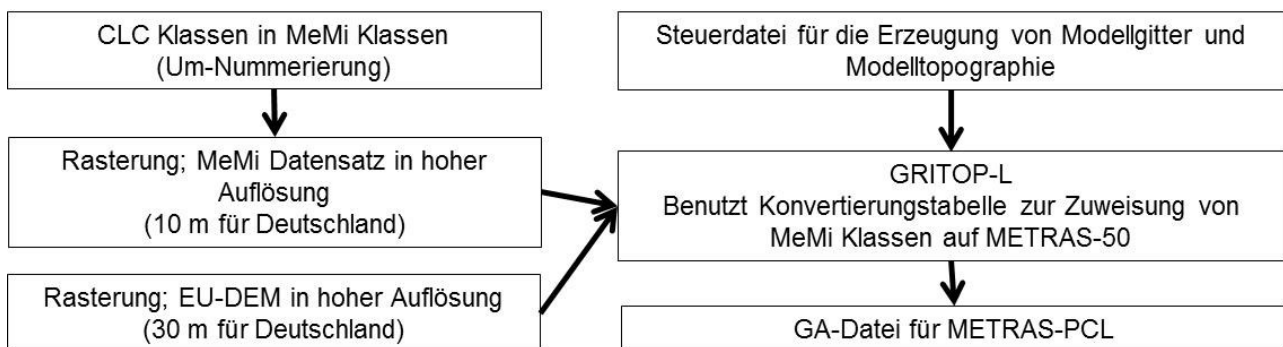
In METRAS-PCL werden wie in Abschnitt 5.1 ausgeführt die Eigenschaften unterschiedlicher Oberflächenbedeckungen berücksichtigt. Verfügbar sind aber normalerweise keine Oberflächenbedeckungsdaten sondern Flächennutzungsdaten. Diese müssen auf Oberflächenbedeckungen konvertiert wer-

den, um die Charakteristiken der Oberflächen in für meteorologische Berechnungen geeigneter Form berücksichtigen zu können. Ein EU-weit verfügbarer Flächennutzungs- und Oberflächenbedeckungsdatensatz ist der CORINE Landbedeckungsdatensatz, im Folgenden als CLC Daten bezeichnet. Die Konvertierung ermöglicht die Landnutzungsklassen der CLC-Daten (Büttner und Kosztra 2007) in die physikalisch-relevanten METRAS-50 Oberflächenbedeckungsklassen (Tabelle 5) zu überführen, die in METRAS verwendet werden.

5.2.1 CLC Daten in MeMi Klassen

Für den Raum Hamburg wurde bereits untersucht, welche Oberflächenbedeckungen mit den verschiedenen Flächennutzungen verbunden sind, wobei detailliertere Datensätze als die CLC Daten verwendet wurden. Die CLC Klassen sind in Hauptgruppen und zwei detaillierende Untergruppen unterteilt (Tabelle 8, Anhang 8.2). Zur Erstellung der Oberflächenbedeckungen sind die CLC Klassen eindeutig sogenannten MeMi Klassen zugeordnet worden, die sich inhaltlich nicht, in ihrer Nummerierung aber wohl von CLC Klassen unterscheiden (Tabelle 8, Anhang 8.2). Grund für die Um-Nummerierung ist die Offenheit der MeMi Klassen für Flächennutzungsdaten außerhalb der EU oder für detailliertere Daten, wie sie z.B. für Hamburg vorliegen. Für diese MeMi Klassen ist untersucht worden, welchen Anteil die Oberflächenbedeckungen auf Basis der METRAS-50 Klassen an der jeweiligen MeMi Klasse aufweisen. Die abgeleiteten statistischen Zusammenhänge sind in eine Konvertierungstabelle eingeflossen, die Teil der Topographieerzeugungsprogramms GRITOP-L ist (Abschnitt 5.4). In GRITOP-L erfolgt die Zuweisung von anteiligen METRAS-50 Oberflächenbedeckungen auf die einzelnen CLC bzw. MeMi Klassen (Abbildung 16).

Abbildung 16: Ablauf zur Erstellung von GA-Dateien aus CLC und EU-DEM als Eingabe für METRAS-PCL



Quelle: Universität Hamburg

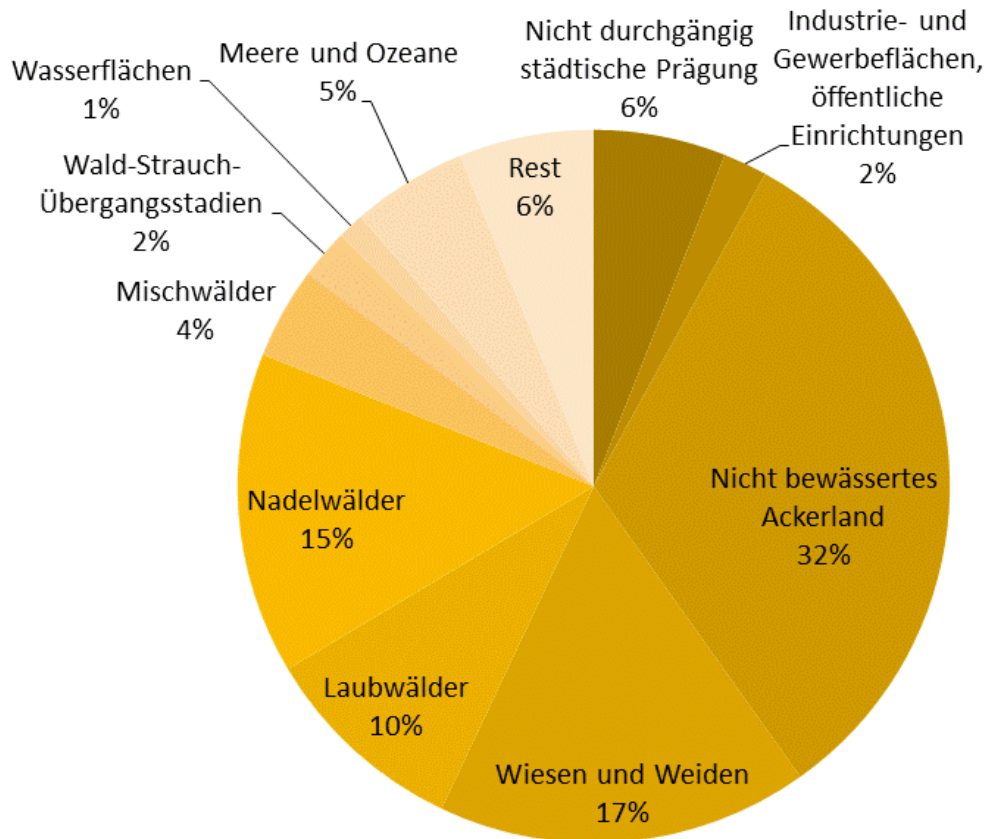
Die für Hamburg entwickelte und im vorigen Absatz beschriebene Methodik ist in diesem Projekt auf ganz Deutschland angewandt worden. Die Zuweisung der CLC-Klassen auf die MeMi Klassen ist beibehalten worden (Tabelle 8, Anhang 8.2). Anhand von LBM-DE2012 Daten wurden die statistischen Zusammenhänge deutschlandweit untersucht. Der LBM-DE2012 Datensatz besteht aus 18 Dateien, die Daten sind nach Bundesländern sortiert. Daten für Niedersachsen, NRW, Bayern und Baden-Württemberg sind dabei jeweils in eine Nord-Datei und eine Süd-Datei aufgeteilt. Im Datensatz für Hamburg ist das Gebiet um Neuwerk und Helgoland enthalten, im Datensatz für Niedersachsen-Nord ist Bremen aufgenommen. Berlin und Brandenburg sind als Berlin-Brandenburg zusammengefasst. Die LBM-DE2012 Daten enthalten geometrische Objekte der Landbedeckung und Landnutzung und auch eine CLC Nomenklatur. Alle Datensätze sind identisch aufgebaut und enthalten vielfältige Informationen, von denen folgende genutzt werden:

- ▶ LB – die Klasse der LBM Landbedeckung
- ▶ LN – die Klasse der LBM Landnutzung
- ▶ CLC – die CORINE Landbedeckungs-Zuordnung

Die einzelnen Datensätze sind zu einem Gesamtdatensatz für Deutschland zusammengefügt worden, auch wenn die Auflösung der LBM-DE2012 Daten in den einzelnen Bundesländern leicht unterschiedlich ist. Dieses ist erforderlich, um bei der Topographieerzeugung (Abschnitt 5.4) keine Bundeslandsgrenzen in den Datensätzen beachten zu müssen. Insgesamt sind in Deutschland 32 der EU weit einheitlichen CLC Klassen mit einem Anteil von mehr als 0 % vorhanden (Tabelle 9, Anhang 8.2). CLC 212 (regelmäßig bewässertes Ackerland), CLC 241 (Einjährige Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen), CLC 242 (komplexe Parzellenstrukturen), CLC 243 (Landwirtschaftliche Flächen, natürliche Bodenbedeckung), CLC 244 (Land- und forstwirtschaftliche Flächen) sind in den LBM-DE2012 Daten für Deutschland nicht belegt. Sie sind vermutlich anderen Flächen zugeordnet worden. So könnte CLC 241, 242, 243 der Klasse CLC 211 (nicht bewässertes Ackerland) zugeordnet oder CLC 244 auf die drei Klassen für verschiedene Waldarten (CLC 311, 312, 313) aufgeteilt worden sein. In Deutschland nicht vorhandene Landbedeckungen kommen im Datensatz auch nicht vor. Dieses sind CLC 213 (Reisfelder), CLC 223 (Olivenhaine), CLC 323 (Hartlaubgewächse) und CLC 422 (Salinen). Brandflächen (CLC 334) haben einen Flächenanteil von $7.84378E-12$ und sind somit vorhanden, haben aber einen sehr geringen Anteil.

