

Müller-BBM Industry Solutions GmbH
Helmut-A.-Müller Straße 1 - 5
82152 Planegg

Telefon +49(89)85602 0
Telefax +49(89)85602 111

www.mbbm-ind.com

Dr. Johannes Sander
Telefon +49(89)85602 3142
johannes.sander@mbbm-ind.com

07. September 2023
M176504/01 Version 1 SAND/RLG

Erweiterung Diabas-Tagebau Huneberg-Ost

Prognostische Windfeldbibliothek

Bericht Nr. M176504/01

Auftraggeber:

Harzer Pflastersteinbrüche
Telge & Eppers
Niederlassung der KEMNA BAU
Andreae GmbH & Co. KG
Am Güterbahnhof 5
38667 Bad Harzburg

Bearbeitet von:

Dr. Johannes Sander

Berichtsumfang:

Insgesamt 37 Seiten, davon
13 Seiten Textteil,
6 Seiten Anhang A und
18 Seiten Anhang B

Müller-BBM Industry Solutions GmbH
HRB München 86143
USt-IdNr. DE812167190

Geschäftsführer:
Joachim Bittner, Walter Grotz,
Dr. Carl-Christian Hantschk,
Dr. Alexander Ropertz

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1 Situation und Aufgabenstellung	4
2 Prognostische Windfelder	5
2.1 Prognostisches mesoskaliges Windfeldmodell	6
2.2 TA-Luft-Modellgebiet	6
2.3 Prognostisches Modellgebiet	6
2.4 Glättung der Randbereiche	7
2.5 Test der Modellgebiete	7
2.6 Qualitätskontrolle	8
3 Windfeldbibliothek	9
4 Ersatzanemometerposition	10
5 Lokale Kaltluft	11
6 Literatur	13
7 Anhang A: Prüfliste für die Erstellung einer Windfeldbibliothek	14
8 Anhang B: Qualitätssicherung prognostisches Windfeld	20

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Erstellung einer Windfeldbibliothek, die als Grundlage für Ausbreitungsrechnungen von Luftschadstoffen oder Gerüchen nach Anhang 2 der TA Luft [1] dient.

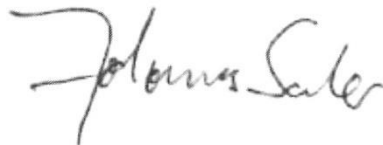
Zur Berücksichtigung der komplexen orographischen Struktur des gegliederten Geländes und der damit verbundenen dynamisch und thermisch induzierten Strömungsverhältnisse müssen für die Immissionsprognose Windfelder auf Grundlage eines prognostischen Windfeldmodells entsprechend der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 16 [3] erstellt werden.

Das verwendete Modell muss dabei den Anforderungen der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 7 (2017) [2] entsprechen.

Das Modellgebiet des prognostischen mesoskaligen Modells umfasst das Rechengebiet, das für die Immissionsprognose eingestellt werden soll, und erfüllt in seiner Ausdehnung die Vorgaben der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 16.

Testrechnungen zeigen, dass die gewählte Gitterweite des Modells ausreichend ist, um die topografischen Einflüsse zu erfassen und dass die Gitterweite keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Die prognostischen Windfeldsimulationen wurden nach VDI-Richtlinie 3783 Blatt 16 im Einzelfall als auch in der Konsistenz geprüft. Ein Prüfbericht nach VDI-Richtlinie 3783 Blatt 16 dokumentiert die Erstellung der Windfeldbibliothek und der ausgeführten Qualitätskontrollen.



Dr. Johannes Sander

1 Situation und Aufgabenstellung

Die Firma Harzer Pflastersteinbrüche Telge & Eppers, eine Niederlassung der KEMNA BAU Andrae GmbH & Co. KG, plant am Standort Huneberg im Landkreis Goslar die Erweiterung ihres bestehenden Diabas-Tagebaus durch Aufschluss eines Erweiterungsgebietes (Abbauüberführung).

Gegenstand der geplanten Beantragung ist der Gesteinsabbau auf dem vorgesehenen Erweiterungsgebiet Huneberg-Ost durch Bohren und Sprengen östlich der bisherigen Abbaufäche, das Vorbrechen des Gesteins im Bereich des Erweiterungsgebietes sowie die Verbringung des Rohmaterials zu der Aufbereitungsanlage am bestehenden Standort. Dem Abbau vorausgehend muss jeweils der anstehende Oberboden abgeschoben und umgelagert werden. Die vorhandenen Betriebsanlagen zur Aufbereitung, die Haldenbevorratung, die jährliche Abbaurate sowie das damit verbundene Verkehrsaufkommen werden hierbei nicht maßgeblich verändert.

Für die geplante Erweiterung soll eine Staubimmissionsprognose nach den Vorgaben der TA Luft 2021 erstellt werden.

Aufgrund der komplexen orographischen Struktur und der damit verbundenen dynamisch und ggf. auch thermisch induzierten Strömungsverhältnisse ist die Immissionsprognose auf Grundlage von Windfeldern, die mit einem prognostischen Windfeldmodell entsprechend VDI-Richtlinie 3783 Blatt 16 [3] erstellt werden, durchzuführen.

2 Prognostische Windfelder

Die Prognose von Staub oder Schadstoffen erfordert Windfelder, mit denen eine Ausbreitungsrechnung dieser Stoffe erfolgt. Bei der Wahl der Berechnungsmethode der Windfelder ist auf die Steilheit des Geländes zu achten. Nach Nr. 12 des Anhangs 2 der TA Luft 2021 [1] sind prognostische mesoskalige Windfelder dann zu verwenden, wenn die Steigungen des Geländes den Wert 1 : 5 überschreiten und/oder wesentliche Einflüsse von lokalen Windsystemen oder anderen meteorologischen Besonderheiten nicht ausgeschlossen werden können. Dabei muss das verwendete Modell den Anforderungen der VDI 3783 Blatt 7 (2017) [2] entsprechen.

Die Berechnung der Windfelder erfolgt dabei nach den Verfahrensregeln der VDI 3783 Blatt 16 [3]. Dieses Verfahren sieht vor, dass eine Windfeldbibliothek erstellt wird, für die zunächst eine begrenzte Anzahl von Basiswindfeldern mittels eines prognostischen Modells berechnet werden. Aus diesen Basiswindfeldern werden folgend Windfelder interpoliert, sodass zu jeder Stunde eines Jahres geeignete Windfelder zur Immissionsprognose vorliegen. Die Interpolation berücksichtigt die Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier, wie sie in der TA Luft 2021 [1] genannt sind, sowie die Windrichtung.

In der Regel werden für die Abbildung der dynamisch induzierten Strömungssysteme 90 Basiswindfelder erstellt: jeweils zu den Ausbreitungsklassen I, II, III/1, III/2 und V (nach Klug/Manier), sowie zu 18 Windrichtungen, die jeweils eine Windrichtungs-klasse von 20° Breite abdecken.

Die Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier berücksichtigen unterschiedliche Temperaturgradienten in der bodennahen Luftschicht und verschiedene Windgeschwindigkeiten des großräumigen Windes (des sog. geostrophischen Windes), der in großer Höhe über das Untersuchungsgebiet weht. Für die bodennahe Luftschicht wird eine Höhe von 1.500 m angenommen und für die darüber liegende Luft eine leicht stabile Standardatmosphäre mit einem Temperaturgradienten von 0.0035 K/m.

Die genutzten Parameter sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1. Rechenwerte des potenziellen Temperaturgradienten und der geostrophischen Windgeschwindigkeit, die für die Berechnung der Basiswindfelder genutzt wurden [1].

Ausbreitungsklasse Nach Klug/Manier	Temperaturgradient	Windgeschwindigkeit
I	0,008 K/m	1,6 m/s
II	0,0057 K/m	2,5 m/s
III/1	0,0032 K/m	7,8 m/s
III/2	0,0012 K/m	5,6 m/s
V	0,0 K/m	3,8 m/s

2.1 Prognostisches mesoskaliges Windfeldmodell

Als mesoskaliges, prognostisches Rechenmodell wird das Modell METRAS-PCL [5] mit Version 5.0.0 eingesetzt, welches die Vorgaben der VDI 3783 Blatt 7 [2] erfüllt. METRAS-PCL wurde auf Basis des Anwendermodells METRAS-PC sowie des wissenschaftlichen Modells METRAS zu dem Zweck entwickelt, die Anforderungen der TA Luft sowie der o. g. VDI 3783 Blatt 7 [2] zu erfüllen. Hierbei wurde eine Turbulenzparametrisierung des Windfeldmodells über komplexem Gelände verwendet.

Die Modellrechnungen erfolgen für die dynamisch induzierten Windfelder ohne Tagesgang, als quasi-stationäre Rechnung, bei der sich die Strukturen und Windgeschwindigkeiten nach genügend langer Rechenzeit nicht mehr wesentlich ändern.

2.2 TA-Luft-Modellgebiet

Aus dem Modell zur Berechnung der Immissionen, kurz TA-Luft-Modell, wurde das Modellgitter in Form der AUSTAL-Parameter-Datei *austal.txt*, sowie der topografischen Daten als *srfa0N1.dmta* Dateien (wobei mit N die Nummer des Gitters 1, 2, ... bezeichnet ist) zur Verfügung gestellt. Die Datei mit dem feinsten Gitter enthält zudem die Gebäudehöhen.

Bei Berücksichtigung von Kaltluftfeldern, die in AUSTAL selbst technisch nicht möglich sind, erfolgten die Ausbreitungsrechnungen mit LASAT in AUSTAL und damit in TA Luft konformer Konfiguration. Dies wurde unter anderem dadurch sichergestellt, indem die Eingangsdaten der LASAT Berechnungen mittels AUSTAL erstellt wurden.

Die Ausdehnung des TA-Luft-Modells ist im Anhang näher erläutert und dargestellt.

2.3 Prognostisches Modellgebiet

Alle Daten, die für die Erzeugung der Topografie und des Modellgitters von METRAS-PCL benötigt werden, wurden vom Modellentwickler aufgearbeitet und durch das Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt. Zudem stellt der Modellentwickler das Programm GRITOP-L [6] bereit, welches die topografischen Daten in METRAS-PCL einbindet. Die von GRITOP-L genutzte Geländehöhe basiert auf EUDEM [7] und die Oberflächenbedeckung, aus der die Rauigkeit und andere thermische Eigenschaften des Bodens abgeleitet werden, auf CLC5 [8] innerhalb Deutschlands und CORINE [9] außerhalb Deutschlands. Grundlage für CLC5 ist das Landbedeckungsmodell Deutschland 2018 in der überarbeiteten Version von 2021 [11].

Das Modellgebiet des mesoskaligen, prognostischen Modells muss nicht nur das Untersuchungsgebiet der Immissionsprognose vollständig abdecken, sondern weit darüber hinausreichen. Damit wird sichergestellt, dass sich die lokalen Windgeschwindigkeiten den topografischen Einflüssen anpassen.

Nach VDI 3783 Blatt 16 [3] soll die horizontale Modellgebietsgröße das 3-fache der Ausdehnung des Untersuchungsgebietes des TA-Luft-Modells jedoch mindestens 15 km × 15 km erfassen.

Das genutzte Rechengebiet erfasst die wesentlichen topografischen Strukturen in dem geforderten, genügend großem Umkreis und deckt das Untersuchungsgebiet der Immissionsprognose vollständig ab.

Die wesentlichen topografischen Strukturen sind die Täler um das Untersuchungsgebiet, deren Talsohle eine Breite von ca. 500 m nicht unterschreiten. Mit Gitterweiten zwischen 90 m bis 130 m wird die formale Anforderung, dass diese Strukturen mit mindestens 3 Gitterzellen erfasst werden, erfüllt.

Die numerischen Details zum Rechengebiet, seiner Ausdehnung und eine Visualisierung finden sich im Anhang.

