

Kapitel 10

Wind

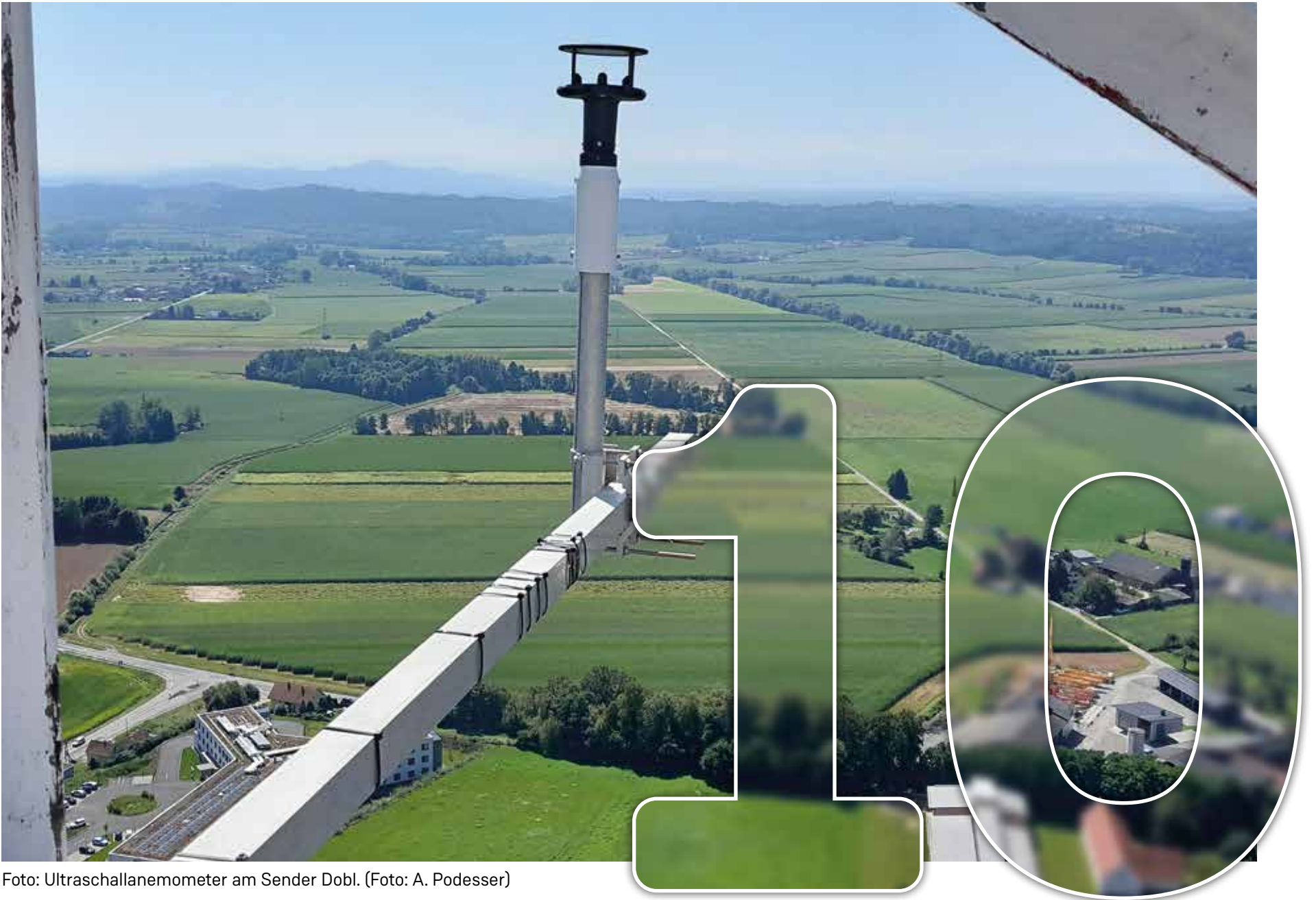


Foto: Ultraschallanemometer am Sender Dobl. (Foto: A. Podesser)

Autor:
Alexander Podesser

Inhaltsverzeichnis

- 10 Wind.....233
 - 10.1 Einleitung235
 - 10.2 Windsysteme235
 - 10.3 Windmessung.....235
 - 10.3.1 Aufstellungsort der Messgeräte zur Windmessung.....236
 - 10.3.2 Die Windverhältnisse in der Steiermark.....236
 - 10.3.3 Thermische Schichtung und Windgeschwindigkeit236
 - 10.3.4 Stabile Schichtungsbedingungen.....236
 - 10.3.5 Labile Schichtungsbedingungen236
 - 10.4 Jahres- und Tagesgänge236
 - 10.4.1 Methodik der Kartendarstellung236
 - 10.4.2 Jahresgang der Windgeschwindigkeit237
 - 10.4.3 Tagesgang der Windgeschwindigkeit239
 - 10.5 Windrichtungsverteilungen.....240
 - 10.6 Starkwindtage.....241
 - 10.7 Zeitliche Entwicklung von extremen Windereignissen244
 - 10.8 Datenanhang247
 - 10.8.1 Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeit sowie mittlere Windrichtungsverteilung nach Geschwindigkeitsklassen.....247

10.1 Einleitung

Durch verschieden temperierte Luftmassen kommt es zu Druckunterschieden der Luft, deren Ausgleich sich als Luftbewegungen in Form von Wind bemerkbar machen. Er wird durch seinen horizontalen Windvektor, der durch Richtung und Geschwindigkeit gekennzeichnet ist sowie durch seine vertikalen Komponenten aus Heben bzw. Absinken von Luft beschrieben. Im Allgemeinen stellen dabei die Horizontalkomponenten den dominanten Anteil dar (zumindest in Bodennähe), daher

beziehen sich alle Darstellungen der Windverhältnisse auf die Horizontalströmungen. Trotzdem sind vertikal gerichtete Luftbewegungen für bestimmte Prozesse in der Atmosphäre von großer Bedeutung, etwa für die Niederschlags- oder Gewitterentstehung oder die Wolkenbildung und -auflösung. Die Messung der Vertikalkomponenten, welche im Mittel um zwei Zehnerpotenzen kleiner sind, findet jedoch meist nur bei Spezialuntersuchungen Anwendung.

Im Folgenden wird die Windrichtung als diejenige verstanden, aus welcher der Wind kommt. Die Windgeschwindigkeit definiert dabei den Weg, den die Luftteilchen pro Zeiteinheit zurücklegen, wobei hier als Maßeinheit üblicherweise Meter pro Sekunde (m/s) oder Kilometer pro Stunde (km/h) verwendet werden.

10.2 Windsysteme

Während großräumig wirksame Windsysteme durch unterschiedliche Druckzustände atmosphärischer, über der Erdoberfläche lagernder Luftmassen entstehen, welche in der Meteorologie als Hoch- und Tiefdruckgebiete bezeichnet werden, kommt es in bodennahen Schichten der Atmosphäre zu Modifizierungen des Windfeldes. Die Rauigkeit der Erdoberfläche sowie die vertikale Schichtung der Luft haben dabei einen wesentlichen Einfluss auf das Strömungsfeld, welches im topographisch stark strukturierten Gelände außerdem von lokalen Windsystemen überlagert wird.

Eine wichtige Rolle in der komplexen Topographie der Steiermark spielen dabei thermische Winde, welche sich unabhängig von den differenzierten Landbedeckungen in regionaler und lokaler Skala ausbilden können. Aufgrund ungleicher Erwärmungsraten, bedingt durch ungleiche Hangneigungen und -expositionen bzw. unterschiedlichen Luftvolumina über Berg-, Tal- und Beckenlagen, kommt es zu tagesperiodisch alternierenden Strömungen.

Tagsüber erwärmen sich sonnenzugewandte Hangflächen stärker als ebene Flächen. Dadurch wird die Hangluft leichter, es entstehen thermisch induzierte Hangaufwinde, auch als anabatische Windsysteme bezeichnet. In gleicher Seehöhe erwärmt sich die Luft in den Gebirgstälern stärker als über dem Vorland, es bildet sich ein Temperaturgefälle zwischen dem Taleinzugsgebiet (relativ warm – „Tief-

druck“ am Boden) und dem Vorland (relativ kalt – „Hochdruck“ am Boden). Das daraus resultierende thermische Windsystem weht parallel zur Talachse als Taleinwind (Talwind) taleinwärts.

In der Nacht kehren sich die Vorgänge um, es kommt zu einer verstärkten Ausstrahlung und damit Abkühlung in den Hochlagen. Nachts wird die Hangluft schwerer und strömt als Hangabwind hangabwärts. Dieser schwerkraftbedingte Kaltluftabfluss wird als katabatischer Wind bezeichnet. Wiederum sind es die thermischen Gegensätze zwischen der akkumulierten Kaltluft in den Tälern (relativ kalt – „Hochdruck“ am Boden) und der in gleicher Höhe relativ wärmeren Luft im Vorland (tieferer Druck), die für eine Zirkulation entlang der Talachse, diesmal als Talauswind (Bergwind), verantwortlich sind. Das ineinandergreifende System der Tallängs- und Talquerzirkulation wurde erstmals von Defant (1949) in idealisierter Weise nach unterschiedlichen Tages- und Nachtzeiten zusammengefasst, die Beschreibung der Ausprägung einer Zirkulationszelle in einem Tal ist bei Colette et al. (2003) ausführlich beschrieben.

Die Bedeutung dieses Windsystems hat vor allem auch einen lufthygienischen und bioklimatischen Aspekt, indem mit dem Talauswind frische und saubere Luft von den Bergen des Umlandes in die Täler gelangt. Die Luft des Taleinwindes kann hingegen zwar wärmer

sein, aufgrund der höheren Windgeschwindigkeiten jedoch trotzdem abkühlend wirken.

Bei der Betrachtung des Windfeldes in den Haupttälern der Steiermark mit entsprechender Horizontüberhöhung tritt eine überproportional häufige, talparallele Komponente in den Vordergrund. Diese kann sich nicht nur bei neutralen bzw. stabilen Schichtungsbedingungen und abgekoppeltem Höhenwindfeld ausbilden, sondern sich auch unabhängig vom Höhenwind bei labilen Verhältnissen entwickeln. Gross und Wippermann (1987) haben dieses Phänomen für das Rheintal nicht nur über die thermische Komponente, sondern vor allem auch über die Leitwirkung größerer Täler erklärt.

Somit lässt sich das autochthone, also vor Ort entstandene Windfeld in Tälern und Becken sowie an Hängen am besten über gradientenschwache, bewölkungsarme Wetterlagen beschreiben, bei denen die meteorologischen Elemente in Bodennähe vornehmlich durch den Wärmehaushalt der sogenannten „wirksamen Erdoberfläche“ und in geringerem Maße von der Luftmasse geprägt sind und daher die Ausbildung von Lokalwinden begünstigen. Diese Strömungscharakteristik findet sich in Bezug auf die Tagesperiodizität der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit auch im langjährigen Mittel wieder.

10.3 Windmessung

War man früher bei der Beurteilung der Windverhältnisse auf Schätzungen angewiesen, welche auf den beobachteten Auswirkungen des Windes basierten (Beispiel Beaufort-Skala), kommen etwa seit den 1980er Jahren halbautomatische bzw. automatische Systeme zum Einsatz. Bis vor wenigen Jahren war das verbreitetste Messprinzip das Rotationsanemometer. Dabei wird die Drehzahl eines

mechanisch gelagerten Schalensternes als Maß für die Windgeschwindigkeit genützt. Die Windrichtung wird mit einer Windfahne, deren Stellung elektronisch abgetastet wird, ermittelt. Mittlerweile haben sich aber vorwiegend Ultraschall-Anemometer (USA) durchgesetzt. Bei diesem Prinzip wird die Laufzeit von Schallimpulsen zwischen zwei Messköpfen gemessen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit

des Schalls wird dabei von der Windgeschwindigkeitskomponente überlagert, die in Richtung der zwei Messköpfe vorhanden ist. Für die Messung des horizontalen Windes braucht man zwei Paar Messköpfe, in x- und y-Richtung. Damit ist es möglich, den resultierenden Windvektor zu berechnen und sowohl die Windgeschwindigkeit als auch die Windrichtung zu ermitteln. Auch eine dreidi-

mensionale Windmessung mit Erfassung der z-Komponente über drei Paar Messköpfe mit entsprechender Anordnung ist möglich und wird vor allem in der Umweltmeteorologie, etwa für Ausbreitungsrechnungen verwendet. Beide Systeme weisen Vor- und Nachteile auf. So haben die Ultraschallanemometer einen deutlich höheren Stromverbrauch, was bei unzureichender Solarversorgung schwierig sein kann. Sie besitzen aber keine drehenden Teile, was den Wartungsaufwand wiederum reduziert. Bei den Schalensternanemometern ergibt sich aufgrund der mechanischen Teile eine gewisse Trägheit beim Anlaufen, weshalb die Messung von Windgeschwindigkeiten unter 0,3 m/s nicht möglich ist. In der Meteorologie war dies lange Zeit vernachlässigbar, da hier bewusst jede Windgeschwindigkeit unter 0,5 m/s als Kalme abgespeichert wurde. Vor allem für die Umweltmeteorologie ist aber die Kenntnis derart geringer Strömungen wichtig, da sie Ursache für recht ungünstige Ausbreitungsverhältnisse mit hohen Spurenstoff-Konzentrationen nahe am Emittenten sein können.

Während sich die Windmessung nicht zuletzt aufgrund technischer und logistischer Unwägbarkeiten lange Zeit auf den Siedlungsraum beschränkte, kommen etwa seit der Jahrtausendwende mit Hilfe modernerer Technologie auch vermehrt Messungen im Gebirge zum Einsatz. So sind für die Einschätzung der Lawinengefahr Windmessstationen an windexponierten Geländeabschnitten ebenso wichtig wie für die Ermittlung des Windenergiepotentials entlang von Gebirgskämmen. Leider haben aber beide Messsysteme ihre Schwachpunkte bei Schnee und Reifansatz, da eine Heizmöglichkeit meist nicht gegeben ist. Eine lückenlose Messung im Hochgebirge ist daher meist nicht möglich, da es aufgrund der Vereisungen im Winterhalbjahr immer wieder zu längeren Datenausfällen kommen kann.

10.3.1 Aufstellungsort der Messgeräte zur Windmessung

Die Standortauswahl der Messgeräte hängt grundsätzlich von der Aufgabenstellung ab (z.B. Erfassung eines lokalen Talwindsystems), für die Standorthöhe gibt es entsprechende Empfehlungen der WMO. Bei unge-

störtem Gelände muss die Geberhöhe 10 m betragen, wobei die Entfernung der nächsten Hindernisse vom Messgeber mindestens das 10-fache der Höhe des Hindernisses ausmachen muss. Gerade im Siedlungsgebiet lassen sich Störungseinflüsse durch Bebauung oder Bewuchs oft nicht vermeiden, in diesem Fall wird über dem Niveau der störenden Objekte gemessen (ÖNORM M9490-6).

10.3.2 Die Windverhältnisse in der Steiermark

Aufgrund der äußerst komplexen Topographie mit dem obersteirischen Anteil an den Nord- und Zentralalpen mit großen Längs- und Durchbruchstälern und ausgeprägten inneralpinen Becken sowie dem abgeschirmten südöstlichen Alpenvorland mit den großen Talböden und dem Hügelland bilden sich in der Steiermark große Gegensätze im Windfeld aus.

So kommt es in Abhängigkeit des Geländes und der Seehöhe zu einer Verzahnung lokaler und regionaler Windsysteme mit dem übergeordneten, großräumig wirksamen Windfeld. Grundsätzlich nehmen die Windgeschwindigkeiten mit zunehmender Seehöhe, der damit verbundenen Abnahme des Reibungsverlustes durch Bodenrauigkeit und der orographischen Abschirmung durch Gebirgszüge, stetig zu. Während in den Niederungen des Vorlandes im Monatsmittel kaum Windgeschwindigkeiten über 3 m/s auftreten, werden an den windexponierten Gipfelstationen Mittelwinde über 10 m/s erreicht.

10.3.3 Thermische Schichtung und Windgeschwindigkeit

Aufgrund der mit zunehmender Seehöhe abnehmenden Reibung nimmt auch die Windgeschwindigkeit entsprechend dem logarithmischen Windgesetz nach oben zu. Der Betrag der vertikalen Geschwindigkeitszunahme hängt aber auch stark von den Stabilitätsverhältnissen (im Wesentlichen von der vertikalen Durchmischung der Luftmasse), d.h. von ihrer thermischen Schichtung, ab (z.B. Oke, 1978).

10.3.4 Stabile Schichtungsbedingungen

Bei Inversionswetterlagen mit stabilen Schichtungsbedingungen und weitgehend fehlender vertikaler Durchmischung erfolgt kein Austausch zwischen der Luft der Grundschicht und der freien Atmosphäre. Als Folge stellen sich in den bodennächsten Schichten meist nur schwache Luftbewegungen oder überhaupt Windstillen ein, während die Luftströmung über der Grundschicht nicht mehr durch die Bodenreibung gebremst wird. Die tieferen Luftschichten verlieren, die höheren Luftschichten gewinnen Bewegungsenergie. Derartige Situationen treten in Bezug auf den Jahresgang der Windgeschwindigkeit häufig im Winterhalbjahr, in Bezug auf den Tagesgang häufig während der Nacht auf.

10.3.5 Labile Schichtungsbedingungen

Umgekehrt ist bei labiler Schichtung bzw. vertikaler Durchmischung der Luftmasse ein Massenaustausch zwischen den oberen und unteren Luftschichten möglich. Durch die höhere thermische Turbulenz werden langsamere Luftpakete aus den bodennahen Schichten gegen schnellere aus den höheren, von der Bodenreibung weniger beeinflussten Schichten ausgetauscht. Dieser Luftanteil aus der freien Atmosphäre führt in den Niederungen zu höheren Windgeschwindigkeiten, während das „Mitschleppen“ bodennaher Luftschichten die Windgeschwindigkeit in der Höhe abbremsst. Die tieferen Luftschichten gewinnen, die höheren Luftschichten verlieren Bewegungsenergie, was sich in einer nur mäßigen vertikalen Windgeschwindigkeitszunahme äußert. In Bezug auf den Jahresgang der Windgeschwindigkeit ist diese Situation im Sommerhalbjahr, in Bezug auf den Tagesgang der Windgeschwindigkeit tagsüber typisch.

10.4 Jahres- und Tagesgänge

10.4.1 Methodik der Kartendarstellung

Aufgrund der großen Variabilität des Parameters Wind in tages- und jahreszeitlicher Abhängigkeit von der komplexen Topographie mit unterschiedlicher Höhenlage gestaltet sich eine flächige Darstellung der mittleren Windgeschwindigkeit und der Windrichtung als relativ schwierig. Aus diesem Grund wurden die mittleren Windverhältnisse eines größeren Gebietes bisher meist nur exemplarisch

als Punktinformation in Form von Windrosen ausgewählter Stationen mit Windmessung wiedergegeben. Auch im vorangegangenen Klimaatlas Steiermark (Podesser, 2012) erfolgte die räumliche Verteilung der Windverhältnisse über die einfache Verortung von Windrosen.

Üblicherweise erfolgen Windfeldberechnungen numerisch über massenkonsistente, divergenzfreie, diagnostische Strömungsmodelle mit mikro- bis mesoskaliger räumlicher Auflösung. Die Modellierung großskaliger

Windfelder – etwa für die Größe der Steiermark und für sehr lange Zeitreihen – wäre in entsprechend befriedigender räumlicher Auflösung extrem rechenaufwändig und war für das gegenständliche Werk auch aus zeitlichen Gründen nicht durchführbar.

Aus diesem Grund erfolgte die Berechnung der Windfelder mit dem Analyse- und Prognose-Tool INCA (Kapitel 1.6). Die Datengrundlage bildeten dabei die INCA-Analysen eines zehnjährigen Zeitraumes vom 01.01.2012 bis 31.12.2021. Ausgewertet bzw. in Kartenform

dargestellt wurden dabei die mittleren Windverhältnisse nach Jahreszeiten sowie während autochthoner Wetterlagen nach Tag und Nacht, weiters die Tage mit Sturm nach Jahreszeiten.

10.4.2 Jahresgang der Windgeschwindigkeit

Für den Jahresgang der Windgeschwindigkeit wirken die oben angeführten Faktoren im Sinne eines Winterminimums und Sommermaximums in tiefen Lagen bzw. in umgekehrter Situation in hohen Lagen, doch ist der Jahresgang nicht nur von der thermischen Schichtung, sondern vor allem auch von den herrschenden Wetterlagen und damit auch von den großräumigen Luftdruckverhältnissen abhängig. Der Jahresgang der Luftdruckunterschiede im zyklonalen Westwindklima der

nordhemisphärischen Mittelbreiten zeigt eine einfache Amplitude mit deutlichem Wintermaximum und Sommerminimum. Dies führt im Winter vor allem in höheren Lagen zu größeren Windgeschwindigkeiten und wirkt somit dem Effekt der thermischen Schichtung, die im Winter vor allem in den Niederungen zu geringeren Windgeschwindigkeiten führt, entgegen (Blüthgen und Weischet, 1980).

Je nach Landschaft zeigt somit der Jahresgang der Windgeschwindigkeit durch das Zusammenwirken beider Komponenten unterschiedliche Ausprägungen. Die regionale Verteilung lässt sich dabei recht gut in Abbildung 10.1 beschreiben.

In abgeschlossenen Landschaften der Niederungen wie etwa in den Becken des Vorlandes und der Obersteiermark wirkt sich der dämpfende Einfluss der thermischen Schichtung (Inversionen) vor allem im Herbst und Winter immer mehr auf die Windgeschwindigkeit aus,

was sich in schwach ausgeprägten Amplituden mit einem Minimum im Winter und einem Maximum im Frühjahr äußert. So liegt an der Station Graz Universität das Dezembermittel bei 1,1 m/s und das Maimittel bei 1,8 m/s, was eine Amplitude von nur 0,7 m/s ergibt. Eine ebenso geringe Jahresschwankung weist die Station Zeltweg mit 0,7 m/s (zwischen 1 und 1,7 m/s) auf. Das Winterminimum und Frühjahrsmaximum setzt sich auch noch in den höheren Riedellagen des Vorlandes wie etwa in Klösch durch. Mit zunehmender Seehöhe treten immer mehr die großräumigen Luftdruckgegensätze in den Vordergrund, die im Winter die höchsten Gradienten aufweisen. Dementsprechend werden an den Messstandorten im Gebirge die höchsten Werte zwischen den Monaten November und Jänner erreicht, während ein Minimum, ausgehend von der eher flachen Druckverteilung, in den Sommermonaten eintritt. Dieser Jahresgang tritt bereits

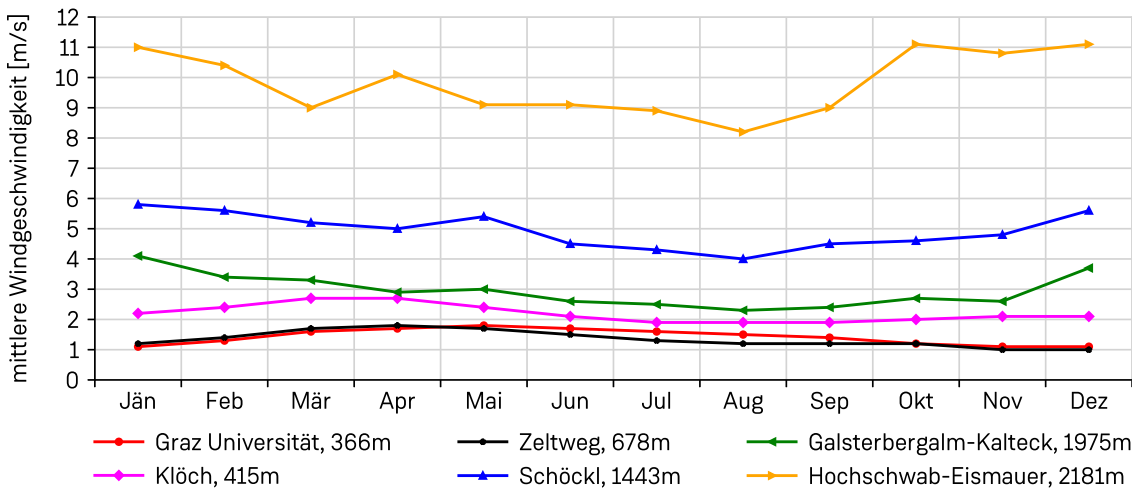
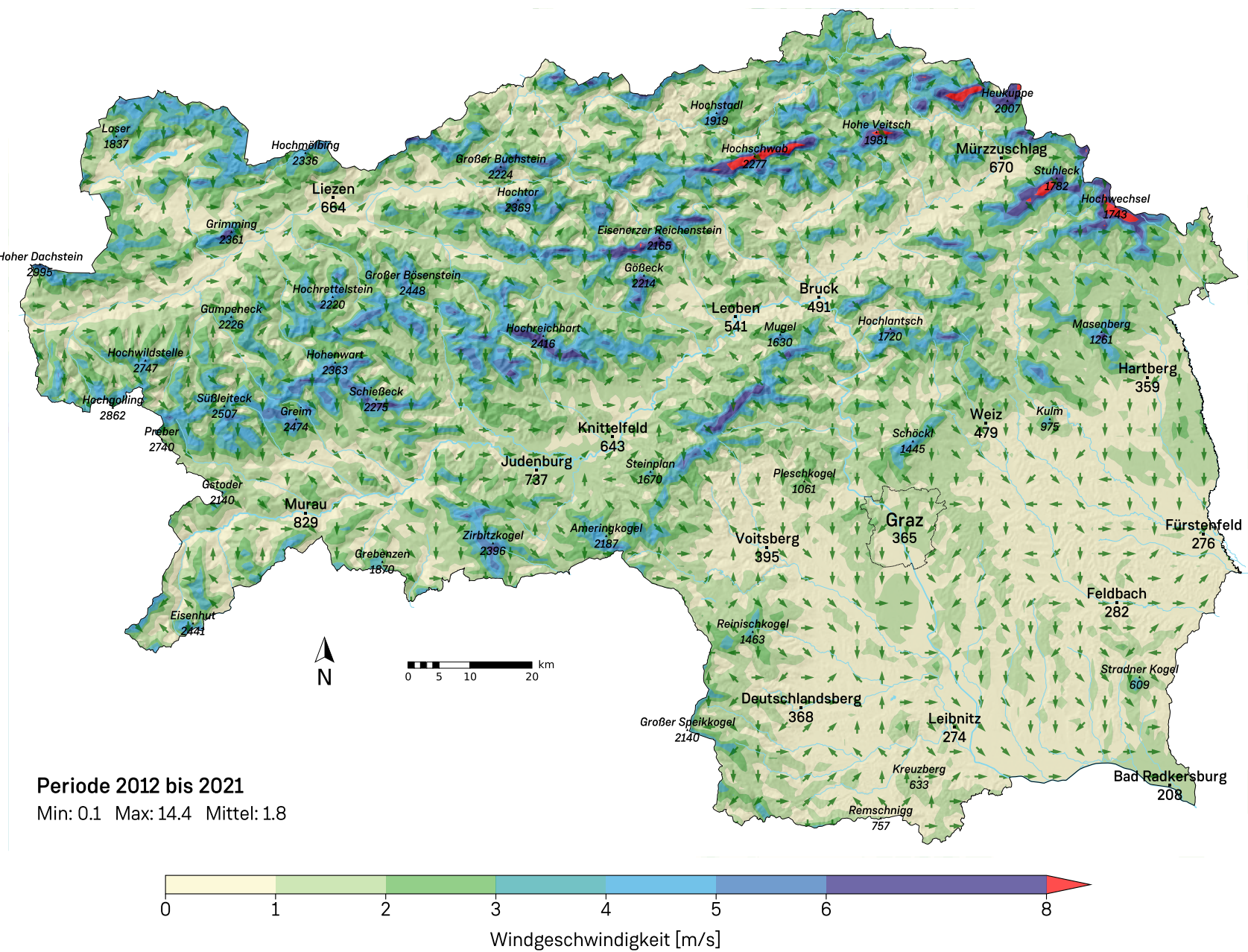
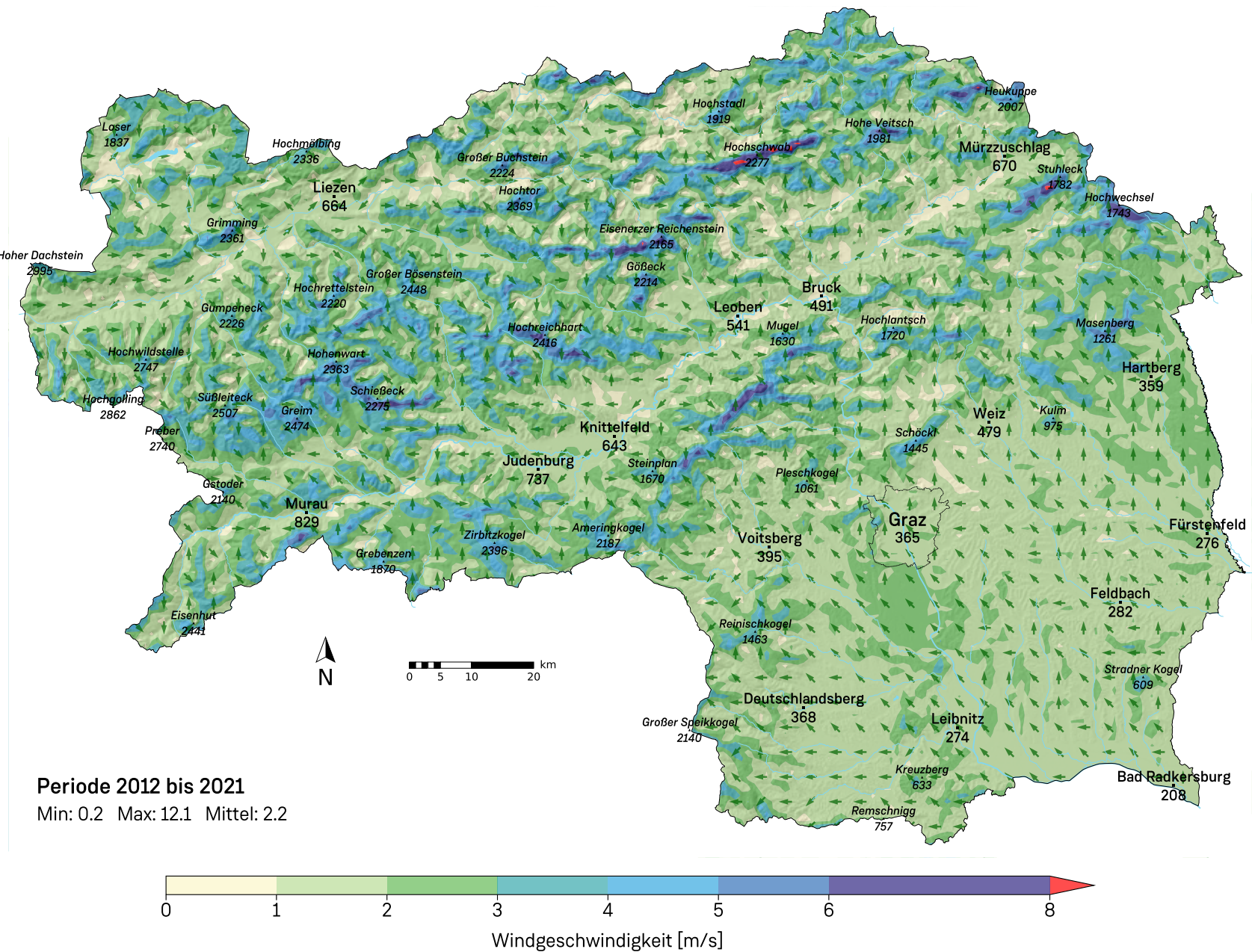


Abbildung 10.1: Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit [m/s] an ausgewählten Stationen.

