

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Lärm und NIS
z.H. Herr K. Köstli
3003 Bern

Aktualisierte flächendeckende Grundlagen für die Schallausbreitungsmodellierung in den Bereichen Meteorologie und Bodeneigenschaften

Bericht-Nr: 5214.024934-3
Ihr Auftrag vom: 1. März 2022
Anzahl Seiten: 20

Inhalt

- Zusammenfassung
- 1 Einleitung
- 2 Bodeneigenschaften
- 3 Wettereinfluss
- 4 Häufigkeit förderlicher Ausbreitungssituationen für verschiedene Tageszeiten

Verfasser: J.M. Wunderli und S. Schalcher

Dübendorf, 09. Februar 2023
Gruppenleiter Lärmauswirkungen

Abteilung Akustik / Lärminderung
Projektleiter / Abteilungsleiter:

Dr. Beat Schäffer

Dr. Jean Marc Wunderli

Zusammenfassung

Die Abteilung Akustik/Lärminderung der Empa erstellte 2012 für die gesamte Schweiz lokale Meteostatistiken auf Basis von Daten eines Jahres des Meteomodells COSMOS2, welche seither verschiedenen Schallausbreitungsmodellen als Eingangsgrößen dienen (siehe Empa Untersuchungsbericht 459'348). Diese Meteostatistiken wurden 2021 mit Daten von vier Jahren des Nachfolgemodells COSMO1 aktualisiert (siehe Empa Untersuchungsbericht 5214.025099-2). Die aktualisierten Grundlagen werden seit Februar 2021 im Schiesslärmmodell sonARMS (seit Version V5.2.0) verwendet.

In diesem Bericht werden zusätzlich neu eingeführte Bodenbedeckungskategorien und eine flächendeckende Auswertung der Häufigkeit förderlicher Schallausbreitungsbedingungen in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung und Tageszeit dokumentiert.

1 Einleitung

Die Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, erstellte im Auftrag BAFU 2012 für die gesamte Schweiz lokale Meteostatistiken, welche seither verschiedenen Schallausbreitungsmodellen als Eingangsgrössen dienen [R1]. Die Meteostatistiken wurden auf der Basis des COSMO2-Wettermodells von MeteoSchweiz mit einer räumlichen Auflösung von 2.2 km für stündliche Daten eines Jahres erstellt. Seit September 2015 liegt COSMO in einer aktualisierten Version mit einer räumlichen Auflösung von 1 km vor. Das BAFU beauftragte die Empa 2020, auf der Basis von COSMO1-Daten flächendeckende Meteostatistiken zu erstellen und die entsprechenden Grundlagen im Schiesslärmmodell sonARMS zu aktualisieren. Dies erfolgte mit der sonARMS Version V5.2.0 vom Februar 2021. Die entsprechenden Arbeiten sind in den Empa Berichten 5214.025099-1 und 5214.025099-2 dokumentiert.

Im Empa Bericht-Nr. 459'348 waren zusätzlich die Definitionen der Untergrundeigenschaften mit entsprechenden Bodenbedeckungskategorien aufgeführt worden, und es wurde eine Methodik eingeführt und umgesetzt, welche flächendeckend in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung und Tageszeit die Häufigkeit förderlicher Schallausbreitungsbedingungen ausweist. Diese Daten werden auf der Internet-Seite des BAFU unter "Lärmermittlung und -beurteilung" unter "Dokumente" zur Verfügung gestellt.

Seit 2012 sind weitere Bodenbedeckungskategorien ergänzt worden, welche aber nicht dokumentiert wurden. Ausserdem müssen die auf der BAFU-Internet-Seite zur Verfügung gestellten Grundlagendaten basierend auf den gemäss Untersuchungsbericht 5214.025099-2 neu erstellten Meteostatistiken aktualisiert werden. Die entsprechenden Arbeiten und die zusätzlichen Grundlagen werden im Rahmen dieses Berichtes dokumentiert. Der vorliegende Untersuchungsbericht baut dabei auf dem Bericht von 2012 auf. Der Vollständigkeit halber werden dabei wichtige Informationen wiederholt.

2 Bodeneigenschaften

Die lokalen Bodeneigenschaften fliessen in die Berechnung des Bodeneffektes verschiedener Ausbreitungsmodell, namentlich der ISO 9613-2, CNOSSOS-EU und der sonX-Familie (sonRoad, sonRAIL, sonARMS, sonAIR) ein. Informationen zu den Bodeneigenschaften liegen für geographische Informationssysteme flächendeckend vor. Im Bericht von 2012 wurden die Bodenbedeckungskategorien der amtlichen Vermessung (Layer Bodenbedeckung im Datenmodell DM01) sowie die Primärflächenklassierung des Vektor25 Datensatzes eingeführt. Diese Kategorien sind immer noch in Gebrauch und funktionsfähig. Der Vollständigkeit halber werden die entsprechenden Zuordnungstabellen deshalb in Beilage B.1 nochmals aufgeführt.

2.1 Modellanforderungen

Die spektralen Bodeneffektmodelle, welche in der ISO-Norm 9613-2 und im CNOSSOS-EU Ausbreitungsmodell beschrieben werden, bilden die akustischen Eigenschaften des Untergrundes durch einen dimensionslosen „ground factor“ G ab. G kann dabei Werte zwischen 0 für akustisch harte und 1 für poröse Flächen annehmen. Bei gemischten Flächen wird G als Prozentsatz der Ausbreitungsstrecke über porösem Grund im Vergleich zur Gesamtstrecke bestimmt.

Die Untergrundeigenschaften im sonX-Modell werden durch den Strömungswiderstand σ in Rayl beschrieben.

2.2 Zusätzliche Bodenbedeckungskategorien

Um Berechnungen auch ausserhalb der Schweiz durchführen zu können, wurde eine zusätzliche, stark vereinfachte Bodenbedeckungskategorisierung eingeführt, welche auf dem weit verbreiteten CORINE Bodenbedeckungsdatensatz von Copernicus basiert [R2]. Tabelle 1 zeigt die entsprechenden acht generischen

Bodenbedeckungskategorien mit den zugeordneten Eigenschaften. In den Spalten drei und vier wurden Vorgaben für den Strömungswiderstand σ und für den Bodenfaktor G gemacht. Die Angaben stützen sich auf Erfahrungen der Empa ab und wurden mit Zuordnungen aus anderen Quellen, beispielsweise aus dem französischen Strassenlärmmodell [R3], abgeglichen. Die nachfolgenden Spalten betreffen nur das sonX-Ausbreitungsmodell, welches unterschiedliche Wind-, Temperatur- und Feuchtigkeitsprofile in Abhängigkeit der Untergrundeigenschaften verwendet. Folgende Grössen fliessen in die Berechnung ein: Albedo: Verhältnis der kurzwelligen Rückstrahlung zur Einstrahlung [], hr: Rauigkeitshöhe [m], a: Verhältnis des Energieflusses in den Boden zur Einstrahlung [], α : Verdunstungsfaktor [] (für Details siehe [R4]).

Tabelle 1: Generische Bodenbedeckungskategorien und zugeordnete Eigenschaften.

Value	DESCR_DE	σ	G	Albedo	hr	a	α
DenseNaturalGround	Fels / Geröll	20000	0.0	0.30	0.50	0.30	0.3
SealedArtificialGround	Versiegelt, Siedlungsgebiet	20000	0.0	0.15	5.00	0.30	0.6
Water	Gewässer	20000	0.0	0.08	0.05	0.05	1.3
SemidenseMixedGround	Unbekannte Gebiete	2000	0.5	0.25	2.50	0.20	0.8
PorousNaturalGround	Grasland / Acker	200	1.0	0.20	0.75	0.10	1.0
OpenVegetation	offener Wald / Gebüsch	150	1.0	0.18	5.00	0.10	1.1
Forest	Wald	100	1.0	0.16	10.00	0.05	1.2
VerySoftGround	Schnee, Moor	50	1.0	0.40	0.50	0.10	1.0

3 Wettereinfluss

Der Wettereinfluss auf die Schallausbreitung wird bei den Modellen ISO 9613, CNOSSOS-EU und sonX unterschiedlich differenziert berücksichtigt. Bei allen Modellen werden Reduktionen der Hinderniswirkung aufgrund von förderlichen Ausbreitungsbedingungen sowie der Einfluss von Temperatur und Feuchte auf die Luftdämpfung abgebildet. Bei sonX wird zusätzlich die Entstehung von akustischen Schattenzonen und eine Veränderung der Walddämpfung aufgrund gekrümmter Schallstrahlen modelliert.

Die Modellvorstellung, welche ISO 9613-2 und CNOSSOS-EU zugrunde liegt, geht davon aus, dass die Schallausbreitung unter inhomogenen Bedingungen mit Kreisbögen angenähert werden kann, was einem linearen Gradienten der Schallgeschwindigkeit mit der Höhe entspricht. Bei sonX können beliebige Vertikalprofile des Schallgeschwindigkeitsverlaufes abgebildet werden, da die resultierenden Schallstrahlen zwischen Quelle und Empfänger mit einem iterativen Verfahren identifiziert werden. Entsprechend unterschiedlich ist auch der Detaillierungsgrad bei den Eingangsparametern. In CNOSSOS-EU wird die Häufigkeit förderlicher Bedingungen direkt als Parameter verwendet. In ISO 9613-2 [R5] kann die Häufigkeit förderlicher Bedingungen über die Meteorokorrektur C_{met} (siehe Gleichungen (6) und (22)) berücksichtigt werden.

