

Auswertung des TEMPIS-Hangprofils Innsbruck für das Jahr 2020

Durchführung
Kundenservice Tirol und Vorarlberg

Erstellt von
Dr. Susanne Drechsel
und
Dr. Johannes Vergeiner

April 2021

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Stationen des Innsbrucker Hangprofils	3
3	Datenverfügbarkeit und -qualität im Jahr 2020	5
4	Auswertung der Temperatur im Jahr 2020	5
4.1	Monats- und Jahresmitteltemperatur	6
4.2	Temperaturprofile	7
4.3	Stabilität	9
4.4	Inversionen	12
4.5	Einfluss der städtischen Wärmeinsel auf die Stabilitätsauswertung	18
4.6	Einordnung in die Innsbrucker TEMPIS-Reihe seit 1999	20
5	Auswertung der Feuchte	22
6	Auswertung des Windes	24
6.1	Windrichtung	24
6.2	Windgeschwindigkeiten: 10 Minuten Mittelwind	25
6.3	Windgeschwindigkeiten: 2 Sekunden Böen	27
6.4	Kalmen	28
7	Fazit	30

1 Einleitung

Die Auswertung des TEMPIS Hangprofils für das Jahr 2020 liefert nun bereits den fünften Jahresüberblick über die Temperatur- und Feuchteverteilung der Innsbrucker Talatmosphäre und die Windverhältnisse im Inntal. Neben den bekannten Stabilitäts- und Inversionsanalysen beinhaltet der vorliegende Bericht eine Zeitreihe des Inversionsgeschehens in der Innsbrucker Talatmosphäre des Jahres 2020 (in Abschnitt 4.4). Darüber hinaus konnte das aktuelle Jahr in den Kontext der mittleren Inversionshäufigkeit und –stärke der Gesamtmessreihe 1999 – 2020 gestellt werden. Diese lange Messreihe erlaubt außerdem eine nähere Untersuchung des städtischen Wärmeinseleffekts im Hinblick auf tages- und jahreszeitliche Entwicklungen sowie den Zusammenhang mit Stabilität und Windverhältnissen (Abschnitt 4.5).

2 Stationen des Innsbrucker Hangprofils

Bei den Stationen gibt es keine Veränderungen zu den vergangenen vier Jahren bzw. Berichten. Die wichtigsten Informationen zu den jeweiligen Standorten sind kurz in diesem Kapitel zusammengefasst, weitere Details sind im Appendix im Abschnitt A1 zu finden.

Wie bisher werden für das Innsbrucker Hangprofil die Stationen des TEMPeratur-Information-Systems (TEMPIS) verwendet, die über das Stadtgebiet und in verschiedenen Höhenlagen der Nordkette verteilt sind: Hauptbahnhof (HBF), Olympisches Dorf (ODO), Alpenzoo (ALP), Hungerburg (HBG), Rastlboden (RAS) und Höttinger Alm (HOE). Das Hangprofil wird ergänzt durch die teilautomatischen Stationen (TAWES) der ZAMG am Flughafen (FLH) und auf dem Patscherkofel (PAK), sowie der in Kooperation mit dem Institut für Atmosphäre und Cryosphäre betriebenen Station Universität (UNI). Abbildungen A1 bis A6 im Appendix zeigen die einzelnen Stationen in ihrer Umgebung.

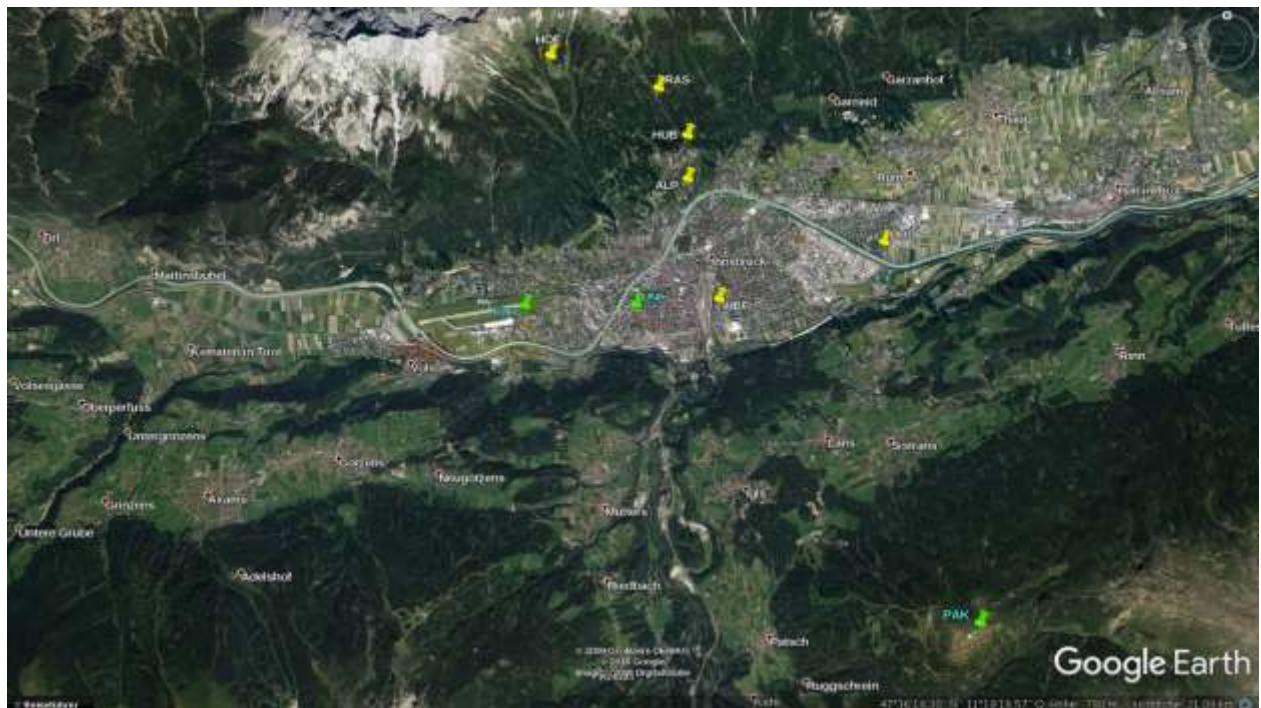


Abbildung 1: Satellitenfoto mit den Standorten der Tempis-Stationen (gelb) und zusätzlich der TAWES der ZAMG (grün) im Bereich Innsbruck, der Nordkette und auf dem Patscherkofel (Quelle: Google Earth).

Abbildung 1 zeigt die Standorte im GoogleEarth Orthofoto, in Tabelle 1 sind Informationen zu den Koordinaten und der Instrumentierung aufgelistet. Temperatur und Feuchte werden an allen Stationen erfasst, an einigen wird zudem der Wind gemessen.

Name	Kürzel	geogr. Länge (WGS 84)	geogr. Breite (WGS 84)	Höhe ü.d. Meer (m)	Höhe ü. Grund (m)	MAST (m)	T	rh	Wind
Hauptbahnhof	HBF	11,405103	47,260656	611	25	6	ja	ja	ja
Olympisches Dorf	ODO	11.446341	47.270121	635	65	6	ja	ja	ja
Alpenzoo	ALP	11.397504	47.280986	665	3	3	ja	ja	nein
Hungerburg	HBG	11.397366	47.287872	907	11,5	0	ja	ja	nein
Rastlboden	RAB	11.390418	47.295204	1208	6,5	0	ja	ja	nein
Höttinger Alm	HOE	11,364569	47,299844	1566	3	3	ja	ja	nein
Flughafen	FLH	11.352065 11.356537	47.257720 47.259953	578	25 2	2	ja	ja	ja
Innsbruck Uni	UNI	11.385245 11.384243	47.264209 47.259850	578	47 2	2	ja	ja	ja
Patscherkofel	PAK	11.461691 11.462274	47.208718 47.208823	2248	28 2	2	ja	ja	ja

Tabelle 1: In den ersten fünf Spalten sind Name, Kürzel, Länge, Breite und Seehöhe (m ü.N.N.) der TEMPIS-Stationen (schwarz) und der in der Auswertung verwendeten TAWES (grau) angegeben. In der sechsten Spalte steht die Höhe der Messung über Grund. Bei den TAWES gibt es jeweils zwei Koordinatenangaben. Der erste Wert bezieht sich auf die Windmessung, der zweite auf Temperatur und Feuchte. In der siebten Spalte wird die Masthöhe angeführt. In den letzten drei Spalten wird festgehalten, ob Temperatur (T), relative Feuchte (rh) und Wind gemessen werden.

Mit Hilfe der TEMPIS-Stationen lassen sich unter anderem vertikale Profile von Temperatur und Feuchte erstellen. Dabei gilt es zu beachten, dass sich die Stationen alle auf den nach Süden exponierten Hängen der Nordkette befinden. Sie bilden nicht die sogenannte „freie Atmosphäre“ ab, sondern sind Strahlungseinflüssen und den daraus resultierenden Hangwinden ausgesetzt, was wiederum die Temperatur beeinflusst. Auf dem Patscherkofel ist der Einfluss der Topographie auf Temperatur, Feuchte und Wind nur mehr gering. Die Station kommt somit der „freien Atmosphäre“ am nächsten.

3 Datenverfügbarkeit und -qualität im Jahr 2020

Die Datenverfügbarkeit für das Jahr 2020 beträgt für die meisten Standorte bzw. Parameter 98,6 bis 100 %, wobei die Ausfälle oft nur wenige Stunden dauerten. Einzig an der Station Olympisches Dorf beträgt die Verfügbarkeit der relativen Feuchte „nur“ rund 95 %. Über einen Zeitraum von gut zwei Wochen wurden aufgrund eines defekten Kabels von Mitte Juni bis Anfang Juli keine Feuchtwerte aufgezeichnet.

An allen Stationen werden die gemessenen Parameter in 10-Minuten Intervallen abgespeichert. Sie stellen jeweils den Mittelwert über die vergangenen 10 Minuten dar, bzw. bei den Windböen den höchsten 2-Sekunden Wert. Temperatur und Feuchte werden überall gemessen, Windgeschwindigkeit und -richtung an den Stationen FLH, UNI, HBF, ODO und PAK.

Was die Datenqualität betrifft, so werden sowohl die TAWES als auch die TEMPIS-Stationen bezüglich Auffälligkeiten automatisiert überwacht. Bei Ausfällen, Über- bzw. Unterschreitung bestimmter Grenzwerte kommt es zu einer Kontrolle und gegebenenfalls zur Reparatur oder einem Tausch des betroffenen Sensors.

Mit Ausnahme der Übertragung der Feuchtwerte beim ODO ist im Jahr 2020 ein Defekt bei der Belüftung der Station RAB zwischen 14. und 24. September nennenswert. Besonders tagsüber bei starker Einstrahlung und windschwachen Verhältnissen waren die Temperaturen zu hoch. Die Auswertungen aus diesem Zeitraum sind daher in den betroffenen Schichten (von der HBG, bzw. bis zur HOE) mit einer gewissen Vorsicht zu genießen.