	Jän	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	
Aflenz, 783m (10m)	0.8	0.9	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	1.1	1.0	0.8	0.8	0.9	5.8
Aigen im Ennstal, 641m (10m)	1.7	1.6	1.9	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	1.2	1.2	1.1	1.4	1.7	1.3	1.2	1.5	1.4	5.6
Bad Aussee, 743m (10m)	1.3	1.4	1.3	1.3	1.0	0.8	0.6	0.7	0.8	1.1	1.4	1.3	1.2	0.7	1.1	1.3	1.1	5.4
Bad Gleichenberg, 269m (20m)	0.8	0.9	1.2	1.4	1.2	1.0	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	1.3	0.9	0.8	0.8	1.0	5.2
Bad Mitterndorf, 814m (13m)	1.2	1.2	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.3	1.1	1.0	1.1	1.2	5.0
Bruck an der Mur, 482m (10m)	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	1.1	0.9	0.8	0.8	0.9	4.8
Dachstein-Hunerkogel, 2700m (24m)	4.3	4.0	3.6	3.6	3.3	3.1	2.7	2.6	2.7	3.6	3.8	4.5	3.5	2.8	3.4	4.3	3.5	4.6
Deutschlandsberg, 354m (16m)	0.7	0.8	1.1	1.2	1.2	1.1	1.0	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	1.2	1.0	0.7	0.7	0.9	4.4
Feldbach, 323m (10m)	0.9	1.1	1.4	1.5	1.4	1.1	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	1.4	1.0	0.9	1.0	1.1	4.2
Fischbach, 1034m (10m)	2.2	2.4	2.5	2.5	3.0	2.3	2.1	1.9	2.1	1.8	1.7	1.9	2.6	2.1	1.9	2.1	2.2	4.0
Frohnleiten, 421m (11m)	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.5	1.4	1.2	1.1	1.2	1.4	1.7	1.7	1.4	1.2	1.6	1.5	3.8
Fürstenfeld, 271m (10m)	1.1	1.5	1.8	1.9	1.8	1.4	1.3	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.8	1.3	1.2	1.2	1.4	3.6
Gleisdorf, 377m (10m)	0.8	0.8	1.2	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	1.2	1.0	0.8	0.8	1.0	3.4
Graz Flughafen, 340m (10m)	1.2	1.4	1.8	2.0	2.1	1.8	1.7	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0	2.0	1.7	1.3	1.2	1.5	3.2
Graz Straßgang, 357m (16m)	0.9	1.1	1.3	1.5	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8	1.4	1.2	0.9	0.9	1.1	3.0
Graz Universität, 366m (34m)	1.1	1.3	1.6	1.7	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.2	1.1	1.1	1.7	1.6	1.2	1.1	1.4	2.8
Gröbming, 766m (14m)	1.1	1.1	1.3	1.4	1.3	1.3	1.2	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	1.4	1.2	0.9	1.0	1.1	2.6
Hall bei Admont, 637m (10m)	0.5	0.8	1.0	1.1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.5	1.0	0.8	0.7	0.6	0.8	2.4
Hartberg, 330m (18m)	1.0	1.3	1.5	1.7	1.5	1.3	1.2	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.6	1.2	1.1	1.1	1.3	2.2
Irdning-Gumpenstein, 697m (12m)	0.9	1.1	1.2	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	1.3	1.2	1.0	0.9	1.1	2.0
Kalwang, 744m (17m)	2.9	2.8	2.9	2.7	2.7	2.3	2.3	1.9	2.1	2.1	2.1	2.5	2.7	2.2	2.1	2.7	2.5	1.8
Kapfenberg, 505m (10m)	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7	1.6
Köflach, 465m (10m)	0.4	0.5	0.7	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.8	0.6	0.4	0.4	0.6	1.4
Laßnitzhöhe, 530m (19m)	1.3	1.3	1.5	1.5	1.4	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.3	1.5	1.2	1.1	1.3	1.3	1.2
Leoben, 544m (10m)	1.0	1.2	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.3	1.2	1.0	1.1	1.2	1.0
Mariazell, 864m (10m)	3.2	3.0	2.9	2.8	2.5	2.3	2.2	2.2	2.3	2.8	2.9	3.1	2.7	2.3	2.7	3.1	2.7	0.8
Mooslandl, 530m (10m)	1.2	1.3	1.4	1.5	1.3	1.2	1.0	1.0	1.0	1.3	1.3	1.2	1.4	1.0	1.2	1.2	1.2	0.6
Murau, 816m (17m)	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.5	1.3	1.1	1.1	1.3	0.4
Mürzzuschlag, 705m (13m)	0.9	1.0	1.2	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	1.1	0.8	0.8	0.9	0.9	0.2
Neumarkt, 869m (10m)	1.5	1.9	2.1	2.2	2.3	1.9	1.7	1.7	1.6	1.6	1.4	1.3	2.2	1.8	1.5	1.5	1.8	0.0
Oberwölz, 842m (10m)	0.5	0.6	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.8	0.6	0.5	0.5	0.6	
Präbichl, 1215m (16m)	2.5	2.5	2.5	2.2	2.4	1.9	1.7	1.8	2.0	2.2	2.3	2.3	2.3	1.8	2.2	2.4	2.2	
Ramsau am Dachstein, 1207m (10m)	1.7	1.6	1.7	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.2	1.2	1.3	1.6	1.6	1.2	1.2	1.6	1.4	
Rohrbach/Eichberg, 692m (11m)	2.1	2.2	2.4	2.6	2.6	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.7	1.9	2.5	2.2	1.9	2.1	2.2	
Rottenmann, 707m (10m)	2.3	2.5	2.6	2.5	2.4	1.8	1.6	1.5	1.8	2.0	2.2	2.1	2.5	1.6	2.0	2.3	2.1	
Schöckl, 1443m (14m)	5.8	5.6	5.2	5.0	5.4	4.5	4.3	4.0	4.5	4.6	4.8	5.6	5.2	4.2	4.7	5.7	4.9	
Seckau, 872m (10m)	1.0	1.1	1.4	1.5	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.4	1.1	1.0	1.0	1.1	
St. Radegund, 726m (15m)	1.4	1.5	1.8	1.8	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	1.4	1.3	1.4	1.8	1.7	1.5	1.4	1.6	
Stolzalpe, 1291m (10m)	2.1	2.2	2.4	2.4	2.6	2.2	1.9	1.9	1.9	2.0	1.7	1.8	2.5	2.0	1.9	2.0	2.1	
Wagna-Leibnitz, 268m (10m)	0.7	1.0	1.3	1.5	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	1.4	1.2	0.9	0.8	1.1	
Zeltweg, 678m (6m)	1.2	1.4	1.7	1.8	1.7	1.5	1.3	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	1.7	1.3	1.1	1.2	1.4	

Abbildung 10.2: Monatliche, saisonale und jährliche mittlere Windgeschwindigkeiten [m/s] an den steirischen TAWES-Stationen.



an der Station Schöckl in nur 1443 m Seehöhe in den Vordergrund und setzt sich am Hochschwab an der Station Eismauer in 2181 m endgültig durch.

In der Abbildung 10.2 sind die Jahresgänge der Windgeschwindigkeit aller steirischen TA-WES-Stationen der GeoSphere Austria eines zehnjährigen Messzeitraumes dargestellt.

10.4.3 Tagesgang der Windgeschwindigkeit

So wie beim Jahresgang wird auch der Tagesgang der Windgeschwindigkeit von der thermischen Schichtung der Atmosphäre bestimmt, welche wiederum mit der Einstrahlung korreliert.

Während der Nacht kommt es in den Niederungen zu einer Isolierung der Grundsicht, was äußerst windschwache Verhältnisse zur Folge hat. Im Gebirge vermindern sich hingegen die Reibungsverluste durch die von der Grundsicht abgekoppelte freie Atmosphäre, was sich an den Bergstationen durch höhere Windgeschwindigkeiten äußert.

Tagsüber wirken die Geschwindigkeitsbeträge zwischen Tal und Berg entgegengesetzt. Bedingt durch die einstrahlungsgetriebene Turbulenz kommt es zu einer Durchmischung der bodennahen Schichten mit jenen der freien Atmosphäre. Als Folge tritt in den Niederungen ein Maximum am Nachmittag ein, wenn die horizontalen Temperaturgegensätze am größten und die Lokalwinde entsprechend gut entwickelt sind. Im Gebirge hat die „bodengestörte Schicht“ hingegen eine bremsende Wirkung, Bergstationen weisen daher am Nachmittag ein Minimum der Windgeschwindigkeit auf.

Grundsätzlich nimmt der reibungsbedingte Einfluss der bodennahen Schicht mit zunehmender Höhe ab. Die Tagesperiodizität der Windgeschwindigkeit ist daher in den Niederungen beständiger und weniger allochthonen Witterungseinflüssen unterworfen als im Gebirge, wo ein mittlerer Tagesgang zwar ebenfalls deutlich hervortritt, sich aber selten in Einzelfällen zeigt, welche stärker von den Zufälligkeiten des aperiodischen Wettergeschehens abhängen (Wakonigg, 1978).

In Abbildung 10.3 sind die mittleren Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten tagsüber während autochthoner Wetterlagen dargestellt. Darunter sind jene antizyklonalen Wettersituationen zu verstehen, an denen die regionalen Windverhältnisse nicht bzw. nur wenig von großskaligen Windfeldern überlagert werden. Diese Kartendarstellung macht insofern Sinn, als die typischen lokalen Windsysteme in den Tal- und Beckenlagen der Steiermark gut abgebildet werden können (siehe Kapitel 10.2).

Recht gut zu erkennen ist dabei die zum Randgebirge gerichtete Strömungskomponente aus Ost bis Süd. Auch in den großen Längs- und Quertälern von Mur, Enns und Mürz dominieren taleinwärts gerichtete Winde, wohingegen kleinere Talabschnitte aufgrund der räumlichen Begrenzung des 1-Kilometer-Rasters nicht mehr so gut zur Geltung kommen. Mit zunehmender Seehöhe verschwindet die Einheitlichkeit der Windrichtungen. Hier wirken zunehmend andere Windkomponenten,

teils in Form von geländeabhängigen Hangwindzirkulationen, teils auch in Form des noch wirksamen übergeordneten Windfeldes. Hinzu kommen insbesondere im Zuge zentraler Hochdrucklagen auch Situationen mit Absinkinversionen (freiem Föhn), was sich im Hochgebirge in sehr schwachen Windverhältnissen äußert. Typischerweise weisen die Gebirge bei antizyklonalen Wetterlagen eher geringe Windgeschwindigkeiten auf, während sie in den Niederungen gut entwickelt sind und im Vergleich zum langjährigen Mittel auch höhere Geschwindigkeitswerte aufweisen können.

Während der Nacht kehren sich die Windverhältnisse um. Bei wolkenarmer Witterung kühlen die höheren Lagen ausstrahlungsbedingt rasch ab. Die kälter werdende Luft fließt von den Hängen und sammelt sich in den Tallagen. Mit den thermischen Gegensätzen zwischen dem mächtiger werdenden Kaltluftvolumen in den Tälern und der relativ wärmeren Luft im Vorland setzt sich der Kaltluftabfluss in Form einer messbaren Strömung in Talausrichtung fort. Die Stärke dieses Talauswindes hängt dabei von mehreren Faktoren ab, etwa vom Talquerschnitt, der Neigung oder dem Bewuchs (Colette et al., 2003).

Wie in Abbildung 10.4 ersichtlich, dominieren in der Nacht entlang der großen Täler talwärts gerichtete Windrichtungen, wobei die Windgeschwindigkeiten im Vergleich zur Tagsituation vor allem in den Niederungen deutlich schwächer sind. In kleineren Tälern kommt diese Einheitlichkeit nicht überall gut zur Geltung, was mit der bereits erwähnten begrenzten räumlichen Auflösung der Windfelder zusammenhängt. Sehr gut lassen sich hingegen die lokalen nächtlichen Talwinde in größeren Tälern erkennen, was auch über die Windrosenabbildungen mit den Windrichtungsverteilungen der Stationsdaten in Kapitel 10.5 bzw. im Kapitelanhang 10.8 belegt ist. Die Gebirge weisen hingegen nachts höhere Windgeschwindigkeiten auf als tagsüber, was bereits mit dem im Kapitel 10.3 beschriebenen verminderten Reibungsverlust zusammenhängt. Besonders auffallend sind hier die hohen Windgeschwindigkeiten am Alpenostrand vom Hochschwab über die Veitsch und Rax bis zum Stuhleck und Hochwechsel, obwohl diese Gebirge etwa im Vergleich zu den Niederen Tauern oder zum Dachsteingebirge deutlich geringere Seehöhen aufweisen. Der Grund dafür dürfte in der relativ freien Anströmung dieser isolierten Gipfel liegen. Auch erfährt die Luft bei der Um- und Überströmung des Alpenostrandes oft eine Beschleunigung, was auch windenergetisch in dieser Region verstärkt genutzt wird.

Anhand von Stundendaten wurden die Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten sämtlicher verfügbarer Stationen ausgewertet und dargestellt. Im Folgenden wird auf einige Stationen speziell eingegangen, alle Stationsauswertungen sind zudem im Kapitelanhang dargestellt.

An den Talstationen zeigt sich dabei die oben erwähnte Geschwindigkeitsverteilung mit einem Maximum ab den Mittagsstunden bis in den Nachmittag hinein, welche vom Frühjahr bis in den Frühsommer hinein am stärksten ausgeprägt ist. Die Minima treten hingegen während der Nachtstunden auf, wobei hier der Spätherbst und Frühwinter die wind-

schwächste Zeit darstellen. Häufig bilden sich während dieser Zeit auch Kalmen aus, die während der kalten Jahreszeit auch ganztägig anhalten können.

Als beispielgebend für derartige Windverhältnisse können die Stationen in Tal- und Beckenlagen wie Graz Straßgang, Graz Universität, Gleisdorf, Feldbach, Frohnleiten und Murau herangezogen werden, wo die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten tagsüber nachmittags zwischen März und Mai auftreten und bei 2,5 m/s liegen. Einige Regionen erweisen sich dabei als besonders gut durchlüftet, wie die Stationen Kalwang und Rottenmann im Palten- und Liesingtal mit 4,1 bzw. 4,2 m/s zeigen, andere wie Kapfenberg oder Köflach bleiben deutlich unter 2 m/s.

Mit zunehmender Seehöhe steigen die Windgeschwindigkeiten generell an, wobei sich die höheren Werte immer mehr in die Nachtstunden verlagern. Als Übergangstyp dafür können die Winddaten der Station Fischbach in 1034 m Seehöhe herangezogen werden. Zwar treten auch hier die höchsten Werte im Frühling und noch am Nachmittag mit 3,4 m/s auf, allerdings liegt auch der nächtliche Mittelwind meist über 2 m/s. An der einzigen echten steirischen Bergstation mit langer Messreihe – am Schöckl in 1443 m Seehöhe – werden hingegen durchwegs die höheren Geschwindigkeitsbeträge, unabhängig von der Jahreszeit, nicht mehr in den Nachmittagsstunden, sondern während der Nacht erreicht (siehe Abbildung 10.5). Im Winter sind diese besonders ausgeprägt und können in einzelnen Nachtstunden etwa im Jänner im Mittel bis über 6 m/s erreichen. Mit einem Jahresmittel von 4,9 m/s weist der Schöckl im Vergleich zu anderen Gipfelstandorten in ähnlicher Seehöhe besonders hohe Werte auf, was seiner freistehenden Lage am Alpenvorland-Rand geschuldet sein dürfte.

Ausgewertet wurden auch Winddaten von Lawinenstationen in Gipfelniveau, allerdings wurden aufgrund der Datenlage nur kürzere Zeiträume erfasst, was einen direkten Vergleich mit Stationsdaten längerer Messperioden nur eingeschränkt ermöglicht. Die fünfjährigen Messreihen geben allerdings einen recht repräsentativen Überblick über die Windverhältnisse im Hochgebirge. So gilt beispielsweise die Station des Lawinenwarndienstes Niederösterreich am Wetterkoglerhaus am Hochwechsel in 1743 m Seehöhe aufgrund der von allen Seiten frei anströmbaren Lage am zweithöchsten Punkt des östlichen Randgebirgsbogens als besonders windexponiert. Die hier gemessenen Windgeschwindigkeiten dürften eine der höchsten in der Steiermark sein, im Februar steigen die nächtlichen Werte hier auf über 12 m/s und das Jahresmittel liegt bei 9,2 m/s.

Noch etwas höhere Werte weisen nur noch die Kamm- und Gipfelregionen des Hochschwabgebietes auf. Beispielgebend dafür ist die Station Eismauer in 2181 m Seehöhe nahe des Hochschwabgipfels angeführt, die aufgrund ihrer orographischen Lage gerade bei winterlichen Nordstaulagen extreme Werte aufweisen kann. Das Jahresmittel liegt hier bei 9,5 m/s. Im Vergleich dazu liegt die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit am ca. 1000 m höheren Sonnblick bei „nur“ 8,1 m/s.

Aufgrund der geschützteren Lage weisen demnach die zentralalpin gelegenen Bergstationen nicht mehr so hohe Werte auf. So ergibt sich an der im Grenzgebiet zu Oberösterreich liegenden Station Dachstein-Hunerkogel in 2700 m Seehöhe in Bezug auf den Jahresgang ein eindeutiges Wintermaximum bzw. Sommer- bis Herbstminimum und in Bezug auf die Tageszeit ein eindeutiges Tagesminimum bzw. Maximalwerte in den Nachtstunden. Die

höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten treten im Dezember mit 4,5 m/s auf, die geringsten im August mit 2,6 m/s. Trotz der in großer Seehöhe liegenden Station bleiben die Geschwindigkeitsbeträge im Vergleich zu den östlicheren Nordstaugebieten relativ bescheiden, was hier wohl auch auf Abschirmungseffekte durch den nördlich der Station gelegenen Dachsteingipfel zurückzuführen sein dürfte.

In Abbildung 10.5 ist nochmal die gegensätzliche Tagesperiodizität der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Seehöhen dargestellt. Im Vergleich zu Stationen in Tallagen schwächt sich das Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit in mittleren Höhenlagen immer mehr ab, während sich im Gebirge das Maximum in die Nachtstunden verlagert und die Minima tagsüber auftreten.

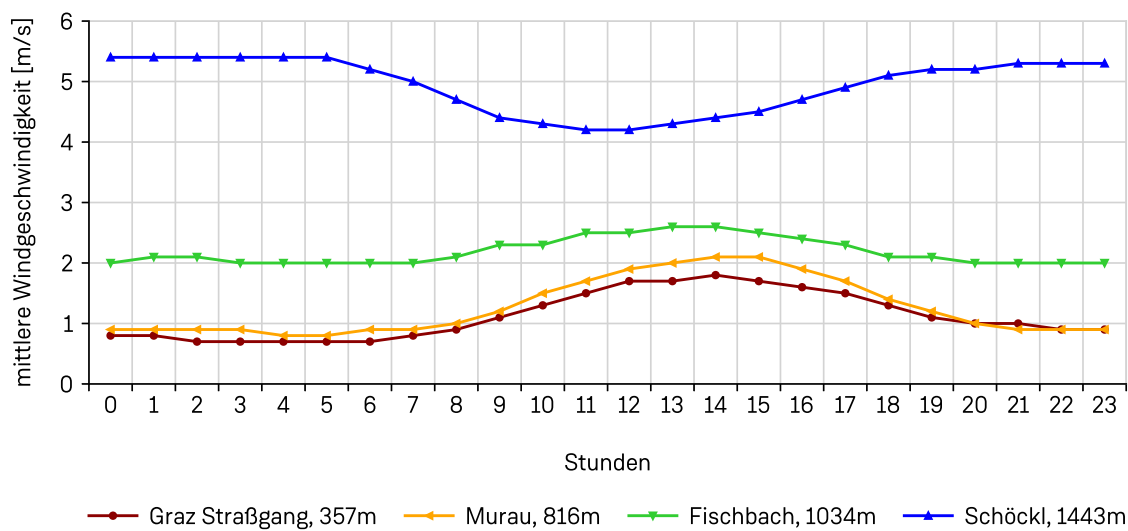


Abbildung 10.5: Tagesgang der mittleren Windgeschwindigkeit [m/s] an ausgewählten Stationen.

10.5 Windrichtungsverteilungen

Als Datenbasis für unterschiedliche Fragestellungen ist die Kenntnis der Windrichtung von Bedeutung. Insbesondere in der Umweltmeteorologie hängen die Ausbreitungsbedingungen von luftgetragenen Spurenstoffen im Wesentlichen von der mittleren Windrichtungsverteilung im Nahbereich eines Emittenten ab. Dabei spielen vor allem auch die Windrichtungen von Schwachwinden oder überhaupt Zustände mit Windstille eine große Rolle. Für die Energiewirtschaft ist zudem die Häufigkeit relevanter Windrichtungen und Windstärken von großem Interesse. Es wurden die Windgeschwindigkeitsklassen und Windrichtungen für 15 repräsentative Messstandorte ausgewertet, welche alle im Kapitelanhang abgebildet sind. Basis für die Auswertung waren nicht nur die Stundenwerte der GeoSphere Austria-eigenen TAWES-Stationen, sondern auch ausgewählte Standorte weiterer Stationsbetreiber. Dabei wurde weiters zwischen der Nacht- und Tagsituation unterschieden, um vor allem die nächtliche Schwachwindsituation in den windmäßig benachteiligten Tal- und Beckenlagen besser darzustellen. Den „Kalmen“ kommt dabei eine große Bedeutung zu, definitionsgemäß handelt es sich dabei um Windgeschwindigkeiten, die $\leq 0,5$ m/s, 2 km/h oder 1 Knoten sind (ÖNORM M9490-6). Vor Beginn der automatischen Windmessung war es nämlich noch nicht möglich, derart schwachen Windströmungen eine Windrichtung zuzuweisen, da die Ansprechschwelle der mechanischen Windgeber zu träge war. Erst mit den viel empfindlicheren Ultraschallsensoren konnten

die Windrichtungen auch für ganz geringe Windgeschwindigkeiten erfasst werden. Daher erhalten in den Windrosen-Darstellungen mit Ausnahme der Lawinenstationen Wetterkoglerhaus, Galsterbergalm-Kalteck, Hochschwab-Eismauer sowie der Umweltstation Klösch alle Windgeschwindigkeiten > 0 m/s eine Windrichtung. In die Klasse der Kalmen gehen hingegen alle Windgeschwindigkeiten zwischen 0 und 0,5 m/s ein. Grundsätzlich findet sich in der Windrichtungsverteilung an den in Tallagen befindlichen Stationen das tagesperiodische Windfeld der Talwindzirkulation mit dem nächtlichen Talauswind und dem Taleinwind tagsüber wieder. Dieses autochthone Windsystem ist im Jahresmittel mehr oder weniger gut ausgeprägt, wobei es jedoch – je nach Standort – zu Überlagerungen mit dem übergeordneten, wetterlagenabhängigen Windfeld kommt. An der Station Graz Universität lässt sich recht gut die Verzahnung von regionalen und lokalen Winden ablesen: Tagsüber dominieren im Sinne einer taleinwärts gerichteten Strömungskomponente Windrichtungen aus dem Südostsektor, deren Windgeschwindigkeiten kaum über 2,5 m/s hinausgehen. Höhere Geschwindigkeiten betreffen am Tag nur die Nordwest- bis Nordnordwestrichtungen, welche auf zyklonales Wettergeschehen oder Nordföhn zurückzuführen sein dürften. Während der Nacht überwiegen hingegen Winde aus dem Nordsektor, einerseits als regionaler Talauswind aus dem Murtal, andererseits als lokale, kaltluftinduzierte Strömung aus dem nordöstlich der Station liegenden

Mariatrostertal. Mit einem Kalmenanteil von knapp 13% erweist sich der Standort als gut durchlüftet, allerdings liegt die Geberhöhe des Windsensors über Dachniveau in 34 m über Grund! Andere tiefergelegene Standorte wie Gleisdorf, Deutschlandsberg, Bruck an der Mur oder Gröbming weisen ebenfalls eine Regelmäßigkeit im tageszeitlichen Windgeschehen auf, allerdings mit vorwiegenden Schwachwinden bzw. erhöhten Kalmenanteilen insbesondere während der Nacht. Diese Windarmut ist – wohl auch aufgrund der beckenartigen Erweiterungen der Talanlage – auf ein nur wenig ausgebildetes Talwindsystem zurückzuführen. Ausgesprochen gut ersichtlich ist das Talwindsystem an der Station Frohnleiten im mittleren Murtalabschnitt. Mit der Leitwirkung der nord-süd-gerichteten Talanordnung ergibt sich die entsprechende Windrichtungsverteilung, wobei der Talauswind aus Nord, überprägt mit dem übergeordneten, druckinduzierten Windfeld besonders gut ausgebildet ist. Höhere Lagen weisen nicht mehr diese Einheitlichkeit in der Verteilung auf. Die Station Fischbach stellt hier den Übergangstyp dar. Der Windrichtungswechsel Nacht/Tag ist zwar noch erkennbar, doch setzt sich zu allen Tageszeiten der Effekt des von großräumigen Druckdifferenzen induzierten Höhenwindes aus Nordwest durch. Mit weiterer Zunahme der Seehöhe tritt dieser Einfluss immer mehr in den Vordergrund. An den Bergstationen wird das typische Strömungsgeschehen der dafür wirksamen Wetterlagen in der tageszeitlichen

Windrichtungsverteilung sichtbar. Mit Klassen höherer Windgeschwindigkeiten dominieren daher in den Nordstaugebieten sowie – etwas abgeschwächter – auch zentralalpin Windrichtungen aus West bis Nord. Dies lässt sich an den Windrosen der Stationen Schöckl und Hochschwab-Eismauer (siehe Anhang 10.8) recht gut ablesen.

Aber auch die Exponiertheit des Standortes beeinflusst das Windrichtungsgeschehen: Die am Alpenostrand befindliche, freistehende Station Wetterkoglerhaus am Gipfel des Hochwechsels spricht sowohl für Wetterlagen aus Nord als auch aus Süd an. Auch am noch zentralalpin gelegenen Gipfelstandort am Sonnblick wird der Südeinfluss sichtbar.

An der Station Dachstein-Hunerkogel lenkt hingegen der vorgelagerte Dachsteinzug den Wind nicht nur ab, sondern führt auch zu verminderten Windgeschwindigkeiten.

10.6 Starkwindtage

Als Starkwindtage wurden jene Tage gezählt, an denen Böen über 60 km/h auftraten. Im Gegensatz zu den deutlich selteneren Sturmtagen, an denen definitionsgemäß der größte über zehn Minuten ermittelte Durchschnittswert größer 8 Beaufort (62 km/h) sein muss, werden Starkwindtage häufiger registriert. Dieser Böen-Grenzwert ist in Österreich zudem auch versicherungsrelevant, da im etwaigen Schadensfall die Kosten ersetzt werden. Bei Böen über 60 km/h können große Äste abbrechen, größere Bäume bewegt werden, vereinzelt sogar entwurzeln. In urbanen Bereichen können Dachziegel herabfallen oder Vordächer beschädigt werden. Im Winter kann es auf exponierten Straßen zu stärkeren Schneeverwehungen kommen, im Hochgebirge sind die Sicht und damit die Orientierung durch die Schneedrift stark eingeschränkt.

In den tiefer gelegenen Regionen der Steiermark verhält sich die Anzahl der Starkwindtage recht unterschiedlich. Grund dafür sind vor allem topographische Effekte, die zu Abschattung oder Kanalisierung des Windfeldes führen. Dazu können in den sonst windschwachen Gebieten, speziell das Vorland betreffend, konvektive Wettererscheinungen mit kurzfristig recht hohen Windgeschwindigkeiten auftreten. So wie die Stärke der mittleren Windgeschwindigkeit nimmt auch die Anzahl der Starkwindtage mit der Höhe zu. Jedoch müssen höhere mittlere Windgeschwindigkeiten nicht gleichbedeutend mit einer größeren Anzahl von Starkwindtagen sein. Als Beispiel sei hier der in den Abbildungen 10.7 und 10.8 dargestellte Vergleich zwischen den Stationen Schöckl und Dachstein-Hunerkogel angeführt. Der Hunerkogel weist im Vergleich zum

Schöckl trotz größerer Seehöhe im Jahresgang zwar geringere Mittelwinde, dafür aber deutlich mehr Starkwindtage auf. Neben topographischen Effekten dürften auch bestimmte Wetterlagen mit ausgeprägter Sturmtendenz dafür ausschlaggebend sein, die in manchen Klimaregionen stärker zur Geltung kommen, etwa bei Nordwestlagen in den Nordstaugebieten. In Abbildung 10.6 sind die Jahresgänge der Starkwindtage aller ausgewerteten Stationen aufgelistet. In tiefen Regionen bleibt deren Anzahl durchwegs unter zehn, in dabei besonders windgeschützten Lagen sogar unter fünf Tagen pro Jahr. Das in der Nordstaureregion liegende Mariazell weist hingegen bereits 42 Tage, das windexponierte Fischbach sogar 50 Starkwindtage auf. Noch deutlich höhere Werte werden am Schöckl mit 114 Tagen er-

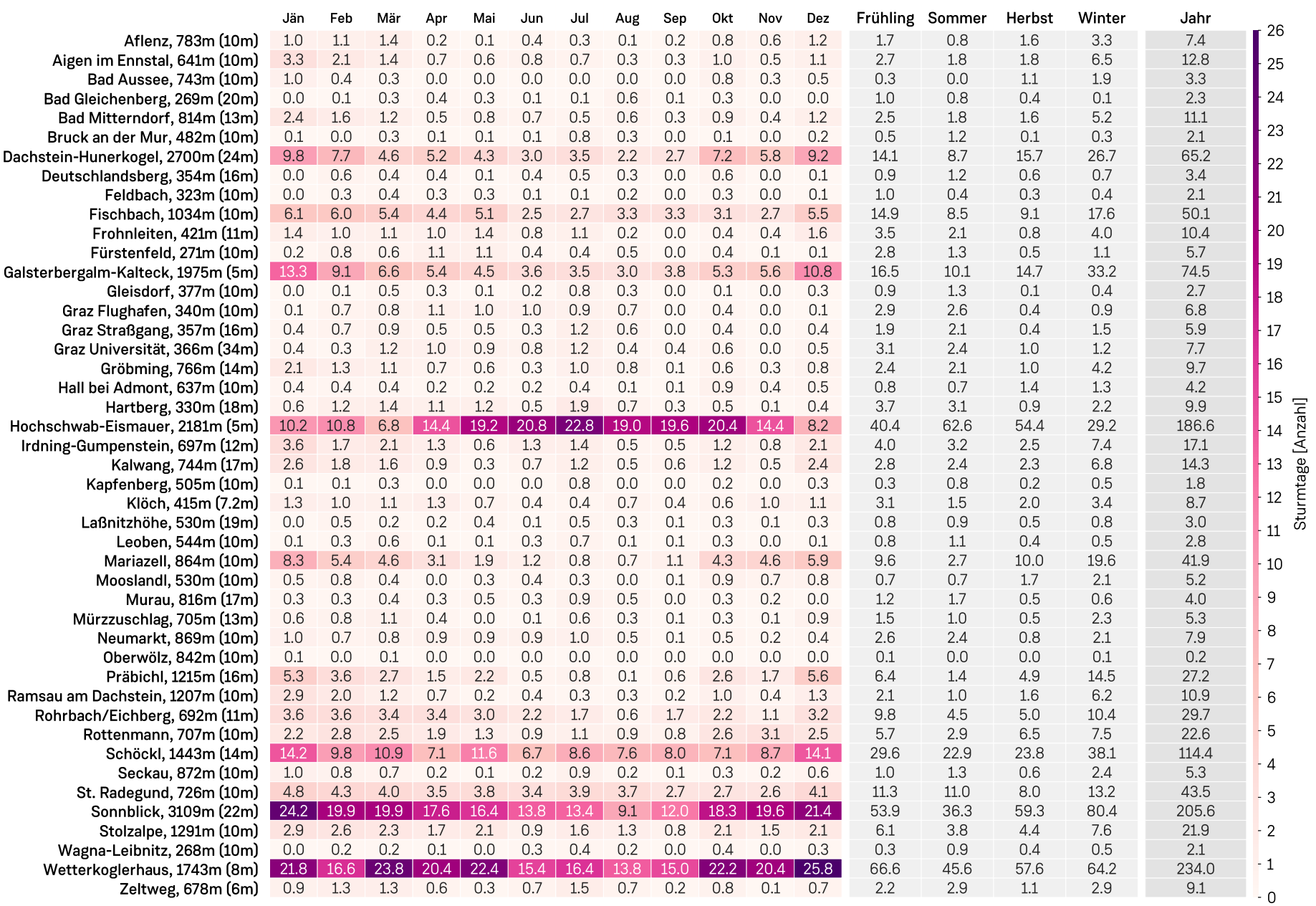


Abbildung 10.6: Mittlere Anzahl der monatlichen, saisonalen und jährlichen Tage mit Sturm an sämtlichen ausgewerteten Stationen.

reicht. An der Station Wetterkoglerhaus am Hochwechsel wurden im Zeitraum 2018 – 2022 die höchsten Werte mit 234 Tagen pro Jahr registriert. Im Vergleich dazu kann diesen Wert nicht einmal der Sonnblick mit 206 Starkwindtagen überbieten.