In sonX wird eine Wetterlage durch Angabe je eines Temperatur-, Wind- und Feuchteprofils in Kombination mit einer Windrichtung sowie Absolutwerten von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit auf einer vorgegebenen Höhe definiert. Der Wettereinfluss für eine ausgesuchte Zeitperiode ergibt sich als über die Auftretenshäufigkeit gewichtetes energetisches Mittel der Meteeffekte einzeln berechneter Wetterlagen.

Unabhängig vom Modell, welches für Berechnungen eingesetzt werden soll, wird als Grundlage für die Berechnung einer Meteorokorrektur eine lokale Wetterstatistik benötigt. Im Rahmen des Projektes sonRAIL wurde in Zusammenarbeit mit der MeteoSchweiz eine Methodik entwickelt, um aus den Daten des Wetterprognosemodells COSMO-2 entsprechende Statistiken aufzubereiten. Gleichzeitig wurden für jeden Gitterpunkt des COSMO-2-Modells, welches eine Auflösung von 2.2 km x 2.2 km aufweist, die Daten eines Jahres ausgewertet und aufbereitet. Die Methodik, verschiedene Validierungsergebnisse und weitere Ergebnisse wurden publiziert in [R4]. Die damals entwickelte Methodik zur Klassierung von Wetterlagen sowie die zugehörigen Vertikalprofile von Wind, Temperatur und Feuchte werden auch heute noch in unveränderter

Form verwendet. Die Meteostatistiken wurden jedoch 2021 auf der Basis von COSMO-1 Meteodaten aktualisiert (siehe Empa Untersuchungsbericht 5214.025099-2). Da die COSMO-1 Daten auf einem feineren räumlichen Gitter von 1 km x 1 km basieren, musste die Zuordnung zu Meteogebieten - also Gebieten, welchen eine Meteostatistik zugeordnet wird - angepasst werden. Die Gebietsdefinition wurde jedoch beibehalten und entspricht somit weiterhin den Grundlagen von 2012. Die Resultate der Auswertungen liegen als DBF-Datei mit zugeordneter Shape-Datei in einer Form vor, welche mit einem GIS-System visualisiert und genutzt werden kann. In Beilage B.3 sind die einzelnen Datenfelder beschrieben.

In Abschnitt 3.1 wird ein Konzept zur Kategorisierung von Ausbreitungsbedingungen vorgestellt, in Abschnitt 3.2 wird die Methodik eingesetzt, um die Häufigkeit förderlicher Ausbreitungsbedingungen für bodennahe Ausbreitungssituationen zu bestimmen. Abschnitt 3.3 beschreibt kurz die Ermittlung der Durchschnittstemperatur und -feuchte.

3.1 Kategorisierung der Ausbreitungsbedingungen

Die Ausbreitungsbedingungen werden nachfolgend in drei Kategorien unterteilt: Förderlich, Neutral und Hinderlich. Massgeblich für die Kategorisierung ist das Höhenprofil der effektiven Schallgeschwindigkeit, welches durch die lokale Windgeschwindigkeit und Temperatur bestimmt wird. Der Temperatureinfluss auf die Schallgeschwindigkeit c kann gemäss Formel (1) abgeschätzt werden, wobei für trockene Luft die untenstehenden Werte verwendet werden können.

$$c = \sqrt{\kappa \frac{R \cdot T}{M}} \quad (1)$$

Für trockene Luft:

$$\kappa = 1.402$$

$$R \text{ (universelle Gaskonstante)} = 8.3145 \text{ [J/mol/K]}$$

$$T = \text{Temperatur in Kelvin}$$

$$M \text{ (Molmasse)} = 0.02886 \text{ [kg/mol]}$$

Es resultiert näherungsweise eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit um 0.6 m/s pro Grad Temperaturänderung. Diese Umrechnung erlaubt einen direkten Vergleich des Einflusses des Windes und der Temperatur auf das Schallgeschwindigkeitsprofil. Bei der Windgeschwindigkeit wiederum ist nur die Komponente des Windes in Ausbreitungsrichtung zu berücksichtigen. Die absolute Windgeschwindigkeit muss somit noch mit dem Kosinus des Winkels zwischen Wind- und Ausbreitungsrichtung multipliziert werden. Bei einer Unterteilung in lediglich zwei Kategorien gelten Situationen als förderlich, bei welchen der Gradient der effektiven Schallgeschwindigkeit mit der Höhe in Ausbreitungsrichtung positiv ist. Umgekehrt gelten Situationen als hinderlich, bei welchen die effektive Schallgeschwindigkeit in der Höhe tiefer liegt als am Boden. Da kleine Schallgeschwindigkeitsgradienten kaum einen Einfluss auf die resultierenden Immissionspegel haben, wurde beschlossen, eine zusätzliche Kategorie für akustisch neutrale Situationen einzuführen. Dabei wurde festgelegt, dass die Meteoklasse N0 gemäss Tabelle 2, also eine neutral geschichtete Atmosphäre ohne Wind, per Definition als neutral zu gelten hat. Ausgehend von idealisierten Temperaturprofilen kann ermittelt werden, dass die Schallgeschwindigkeit in der Meteoklasse N0 in 20 m Höhe um 0.5 m/s tiefer liegt als am Boden. In 100 m Höhe beträgt die Differenz 1.0 m/s. Ist die absolute Differenz der Schallgeschwindigkeit zwischen Boden und der entsprechenden Referenzhöhe für eine bestimmte Ausbreitungssituation kleiner als der Absolutwert bei N0, so wird die Situation als akustisch neutral eingestuft.

Tabelle 2: Klassierungsschema mit 15 verschiedenen Meteosituationen. Die Windgeschwindigkeiten gelten für eine Messhöhe von 10 m über Grasland. (Bemerkung: Die Windgeschwindigkeit auf Bodenhöhe wird mit 0 m/s angenommen.) Hinweise zur Zuordnung einer bestimmten Wetterlage zu einer Meteoklasse werden in den Beilagen B.5 und B.6 gegeben.

Strahlungsbilanz / Stabilität		$\geq 180 \text{ W/m}^2$			$\leq -18 \text{ W/m}^2$		
		Wind (Bereich / Mittelwert)		Labil	Neutral	Stabil	
0 – 1 m/s	0.0 m/s	L0	N0	S0			
1 – 2 m/s	1.5 m/s	L1	N1	S1			
2 – 3 m/s	2.5 m/s	L2	N2	S2			
3 – 5 m/s	4.0 m/s	L3	N3	S3			
> 5 m/s	6.0 m/s	L4	N4	S4			

Ist der Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit grösser als die Windgeschwindigkeit, so dominiert dieser und es resultiert ein einheitlicher Trend in alle Ausbreitungsrichtungen. In Situationen, in welchen die absolute Windgeschwindigkeit jedoch grösser ist, leiten sich je nach Ausbreitungsrichtung sowohl hinderliche, neutrale als auch förderliche Situationen ab. Bei Seitenwind, relativ zur Ausbreitungsrichtung, entfällt die Windkomponente; bei Mitwind- und Gegenwindsituationen dominiert sie jedoch. So kann eine Mitwindsituation mit genügend starkem Wind eine Schichtung der Atmosphäre mit abnehmender Temperatur mit der Höhe kompensieren. Umgekehrt kann ein Gegenwind den Einfluss einer Inversionslage auf das Schallgeschwindigkeitsprofil drehen.

Abbildung 1 zeigt exemplarisch eine Situation mit einer labil geschichteten Atmosphäre und einem angenommenen Temperaturdifferenz von 3.5°C zwischen 0 und 20 m sowie einem Westwind mit 3 m/s auf 20 m Höhe. Gemäss Formel (1) resultiert daraus ein Temperatureinfluss auf die effektive Schallgeschwindigkeit von rund 2.1 m/s. Dies entspricht der Windkomponente unter 45° . Somit heben sich bei einem Zwischenwinkel von 45° der Einfluss von Wind- und Temperatur gegenseitig auf. Um den Winkelbereich von 45° resultieren sehr kleine Gradienten, weshalb dieser Bereich als neutral eingestuft wird. Bei kleineren Zwischenwinkeln resultiert eine förderliche, bei grösseren eine hinderliche Situation.

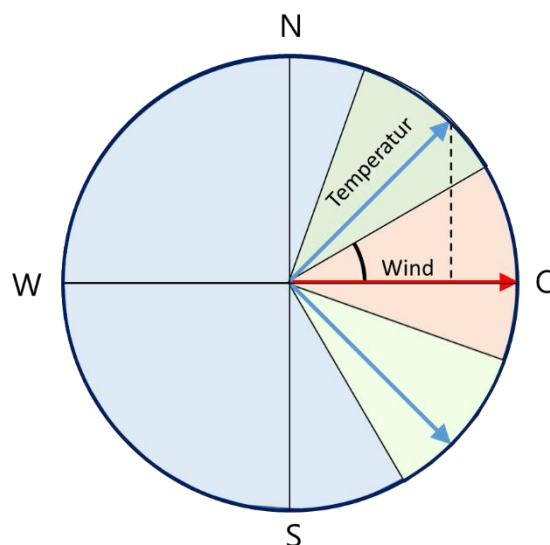


Abbildung 1: Darstellung von förderlichen, neutralen und hinderlichen Ausbreitungsrichtungen (rot bzw. grün und blau hinterlegt) bei einer Situation mit Westwind (roter Pfeil) und einer labil geschichteten Atmosphäre.