Die Anteile der vorhandenen 35 CLC Klassen sind in Deutschland recht unterschiedlich (Abbildung 17). In die Abbildung sind die Landnutzungen aufgenommen, die einen Anteil von mehr als 1 % aufweisen. Die mit einem geringeren Anteil sind nicht dargestellt sondern in „Rest“ zusammengefasst. Den Hauptanteil weist mit 32 % nicht bewässertes Ackerland auf. Wiesen und Weiden bedecken das Land zu 17 %, Nadelwälder zu 15 % und Laubwälder zu 10 %. Der Anteil an Mischwäldern beträgt 4 %. 6 % der Fläche sind nicht durchgängig städtisch geprägt. Industrie- und Gewerbeflächen nehmen 2 % der Fläche ein, ebenso wie Wald- Strauch und Übergangsstadien. Wasserflächen im Landesinneren sind auf 2 % der Fläche vorhanden, der Anteil an Meeren und Ozeanen beträgt 5 %. Die nicht genannten verbleibenden 25 CLC Klassen nehmen jeweils deutlich weniger als 1 % der Fläche ein (Tabelle 9, Anhang 8.2) und belegen insgesamt 6 % der Fläche Deutschlands.

Abbildung 17: Anteile unterschiedlicher CLC Klassen an der Flächennutzung Deutschlands für CLC Klassen mit wenigstens 1 % Anteil (gerundet) an der Gesamtfläche Deutschlands.



Quelle: Universität Hamburg

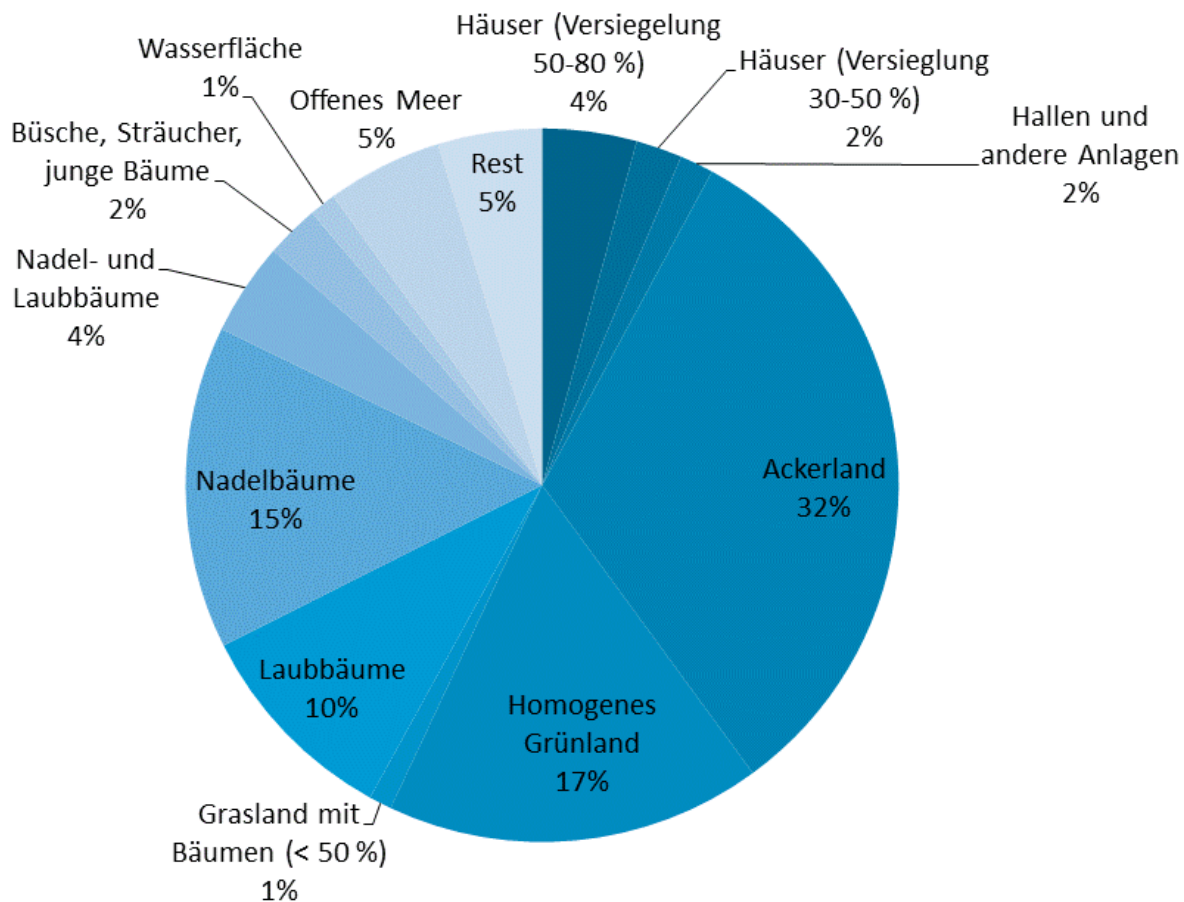
Üblicherweise beträgt die Mindestkartierfläche 1 ha in der CLC Nomenklatur. Lediglich bei CLC 521 (Lagunen) ist die Mindestkartierfläche erheblich größer, sie beträgt hier knapp 10 ha. Bei einigen CLC Klassen ist die kleinste Fläche geringer als 1 ha. Sie beträgt bei CLC 313 (Mischwälder) 0,5 ha, bei CLC 211 (nicht bewässertes Ackerland) 0,4 ha, bei CLC 412 (Torfmoore) 0,3 ha und bei CLC 231 (Wiesen und Weiden) sogar nur 772 m². Die CLC Daten sind auf ein 10 m Raster projiziert und in MeMi Klassen überführt worden. Die Daten werden über das Umweltbundesamt und die metraspcl Internetseite der Universität Hamburg (<https://www.umweltbundesamt.de/metraspcl>) bereit gestellt.

5.2.2 MeMi Klassen in LB Klassen

Ausgehend von den in LBM-DE2012 vorhandenen CLC Daten und den in Daten für die Landbedeckung (LB) ist deutschlandweit untersucht worden, wie der Anteil der LB-Werte an den CLC Klassen ist. Diese Zusammenhänge sind direkt auf die MeMi Klassen übertragbar, da eine ein-eindeutige Zuordnung existiert (Abschnitt 5.2.1). Für jede CLC Klasse sind die dazugehörigen Polygone mit den LB Klassen verschnitten worden, so dass ein mittlerer Zusammenhang von CLC Klassen zu LB Klassen abgeleitet werden konnte. Die mittleren Zusammenhänge von LB und CLC sind Tabelle 10, Anhang 8.4, zu entnehmen. Für CLC 111 (MeMi 6112; Durchgängig städtische Prägung) ergeben sich durch diese Analyse 76,4 % LB 111 (Häuser; Versiegelung > 80 %), 21,7 % LB 121 (Hallen und andere Anlagen) sowie 1,9 % LB 122 (Versiegelte gebäudelose Flächen). Die prozentualen Anteile an der Gesamtfläche sind in Abbildung 18 dargestellt. Die LB Anteile sind gerundet angegeben. Alle Landbedeckungen, die einen Anteil von weniger als 1 % an der Gesamtfläche aufweisen sind nicht dargestellt sondern in „Rest“ aufgenommen. Die Landbedeckungen mit großen prozentualen Anteilen weisen gleiche Anteile auf, doch sind die städtischen Flächen und Bewuchsklassen mit Bäumen nun anders aufgegliedert. Ursache

der unterschiedlichen Variationen sind die in LB in einer CLC Klasse vorhandenen Untergliederungen. So sind beispielsweise für die häufigen Klassen CLC 311 (MeMi 5100, Laubbäume), CLC 312 (MeMi 5200, Nadelbäume), CLC 313 (MeMi 5300, Nadel- und Laubbäume) keine zusätzlich die CLC Klasse unterteilenden LB Klassen gefunden worden.

Abbildung 18: Anteile unterschiedlicher LB Klassen an der Landbedeckung Deutschlands für LB Klassen mit wenigstens 1 % Anteil an der Gesamtfläche Deutschlands



Quelle: Universität Hamburg

Eine Nutzung der Verkehrsflächen aus dem Digitalen Landschaftsmodell (DLM) wurde geprüft, um über Breiten-Zuweisung für Straßen diese bei der Aufteilung von CLC auf METRAS-50 berücksichtigen zu können. Hier ließ sich keine einheitliche Regel finden, um die Straßenbreiten zuzuweisen. Zudem sind größere Verkehrsflächen bereits in den LB-Daten enthalten (z.B. Autobahnauffahrten), wodurch eine generelle Zuweisung von Straßenbreiten zusätzlich erschwert wird.

5.2.3 LB Klassen in METRAS-50 Klassen

Die LB Klassen enthalten trotz ihres Namens (Landbedeckung) nicht immer Oberflächenbedeckungen, wie sie für die atmosphärische Modellierung relevant sind. Daher müssen die LB Klassen weiter unterteilt werden. Hierzu werden Plausibilitätsannahmen verwendet. Als Beispiel sei hier die LB Klasse 112 (Häuser, Versiegelung 50 % - 80 %) aufgeführt, die 4,3 % der Fläche Deutschlands nach den LBM-DE2012 Daten bedeckt. Sie enthält verschiedene Oberflächenbedeckungen, die über fünf verschiedene METRAS-50 Klassen abgebildet werden. Für 6006 (städtische Fläche, Gebäude >11 m und umgebende versiegelte Flächen) wird ein Flächenanteil von 35 %, für 6005 (städtische Fläche, Gebäude <11 m und umgebende versiegelte Flächen) ein Anteil von 30 %, für 3100 (kurzes, trockenes Gras) ein Anteil von 17,5 %, für 4340 (kurze Sträucher) ein Anteil von 9 % und für 5100 (sommergrüner Laubwald) ein

Anteil von 8.5 % vorgegeben. Diese Oberflächenbedeckungen unterscheiden sich in ihren physikalischen Charakteristiken (Tabelle 7) und beschreiben somit die Wirkung der Oberflächen auf Temperatur- und Strömungsfelder besser, als die Bedeckungsklassen LB 112 aus LBM-DE2012.