Mit Hilfe der INCA-Analysen wurden die Starkwindtage auch flächig für die gesamte Steiermark ausgewertet. Die Anzahl der Tage mit Windgeschwindigkeiten > 60 km/h pro Jahr (Abbildung 10.9) nimmt mit zunehmender Seehöhe – so wie auch die Stärke der mittleren Windgeschwindigkeit – zu. Im Alpenvorland treten Starkwindtage meist nur im Zusammenhang mit ausgeprägten Strömungslagen oder konvektiven Wettererscheinungen auf und sind im Vergleich zum Hochgebirge selten. Allerdings können die gefürchteten Downbursts in Begleitung sommerlicher Gewitter durchaus Windgeschwindigkeiten jenseits von 100 km/h erreichen. In den inneralpinen Tal- und Beckenlagen sind stürmische Verhältnisse – wenn auch kurzfristig – ebenfalls meist an Gewitter gekoppelt, während im Hochgebirge ein gehäuftes Auftreten von Starkwindtagen im Zusammenhang mit Strömungslagen aus großräumig wirksamen

Druckdifferenzen im Vordergrund stehen. Im Zuge von Föhn sind stürmische Windverhältnisse nicht nur auf das Hochgebirge beschränkt, auch in den Niederungen können die Föhnstürme durchgreifen. Berühmt dafür sind etwa bei Südföhn die Seitentäler an der Nordseite der Niederen Tauern oder der sogenannte Jauk (warmer Föhnwind) in der Weststeiermark.

Die im Mittel (über alle Höhen) sturmreichste Zeit ist der Winter (Dezember bis Februar), wobei hier der Gegensatz zwischen den windarmen Tal- und Beckenlagen und dem sturmreichen Gebirge besonders stark ausgeprägt ist. Auf den Bergen beschränkt sich die größere Häufigkeit an Starkwindtagen dann nicht nur mehr auf den Alpenostrand, sondern weitet sich auf das gesamte Hochgebirge aus. In den Niederungen ist der Frühling (März bis Mai) die im Mittel stürmischste Zeit (siehe Abbildung 10.10). Die labile Schichtung der Atmosphäre mit wechselhafter Witterung begünstigt dann das Auftreten stürmischer Wetterphasen. Im Vergleich zu den Verhältnissen im Gebirge bewegen sich die Häufigkeiten allerdings im bescheidenen Rahmen, weshalb dieser Effekt in der in der räumlichen Darstel-

lung verwendeten Farbskala nicht sichtbar ist. Wie bereits bei den Karten der mittleren Windgeschwindigkeit in den Abbildungen 10.3 und 10.4 finden sich die Gebiete mit der auffällig höheren Anzahl an Starkwindtagen am Alpenostrand im Bereich der östlichen Nordalpen und den östlichen Ausläufern des Steirischen Randgebirges.

Allerdings wird vor allem im Gebirge die Anzahl der Starkwindtage über die INCA-Analyse im Vergleich mit den Messwerten von Hochgebirgsstationen deutlich unterschätzt (siehe Kapitelanhang). Ein Grund ist die Fehleranfälligkeit des Datenmaterials exponiert liegender Bergstationen aus Fremdnetzen (Stichwort: Vereisung). Diese Bergstationen fließen daher nur in seltenen Fällen in die INCA-Analysen ein, und es entsteht ein Überhang an Windmesswerten von Tal- und Mittelgebirgsstationen. Des Weiteren entsteht durch die Interpolation von Messwerten in die Fläche und die Verschneidung mit dem Modellhintergrund auf einem 1-Kilometer-Raster eine Glättung. Daraus ergeben sich gegenüber einer Punktmessung einer Bergstation in der Windanalyse geringere Werte.

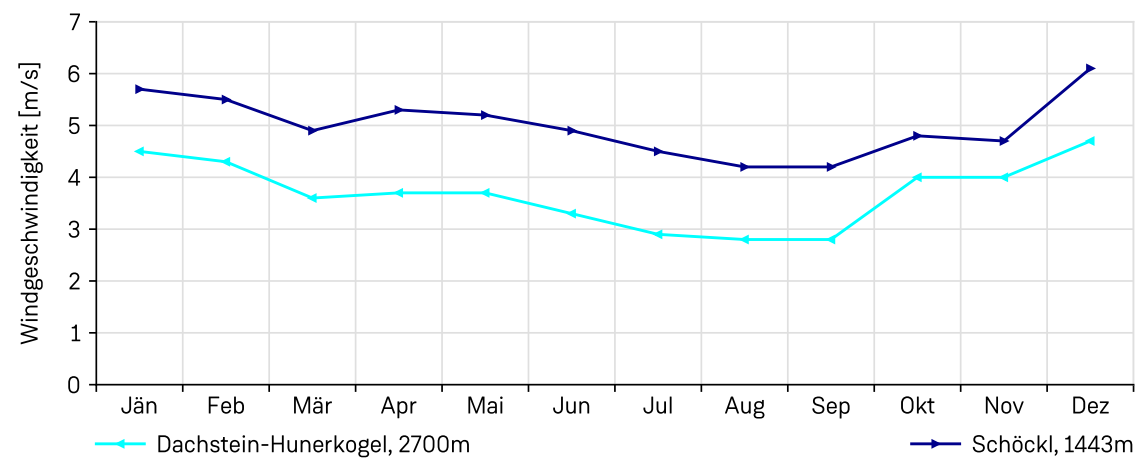


Abbildung 10.7: Vergleich des Jahresgangs der Windgeschwindigkeit [m/s] an den Stationen Schöckl und Dachstein-Hunerkogel.

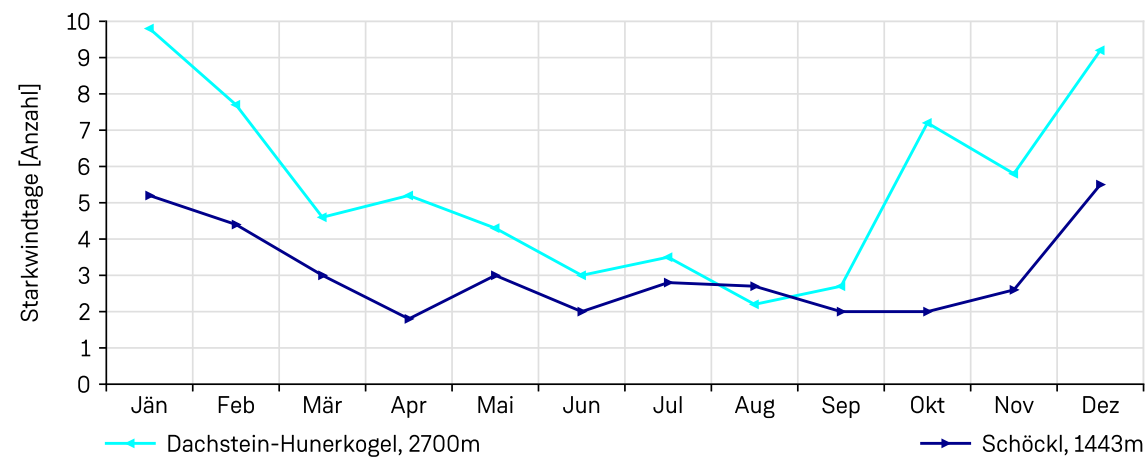


Abbildung 10.8: Vergleich des Jahresgangs der Starkwindtage an den Stationen Schöckl und Dachstein-Hunerkogel.

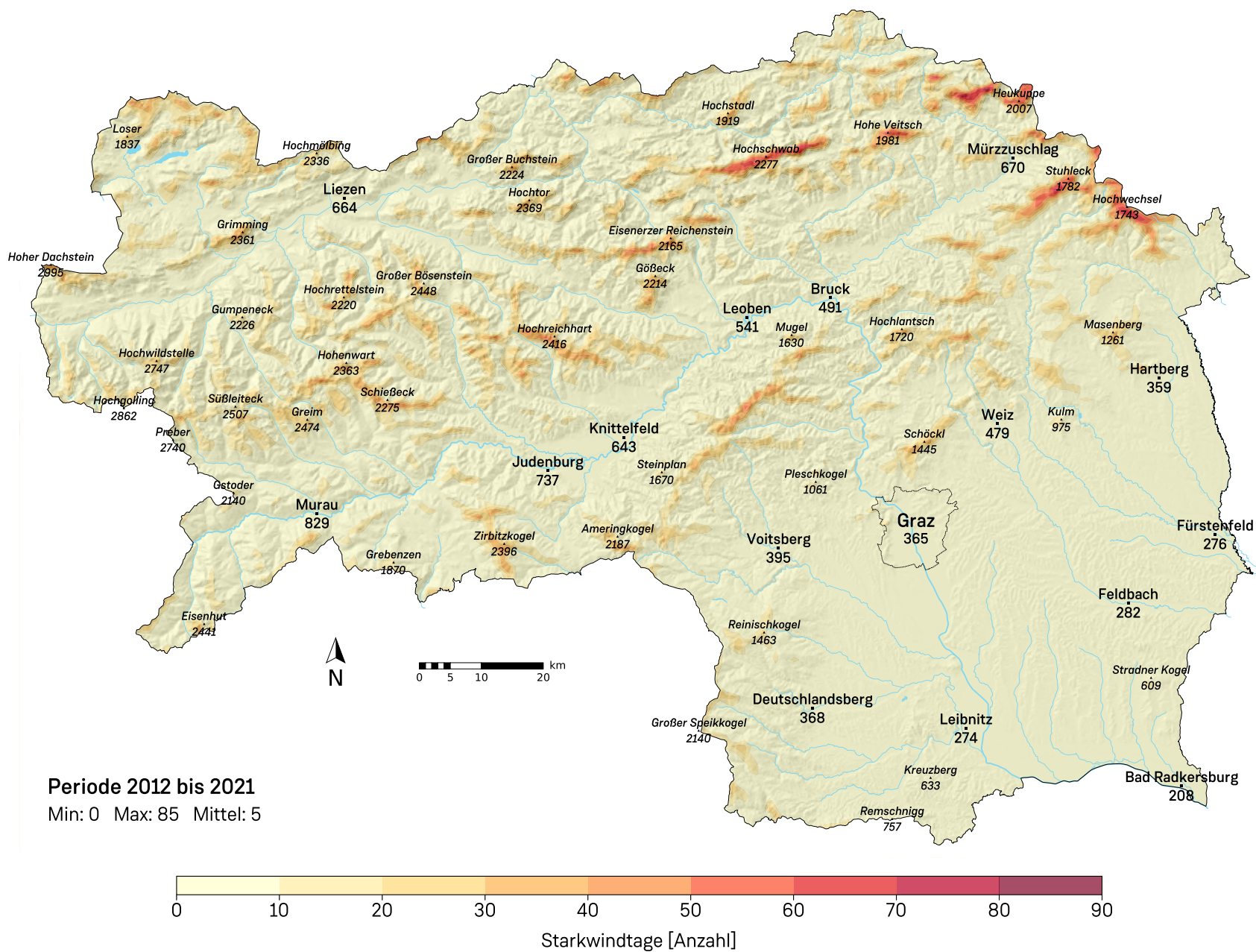


Abbildung 10.9: Mittlere Anzahl der Starkwindtage (Windgeschwindigkeiten > 60 km/h) ganzjährig.

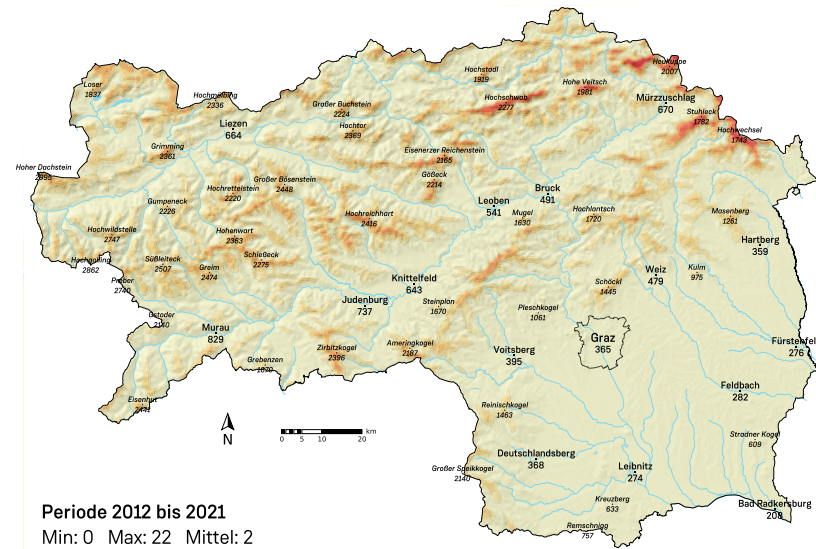
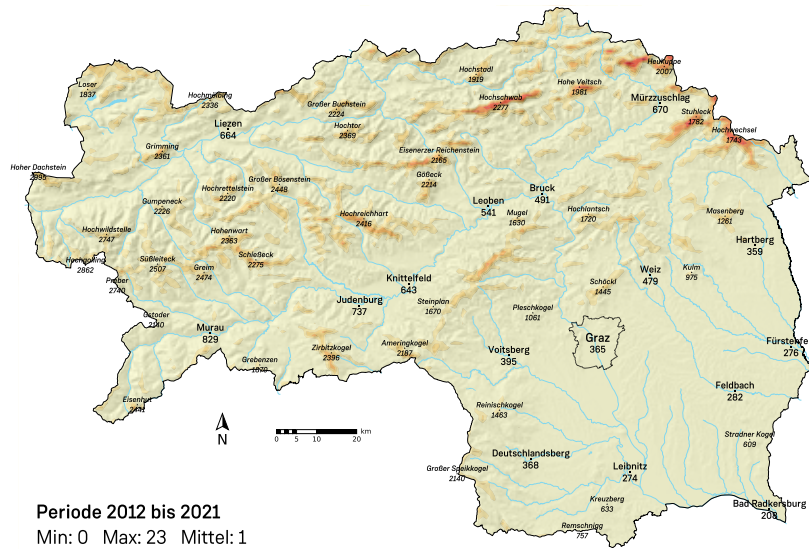
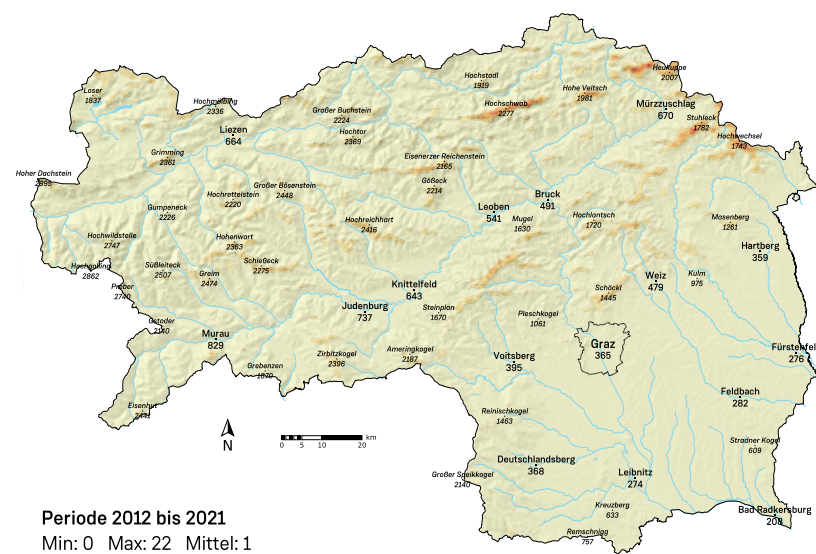
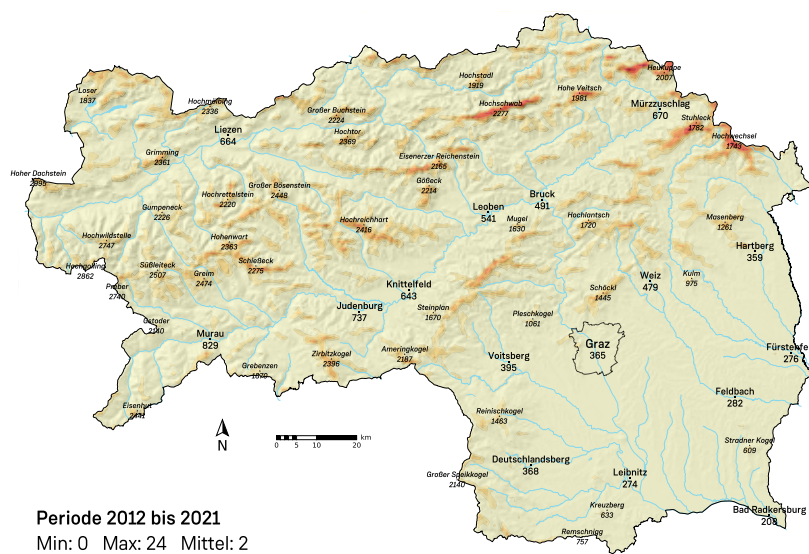


Abbildung 10.10: Mittlere Anzahl der Starkwindtage (Windgeschwindigkeiten > 60 km/h) im Frühling (links oben), Sommer (rechts oben), Herbst (links unten) und Winter (rechts unten).

10.7 Zeitliche Entwicklung von extremen Windereignissen

Für die Entstehung von extremen Windgeschwindigkeiten gibt es unterschiedliche meteorologische Phänomene. Diese reichen von Frontdurchgängen und Sturmtiefs über konvektive Wettererscheinungen bis hin zu Föhnereignissen. Fast alle Aussagen der aktuellen Klimamodelle betreffend die zukünftigen Veränderungen der Sturmhäufigkeiten und -intensitäten beziehen sich dabei auf die Untersuchung von großräumigen Tiefdruckgebieten und deren Druckfeldern, beispielsweise von der Größenordnung des Orkantiefs Kyrill im Jänner 2007 oder des Sturmtiefs Paula im Jänner 2008. Kleinräumige und kurzlebige Phänomene wie Gewitter oder Tornados können dabei oft gar nicht oder nur indirekt über Parametrisierungen berücksichtigt werden.

Auf Basis von Daten aus Stationsbeobachtungen zeigen mehrere Studien für die von zunehmenden anthropogenen Treibhausgasemissionen geprägte Vergangenheit keine Veränderungen der Sturmaktivität in Europa (z.B. Barring und Von Storch, 2004).

Auch Matulla et al. (2008) fanden in drei untersuchten Regionen Europas (Nordwest-, Nord- und Mitteleuropa) langfristig keinen Trend zu mehr Sturmereignissen. Sie konnten für Mitteleuropa sogar einen Rückgang gegenüber der stürmischeren Zeit um 1900 zeigen. In allen drei Regionen war die Sturmaktivität von den 1920er Jahren bis in die 1970er Jahre relativ unauffällig. Besonders in Nordeuropa stiegen die Sturmphasen danach bis Mitte der 1990er Jahre deutlich an, seither gingen sie

aber in allen drei Regionen wieder zurück.

Weitere Studien (z.B. Zwiers und Kharin, 1998; Knippertz et al., 2000; Leckebusch und Ulbrich, 2004; Prein et al., 2011) kommen zum Schluss, dass es im Zusammenhang mit einer Änderung der Nordatlantischen Oszillation zu einem Anstieg der mittleren und/oder extremen Windgeschwindigkeiten in Nord- und/oder Zentraleuropa kommt. Demnach hätte für die mittleren Breiten eine Verstärkung der Druckgradienten über Nordwesteuropa eine Intensivierung der Frontalzone im Winter mit verstärkter Tiefdrucktätigkeit zur Folge. Allerdings beziehen sich die meisten dieser Studien auf Regionen nördlich der Steiermark. Ein neuerer Vergleich mehrerer Langzeitstudien (Feser et al., 2015), basierend auf Beobach-



Foto 10.1: Im Zuge heftiger Unwetter im Sommer 2012 kam es in der Steiermark verbreitet zu Überflutungen, Murenabgängen und sturmbedingten Waldschäden. Im Bild: zerstörter Wald bei Kobenz. (Quelle: Gemeinde Kobenz)



Foto 10.2: Ende Jänner 2008 erfassten die orkanartigen Windböen des Sturmtiefs Paula auch die GeoSphere-Wetterstation in Graz Straßgang. (Foto: A. Podesser)

tungsdaten, zeigt dekadische Schwankungen in der Sturmtätigkeit für Mitteleuropa mit keinem oder leichtem Abwärtstrend in der Häufigkeit. Es gibt also derzeit keine einheitlichen, gesicherten wissenschaftlichen Aussagen

über Trends von Stürmen in Mitteleuropa. Darüber hinaus existieren spezifisch für Österreich noch keine Untersuchungen über Trends bei extremen Windereignissen, die mit Gewittern oder Frontpassagen verbunden sind. So-

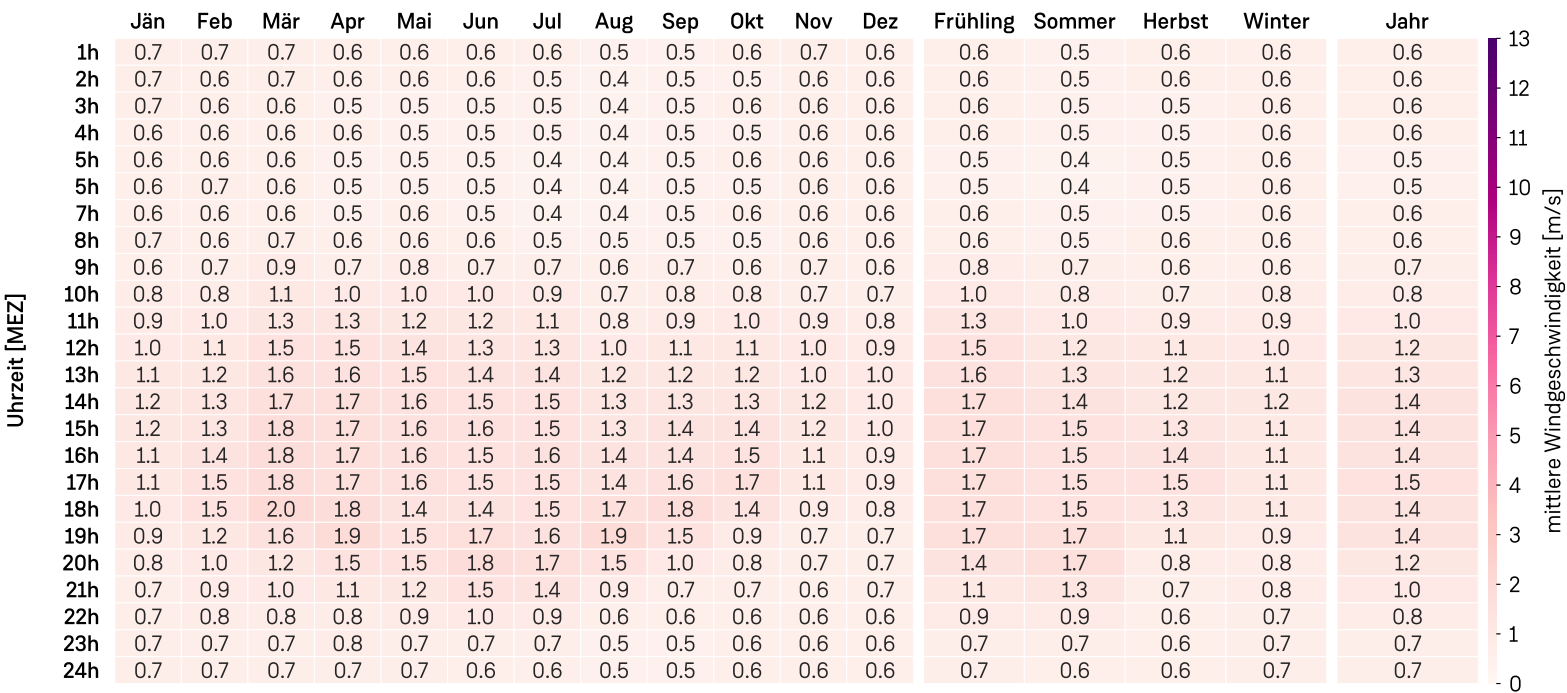
mit gibt es auch in der Steiermark derzeit keine einheitlichen Hinweise auf etwaige Trends im Sturmklima.

Literatur

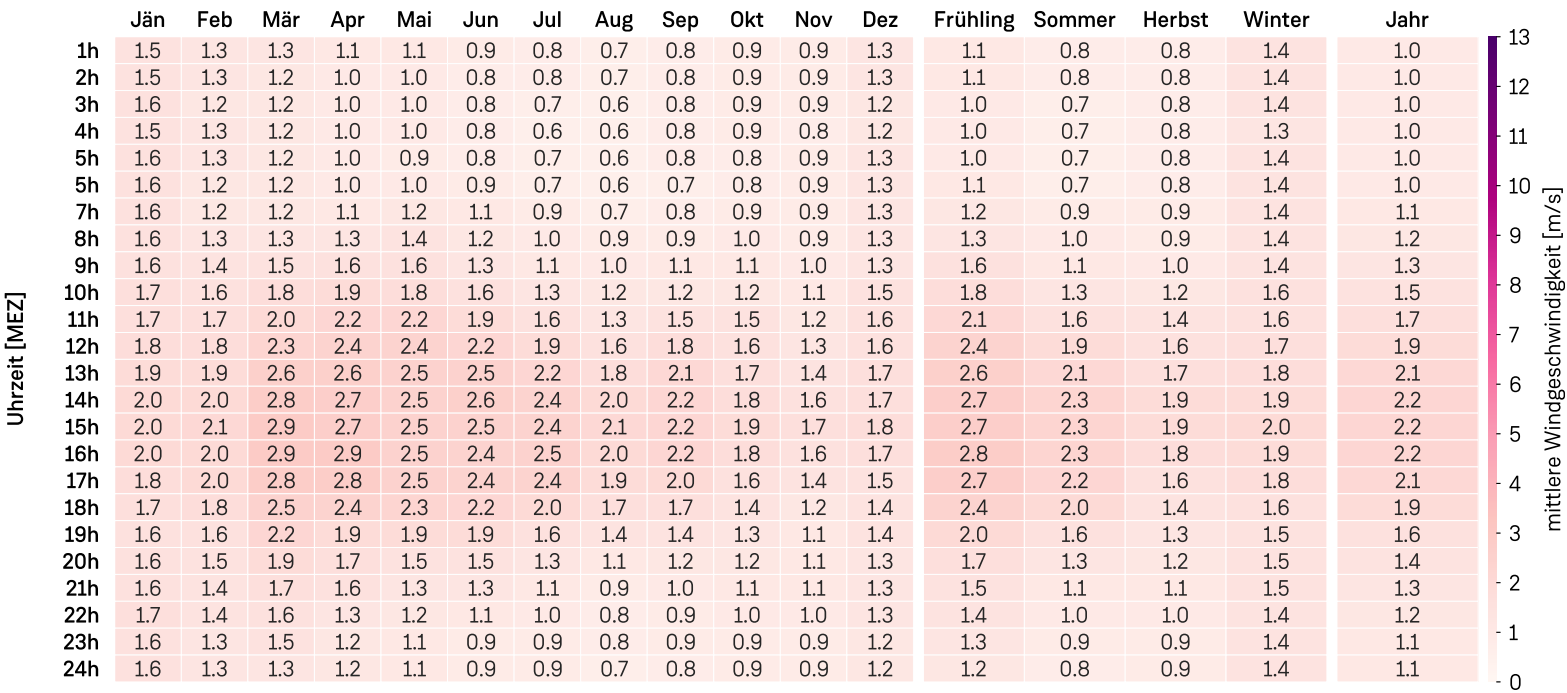
- Austrian Standards Institute, 2009. ÖNORM M9490-6. Meteorologische Messung für Fragen der Luftreinhaltung, Teil 6: Messung des Windes (Windrichtung und Windgeschwindigkeit).
- Bärring, L., Von Storch, H., 2004. Scandinavian storminess since about 1800. *Geophysical Research Letters* 31, 2004GL020441. <https://doi.org/10.1029/2004GL020441>
- Blüthgen, J., Weischet, W., 1980. Allgemeine Klimageographie, 3. neu bearb. Aufl., Lehrbuch der allgemeinen Geographie, Erich Obst (Hrsg.), De Gruyter, Berlin.
- Colette, A., Chow, F.K., Street, R.L., 2003. A Numerical Study of Inversion-Layer Breakup and the Effects of Topographic Shading in Idealized Valleys. *J. Appl. Meteor.* 42, 1255–1272. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<1255:ANSOIB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<1255:ANSOIB>2.0.CO;2)
- Defant, F., 1949. Zur Theorie der Hangwinde, nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg- und Talwinde. *Arch. Met. Geoph. Biokl. A.* 1, 421–450. <https://doi.org/10.1007/BF02247634>
- Feser, F., Barcikowska, M., Krueger, O., Schenk, F., Weisse, R., Xia, L., 2015. Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe—A review. *Quart J Royal Meteor Soc* 141, 350–382. <https://doi.org/10.1002/qj.2364>
- Gross, G., Wippermann, F., 1987. Channeling and Countercurrent in the Upper Rhine Valley: Numerical Simulations. *J. Climate Appl. Meteor.* 26, 1293–1304. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1987\)026<1293:CACITU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<1293:CACITU>2.0.CO;2)
- Knippertz, P., Ulbrich, U., Speth, P., 2000. Changing cyclones and surface wind speeds over the North Atlantic and Europe in a transient GHG experiment. *Clim. Res.* 15, 109–122. <https://doi.org/10.3354/cr015109>
- Lazar, R., Podesser, A., 1999. An urban climate analysis of Graz and its significance for urban planning in the tributary valleys east of Graz (Austria). *Atmospheric Environment* 33, 4195–4209. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00162-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00162-4)
- Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2004. On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. *Global and Planetary Change* 44, 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.06.011>
- Matulla, C., Schöner, W., Alexandersson, H., Von Storch, H., Wang, X.L., 2008. European storminess: late nineteenth century to present. *Clim Dyn* 31, 125–130. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0333-y>
- Oke, T.R., 1978. Boundary layer climates. Methuen, London.
- Podesser, A., 2012. Windverhältnisse. H. Pilger, A. Podesser, F. Prettenhaler (Hrsg.), *Klimaatlas Steiermark: Periode 1971 - 2000; eine anwenderorientierte Klimatographie* (2. überarb. Aufl., Studien zum Klimawandel in Österreich, 22 S.), Verl. der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.
- Prein, A.F., Gobiet, A., Truhetz, H., 2011. Analysis of uncertainty in large scale climate change projections over Europe. *metz* 20, 383–395. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0286>
- Wakonigg, H., 1978. Witterung und Klima in der Steiermark, Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz. Verl. für d. Technische Univ. Graz.
- Zwiers, F.W., Kharin, V.V., 1998. Changes in the Extremes of the Climate Simulated by CCC GCM2 under CO2 Doubling. *J. Climate* 11, 2200–2222. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<2200:CITEOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<2200:CITEOT>2.0.CO;2)