3.2 Ermittlung der Häufigkeit förderlicher Situationen für bodennahe Ausbreitungssituationen

Ausgehend von den Absolutprofilen (Standardprofile) von Wind und Temperatur der 15 Meteoklassen gemäss Tabelle 2 für den Untergrundtyp Mixed Semidense Ground (siehe Beilage B.3) wurde der Gradient zwischen 0 und 20 m Höhe bestimmt und daraus die Winkel zwischen Wind- und Schallausbreitungsrichtung für die Übergänge zwischen förderlichen, neutralen und hinderlichen Situationen ermittelt. Eine Höhe von 20 m war bereits bei der vorhergehenden Auswertung von 2012 verwendet worden und scheint weiterhin eine geeignete Wahl für bodennahe Ausbreitungssituationen. Die Auswertung ist in Tabelle 3 zusammengestellt, wobei in den letzten Spalten zusätzlich noch aufgeführt ist, welcher Anteil der Ausbreitungsrichtungen den drei Kategorien zugeordnet wird. Im Mittel über alle Meteoprofile entfallen 38% der Situationen auf förderliche, 17% auf neutrale und 45% auf hinderliche Bedingungen. Gemäss Abschnitt 3.1 wird die absolute Differenz der Schallgeschwindigkeit zwischen Boden und 20 m Höhe von N0, also 0.5 m/s, als Kriterium für neutrale Situationen verwendet.

Tabelle 3: Auswertung der Winkelbereiche mit Förderlichen (F), Neutralen (N) und Hinderlichen (H) Ausbreitungsbedingungen für die Standardprofile sämtlicher Meteoklassen. Die 2. und 3. Spalte zeigen die resultierenden Differenzen für Windgeschwindigkeit v und Temperatur T zwischen 0 und 20 m Höhe über Grund. In der 4. Spalte wird die Änderung der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} auf Grund der Temperaturänderung, ebenfalls zwischen 0 und 20 m Höhe über Grund, wiedergegeben. c_{eff} kann direkt mit der Windgeschwindigkeitsänderung verglichen werden. Die 5. und 6. Spalte zeigen die zugehörigen Zwischenwinkel relativ zur Windrichtung, wo die Gradienten sich gegenseitig aufheben, und die 7. bis 9. Spalte, welcher Prozentsatz aller Ausbreitungsrichtungen Förderlichen (F), Neutralen (N) und Hinderlichen (H) Ausbreitungsbedingungen zugeordnet werden.

SP	Δv	ΔT	$c_{\text{eff}}(\Delta T)$	F \leftrightarrow N	N \leftrightarrow H	F	N	H
L0	0.0	-2.3	-1.3	0 °	0 °	0%	0%	100%
L1	1.5	-2.3	-1.4	0 °	56 °	0%	31%	69%
L2	2.5	-2.1	-1.2	46 °	74 °	25%	16%	59%
L3	4.2	-1.7	-1.0	68 °	83 °	38%	9%	54%
L4	6.2	-1.4	-0.8	77 °	88 °	43%	6%	51%
N0	0.0	-0.9	-0.5	0 °	180 °	0%	100%	0%
N1	1.5	-0.8	-0.5	48 °	93 °	27%	25%	49%
N2	2.6	-0.7	-0.4	69 °	93 °	38%	13%	48%
N3	4.1	-0.5	-0.3	78 °	93 °	43%	8%	48%
N4	6.4	-0.4	-0.2	83 °	93 °	46%	5%	49%
S0	0.0	2.4	1.4	180 °	180 °	100%	0%	0%
S1	2.0	2.2	1.3	113 °	160 °	63%	26%	11%
S2	3.2	1.2	0.7	94 °	114 °	52%	11%	37%
S3	5.3	0.0	0.0	84 °	96 °	47%	6%	47%
S4	6.9	0.0	0.0	85 °	94 °	47%	5%	48%
						38%	17%	45%

Die Resultate von Tabelle 3 lassen sich für die einzelnen Meteoklassen wie folgt zusammenfassen:

- Bei den Klassen L0, N0 und S0 entfällt der Windeinfluss, weshalb eine Klassierung unabhängig von der Windrichtung resultiert.
- Bei der Klasse L1 ist der Windeinfluss nicht stark genug, um den hinderlichen Trend der Temperaturschichtung zu drehen. Es treten somit auch in Windrichtung keine förderlichen Bedingungen auf.

- Bei den Klassen S1 und S2 zeigt sich ein positiver Temperaturgradient, der grösser als das Kriterium für neutrale Situationen ausfällt. Neutrale und hinderliche Situationen treten deshalb nur bei Gegenwind auf.
- Bei allen labil geschichteten Fällen gelten bereits Seitenwindsituationen als hinderlich.
- Bei allen neutral geschichteten Profilen sowie bei den Meteoklassen S3 und S4 werden Seitenwindsituationen als neutral eingestuft.

3.3 Ermittlung der durchschnittlichen Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit für die drei Zeitabschnitte Tag, Abend und Nacht

In den Ausgangsdaten des COSMO-1-Modells sind die absolute Temperatur in °C und die relative Luftfeuchtigkeit in % für eine Höhe von 10 m über Terrain für jeden Gitterpunkt in stündlicher Auflösung über den Zeitraum eines Jahres angegeben. Für die drei Zeitabschnitte Tag (06 – 18 Uhr), Abend (18 – 22 Uhr) und Nacht (22 – 06 Uhr) wurde für jeden Gitterpunkt das arithmetische Mittel gebildet.

4 Häufigkeit förderlicher Ausbreitungssituationen für verschiedene Tageszeiten

4.1 Vorgehen

Wie erwähnt basieren die aktuellen Daten auf dem Wettermodell COSMO-1 mit einer Gitterauflösung von 1 km. In Analogie zum Vorgehen, welches für sonARMS gewählt wurde, wurde die Gebietszuordnung für Meteostatistiken der Vorgängerversion beibehalten, welche eine mittlere zugeordnete Fläche pro Meteorostatistik von 4.84 km² (2.2 km × 2.2 km) aufweist. Die einzelnen Meteorostatistiken pro Meteorogebiet werden als gewichtetes Mittel von neuen COSMO-1 Gitterpunkten berechnet (siehe Empa Berichten 5214.025099-1).

Die Definition der Tageszeiten wurde analog zu 2012 vorgenommen, mit drei Zeitabschnitten Tag (06 – 18 Uhr), Abend (18 – 22 Uhr) und Nacht (22 – 06 Uhr).

Für jeden Rasterpunkt des COSMO1 Gitters, für jede Meteoklasse und für jeden Tagesabschnitt wurde eine Windrose in 10° Schritten ausgewertet. Aus der Kombination dieser Windrichtungsanalysen mit der Information, welche Zwischenwinkel von Hauptwindrichtung und Schallausbreitungsrichtung noch zu förderlichen Bedingungen führen, kann für jede Ausbreitungsrichtung die Häufigkeit förderlicher Bedingungen abgeleitet werden. Dazu wird in jeder Windrose pro Windrichtung in einer Auflösung von 10° die Auftretenshäufigkeit der Windrichtungen für die Winkelbereiche gemäss Tabelle 3 aufsummiert. Durch Multiplikation mit der Auftretenswahrscheinlichkeit der entsprechenden Meteoklasse und Summation über alle Meteoklassen pro Tagesabschnitt ergibt sich die Häufigkeit förderlicher Situationen pro Ausbreitungsrichtung und Tageszeitraum. Speziell zu beachten bei der Auswertung ist dabei, dass Windrichtung und Ausbreitungsrichtung um 180° gedreht sind, d.h. ein Nordwind erzeugt förderliche Bedingungen bei einer Schallausbreitung in Richtung Süden.

4.2 Resultate

Eine entsprechende statistische Auswertung wurde für sämtliche Meteorogebiete durchgeführt und in Form von drei ASCII-Tabellen, je eine für Tag, Abend und Nacht, abgelegt. Abbildung 2 bis Abbildung 4 zeigen räumliche Häufigkeitsanalysen für die drei Tageszeiten. In den einzelnen Abbildungen zeigen sich lokale

Unterschiede, welche primär auf die Häufigkeit von Nebellagen bzw. Bewölkung sowie auf die Windexposition zurück zu führen sind. Im Vergleich zwischen den Abbildungen fallen jedoch Unterschiede bei der Strahlungsbilanz als Folge unterschiedlicher Tageszeiten deutlich stärker ins Gewicht. So treten förderliche Bedingungen am Tag mit im Mittel 32% deutlich seltener auf als am Abend bzw. in der Nacht, mit 54 bzw. 52 %. Die Resultate decken sich qualitativ mit einer analogen Auswertung für die Nacht, welche in 2011 in Acta Acustica publiziert wurde [R4].