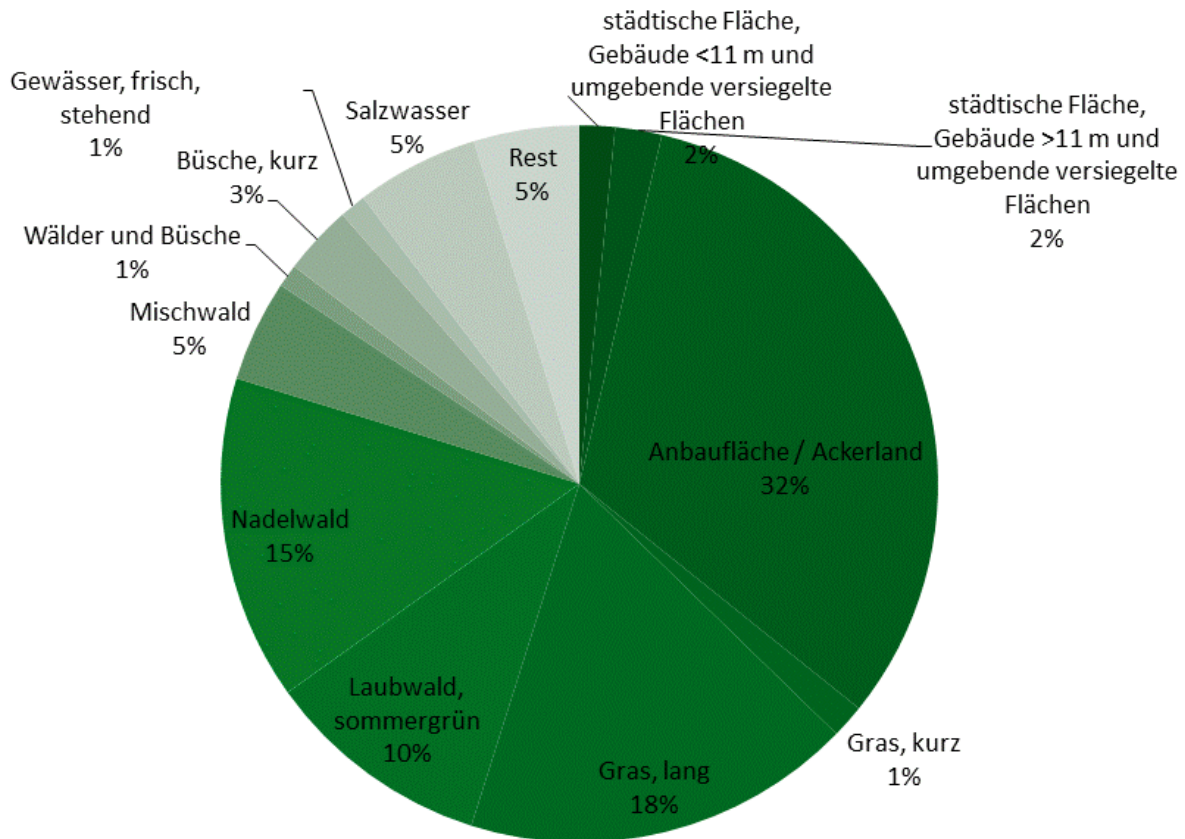
Die Zuordnungen von LB zu CLC und daraus abgeleitet zu METRAS-50 sind nur im Mittel über ganz Deutschland gültig. Lokal können sie durchaus anders sein. So zeigt ein Vergleich mit den Daten für Hamburg für CLC 112 (nicht durchgängig städtisch) einen höheren Anteil städtischer Flächen bei der Zuweisung in 6005 und 6006 (insgesamt 56.8 %) auf Basis der LB Klassen als In-Situ für Hamburg gefunden (30 %, Tabelle 6). Die höheren Werte der in diesem Projekt entwickelten Umrechnung sind leicht nachvollziehbar: CLC 112 enthält einen Anteil von 67.2 % LB 112 (Häuser, Versiegelung 50-80 %) und einen Anteil von 32.8 % LB 113 (Häuser, Versiegelung 30-50 %). Für die Zuweisung von METRAS-50 Klassen darauf wurden die mittleren Versiegelungsgrade verwendet (65 % für LB 112 und 40 % für LB 113), so dass sich insgesamt eine mittlere Versiegelung von 56.8 % ergibt. Die verbleibenden 43.2 % sind verteilt auf die verschiedenen Grüngruppen (Tabelle 11, Anhang 8.5). Asphalt als separate Klasse entsteht hier nicht, da die METRAS-50 Klassen 6005 und 6006 die Häuser umgebenden versiegelten Flächen enthalten.

Tabelle 6: Anteile verschiedener METRAS-50 Klassen an der CLC Klasse 112 (nicht durchgängig städtisch)

METRAS-50 Klasse	Bedeutung	Anteile mit LB	Anteile in-situ Daten
2105	kahler Boden	0.00000	0.007
3100	Gras, kurz	0.21600	0.462
4340	Büsche, kurz	0.10968	0.014
5100	Laubwald, sommergrün	0.10632	0.000
5300	Mischwald	0.00000	0.217
6005	städtische Fläche, Gebäude <11 m und umgebende versiegelte Flächen	0.25080	0.150
6006	städtische Fläche, Gebäude >11 m und umgebende versiegelte Flächen	0.31720	0.150

Der Anteil verschiedener METRAS-50 Klassen an der Oberflächenbedeckung als Mittel über ganz Deutschland sind in Abbildung 19 dargestellt. Die METRAS-50 Anteile sind gerundet angegeben. Alle Oberflächenbedeckungen, die einen Anteil von weniger als 1 % an der Gesamtfläche aufweisen sind nicht dargestellt sondern in „Rest“ aufgenommen. Leichte Veränderungen in den Flächenanteilen zeigen sich bei METRAS-50 gegenüber CLC (Abbildung 17) und LB (Abbildung 18) auch in den Vegetationsklassen. So hat der Anteil von Wiesen und Weiden von 18% in CLC und ähnlichen Anteilen in LB (Grasland und Bäume 1%, homogenes Grünland 17%) auf 19% zugenommen in METRAS-50 (18% Gras, lang; 1% Gras, kurz). Die Zunahme ist darin begründet, dass die städtischen Flächen teilweise auch grün sind und dieses ist der entsprechenden Grünklasse auch im deutschlandweiten Mittel sichtbar. Dementsprechend sind die Anteile städtisch und industriell geprägter Flächen von 8% in CLC auf 4% bebauter und umliegender versiegelter Flächen zurückgegangen. Der Anteil Asphalt an der Gesamtfläche liegt unterhalb von 1% (Anteil von METRAS-50 2220 ist 0.95 %).

Abbildung 19: Anteile unterschiedlicher METRAS-50 Klassen mit wenigstens 1 % Anteil an der Oberflächenbedeckung der Gesamtfläche Deutschlands



Quelle: Universität Hamburg

5.3 Geländehöhen für METRAS-PCL

Die Orographiedaten basieren auf EU-DEM und werden vom Copernicus Land Monitoring Service der Europäischen Umweltagentur (Copernicus 2017) bereitgestellt. Sie überdecken Deutschland und sind in neun Dateien aufgeteilt, die zur Vermeidung von künstlichen Grenzen zu einer zusammengefügt worden sind. Die Originaldaten sind in geographische Koordinaten mit dem Referenzellipsoid WGS84 überführt worden, so dass sie konsistent mit dem 10 m MeMi-Klassen Datensatz sind. Die Daten sind auf 30 m gerastert und in einzelne Dateien a 1000 x 1000 Rasterelemente überführt worden, um eine schnellere Verarbeitung in GRITOP-L zu erlauben.

5.4 Erstellung der Topographiedatei für METRAS-PCL – Programm GRITOP-L

Als Vorbereitung für die Erstellung von GA-Dateien sind die CLC in MeMi Klassen konvertiert und gerastert worden. Diese gerasterten Daten sowie die gerasterten EU-DEM Daten (Abschnitt 0) sind Eingabedaten in GRITOP-L (Abbildung 16). In der Steuerdatei wird das Gebiet festgelegt.

Für die Berechnung der Topographiedateien für METRAS-PCL liegt ein deutschlandweiter Datensatz der CLC Daten überführt in MeMi Klassen (Abschnitt 5.2) mit einer Auflösung von 10 m vor. Jedem der 10 m Rasterelemente ist eine MeMi Klasse zugewiesen. Der gerasterte Höhendatensatz liegt mit einer Auflösung von 30 m vor (Abschnitt 0). Beide Datensätze werden den Anwenderinnen und Anwendern von METRAS-PCL bereitgestellt (Abschnitt 6.4). Zusätzlich wird ein Programm vorgehalten, welches für das gewünschte Modellgebiet die MeMi Daten auswählt und das Modellgitter nach Nutzervorgaben erzeugt. Die GRITOP-L Steuerung erfolgt wie für METRAS-PCL über eine NAMELIST (Abbildung 20).

Abbildung 20: Beispielhafte Steuerdatei für die GRITOP-L

```

&CONTROL
!
topo_file = 'GA_Example'
data_folder = './TOPO/'
!
ddmmss = .TRUE.
ref_lon = 10.02934
ref_lat = 53.156551
grid_rotation = 0.
!
domain_geo = .TRUE.
domain_north = 53.207193
domain_east = 10.101704
domain_south = 53.107939
domain_west = 9.507477
domain_top = 10000.0
!
stretch_factor = 1.175
hor_grid_min = 100.
hor_grid_max = 500.
ver_grid_min = 20.
ver_grid_max = 500.
!
equi_north = 5000.
equi_east = 5000.
equi_south = -5000.
equi_west = -5000.
equi_top = 80.