10.8 Datenanhang

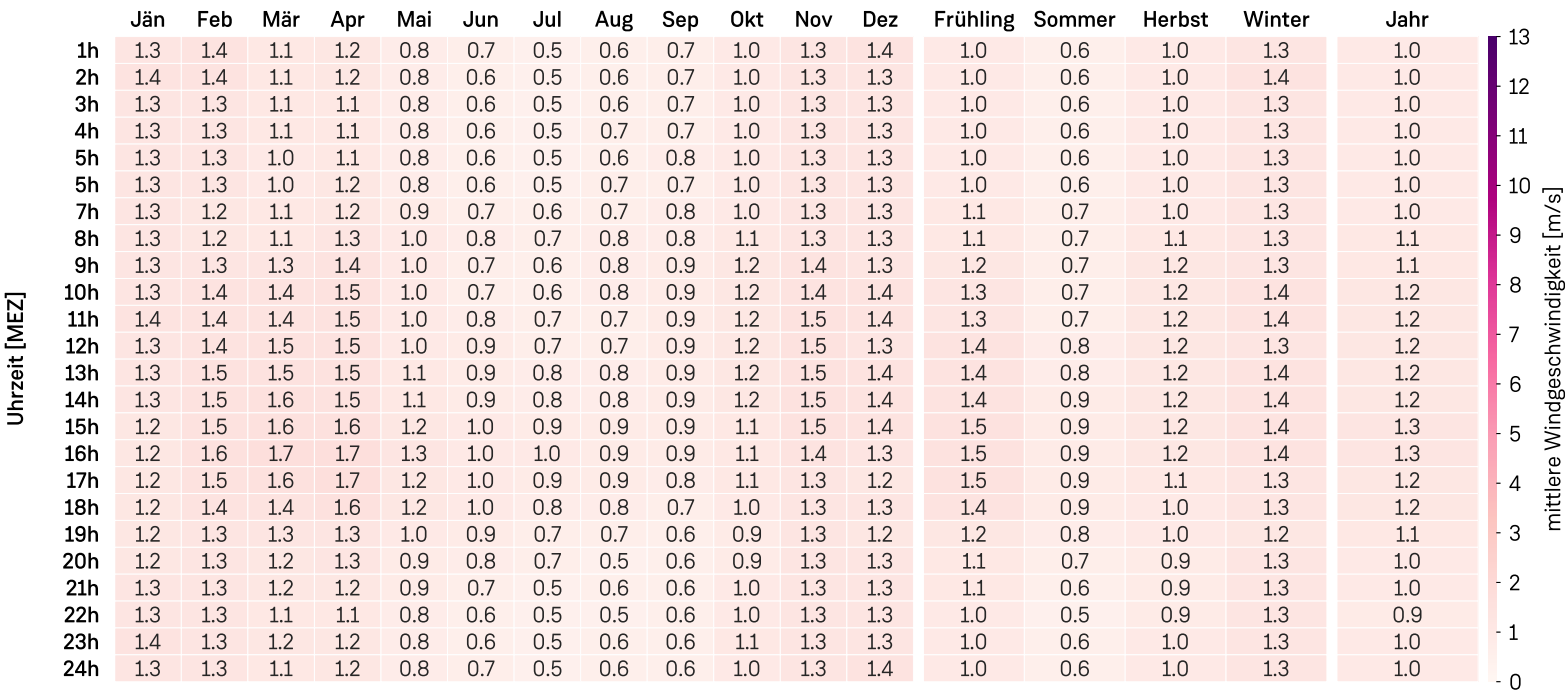
10.8.1 Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeit sowie mittlere Windrichtungsverteilung nach Geschwindigkeitsklassen



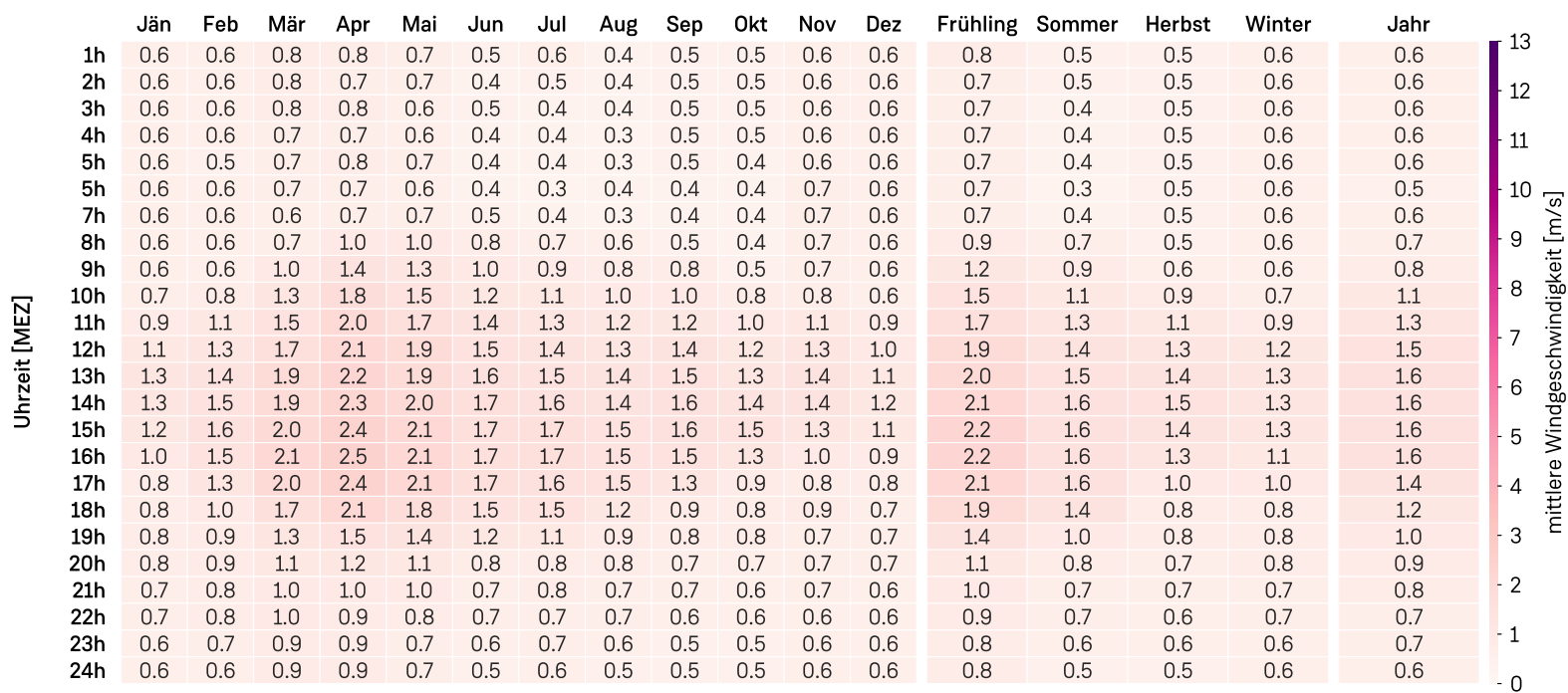
Anhang 10.1: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Aflenz.



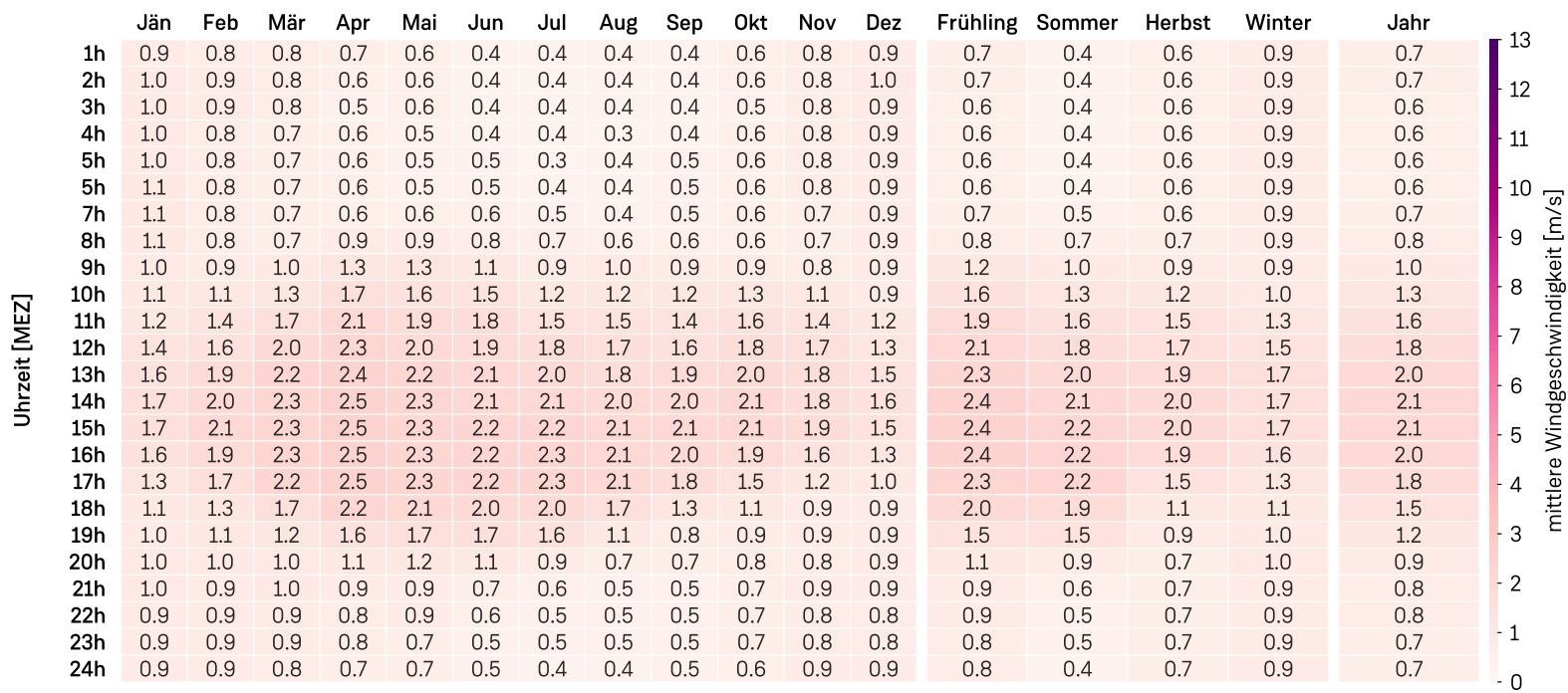
Anhang 10.2: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Aigen im Ennstal.



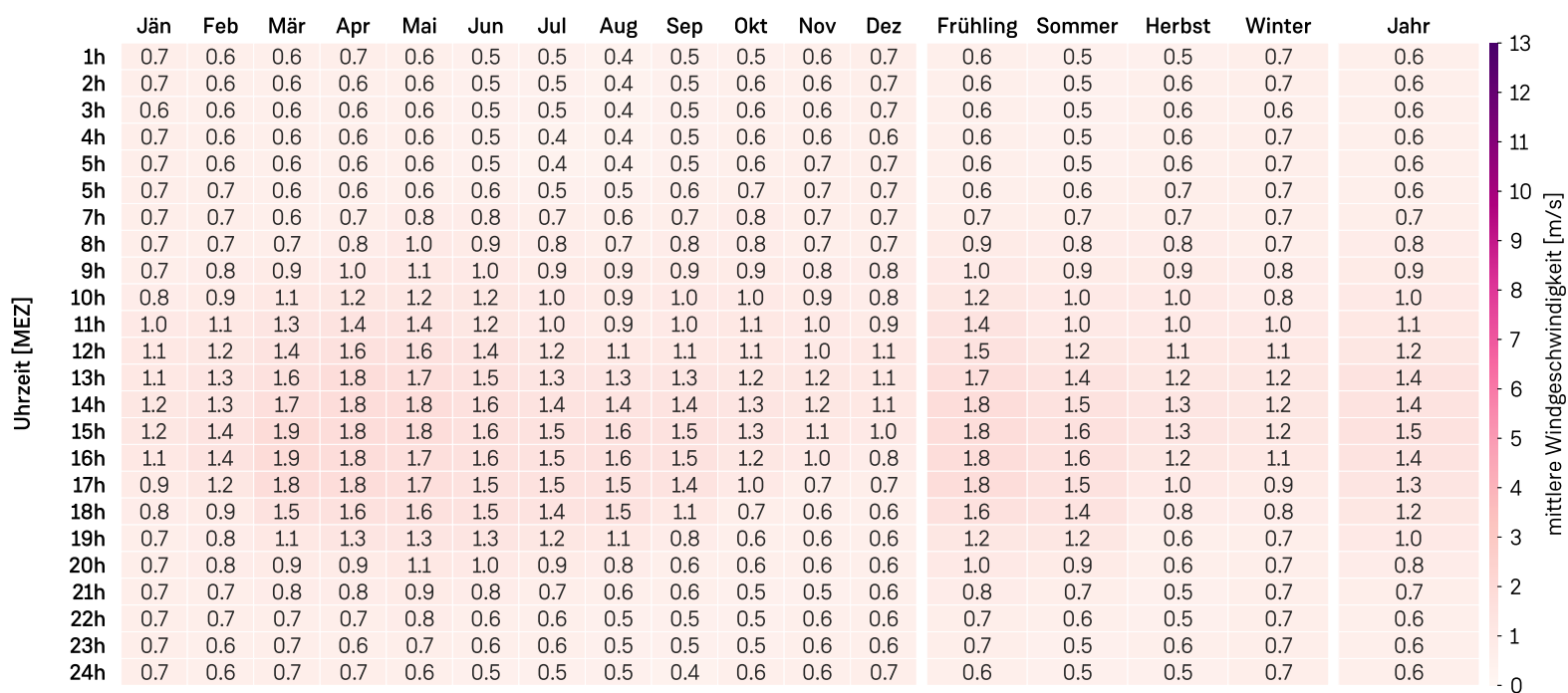
Anhang 10.3: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Bad Aussee.



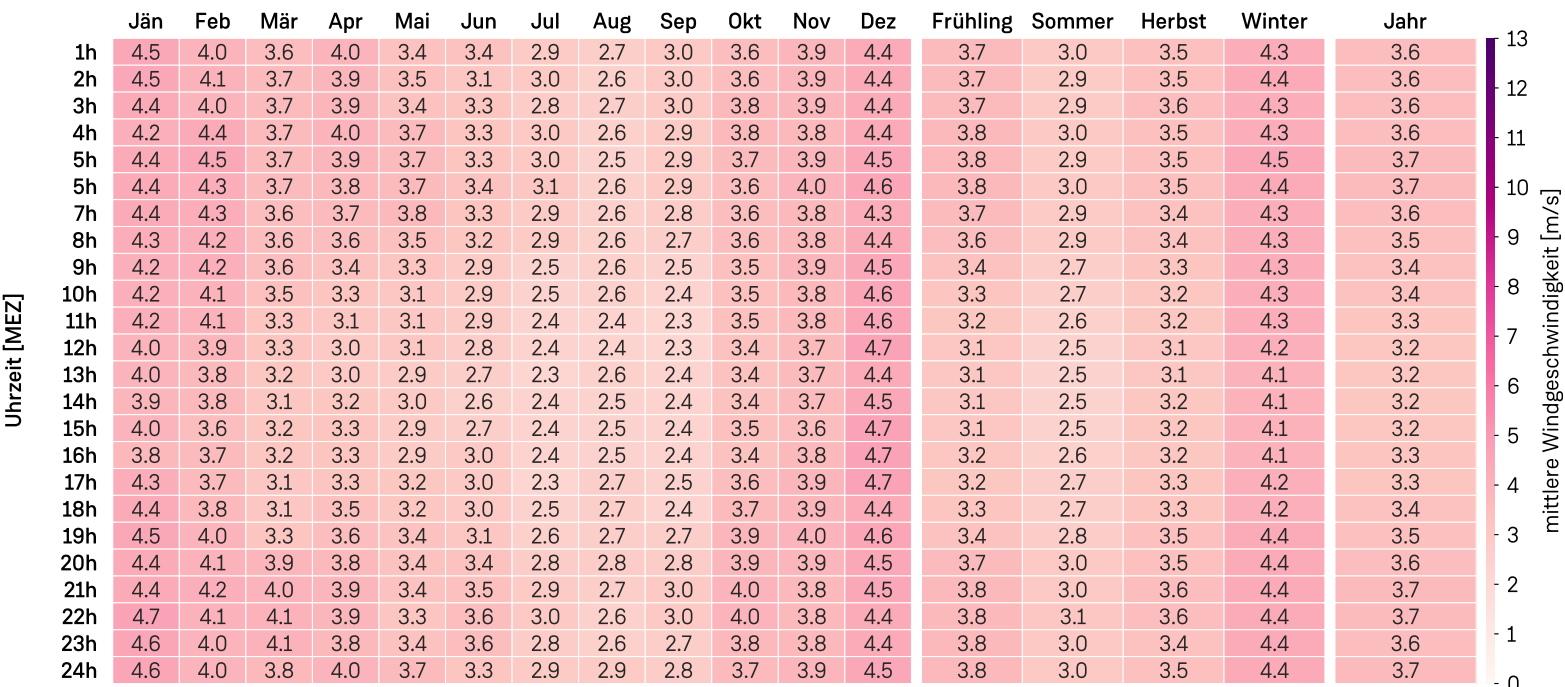
Anhang 10.4: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Bad Gleichenberg.



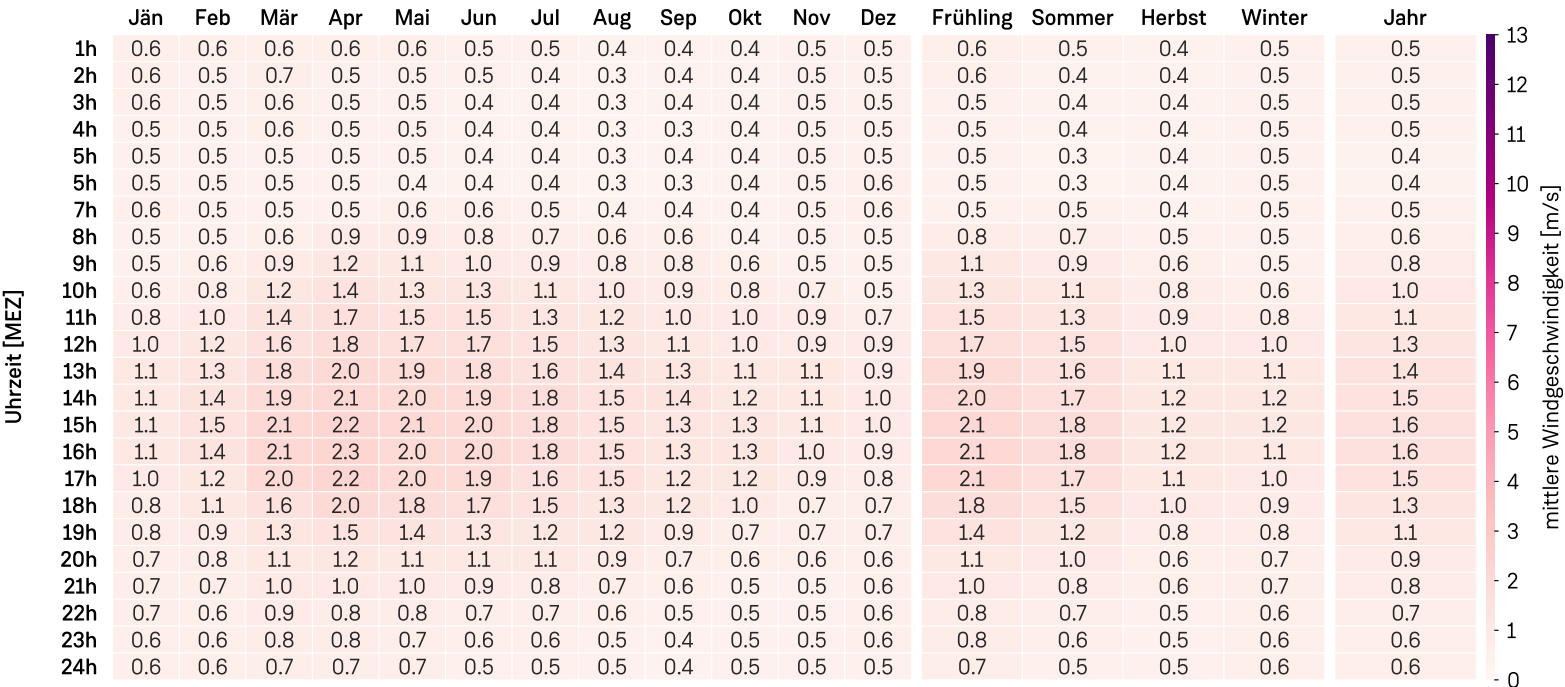
Anhang 10.5: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Bad Mitterndorf.



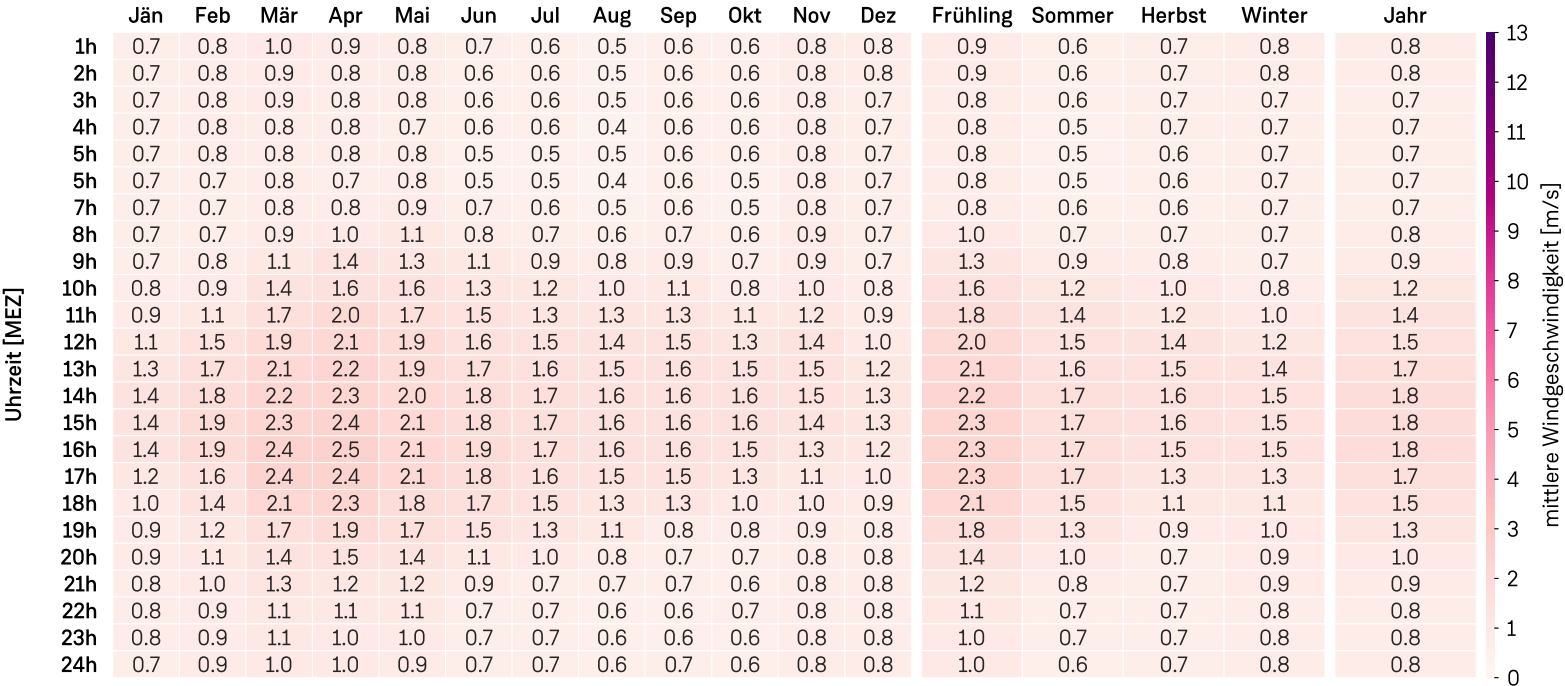
Anhang 10.6: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Bruck an der Mur.



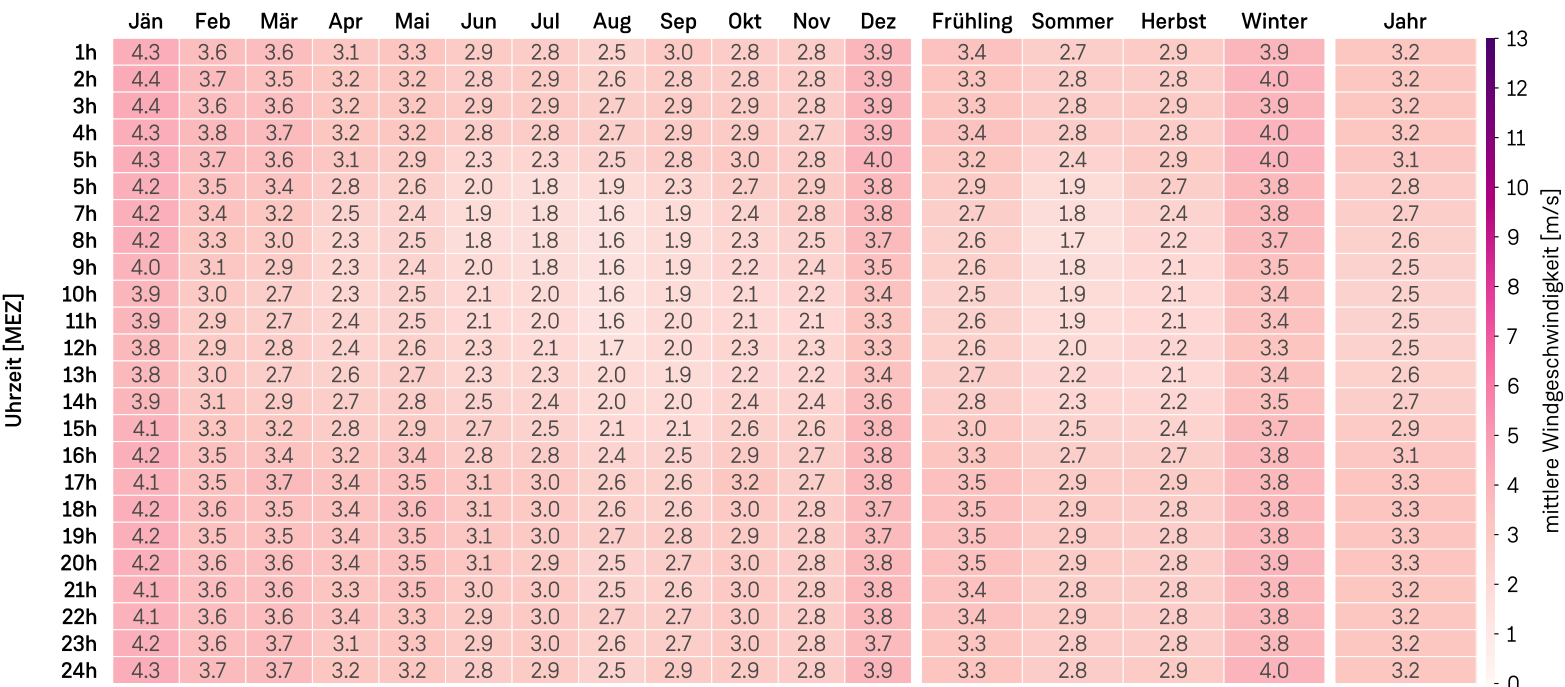
Anhang 10.7: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Dachstein - Hunerkogel.



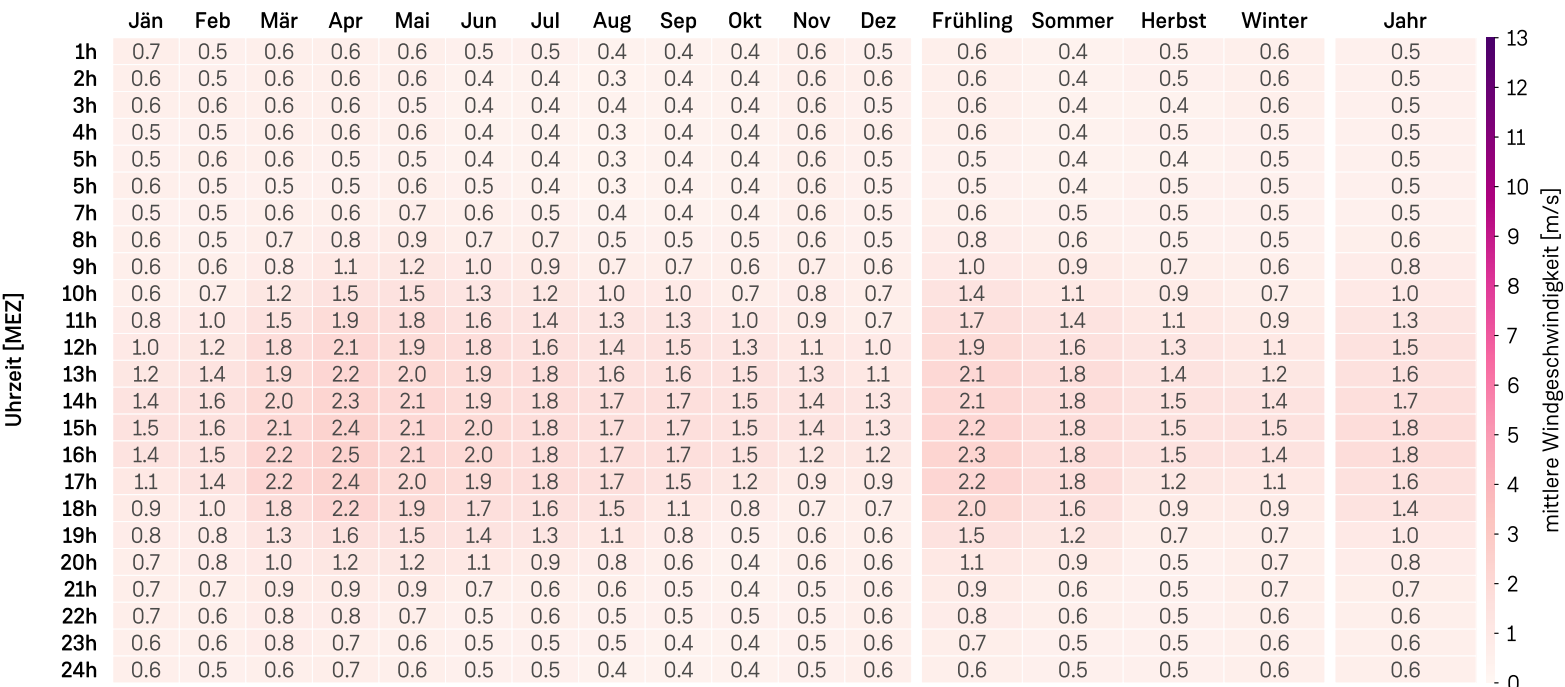
Anhang 10.8: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Deutschlandsberg.