4 Auswertung der Temperatur im Jahr 2020

Für die Auswertung ist eine Mindestverfügbarkeit von 80 % an 10-Minuten Daten im betrachteten Zeitintervall gefordert. Diese Voraussetzung wurde im Jahr 2020 an allen Stationen und in allen Monaten erfüllt.

4.1 Monats- und Jahresmitteltemperatur

Tabelle 2 zeigt die Monats- und Jahresmittel der Temperatur an allen betrachteten Stationen im Jahr 2020. In Innsbruck war das Jahr 2020 das fünftwärmste seit Beginn der Aufzeichnungen 1877, wärmer waren nur die Jahre 2014, 2015, 2018 und 2019. Im Stadtgebiet bis zur Höhe Alpenzoo lag die Jahresmitteltemperatur bei 10,6 °C und nahm bis zum Patscherkofel hinauf auf 1,8 °C ab (siehe Tabelle 2). Damit fiel 2020 in den Schichten unterhalb der Hungerburg um 0,1 bis 0,3 °C kühler aus als 2019, oberhalb davon um den gleichen Betrag wärmer, am Patscherkofel sogar um 0,5 °C. Damit war es auf dem PAK bezogen auf die (hier verwendeten) hochaufgelösten Daten das wärmste Jahr der Messgeschichte.

NAME	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
FLH	-0,3	3,7	5,8	12,1	13,5	16,5	19,1	19,1	15,7	8,8	3,9	0,6	9,9
UNI	0,6	4,5	6,5	13,1	14,1	17,2	19,8	19,7	16,3	9,4	4,7	1,3	10,6
HBF	1,3	4,7	6,2	13,0	13,8	16,9	19,6	19,6	16,2	9,5	5,3	1,5	10,6
ODO	1,1	4,4	5,9	12,7	13,3	16,5	19,2	19,2	15,9	9,4	5,3	1,5	10,4
ALP	1,3	4,5	6,3	13,1	13,5	16,5	19,1	19,2	15,8	9,5	5,4	1,7	10,5
HBG	1,8	3,5	4,4	11,2	11,5	14,5	17,1	17,3	14,0	8,1	5,2	1,5	9,2
RAB	2,3	2,4	2,6	9,5	9,6	12,7	15,4	15,8	12,7	6,7	5,4	1,1	8,0
HOE	1,9	0,8	0,6	7,4	7,4	10,6	13,6	14,3	11,1	4,8	5,0	-0,5	6,4
PAK	-2,6	-4,0	-4,7	2,0	2,7	5,9	9,2	9,7	6,8	0,4	1,5	-4,8	1,8

Tabelle 2: Monats- und Jahresmittel der Temperatur in °C aus den 10-Minuten Daten der Messstationen (von oben nach unten der Höhe entsprechend sortiert) im Jahr 2020. Sind im betrachteten Mittelungszeitraum weniger als 80 % an Daten verfügbar, wurde kein Mittel berechnet (NA). Die Farbcodierung in „blau= kalt“ und „rot=warm“ soll eine schnelle Einordnung erleichtern.

Der Jänner war bezogen auf das Klimamittel 1981-2010 deutlich überdurchschnittlich temperiert (vergleiche Tabelle 3) und unterhalb des PAK fast überall im Durchschnitt frostfrei, nur am FLH lag das Mittel knapp unter 0 °C. Dennoch war es zumindest im Talniveau der kälteste Monat, ab der HBG aufwärts kam dem Dezember diese Rolle zu. Auch die meisten anderen Monate fielen überdurchschnittlich warm aus, am stärksten war die Abweichung im April, auf dem Patscherkofel auch im November. Nur der Mai entsprach in etwa dem langjährigen Klimamittel, der Oktober war im Talniveau leicht, auf dem Patscherkofel deutlich darunter. Wie man Tabelle 2 entnehmen kann, war es bei auffallend ähnlichen Werten in den Monaten Juli und August mit knapp 20 °C in der Stadt am wärmsten – insgesamt aber deutlich weniger heiß als der Rekordmonat des Vorjahres Juni, welcher (zusammen mit dem Juni 2003) mit knapp 22 °C in der Stadt der heißeste Monat der Messgeschichte seit 1877 war.

Abweichungen vom Klimamittel 1981 - 2010													
NAME	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
UNI	2,1	3,8	1,0	3,4	-0,2	0,2	0,9	1,5	2,0	-0,5	1,4	1,1	1,4
PAK	2,7	2,9	0,3	4,4	0,0	0,2	0,8	1,3	1,7	-2,2	4,5	1,0	1,5

Tabelle 3: Temperaturabweichungen in °C in den einzelnen Monaten und im Jahr 2020 vom Klimamittel 1981 – 2010. Quelle: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring/>

Der Temperaturunterschied von 0,7 °C zwischen den beiden gleich hoch gelegenen Stationen FLH und UNI war ähnlich wie in den Vorjahren. Er rührt vom Stadteffekt her und ist nicht nur im Jahresmittel, sondern auch in allen einzelnen Monaten vorhanden. Weitere Details zum Stadteffekt sind in Abschnitt 4.5 zu finden.

4.2 Temperaturprofile

Anhand der stündlichen, über das Jahr bzw. die einzelnen Monate gemittelten Temperaturprofile kann man sowohl den tageszeitlichen als auch den jahreszeitlichen Verlauf der Temperaturschichtung zwischen Innsbruck und dem Patscherkofel betrachten. Abbildung 2 zeigt das Jahresmittel, im Appendix sind in Abbildung A7 die Monatsmittel für Jänner, April, August und Dezember 2020 zu sehen. Aus den Temperaturprofilen lassen sich auch Aussagen zur Stabilität in den Schichten zwischen den Stationen ableiten. Grundsätzlich gilt, je steiler (senkrechter) ein Temperaturprofil, desto weniger nimmt die Temperatur mit der Höhe ab (oder sogar zu), umso stabiler ist also die Schicht. Anhand des tageszeitlichen Verlaufs in der Abbildung 2 kann man erkennen, dass die Profile nachts (grüne und blau-violette Linien) generell steiler sind, es ist also stabiler als tagsüber (rote und hellbraune Linien). Der Grund dafür ist, dass der mittlere Tagesgang in den unteren Niveaus (2020 waren es etwa 8 bis 9 Grad an den Stationen UNI, HBF, ODO und ALP) deutlich größer ist als weiter oben¹ (etwa 3 bis 4 Grad am PAK und HOE). Im Bereich der Talsohle bis zum Alpenzoo wird die Abnahme des Tagesganges mit der Höhe von den Effekten der städtischen Wärmeinsel, der Messhöhe über Grund und der Hanglage überdeckt. So ist der etwas geringere Tagesgang an den Stationen HBF und ODO gegenüber UNI und ALP der größeren Messhöhe über Grund (vgl. Tabelle 1) zuzuschreiben.

¹ Da die Luft weniger direkt, sondern vielmehr durch Strahlungsprozesse von darunterliegenden Oberflächen gekühlt bzw. erwärmt wird, sind die Temperaturschwankungen nahe der Oberfläche größer als in der freien Atmosphäre.

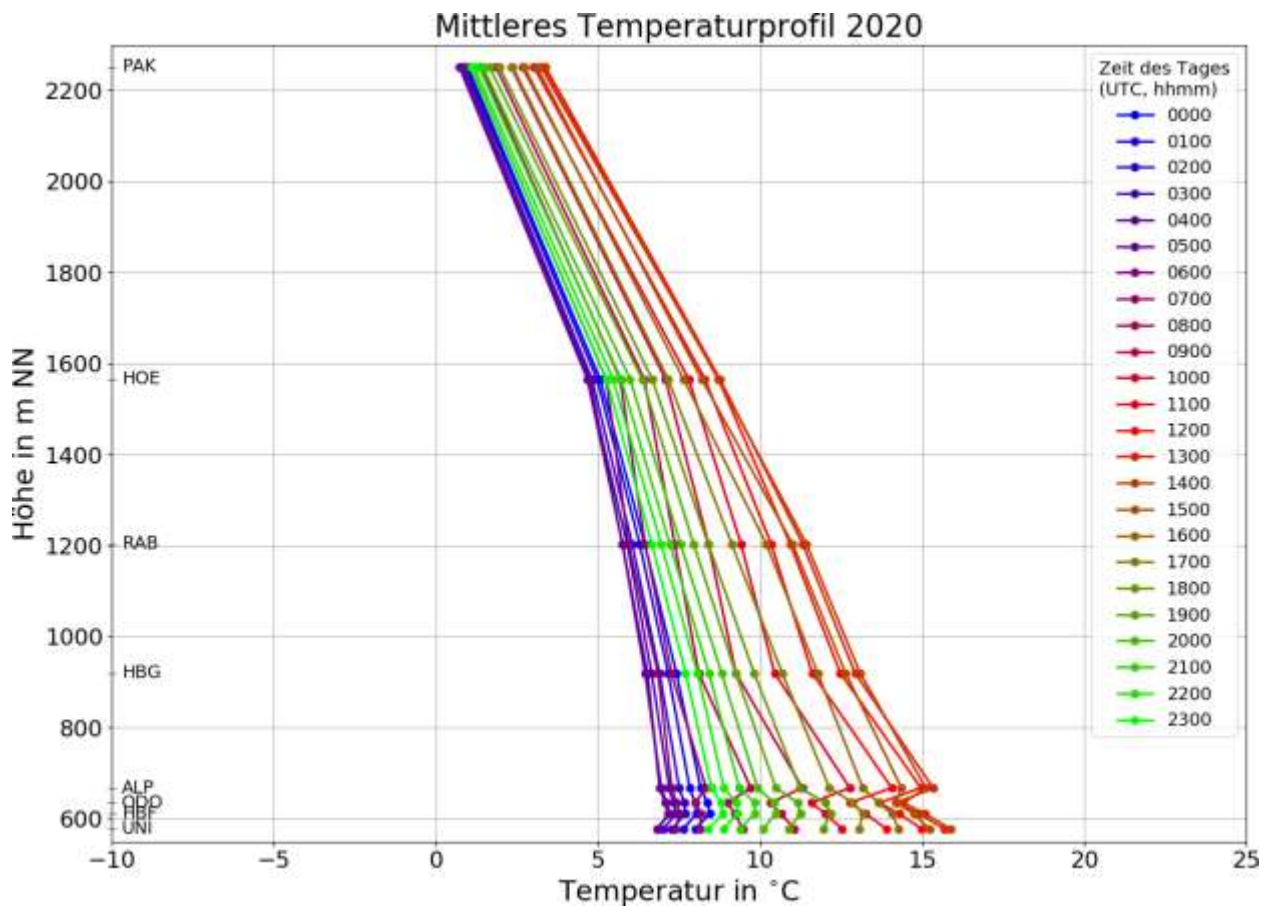


Abbildung 2: Mittlere stündliche Temperaturprofile im Jahresmittel 2020. Zur Umrechnung auf Mitteleuropäische Zeit (MEZ) ist eine Stunde zu addieren, 12:00 Uhr UTC entspricht also beispielsweise 13:00 Uhr MEZ.