```

Quelle: Universität Hamburg

In der NAMELIST müssen diverse Steuergrößen angegeben werden. In dem Beispiel in Abbildung 20 heißt die zu erstellende GA-Datei `GA_Example` (`topo_file`). Die geographischen Koordinaten des Bezugspunktes des Gitters werden mit `ref_lon` und `ref_lat` festgelegt. Der Bezugspunkt sollte möglichst im Zentrum des Modellgebietes liegen, da durch die Projektion der Erdoberfläche auf die Ebene immer kleine Projektionsfehler auftreten. Falls notwendig kann das Gitter gegen Nord gedreht werden (`grid_rotation`). Dabei ist zu beachten, dass die Windkomponenten bei Initialisierung und Ausgabe in METRAS-PCL als achsenparallel angesehen werden. Über `domain_geo` kann festgelegt werden, ob die Gebietsränder (`domain_north`, `domain_east`, `domain_south`, `domain_west`) in geographischen Koordinaten (`.TRUE.`) oder in Modellkoordinaten (`.FALSE.`) einzulesen sind. Zwei weitere Gitterparameter sind festzulegen: der Gitterspreizungsfaktor (`stretch_factor`) und der minimale und maximale Abstand zwischen den Gitterpunkten jeweils in horizontaler (`hor_grid_min`, `hor_grid_max`) und in vertikaler Richtung (`ver_grid_min`, `ver_grid_max`). Diese Angaben müssen in Metern erfolgen.

Die minimale vertikale Gitterweite liegt bei 20 m, dann befindet sich durch das Arakawa-C Gitter das niedrigste Modellniveau für die Berechnung des Horizontalwindes und der Temperaturen und Feuchten in 10 m über Grund. Eine feinere vertikale Auflösung sollte nicht verwendet werden, um zu gewährleisten, dass das unterste Modellniveau deutlich über der maximalen Rauigkeitslänge liegt. Diese beträgt maximal 1.2 m (Tabelle 7). Auch die Größe des äquidistanten Gebietes des Modellgebietes muss festgelegt werden. Dieses muss nach VDI (2017a) in horizontaler Richtung mindestens so groß sein wie das Prognosegebiet. Das äquidistante Gebiet ist festlegbar über die Grenzen `equi_north`, `equi_east`, `equi_south`, `equi_west` und `equi_top`. Letzteres gibt an, bis in welche Höhe über

Grund ein äquidistantes Gitter verwendet werden soll. Hier ist zu empfehlen, wenigstens bis in 80 m äquidistant zu rechnen, bei Interesse an genauen Windberechnungen in größerer Höhe (z.B. Windenergiepotentiale) auch bis in größere Höhe. Diese Angaben müssen ebenfalls in Metern erfolgen.

In GRITOP-L wird das Gitter errechnet. In dem Programm GRITOP-L erfolgt die Konvertierung von MeMi in METRAS-50 Klassen. Diese Konvertierung erfolgt in zwei Schritten, die im Programm GRITOP-L über Anwendung der Gleichungen (13) und (14) abgebildet sind.

$$A_{LB}(k) = B_{i,k} \cdot A_{MeMi}(i) \quad (13)$$

$$A_{METRAS-50}(l) = C_{k,l} \cdot A_{LB}(k) \quad (14)$$

Dabei beinhaltet die Matrix $B_{i,k}$ die Zuordnung der MeMi Klasse auf die LB Klassen. Eingetragen sind enthält Bruchteile von 1, die sich für eine MeMi Klasse zu Eins addieren (Tabelle 10). Die Matrix $C_{k,l}$ für die Zuordnung der LB Klasse auf die METRAS-50 Klassen enthält ebenfalls Bruchteile von 1, die sich für eine LB Klasse zu Eins addieren (Tabelle 11).

Um die aufbereiteten und bereit gestellten Standard-Daten verwenden zu können (Abschnitt 6.4) ist über `data_folder` das lokale Dateiverzeichnis zu setzen, in dem sich die Standard-Daten befinden. Weitere Details zu GRITOP-L sind Grawe und Schlünzen (2018) zu entnehmen.

6 Modelldokumentation und Schulung der Anwenderinnen und Anwender

6.1 Dokumentation von Modellläufen

Die zu jeder Simulation erstellten, protokollierten Daten bieten die Möglichkeit, die Konformität von Ergebnissen eines gutachterlich durchgeführten Laufs mit denen des Referenzmodells zu überprüfen. Sie erleichtern gegebenenfalls eine Fehleranalyse, indem eine neue Rechnung auf Basis der protokollierten Modellversion, der Eingangsdaten und Steuerparameter durchgeführt wird. Eine absolute Fälschungssicherheit jeglicher Protokollierungsdaten kann trotz der nachfolgenden Inhalte der Protokolldatei allerdings nicht gewährleistet werden:

- ▶ Durch entsprechende Konfiguration des MAKEFILE und der Quellcodes wird in der für jeden Modelllauf ausgegebenen Protokolldatei automatisch die Modellversion des ausgeführten Programms METRAS-PCL eingetragen.
- ▶ Die für jeden Modelllauf verwendeten Steuerparameter sind in der für jeden Modelllauf ausgegebenen Protokolldatei dokumentiert. In der Anwenderversion bezieht sich das ausschließlich auf die Standard-Parameter (Abbildung 1). In der wissenschaftlichen Version werden zusätzlich die erweiterten Steuerparameter ausgegeben.
- ▶ Checksummen der Modellergebnisse werden in der Protokolldatei ausgegeben.

Alle Methoden gemeinsam erleichtern eine Rückführbarkeit: die ersten beiden Methoden protokollieren die Modellversion und die verwendeten Steuerparameter. Damit lassen sich Modellläufe im Nachhinein reproduzieren. Die dritte Methode erlaubt zu überprüfen, ob mit der gegebenen Modellversion und Eingabedatei die gleiche Lösung erzielt werden kann.

6.2 Modelldokumentation

Die Dokumentation des Modellsystems METRAS-PCL richtet sich unter anderem nach den Festlegungen in der Evaluierungsrichtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a). Demnach sind folgende Dokumente für METRAS-PCL verfügbar bzw. erfolgreich erstellt und verfügbar gemacht worden:

- ▶ Eine Kurzbeschreibung des Modells METRAS, welche beispielsweise im Rahmen der Aktion COST728 in einer Metadatenbank für mesoskalige Modelle verfügbar gemacht wurde (https://mi-pub.cen.uni-hamburg.de/index.php?id=6295&no_cache=1).
- ▶ Eine ausführliche wissenschaftliche Beschreibung des Modellsystems M-SYS (Schlünzen et al. 2012a), in welchem auch die in der Anwenderversion METRAS-PCL verwendeten Modellgleichungen, die numerische Diskretisierung und die verwendeten Parametrisierungen in ausführlicher Form beschrieben sind.
- ▶ Eine ausführliche technische Referenz des Modellsystems M-SYS (Schlünzen et al. 2012b), in welchem auch die in der Anwenderversion METRAS-PCL verwendeten Eingangsdaten, Variablen (im Quellcode benutzt) und der CALL GRAPH sowie eine Kurzerläuterung der Subroutinen und Funktionen aufgeführt sind.
- ▶ Eine Dokumentation von METRAS-PCL mit Erläuterung der Standard-Steuerparameter in der Steuerdatei von METRAS-PCL (Schlünzen et al. 2017).
- ▶ Das METRAS-PCL Handbuch (Schlünzen et al. 2017), welches explizit auf die Eingabedaten, die Ausgabedateien und die Steuerung der Anwenderversion eingeht.

Das METRAS-PCL Handbuch ist im Rahmen des ersten METRAS-PCL Workshops (Mai 2016; Abschnitt 6.3) den Anwenderinnen und Anwendern vorab zur Verfügung gestellt worden. Einige Änderungen wurden an dem Modellhandbuch in Anlehnung an Verbesserungsvorschläge, die während des dreitägigen ersten METRAS-PCL Workshops gemacht wurden, ausgearbeitet. Das Modellhandbuch ist auf den Internetseiten der Universität Hamburg und des Umweltbundesamtes veröffentlicht (Abschnitt 6.4).

Auch für GRITOP-L wurde eine Dokumentation erstellt (Schlünzen und Grawe 2018), die die Eingabe- und Ausgabedateien erläutert. Zudem sind die in der resultierenden Topographiedatei (GA-Datei) enthaltenen Werte erklärt.

6.3 Schulung der Anwenderinnen und Anwender

Die oben schon erwähnte Anwenderschulung für das Modell METRAS-PCL wurde im Mai 2016 erfolgreich in Hamburg durchgeführt und ist von Frau Schlünzen, Herrn Grawe und Herrn Petrik organisiert worden. Die im Voraus anvisierten Zielgruppen waren zahlreich vertreten, d.h. die teilnehmenden Personen konnten entweder Gutachterbüros oder Behörden (Landesumweltämter) zugeordnet werden. Darüber hinaus interessierten sich zwei Angehörige von Universitäten für METRAS-PCL. Die Nachfrage nach der Teilnahme am Workshop konnte bei Weitem nicht befriedigt werden, so dass eine Vielzahl von Personen auf die Warteliste gesetzt werden mussten. Ein weiterer Workshop ist im März 2018 durchgeführt worden, der thematisch zwei neue Bereiche umfasst hat. Neben einem „Aufbaukurs METRAS-PCL“ wurden zusätzlich die Teilnehmenden in der Erstellung der GA-Datei geschult, also die Erzeugung von Topographiedaten gelernt. Alle Nutzer erzeugten ein eigenes Modellgebiet, das im abschließenden Einführungskurs in METRAS-PCL auch von allen gerechnet werden konnte.