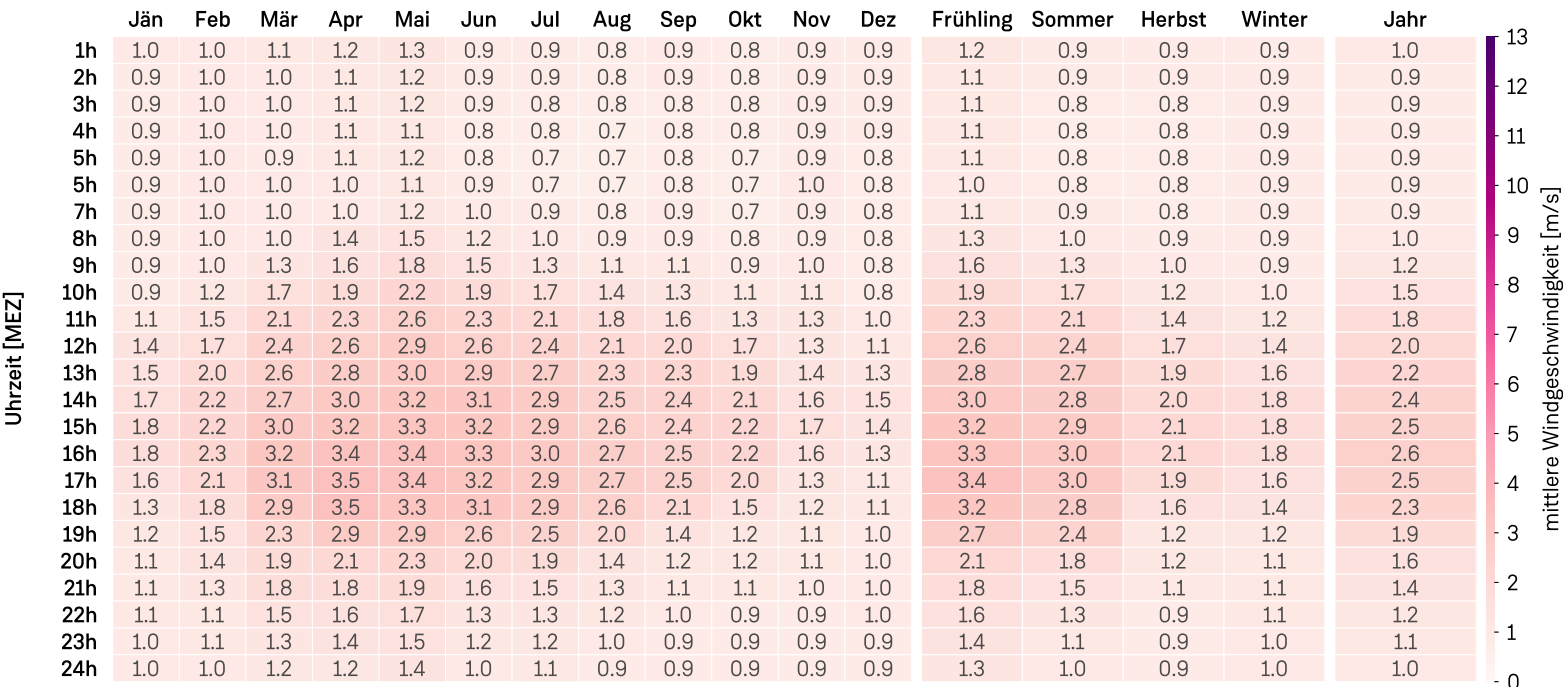
Anhang 10.9: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Feldbach.



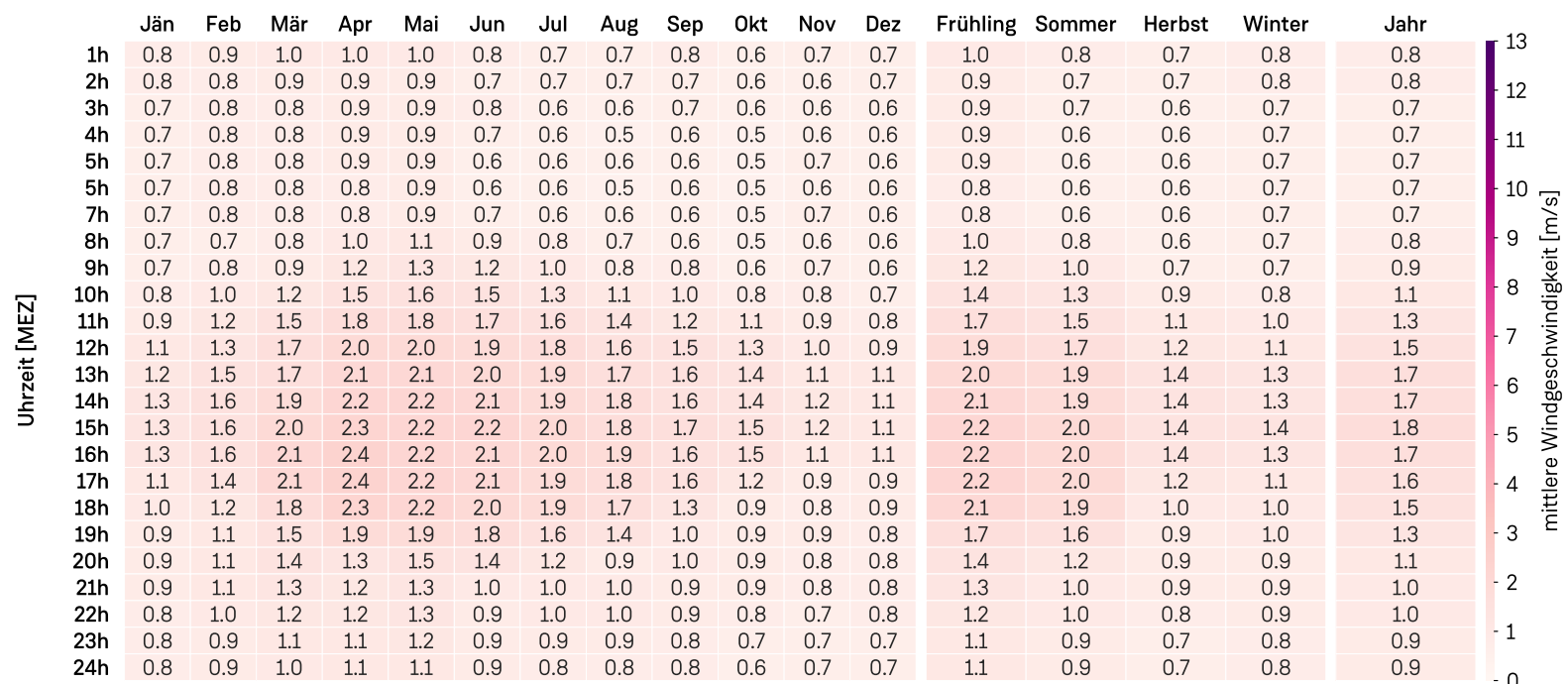
Anhang 10.13: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Galsterbergalm - Kalteck.



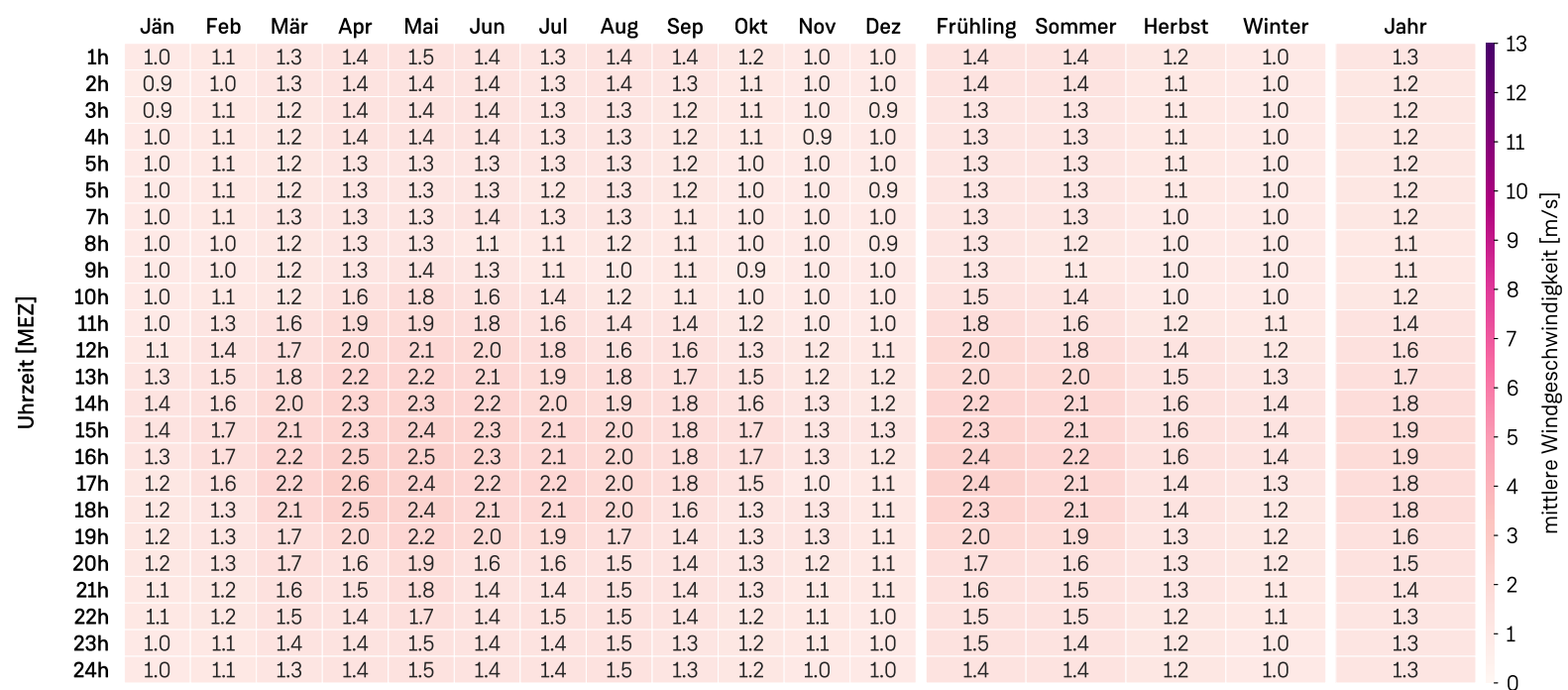
Anhang 10.14: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Gleisdorf.



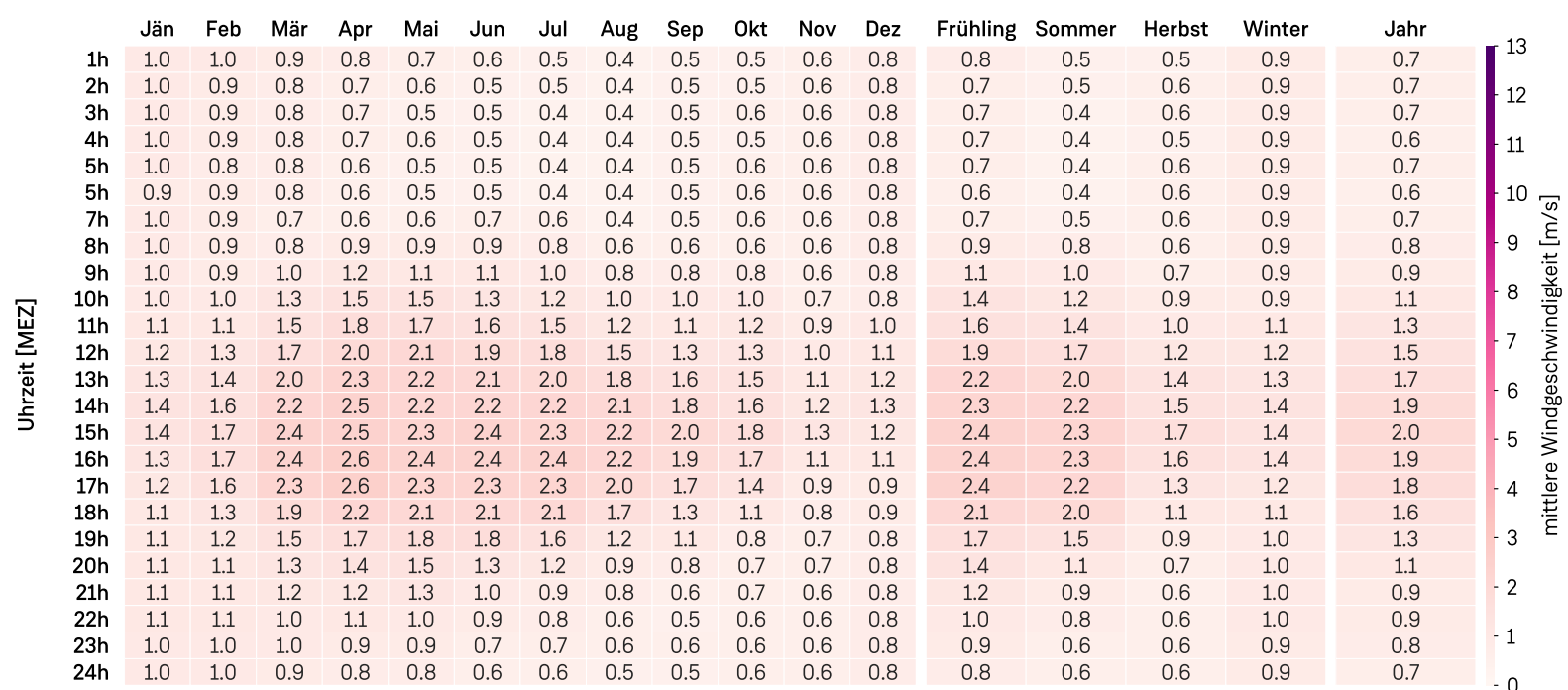
Anhang 10.15: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Graz Flughafen.



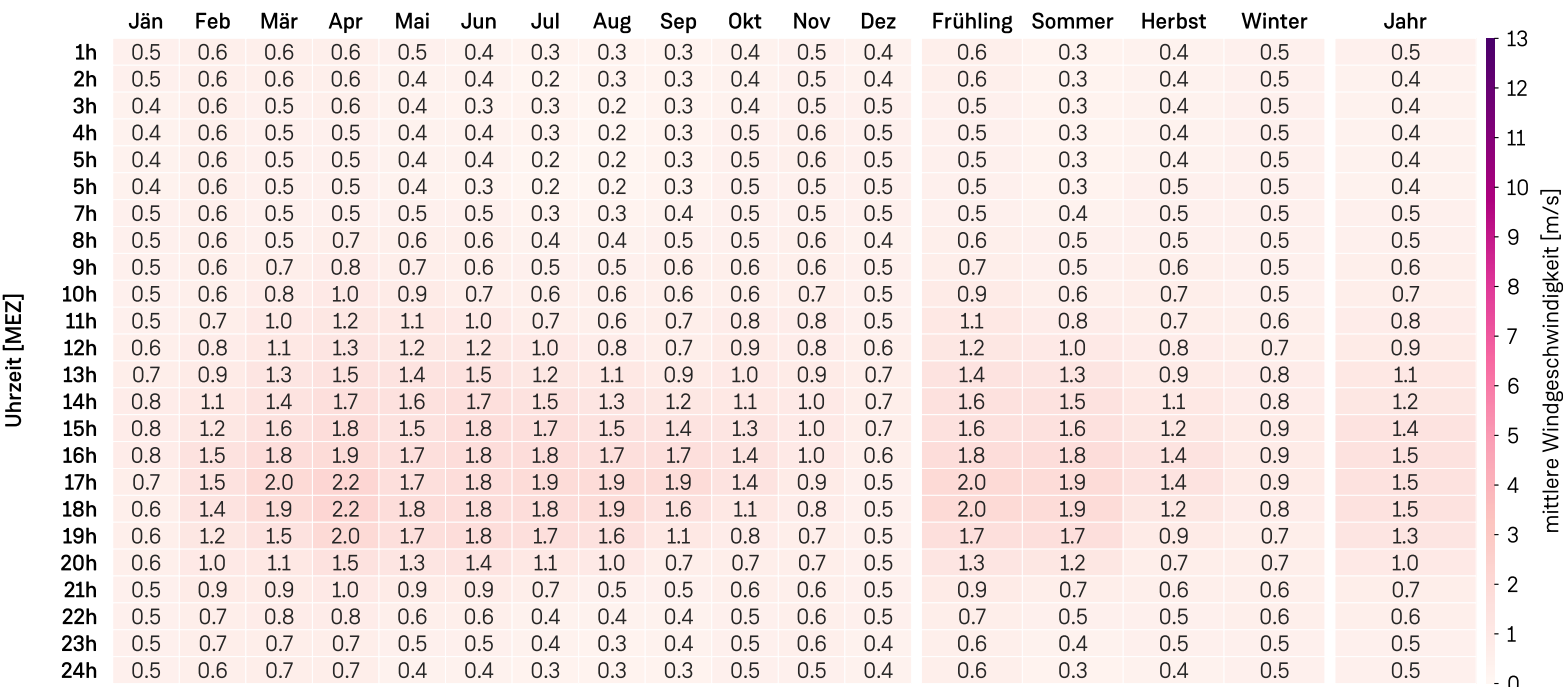
Anhang 10.16: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Graz Straßgang.



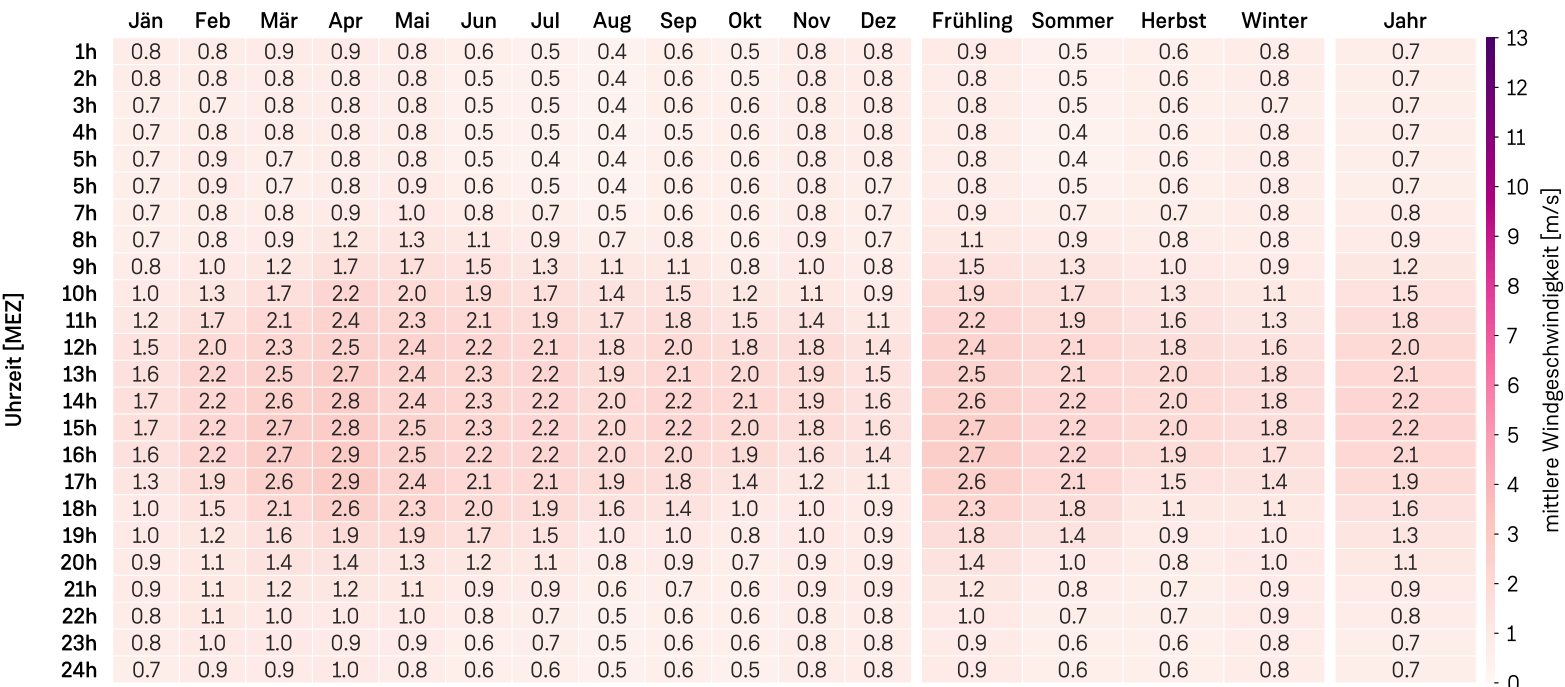
Anhang 10.17: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Graz Universität.



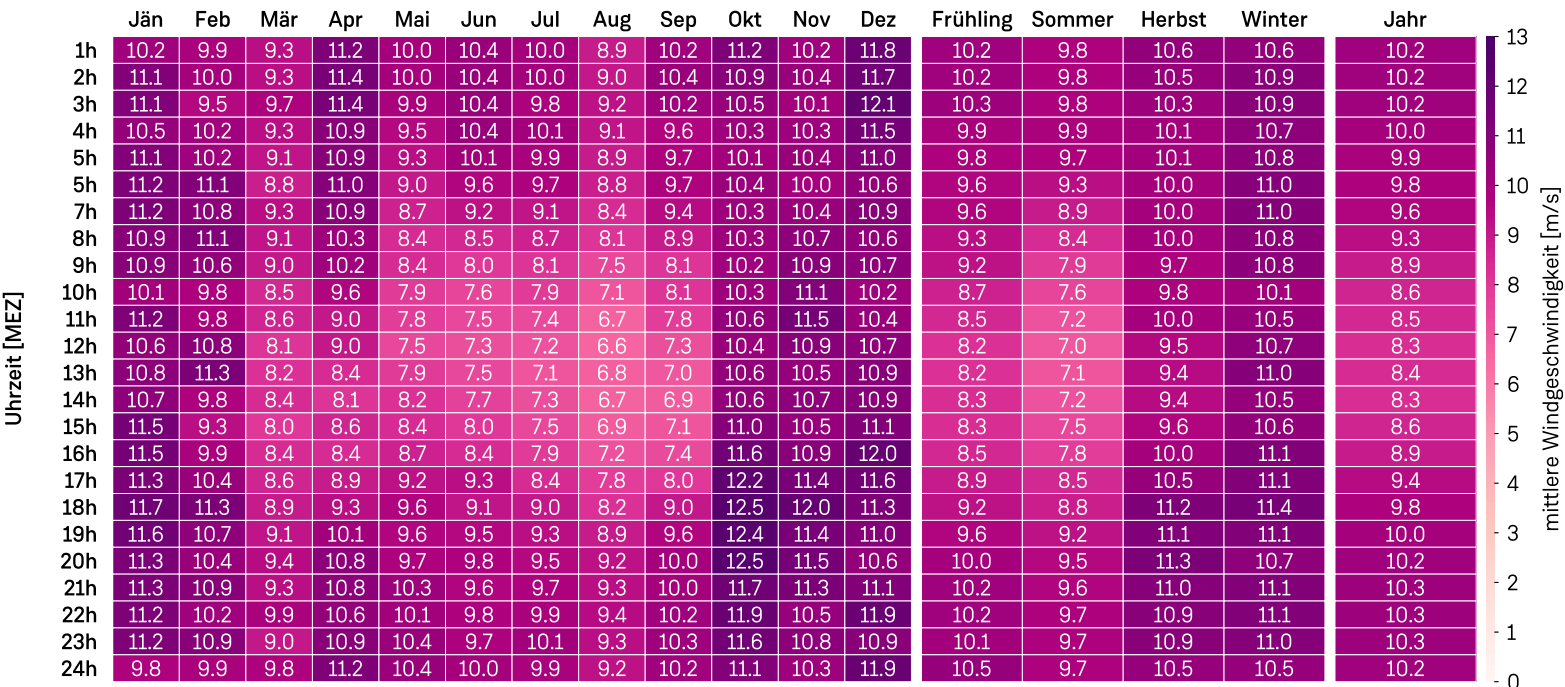
Anhang 10.18: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Gröbming.



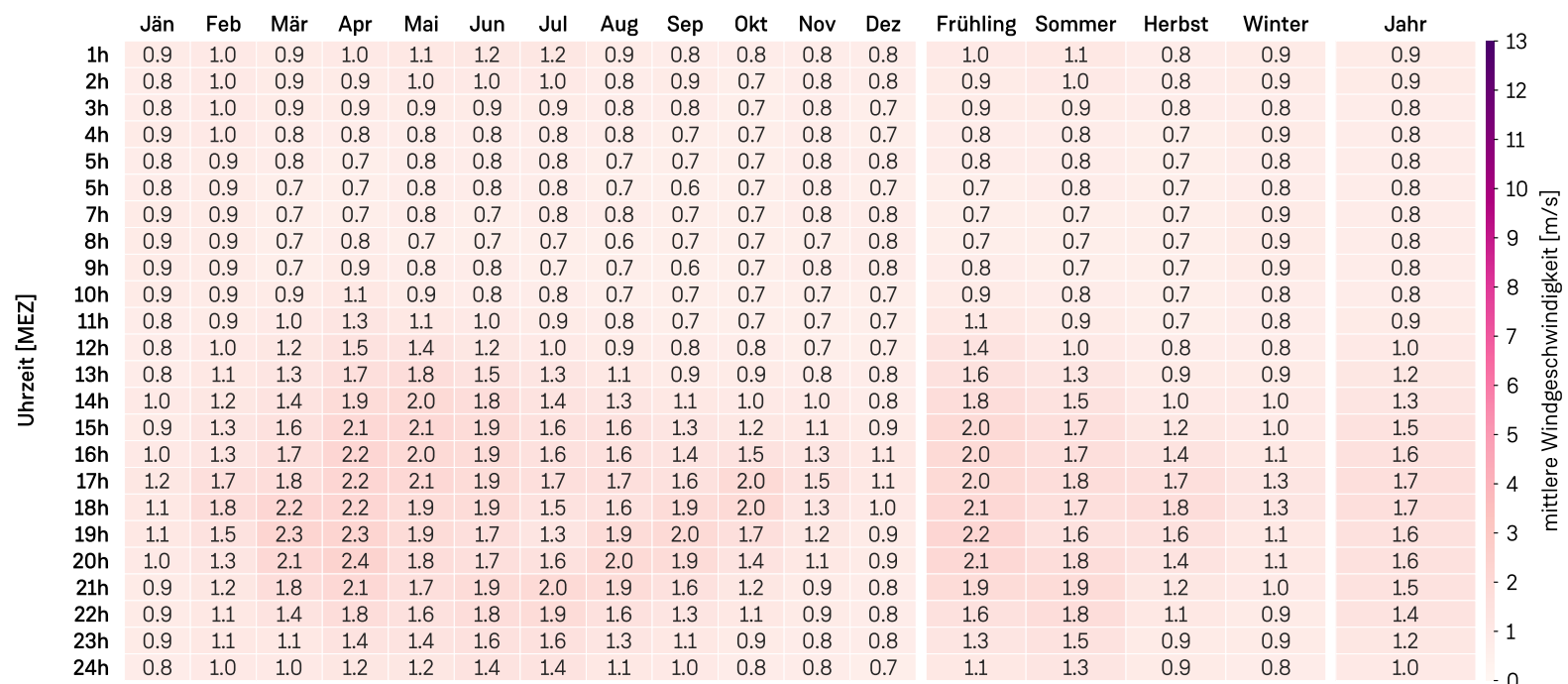
Anhang 10.19: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Hall bei Admont.



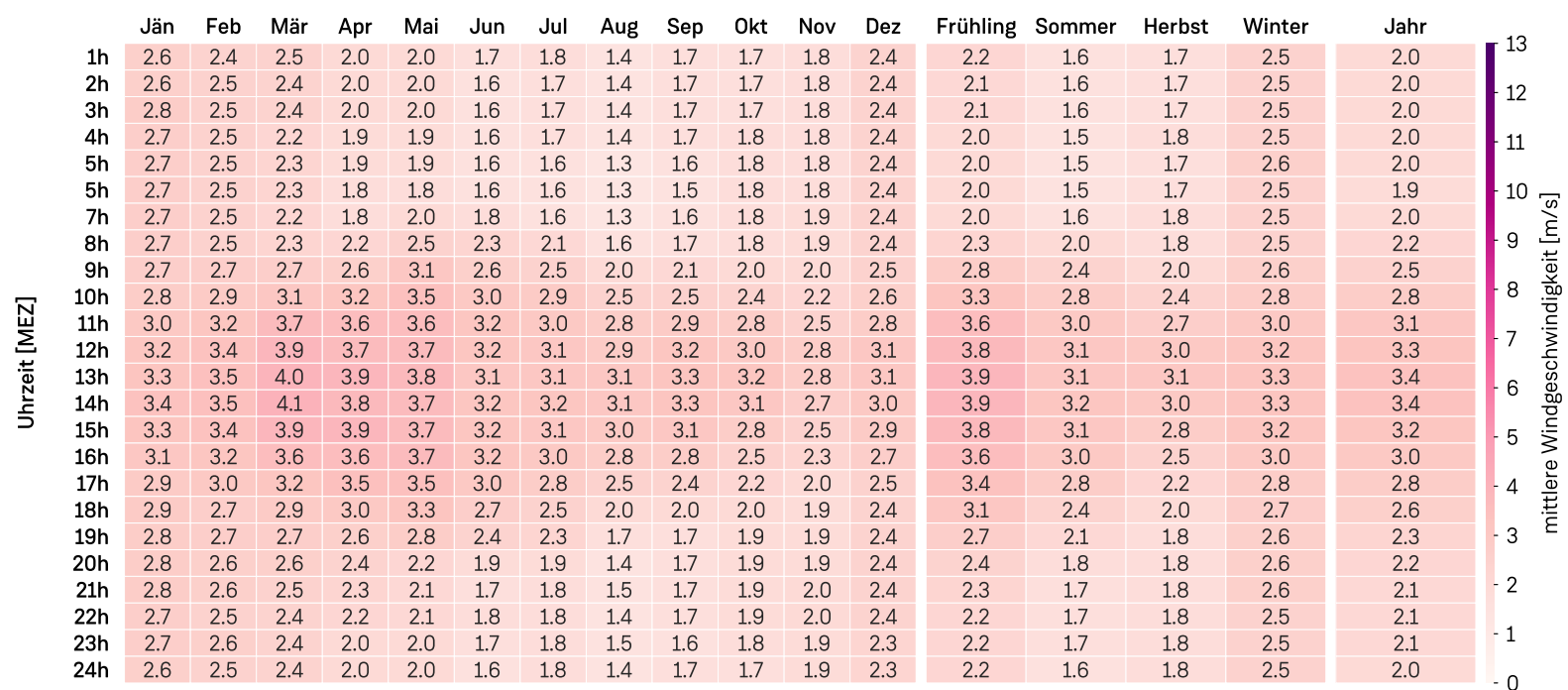
Anhang 10.20: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Hartberg.