Ebenso sind die Profile im Allgemeinen während der kühlen Jahreszeit steiler, da es dann im Durchschnitt stabiler ist. 2020 traf dies besonders auf den Jänner zu, welcher dank milder Hochdrucklagen sowie föhniger Südströmungen überdurchschnittlich sonnig (+30 % im Vergleich zum langjährigen Mittel), warm (+2,1 °C an der UNI und +2,7 °C auf dem PAK) und trocken ausfiel. Nachts konnte sich dabei in der Talsohle kalte Luft sammeln, die aufgrund der Kürze des Tages bei einem sehr niedrigen Sonnenstand nur wenig erwärmt wurde. An der Hungerburg und der Höttinger Alm war die Atmosphäre zu den meisten Tageszeiten gleich warm oder wärmer, was eine sehr stabile Schichtung bedingt. Augenscheinlich war es im April deutlich labiler. Auch dieser Monat war mit Hochdruckwetter stark überdurchschnittlich sonnig (+50 %). Hier sorgte die rasche Ausaperung für starke Tagesgänge im Tal, während es auf den Bergen aufgrund der noch vorhandenen Schneebedeckung deutlich kühler blieb. Im August war es bei ähnlichem Sonnenstand tagsüber nicht ganz so labil. Da die Schneebedeckung in der Höhe nun fehlte, haben sich die höheren Niveaus stärker erwärmt als die Talsohle. Im Dezember fällt vor allem die starke Drängung der Vertikalprofile auf. In allen Höhen war der Tagesgang ausgesprochen gering. Dies ist vor allem der anfangs sehr niederschlagsreichen, dann oft auch bewölkten Witterung zuzuschreiben. Die Schichtung ist dabei recht stabil, bis zum Rastlboden hinauf sogar als annähernd isotherm zu bezeichnen.

4.3 Stabilität

Die vertikale Temperaturschichtung beschreibt die Stabilität der Atmosphäre. Während bei labiler Schichtung vertikaler Luftaustausch möglich ist, wird dieser durch zunehmende Stabilität erschwert bzw. auch ganz unterbunden. Die Stabilität und ihre zeitliche Entwicklung sind daher besonders im Hinblick auf Schadstoffkonzentrationen interessant. Die im Folgenden verwendeten Stabilitätsklassen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Stabilitätsklasse	Temperaturänderung mit der Höhe [°C / 100 m]	Vertikaler Luftaustausch
sehr labil	$\leq -1,30$	sehr leicht möglich, geschieht ‚von selber‘
labil	$\geq -1,30$ & $\leq -0,86$	leicht möglich, geschieht ‚von selber‘
neutral	$\geq -0,86$ & $\leq -0,40$	möglich, Schicht kann durchmischt werden
stabil	$\geq -0,40$ & $\leq 0,40$	erschwert; nur mit Zusatz-Forcing
sehr stabil	$\geq +0,40$	auch mit Zusatz-Forcing kaum möglich

Tabelle 4: Einteilung der Stabilitätsklassen.

Bei der Auswertung der Stabilität mittels TAWES und TEMPIS-Stationen werden jeweils zwei benachbarte Niveaus verglichen. Es hat sich herausgestellt, dass es für eine gut interpretierbare Auswertung sinnvoll ist, nicht zu dünne Schichten zu betrachten und Stationen, an denen der Stadteffekt deutlich zu tragen kommt, wegzulassen. Als unterste Schicht wird deshalb jene zwischen Flughafen und Hungerburg verwendet.

Abbildung 3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Stabilitätsklassen für die vier relevanten aufeinanderfolgenden Schichten für das Jahr 2020. Grundsätzlich ist die Verteilung sehr ähnlich wie in den vorangegangenen Jahren (nicht gezeigt). In allen hier dargestellten Schichten dominiert die neutrale Schichtung, am häufigsten mit rund 70 % ist sie zwischen Höttinger Alm und Patscherkofel zu finden. In den anderen Schichten liegt die Häufigkeit zwischen gut 40 und etwa 50 %.

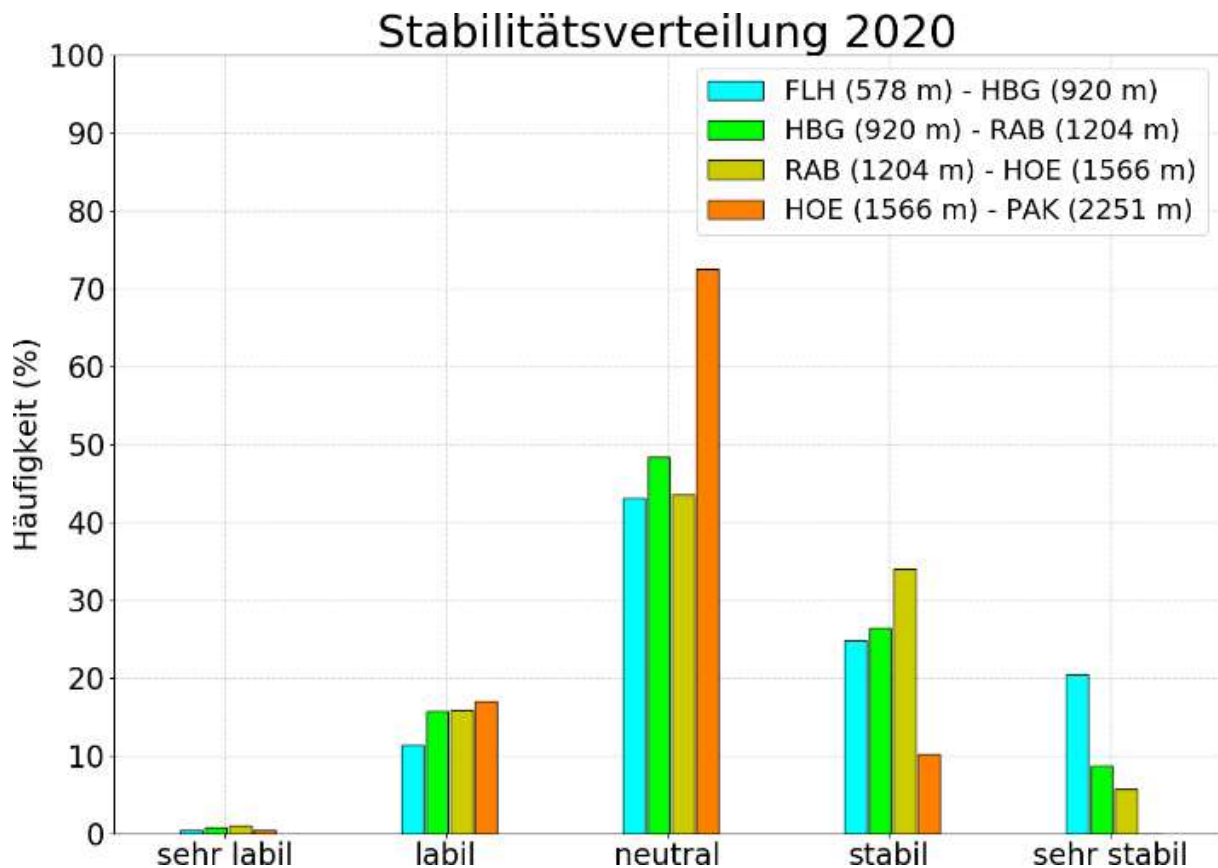


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Stabilitätsklassen in den übereinanderliegenden (verschiedenfarbig markierten) Schichten im Jahr 2020.

In der hier gezeigten und als repräsentativ erachteten untersten Schicht FLH bis HBG war es im Jahresverlauf 2020 zu etwa 45 % der Zeit stabil bzw. sehr stabil (25 bzw. 20 %). Die labile Klasse kam zu rund 12 % der Zeit vor, die sehr labilen Phasen waren hingegen äußerst selten. In den einzelnen Monaten sieht die Verteilung besonders in dieser für die Schadstoffkonzentration relevanten Schicht sehr unterschiedlich aus. In den Monaten Jänner (91 % !), Feber (57 %), November (76 %) und Dezember (76 %) war es überwiegend stabil bis sehr stabil, in den Sommermonaten ging die Häufigkeit dieser Lagen, die zu schwacher Verdünnung von Schadstoffen führen, auf etwa 20 bis 25 % zurück. Die Stabilitätsverteilungen im Jänner und Juni sind der Abbildung A8 im Appendix zu entnehmen, sie stellen die Verhältnisse im Monat mit den stabilsten und mit den am wenigsten stabilsten Bedingungen dar.

Die Analyse von Sonnenscheindauer, Windverhältnissen und Wetterlagen zeigt recht gut, dass die Stabilität nicht nur durch lokale Strahlungsprozesse, sondern auch regionale Einflüsse wie Föhn und großräumige Wetterlagen gesteuert wird².

² Bei windschwachen Hochdrucklagen unterliegt die Stabilität Strahlungsprozessen. Die Sonnenstrahlung erwärmt vor allem Oberflächen und erst diese die darüber liegende Luft. Die involvierte Schicht wird labilisiert. Nachts kühlen ebenfalls vor allem Oberflächen aus und kühlen die darüber liegende Luft, die involvierte Schicht wird stabilisiert. Damit ist die Stabilität bei windschwachen Hochdrucklagen von der Tages- und der Jahreszeit abhängig. An Hängen produzierte kalte bzw. warme Luft sinkt bzw. steigt auf und wird somit abtransportiert. Bei sehr windigen und/oder

Die tageszeitliche Verteilung der Stabilitätsklassen in der Schicht zwischen Flughafen und Hungerburg ist in Abbildung 4 dargestellt. Gegenüber den Vorjahren sind die Unterschiede in der Stabilitätsverteilung marginal, weshalb hier nur eine kurze Beschreibung des Tagesganges folgt.