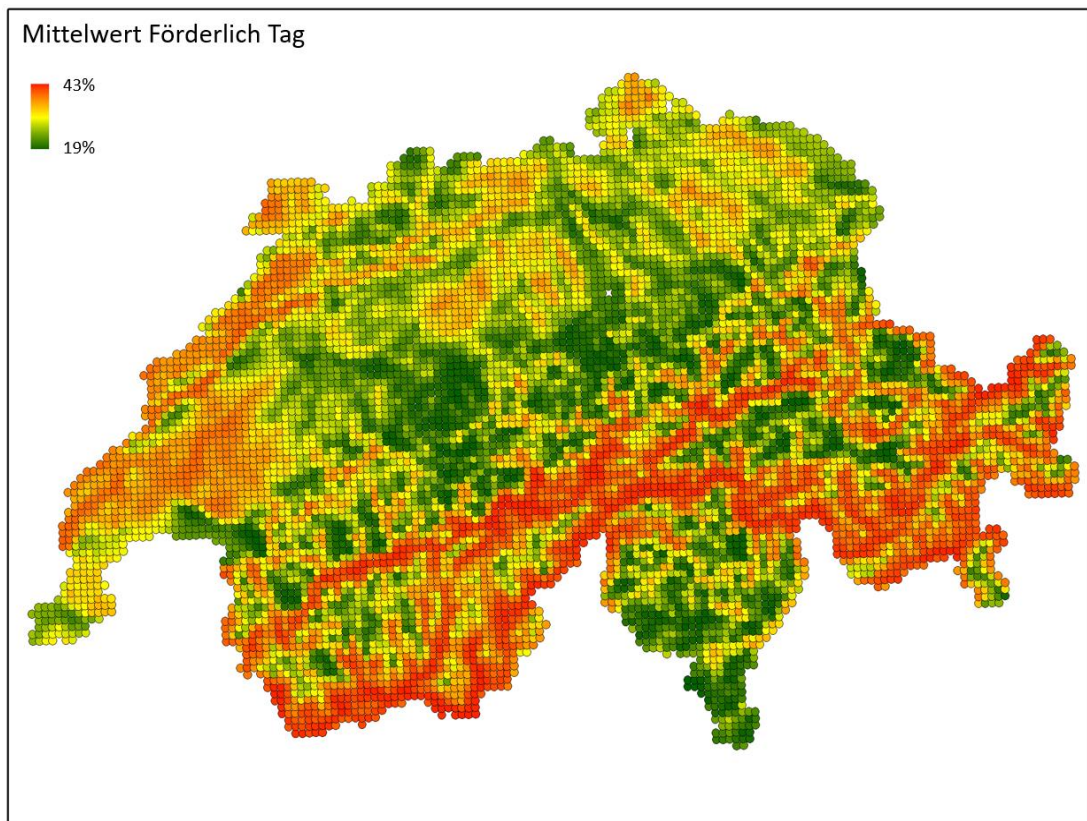


Abbildung 2: Häufigkeit förderlicher Ausbreitungsbedingungen am Tag (06 – 18 Uhr), pro Rasterpunkt gemittelt über alle Windrichtungen. (Mittelwert: 32%, Standardabweichung: 4%)

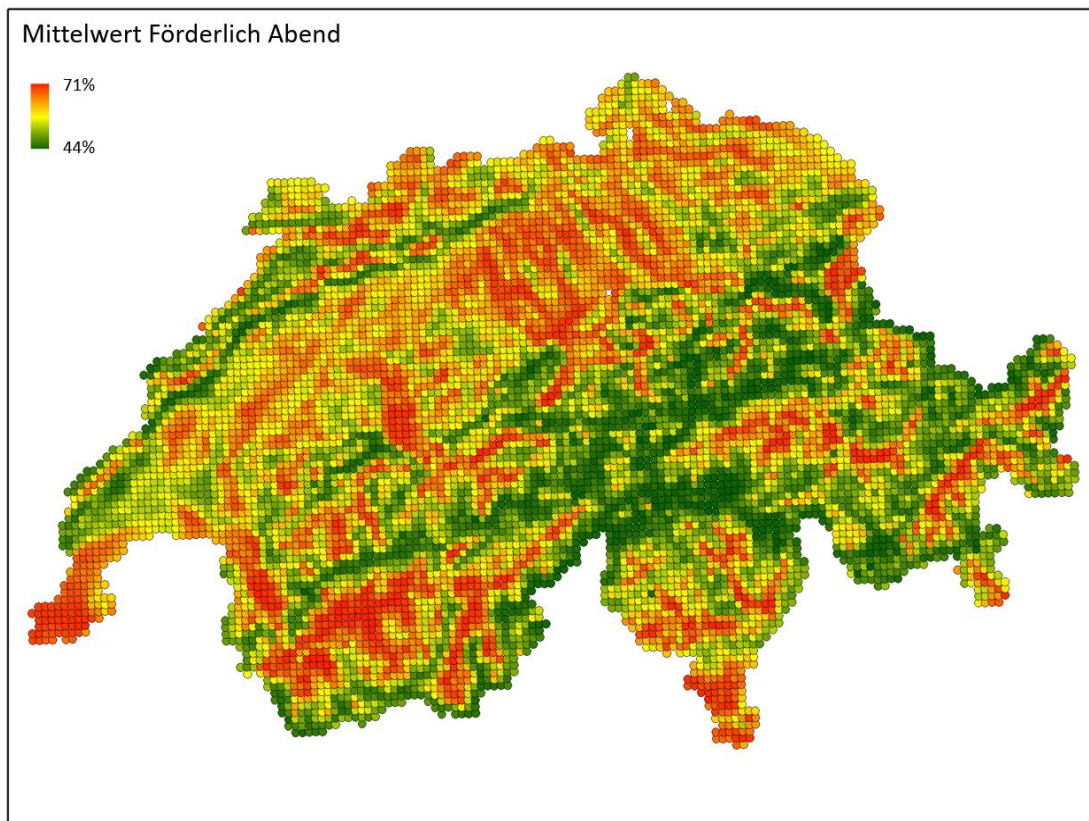


Abbildung 3: Häufigkeit förderlicher Ausbreitungsbedingungen am Abend (06 – 22 Uhr), pro Rasterpunkt gemittelt über alle Windrichtungen. (Mittelwert: 54%, Standardabweichung: 4%)

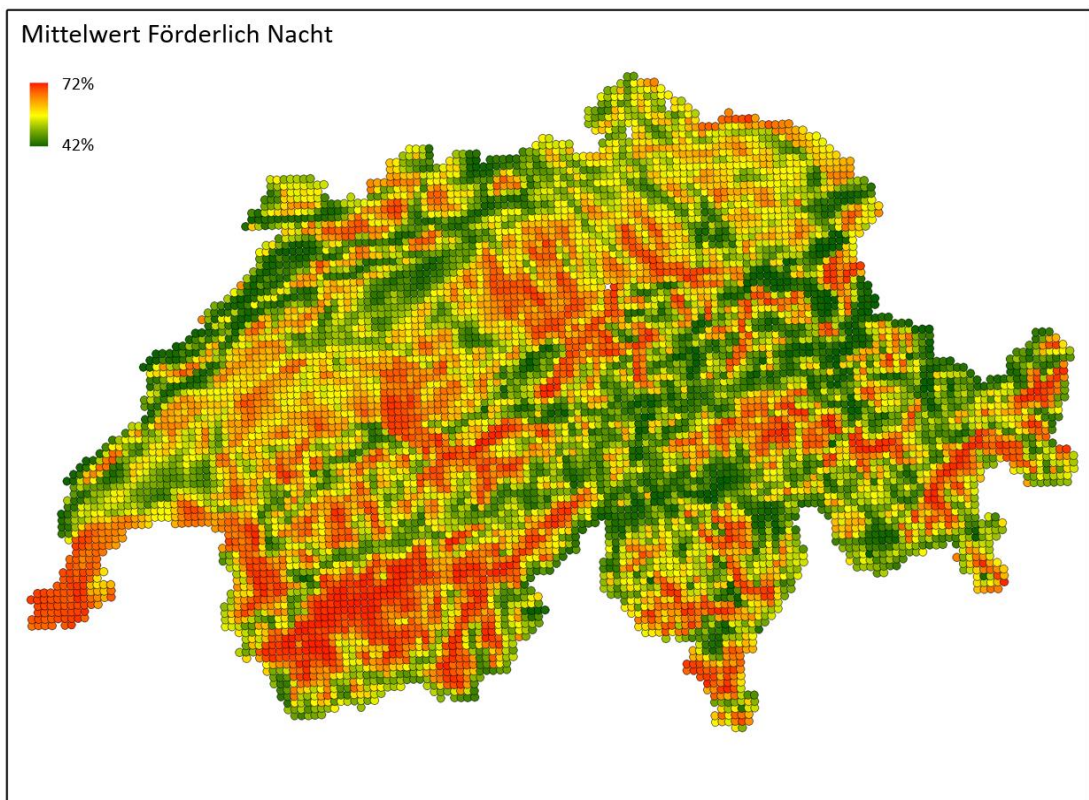


Abbildung 4: Häufigkeit förderlicher Ausbreitungsbedingungen in der Nacht (22 – 06 Uhr), pro Rasterpunkt gemittelt über alle Windrichtungen. (Mittelwert: 52%, Standardabweichung: 3%)

Beilagen

B.1 Referenzen

- [R1] "Aufbereitung von flächendeckenden Grundlagen für die Schallausbreitungsmodellierung in den Bereichen Meteorologie und Bodeneigenschaften", Empa Bericht-Nr. 459'348.
- [R2] <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- [R3] Prévion du bruit routier, 2 – Methode de calcul de propagation du bruit incluant les effets météorologiques (NMPB 2008).
- [R4] Wunderli, J. M. and M. W. Rotach, Application of statistical weather data from the numerical weather prediction model COSMO-2 for noise mapping purposes. Acta Acustica United with Acustica 97: 403-415 (2011).
- [R5] ISO 9613-2: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: General method of calculation, International Organization of Standardization (1996).

B.2 Bodenbedeckungskategorien und Zuordnungstabellen des Vorgängerberichtes

Tabelle 4 zeigt die Bodenbedeckungskategorien des Primärflächendatensatzes des Vektor25-Modells der swisstopo mit 28 Elementen. In

Tabelle 5 ist die Systematik des Datenmodells DM01 der amtlichen Vermessung mit 26 Elementen aufgeführt.