Beide Workshops wurde mit hohem Personalaufwand vorbereitet und durchgeführt, was eine intensive Betreuung der Teilnehmerinnen und Teilnehmer ermöglichte. Wie den Rückmeldungen aus dem Teilnehmerkreis zu entnehmen ist, hatte dieser Ansatz den angestrebten Erfolg. Die Teilnehmenden konnten den Frontalvorträgen folgen und wurden bei den praktischen Übungen in die Lage versetzt, Modellgitter zu erzeugen, Modellrechnungen durchzuführen und eine erste Analyse und Visualisierung der Daten vorzunehmen. Beim ersten Workshop konnten auch eigene Laptops genutzt werden. Dadurch war für einige Teilnehmer die Mitarbeit im Workshop durch technische Probleme mit dem eigenen Laptop oder mangelnde UNIX-Kenntnis erschwert worden. Daher sind beim zweiten Workshop (März 2018) nur die Rechner der Universität genutzt worden. Die graphische Darstellung der Ergebnisse war für die Teilnehmenden zeitaufwändig und zeigte, dass allgemein bereit gestellte graphische Auswertewerkzeuge die Modellnutzung erheblich erleichtern könnten.

6.4 Bereitstellung von Referenzimplementierung, Daten und Datenaufbereitungsprogrammen

METRAS-PCL und das Topographiedatenaufbereitungsprogramm GRITOP-L sind als ausführbare Dateien von den Seiten des Umweltbundesamtes (unter <https://www.umweltbundesamt.de/metraspcl>) sowie denen der Universität Hamburg (unter <https://www.mi.uni-hamburg.de/metraspcl>) ladbar. Die Nutzungsbedingungen liegen den Programmen bei. Auch die Dokumentation des Modells sowie des Programms zur Topographiedatenaufbereitung sind dort zu finden. Auch die harmonisierten topographischen Daten sind auf den Internetseiten des Umweltbundesamtes und der Universität Hamburg zu finden.

7 Schlussbemerkungen und Ausblick

METRAS-PCL und GRITOP-L können helfen, die gutachterliche Praxis weiter zu harmonisieren. Durch die erfolgreiche Evaluierung (Kapitel 3) ist nachgewiesen, dass METRAS-PCL die Anforderungen der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (VDI 2017a) erfüllt. Erleichtert werden könnten die Modellanwendungen, wenn neben dem Gittererzeugungsprogramm auch graphische Auswertewerkzeuge auf Basis von frei verfügbarer Software für die METRAS-PCL allgemein verfügbar wären.

Forschungsbedarf kann darin gesehen werden, die in der VDI 3783 Blatt 8 festgelegten Windprofile so zu nutzen, dass sich trotz der in Kapitel 4 diskutierten prinzipiellen Unterschiede in der Behandlung der atmosphärischen Grenzschicht eine Initialisierung für prognostische mesoskalige Windfeldmodelle daraus ableiten lässt, die für idealisierte Bedingungen in VDI 3783 Blatt 8 übergeht. Ziel könnte sein einen Präprozessor zu schaffen, welcher für die unterschiedlichste Kombination von Rauigkeiten und atmosphärischen Stabilitäten einsetzbar ist und physikalisch plausible Modellinitialisierungen liefert.

Das Forschungsvorhaben widmete sich auch Modellinitialisierungen unter sehr labilen Verhältnissen. Weil die durch die Stabilitätsklassen IV-H und V-H beschriebenen überadiabatischen Verhältnisse nur in der bodennahen Grenzschicht und nur zeitweise vorkommen, muss darüber eine andere Schichtung angenommen werden. Anhand von Messungen sollte geprüft werden, wie solche atmosphärischen Bedingungen sinnvoll zu initialisieren sind. Diese Untersuchungen könnten auch helfen, die turbulente Vermischung in der labilen Grenzschicht unter idealisierten Bedingungen realitätsnäher abzubilden.

8 Anhänge

8.1 Eigenschaften Oberflächenbedeckungsklassen

In METRAS-PCL werden verschiedene Oberflächenbedeckungsklassen verwendet, die sich unterscheiden in

- ▶ Albedo A_0 ,
- ▶ thermischer Diffusivität k_s ,
- ▶ thermischer Leitfähigkeit ν_s ,
- ▶ Verfügbarkeit von Bodenwasser l_q ,
- ▶ Bodenwassersättigung W_k ,
- ▶ Rauigkeitslänge z_0 .

Die oberflächennahen Flüsse werden unter Berücksichtigung der prozentualen Anteile der METRAS-50 Oberflächenbedeckungsklassen in jeder Gitterzelle berechnet.

Tabelle 7: In METRAS-PCL berücksichtigten Oberflächenbedeckungsklassen und deren Eigenschaften

METRAS-50 Klasse	Bezeichnung	Albedo A_0	THEDIF k_s [m ² /s]	THECON ν_s [W/mK]	QVCONT l_q	QVDEEP W_k [m]	YZOCLS z_0 [m]
1000	Wasser (allgemein)	$f(Z(t))$	1.50E-07	100.00	0.98	100.0	$f(u_*)$
1100	Gewässer, frisch, stehend	$f(Z(t))$	1.50E-07	100.00	1.00	100.0	$f(u_*)$
1222	Gewässer, frisch, fließend	$f(Z(t))$	1.50E-07	100.00	1.00	100.0	$f(u_*)$
1300	Salzwasser	$f(Z(t))$	1.50E-07	100.00	0.98	100.0	$f(u_*)$
1411	Watt	0.105	7.40E-07	2.20	0.98	100.0	0.0002
1600	Schnee und Eis	0.72	1.50E-06	2.04	0.95	100.0	0.0010
1810	Gletscher	0.72	1.50E-06	2.04	0.95	100.0	0.0010
2105	kahler Boden	0.17	3.80E-07	1.18	0.30	0.0150	0.0012
2106	Sand	0.20	5.70E-07	1.05	0.10	0.0100	0.0003
2107	Kies/Schotter	0.12	2.76E-07	0.40	0.10	0.0100	0.0050
2108	Fels	0.10	1.40E-07	2.90	0.05	0.0100	0.0012
2122	Sanddünen mit Gras	0.20	5.70E-07	1.05	0.15	0.0350	0.0100
2123	Sanddünen mit wenig Vegetation	0.20	5.70E-07	1.05	0.15	0.0450	0.0500
2220	Asphalt	0.09	2.30E-06	1.35	0.5	0.0015	0.0003
2230	Beton	0.15	2.30E-06	1.81	0.5	0.0015	0.0003
2240	Ziegel/Backstein/Pflaster	0.30	2.30E-06	0.9	0.02	100.0	0.0006
2250	Stahl	0.30	4.20E-06	30	0.5	0.0005	0.0003
2712	Sträucher, nass	0.20	5.20E-07	1.33	0.65	100.0	0.1000
2715	kahler Boden, nass	0.17	7.40E-07	2.20	0.60	100.0	0.0012
2911	Salzgrube	0.50	7.40E-07	2.20	0.98	100.0	0.0002
3100	Gras, kurz	0.20	5.20E-07	1.33	0.35	0.0500	0.0100
3104	Gras, kurz, feucht	0.20	5.20E-07	1.33	0.55	100.000	0.0100
3138	Gras, lang	0.20	5.20E-07	1.33	0.35	0.0700	0.0200
3148	Gras, lang, nass	0.20	5.20E-07	1.33	0.55	100.000	0.0200
3500	Anbaufläche/Ackerland	0.20	5.20E-07	1.33	0.40	0.0600	0.0400
3830	Ackerland, bewässert	0.20	5.20E-07	1.33	0.65	100.000	0.0400
3863	Ackerland, Sandboden	0.20	5.20E-07	1.33	0.35	0.0400	0.0400
4102	Savanne, bewaldet	0.20	5.70E-07	1.05	0.50	0.0600	0.0500
4103	Savanne	0.20	5.70E-07	1.05	0.25	0.0600	0.0200
4210	Heide	0.15	5.70E-07	1.05	0.15	0.4230	0.0500
4211	Heide, Sandboden	0.15	5.70E-07	1.05	0.15	0.1000	0.0500

METRAS-50 Klasse	Bezeichnung	Albedo A_0	THEDIF k_s [m ² /s]	THECON ν_s [W/mK]	QVCONT I_q	QVDEEP W_k [m]	YZ0CLS z_0 [m]
4314	Büsche, trockene Böden	0.20	5.20E-07	1.33	0.15	0.0600	0.1000
4340	Büsche, kurz	0.20	5.20E-07	1.33	0.35	0.0900	0.1000
5100	Laubwald, sommergrün	0.17	8.00E-07	2.16	0.60	0.1200	1.0000
5200	Nadelwald	0.10	8.00E-07	2.16	0.60	0.1600	1.2000
5213	Nadelwald, nass	0.10	8.00E-07	2.16	0.70	100.000	1.2000
5300	Mischwald	0.15	8.00E-07	2.16	0.60	0.1200	1.0000
5358	Mischwald, trocken	0.15	8.00E-07	2.16	0.50	0.0500	1.0000
5656	Mischwald, nass	0.15	8.00E-07	2.16	0.70	100.000	1.0000
5811	Wälder und Büsche	0.20	6.50E-07	1.75	0.45	0.1000	0.2500
6000	Städtisch geprägte Fläche	0.18	1.22E-06	3.03	0.50	0.0015	0.9000
6005	städtische Fläche, Gebäude <11 m und umgebende versiegelte Flächen	0.18	1.40E-06	2.61	0.50	0.0015	0.6000
6006	städtische Fläche, Gebäude >11 m und umgebende versiegelte Flächen	0.18	2.30E-06	3.44	0.50	0.0015	1.2000
7010	Mischflächennutzung	0.20	5.20E-07	1.33	0.20	0.1000	0.1000

Die Albedo wird in Abhängigkeit vom Sonnenstand zeitabhängig berechnet ($f(Z(t))$), die Rauigkeitslänge hängt von der Windschubspannungsgeschwindigkeit ab ($f(u_*)$).