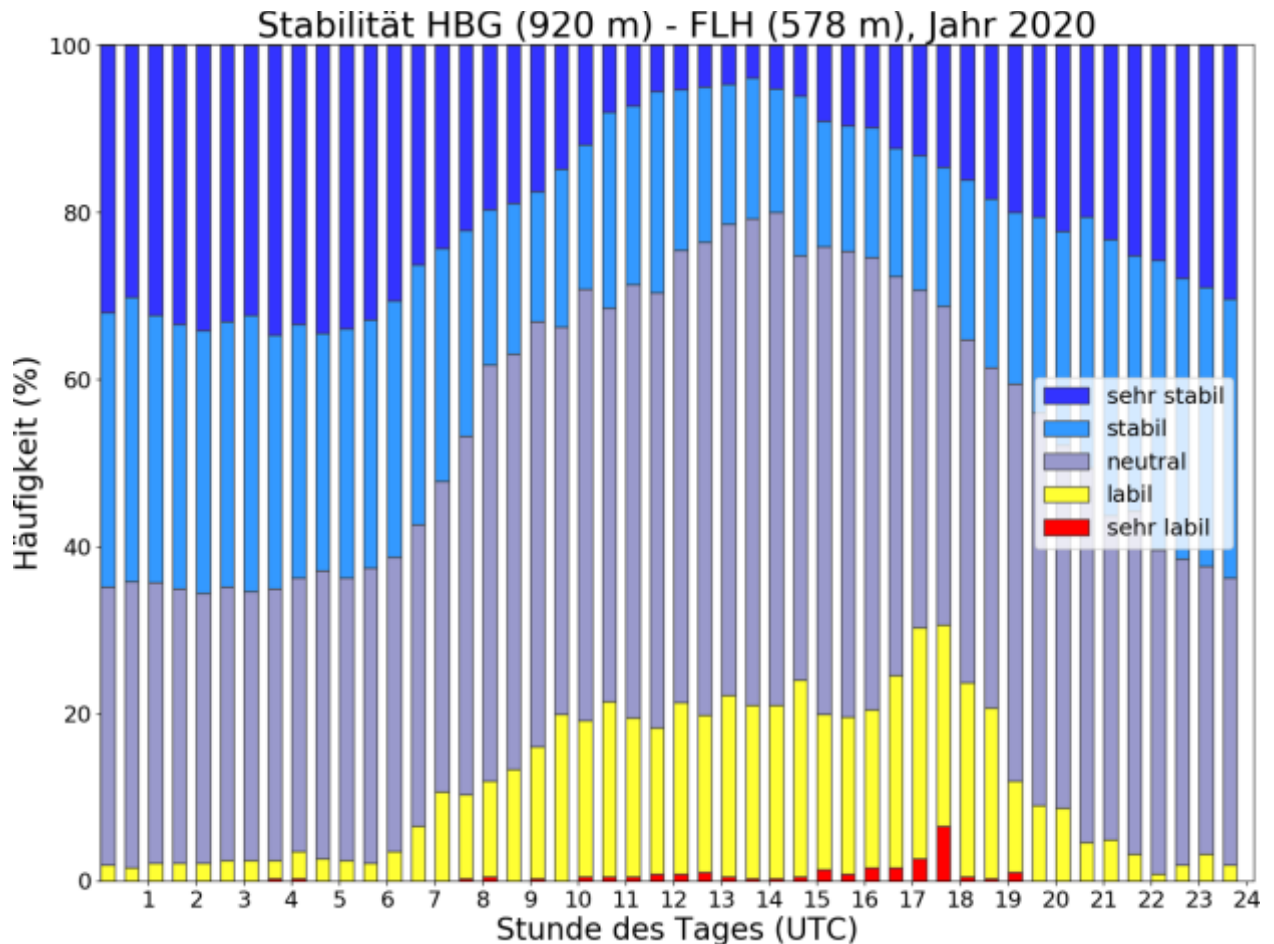


Abbildung 4: Tageszeitliche Verteilung der Stabilitätsklassen aus den halbstündlichen Temperaturmitteln in der 342 m dicken Schicht zwischen Flughafen und Hungerburg im Jahr 2020.

Grundsätzlich dominierten nachts ab etwa 21 UTC bis in die Morgenstunden um ca. 7 UTC die (sehr) stabilen Verhältnisse (ca. 50 bis 65 %), ansonsten die neutrale Schichtung. Mit der Einstrahlung stieg die Häufigkeit der labilen Klasse vormittags auf knapp über 20 %, den Maximalwert erreichte sie zwischen etwa 17 und 18 UTC mit etwa 30 %. Sehr labil war es kaum (weniger als 5 %). Die Lage der Station Hungerburg am Südhang sorgte hier mittags und am frühen Nachmittag vermutlich für ein leichtes ‚Überhitzen‘ und damit für höhere Stabilitätswerte. Die Abendspitze der labilen Werte ist wohl auf das späte Temperaturmaximum am Flughafen zurückzuführen, bedingt durch die begünstigte Sonneneinstrahlung.

niederschlagsreichen Phasen findet von oben her eine Durchmischung statt, wodurch sich eine neutrale (oder leicht labile bis leicht stabile) Schichtung ergibt.

In den einzelnen Monaten zeigt sich der komplexe Zusammenhang zwischen Stabilität, Strahlungsangebot und Wetterlagen (siehe Abbildung A9 im Appendix). Im sonnigen und warmen Jänner gab es neben den dominierenden stabilen Verhältnissen fast nur neutrale Schichtung. Im März fällt neben der sonnenbedingten zunehmenden Labilisierung untertags auf, dass auch nachts um die 10 % labil waren. Das liegt an Föhnlagen, die durch turbulente Durchmischung neutrale bis leicht labile Verhältnisse in Bodennähe erzeugen. Der Juli war leicht zu warm und zu trocken, die Stabilitätsverteilung ist typisch für den Sommer. Besonders die ca. 40 % an labilen bzw. sehr labilen Fällen am Nachmittag stechen ins Auge. Im ebenfalls warmen und trockenen November wurden wieder einige Föhnlagen registriert. Entsprechend gab es in den Nachtstunden ein paar Prozent an (leicht) labilen Klassen. Ansonsten fällt durch das reduzierte Sonnenangebot auf, dass der Tagesgang schon deutlich gedämpft wird und die stabilen Lagen bis auf zwei Stunden kurz nach Mittag ganztägig dominierten.

Neben der Häufigkeit kommt es in Bezug auf die Schadstoffkonzentration insbesondere auf die Dauer der stabilen Phasen an. Deshalb wurden (analog zur Auswertung der Kalmendauer in Abschnitt 6.4) für die Schicht Flughafen bis Hungerburg die verschiedenen Dauerstufen der stabilen bis sehr stabilen Phasen analysiert. Sie sind zusammen mit den Werten der Vorjahre in Tabelle 5 zusammengefasst.

HMW-Dauer		Anzahl					Gesamtdauer (Wochen)				
von	bis	2016	2017	2018	2019	2020	2016	2017	2018	2019	2020
1	2	258	347	331	296	295	0,9	1,3	1,3	1,1	1,1
3	6	76	85	109	84	79	0,9	1,0	1,4	1,0	1,0
7	12	40	46	53	49	35	1,0	1,2	1,4	1,4	1,0
13	24	90	76	91	88	99	5,1	4,0	5,2	4,9	5,5
25	48	49	80	81	83	66	4,7	7,7	7,9	8,3	6,6
49	inf	16	13	14	16	23	6,3	4,4	3,9	4,0	8,3
SUMME							19,0	19,7	21,1	20,7	23,5

Tabelle 5: Häufigkeit verschiedener Dauerstufen mit (sehr) stabiler Schichtung zwischen Flughafen (587 m) und Hungerburg (920 m), sowie deren Gesamtdauer in den Jahren 2016 bis 2020. Wie in Tabelle 4 definiert, bedeutet (sehr) stabil eine Temperaturabnahme von höchstens 0,4 °C/100m. HMW steht für Halbstundenmittelwert.

Die Gesamtdauer aller (sehr) stabilen Phasen war 2020 mit 23,5 Wochen länger als in den Vorjahren. Insbesondere waren auch Phasen, die mehr als einen Tag (mehr als 48 HMW) andauerten, deutlich häufiger als in den vier Vergleichsjahren 2016 bis 2019.

4.4 Inversionen

Ein Spezialfall bei der Stabilität ist die Inversion, hier nimmt die Temperatur mit der Höhe zu. Die Atmosphäre ist damit bei Inversionslagen sehr stabil geschichtet. Problematisch sind vor allem lang anhaltende Inversionslagen. Schadstoffe aus Verkehr, Hausbrand und Industrie sammeln

sich dabei in der Inversionsschicht an. Wenn wie im Inntal das Gebirge auch horizontalen Austausch einschränkt, kann es zu hohen Schadstoffkonzentrationen (-belastungen) kommen.

Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Inversionshäufigkeit in den aufeinanderfolgenden Schichten FLH-HBG, HBG-RAB, RAB-HOE und HOE bis PAK im Jahr 2020. Die sehr dünnen Schichten unterhalb der Hungerburg, die bis 2018 ausgewertet wurden, wurden durch die Gesamtschicht zwischen FLH und HBG ersetzt. Im Großen und Ganzen nimmt die Inversionshäufigkeit mit der Höhe ab. Sie lag im Jahr 2020 bei ca. 30 % in der untersten Schicht, bei (gut) 15 % in den beiden folgenden Schichten und nur zu rund 1 % der Zeit herrschten in der Schicht zwischen Höttinger Alm und Patscherkofel Inversionsbedingungen. In den Vorjahren waren Inversionen bis zum Rastlboden seltener, sie kamen in der untersten Schicht zu 22 bis 24 % vor und zu 12 bis 14 % zwischen HBG und RAB. Ab dem Rastlboden lagen die Häufigkeiten im Jahr 2020 in der Bandbreite der Periode 2016 – 2019.

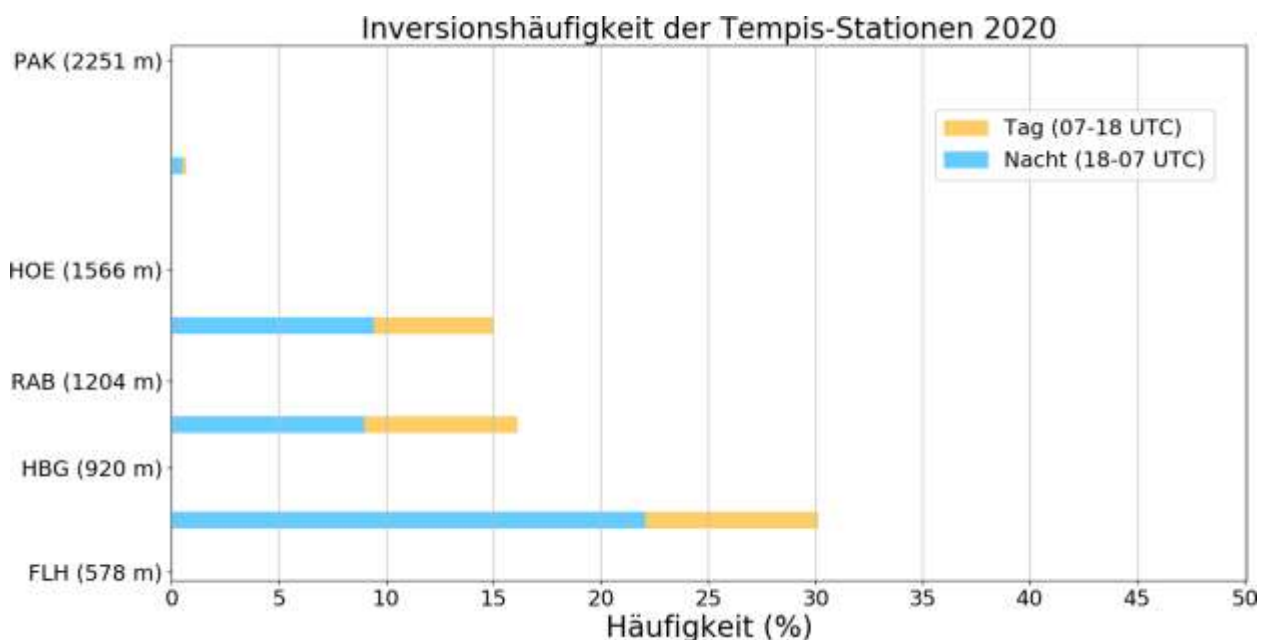


Abbildung 5: Häufigkeit der Inversionen in den verschiedenen Schichten im Jahr 2020. Gelbe Balken stehen dabei für den Anteil zwischen 7 und 18 UTC (8 und 19 MEZ), blau für den Anteil zwischen 18 und 7 UTC (19 und 8 MEZ), vereinfacht also für den Tages- und Nachtanteil.