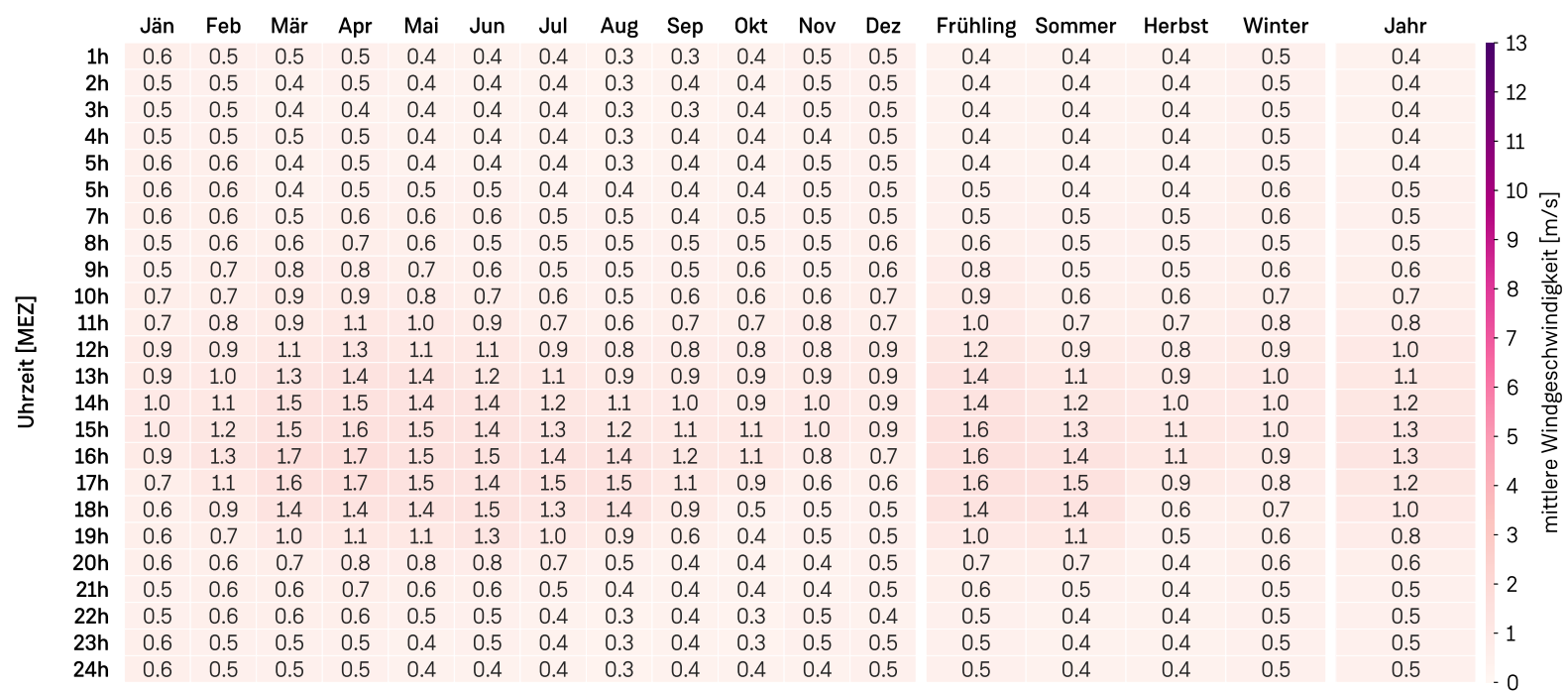
Anhang 10.21: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Hochschwab - Eismauer.



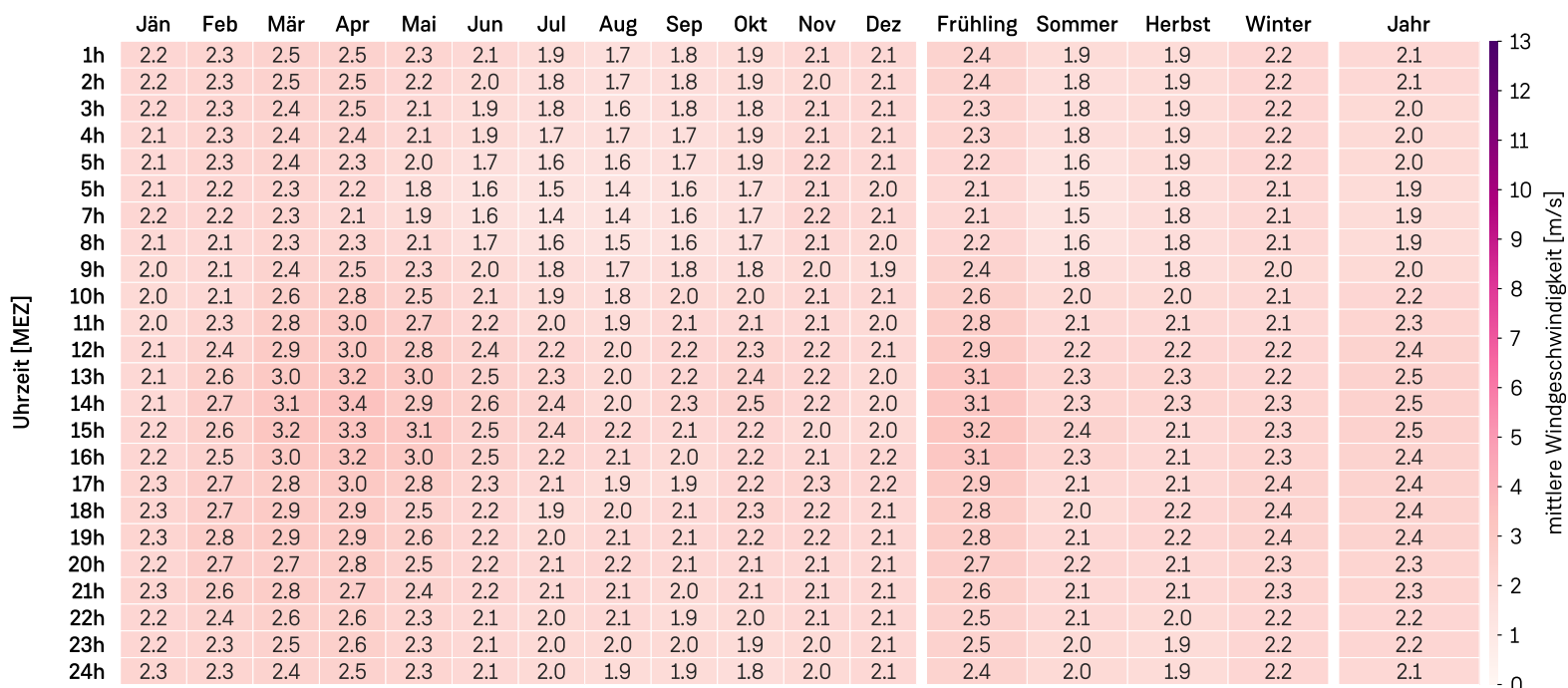
Anhang 10.22: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Irdning - Gumpenstein.



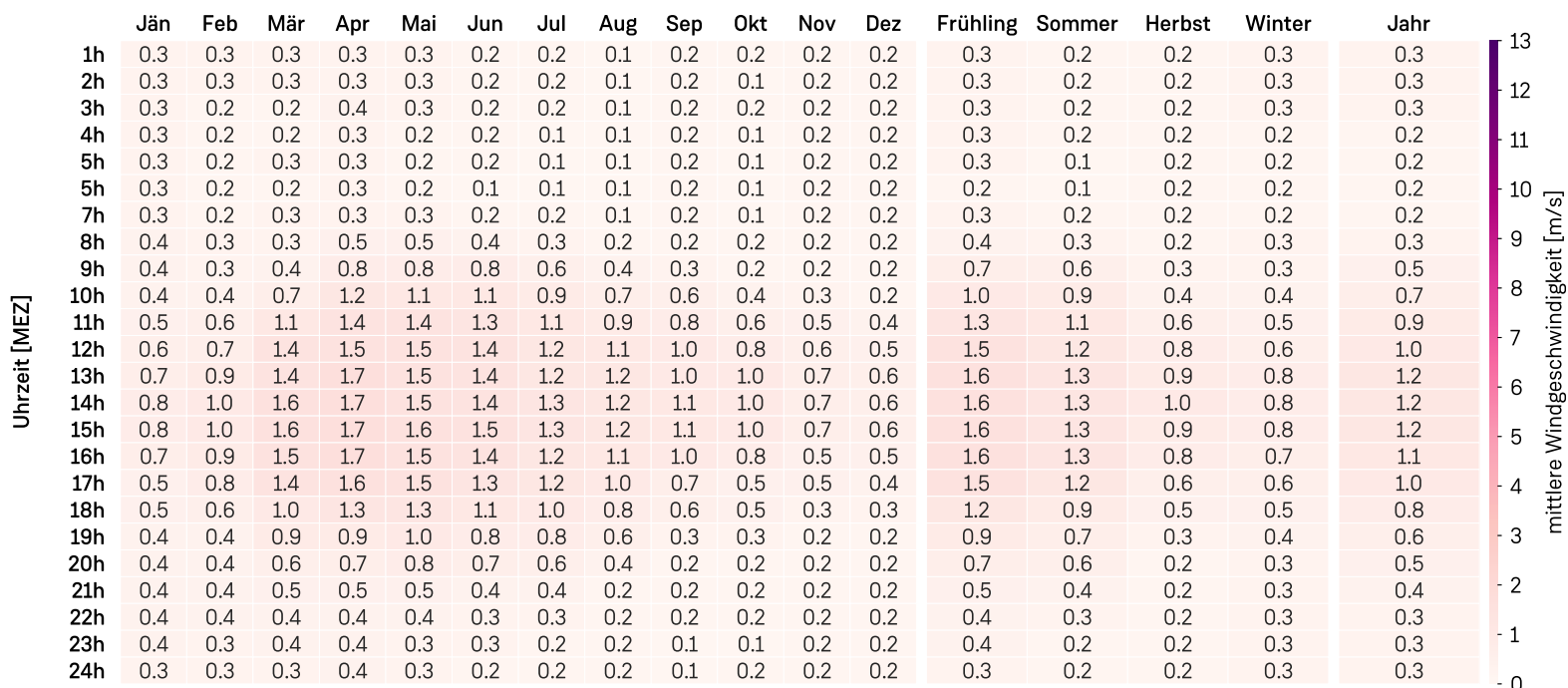
Anhang 10.23: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Kalwang.



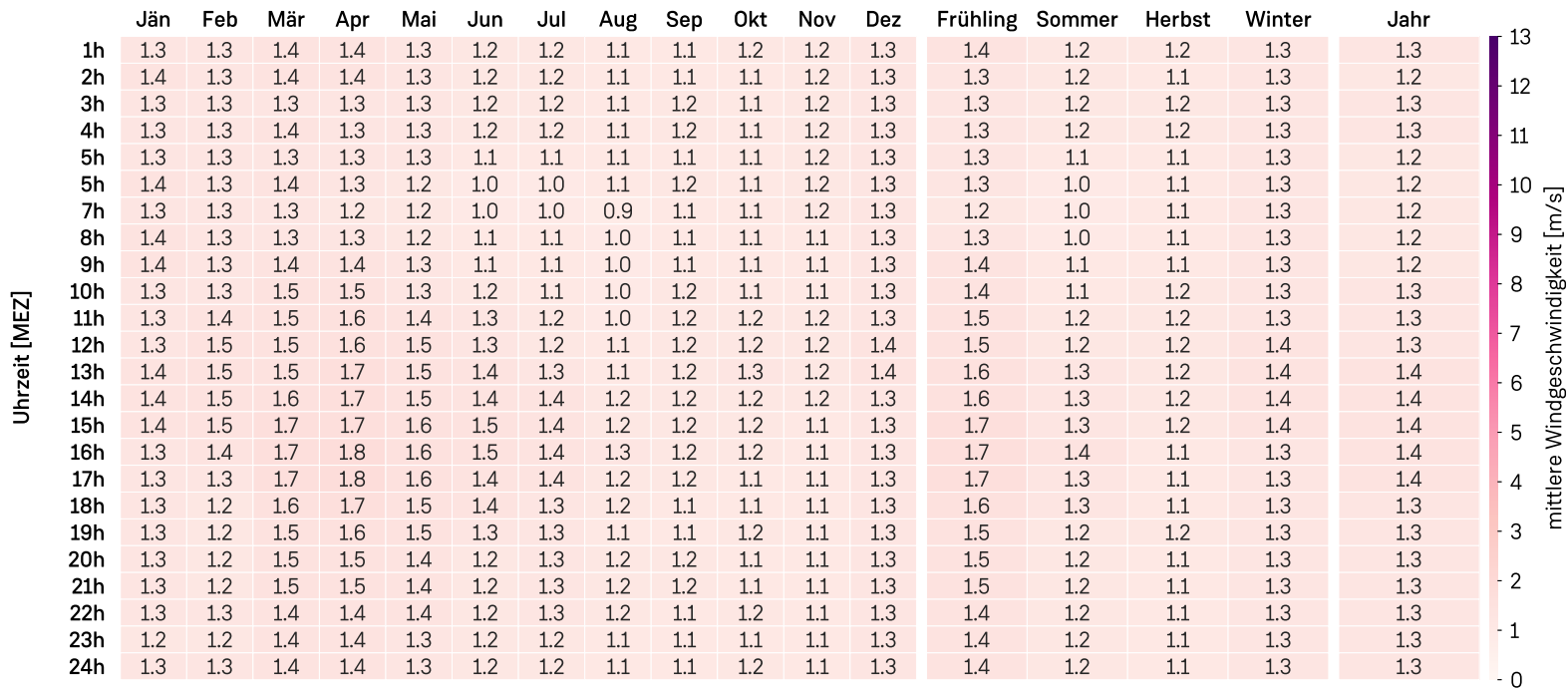
Anhang 10.24: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Kapfenberg.



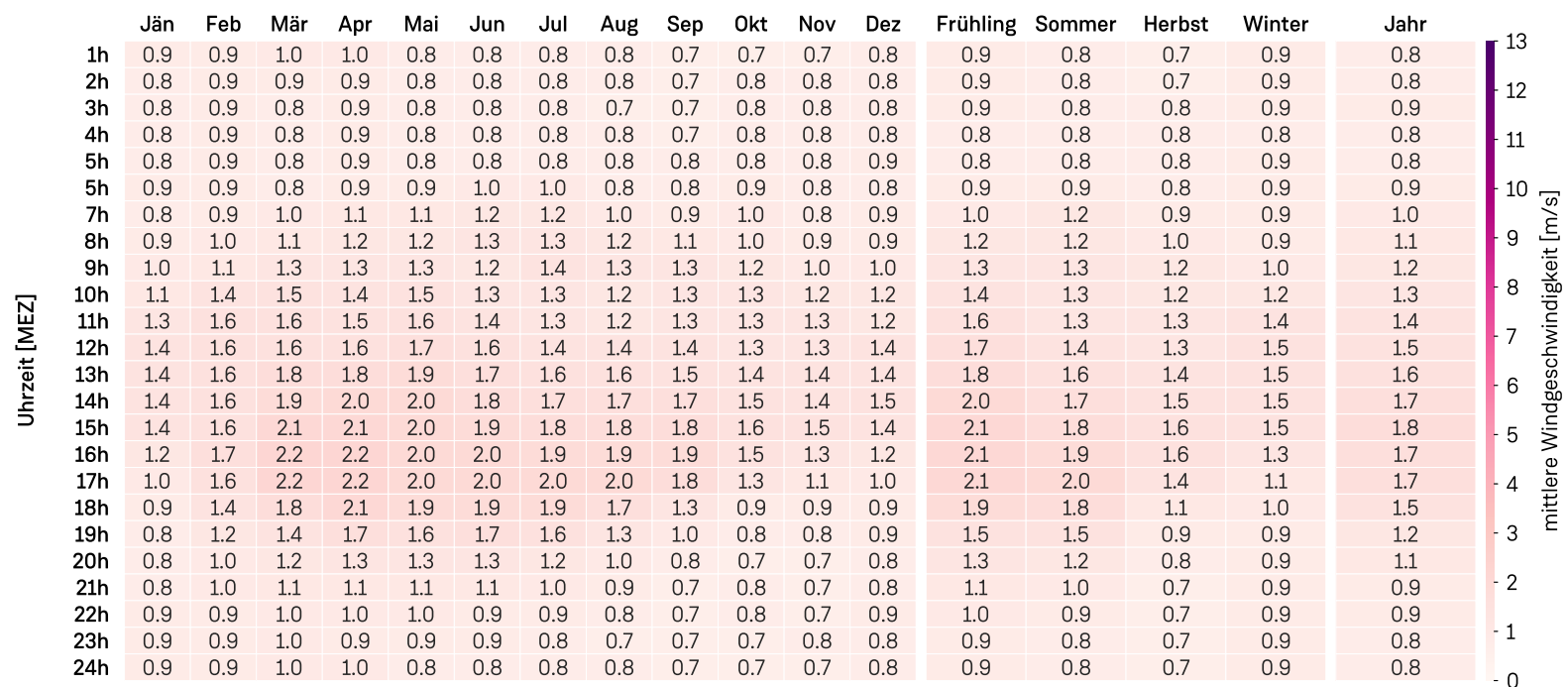
Anhang 10.25: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Klösch.



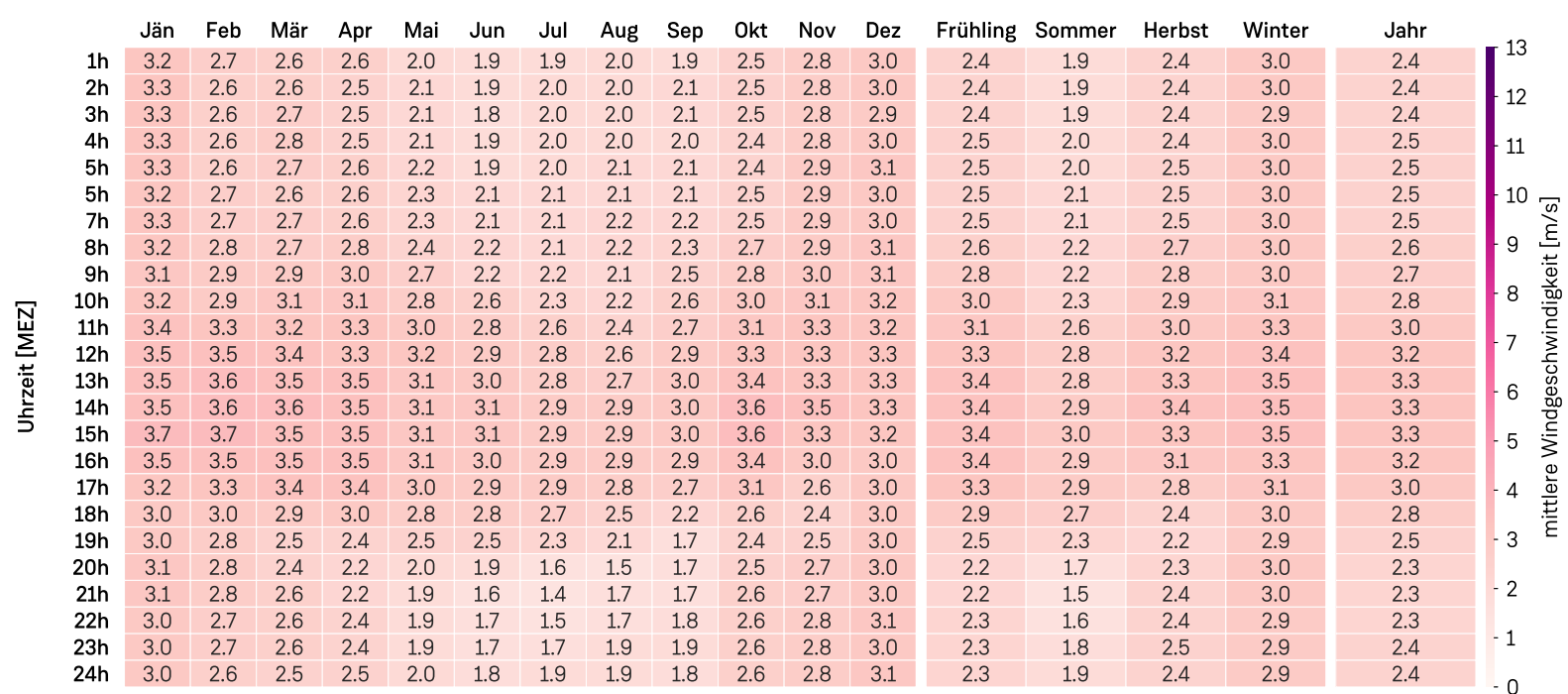
Anhang 10.26: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Köflach.



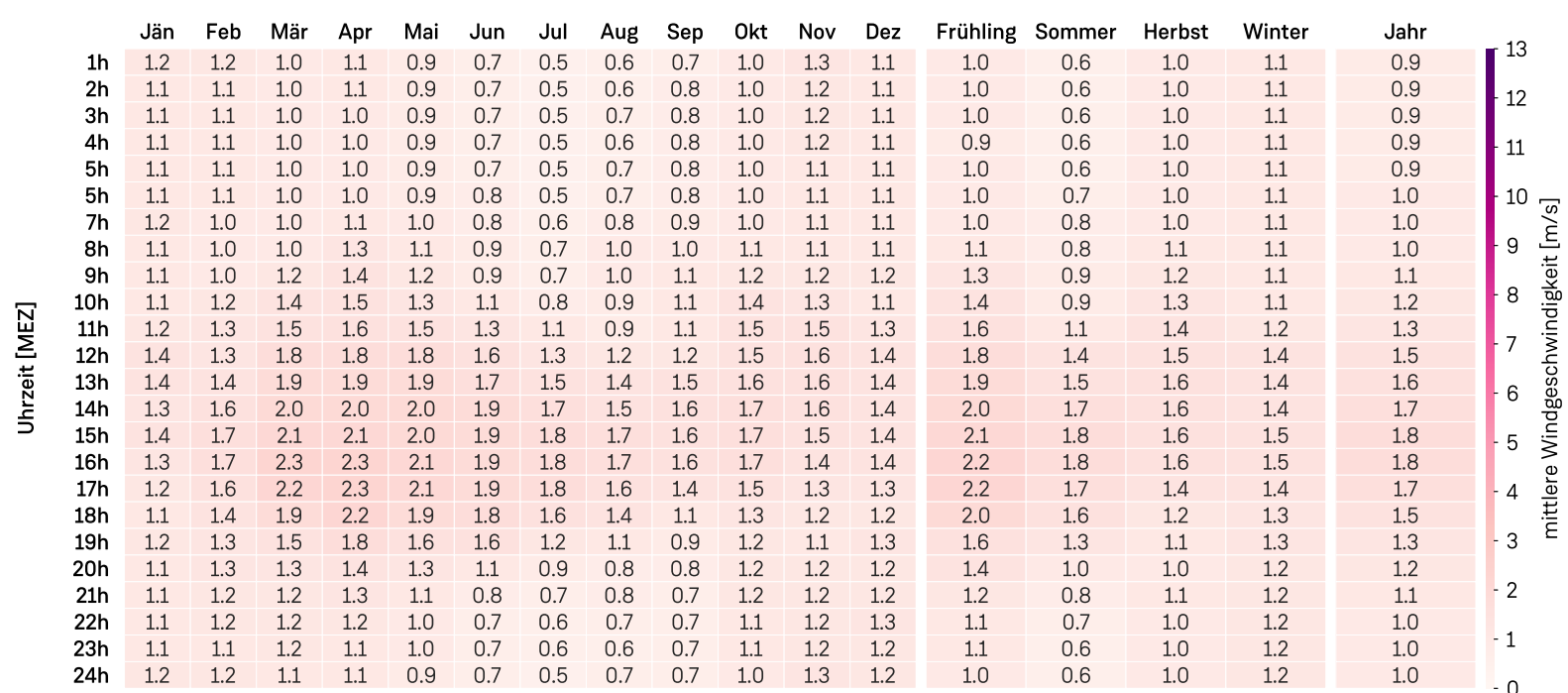
Anhang 10.27: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Laßnitzhöhe.



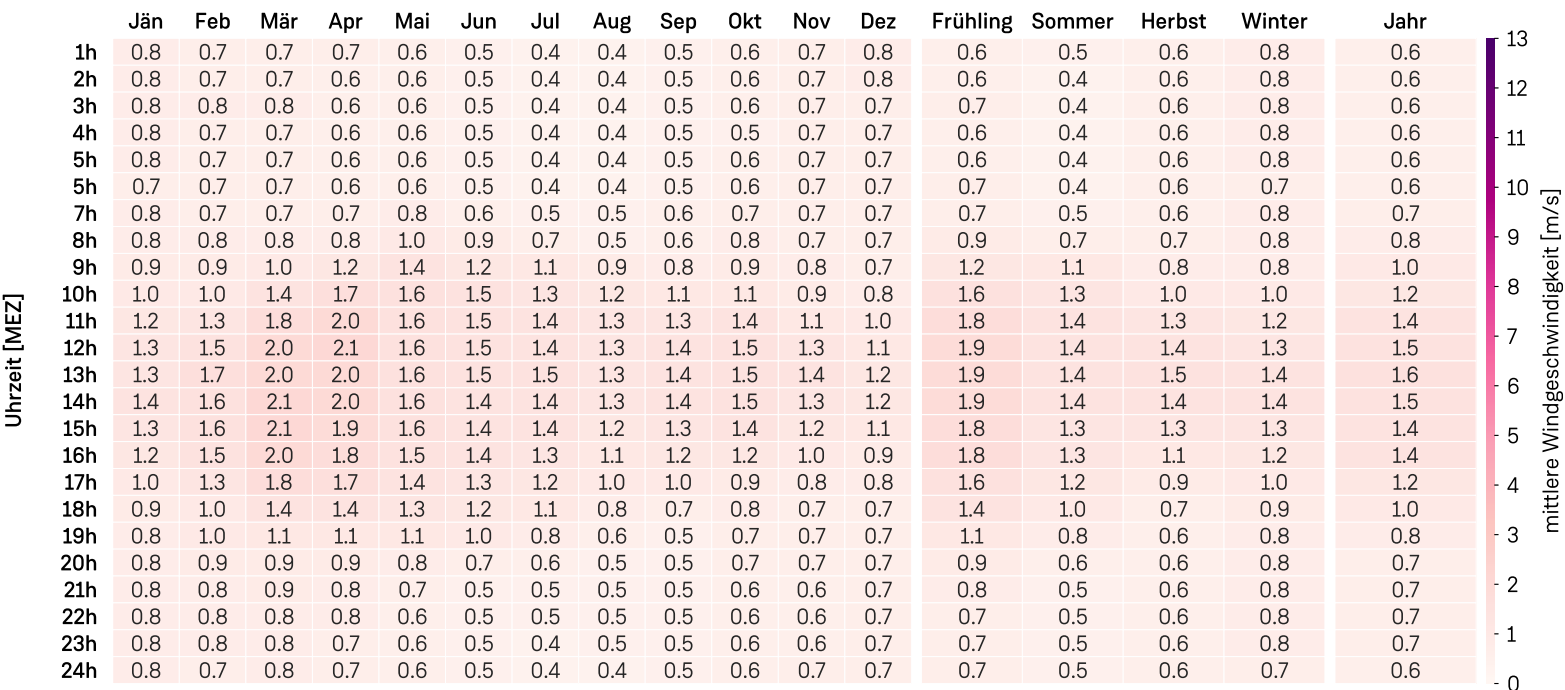
Anhang 10.28: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Leoben.



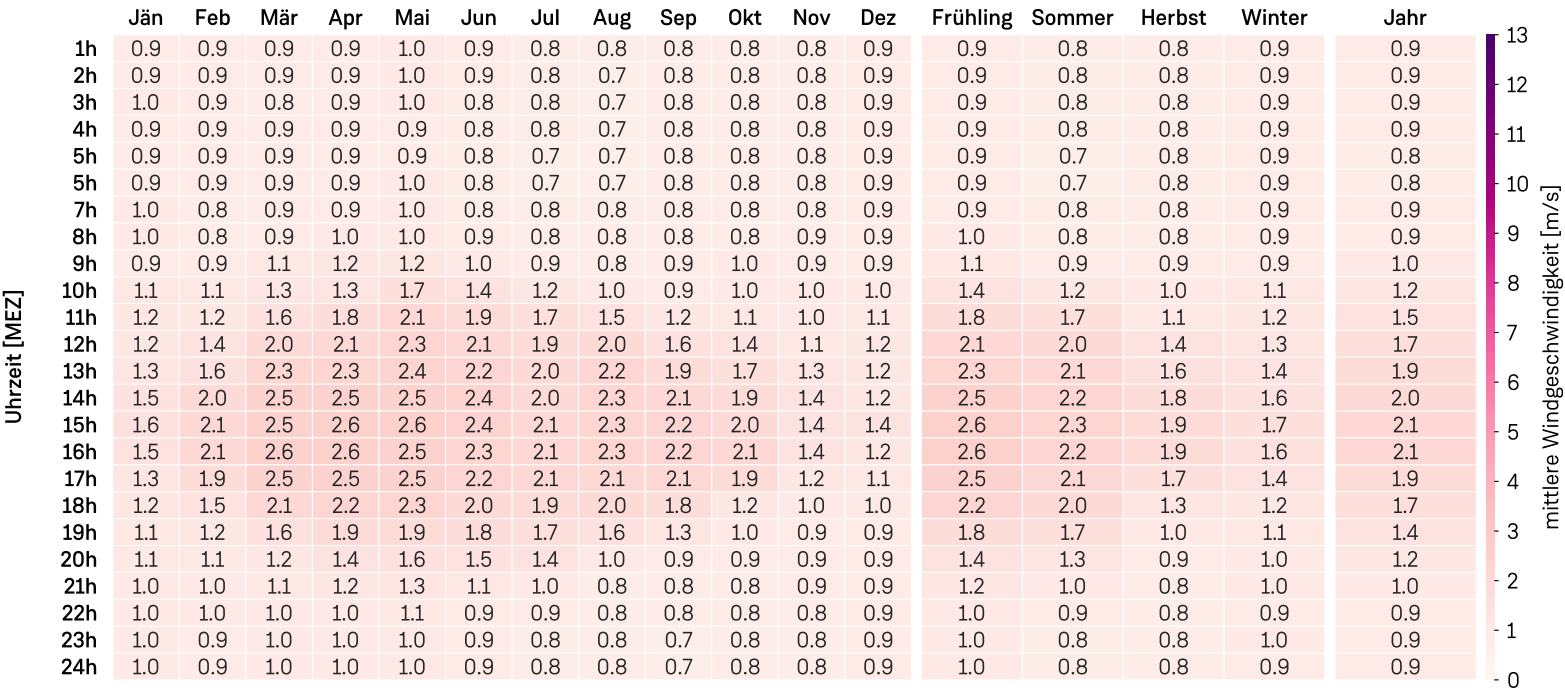
Anhang 10.29: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Mariazell.