Die vertikale Ausdehnung des prognostischen Windfeldmodells soll nach VDI 3783 Blatt 16 mindestens 5 km zuzüglich nötiger Randpunkte aufweisen. Um numerisch bedingte Reflexionen vom Oberrand des Modellgebietes auszuschließen, wurde die Höhe vorliegend auf 15 km gesetzt. Analog zur horizontalen Gitterauflösung wird auch das vertikale Gitter nach oben hin gespreizt, und zwar so, dass sowohl die numerische Stabilität und gleichzeitig effiziente Rechenzeiten erreicht werden.

Die vertikale Gitterauflösung beträgt vorliegend in Bodennähe 20 m und wird ab einer Höhe von ca. 80 m über Grund graduell nach oben hin bis auf maximal 1000 m gespreizt. Die obersten Schichten sind nachfolgend äquidistant, um eine zusätzliche Sicherung gegenüber numerischen Reflektionen zu bilden.

2.4 Glättung der Randbereiche

Die VDI 3783 Blatt 16 verlangt eine Glättung orographischer Strukturen innerhalb der Randgebiete des prognostischen Windfeldgitters mit einem Dreipunktfiter, welcher mindestens 10-fach angewendet wird. So wird sichergestellt, dass das verwendete prognostisch mesoskalige Modell in den Randbereichen numerisch stabil bleibt. Das Gitter des Modells METRAS-PCL wird mit dem Programm GATOPOMOD, das zu GRITOP-L gehört, analog nachbearbeitet. In einem Randstreifen, welcher 10 Gitterzellen umfasst, wird die Topografie entsprechend den o. g. Vorgaben der VDI 3783 Blatt 16 gefiltert, um numerische Randartefakte zu vermeiden.

2.5 Test der Modellgebiete

Die Berechnungen des prognostischen Modells werden auf einem horizontalen Gitter ausgeführt, das im Untersuchungsgebiet des TA-Luft-Modells eine konstante Gitterweite besitzt. Außerhalb des TA-Luft-Gitters werden die Gitterzellen bis zu einer maximalen Ausdehnung von 1000 m gespreizt.

Die Gitterweite darf keinen Einfluss auf die berechneten Windfelder haben. Um dies zu prüfen wurden Testrechnungen mit unterschiedlichen Gitterweiten ausgeführt. Alle Testrechnungen wurden für zwei Hauptwindrichtungen (Nordwind und Westwind) und verschiedene Stabilitätsklassen wiederholt.

Die Testrechnungen zeigen sowohl ähnliche Strukturen der horizontalen Windfelder als auch der vertikalen Windfelder im Modellgebiet.

Die Prüfung zeigt, dass die gewählte Gitterweite ausreichend ist, um die topografischen Einflüsse zu erfassen. Ein engeres Gitter ist rechentechnisch aufwendiger

und kann vermieden werden. Außerdem zeigt die weitere Prüfung, dass auch ein gespreiztes Gitter keinen wesentlichen Einfluss auf die Rechenergebnisse hat.

Für die Erstellung der prognostischen Basiswindfelder wurde eine Gitterweite gewählt, die nach außen hin bis zu einer Weite von 1000 m gespreizt wird. Von der Spreizung nicht betroffen ist der Bereich des TA-Luft-Gitters zuzüglich eines um ca. 20 % erweiterten Bereiches, um eventuelle modellbedingte Störungen im Untersuchungsgebiet zu vermeiden.

2.6 Qualitätskontrolle

Die Berechnung der dynamisch induzierten prognostischen Windfelder erfolgt unter der Annahme, dass keine Erwärmung des Bodens durch die solare Strahlung erfolgt und dass kein Antrieb des Windes durch andere Randbedingungen stattfindet. Der einzige Antrieb des Windfeldes ist der großskalige, geostrophische Wind. Es kann deshalb erwartet werden, dass sich das Windfeld nach einer genügend langen Rechenzeit in seiner Struktur nicht mehr ändert.

Nach VDI 3783 Blatt 16 sind die prognostischen Windfeldsimulationen sowohl im Einzelfall als auch in der Konsistenz zu prüfen.

Die Einzelfallprüfung stellt sicher, dass die Simulationen plausibel und numerisch ungestört verlaufen. Sofern die Basiswindfelder einen Gleichgewichtszustand erreicht haben, werden diese für weiterführende Berechnungen herangezogen. Andernfalls sind diese zu verwerfen.

Die Konsistenzprüfung stellt eine Kontrolle aller Simulationsrechnungen im Parameterraum dar. Dabei ist zu kontrollieren, dass der bodennahe Wind mit jeder Drehung in Antriebswindrichtung gleichsinnig dreht, mit zunehmender Windgeschwindigkeit und abnehmender Stabilität weniger stark räumlich strukturiert und die Strömungsstrukturen in sich konsistent sind.

Die Einzelfallprüfung wurde sowohl vor als auch während der Modellläufe durch eine visuelle Inspektion von Windfeldern, die für jede Stunde grafisch aufgearbeitet wurden, geprüft. Dabei wurden Windfelder der ersten acht Stunden dargestellt und zusätzlich der zeitliche Verlauf des Windes an einzelnen Punkten im Modellgebiet vollständig erfasst.

Die Windfelder wurden auf Plausibilität und mögliche Störeinflüsse im Anschluss an die Modellrechnungen in ihrer Konsistenz visuell überprüft.

Es wurde festgestellt, dass sich die Strukturen der Windfelder nach acht Stunden nicht mehr wesentlich ändern, und die Änderungen der Windgeschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf an den Untersuchungspunkten hinreichend gering sind, so dass ein nahezu stationäres Windfeld erreicht wurde.

Die Berechnung aller prognostischer Basiswindfelder erfolgt mit einem Zeitschrittverfahren, das nach acht Stunden beendet wird.

3 Windfeldbibliothek

Die Immissionsprognose basiert auf einer Windfeldbibliothek, die aus den Basiswindfeldern des prognostischen Modells erstellt wird. Dazu werden die Basiswindfelder zunächst auf das Gitter des TA-Luft-Modells horizontal interpoliert.

Das Interpolationsverfahren unterscheidet, ob das Gitter des TA-Luft-Modells feiner oder gröber als das Gitter des prognostischen Modells ist. Für feinere Gitter wird ein flächengewichtetes Interpolationsverfahren erster Ordnung angewandt; für gröbere Gitter erfolgt eine bi-lineare Interpolation über die benachbarten Gitterpunkte.

In der vertikalen Richtung wird eine lineare Interpolation vom Gitter des prognostischen Modells auf das vertikale Gitter des TA-Luft-Modells gewählt. In der bodennächsten Schicht, die vom prognostischen Modell nicht aufgelöst ist, wird ein logarithmisches Windprofil der Prandtl-Schicht angenommen, dem eine Verdrängungshöhe der 6-fachen Rauigkeitslänge aufgeprägt wird.

Nach einer Konsistenzprüfung aller Modellrechnungen erfolgt die Interpolation im sog. Parameterraum. Dort werden die Basiswindfelder zu einer Windfeldbibliothek im Parameterraum aller Ausbreitungsklassen und aller Windrichtungen bi-linear zu Windrichtungsklassen von 10° Breite interpoliert.

Die Interpolation folgt den Vorgaben der VDI 3783 Blatt 16 zur Erstellung einer Windfeldbibliothek und ist für jedes Rechengitter des TA-Luft-Modells auszuführen.

Im letzten Schritt wird die Windfeldbibliothek zur Nutzung mit dem Prognosemodell LASAT [4] aufgearbeitet. Dazu wird die durch die Interpolation verbleibende Restdivergenz mit dem Tool *Lprwnd* aus dem Programmpaket LASAT herausgerechnet. Liegen Gebäude im Prognosegebiet, wird deren Umströmung und die Ausbildung von Turbulenz im Nachlauf der Gebäude durch das Modell LASAT berücksichtigt.

Die Windfeldbibliothek ist damit divergenzfrei und kann für die Immissionsprognose eingesetzt werden.

4 Ersatzanemometerposition

Die Ausbreitungsrechnung mit dem TA-Luft-Modell basiert auf einer AKTerm, in der Stundenwerte der Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Ausbreitungsklasse aus einer Messung hinterlegt sind. In der Ausbreitungsrechnung werden (im Falle dynamisch induzierter Strömungssysteme) jeweils zwei Bibliotheksfelder linear auf einen Stundenwert aus der AKTerm interpoliert. Sofern im Modellgebiet des TA-Luft-Modells keine Windmessung vorliegt, müssen die Messdaten der AKTerm auf einen anderen Standort im Modellgebiet übertragen werden, der sogenannten Ersatzanemometerposition, EAP.

Die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 16 beschreibt ein Verfahren, mit dem eine geeignete EAP bestimmt werden kann. Die EAP muss sich an einer Position befinden, an der die Orografie keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Windverhältnisse aufweist. Deshalb befindet sich die EAP in der Regel auf einer Hochebene oder sanften Kuppenlage. Zudem muss sich der Wind an der EAP gleichsinnig mit dem Wind der freien Anströmung drehen und möglichst wenig von der freien Anströmung abweichen. Die freie Anströmung wird mit einem Referenzprofil des Windes vorgegeben, das mit einer Rauigkeit aus der Landnutzungsklasse Wiesen und Weiden (CLC-Klasse 231 mit Rauigkeitslänge 0,1 m) bestimmt wurde.

Das Verfahren, das in der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 16 beschrieben ist, wurde im Programm TAL-Anemo [10] implementiert und wird mit der Programm Version 1.32/19.07.2014 genutzt. Das Programm berechnet für jede Modellebene mögliche Orte der EAP.

An den möglichen Orten von EAP wurde jeweils die Rauigkeit bestimmt und aus der AKTerm die zugehörige Höhe eines möglichen Ersatzanemometers ermittelt. Ein Abgleich dieser Höhen mit möglichen Modellebenen ergibt die Position des Ersatzanemometers.

Für die weiteren Immissionsprognosen werden die Werte aus Tabelle 2 genutzt.

Tabelle 2. Ersatzanemometerposition und Angaben zum Standort, die in der Immissionsprognose genutzt werden. Koordinatensystem: UTM-32. Die Werte X_a und Y_a sind relative Koordinatenangaben, die in der Software zur Immissionsprognose genutzt werden.

Ersatzanemometerposition	
Rechtswert	603.424
Hochwert	5.747.496
Rauigkeitslänge zur Bestimmung der Höhe des Ersatzanemometers	1,50 m
Hinweise zu Angaben in <i>meteo.def</i> und <i>metlib.def</i>	
X_a	-576
Y_a	2496
Höhe des Ersatzanemometers H_a	20,7 m

5 Lokale Kaltluft

Bei windschwachen, wolkenarmen Wetterlagen können lokale Windströmungen durch die Bewegung bodennaher, kalter Luftschichten entstehen. Die Kaltluft entsteht während der nächtlichen Abkühlung der bodennahen Luft und fließt vorwiegend hangabwärts ab. Ihre Mächtigkeit nimmt dabei im Verlaufe der Nacht zu. Der Abfluss von Kaltluft kann für Immissionsprognosen mit instationären Modellrechnungen des prognostischen mesoskaligen Modells berücksichtigt werden.

Die Kaltluft wird für 4 repräsentative meteorologische Situationen aus verschiedenen Jahreszeiten erfasst. Zu jeder Situation wird eine instationäre Simulation ausgeführt, aus der die Entwicklung der Windsysteme während der ganzen Nacht zu jeder Stunde in der Windfeldbibliothek berücksichtigt wird.

Zum Startzeitpunkt des Modelltages wird von einer windschwachen nachmittäglichen Strahlungswetterlage mit einer gut durchmischten Grenzschicht ausgegangen. Die Bodentemperatur und die Höhe der anfänglichen Grenzschicht hängen von der Jahreszeit ab und sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3. Parameter zur Simulation von Kaltluft.