In Abbildung 6 wird der zeitliche Verlauf der Inversionen im Jahr 2020 monatsweise gezeigt. Ausgewertet wurden die Schichten Flughafen – Hungerburg (Schichtdicke: 340 m), Hungerburg – Rastlboden (320 m) und Rastlboden – Patscherkofel (1010 m). Die Inversionsstärke wird über die in Abbildung 7 gezeigte Farbkodierung in Schritten von 0,5 °C/100 m ausgedrückt. Fehlzeiten (bzw. Tage, die es in einem Monat nicht gibt) werden über einen grauen Balken sichtbar gemacht. Über jeder Monatsabbildung sind Föhnzeiten im Wipptal in orange angegeben. Diese wurden direkt aus den Messungen am Sattelberg und in Ellbögen abgeleitet, daher gibt es hier auch Fehlzeiten, die als graue Punkte bzw. Balken gekennzeichnet sind.

Der saisonale Verlauf der Inversionen tritt klar zu Tage. Im Jänner (oberste Reihe) gab es lange stabile Phasen, die Inversionen reichten oft bis zum Rastlboden hinauf. Ab März nahmen die Inversionen deutlich ab und beschränkten sich, überwiegend auf Nachtzeiten. Gleichzeitig kann eine Abnahme der Inversionsstärke (ausgedrückt durch die Farbe) festgestellt werden. Ab Mitte Oktober gab es in der untersten Schicht Flughafen – Hungerburg wieder Zeiten, in denen die Inversion untertags kaum aufbrach. Und im November und Dezember überwogen die Inversionszeiten in den untersten beiden Schichten, wobei – bedingt durch Frontdurchgänge bzw. Luftmassenwechsel – auch bis zu drei Tage lange Perioden ohne Inversionen vorkamen.

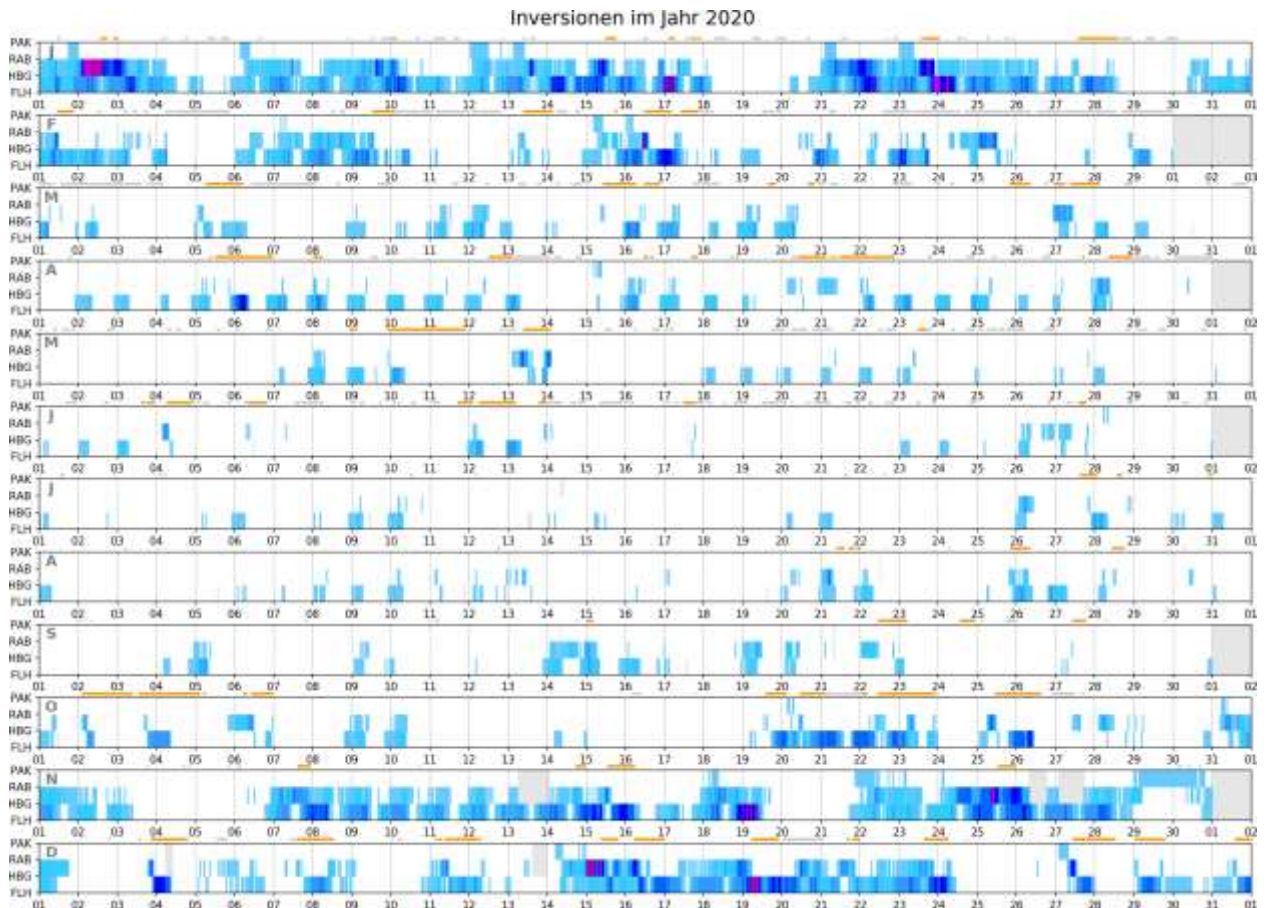


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Inversionen im Jahr 2020 in den Schichten FLH – HBG, HBG – RAB und RAB – PAK auf Basis von Halbstundenmittelwerten. Weitere Erklärungen sind dem Text zu entnehmen.

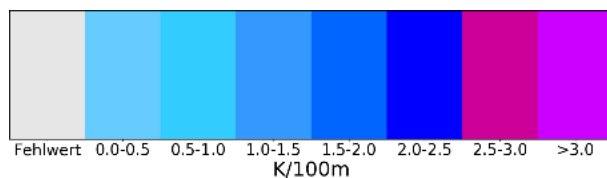


Abbildung 7: Farbskala für die Zeitreihenplots der Inversionen.

Abbildung 8 zeigt zur Einordnung in die gesamte Messreihe 1999 – 2020 die mittlere Inversionshäufigkeit und – stärke als Funktion der Tageszeit in den drei Schichten FLH – HBG (Schichtdicke $dH = 340$ m), HBG – RAB ($dH = 320$ m) und RAB – PAK ($dH = 1010$ m). Die Monate

sind von oben Juli bis unten Juni angeordnet. Die Inversionsstärke wird zu den Zeiten, an denen eine Inversion vorhanden ist, gebildet.

Aus der Abbildung sind die folgenden Charakteristika von Inversionen im Inntal rund um Innsbruck ablesbar:

- Sowohl die Inversionshäufigkeit als auch deren Stärke nehmen im Mittel von oben nach unten deutlich zu.
- Inversionshäufigkeit und –stärke sind korreliert. D. h. Zeiten, in denen die meisten Inversionen auftreten, sind im Mittel auch jene, in denen diese am stärksten ausgeprägt sind und umgekehrt. Wenn Inversionen sehr selten sind, ist die Bestimmung der zugehörigen Inversionsstärke wenig überraschend anfälliger für Ausreißer.
- Jahreszeitlich sind Inversionen in den Monaten November, Dezember und Jänner am häufigsten und stärksten. Der Zusammenhang mit der Besonnung ist augenscheinlich, Monate mit vergleichbarem Sonnenstand zeigen auch eine ähnliche mittlere tageszeitliche Inversionsverteilung, zum Beispiel Oktober bis Februar, September bis März.
- Auch die tageszeitliche Verteilung von Inversionshäufigkeit und –stärke hängt klar mit der Tageslänge zusammen. Das Minimum an Inversionen tritt am frühen Nachmittag auf, da die Luft in Nähe des Talbodens stärker erwärmt wird als jene in höheren Schichten. Diese etwa zweistündige Verschiebung gegenüber dem Sonnenhöchststand spiegelt die Verzögerung bei der Erwärmung wider.

Detailliertere Ergebnisse des Inversionsvorkommens im Zeitraum 1999 – 2020 sind dem Bericht „Vertiefende Analysen des erweiterten Innsbrucker Hangprofiles“ zu entnehmen, der im Rahmen eines internen Projektes erstellt wurde und auf Anfrage gerne zugeschickt wird.