Tabelle 4: Bodenbedeckungskategorien des Primärflächendatensatzes der swisstopo (Vektor25-Modell).

DESCR_DE	DESCR_DE	DESCR_DE	DESCR_DE
Baumschule	Geröll in Wald	Obstanlage	Sumpf und Gebüsch
Fels	Geröll in offenem Wald	Reben	Sumpf
Fluss	Gletscher	See	Sumpf in Wald
Gebüsch	Graspiste	Siedlung	Sumpf in offenem Wald
Geröll mit Gebüsch	Piste mit Hartbelag	Staudamm	Übriges Gebiet
Geröll auf Gletscher	Kiesgrube	Staumauer	Wald
Geröll	Lehmgrube	Steinbruch	Wald offen

Tabelle 5: Bodenbedeckungskategorien der amtlichen Vermessung (Layer Bodenbedeckung im Datenmodell DM01).

ID	des_f	des_d	des_i	des_e
0	batiment	Gebaeude	edificio	buildings
1	route_chemin	Strasse_Weg	strada_sentiero	roads_tracks
2	trottoir	Trottoir	marciapiede	pavements
3	ilot	Verkehrinsel	spartitraffico	traffic_islands
4	chemin_de_fer	Bahn	ferrovia	railways
5	place_aviation	Flugplatz	aeroporto	airfields
6	bassin	Wasserbecken	bacino_idrico	basins
7	autre_revetement_dur	uebrige_befestigte	altro_rivestimento_duro	other_hard-surfaced
8	champ_pre_paturage	Acker_Wiese>Weide	campo_prato_pascolo	arable_meadow_pasture

9	vigne	Reben	vigna	vineyards
10	autre_culture_intensive	uebrige_Intensivkultur	altra_coltura_intensiva	intensive_cultivation
11	jardin	Gartenanlage	giardino	garden
12	tourbiere	Hoch_Flachmoor	torbiera	bog_swamp
13	autre_verte	uebrige_humusierte	altro_humus	other_vegetated
14	eau_stagnante	stehendes	specchio_acqua	standing_water
15	cours_eau	fliessendes	corso_acqua	flowing_water
16	roseliere	Schilfguertel	canneti	reed_belts
17	foret_dense	geschlossener_Wald	bosco_fitto	dense_forest
18	paturage_boise_dense	Wytweide_dicht	pascolo_boscato_fitto	pasture_dense
19	paturage_boise_ouvert	Wytweide_offen	pascolo_boscato_rado	pasture_open
20	autre_boisee	uebrige_bestockte	altro_bosco	other_wooded
21	rocher	Fels	roccia	rock
22	glacier_neve	Gletscher_Firn	ghiacciaio_nevaio	glacier_firn
23	eboulis_sable	Geroell_Sand	pietraia_sabbia	boulders_screesand
24	graviere_decharge	Abbau_Deponie	cava_di_ghiaia_discarica	quarries_landfill
25	autre_sans_vegetation	uebrige_vegetationslose	altra_senza_vegetazione	other_unvegetated

In Tabelle 6 wurde eine Zuordnung der Bodenbedeckungskategorien der amtlichen Vermessung zur Primärflächenkategorisierung des Vektor25-Modells vorgenommen. Trotz der ähnlichen Anzahl Elemente gibt es verschiedene Typen des swisstopo-Modells, für welche keine Entsprechung im DM01-Modell gefunden werden kann. Umgekehrt wurden namentlich den Elementen „Graspiste“ und „Piste mit Hartbelag“ des Vektor25-Modells mehrere Elemente aus dem DM01-Modell zugeordnet. Beim Element „Bahn“ des DM01-Modells findet sich keine geeignete Entsprechung im Vektor25-Modell. Im Rahmen des sonRAIL-Projektes waren die akustischen Eigenschaften von Bahntrassees untersucht worden und es stellte sich heraus, dass die Reflexionen an einem Schotter-Untergrund mit konventionellen Bodeneffektmodellen nicht korrekt wiedergegeben werden können. Deshalb wurde ein separates Bodeneffektmodell für die Reflexion an Schotter entwickelt und der Vektor25-Datensatz für die Verwendung mit sonRAIL um das Element „Eisenbahntrasse“ erweitert. Dieser zusätzliche Typ ist in Tabelle 6 zusätzlich aufgeführt.

In den letzten beiden Spalten von Tabelle 6 wurden Vorgaben für den Strömungswiderstand σ und für den Bodenfaktor G gemacht. Die Angaben stützen sich auf Erfahrungen der Empa ab und wurden mit Zuordnungen aus anderen Quellen, beispielsweise aus dem französischen Strassenlärmmodell¹, abgeglichen. In Tabelle 7 ist eine analoge Tabelle für die Bodenbedeckungskategorien der amtlichen Vermessung aufgeführt.

Tabelle 6: Zuordnung der Primärflächenkategorien gemäss Vektor25-Modell (Spalten 1 und 2) zu den Bodenbedeckungskategorien der amtlichen Vermessung (Spalten 3 und 4) sowie Angabe eines repräsentativen Strömungswiderstands σ [Rayl] und eines Bodenfaktors G [.]

ID	DESCR_DE	ID	des_d	σ	G
501	Baumschule			200	1.0
502	Fels	21	Fels	20000	0.0
503	Fluss	15	fliessendes	20000	0.0
504	Gebüsch	20	uebrige_bestockte	150	1.0
505	Geröll mit Gebüsch			20000	0.0
506	Geröll auf Gletscher			20000	0.0

¹ Préviation du bruit routier, 2 – Methode de calcul de propagation du bruit incluant les effets météorologiques (NMPB 2008).

507	Geröll	23	Geroell_Sand	20000	0.0
508	Geröll in Wald			500	0.7
509	Geröll in offenem Wald			500	0.7
510	Gletscher	22	Gletscher_Firn	20000	0.0
511	Graspiste	8, 10, 18, 19	Acker_Wiese_Weide, uebrige_Intensivkultur, Wytweide_dicht, Wytweide_offen	200	1.0
512	Piste mit Hartbelag	1, 2, 5, 7	Strasse_Weg, Trottoir, Flugplatz, uebrige_befestigte	20000	0.0
513	Kiesgrube			20000	0.0
514	Lehmgrube	24, 25	Abbau_Deponie, uebrige_vegetationslose	5000	0.3
515	Obstanlage	11	Gartenanlage	200	1.0
516	Reben	9	Reben	200	1.0
517	See	6, 14	Wasserbecken, stehendes	20000	0.0
518	Siedlung	0, 3	Gebaeude, Verkehrsinsel	10000	0.1
519	Staudamm			20000	0.0
520	Staumauer			20000	0.0
521	Steinbruch			20000	0.0
522	Sumpf und Gebüsch	16	Schilfguertel	200	1.0
523	Sumpf	12	Hoch_Flachmoor	200	1.0
524	Sumpf in Wald			200	1.0
525	Sumpf in offenem Wald			200	1.0
526	Übriges Gebiet	13	uebrige_humusierte	200	1.0
527	Wald	17	geschlossener_Wald	150	1.0
528	Wald offen			150	1.0
529	Eisenbahntrasse	4	Bahn	50	1.0

Tabelle 7: Bodenbedeckungskategorien der amtlichen Vermessung (Layer Bodenbedeckung im Datenmodell DM01) sowie Angabe eines repräsentativen Strömungswiderstands σ [Rayl] und eines Bodenfaktors \mathbf{G} [.]

ID	des_f	σ	\mathbf{G}
0	Gebaeude	10000	0.1
1	Strasse_Weg	20000	0.0
2	Trottoir	20000	0.0
3	Verkehrsinsel	10000	0.1
4	Bahn	50	1.0
5	Flugplatz	20000	0.0
6	Wasserbecken	20000	0.0
7	uebrige_befestigte	20000	0.0
8	Acker_Wiese_Weide	200	1.0
9	Reben	200	1.0
10	uebrige_Intensivkultur	200	1.0
11	Gartenanlage	200	1.0
12	Hoch_Flachmoor	200	1.0
13	uebrige_humusierte	200	1.0
14	stehendes	20000	0.0
15	fliessendes	20000	0.0
16	Schilfguertel	200	1.0
17	geschlossener_Wald	150	1.0

18	Wytweide_dicht	200	1.0
19	Wytweide_offen	200	1.0
20	uebrige_bestockte	150	1.0
21	Fels	20000	0.0
22	Gletscher_Firn	20000	0.0
23	Geroell_Sand	20000	0.0
24	Abbau_Deponie	5000	0.3
25	uebrige_vegetationslose	5000	0.3