Jahreszeit	Modelltag	Höhe der Grenzschicht [m]	Bodentemperatur [K]
Frühjahr	21.03	900.0	283.15
Sommer	21.06	1800.0	293.15
Herbst	21.09	900.0	283.15
Winter	21.12	400.0	273.15

Die stündlichen Windfelder werden auf das Gitter des TA-Luft-Modells übertragen. Nachdem die Restdivergenzen beseitigt sind, steht eine Windfeldbibliothek zur Nutzung mit dem TA-Luft-Modell zur Verfügung.

Die Dateien der Windfeldbibliothek sind mit *w9MHHaN1.dmna* bezeichnet, wobei die Nummer 9 ein instationäres Windfeld bedeutet, *M* den Monat bzw. die Jahreszeit (1=Frühling, 2=Sommer, 3=Herbst, 4=Winter) angibt und *HH* die Stunde des Tages. Mit *N* wird die Nummer des Gitters des TA-Luft-Modells gekennzeichnet.

Die zeitliche Zuordnung der Windfelder zu einer AK-Term erfolgt bei LASAT über den Parameter *Wind* in der Datei *meteo.def*. Soll ein Kaltwindfeld verwendet werden, erhält zur betreffenden Stunde der Parameter *Wind* einen Wert *9MHH*.

Da keine Messdaten des Auftretens von Kaltluft für den zu untersuchenden Raum vorhanden waren, wurden angenommen, dass Kaltluft nur im Zeitraum kurz vor Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang, bei Schwachwindlagen und geringer Bewölkung auftritt. Zudem soll die meteorologische Situation über mehrere Stunden gleichbleiben.

Die genannten Bedingungen sind dann gegeben, wenn zwischen der abendlichen Bürgerlichen Dämmerung und der morgendlichen Bürgerlichen Dämmerung eine sehr stabile oder eine stabile Schichtung mit Ausbreitungsklasse I oder II nach Klug/Manier gegeben ist, die mindestens über 3 Stunden anhält und die Windgeschwindigkeit unter einem vorgegebenen Grenzwert liegt. Die numerischen Details sind im Anhang dargestellt.

6 Literatur

- [1] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), (GMBI Nr. 48-54 (72), S. 1049; vom 14. September 2021).
- [2] VDI 3783 Blatt 7: Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle. Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. 2017-05.
- [3] VDI 3783 Blatt 16: Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle. Verfahren zur Anwendung in Genehmigungsverfahren nach TA Luft. 2020-10.
- [4] LASAT Version 3.4.24. Ingenieurbüro Janicke GbR, Überlingen.
- [5] Schlünzen et al.: Referenzimplementierung eines prognostischen mesoskaligen Windfeldmodells für die Ausbreitungsrechnung nach Anhang 3 der TA Luft zur Berücksichtigung von Geländeunebenheiten bei Steigungen 1 : 5. Forschungskennzahl 3712 43 241, UBA-FB 002642, Hrsg. Umweltbundesamt Mai 2019.
- [6] K. H. Schlünzen, Grawe D.: GRITOP-L Präprozessor zur Initialisierung von Topographiedaten für das Modell METRAS. METRAS Technical Report 11. Meteorologisches Institut, CEN, Universität Hamburg. 2018.
- [7] European Digital Elevation Model (EU-DEM). Version 1.1. European Environment Agency (EEA) under the framework of the Copernicus programme.
- [8] CORINE Land Cover 5 ha, CLC5, Stand 2018 (CLC5-2018). Mit Datenaktualisierung auf Grundlage der 2021 überarbeiteten Daten des LBM-DE 2018. GeoBasis-DE/BKG (2021).
- [9] Corine Land Cover (CLC) 2018, Version 2020_20u1. European Environment Agency (EEA) under the framework of the Copernicus programme.
- [10] TAL-Anemo. <https://www.vdi.de/richtlinien/programme/inhalte-zu-richtlinien/vdi-3783-blatt-16> [Letzter Zugriff: 20.01.2022].
- [11] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG): Landbedeckungsmodell für Deutschland (LBM-DE) 2018. <https://gdk.gdi-de.org/geonetwork/srv/api/records/ED7F6DE9-6433-41DA-928A-044837C6EDAA>.

7 Anhang A: Prüfliste für die Erstellung einer Windfeldbibliothek

Prüfliste nach VDI 3783 Blatt 16

Projekt: Prognostische Windfeldbibliothek,
KEMNA BAU-Tagebau Huneberg. Bericht Nr. M176504

Verfasser: Dr. Johannes Sander

Datum: 02.02.2024

Abschnitt in VDI 3783 Blatt 16	Prüfpunkt	Entfällt	Zutreffend/ durchgeführt	Abschnitt im Gutachten
1	Anwendungsbereich			
	Prognostisches Windfeldmodell			
	Windfeld gemäß Anforderungen der VDI 3873 Blatt 7?		<input checked="" type="checkbox"/>	2.1
	Sachverstand und umfangreiche Erfahrung mit mesoskaligen prognostischen Windfeldmodellen vorhanden (z. B. Referenzen)?		<input checked="" type="checkbox"/>	
5.2	Prognostische Modellgebiete erstellen und testen			
	Meteorologische Daten			
	Die meteorologischen Daten repräsentieren die regionalen topografischen Einflüsse?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Gitter des TA-Luft-Modells			
	Rechengebiet und Rechengitter für die Immissionsprognose mit dem TA-Luft-Modell gemäß Vorgaben der TA Luft festgelegt?		<input checked="" type="checkbox"/>	2.2
	Gitter des Windfeldmodells			
	Verwendete Geländehöhe dokumentiert und Wahl des Datensatzes begründet?		<input checked="" type="checkbox"/>	2.3
	Verwendete Rauigkeitslängen und deren Aktualität dokumentiert und Wahl des Datensatzes begründet?		<input checked="" type="checkbox"/>	2.3
	Vertikale Ausdehnung des Windfeldmodells mindestens 5 km zuzüglich der Randpunkte?		<input checked="" type="checkbox"/>	2.3
	Horizontale Gebietsgröße des Windfeldmodells entspricht der dreifachen Ausdehnung des Rechengebiets für die Immissionsprognose nach TA Luft, mindestens aber 15 km x 15 km zuzüglich der Randpunkte?		<input checked="" type="checkbox"/>	2.3

	Im Gebiet des Windfeldmodells alle wesentlichen topografischen Strukturen erfasst, die sich auf die Strömung im Rechengebiet des TA-Luft-Modells auswirken können, aber nicht in den Daten der meteorologischen Zeitreihe enthalten sind?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Anforderungen der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 hinsichtlich minimaler Gitterweite beachtet?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Falls Gitterweite des Windfelds größer als die des TA-Luft-Modells: Alle für die Ausbreitung relevanten Geländestrukturen mit mindestens drei Gitterpunkten aufgelöst?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Falls von dem vorgenannten Punkt abgewichen wurde: Abweichung fachlich begründet?	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Mindestens zehn randparallele Reihen auf halber Strecke zwischen äußerstem Rand des Windfeldmodells und TA-Luft-Rechengebiet?		<input checked="" type="checkbox"/>	
Glättung der Randbereiche				
	Geländehöhe in den Randbereichen des Modellgitters nach Vorgaben der Richtlinie geglättet (Dreipunktfiter, Gewichte wie angegeben, mindestens zehn Anwendungen über mindestens zehn Reihen?)		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Fall 1: Glättung mit dem zur Richtlinie herunterladbaren Programm?	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Fall 2: Glättung mit anderer Implementierung gemäß Richtlinie?		<input checked="" type="checkbox"/>	
Test der Modellgebiete				
	Durch Testrechnungen über mehrere Anströmrichtungen und Stabilitäten nachgewiesen, dass mit dem gewählten Modellgitter die erwarteten topografischen Einflüsse auf die Strömung im Rechengebiet des TA-Luft-Modells hinreichend aufgelöst werden und die Rechnungen numerisch stabil verlaufen		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Allgemeine Darstellung ohne Detailergebnisse der Testrechnungen		<input checked="" type="checkbox"/>	2.5

\\S-muc-fs01\allefirmen\WP\Proj\176\M176504\M176504_01_Ber_1D.DOCX:02. 02. 2024

	Vorgaben der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 hinsichtlich Qualitätskontrolle der Modellrechnungen beachtet?		<input checked="" type="checkbox"/>	
5.3	Prognostische Modellrechnungen			
	Erzeugung der Stützstellen			
	72 prognostische Modellrechnungen (18 Windrichtungen in 20°-Intervallen, beginnend mit einer Anströmung aus Nord in jeder der Ausbreitungsklassen I, II, III/1 und V) durchgeführt und resultierende Windfelder als Stützstellen für die Interpolation im Parameterraum verwendet?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Abweichende Vorgehensweise begründet?	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Antriebsdaten			
	Rechenwerte des potenziellen Temperaturgradienten (unterhalb ca. 1500 m über Grund) und der geostrophisch Windgeschwindigkeit aus Tabelle 1 der Richtlinie verwendet?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Oberhalb ca. 1500 m über Grund ICAO Standardatmosphäre verwendet?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Falls modellspezifisch notwendig: Andere Antriebsdaten erläutert, Konsistenz zu Daten der Tabelle 1 diskutiert?	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Qualitätskontrolle			
	Einzelprüfung jeder Modellrechnung auf Plausibilität und Störeinflüsse durchgeführt?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Allgemeine Darstellung ohne Detailergebnisse		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Konsistenzprüfung aller Modellrechnungen im Parameterraum durchgeführt?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Allgemeine Darstellung ohne Detailergebnisse		<input checked="" type="checkbox"/>	2.6
5.4	Interpolation im Parameterraum			
	Ausreichend viele Stützstellen für bilineare Interpolation im Parameterraum?		<input checked="" type="checkbox"/>	

\\S-muc-fs01\allefirmen\WP\Proj\176\M176504\M176504_01_Ber_1D.DOCX:02.02.2024

	Falls Voraussetzungen für bilineare Interpolation erfüllt, fehlende Windfelder durch bilineare Interpolation gemäß Richtlinie erzeugt?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Fall Voraussetzung für bilineare Interpolation nicht erfüllt, alternative $1/r^2$ Interpolation gemäß Richtlinie verwendet?	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Falls Voraussetzung für bilineare Interpolation nicht erfüllt, anderes alternatives Interpolationsverfahren verwendet und begründet?	<input checked="" type="checkbox"/>		
5.5	Interpolation auf Gitter des TA-Luft-Modells			
	Gitterdefinition			
	Wurden Windkomponenten der exakten Lage der Gitterpunkte zugeordnet (gegebenenfalls Versatz z. B. bei Arakawa C-Gitter, nicht äquidistanten Gittern berücksichtigt?)		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Vertikale Interpolation			
	Lineare Interpolation der kartesischen Komponenten zwischen den Schichten des Windfeldmodells?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Interpolation zwischen Erdboden und erster Rechenfläche des Windfeldmodells mindestens mit logarithmischem Windprofil bei neutraler Schichtung?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Interpolation zwischen Erdboden und ersten Rechenfläche des Windfeldmodells mit stabilitätsabhängigen logarithmischen Windprofilen (z. B. VDI 3878 Blatt 8) dokumentiert?	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Horizontale Interpolation			
	Horizontale Interpolation gemäß Richtlinie ausschließlich innerhalb der Modellschichten des TA-Luft-Modells?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Falls Gitterweite im Zielgitter kleiner als die Gitterweite im Ausgangsgitter: bilineare Interpolation der kartesischen Komponenten in x- und y-Richtung?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Falls Gitterweite im Zielgitter kleiner als die Gitterweite im Ausgangsgitter: flächengewichtete Interpolation der kartesischen Komponenten gemäß Richtlinie?		<input checked="" type="checkbox"/>	