8.2 CLC Klassen und deren Zuordnung zu MeMi Klassen

Jede CLC Klasse wird eindeutig einer MeMi Klasse zugeordnet. Diese sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Zuordnung der CLC Klassen zu den MeMi Klassen

CLC, Ebene 1	CLC, Ebene 2	CLC, Ebene 3	MeMi Klasse
1 Bebaute Flächen	11 Städtisch geprägte Flächen	111 Durchgängig städtische Prägung	6112 Durchgängig städtische Prägung
		112 Nicht durchgängig städtische Prägung	6150 Nicht durchgängig städtische Prägung
		121 Industrie- und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen	6614 Industrie- und Gewerbeflächen
	12 Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen	122 Straßen-, Eisenbahnnetze und funktionell zugeordnete Flächen	2614 Straßen, Eisenbahn
		123 Hafengebiete	6751 Hafengebiete

CLC , Ebene 1	CLC, Ebene 2	CLC, Ebene 3	MeMi Klasse
		124 Flughäfen	2650 Flughäfen mit versiegelter Landebahn
		131 Abbauf Flächen	2313 Abbauf Flächen
	13 Abbauf Flächen, Deponien und Baustellen	132 Deponien und Abraumhalden	2314 Deponien und Abraumhalden
		133 Baustellen	2315 Baustellen
	14 Künstlich angelegte, nicht landwirtschaftlich genutzte Grünflächen	141 Städtische Grünflächen	3413 Städtische Grünflächen
		142 Sport- und Freizeitanlagen	3414 Sport- und Freizeitanlagen
2 Landwirtschaftliche Flächen	21 Ackerflächen	211 Nicht bewässertes Ackerland	3810 Nicht bewässertes Ackerland
		212 Regelmäßig bewässertes Ackerland	3830 Permanent bewässertes Ackerland
		213 Reisfelder	3850 Reisfelder
	22 Dauerkulturen	221 Weinbauflächen	3710 Weinbauflächen
		222 Obst- und Beerenobstbestände	3711 Obst- und Beerenobstbestände
		223 Olivenhaine	3712 Olivenhaine
	23 Grünland	231 Wiesen und Weiden	3100 Wiesen und Weiden
	24 Landwirtschaftliche Flächen heterogener Struktur	241 Einjährige Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen	3713 Mischung einjähriger Früchte mit Dauerkulturen
		242 Komplexe Parzellenstrukturen	3511 Komplexe Parzellenstrukturen
		243 Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe	3512 Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung
		244 Land- und forstwirtschaftliche Flächen	5710 Agroforstlich genutzte Flächen
3 Wälder und naturnahe Flächen	31 Wälder	311 Laubwälder	5100 Laubwälder
		312 Nadelwälder	5200 Nadelwälder
		313 Mischwälder	5300 Mischwälder
	32 Strauch- und Krautvegetation	321 Natürliches Grünland	3158 Natürliches Grünland
		322 Heiden und Moorheiden	4213 Heiden und Moorheiden
		323 Hartlaubbewuchs	4214 Hartlaubgewächse

CLC , Ebene 1	CLC, Ebene 2	CLC, Ebene 3	MeMi Klasse
		324 Wald-Strauch-Übergangsstadien	4333 Wald-Strauch-Übergangsstadien
	33 Offene Flächen ohne / mit geringer Vegetation	331 Strände, Dünen und Sandflächen	2133 Strände, Dünen und Sandflächen
		332 Felsflächen ohne Vegetation	2134 Felsflächen ohne Vegetation
		333 Flächen mit spärlicher Vegetation	2135 Flächen mit spärlicher Vegetation
		334 Brandflächen	2136 Brandflächen
		335 Gletscher und Dauer-schneegebiete	1810 Gletscher und Dauer-schneegebiete
4 Feuchtflächen	41 Feuchtflächen im Landesinnern	411 Sümpfe	2810 Sümpfe
		412 Torfmoore	2711 Torfmoore
	42 Feuchtflächen an der Küste	421 Salzwiesen	2910 Salzwiesen
		422 Salinen	2911 Salinen
		423 In der Gezeitenzone liegende Flächen	1415 In der Gezeitenzone liegende Flächen
5 Wasserflächen	51 Wasserflächen im Landesinnern	511 Gewässerläufe	1210 Gewässerläufe
		512 Wasserflächen	1050 Wasserflächen im Landesinnern
	52 Meeresgewässer	521 Lagunen	1320 Lagunen
		522 Mündungsgebiete	1330 Mündungsgebiete
		523 Meere und Ozeane	1310 Meere und Ozeane

8.3 Anteile CLC Klassen in Deutschland

In Tabelle 9 sind Flächenanteile der CLC Klassen an der Fläche Deutschlands angegeben. Viele CLC Klassen weisen einen Flächenanteil von weniger als 1 % auf. Nur bei einer Genauigkeit mit vier Nachkommastellen ergibt die Summe der Anteile 100 %, daher sind 4 Nachkommastellen angegeben.

Tabelle 9: Anteile der CLC Klassen in Prozent an der Gesamtfläche Deutschlands

CLC Klasse	Prozent an Gesamtfläche	Bedeutung
111	0.1136	Durchgängig städtische Prägung
112	6.0064	Nicht durchgängig städtische Prägung
121	1.9841	Industrie- und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen
122	0.2918	Straßen-, Eisenbahnnetze, funktionell zugeordnete Flächen
123	0.0233	Hafengebiete
124	0.1034	Flughäfen
131	0.2493	Abbauflächen

CLC Klasse	Prozent an Gesamtfläche	Bedeutung
132	0.0682	Deponien und Abraumhalden
133	0.0453	Baustellen
141	0.5028	Städtische Grünflächen
142	0.8725	Sport- und Freizeitanlagen
211	32.1604	Nicht bewässertes Ackerland
212	0.0000	Regelmäßig bewässertes Ackerland
213	0.0000	Reisfelder
221	0.3111	Weinbauflächen
222	0.6039	Obst- und Beerenobstbestände
223	0.0000	Olivenhaine
231	16.8796	Wiesen und Weiden
241	0.0000	Einjährige Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen
242	0.0000	Komplexe Parzellenstrukturen
243	0.0000	Landwirtschaftliche Flächen, natürliche Bodenbedeckung
244	0.0000	Land- und forstwirtschaftliche Flächen
311	9.4080	Laubwälder
312	14.5884	Nadelwälder
313	4.1409	Mischwälder
321	0.4907	Natürliches Grünland
322	0.2524	Heiden und Moorheiden
323	0.0000	Hartlaubbewuchs
324	2.2750	Wald-Strauch-Übergangsstadien
331	0.0639	Strände, Dünen und Sandflächen
332	0.0259	Felsflächen ohne Vegetation
333	0.0412	Flächen mit spärlicher Vegetation
334	0.0000	Brandflächen
335	0.0003	Gletscher und Dauerschneegebiete
411	0.1818	Sümpfe
412	0.2283	Torfmoore
421	0.0664	Salzwiesen
422	0.0000	Salinen
423	0.8092	In der Gezeitenzone liegende Flächen
511	0.3600	Gewässerläufe
512	1.1900	Wasserflächen
521	0.3034	Lagunen
522	0.1135	Mündungsgebiete
523	5.2450	Meere und Ozeane

8.4 Anteil verschiedenen Landbedeckungen (LB) an den CLC Klassen

Für jede CLC Klasse ist als Mittel über Deutschland abgeleitet worden, welchen Anteil die unterschiedlichen Landbedeckungen (LB Klassen) an der jeweiligen CLC Klasse haben. Die Werte sind Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Anteile der Landbedeckungen (LB) an den CLC bzw. MeMi Klassen

CLC Klasse	MeMi Klasse	Zugeordnete LB Klasse	Relativer Anteil pro MeMi Klasse	Bezeichnung
111	6112			Durchgängig städtische Prägung
		111	76.4 %	Häuser (Versiegelung > 80 %)
		121	21.7 %	Hallen und andere Anlagen
		122	1.9 %	Versiegelte gebäudelose Flächen
112	6150			Nicht durchgängig städtische Prägung
		112	67.2 %	Häuser (Versiegelung 50-80 %)
		113	32.8 %	Häuser (Versiegelung 30-50 %)
121	6614			Industrie- und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen
		121	69.3 %	Hallen und andere Anlagen
		112	11.7 %	Häuser (Versiegelung 50-80 %)
		113	4.6 %	Häuser (Versiegelung 30-50 %)
		231	4.2 %	Homogenes Grünland
		242	2.0 %	Mischflächen (regelmäßige Struktur)
		133	1.5 %	Unversiegelte gebäudelose Flächen
		233	1.3 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		311	1.3 %	Laubbäume
		324	1.2 %	Büsche, Sträucher, junge Bäume
		122	0.9 %	Versiegelte gebäudelose Flächen
		312	0.8 %	Nadelbäume
		313	0.5 %	Nadel- und Laubbäume
		321	0.5 %	Inhomogenes Grünland
		111	0.1 %	Häuser (Versiegelung > 80 %)
		512	0.1 %	Wasserfläche
122	2614			Straßen-, Eisenbahnnetze, funktionell zugeordnete Flächen
		122	69.8 %	Versiegelte gebäudelose Flächen
		133	21.9 %	Unversiegelte gebäudelose Flächen
		121	5.1 %	Hallen und andere Anlagen
		231	0.9 %	Homogenes Grünland
		233	0.8 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		113	0.5 %	Häuser (Versiegelung 30-50 %)