B.3 Dokumentation der verwendeten Standard-Meteoprofile

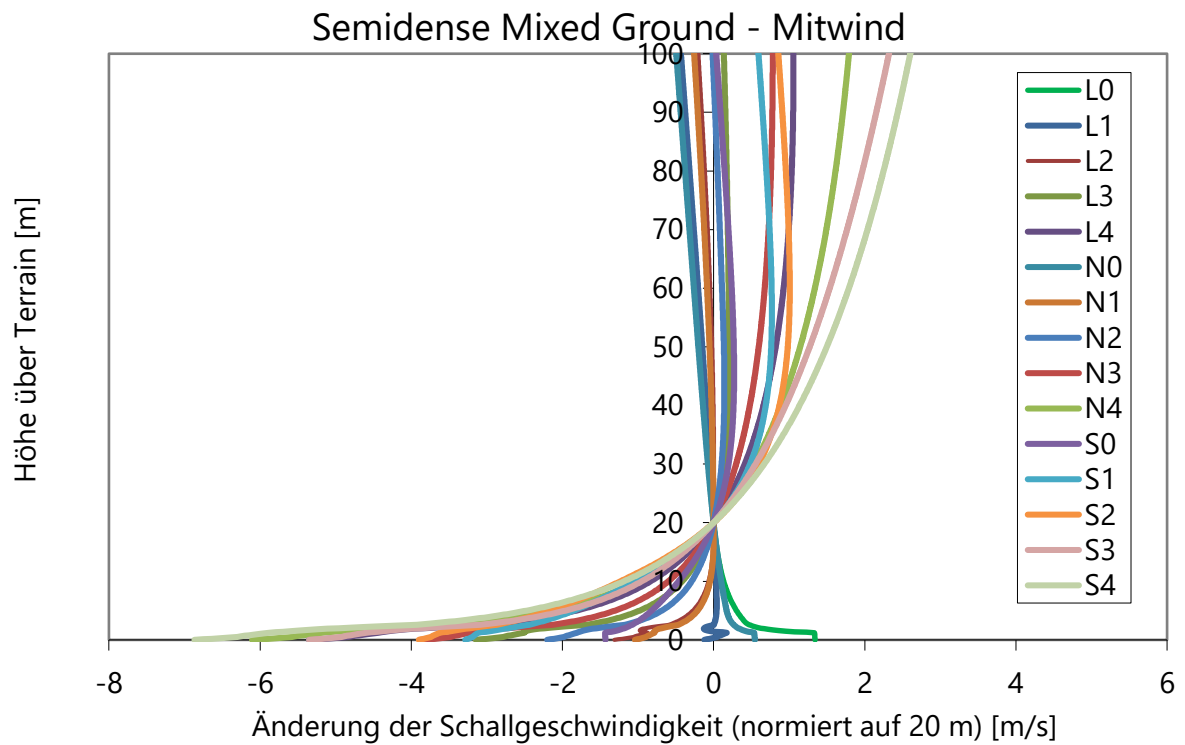


Abbildung 5: Vertikalprofile der Schallgeschwindigkeit, normiert auf 20 m, für 15 Standardprofile des Bodentyps "Semidense Mixed Ground" für Mitwind.

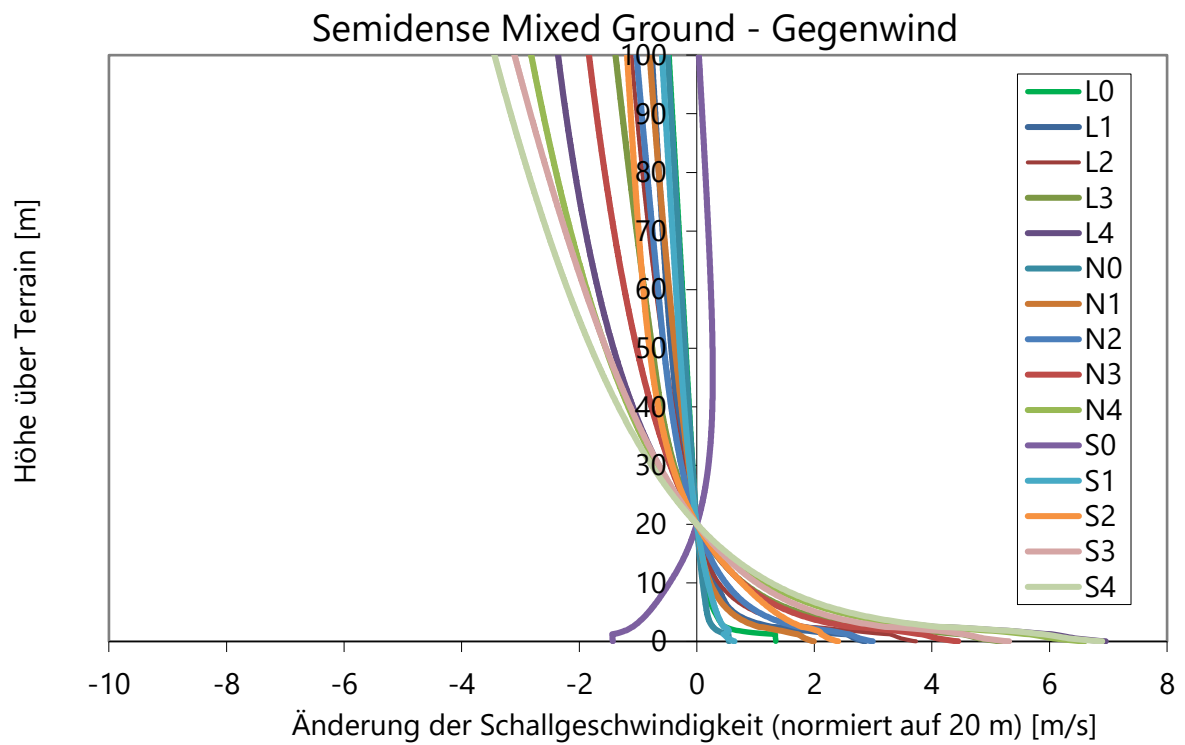


Abbildung 6: Vertikalprofile der Schallgeschwindigkeit, normiert auf 20 m, für 15 Standardprofile des Bodentyps "Semidense Mixed Ground" für Gegenwind.

B.4 Dokumentation der Datenfelder der resultierenden Meteostatistik

Allgemeine Angaben (bei sämtlichen Datensätzen identisch):

Index:	Index des COSMO2-Rasterpunktes
X_Koord:	Landeskoordinate in X-Richtung des COSMO2-Rasterpunktes
Y_Koord:	Landeskoordinate in Y-Richtung des COSMO2-Rasterpunktes
Hoehe:	Höhe über Meer des COSMO2-Rasterpunktes

Datensatz „Förd-Tag“ (*.dbf, *.shx, *.shp):

T_0 – T_350: Häufigkeit förderlicher Situationen in eine bestimmte Ausbreitungsrichtung

Datensatz „Förd-Abend“ (*.dbf, *.shx, *.shp):

A_0 – A_350: Häufigkeit förderlicher Situationen in eine bestimmte Ausbreitungsrichtung

Datensatz „Förd-Nacht“ (*.dbf, *.shx, *.shp):

N_0 – N_350: Häufigkeit förderlicher Situationen in eine bestimmte Ausbreitungsrichtung

Datensatz „Hind-Tag“ (*.dbf, *.shx, *.shp):

T_0 – T_350: Häufigkeit hinderlicher Situationen in eine bestimmte Ausbreitungsrichtung

Datensatz „Hind-Abend“ (*.dbf, *.shx, *.shp):

A_0 – A_350: Häufigkeit hinderlicher Situationen in eine bestimmte Ausbreitungsrichtung

Datensatz „Hind-Nacht“ (*.dbf, *.shx, *.shp):

N_0 – N_350: Häufigkeit hinderlicher Situationen in eine bestimmte Ausbreitungsrichtung

Datensätze „Stat-Tag“, Stat-Abend und Stat-Nacht (*.dbf, *.shx, *.shp):

Hind_mean:	Mittelwert der Häufigkeit hinderlicher Situationen über alle Ausbreitungsrichtungen
Hind_media:	Median der Häufigkeit hinderlicher Situationen über alle Ausbreitungsrichtungen
Hind_min:	Minimalwert der Häufigkeit hinderlicher Situationen über alle Ausbreitungsrichtungen
Hind_max:	Maximalwert der Häufigkeit hinderlicher Situationen über alle Ausbreitungsrichtungen
Foerd_mean:	Mittelwert der Häufigkeit förderlicher Situationen über alle Ausbreitungsrichtungen
Foerd_media:	Median der Häufigkeit förderlicher Situationen über alle Ausbreitungsrichtungen
Foerd_min:	Minimalwert der Häufigkeit förderlicher Situationen über alle Ausbreitungsrichtungen
Foerd_max:	Maximalwert der Häufigkeit förderlicher Situationen über alle Ausbreitungsrichtungen

B.5 Zuordnung einer bestimmten Wetterlage zu einer Meteoklasse

Wie in Tabelle 2 dargestellt, werden drei Kategorien für die atmosphärische Stabilität verwendet, nämlich Labil, Neutral und Stabil, welche in Abhängigkeit der Strahlungsbilanz zugeordnet werden. Die Strahlungsbilanz, als Verhältnis der lang- und kurzwelligen Ein- und Ausstrahlung hängt in erster Linie von Ort und Zeit, der Wolkenbedeckung sowie dem Albedo des Untergrundes ab. Abbildung 7 zeigt typische Strahlungsbilanzen im Tagesverlauf für einen wolkenfreien Himmel, welche gemäss VDI 3789, Blatt 2, berechnet wurden. Abbildung 8 zeigt analoge Resultate für einen vollständig wolkenbedeckten Himmel. Wie zu sehen ist, treten labile Schichtungen ausschliesslich am Tag und stabile Schichtungen ausschliesslich nachts auf.

Neutral geschichtete Atmosphären resultieren in Tagesrandzeiten bzw. im Winter und bei starker Bewölkung.