\\S-muc-fs01\allefirmen\WP\Proj\176\M176504\M176504_01_Ber_1D.DOCX:02. 02. 2024

5.6	Berechnung der endgültigen Windfeldbibliothek			
	Windfeld divergenzfrei gerechnet und Methode benannt?		<input checked="" type="checkbox"/>	3
	Modifikation des Windfelds durch Gebäude berücksichtigt und Methode benannt?		<input checked="" type="checkbox"/>	3
6.1	Festlegung der Ersatzanemometerposition			
	Alternative 1: Verfahren gemäß Richtlinie			
	Referenzprofile mit dem gleichen Modell wie die Windfeldbibliothek gemäß Anforderungen der Richtlinie berechnet?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	EAP mit dem zur Richtlinie herunterladbarem Programm TAL-Anemo bestimmt?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	EAP mit einer anderen Implementierung des Verfahrens laut Richtlinie bestimmt und dokumentiert?	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Fall 1: EAP ist damit bereits eindeutig bestimmt und wird so verwendet?	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Fall 2: EAP ist noch nicht eindeutig. Endgültige EAP-Bestimmung wird unter Einbeziehung der Ersatzanemometerhöhe gemäß Abschnitt 6.2 bestimmt.		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Alternative 2: Anderes Verfahren			
	EAP mit fachlicher Begründung abweichend bestimmt und Verfahren dokumentiert?	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Verifiziert, dass and er EAP eine gleichsinnige Drehung des Winds in Anemometerhöhe mit Drehung der Antriebswindrichtung gegeben ist?			
6.2	Festlegung der Ersatzanemometerhöhe			
	Rauigkeiten im Umkreis von 200 m um die unter Abschnitt 6.1 bestimmten EAP (gegebenenfalls unterschiedlich für die Höhenebenen zwischen Boden und 100 m) bestimmt?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Zu jeder Rauigkeit zugehörige Ersatzanemometerhöhe aus der meteorologischen Zeitreihe ausgelesen?		<input checked="" type="checkbox"/>	

	Gültigkeitshöhe der EAP (entsprechend der ausgewerteten Modell-ebene) und Ersatzanemometerhöhen auf Übereinstimmung geprüft?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Fall 1: Nur eine gültige Kombination von EAP und Ersatzanemometerhöhe festgestellt und diese ausgewählt?	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Fall 2: Mehrere gültige Kombinationen von EAP und Ersatzanemometerhöhen gefunden und daraus eine fachlich begründete Auswahl getroffen?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Fall 3: Keine gültige Kombination von EAP und Ersatzanemometerhöhe gefunden oder davon abgewichen. Auswahl der endgültigen EAP und Ersatzanemometerhöhe fachlich begründet?	<input checked="" type="checkbox"/>		
Verwendete EAP				
	Sind EAP und Ersatzanemometerhöhe benannt?		<input checked="" type="checkbox"/>	4

8 Anhang B: Qualitätssicherung prognostisches Windfeld

In einem separaten Anhang werden numerische Informationen zu den gewählten Gittern, Darstellungen der Topografie und Basiswindfelder, die mit METRAS-PCL berechnet wurden, gezeigt.

Anhang

Qualitätssicherung: Prognostisches Windfeld

Projektnummer: M176504

Datum: 05.09.2023

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	1
2	Modellgebiet	2
3	Gelände	2
4	Qualitätssicherung	3
5	Windfelder.....	3
6	Lokale Kaltluft	16

2 Modellgebiet

Das Modellgebiet des prognostischen mesoskaligen Modells besitzt eine Ausdehnung von 51'155 m x 53'332 m, während das Modellgebiet des TA-Luft-Modells eine Ausdehnung von 9'472 m x 9'472 m besitzt. Die Ausdehnung ist um einen Faktor von 5,4 größer und erfüllt somit die Anforderungen der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 16, die einen Faktor von mindestens 3 verlangt. Die Gitterweite des prognostischen Modells beträgt 128 m im Bereich des TA-Luft-Modells.

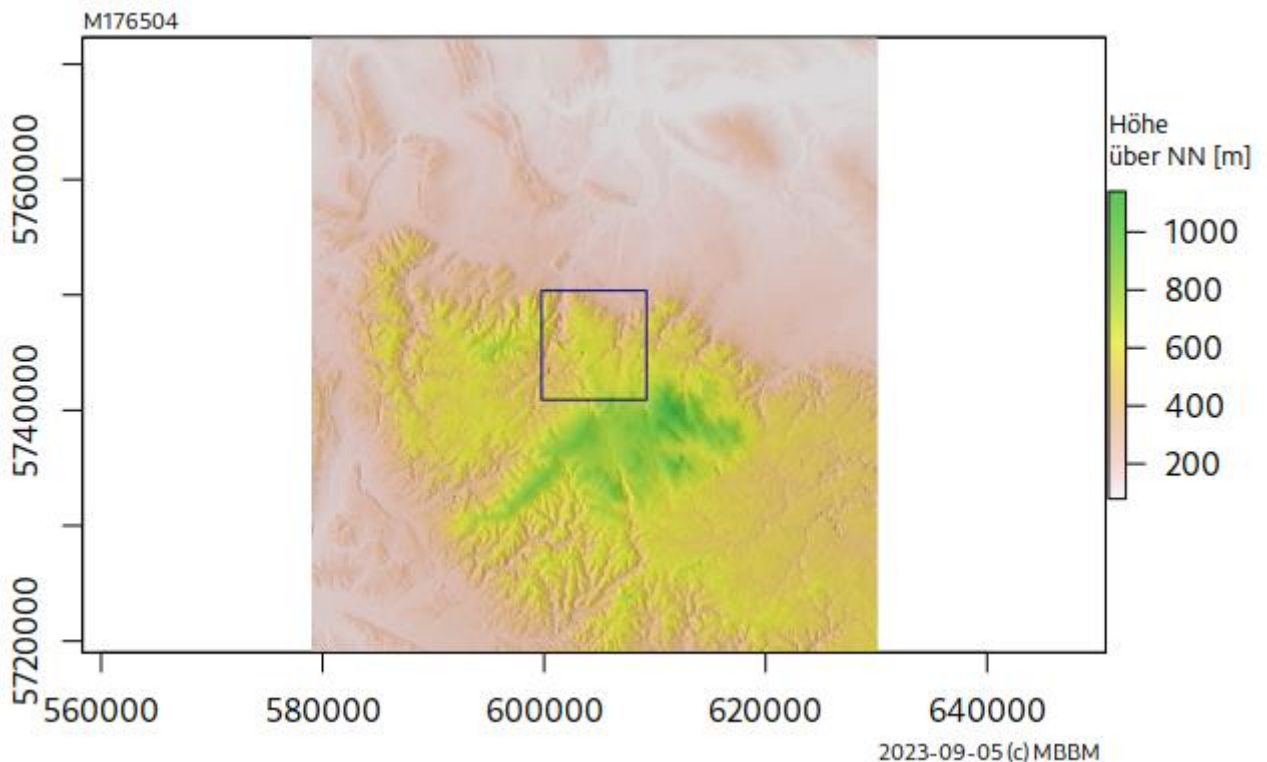


Abbildung 1: Rechengebiet des mesoskaligen prognostischen Modells. Dargestellt ist die topografische Höhe. Der blaue Rahmen zeigt das Untersuchungsgebiet der Immissionsprognose.

3 Gelände

Die TA Luft beschreibt, dass in Gelände mit geringer Steigung ein diagnostisches Modell zur Berechnung der Immissionsprognose genügt. Im Gelände, dessen Steigung den Wert 1 : 5 überschreitet, oder in dem wesentliche Einflüsse von lokalen Windsystemen und andere meteorologische Besonderheiten nicht ausgeschlossen werden können, können die Geländeunebenheiten mit einem prognostischen mesoskaligen Windfeldmodell berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Analyse der Geländesteilheit sind im Folgenden dargestellt. Grundlage ist das Geländemodell EU-DEM, Version 1.1 des Copernicus Land Monitoring Service, mit einer geografischen Auflösung von 25 m. Abweichend zur TA Luft wird die Geländesteigung nicht aus der Höhendifferenz über einer Strecke, die dem Zweifachen der Schornsteinbauhöhe entspricht, sondern über der Rasterweite des zugrunde liegenden Geländemodells bestimmt.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 1. Topografische Analyse des Modellgebietes.

Bezeichnung	Wert
Höchster Geländepunkt	798,6 m
Tiefster Geländepunkt	216,8 m
Maximale Höhendifferenz	581,9 m
Gesamtfläche	92,2 km ²
Rasterweite	25 m
Flächenanteil mit Steigung größer 1:5	34,2 %
Flächenanteil mit Steigung größer 1:20	85,78 %
Koordinatensystem	UTM-32
Modellgebiet	5740904 - 5750376 m Nord 599776 - 609248 m Ost

4 Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung der prognostischen Windfelder wurden insgesamt 4 verschiedene Gitter geprüft. Die Gitter unterscheiden sich in den Gitterweiten und im Aufbau des Gitters.

Jeder Testlauf wurde mit unterschiedlichen Windrichtungen und mit unterschiedlichen Ausbreitungsklassen wiederholt.

5 Windfelder

Im Folgenden sind beispielhaft Basiswindfelder des prognostischen mesoskaligen Modells wiedergegeben. Die Abbildungen zeigen die Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund für verschiedene Ausbreitungsklassen und Windrichtungen.

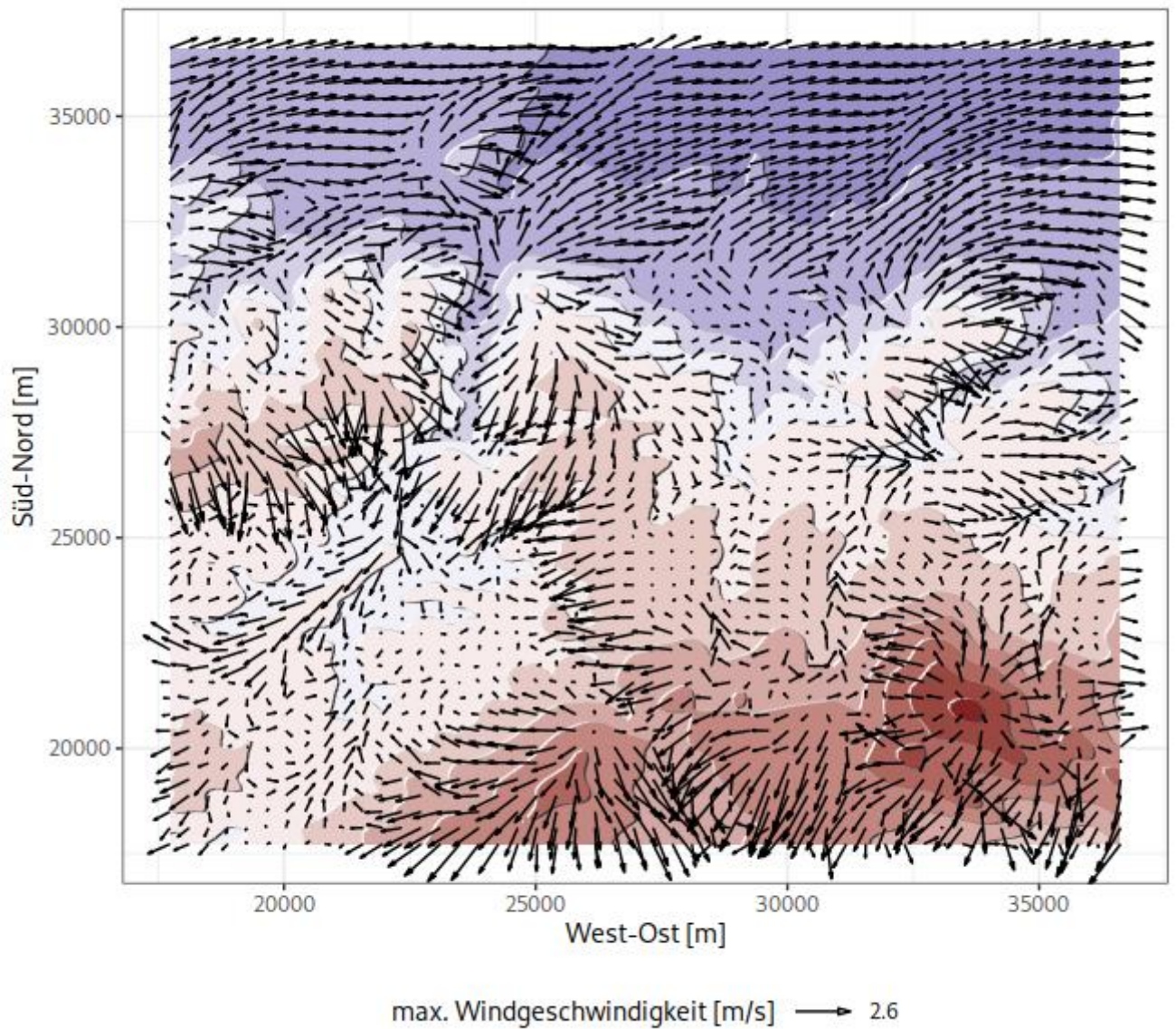


Abbildung 2: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse I und Windrichtung 0°.