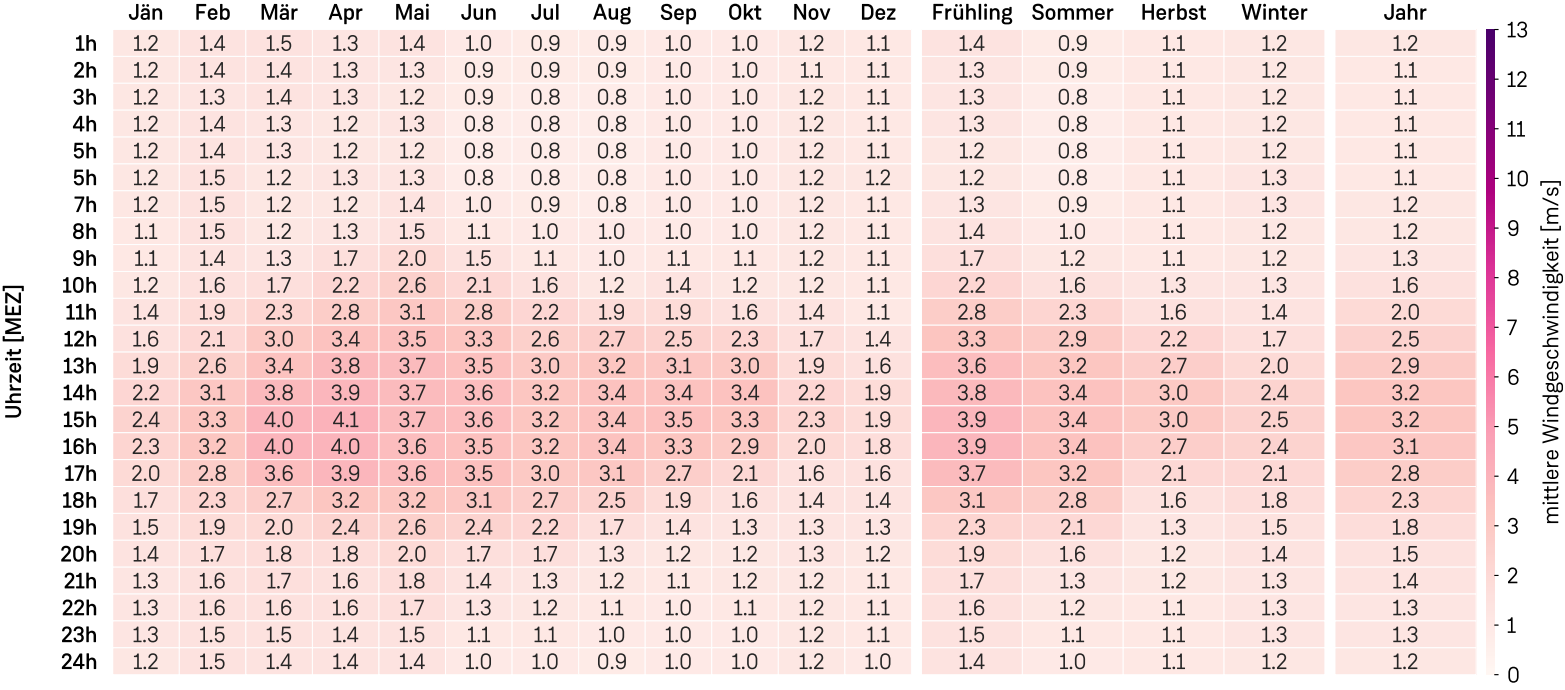
Anhang 10.30: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Mooslandl.



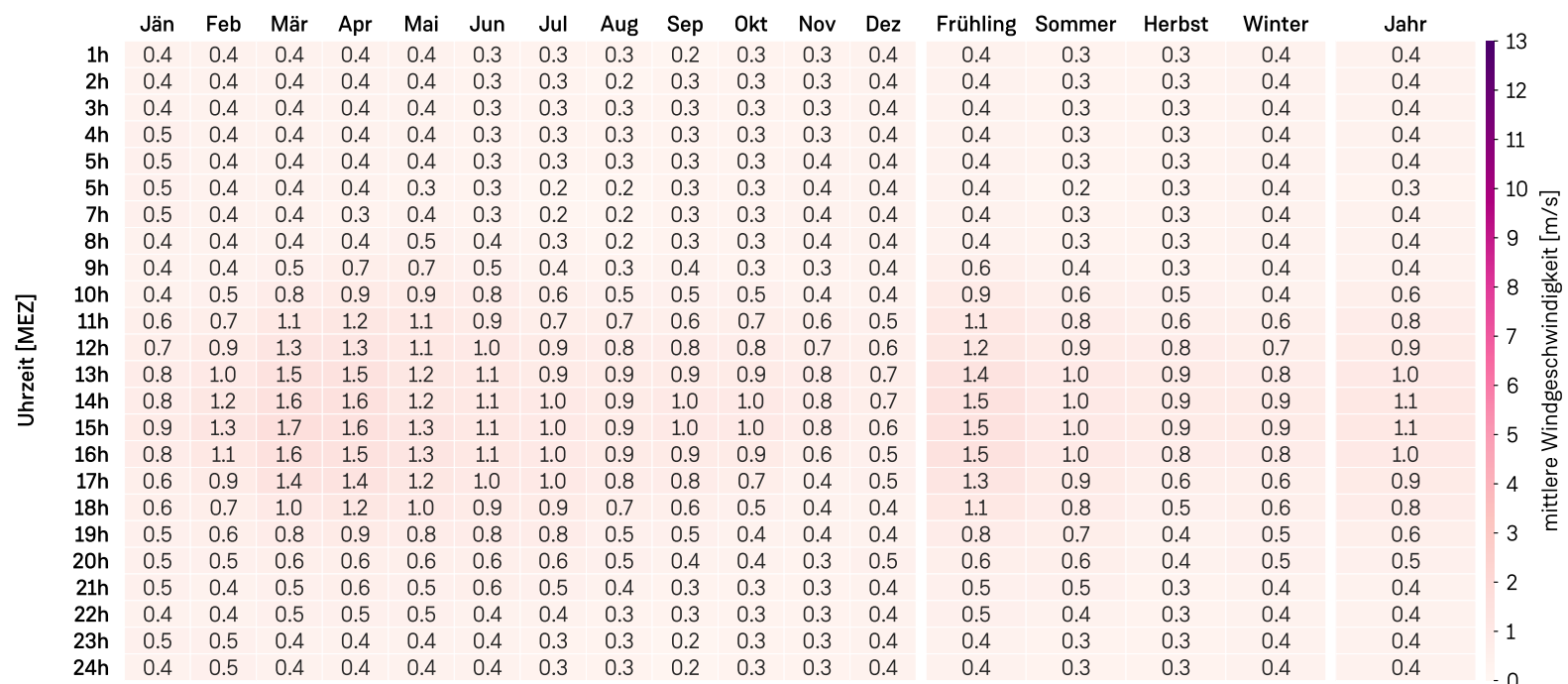
Anhang 10.31: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Müzzuschlag.



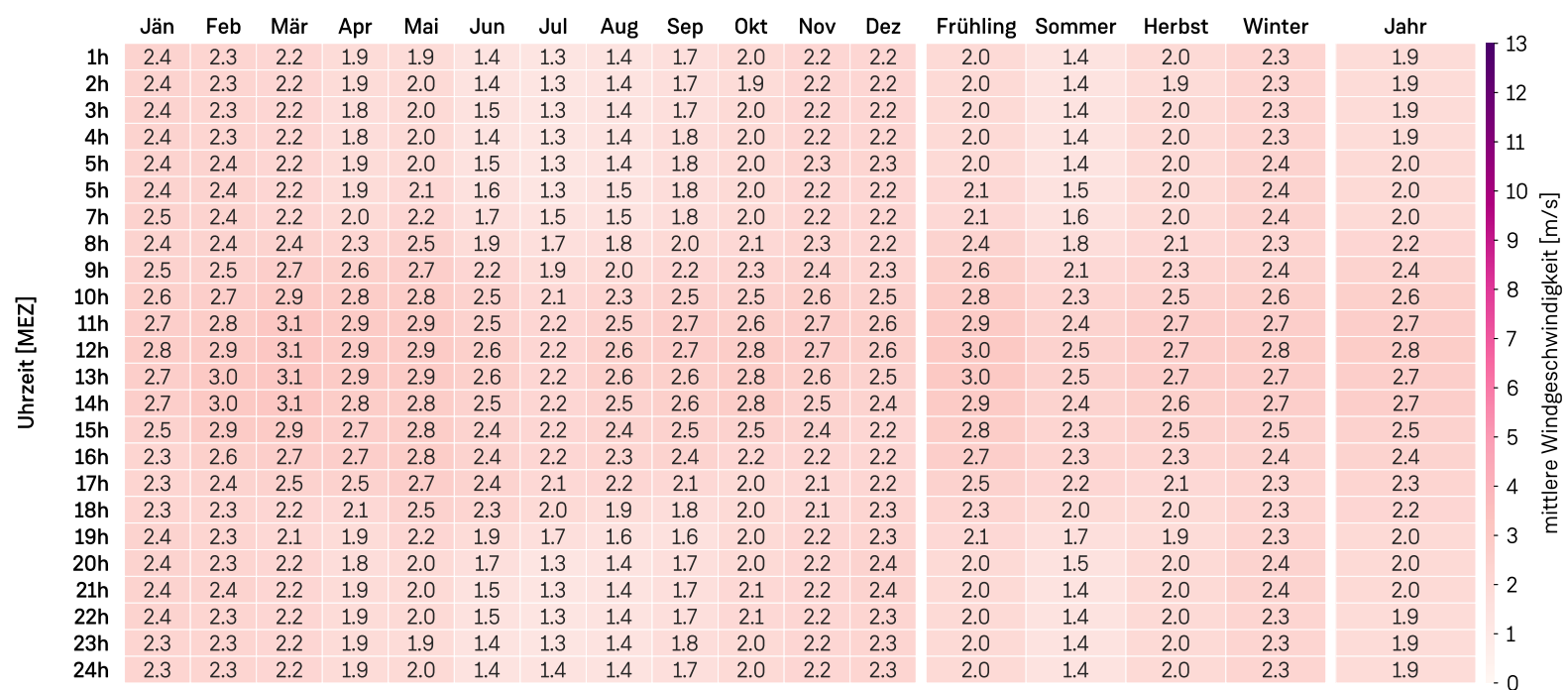
Anhang 10.32: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Murau.



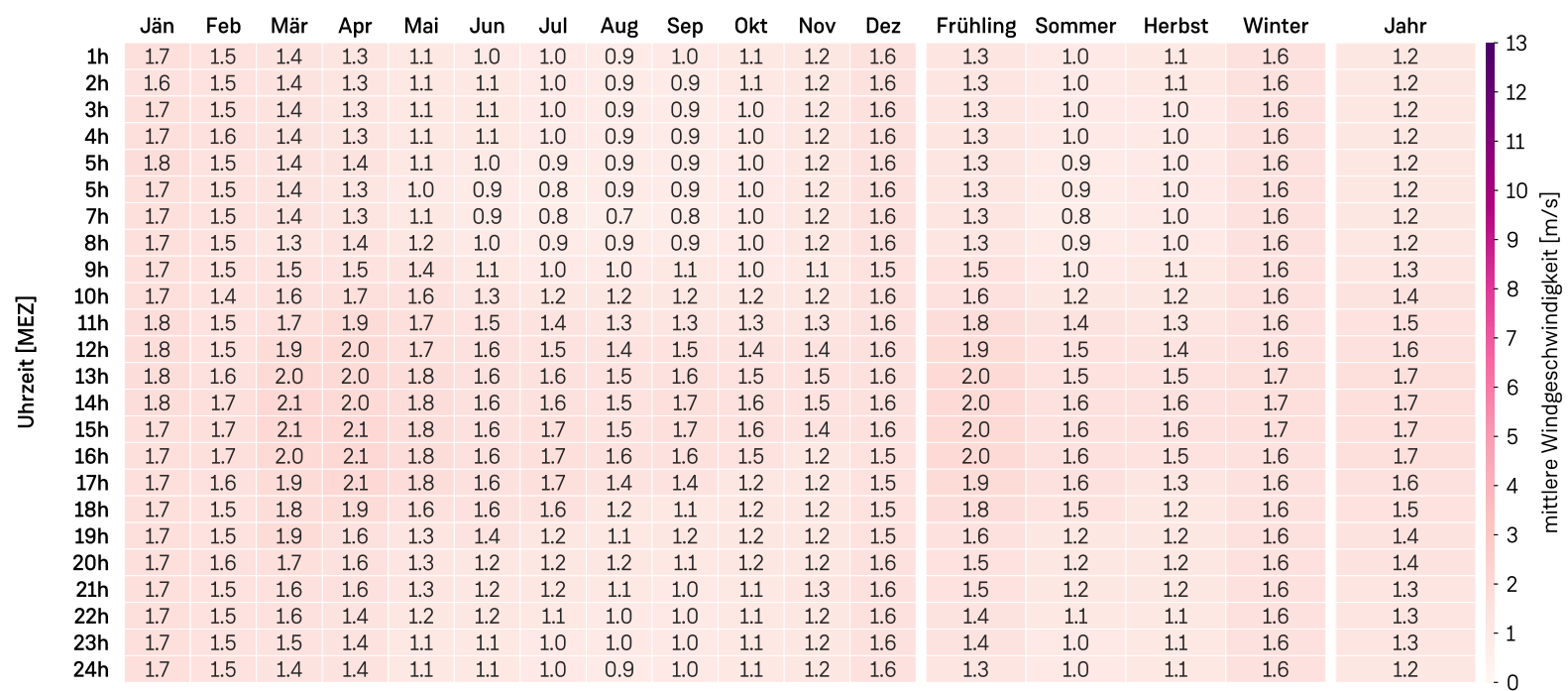
Anhang 10.33: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Neumarkt.



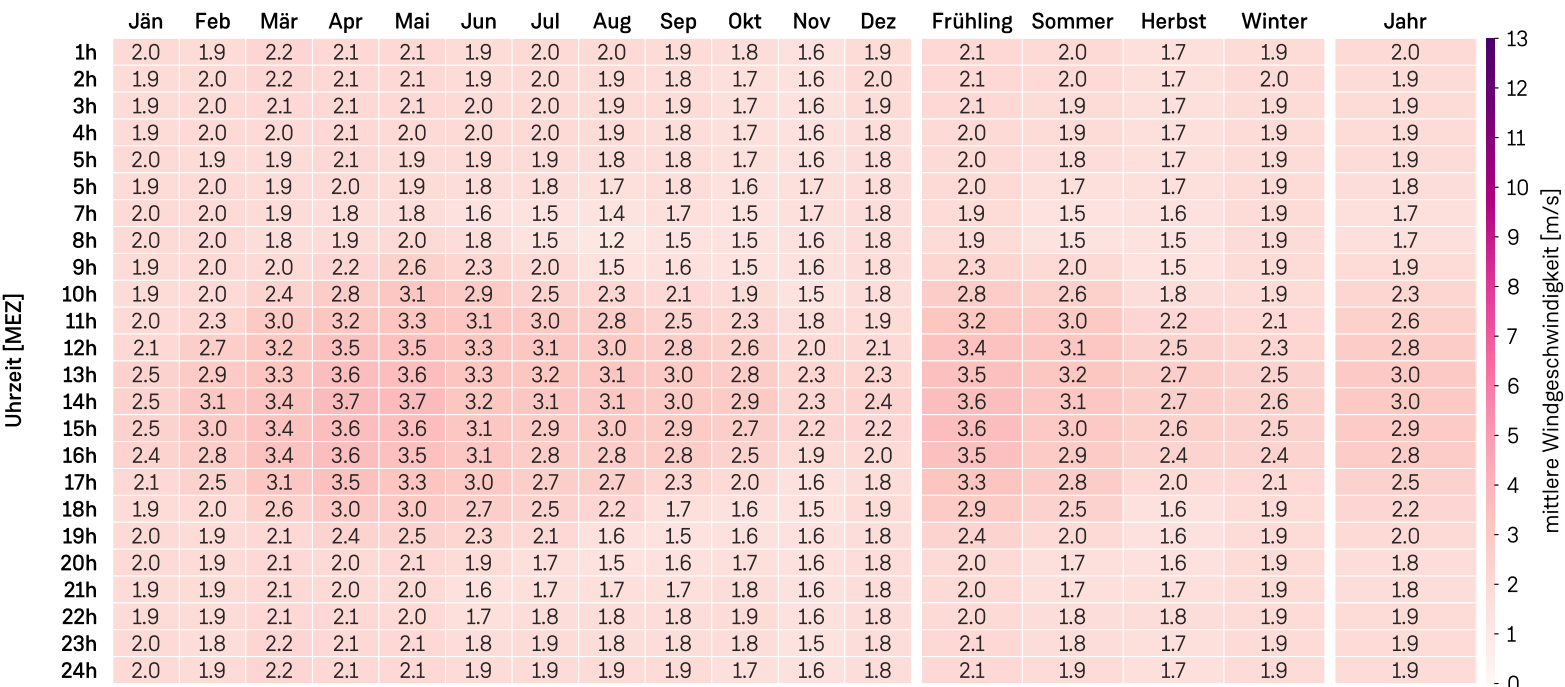
Anhang 10.34: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Oberwölz.



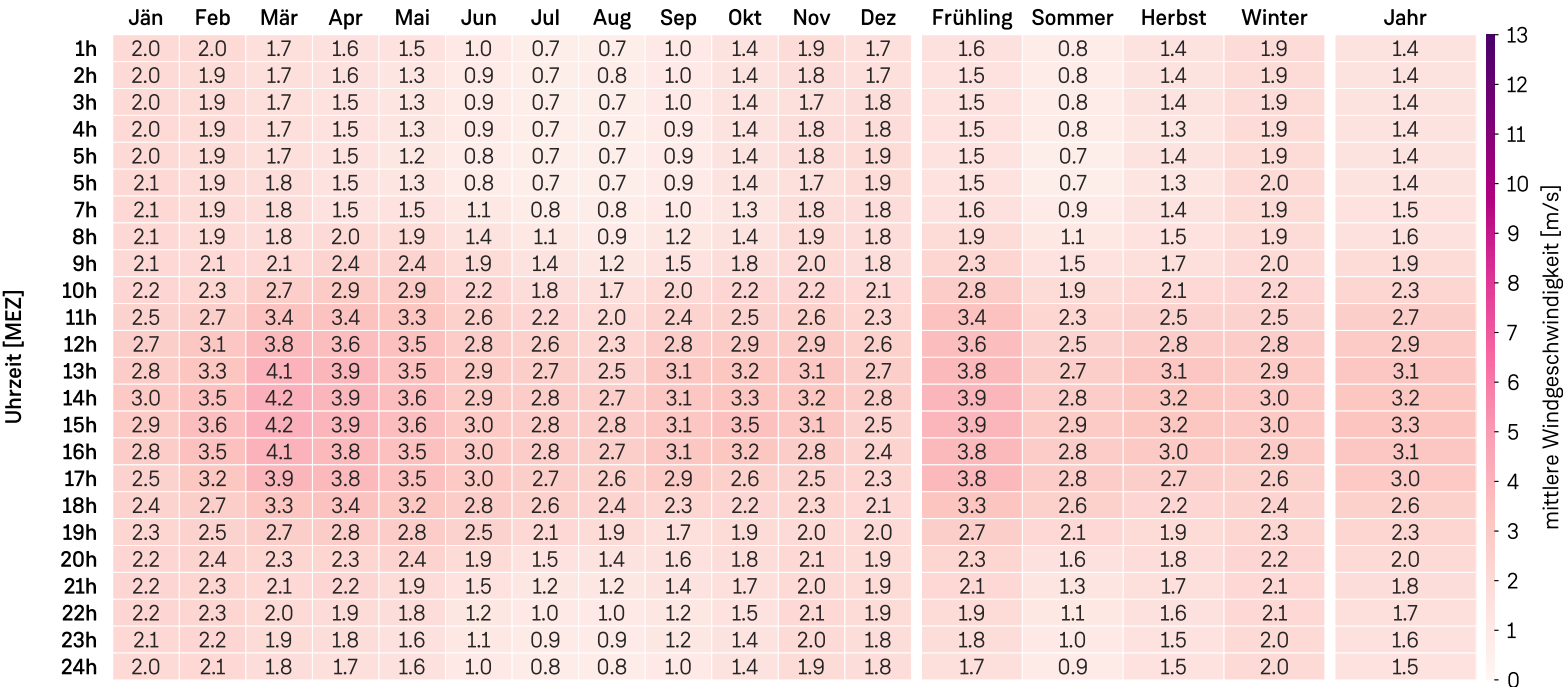
Anhang 10.35: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Präbichl.



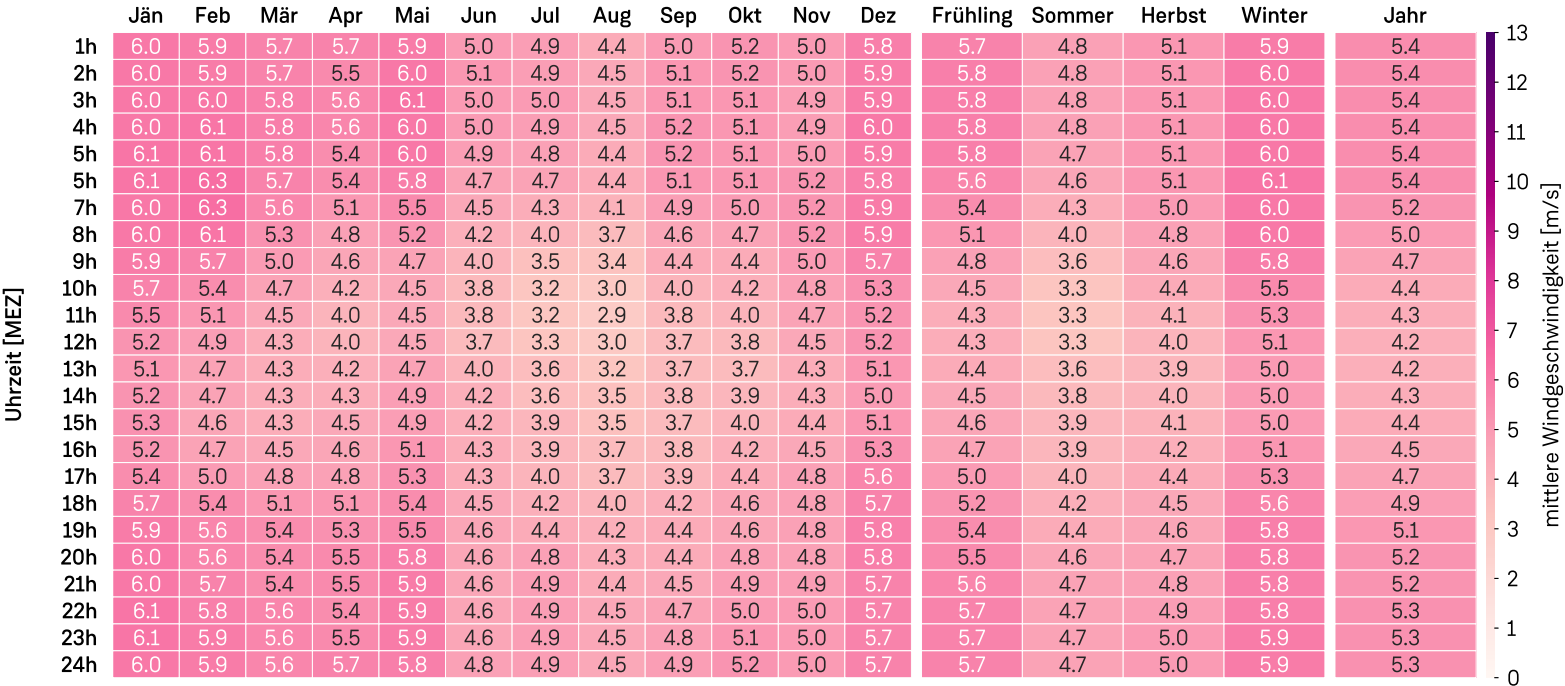
Anhang 10.36: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Ramsau am Dachstein.



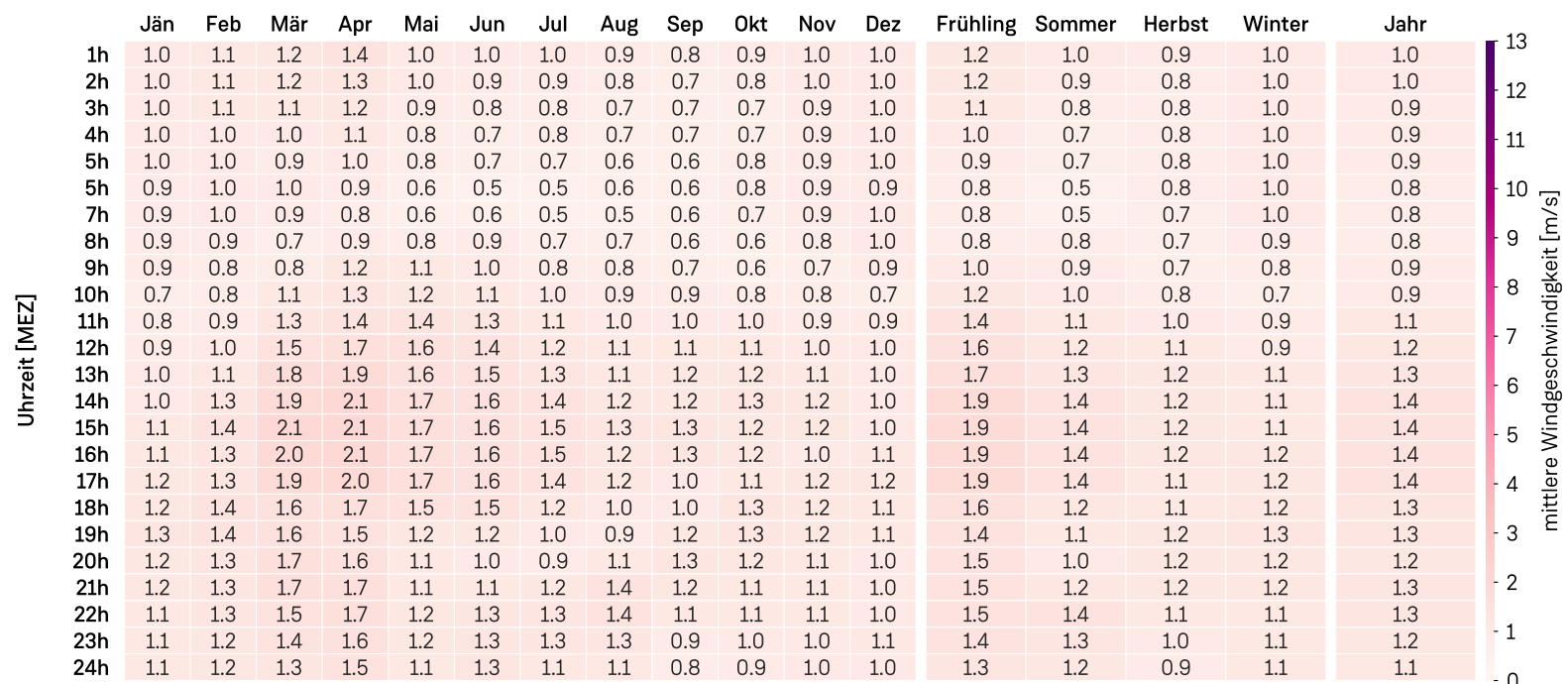
Anhang 10.37: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Rohrbach - Eichberg.



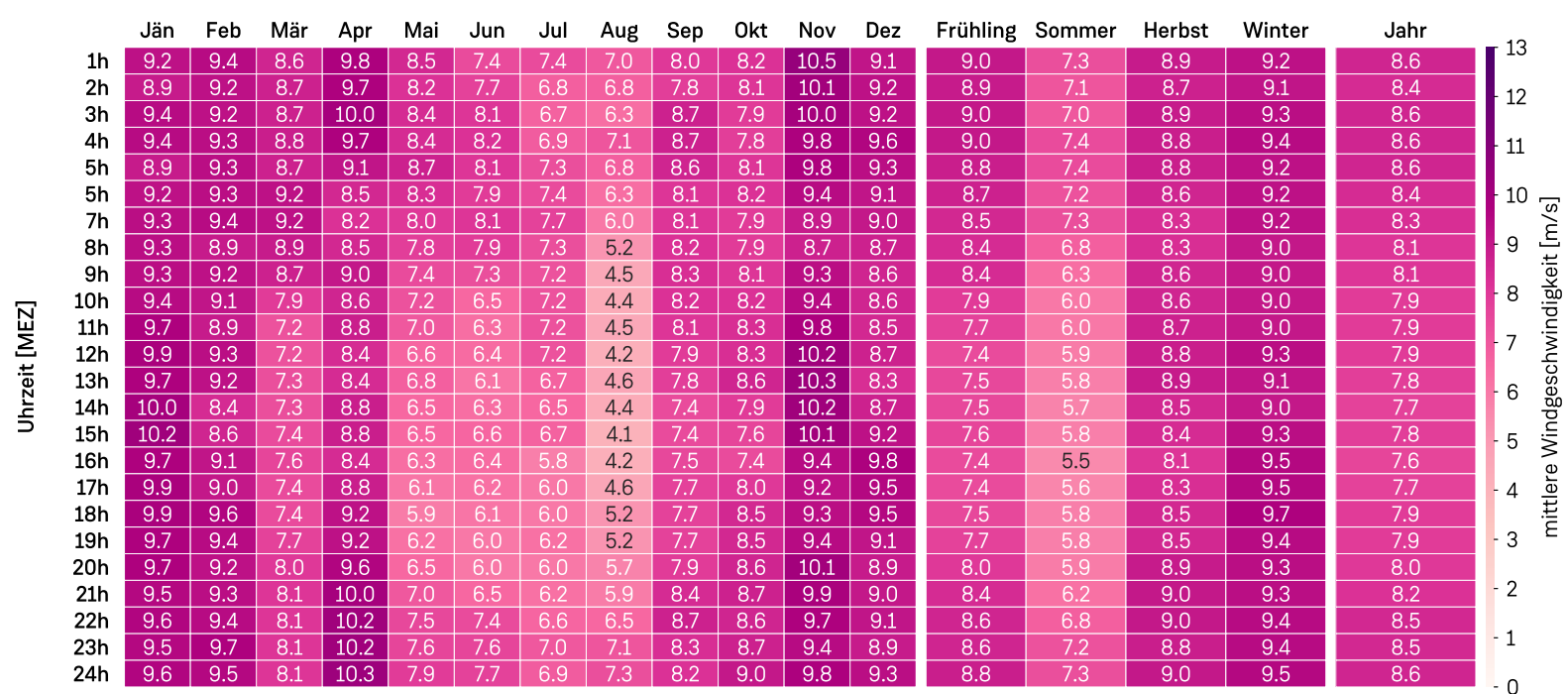
Anhang 10.38: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Rottenmann.



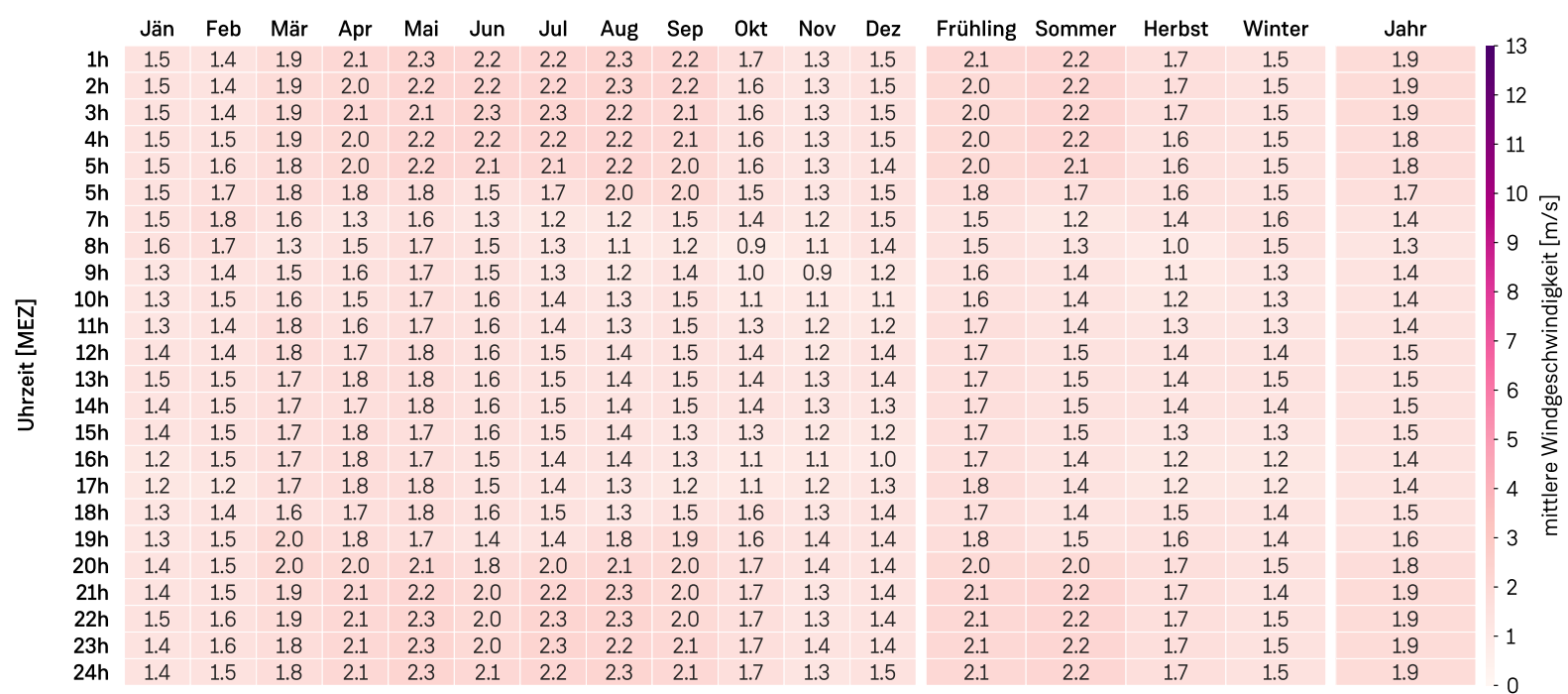
Anhang 10.39: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Schöckl.