CLC Klasse	MeMi Klasse	Zugeordnete LB Klasse	Relativer Anteil pro MeMi Klasse	Bezeichnung
		211	0.4 %	Ackerland
		112	0.3 %	Häuser (Versiegelung 50-80 %)
		324	0.2 %	Büsche, Sträucher, junge Bäume
		311	0.1 %	Laubbäume
123	6751			Hafengebiete
		121	62.8 %	Hallen und andere Anlagen
		122	21.5 %	Versiegelte gebäudelose Flächen
		231	6.8 %	Homogenes Grünland
		133	3.3 %	Unversiegelte gebäudelose Flächen
		233	1.5 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		324	1.3 %	Büsche, Sträucher, junge Bäume
		321	0.9 %	Inhomogenes Grünland
		112	0.7 %	Häuser (Versiegelung 50-80 %)
		113	0.6 %	Häuser (Versieglung 30-50 %)
		311	0.5 %	Laubbäume
		111	0.1 %	Häuser (Versiegelung > 80 %)
124	2650			Flughäfen
		231	58.5 %	Homogenes Grünland
		122	18.5 %	Versiegelte gebäudelose Flächen
		121	10.2 %	Hallen und andere Anlagen
		312	2.8 %	Nadelbäume
		311	2.1 %	Laubbäume
		324	1.7 %	Büsche, Sträucher, junge Bäume
		313	1.6 %	Nadel- und Laubbäume
		321	1.5 %	Inhomogenes Grünland
		233	1.0 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		133	0.8 %	Unversiegelte gebäudelose Flächen
		113	0.7 %	Häuser (Versieglung 30-50 %)
		112	0.3 %	Häuser (Versiegelung 50-80 %)
		322	0.3 %	Zwergsträucher (Heide)
131	2313			Abbauf Flächen
		133	38.6 %	Unversiegelte gebäudelose Flächen
		332	19.5 %	Fels
		336	12.8 %	Lockergestein
		321	11.7 %	Inhomogenes Grünland
		324	8.6 %	Büsche, Sträucher, junge Bäume
		331	2.4 %	Sandflächen

CLC Klasse	MeMi Klasse	Zugeordnete LB Klasse	Relativer Anteil pro MeMi Klasse	Bezeichnung
		333	2.1 %	Spärliche Vegetation
		231	1.8 %	Homogenes Grünland
		121	1.2 %	Hallen und andere Anlagen
		311	0.6 %	Laubbäume
		233	0.2 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		312	0.2 %	Nadelbäume
		313	0.2 %	Nadel- und Laubbäume
		512	0.1 %	Wasserfläche
132	2314			Deponien und Abraumhalden
		133	48.7 %	Unversiegelte gebäudelose Flächen
		321	16.5 %	Inhomogenes Grünland
		324	16.0 %	Büsche, Sträucher, junge Bäume
		231	11.0 %	Homogenes Grünland
		121	2.1 %	Hallen und andere Anlagen
		311	2.0 %	Laubbäume
		512	1.6 %	Wasserfläche
		233	0.6 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		122	0.4 %	Versiegelte gebäudelose Flächen
		333	0.3 %	Spärliche Vegetation
		312	0.3 %	Nadelbäume
		313	0.3 %	Nadel- und Laubbäume
		113	0.1 %	Häuser (Versiegelung 30-50 %)
		112	0.1 %	Häuser (Versiegelung 50-80 %)
133	2315			Baustellen
		133	99.2 %	Unversiegelte gebäudelose Flächen
		231	0.7 %	Homogenes Grünland
		122	0.1 %	Versiegelte gebäudelose Flächen
141	3413			Städtische Grünflächen
		233	35.1 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		231	21.3 %	Homogenes Grünland
		311	17.5 %	Laubbäume
		242	16.4 %	Mischflächen (regelmäßige Struktur)
		324	4.3 %	Büsche, Sträucher, junge Bäume
		313	3.3 %	Nadel- und Laubbäume
		312	2.1 %	Nadelbäume

CLC Klasse	MeMi Klasse	Zugeordnete LB Klasse	Relativer Anteil pro MeMi Klasse	Bezeichnung
142	3414			Sport- und Freizeitanlagen
		231	31.5 %	Homogenes Grünland
		242	30.8 %	Mischflächen (regelmäßige Struktur)
		233	11.6 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		133	6.8 %	Unversiegelte gebäudelose Flächen
		121	6.5 %	Hallen und andere Anlagen
		311	4.0 %	Laubbäume
		113	3.9 %	Häuser (Versiegelung 30-50 %)
		312	1.8 %	Nadelbäume
		313	1.3 %	Nadel- und Laubbäume
		112	0.8 %	Häuser (Versiegelung 50-80 %)
		324	0.6 %	Büsche, Sträucher, junge Bäume
		122	0.3 %	Versiegelte gebäudelose Flächen
		331	0.1 %	Sandflächen
211	3810			Nicht bewässertes Ackerland
		211	99.6 %	Ackerland
		324	0.3 %	Büsche, Sträucher, junge Bäume
		121	0.1 %	Hallen und andere Anlagen
221	3710			Weinbauf Flächen
		221	100.0 %	Weinbau
222	3711			Obst- und Beerenobstbestände
		233	60.1 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		222	31.6 %	Obst und Beerenobst
		224	8.3 %	Hopfen
231	3100			Wiesen und Weiden
		231	97.8 %	Homogenes Grünland
		233	2.1 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		242	0.1 %	Mischflächen (regelmäßige Struktur)
311	5100			Laubwälder
		311	100.0 %	Laubbäume
312	5200			Nadelwälder
		312	100.0 %	Nadelbäume
313	5300			Mischwälder
		313	100.0 %	Nadel- und Laubbäume
321	3158			Natürliches Grünland
		321	100.0 %	Inhomogenes Grünland

CLC Klasse	MeMi Klasse	Zugeordnete LB Klasse	Relativer Anteil pro MeMi Klasse	Bezeichnung
322	4213			Heiden und Moorheiden
		322	100.0 %	Zwergsträucher (Heide)
324	4333			Wald-Strauch-Übergangsstadien
		324	99.3 %	Büsche, Sträucher, junge Bäume
		333	0.6 %	Spärliche Vegetation
		233	0.1 %	Grasland mit Bäumen (< 50 %)
331	2133			Strände, Dünen und Sandflächen
		331	75.8 %	Sandflächen
		336	24.2 %	Lockergestein
332	2134			Felsflächen ohne Vegetation
		332	100.0 %	Fels
333	2135			Flächen mit spärlicher Vegetation
		333	100.0 %	Spärliche Vegetation
334	2136			Brandflächen
		334	100.0 %	Brandfläche
335	1810			Gletscher und Dauerschneegebiete
		335	100.0 %	Schnee (permanent) und Eis
411	2810			Sümpfe
		411	83.6 %	Sumpf
		413	16.4 %	Sumpf mit Büschen/Bäumen < 50 %
412	2711			Torfmoore
		412	81.5 %	Moor
		414	18.5 %	Moor mit Büschen/Bäumen < 50 %
421	2910			Salzwiesen
		421	100.0 %	Salzwiesen (Küste)
423	1415			In der Gezeitenzone liegende Flächen
		423	100.0 %	Watt
511	1210			Gewässerläufe
		511	100.0 %	Wasserlauf
512	1050			Wasserflächen
		512	100.0 %	Wasserfläche
521	1320			Lagunen
		521	100.0 %	Lagune
522	1330			Mündungsgebiete
		522	100.0 %	Mündungstrichter
523	1310			Meere und Ozeane
		523	100.0 %	Offenes Meer

8.5 Anteil verschiedenen METRAS-50 Oberflächenbedeckungsklassen an den Landbedeckungen (LB) in LBM-DE2012

Die LB Klassen enthalten nicht immer Oberflächenbedeckungen, die die physikalischen Charakteristiken der Oberflächen widerspiegeln. Daher werden diese Anteile festgelegt und jeder LB Klasse anteilig eine oder mehrere METRAS-50 Klassen zugewiesen (Tabelle 11).

Tabelle 11: Anteile der METRAS-50 Klassen an den Landbedeckungen (LB)

LB Klasse	Flächenanteil in %	Zugeordnete METRAS-50 Klasse	Relativer Anteil pro LB Klasse	Bezeichnung
111	0.1			Häuser (Versiegelung > 80 %)
		6006	90.0 %	städtische Fläche, Gebäude >11 m und umgebende versiegelte Flächen
		3100	5.0 %	Gras, kurz
		4340	2.5 %	Büsche, kurz
		5100	2.5 %	Laubwald, sommergrün
112	4.1			Häuser (Versiegelung 50 % - 80 %)
		6006	35.0 %	städtische Fläche, Gebäude >11 m und umgebende versiegelte Flächen
		6005	30.0 %	städtische Fläche, Gebäude <11 m und umgebende versiegelte Flächen
		3100	17.5 %	Gras, kurz
		4340	9.0 %	Büsche, kurz
		5100	8.5 %	Laubwald, sommergrün
113	2.0			Häuser (Versiegelung 30 % - 50 %)
		3100	30.0 %	Gras, kurz
		6006	25.0 %	städtische Fläche, Gebäude >11 m und umgebende versiegelte Flächen
		6005	15.0 %	städtische Fläche, Gebäude <11 m und umgebende versiegelte Flächen
		4340	15.0 %	Büsche, kurz
		5100	15.0 %	Laubwald, sommergrün
121	1.5			Hallen und andere Anlagen
		2220	50.0 %	Asphalt
		2105	10.0 %	kahler Boden
		2230	10.0 %	Beton
		2240	10.0 %	Ziegel/Backstein/Pflaster
		2250	10.0 %	Stahl
		6000	5.0 %	Städtisch geprägte Fläche
		3100	2.5 %	Gras, kurz
		4314	2.5 %	Büsche, trockene Böden