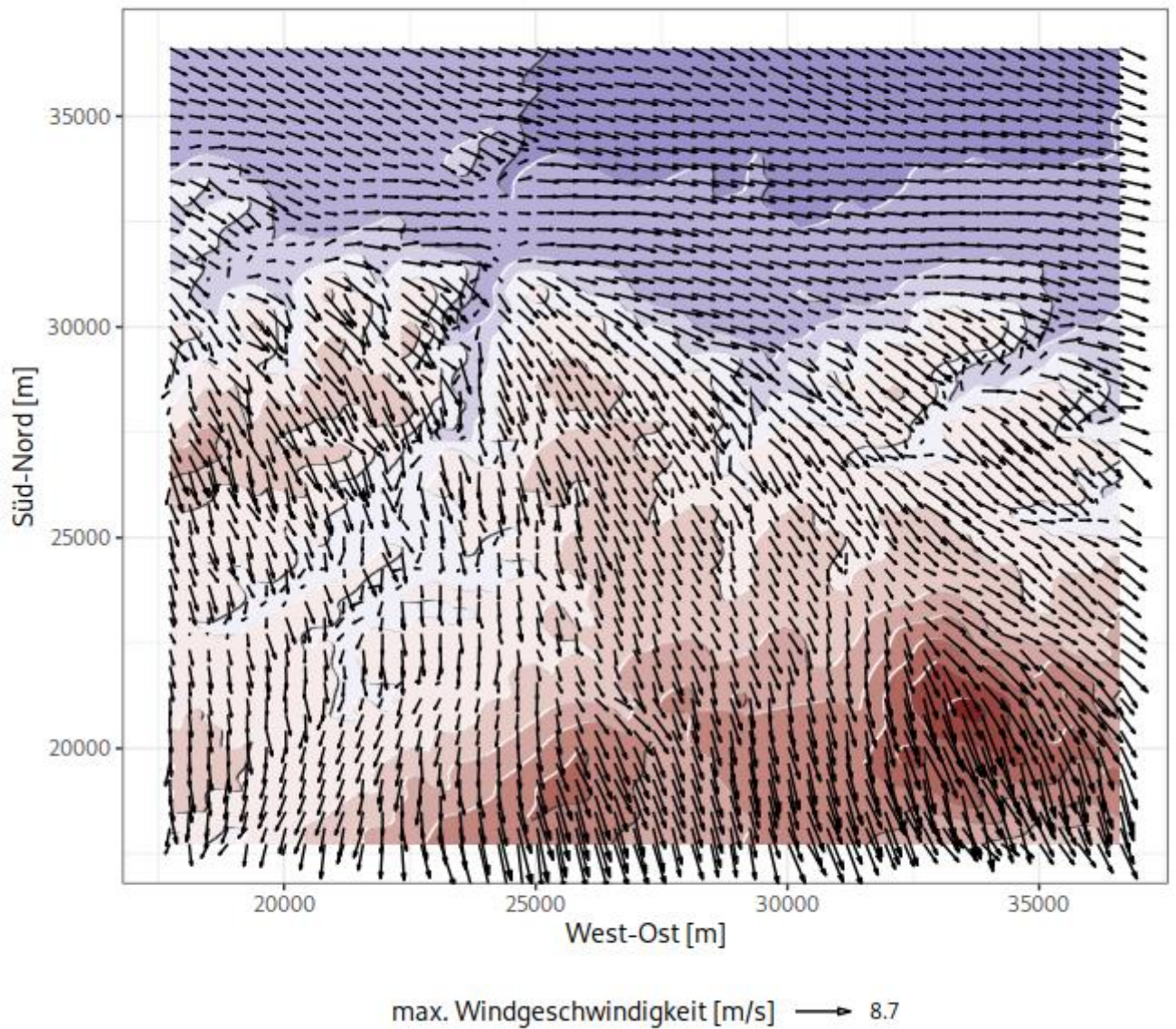


Abbildung 3: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse III_1 und Windrichtung 0°.

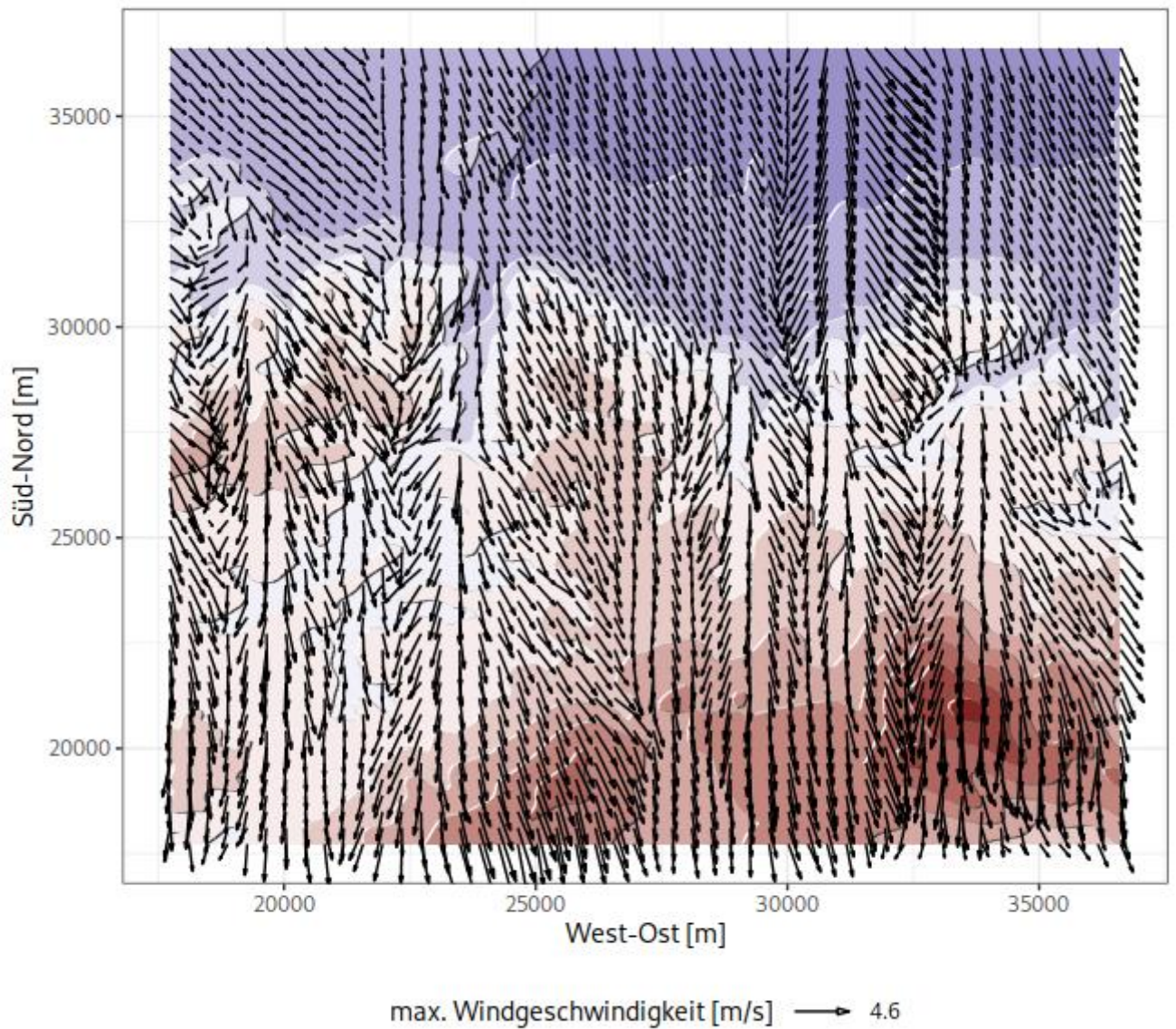


Abbildung 4: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse V und Windrichtung 0°.

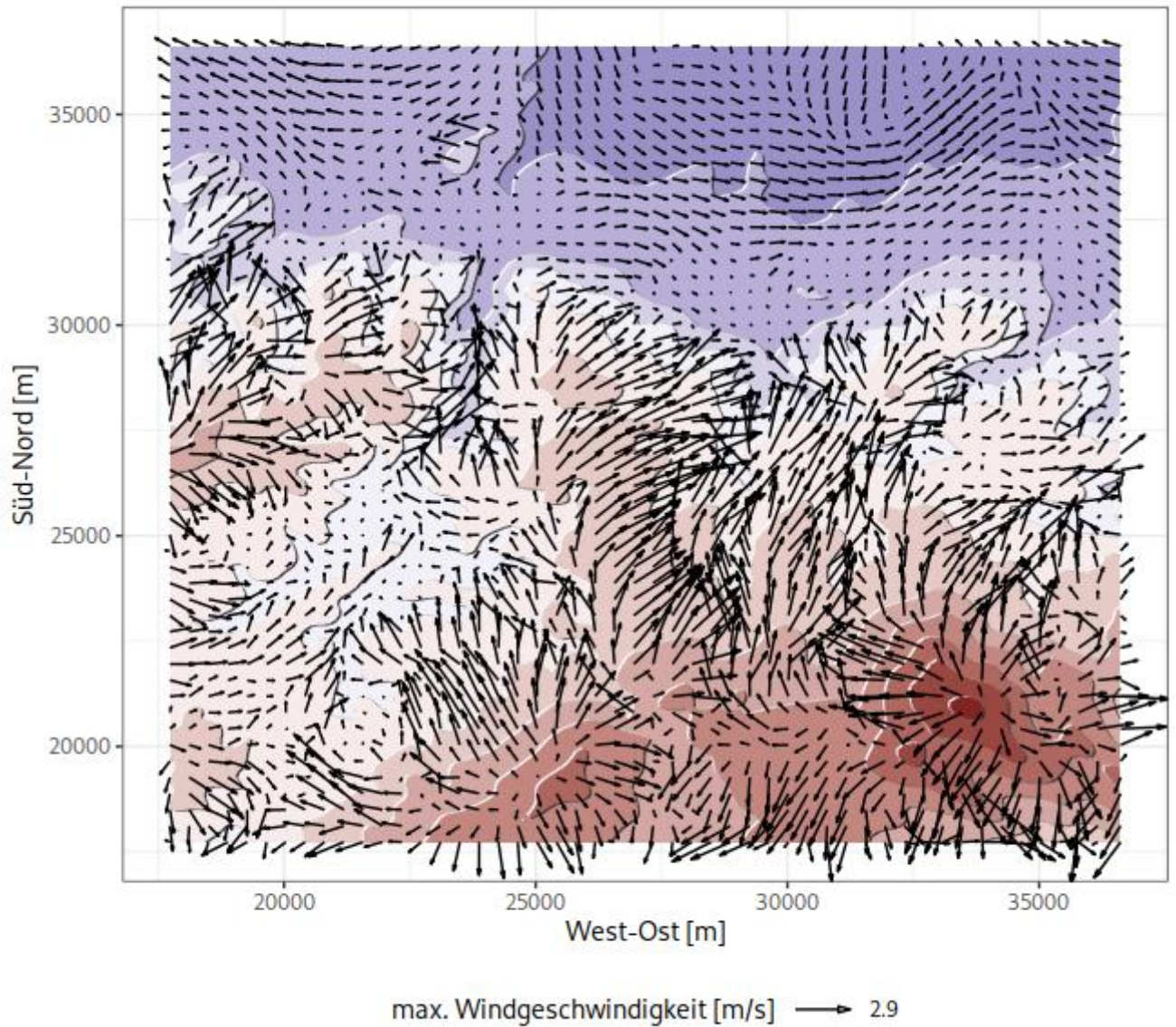


Abbildung 5: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse I und Windrichtung 80°.