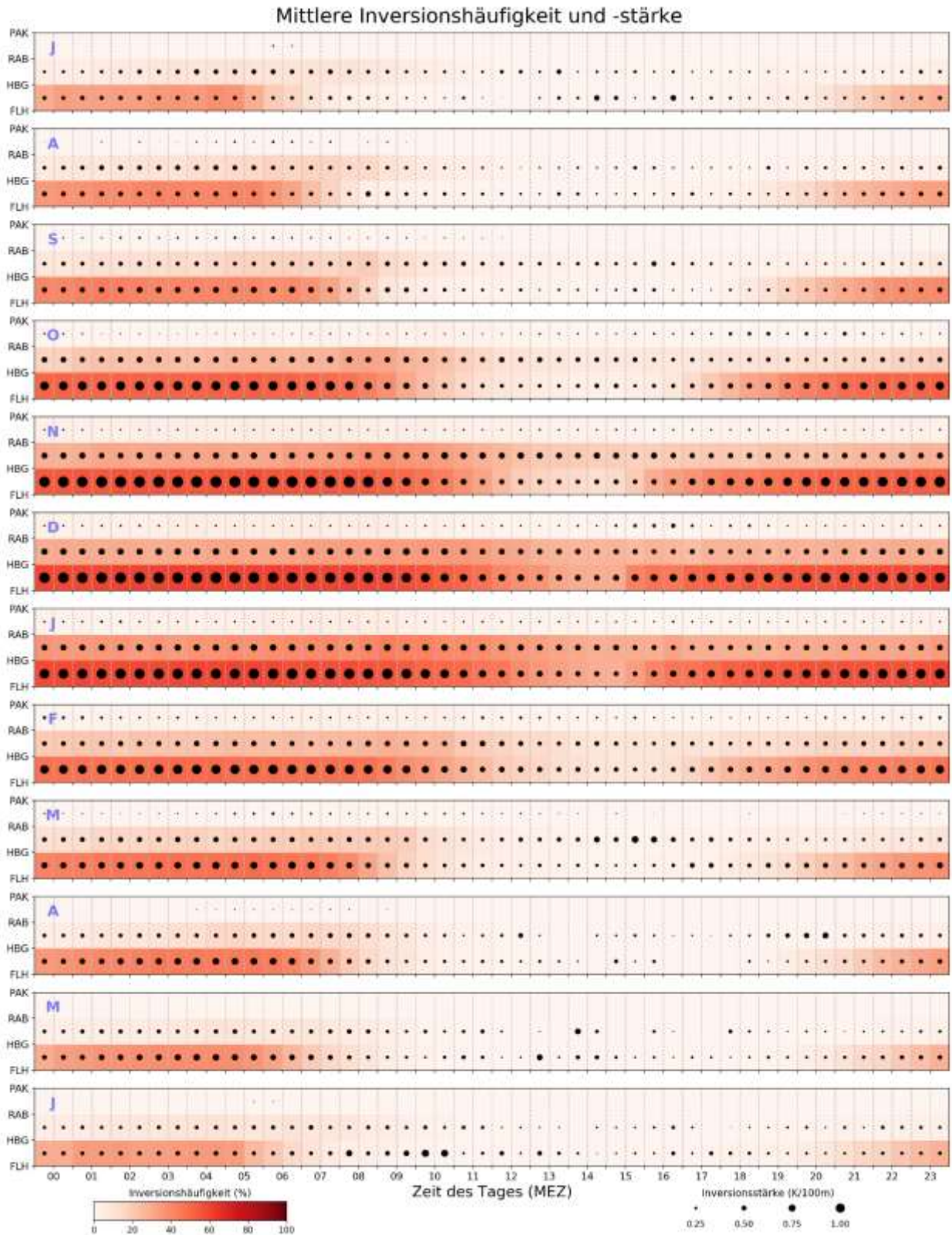


Abbildung 8: Monatliche mittlere Inversionshäufigkeit und -stärke als Funktion der Zeit des Tages und in halbstündlicher Auflösung in den drei Schichten Flughafen-Hungerburg, Hungerburg – Rastlboden und Rastlboden – Patscherkofel für die Periode 1999 bis 2020 von Juli (ganz oben) bis Juni (ganz unten).

Betrachtet man für das Inversionsgeschehen nicht die aufeinanderfolgenden Schichten, sondern verwendet für alle die gleiche Basisstation, ergeben sich weitere Einblicke. Tabelle 6 fasst die

monatlichen bzw. jährlichen Inversionshäufigkeiten für 2020 und die Vorjahre zusammen. Die Tabelle enthält auch die sehr dünnen Schichten unterhalb der HBG. Auch wenn deren Absolutzahlen³ aus den bereits erwähnten Gründen nicht allzu hohe Bedeutung zuzumessen ist, kann die zeitliche Entwicklung seit 2016 von Interesse sein.

Wie gehabt konzentrierten sich die Inversionen ganzjährig auf die Schicht unterhalb der Hungerburg und waren in der kalten Jahreszeit erwartungsgemäß häufiger (Oktober bis Feber) als in der warmen. Ab der Hungerburg nahm die Häufigkeit der Inversionen mit zunehmender Schichtdicke stark ab. Die höchsten Inversionshäufigkeiten traten 2020 im Jänner, gefolgt von November und Dezember auf. In den untersten Niveaus bis zum Alpenzoo herrschten in diesen Monaten zwischen 70 und 92 % Inversionsbedingungen, bis hinauf zur Höttinger Alm zwischen 37 und 76 %. Im Jänner gab es über die gesamte Talatmosphäre (bis zum Patscherkofel) 39 % Inversionen, das ist der zweithöchste Monatswert nach Dezember 2016.

	Δz	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
2020														
HBF	33	92	75	59	72	55	59	66	67	65	60	79	82	69,0
ODO	57	79	64	46	59	39	41	49	51	47	48	71	70	55,3
ALP	90	86	59	57	72	42	37	47	48	48	47	78	73	57,8
HBG	342	76	42	22	30	12	8	9	12	13	25	62	52	30,1
RAB	626	72	34	13	19	5	4	4	7	9	24	62	50	24,9
HOE	988	65	28	10	13	2	1	2	5	9	14	62	37	20,6
PAK	1673	39	11	1	0	0	0	0	0	1	4	36	12	8,7
2019														
HBF	33	64	79	57	52	46	69	71	76	74	69	72	76	68,8
ODO	57	46	69	50	48	40	58	53	52	51	56	63	67	54,3
ALP	90	48	68	43	36	27	42	46	46	50	54	60	66	48,8
HBG	342	24	48	23	14	5	16	13	11	19	38	40	44	24,4
RAB	626	23	49	17	10	3	12	6	9	14	37	35	45	21,3
HOE	988	16	48	15	6	1	8	3	5	7	26	23	37	16,0
PAK	1673	2	22	5	0	0	0	0	0	1	7	1	18	4,5
2018														
HBF	33	81	56	54	67	49	53	58	60	64	70	70	74	63,0
ODO	57	75	41	48	67	49	43	51	55	53	63	64	65	56,4
ALP	90	73	51	51	66	51	48	54	56	58	62	66	65	58,5
HBG	342	55	15	24	26	13	6	9	12	17	34	40	36	23,9
RAB	626	48	17	18	17	7	1	2	6	14	29	45	36	20,0
HOE	988	37	13	11	11	1	0	2	3	13	23	35	30	15,1
PAK	1673	8	3	2	1	0	0	0	0	5	2	7	10	3,2
2017														
HBF	33	82	70	61	52	64	63	60	66	60	75	69	74	66,4
ODO	57	71	58	50	39	48	45	43	49	46	62	50	62	51,8
ALP	90	79	64	56	46	48	49	38	46	41	61	50	60	53,1

³ Wegen des Stadteffekts kommt es bei Verwendung des FLH als Basisstation in den dünnen Schichten unterhalb der HBG zu einer (deutlichen) Überschätzung der Inversionshäufigkeit. Vergleiche auch Abschnitt 4.5. In Tabelle A1 im Appendix sind für den Vergleich die Inversionshäufigkeiten in den dünnen Schichten unterhalb der HBG mit Basisstation UNI angeführt.

HBG	342	51	38	21	13	11	9	5	12	11	34	25	37	22,2
RAB	626	50	40	13	8	5	3	3	9	8	30	24	34	18,6
HOE	988	44	31	12	4	3	2	3	9	5	29	25	25	15,8
PAK	1673	30	7	0	0	0	0	0	0	0	12	9	13	5,8

2016														
HBG	33	80	65	51	53	56	57	68	71	75	61	60	90	65,6
ODO	57	62	52	37	40	42	36	46	50	58	48	49	83	50,2
ALP	90	61	52	42	44	39	31	40	48	59	48	44	94	50,1
HBG	342	39	33	13	16	11	3	5	9	24	20	26	85	23,6
RAB	626	36	25	8	12	9	2	2	3	19	16	27	81	19,9
HOE	988	32	17	10	15	2	2	2	4	13	13	21	76	18,2
PAK	1673	14	5	0	0	0	0	0	1	0	2	4	45	6,1

Tabelle 6: Die Inversionshäufigkeit (in %) zwischen Flughafen und der jeweiligen Station in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2020 (oben) und den Jahren davor seit 2016. Unter Δz ist die Schichtdicke (in m) angegeben. Die Häufigkeiten sind farbkodiert – je dunkler der Zellhintergrund, umso höher die Häufigkeit. Zahlen in weißer Schrift zeigen an, dass die Inversionshäufigkeiten aufgrund von Stationsausfällen nur für den Anteil der vorhandenen Daten bestimmt werden konnten.

Erwartungsgemäß waren Inversionen nachts (18 bis 7 UTC, Tabelle A2 im Appendix) sehr viel häufiger als tagsüber (7 bis 18 UTC, Tabelle A3 im Appendix). Mit zunehmender Schichtdicke nahm die Häufigkeit nachts in allen Einzelmonaten ab. Tagsüber sind die ‚künstlichen‘ Inversionen am Alpenzoo aufgrund der Überwärmung in der Südhanglage erkennbar, sodass die Häufigkeiten zumindest jene des ODO immer übertrafen.

4.5 Einfluss der städtischen Wärmeinsel auf die Stabilitätsauswertung

Wie man bereits anhand der Temperatúrauswertungen in Abschnitt 4.1 sehen kann, ist es bei ansonsten ähnlichen Messbedingungen in der Stadt an der UNI im Durchschnitt wärmer als am Westrand der Stadt am FLH. Dies wird als städtische Wärmeinsel bezeichnet. Einerseits speichert die Stadt Wärme und kühlt nachts langsamer aus, andererseits erwärmt sie sich tagsüber aufgrund des starken Versiegelungsgrads (fehlende Verdunstungskühlung), der schwächeren Durchlüftung und der geringeren Albedo schneller. Die Station am Flughafen liegt relativ frei mit recht viel Gras- bzw. Wiesenumgebung. Die nächtliche Auskühlung wird weniger behindert, tagsüber ist die Durchlüftung besser und neben einer höheren Albedo wirkt auch die Verdunstung aus der Vegetation kühlend.

Um diesen Effekt näher zu analysieren, wurden hier die langjährigen Datenreihen 1999 – 2020 verwendet. Im Median ist es in der Stadt (UNI) um 0,6 °C wärmer als außerhalb (FLH). Eine jahres- und tageszeitliche Aufschlüsselung zeigt, dass es zwei Situationen gibt, in denen die städtische Überwärmung mit rund 0,8 °C besonders hoch ist:

- Nachts im Winter, wahrscheinlich verursacht durch das Beheizen der Gebäude und möglicherweise auch eine schwächere Abstrahlung sowie wenig Wind.

- Etwa zwei Stunden nach Sonnenhöchststand im Hochsommer, mutmaßlich verursacht durch starke Einstrahlung bei einer hohen Flächenversiegelung im Stadtzentrum, mit geringer Verdunstungs-Abkühlung und möglicherweise auch geringerer Albedo.

Betrachtet man den Stadteffekt im Zusammenhang mit der Stabilität in der untersten Schicht zwischen FLH und der ebenfalls eher frei im Grünen liegenden Station Hungerbug, stellt sich insgesamt eine hohe Korrelation heraus. Der Temperaturunterschied ist umso größer, umso stabiler die Luft zwischen FLH und HBG geschichtet ist (Tabelle 7).