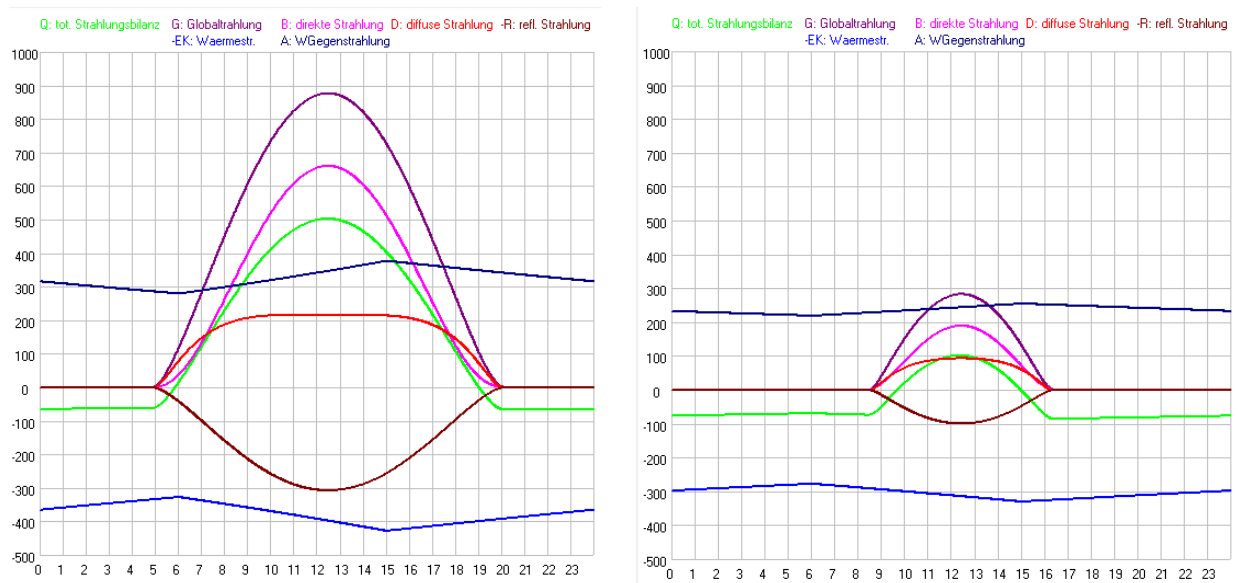


Abbildung 7: Strahlungsbilanzen im Tagesverlauf, berechnet für feuchtes Gras (Albedo = 0.35) und einen wolkenfreien Himmel, für einen Standort im Schweizerischen Mittelland 500 m über Meer; links für Mitte Juni, rechts für Mitte Dezember.

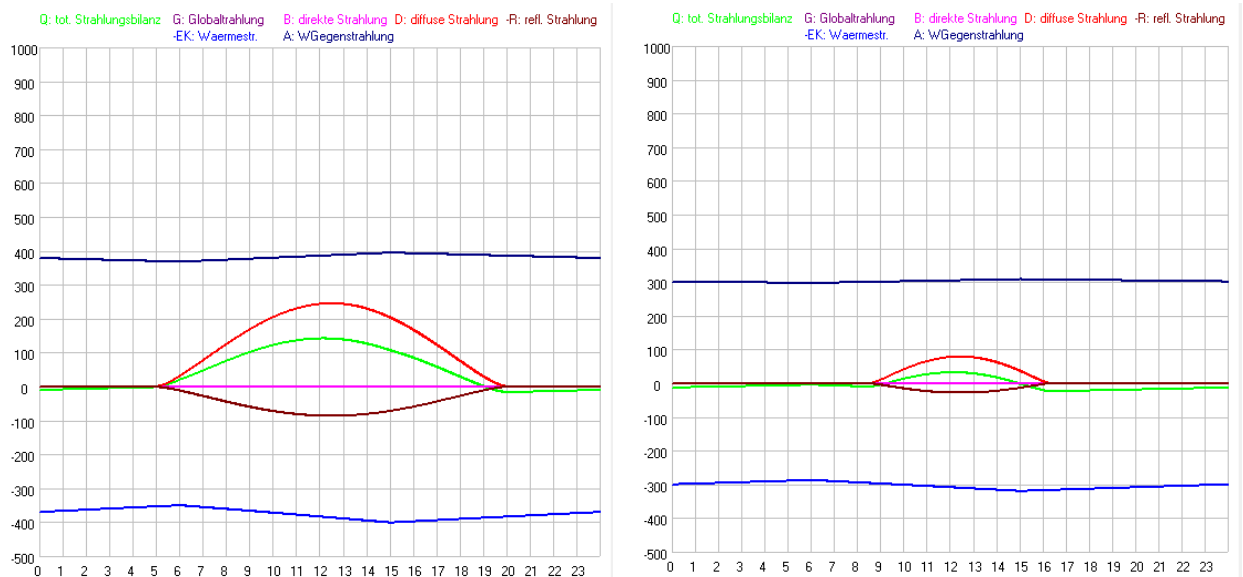


Abbildung 8: Strahlungsbilanzen im Tagesverlauf, berechnet für feuchtes Gras (Albedo = 0.35) und einen wolkenbedeckten Himmel, für einen Standort im Schweizerischen Mittelland 500 m über Meer; links für Mitte Juni, rechts für Mitte Dezember.

Die atmosphärische Stabilität wiederum hängt nicht nur von der Strahlungsbilanz, sondern auch vom Wind ab. Der Wind führt zu einer Durchmischung der Atmosphäre, was eine Reduktion der Temperaturgradienten mit der Höhe zur Folge hat. Exemplarisch zeigt Abbildung 9 die resultierenden Stabilitätsklassen für die Situation gemäss Abbildung 7, wobei links kein Wind bläst und rechts ein Wind von 3-5 m/s in 10 m Höhe. Wie zu erkennen, treten bei vorherrschendem Wind weder stark labile noch stark stabile Situationen auf.

Diese Effekte werden in den Meteoprofilen, welche den Meteoklassen gemäss Tabelle 2 zugrunde liegen, berücksichtigt.

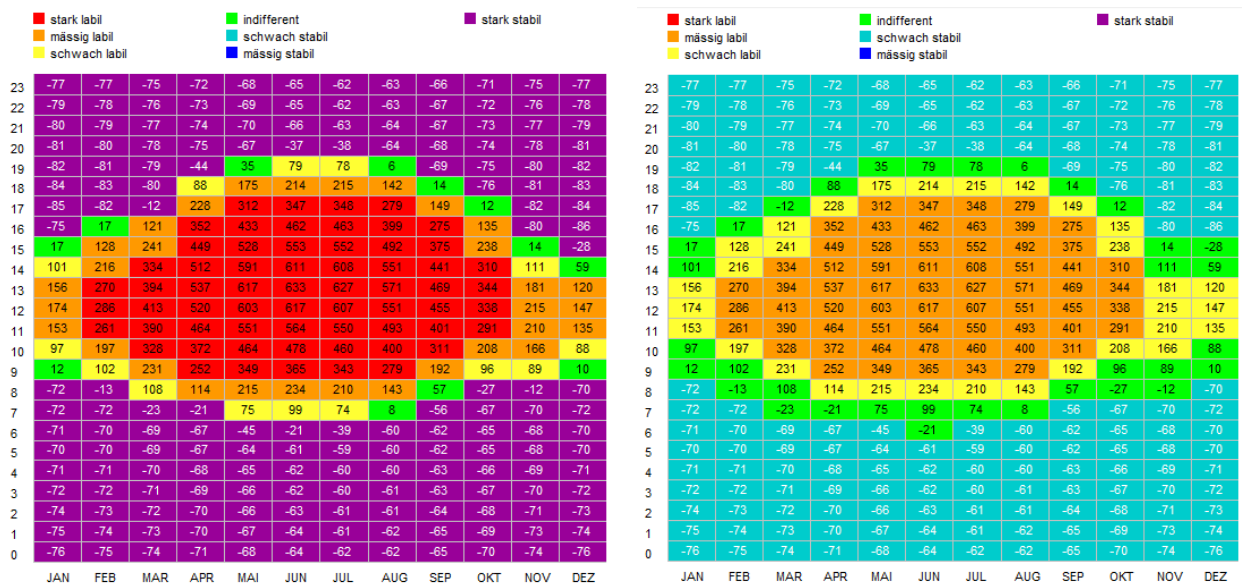


Abbildung 9: Stabilitätsklassen im Tages- und Jahresverlauf, berechnet für feuchtes Gras (Albedo = 0.35), für einen Standort im Schweizerischen Mittelland 500 m über Meer für Mitte Juni und einen wolkenfreien Himmel. Links dargestellt für Windstille, rechts für einen Wind von 3-5 m/s in 10 m Höhe. Die Zahlen in der Tabelle geben die Strahlungsbilanz in W/m² an, die Farbe zeigen eine Zuordnung zu sieben Stabilitätsklassen.

B.6 Umrechnung von Windprofilen auf andere Höhen

Die Angaben zur Windgeschwindigkeit in diesem Bericht gelten für Höhen von 10 m über Terrain. In der Praxis ist es jedoch oft nicht möglich oder zumindest zu aufwändig, auf dieser Höhe zu messen. Um ausgehend von einer anderen Messhöhe eine Zuordnung zu einer bestimmten Meteoklasse vorzunehmen, können Abbildung 10 bis Abbildung 12 verwendet werden. Die Profile in Abbildung 10 gelten für sonnige Bedingungen am Tag über Grasland mit kaum Hindernissen wie Gebäuden oder Vegetation, welche die Windfelder beeinflussen. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die analogen Profile für neutral bzw. stabil geschichtete Atmosphären. Um eine gute Übereinstimmung mit den Profilen zu erreichen, müssen die Messung über ebenem Grasland in möglichst grossem Abstand von Hindernissen durchgeführt werden. Da lokale Einflüsse in Bodennähe ausgeprägter sind, sollte die Messhöhe mindestens 2 m betragen.