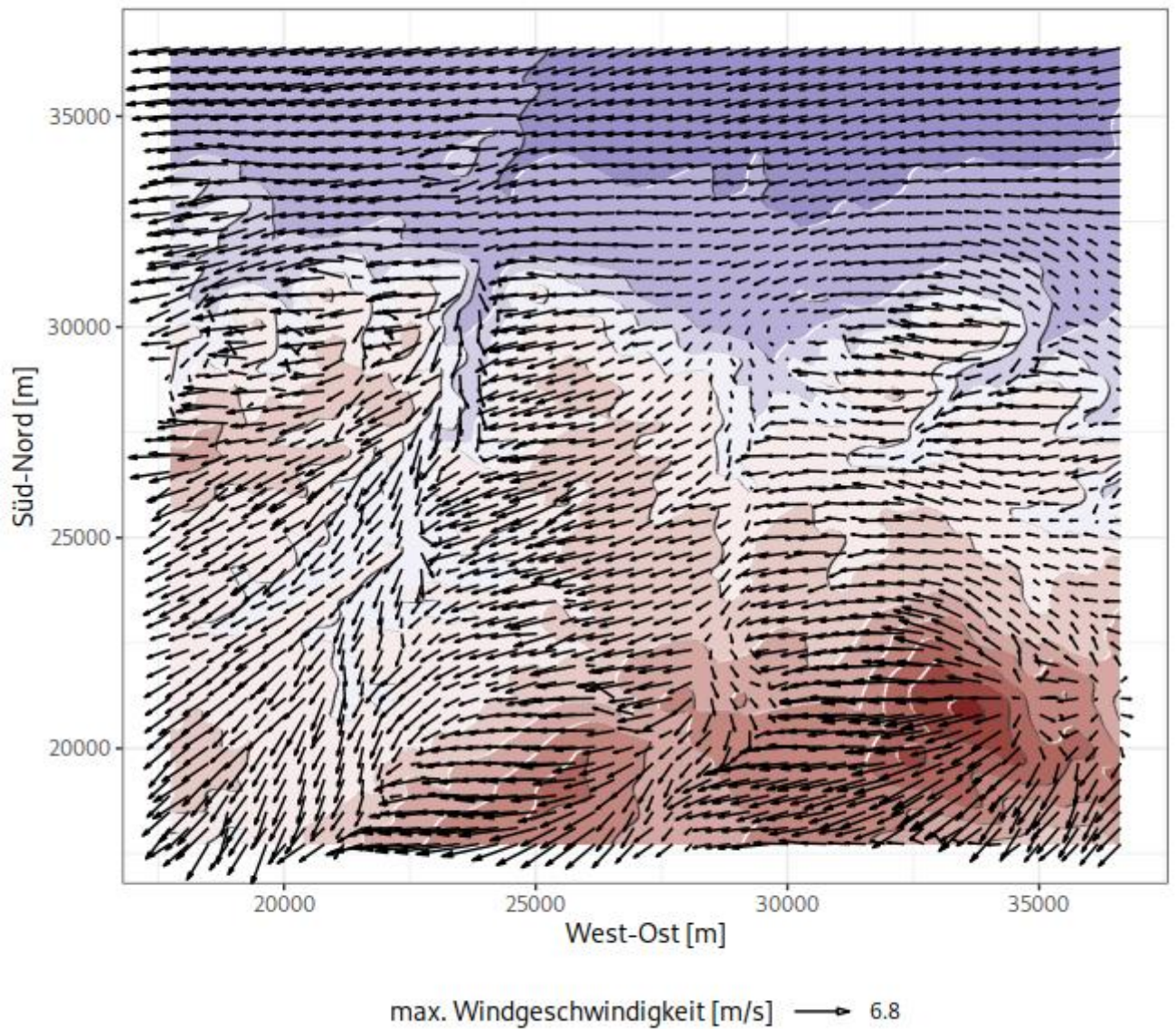


Abbildung 6: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse III_1 und Windrichtung 80°.

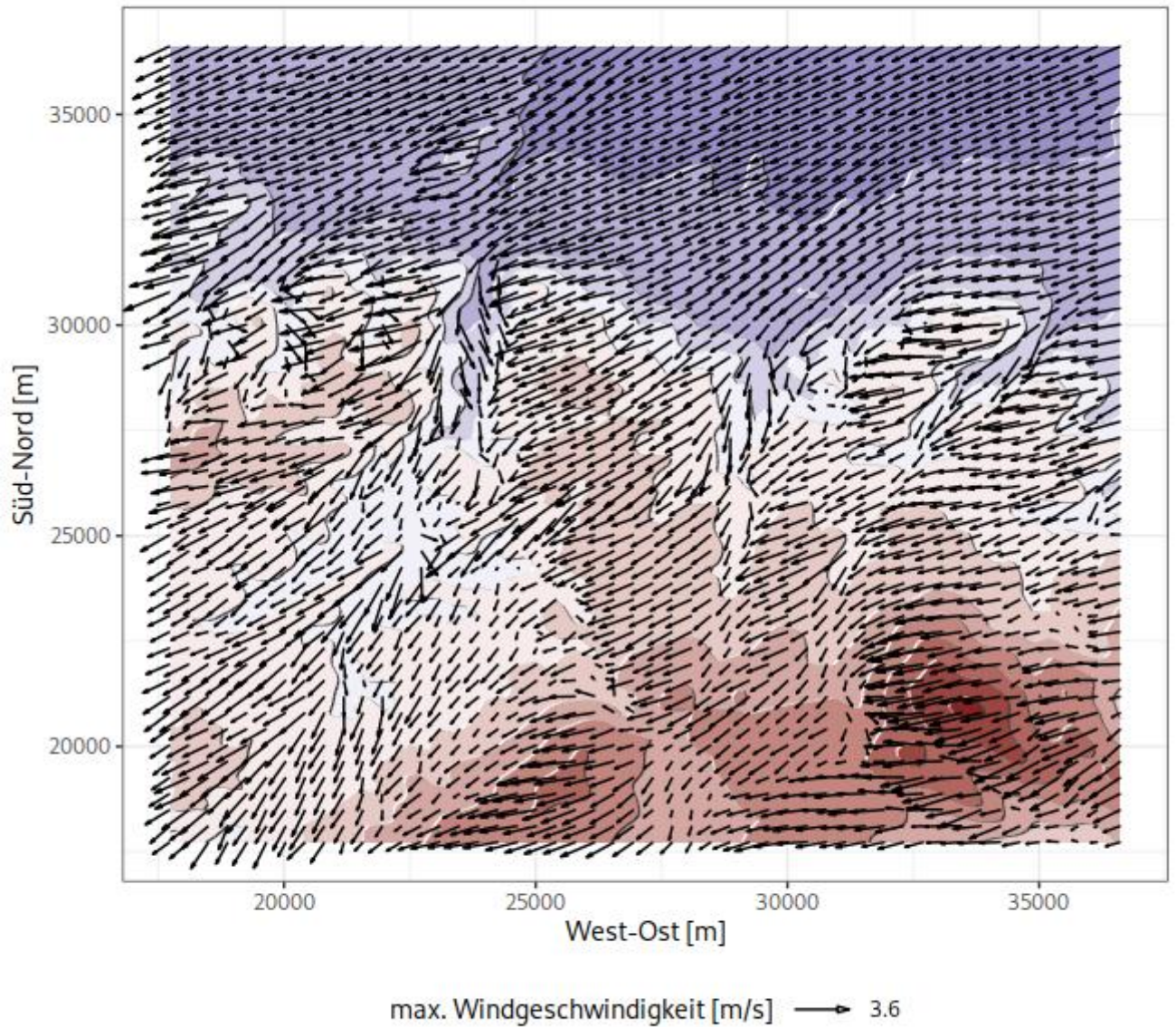


Abbildung 7: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse V und Windrichtung 80°.

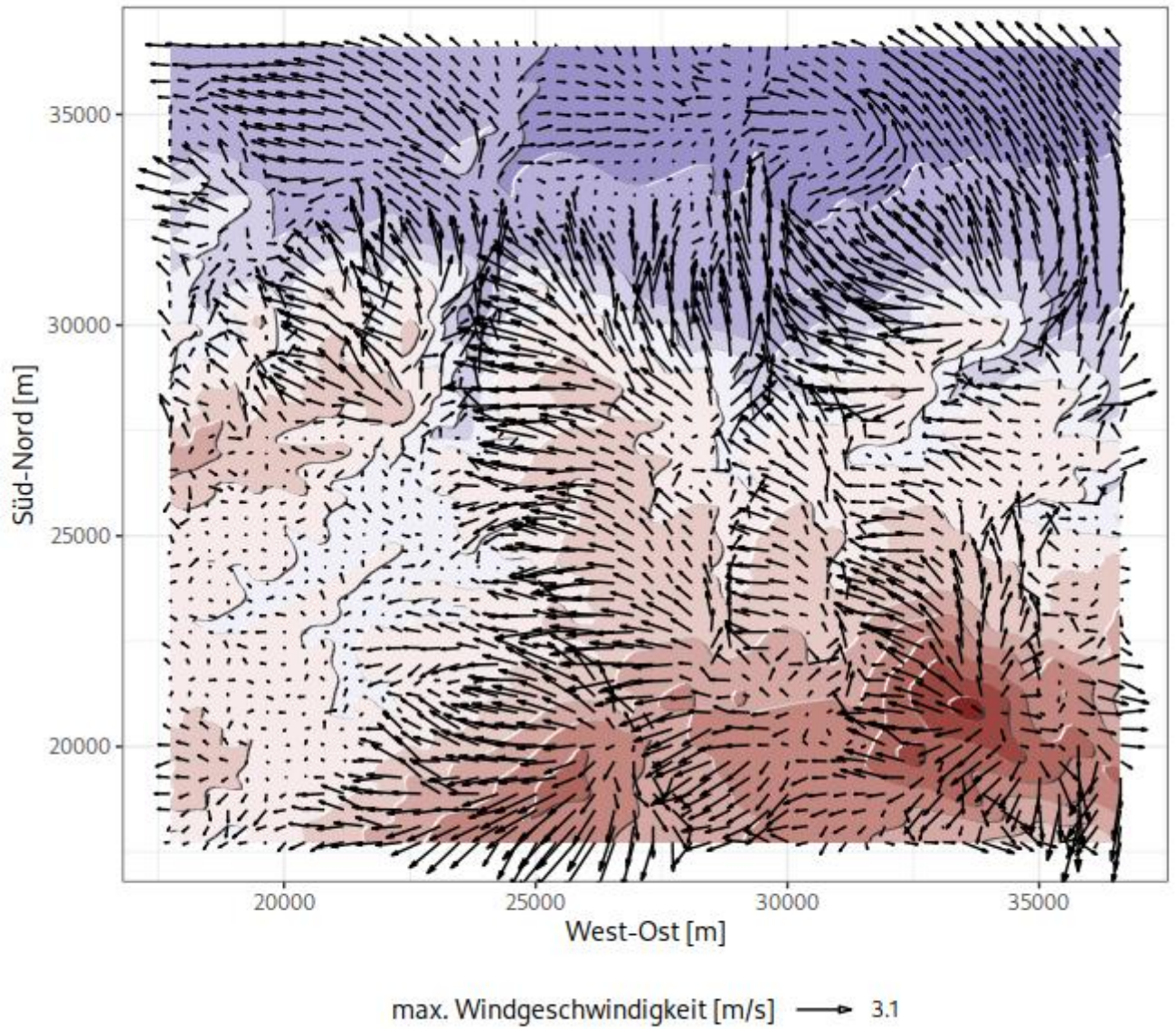


Abbildung 8: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse I und Windrichtung 180°.