LB Klasse	Flächen- anteil in %	Zugeordnete METRAS-50 Klasse	Relativer Anteil pro LB Klasse	Bezeichnung
122	0.2			Versiegelte gebäudelose Flächen
		2220	75.0 %	Asphalt
		2105	20.0 %	kahler Boden
		2230	5.0 %	Beton
133	0.3			Unversiegelte gebäudelose Flächen
		2106	65.0 %	Sand
		2240	20.0 %	Ziegel/Backstein/Pflaster
		2107	5.0 %	Kies/Schotter
		2122	5.0 %	Sanddünen mit Gras
		3100	5.0 %	Gras, kurz
211	30.5			Ackerland
		3500	100.0 %	Anbaufläche/Ackerland
221	0.3			Weinbau
		3863	100.0 %	Ackerland mit Sandboden
222	0.2		100.0 %	Obst und Beerenobst
		3830	100.0 %	bewässertes Ackerland
224	<0.1			Hopfen
		3500	80.0 %	Anbaufläche/Ackerland
		3100	20.0 %	Gras, kurz
231	16.3			Homogenes Grünland
		3138	100.0 %	Gras, lang
233	1.0			Grasland mit Bäumen (< 50 %)
		5811	100.0 %	Wälder und Büsche
242	0.4			Mischflächen (regelmäßige Struktur)
		5300	100.0 %	Mischwald
311	9.1			Laubbäume
		5100	100.0 %	Laubwald, sommergrün
312	14.0			Nadelbäume
		5200	100.0 %	Nadelwald
313	4.0			Nadel- und Laubbäume
		5300	100.0 %	Mischwald
321	0.5			Inhomogenes Grünland
		3138	100.0 %	Gras, lang
322	0.3			Zwergsträucher (Heide)
		4210	100.0 %	Heide
324	0.7			Büsche, Sträucher, junge Bäume
		4340	100.0 %	Büsche, kurz

LB Klasse	Flächen- anteil in %	Zugeordnete METRAS-50 Klasse	Relativer Anteil pro LB Klasse	Bezeichnung
331	0.1			Sandflächen
		2106	100.0 %	Sand
332	0.1			Fels
		2108	100.0 %	Fels
333	0.1			Spärliche Vegetation
		3100	100.0 %	Gras, kurz
334	<0.1			Brandfläche
		2240	100.0 %	Ziegel/Backstein/Pflaster
335	<0.1			Schnee (permanent) und Eis
		1600	100.0 %	Schnee und Eis
336	<0.1			Lockergestein
		2107	100.0 %	Kies/Schotter
411	0.1			Sumpf
		5656	100.0 %	Mischwald, nass
412	0.2			Moor
		3148	100.0 %	Gras, lang, nass
413	<0.1			Sumpf mit Büschen/Bäumen < 50 %
		2712	100.0 %	Sträucher, nass
414	<0.1			Moor mit Büschen/Bäumen < 50 %
		2712	100.0 %	Sträucher, nass
421	0.1			Salzwiesen (Küste)
		2911	100.0 %	Salzgrube
423	0.8			Watt
		1411	100.0 %	Watt
511	0.3			Wasserlauf
		1222	100.0 %	Gewässer, frisch, fließend
512	1.1			Wasserfläche
		1100	100.0 %	Gewässer, frisch, stehend
521	0.3			Lagune
		1300	100.0 %	Salzwasser
522	0.1			Mündungstrichter
		1000	100.0 %	Wasser (allgemein)
523	5.0			Offenes Meer
		1300	100.0 %	Salzwasser

Quellenverzeichnis

- Abramowitz, M., Stegun, I. A., und Romer, R. H. (1988): Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables. AAPT.
- Adams, J. C., Brainerd, W. S., Hendrickson, R. A., Maine, R. E., Martin, J. T. und Smith, B. T. (2008): The Fortran 2003 Handbook. Springer.
- Baldauf, M., Seifert, A., Förstner J., Majewski, D., Raschendorfer, M. und Reinhardt, T. (2011): Operational convective-scale numerical weather prediction with the Cosmo model: description and sensitivities. Monthly Weather Review, 139 (12), 3887–3905.
- Büttner, G. und Kosztra, B. (2007): CIC2006 Technical Guidelines. Tech. rep.
- Carson, D. und Richards, P. (1978): Modelling surface turbulent fluxes in stable conditions. Boundary-Layer Meteorology, 14 (1), 67–81.
- Claussen, M. (1991): Estimation of areally-averaged surface fluxes. Boundary-Layer Meteorology, 54 (4), 387–410.
- Copernicus (2017): Orographiedatensatz EU-DEM. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-eu-dem>, aufgerufen im September 2017.
- Cuxart, J., Holtslag, A.A.M., Beare, R.J., Bazile, E., Beljaars, A., Cheng, A., Conangla, L., EK, M., Freedman, F., Hamdi, R., Kerstein, A., Kitagawa, H., Lenderink, G., Lewellen, D., Mailhot, J., Mauritsen, T., Perov, V., Schayes, G., Steebevel, G.-J., Svensson, G. Taylor, P., Wenig, W., Wunsch, S., XU, K.-M. (2006): Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer. Boundary-Layer Meteorology, 118 (2), 273–303.
- Dyer, A. (1974): A review of flux-profile relationships. Boundary-Layer Meteorology, 7 (3), 363–372.
- Grawe, D. und Schlünzen, K.H. (2018): Preparation of land-cover and orography data for GRITOP-L. METRAS Technical Report 12, Meteorologisches Institut, CEN, Universität Hamburg, 75; <http://www.mi.uni-hamburg.de/metraspl>.
- Gryning, S.-E., Batchvarova, E., Brümmer, B., Jørgensen, H. und Larsen S. (2007): On the extension of the wind profile over homogeneous terrain beyond the surface boundary layer. Boundary-Layer Meteorology, 124 (2), 251–268.
- Herbert, F. und Kramm G., (1985): Trockene Deposition reaktionsträger Substanzen, beschrieben mit einem diagnostischen Simulationsmodell der bodennahen Luftschicht. Atmosphärische Spurenstoffe und ihr physikalisch-chemisches Verhalten, Springer, 190–209.
- Hicks, B. (1976): Wind profile relationships from the ‘Wangara’ experiment. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 102 (433), 535–551.
- Högström, U. (1996): Review of some basic characteristics of the atmospheric surface layer. Boundary-Layer Meteorology, 78 (3), 215–246.
- Konow, H. (2015): Tall wind profiles in heterogeneous terrain. Ph.D. thesis, Universität Hamburg.
- Lange, I. (2011): Datenauswertung zur messwertgestützten turbulenzparametrisierung in Ausbreitungsmodellen. Tech. rep., Universität Hamburg, Klimacampus.
- Lüpkes, C. und Schlünzen, K. H. (1996): Modelling the Arctic convective boundary-layer with different turbulence parameterizations. Boundary-layer Meteorology, 79 (1-2), 107–130.
- Mölders, N. und Kramm, G. (2014): Lectures in Meteorology. Springer.
- Pichler, H. (1997): Dynamik der Atmosphäre, Spektrum. Heidelberg.
- Schlünzen, K. H., Flagg D., Fock B., Gierisch A., Lüpkes C., Reinhardt V., und Spensberger C. (2012a): Scientific documentation of the multiscale model system M-SYS (METRAS, MITRAS, MECTM, MICTM, MESIM). MEMI Technical Report 4, Meteorological Institute, University of Hamburg. <http://www.mi.uni-hamburg.de/metras>
- Schlünzen, K. H., Bungert, U., Fock, B.H., Flagg, D., Gierisch, A., Grawe, D., Kirschner, P., Lüpkes, C., Reinhardt, V., Ries, H., Spensberger, C. und Uphoff, M. (2012b): Technical documentation of the multiscale model system M-SYS (METRAS, MITRAS, MECTM, MICTM, MESIM). MEMI Technical Report 3, Meteorological Institute, University of Hamburg. <http://www.mi.uni-hamburg.de/metras>

- Schlünzen, K.H. (1994): Mesoscale modelling in complex terrain - an overview on the German nonhydrostatic models. Beitr. Phys. Atmosph., 67, 243 - 253.
- Schlünzen, K.H. und Grawe, D. (2018): GRITOP-L. Präprozessor zur Initialisierung von Topographiedaten für das Modell METRAS. METRAS Technical Report 11, Meteorologisches Institut, CEN, Universität Hamburg, 24 S, <http://www.mi.uni-hamburg.de/metraspcl>
- Schlünzen, K.H. und Katzfey, J.J. (2003): Relevance of sub-grid-scale land-use effects for mesoscale models. Tellus, 55A, 232-246. DOI: 10.1034/j.1600-0870.2003.00017.x
- Schlünzen, K.H., Petrik, R., Grawe, D. (2017): METRAS-PCL - Version 5.0.0 –Benutzerhandbuch. Meteorologisches Institut, CEN, Univ. Hamburg, <http://www.mi.uni-hamburg.de/metraspcl>
- Skamarock, W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Wang W., und Powers J. G. (2005): A description of the advanced research WRF version 2. Tech. rep., DTIC Document.
- TA Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24.06.2002. GMBI. Nr. 25-29, S. 511.
- VDI (2000): VDI 3945 Blatt 3 - Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodelle – Partikelmodell. Berlin, Beuth-Verlag.
- VDI (2002): VDI 3783 Blatt 8 - Umweltmeteorologie - Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. Berlin, Beuth-Verlag.
- VDI (2015): VDI 3783 Blatt 16 - Umweltmeteorologie – Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle, Verfahren zur Anwendung in Genehmigungsverfahren nach TA Luft. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI (2017a): VDI 3783 Blatt 7 - Umweltmeteorologie – Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. Berlin, Beuth-Verlag.
- VDI (2017b): VDI 3783 Blatt 8 - Umweltmeteorologie – Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. Berlin, Beuth-Verlag.
- von Salzen, K., Claussen, M. und Schlünzen, K. H. (1996): Application of the concept of blending height to the calculation of surface fluxes in a mesoscale model. Meteorol. Zeitschrift, NF 5, 60 – 66.
- Xu, D. und Taylor, P. A. (1997): On turbulence closure constants for atmospheric boundary-layer modelling: neutral stratification. Boundary-Layer Meteorology, 84 (2), 267–287.