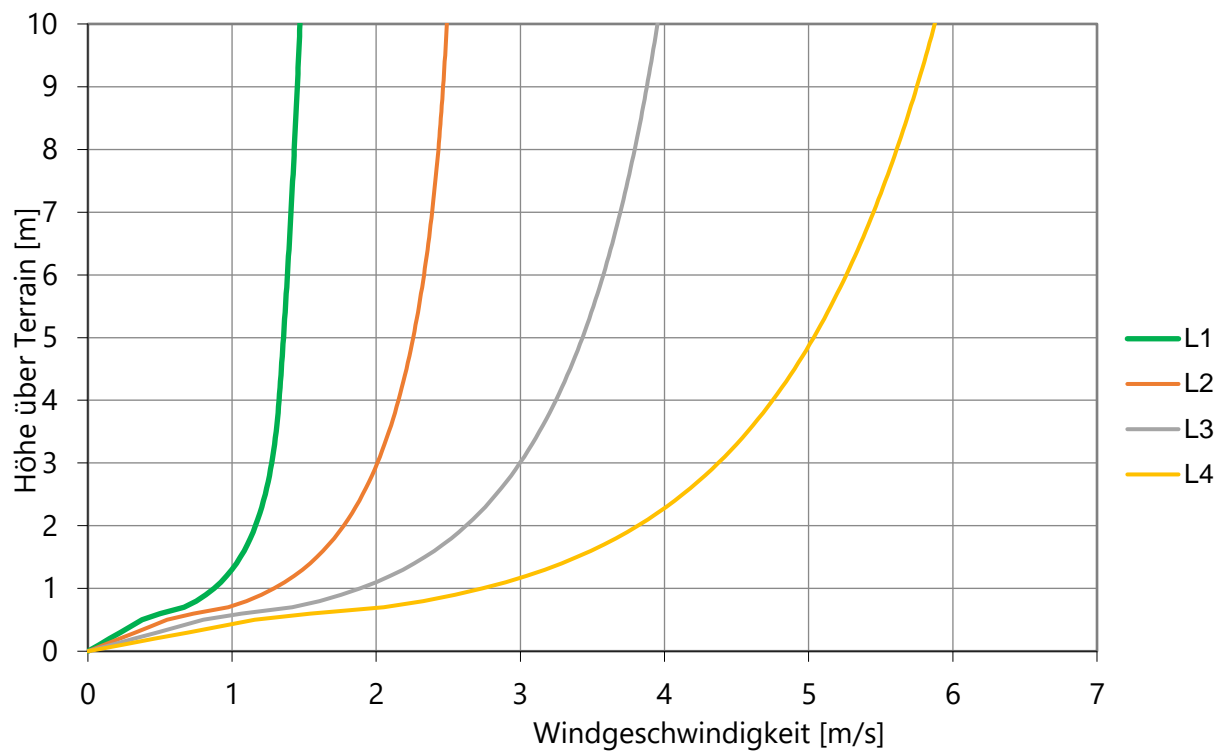


Abbildung 10: Windprofile der Meteoklassen L1 bis L4 (labil geschichtete Atmosphäre) über Grasland (Typ PorousNaturalGround).

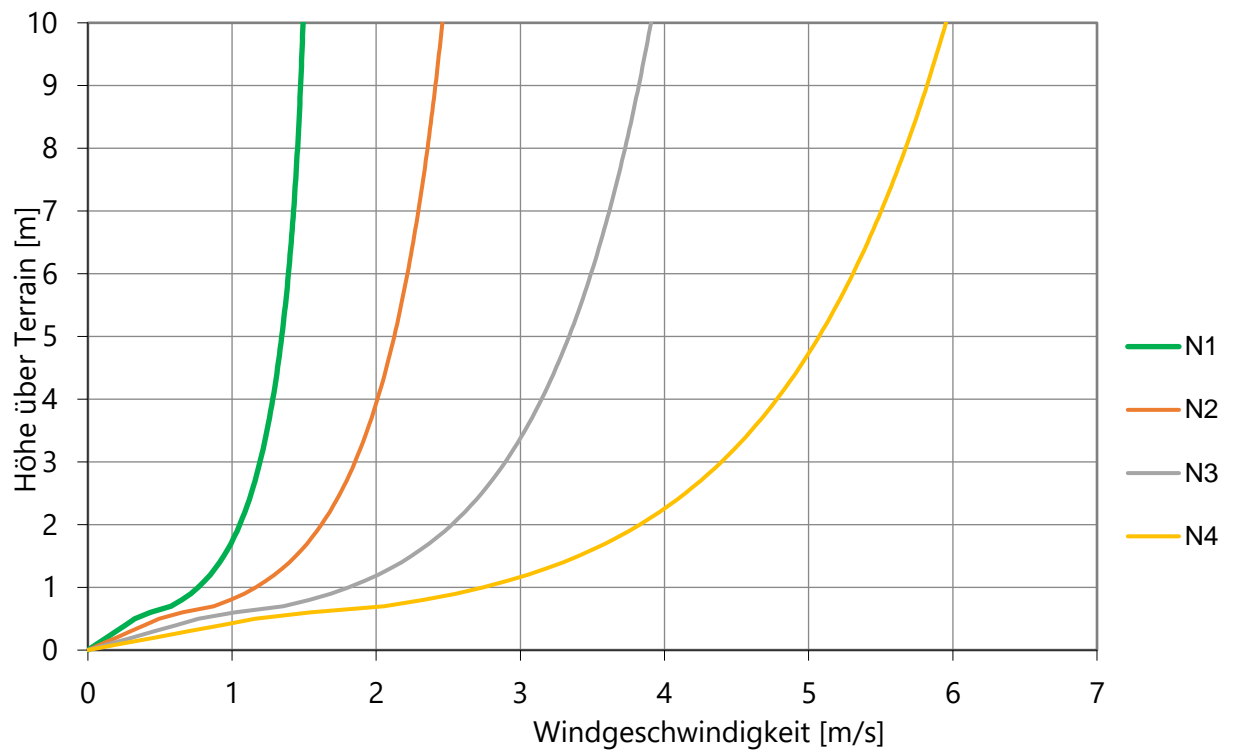


Abbildung 11: Windprofile der Meteoklassen N1 bis N4 (neutral geschichtete Atmosphäre) über Grasland (Typ PorousNaturalGround).

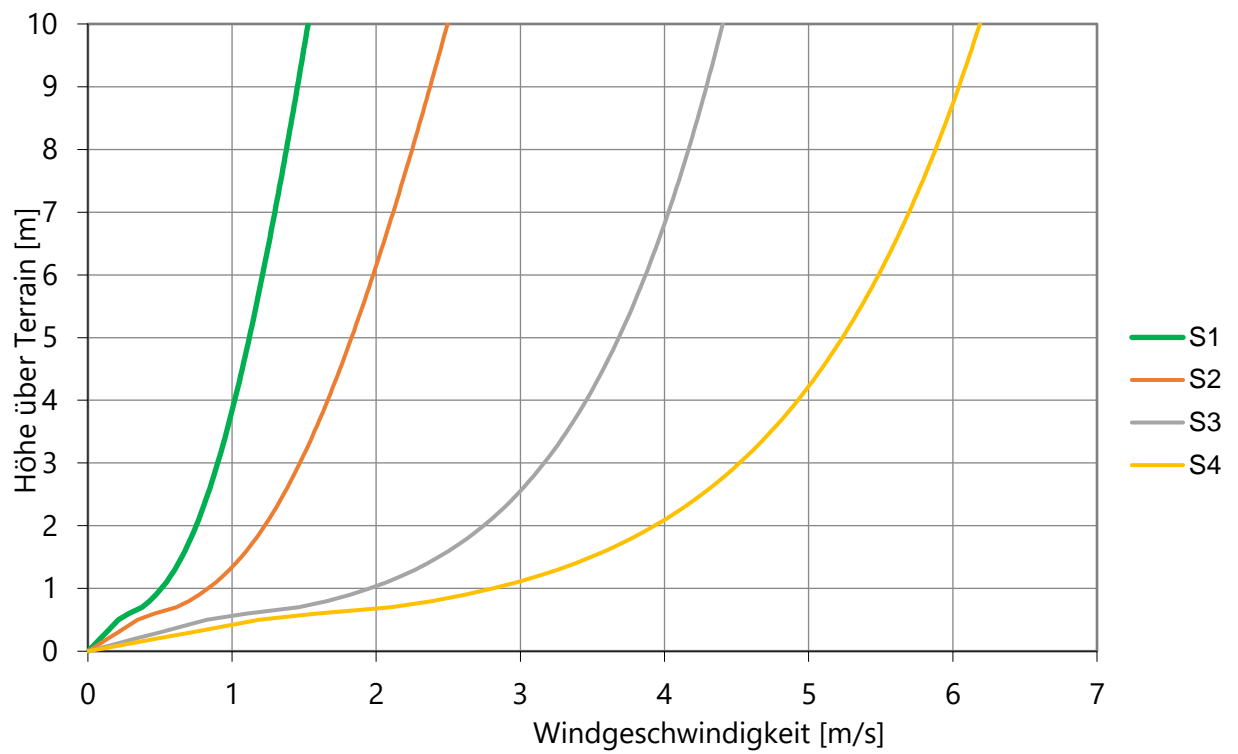


Abbildung 12: Windprofile der Meteoklassen S1 bis S4 (stabil geschichtete Atmosphäre) über Grasland (Typ PorousNaturalGround).