Temperaturdifferenz UNI – FLH [°C] in Abhängigkeit von der Stabilität					
Schichtung FLH-HBG	sehr labil	labil	neutral	stabil	sehr stabil
Häufigkeit [%]	0,5	14,3	40,4	26,2	18,6
Median Wind [m/s]	2,5	2,1	1,5	1,0	1,2
dT [°C]	0,1	0,4	0,4	0,7	1,2

Tabelle 7: Temperaturdifferenz dT [°C] zwischen UNI und FLH in Abhängigkeit von der Stabilität in der Schicht FLH-HBG. Zudem sind die Häufigkeit [%] der einzelnen Schichtungen und der Median der dabei auftretenden Windgeschwindigkeit [m/s] angeführt. Die Stärke des Stadteffekts ist farbcodiert, wobei eine stärkere städtische Überwärmung ins rötliche geht.

Umgekehrt wirkt sich damit die Wahl der Basisstation – UNI oder FLH – auf die Stabilitätsklassen und deren Tagesgang in der untersten Schicht bis zur Hungerburg aus (Abbildung 9 für das Jahr 2020).

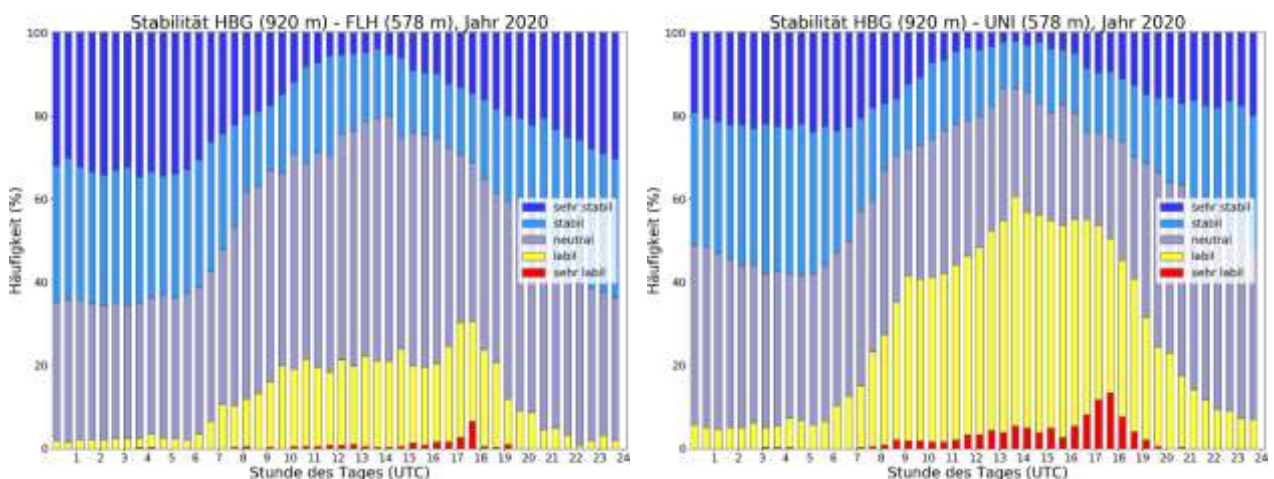


Abbildung 9: Mittlerer Tagesgang der verschiedenen Stabilitätsklassen 2020 zwischen Flughafen und Hungerburg (links), bzw. zwischen Innsbruck Universität und Hungerburg (rechts).

Mit FLH als Basisstation sind sehr stabile bzw. stabile Situationen häufiger als mit der UNI. Sehr stabile bzw. stabile Situationen kamen im Jahresschnitt mit Basis FLH zu ca. 20 bzw. 25 % vor, mit Basis UNI hingegen nur zu 15 bzw. 22 %. Auch die neutrale Schichtung (graue Balken) kam in der Schicht FLH – HBG etwas öfter vor (ca. 43 gegenüber 35 % für UNI - HBG), während es

deutlich seltener labil war (gelbe Balken, ca. 11 gegenüber 26 %). Die Klasse sehr labil (in rot) kam unabhängig von der Basisstation selten und quasi nur tagsüber vor, mit der UNI als Basisstation aber doch sichtbar mehr als mit dem FLH (dort weniger als 1 %, mit UNI ca. 2 %). Da der Wärmeinseleffekt in der vertikalen Ausdehnung begrenzt ist, besonders während stabiler Phasen, dürfte die UNI eher nur für Stabilitätsanalysen in der vom Stadteffekt beeinflussten Schicht – maximal bis zur Hungerburg – geeignet sein. Die Verwendung des FLH als Basisstation wird als repräsentativer für den Großraum Innsbruck bzw. auch das Inntal allgemein erachtet. Die Stabilitätsanalysen basieren daher in Zukunft vor allem auf dieser Basisstation, UNI wird nur teilweise ergänzend verwendet.

Tendenziell ist die städtische Überwärmung umso geringer, umso stärker der Wind ist. Nur im Sommer weicht dieses Muster ab, bis zu einer Windgeschwindigkeit von 7,5 m/s nimmt der Temperaturunterschied sogar zu (nicht gezeigt). Dies hängt damit zusammen, dass die nachmittägliche Überhitzung in der Stadt gleichzeitig mit kräftigem Taleinwind einhergeht.

Detailliertere Ergebnisse des Stadteffekts – auch im Hinblick auf die Auswirkungen der Windverhältnisse - im Zeitraum 1999 bis 2020 sind ebenfalls dem bereits oben erwähnten Bericht „Vertiefende Analysen des erweiterten Innsbrucker Hangprofiles“ zu entnehmen.

4.6 Einordnung in die Innsbrucker TEMPIS-Reihe seit 1999

In einem Projekt der ZAMG, das vom Land Tirol unterstützt wurde, konnten alte TEMPIS Daten beginnend mit dem Jahr 1999 digitalisiert, kontrolliert und analysiert werden. Im Zusammenhang mit dem hier vorliegenden Bericht eignen sich die Stationen Hungerburg (HBG) und Rastlboden (RAB) für Stabilitätsvergleiche, da sie im Laufe der Jahre nur geringfügig verändert wurden. Beide Stationen haben sich schon vor 2015 auf den ortsfest gebliebenen Stützen 1 und 2 der Nordkettenbahn befunden. HBG war um rund 15 m höher montiert, RAB sogar gute 20 m höher. Beide Temperatursensoren waren vor 2015 nicht ventiliert, so dass man bei den älteren Daten von etwas höheren Temperaturen ausgehen muss, was die größere Messhöhe aber ein wenig ausgleichen dürfte. Abzüglich jener Jahre mit zu großen Ausfällen liegen aus diesem Projekt bis inklusive 2020 für die Hungerburg 18 Jahre an Temperaturdaten vor und für den Rastlboden 17.

In Abbildung 10 ist die langjährige Entwicklung der Inversionshäufigkeiten in den Schichten Flughafen bis Hungerburg, Rastlboden und Patscherkofel zu sehen. In der untersten Schicht FLH bis HBG schwankt die Inversionshäufigkeit zwischen 22 und 36 %, bis zum RAB zwischen 19 und 31 % und bis zum PAK zwischen 2 und 11 %. Inversionen kommen in allen Monaten vor (nicht gezeigt), der Schwerpunkt ist zwischen Oktober und Februar zu finden, mit doch deutlich wechselnden Anteilen von Jahr-zu-Jahr. Im vergangenen Jahr 2020 erreichte die Inversionshäufigkeit in allen drei Schichten den höchsten Wert seit der Neuaufstellung der Stationen (also seit 2016), in der gesamten Reihe nahm die Häufigkeit den dritt- bis

fünfhöchsten Wert ein. Insgesamt ist seit 1999 kein signifikanter Trend bei den Inversionen beobachtbar.

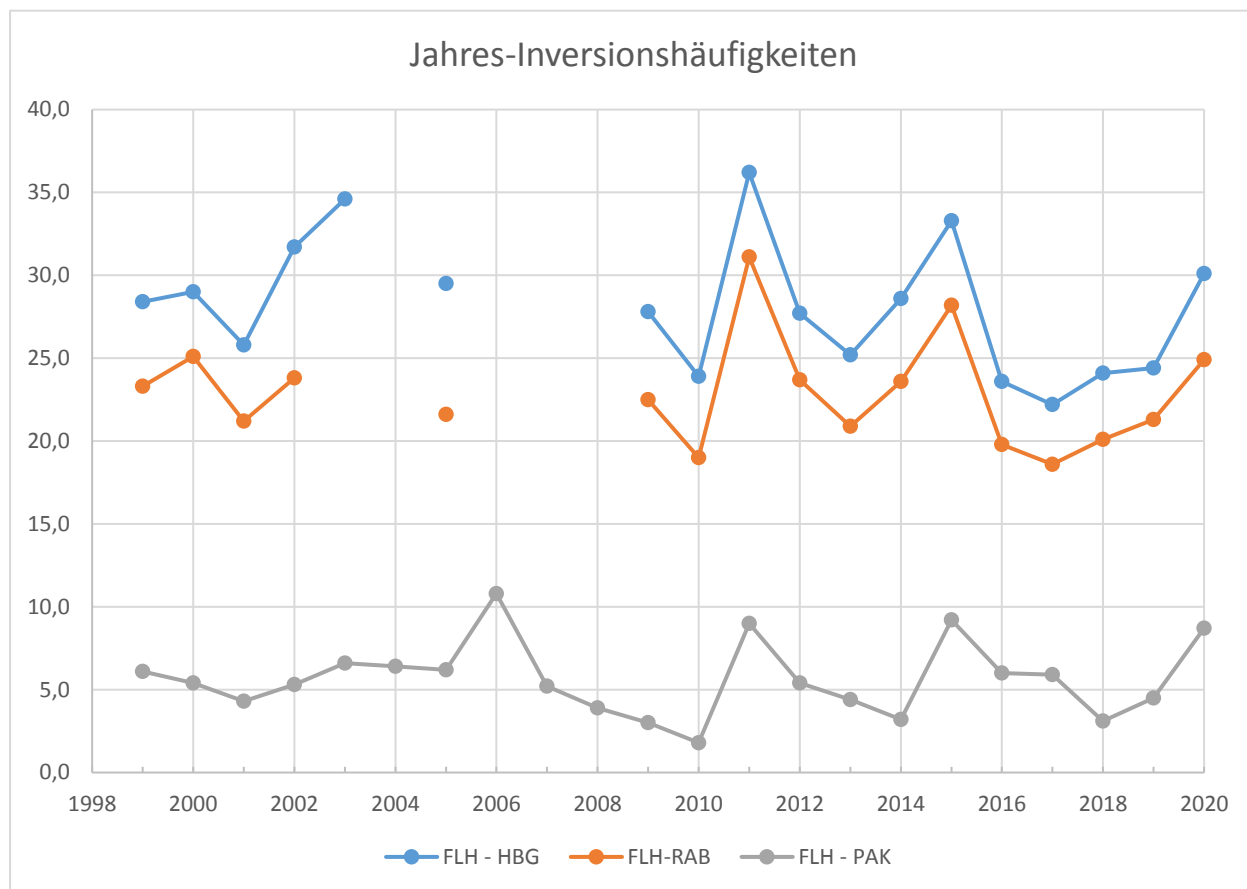


Abbildung 10: Jahres-Inversionshäufigkeiten der langjährigen TEMPIS-Reihen von 1999 bis 2020 (bis 2018 basierend auf 30-Minuten-Daten, ab 2019 auf 10-Minuten-Daten) für die Schichten zwischen Flughafen und Hungerburg (blau), Rastlboden (orange) und Patscherkofel (grau).