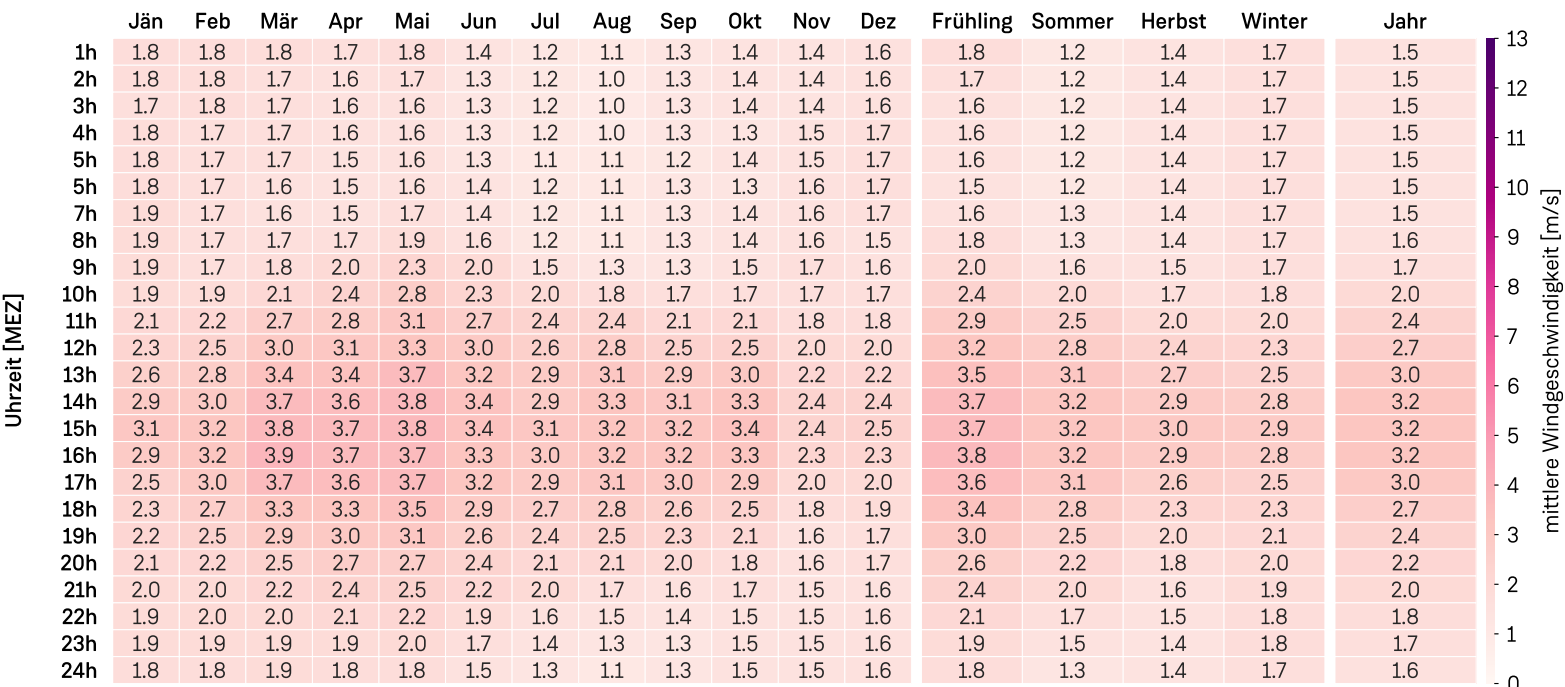
Anhang 10.40: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Seckau.



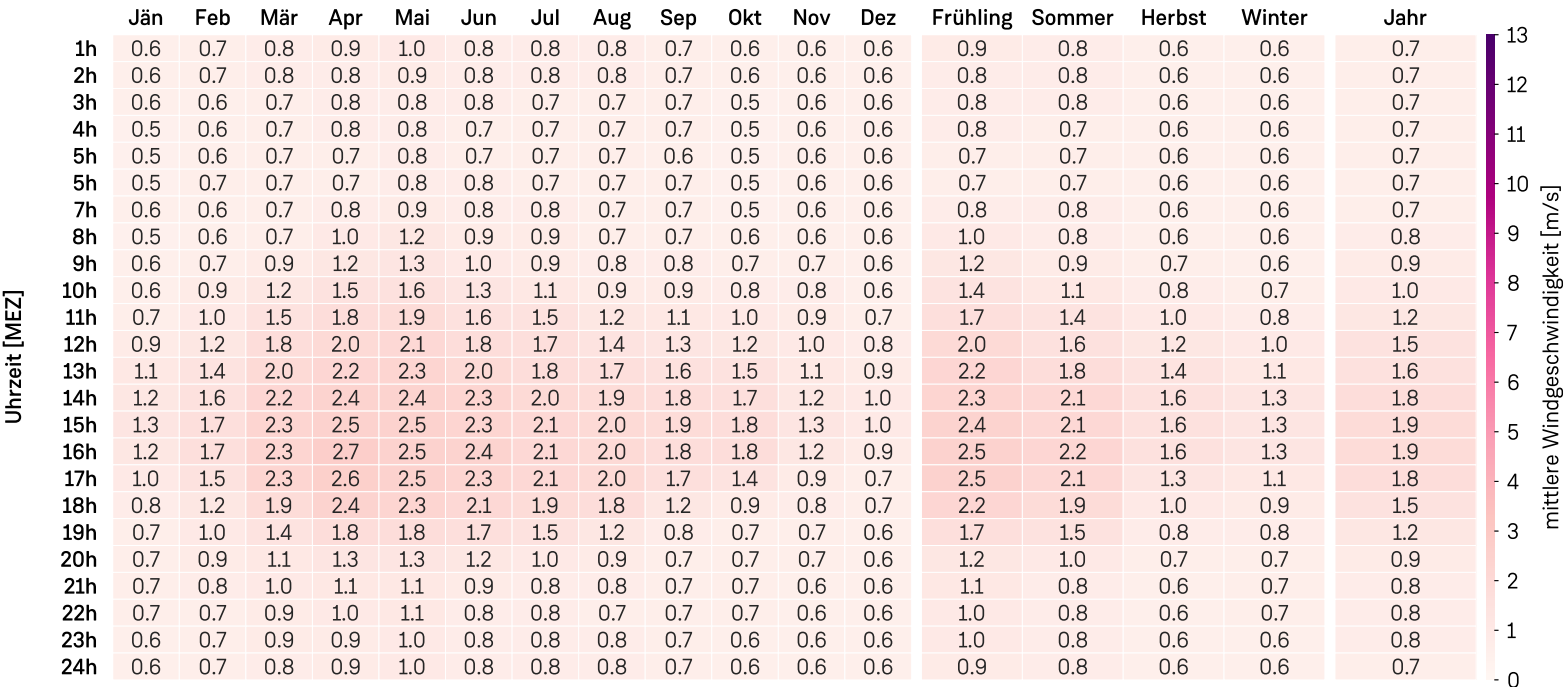
Anhang 10.41: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Sonnblick.



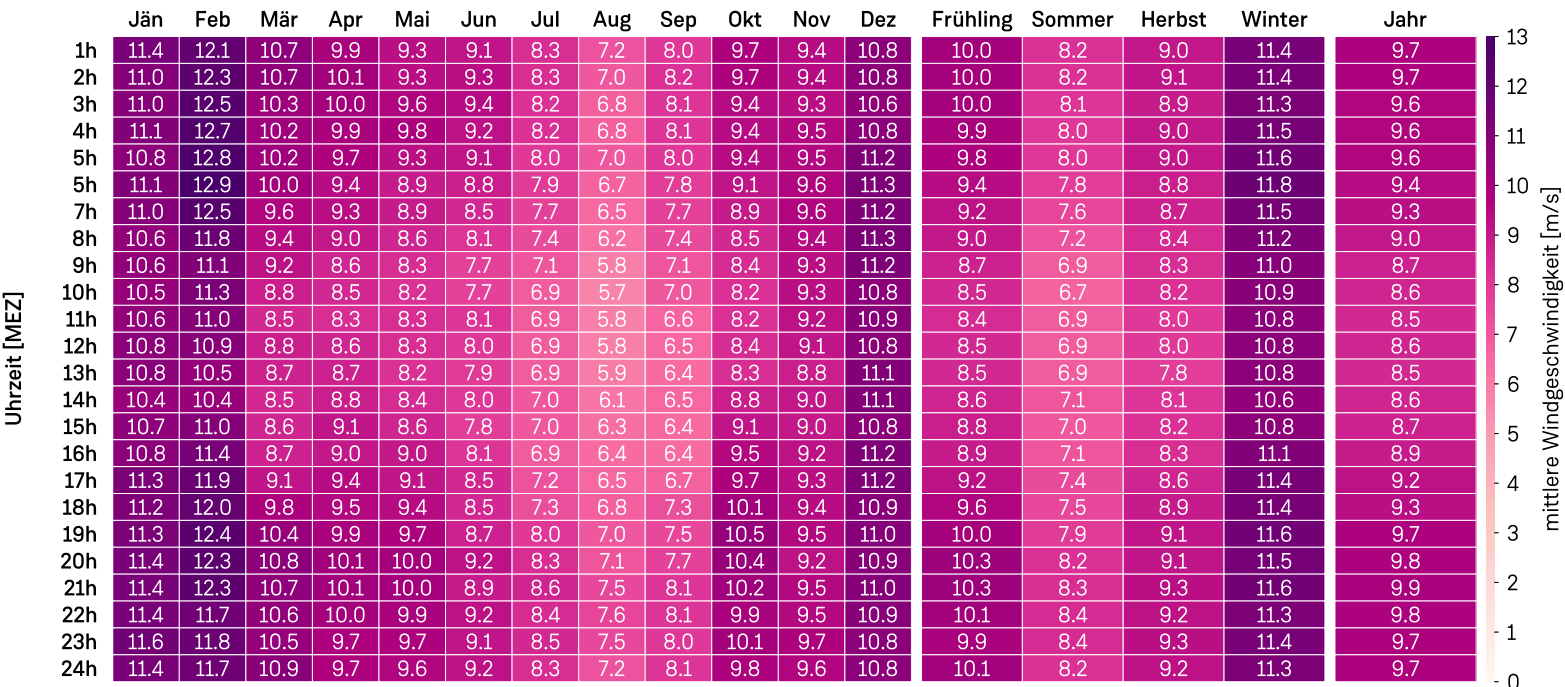
Anhang 10.42: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station St. Radegund.



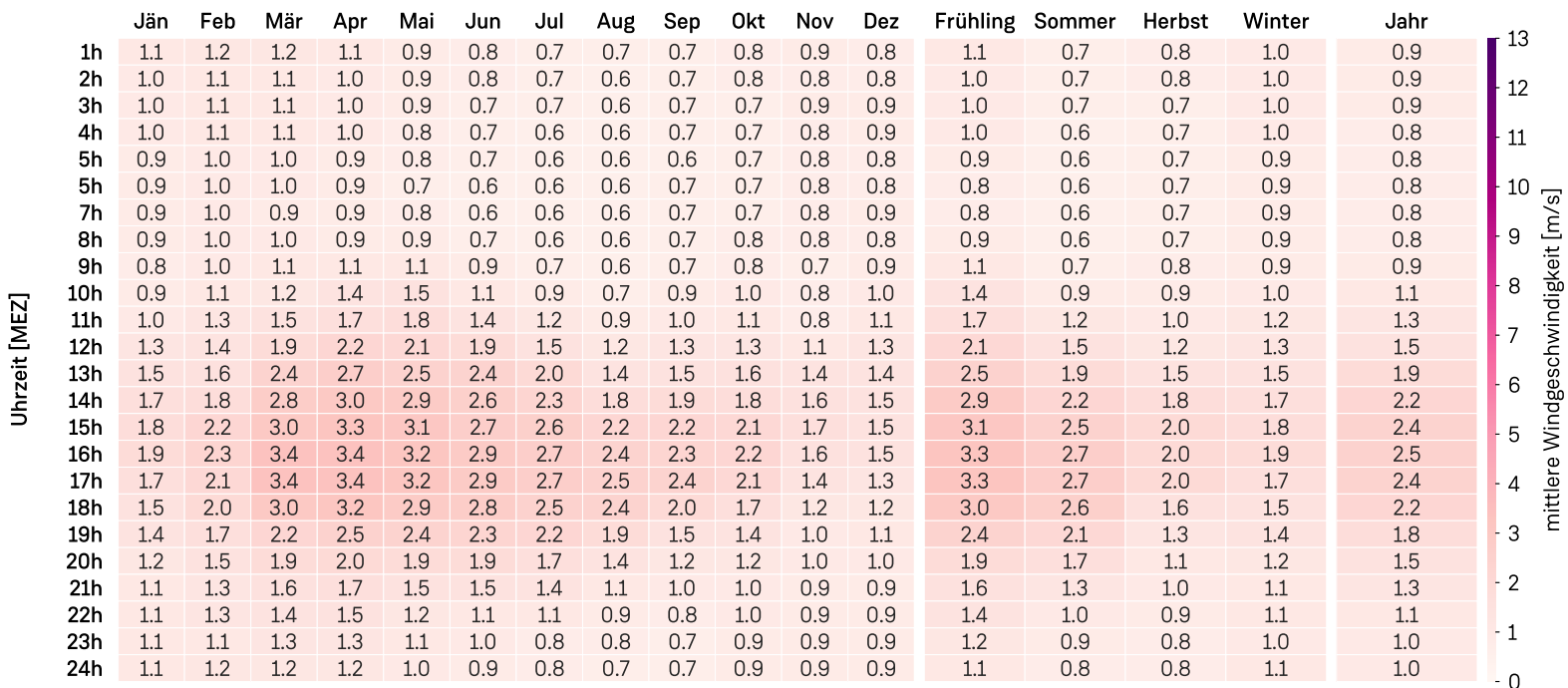
Anhang 10.43: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Stolzalpe.



Anhang 10.44: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Wagna - Leibnitz.



Anhang 10.45: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Wetterkoglerhaus.



Anhang 10.46: Tages- und Jahresgänge der mittleren Windgeschwindigkeiten [m/s] über eine zehnjährige Messperiode (2012 – 2021) für die Station Zeltweg.

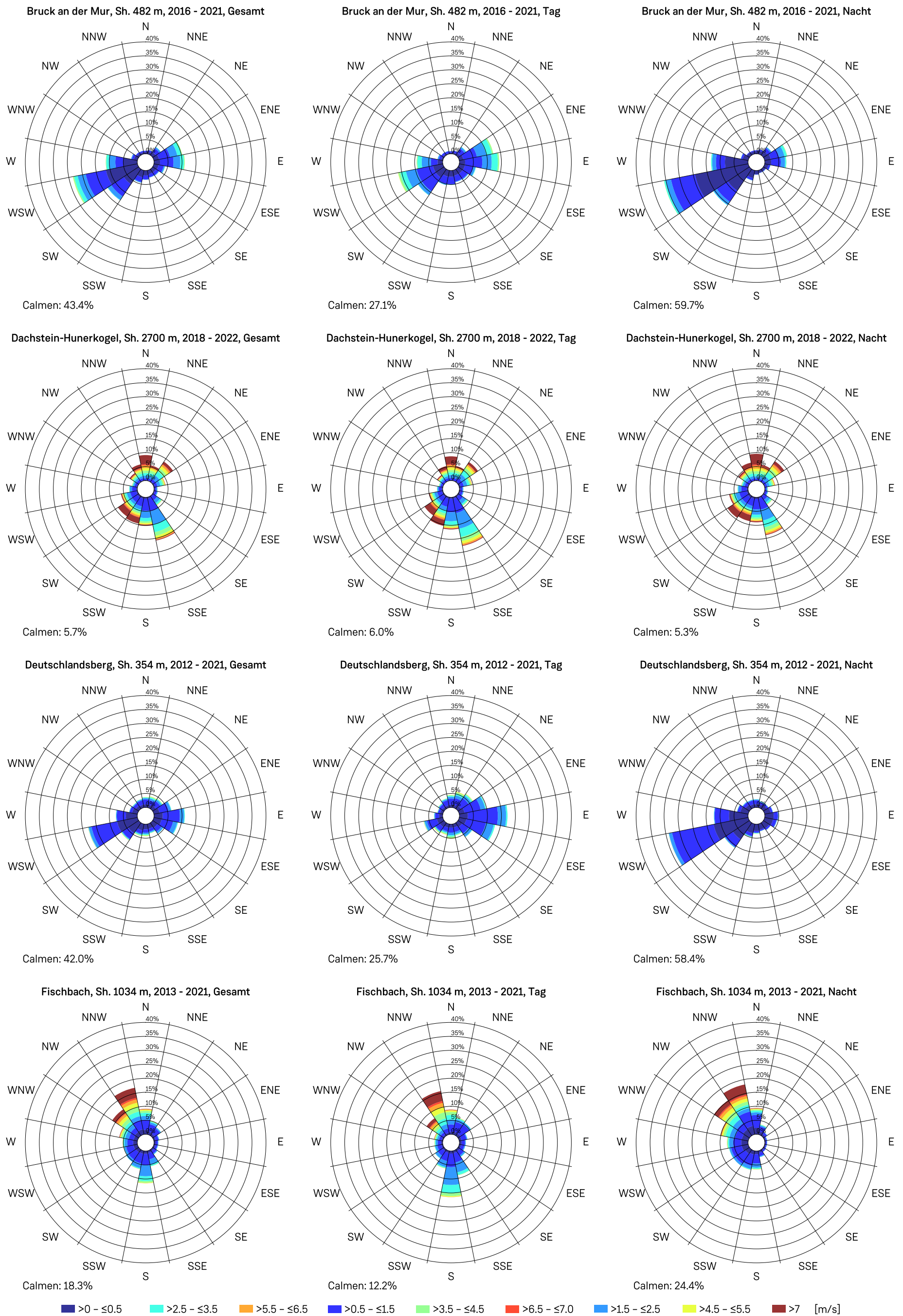


Abbildung 10.47: Mittlere Windrichtungsverteilung nach Geschwindigkeitsklassen [m/s] sowie Kalmenanteile an ausgewählten Stationen.

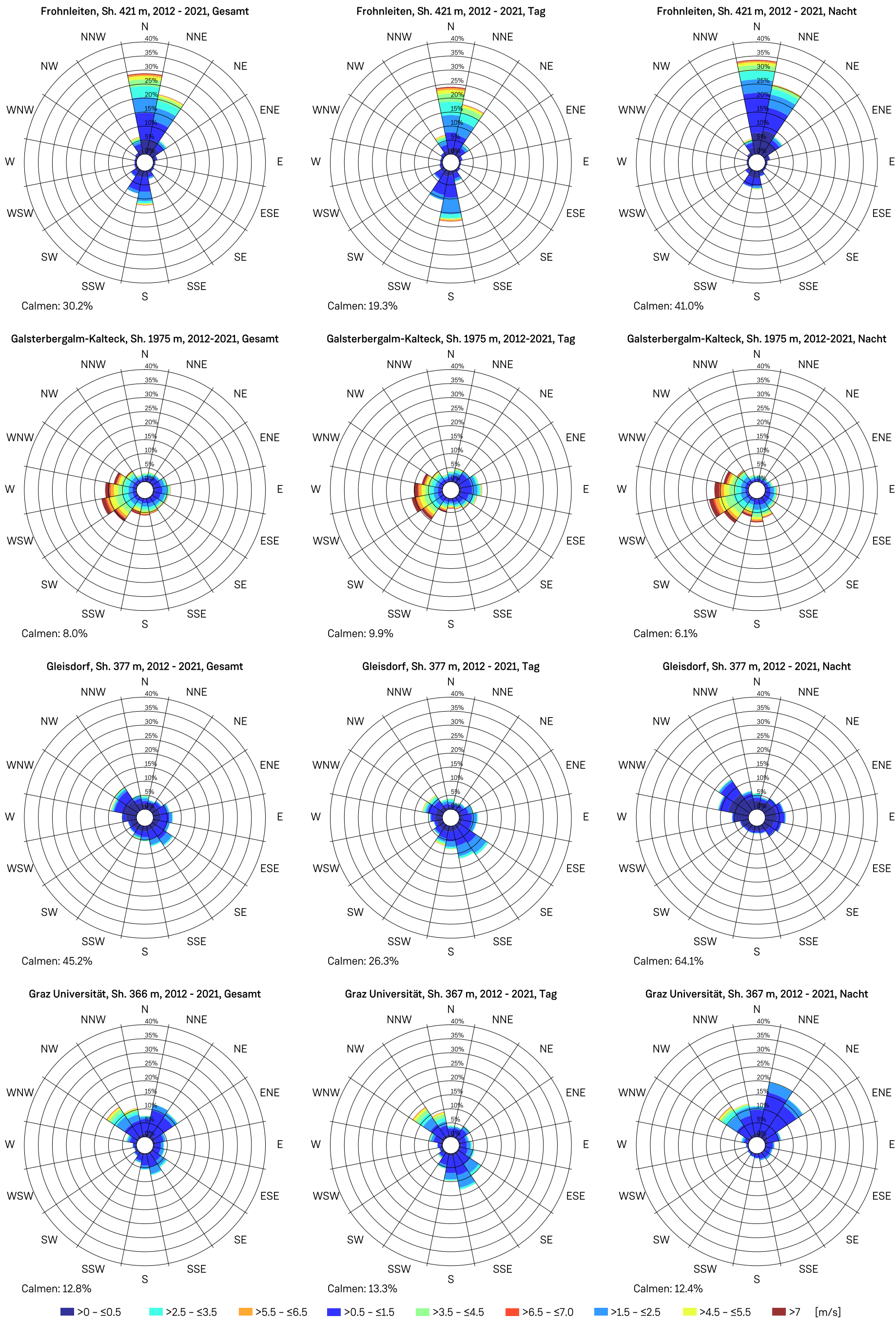


Abbildung 10.48: Mittlere Windrichtungsverteilung nach Geschwindigkeitsklassen [m/s] sowie Kalmenanteile an ausgewählten Stationen.

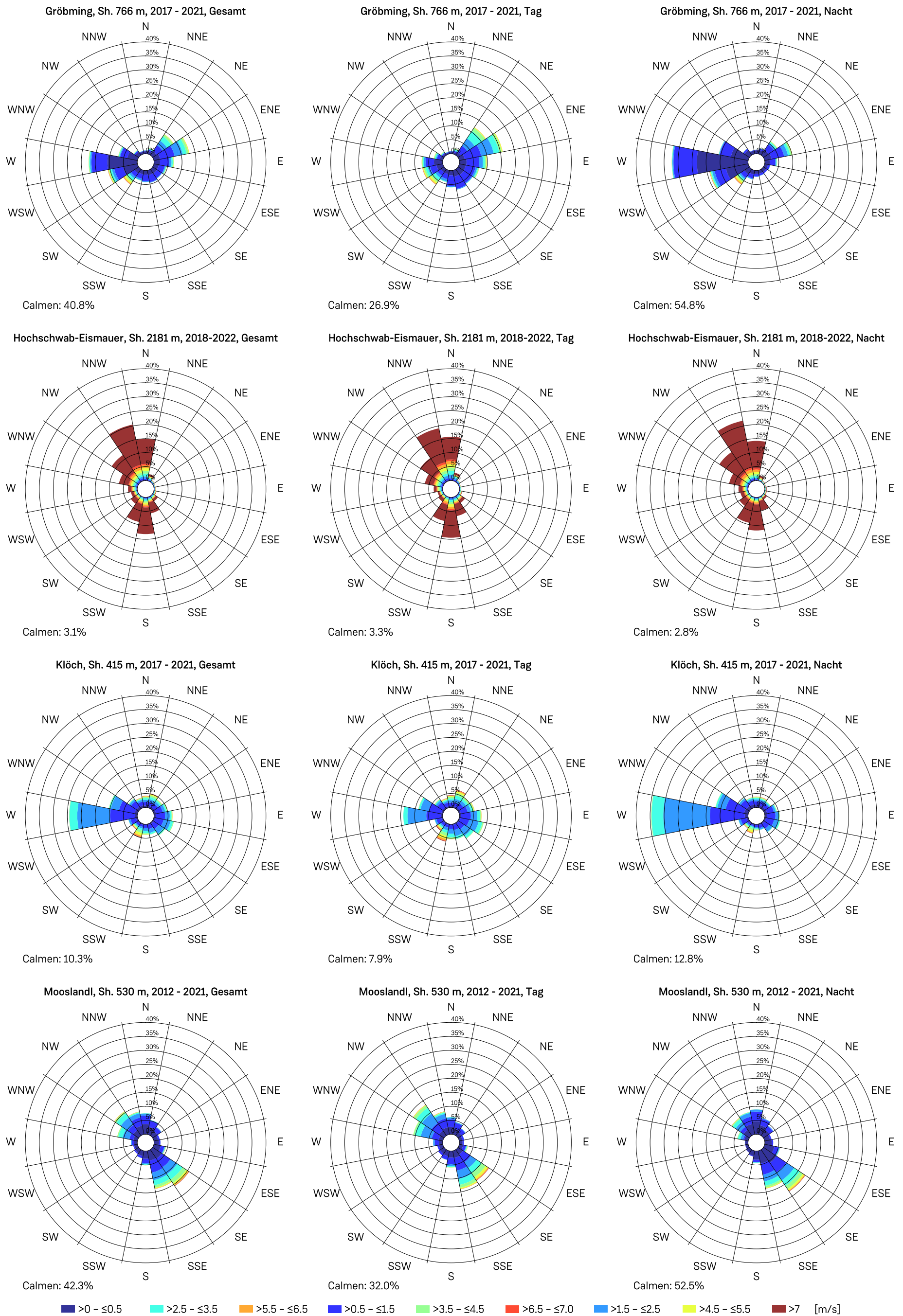


Abbildung 10.49: Mittlere Windrichtungsverteilung nach Geschwindigkeitsklassen [m/s] sowie Kalmenanteile an ausgewählten Stationen.

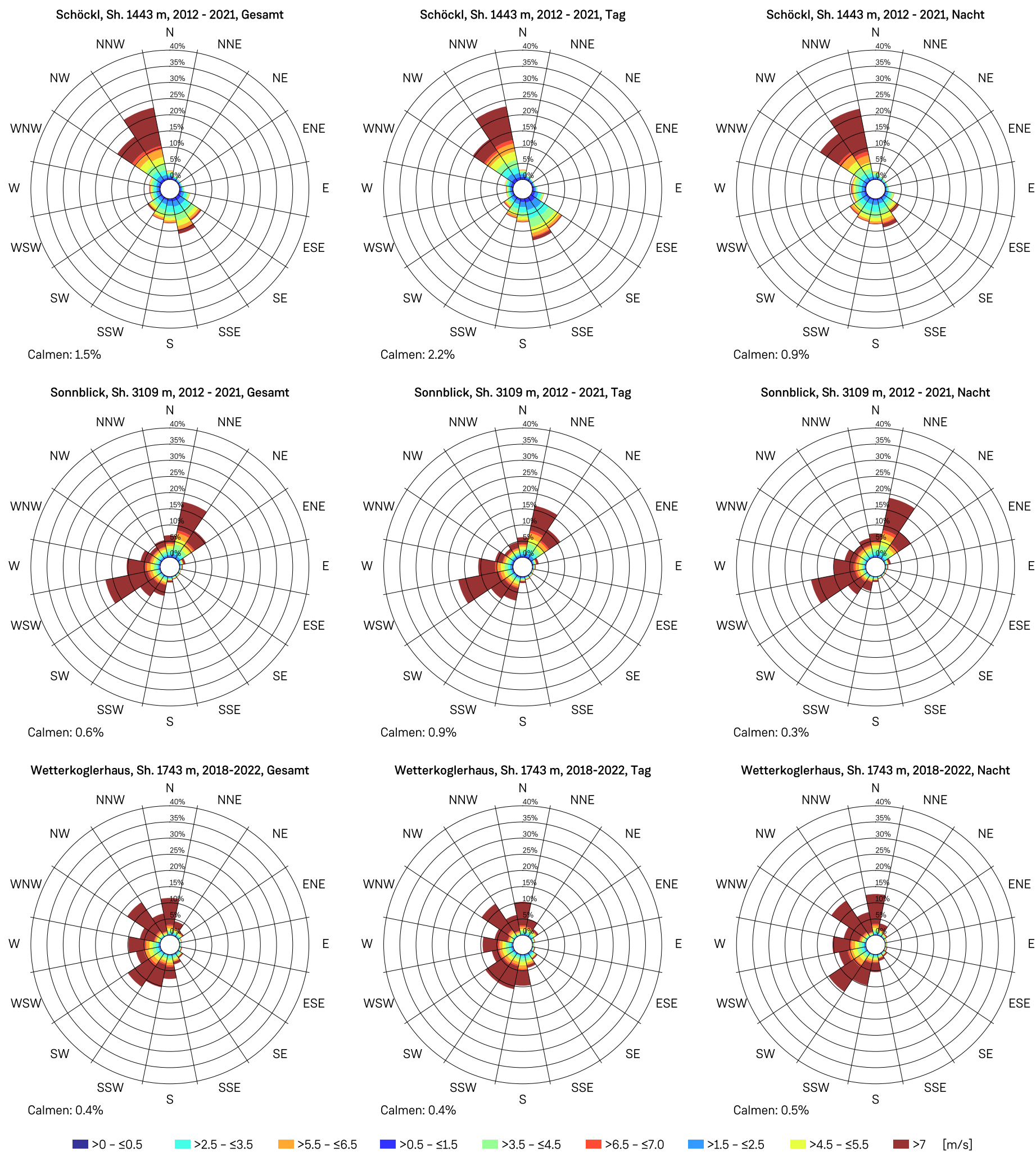


Abbildung 10.50: Mittlere Windrichtungsverteilung nach Geschwindigkeitsklassen [m/s] sowie Kalmenanteile an ausgewählten Stationen.



Klimaatlas **Steiermark** – Klima und Klimawandel 1961 – 2100

Im neuen Klimaatlas Steiermark wurden Veränderungen bestimmter Klimaelemente der Periode 1961 – 1990 mit der aktuellen WMO-Periode 1991 – 2020 ausgewertet und dargestellt. Zusätzlich wurden für jene Klimaelemente, für die es aus derzeitiger Sicht wissenschaftlich sinnvoll erschien, auch zukünftige Klimaausprägungen des 21. Jahrhunderts in Abhängigkeit unterschiedlicher Emissionsszenarien berechnet und dargestellt. Die räumliche Verteilung von vielen

Klimaelementen erfolgte mit einem hochaufgelösten Rasterdatensatz unter Zuhilfenahme aufwändiger Interpolationsverfahren. In der vorliegenden Druckform bietet das Werk insgesamt mehr als 260 Karten sowie über 400 Einzelabbildungen und Tabellen. Ergänzend dazu stehen in begleitenden Fachtexten umfangreiche Informationen über eine Vielzahl von meteorologischen und klimatologischen Details mit Bezug auf das Land Steiermark zur Verfügung.