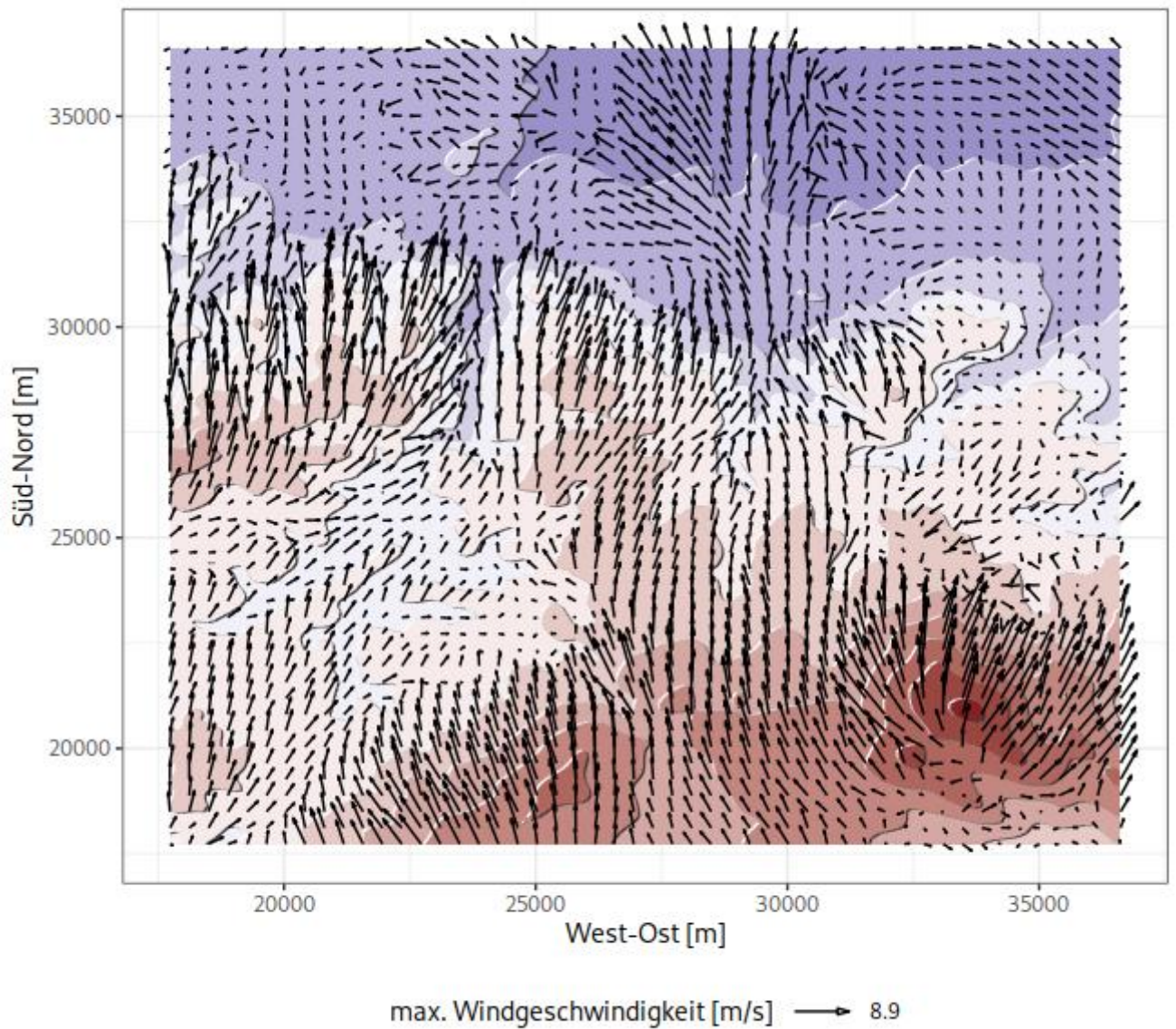


Abbildung 9: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse III_1 und Windrichtung 180°.

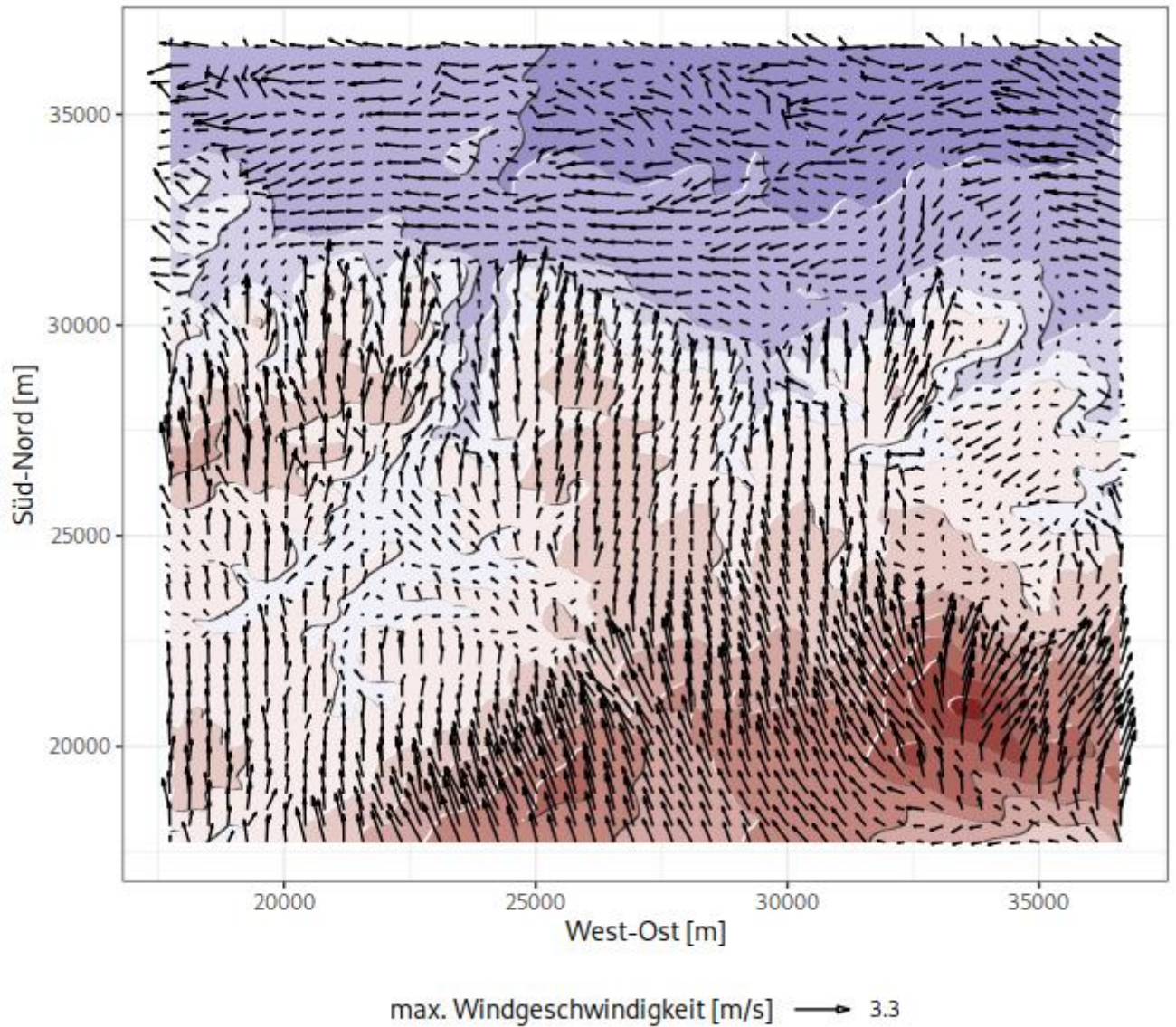


Abbildung 10: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse V und Windrichtung 180°.

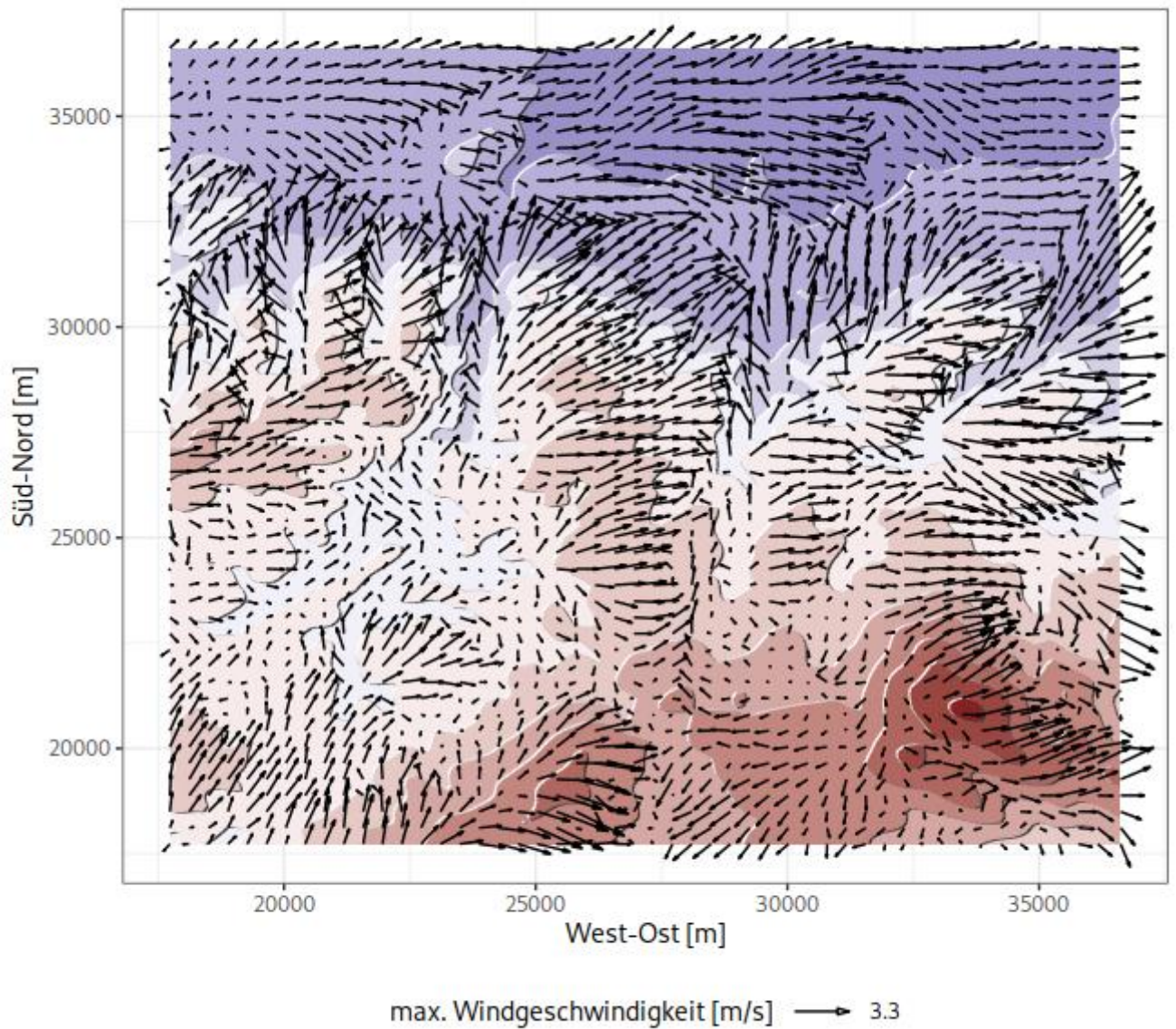


Abbildung 11: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse I und Windrichtung 260°.

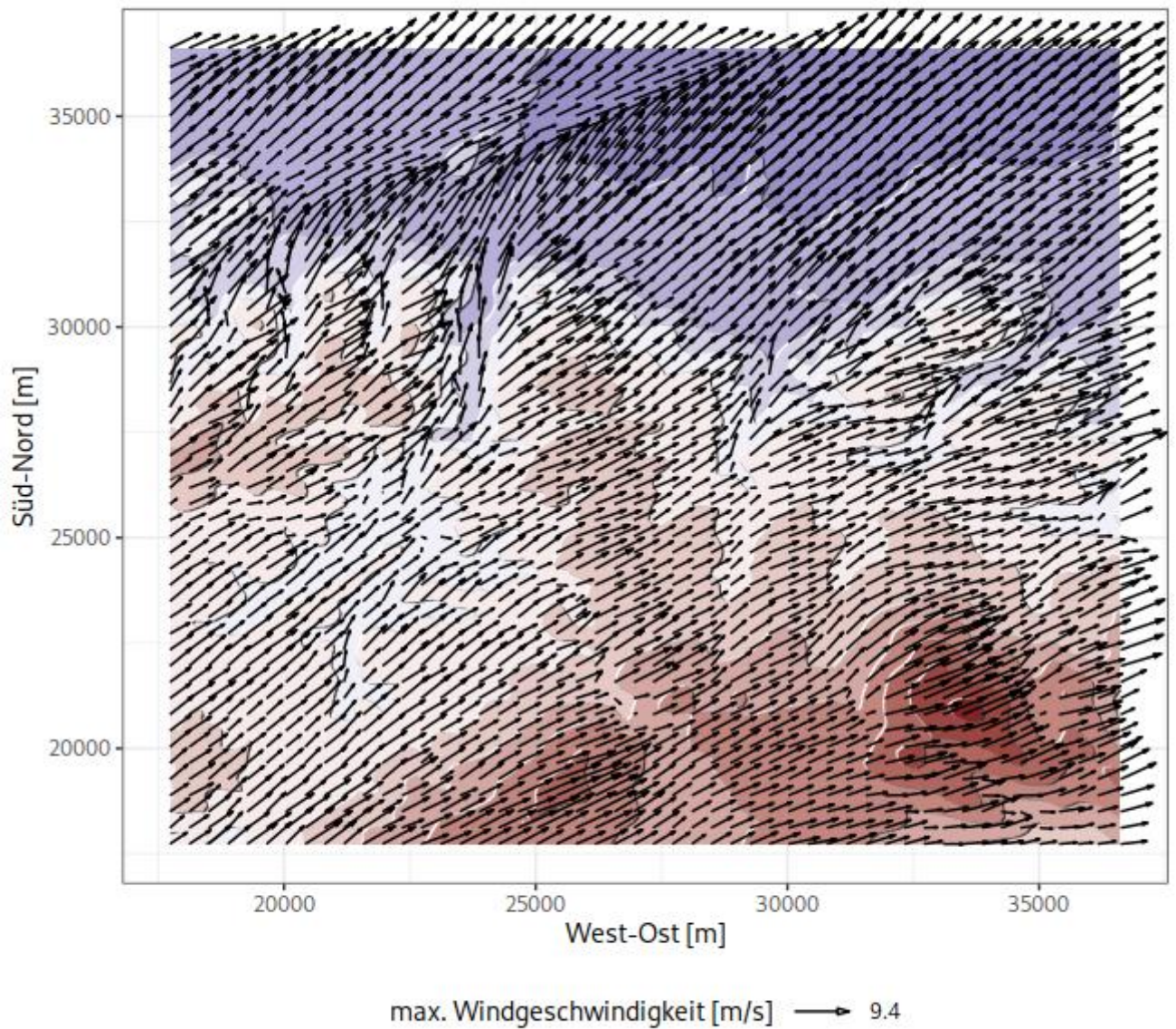


Abbildung 12: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse III_1 und Windrichtung 260°.

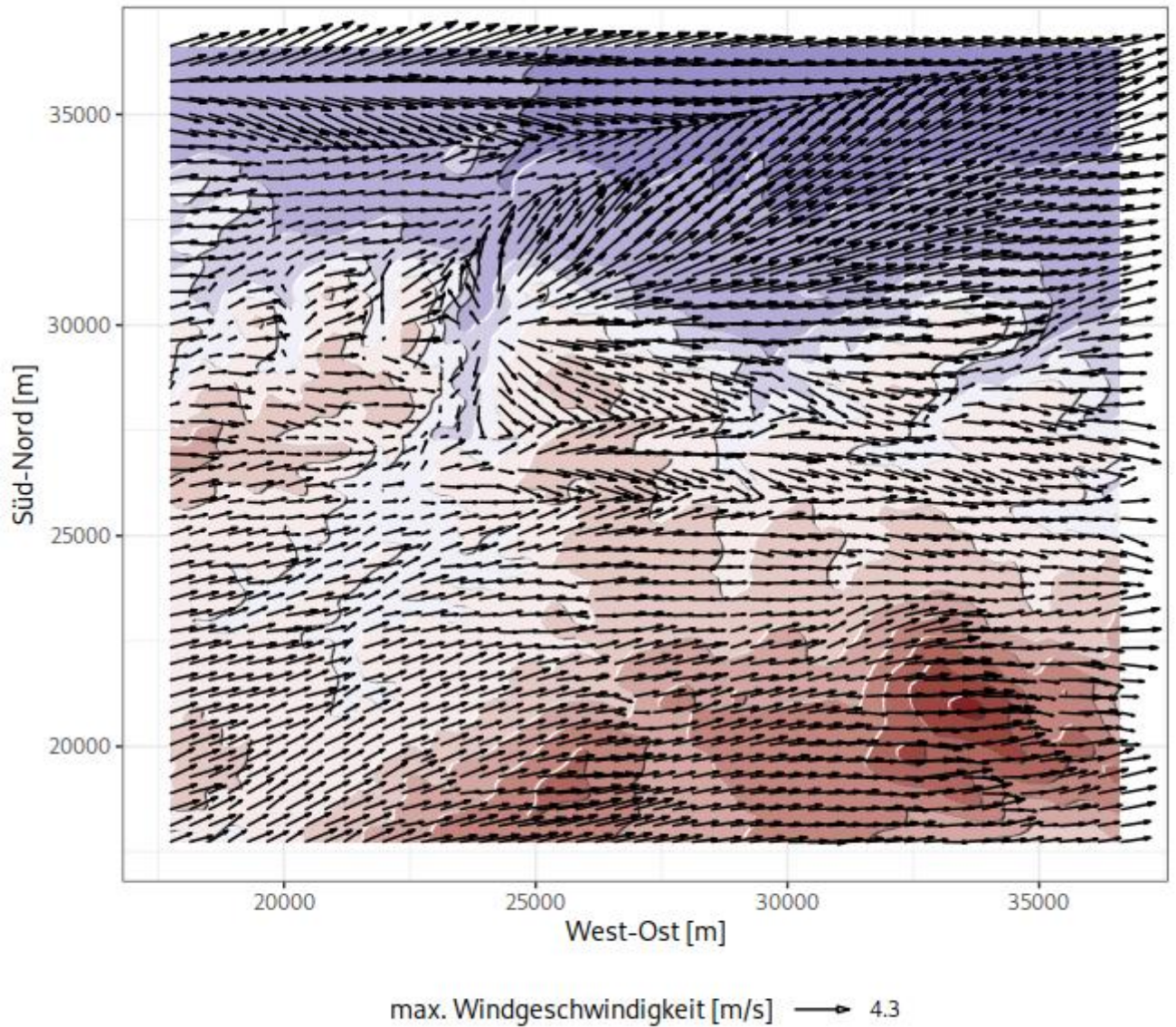


Abbildung 13: Horizontaler Wind in 10 m Höhe über Grund für Ausbreitungsklasse V und Windrichtung 260°.

6 Lokale Kaltluft

Bei windschwachen, wolkenarmen Wetterlagen können lokale Windströmungen durch die Bewegung bodennaher, kalter Luftschichten entstehen. Die Kaltluft entsteht während der nächtlichen Abkühlung der bodennahen Luft und fließt vorwiegend hangabwärts ab. Ihre Mächtigkeit nimmt dabei im Verlaufe der Nacht zu. Der Abfluss von Kaltluft kann für Immissionsprognosen mit instationären Modellrechnungen des prognostischen mesoskaligen Modells berücksichtigt werden.

Die Kaltluft wurde für 4 repräsentative meteorologische Situationen aus verschiedenen Jahreszeiten erfasst. Zu jeder Situation wird eine instationäre Simulation ausgeführt, aus der die Entwicklung der Windsysteme während der ganzen Nacht zu jeder Stunde in der Windfeldbibliothek berücksichtigt wird.

Zum Startzeitpunkt des Modelltages wird von einer windschwachen nachmittäglichen Strahlungswetterlage mit einer gut durchmischten Grenzschicht ausgegangen. Die Bodentemperatur und die Höhe der anfänglichen Grenzschicht hängen von der Jahreszeit ab und sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2. Parameter zur Simulation von Kaltluft.

Jahreszeit	Modelltag	Höhe der Grenzschicht [m]	Bodentemperatur [K]
Frühjahr	21.03	900.0	283.15
Sommer	21.06	1800.0	293.15
Herbst	21.09	900.0	283.15
Winter	21.12	400.0	273.15

Die stündlichen Windfelder werden auf das Gitter des TA-Luft-Modells übertragen. Nachdem die Restdivergenzen beseitigt sind, steht eine Windfeldbibliothek zur Nutzung mit dem TA-Luft-Modell zur Verfügung.

Die Dateien der Windfeldbibliothek sind mit *w9MHHaN1.dmna* bezeichnet, wobei die Nummer 9 ein instationäres Windfeld bedeutet, *M* den Monat bzw. die Jahreszeit (1=Frühling, 2=Sommer, 3=Herbst, 4=Winter) angibt und *HH* die Stunde des Tages. Mit *N* wird die Nummer des Gitters des TA-Luft-Modells gekennzeichnet.

Die zeitliche Zuordnung der Windfelder zu einer AK-Term erfolgt bei LASAT über den Parameter *Wind* in der Datei *meteo.def*. Soll ein Kaltwindfeld verwendet werden, erhält zur betreffenden Stunde der Parameter *Wind* einen Wert *9MHH*.

Da keine Messdaten des Auftretens von Kaltluft für den zu untersuchenden Raum vorhanden waren, wurden angenommen, dass Kaltluft nur im Zeitraum kurz vor Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang, bei Schwachwindlagen und geringer Bewölkung auftritt. Zudem soll die meteorologische Situation über mehrere Stunden gleichbleiben.

Die genannten Bedingungen sind dann gegeben, wenn zwischen der abendlichen Bürgerlichen Dämmerung und der morgendlichen Bürgerlichen Dämmerung eine sehr stabile oder eine stabile Schichtung mit Ausbreitungsklasse I oder II nach

Klug/Manier gegeben ist, die mindestens über 3 Stunden anhält. Dabei darf die Windgeschwindigkeit nicht größer als 2,5 m/s sein.

In der zur Verfügung gestellten AK-Term wurden an insgesamt 526 Stunden eine Kaltluftsituation zu den genannten Bedingungen gefunden. Auf die einzelnen Monate verteilt sich die Anzahl der Stunden mit Kaltluft und die Nachtstunden zwischen der morgendlichen und abendlichen Bürgerlichen Dämmerung wie folgt:

Tabelle 3. Anzahl der Stunden mit Kaltluft, sowie nächtliche Stunden zwischen den Bürgerlichen Dämmerungen. Referenzort, für den die Zeiten der Dämmerung ermittelt werden, ist 51.85177° N, 10.51741° E.

Monat	Nacht- stunden	Kaltluft- stunden
Januar	299	22
Februar	322	32
März	404	44
April	454	34
Mai	530	15
Juni	546	52
Juli	547	30
August	491	50
September	413	82
Oktober	365	81
November	302	34
Dezember	285	50
Jahressumme	5,038	526