Wird die Station Innsbruck-Uni anstatt Innsbruck-Flughafen verwendet, verläuft die zeitliche Entwicklung quasi parallel. Jedoch kommt es aufgrund des Stadteffekts bis zur Hungerburg im Durchschnitt „nur“ noch in etwa 21 % (statt 28 %) der Gesamtzeit zu Inversionen.

5 Auswertung der Feuchte

Eines der gebräuchlichsten Feuchtemaße ist die relative Feuchte. Diese hängt von Temperatur und Luftdruck ab und sagt aus, wieviel Wasserdampf die Luft enthält, bezogen auf das maximale Aufnahmevermögen. Wird das maximale Aufnahmevermögen der Luft erreicht, kondensiert das Wasser und eine Wolke entsteht. Daher beträgt die relative Feuchte innerhalb von Wolken oder Nebel immer 100 %. Findet kein horizontaler Transport an feuchten Luftmassen/Regen statt, ist die Quelle für Wasserdampf (abgesehen von vernachlässigbaren chemischen Prozessen) die Erdoberfläche. Wasser, das an der Oberfläche von Gewässern oder von der Vegetation oder nassen/feuchten Oberflächen verdunstet, gelangt über vertikalen Austausch in die Atmosphäre und kann mittels großräumiger Luftströmungen weiter transportiert werden.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
2020													
FLH	81	74	66	57	67	73	72	75	78	81	84	86	74
UNI	78	70	62	51	63	70	68	72	75	79	80	83	71
HBF	77	71	62	48	63	71	69	73	76	80	81	86	71
ODO	75	70	62	49	65	NA	66	72	76	78	80	85	69
ALP	78	75	64	52	69	76	74	79	82	82	82	86	75
HBG	68	72	66	52	70	78	76	79	83	81	76	80	73
RAB	58	68	69	54	74	80	77	80	81	80	69	74	72
HOE	50	62	70	56	76	80	77	79	80	79	60	72	70
PAK	54	69	77	64	82	86	79	82	82	83	59	79	75
2019													
FLH	84	74	66	64	73	61	70	76	79	77	83	82	74
UNI	83	71	62	60	70	56	66	72	75	74	80	79	71
HBF	83	68	61	NA	NA	53	51	55	73	72	81	80	67
ODO	90	73	65	61	75	66	66	74	76	74	80	77	73
ALP	85	71	63	60	74	59	70	78	79	76	80	80	73
HBG	89	71	67	66	80	62	73	80	81	73	79	78	75
RAB	86	65	67	70	82	61	74	80	82	70	77	74	74
HOE	82	55	64	72	81	60	74	78	80	71	76	67	72
PAK	84	59	71	82	90	68	78	81	80	76	86	69	77
2018													
FLH	86	77	70	55	65	69	67	69	74	73	77	86	72
UNI	84	75	67	51	63	65	63	65	71	70	73	84	69
HBF	NA	NA	65	48	60	63	61	64	68	66	71	82	66
ODO	81	78	68	48	NA	68	66	68	74	70	75	88	71
ALP	75	76	65	50	65	68	67	68	73	69	70	85	69
HBG	77	85	71	52	69	75	72	73	79	71	74	88	74
RAB	76	86	74	56	71	77	75	74	78	71	69	82	74
HOE	73	81	NA	NA	72	76	73	72	75	70	66	73	72
PAK	78	82	84	72	81	82	78	79	75	75	73	74	78
2017													
FLH	82	76	68	68	64	64	74	75	82	79	85	86	75
UNI	78	72	64	65	60	60	71	73	81	77	83	85	72

HBF	75	70	61	62	57	58	69	70	77	72	81	82	70
ODO	76	72	63	64	59	61	70	72	79	73	83	83	71
ALP	78	71	66	67	64	65	77	78	85	79	85	85	75
HBG	75	69	69	72	66	67	80	79	87	76	85	84	76
RAB	70	66	69	75	70	70	81	79	87	74	84	82	76
HOE	65	65	66	75	70	69	77	75	85	67	77	76	72
PAK	63	72	72	81	79	74	80	76	87	68	78	79	76
2016													
FLH	87	78	70	67	70	76	75	75	75	80	80	78	76
UNI	84	74	66	63	66	72	71	72	71	77	77	74	72
HBF	81	72	64	61	64	70	70	69	69	75	75	69	70
ODO	83	74	67	63	65	72	71	71	70	76	74	69	71
ALP	86	75	68	65	70	79	78	78	76	80	76	71	75
HBG	84	74	72	68	71	81	79	79	76	83	80	62	76
RAB	78	74	75	71	74	84	82	82	76	85	80	54	76
HOE	73	NA	NA	NA	74	83	78	79	74	84	76	49	74
PAK	81	85	86	85	88	89	86	79	78	84	77	51	81

Tabelle 8: Relative Feuchte in % an den TAWES und TEMPIS-Stationen in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2020 (oben) und den Jahren davor seit 2016. Die Häufigkeiten sind farbkodiert, wobei braune Farben für eher trockene Verhältnisse stehen, blaue für feuchtere. In den Monaten mit weniger als 80 % an verfügbaren Daten wurden keine Mittel bestimmt, sie sind mit „NA“ gekennzeichnet.

Übers Jahr gerechnet lag die relative Feuchte 2020 zwischen 69 % am HBF und 75 % im ALP und auf dem PAK (Tabelle 8, oben). Die starke Flächenversiegelung und das Fehlen von größeren Grünanlagen in der Nähe sind die Ursache für den niedrigen Wert am HBF. Üppige Vegetation samt ausreichendem Niederschlag im Alpenzoo sorgten hier für den höchsten Jahreswert abseits vom Patscherkofel, welcher aufgrund seiner Höhe bereits oft in Wolken steckt.

In Tallagen ist im Winter die relative Feuchte tendenziell höher als in den wärmeren Jahreszeiten⁴. 2020 war das Frühjahr trocken, Höhepunkt war der April wo anhaltender Hochdruckeinfluss und ausbleibender Niederschlag die Feuchte auf rund 50 % absinken ließen. Danach stieg sie mit eher regelmäßigen Niederschlägen wieder deutlich an. In höheren Lagen, etwa ab dem RAB aufwärts, waren auch der Jänner und der November verhältnismäßig trocken für die kalte Jahreszeit. Hoher Luftdruck und mangelnde Feuchtequellen (im Jänner eine Schneedecke, im November bereits abgestorbene Vegetation, aus der kaum Feuchtigkeit entweicht), waren dafür verantwortlich.

In der Talsohle ist der Tagesgang der relativen Feuchte stärker ausgeprägt als in höheren Niveaus. Dies lässt sich deutlich aus dem Vergleich für den Juli 2020 an den Stationen Alpenzoo und Höttinger Alm in Abbildung 11 erkennen. Tagsüber war es im Jahresschnitt (und an den meisten Tagen) durch die Temperaturzunahme sowie die vertikale Durchmischung trockener als nachts.

⁴ Betrachtet man die absolute Feuchte, ist diese in der warmen Jahreszeit höher, da wärmere Luft mehr Feuchte fassen kann.

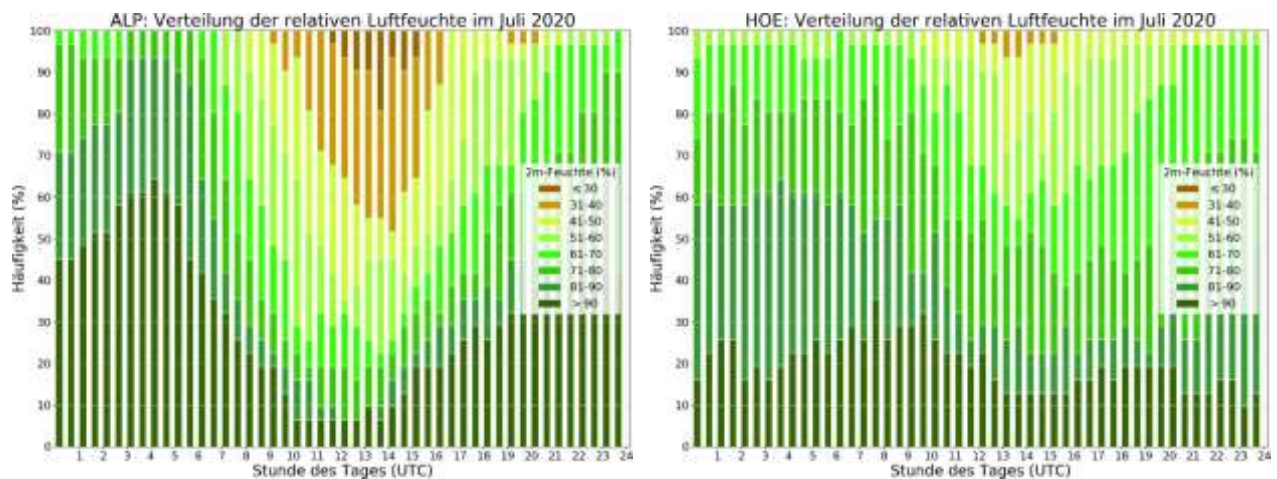


Abbildung 11: Tagesgang der Häufigkeitsverteilung der relativen Feuchte im Alpenzoo (links) und auf der Höttinger Alm (rechts) im Juli 2020.

6 Auswertung des Windes

Der Wind ist das Resultat von horizontalen Druck- und damit Temperaturunterschieden. Lokale topographische Gegebenheiten können den Wind blockieren, umlenken und/oder kanalisieren. Vor allem beim Überströmen von Gebirgen kann es unter anderem zu Beschleunigungseffekten kommen. In Innsbruck ist hier vor allem der Südföhn durch das Wipptal zu nennen.

6.1 Windrichtung

Die auftretenden Windrichtungen im Bereich vom Talgrund sind maßgeblich von der Ausrichtung der Achse des Inntals in der Umgebung von Innsbruck (W bis WSW nach O bis ONO) geprägt. Daher gibt es im Vergleich zu den Vorjahren kaum Änderungen in der Richtungs- und Geschwindigkeitsverteilung.

Abbildung 11 zeigt die entsprechenden Jahreswindrosen für FLH, UNI, HBF und ODO. Neben der Talachse zeigen sich in den Verteilungen auch deutlich die Lage der Messstation bezüglich des Stadtrandes (FLH am Westrand, ODO am Ostrand), aus welcher Richtung der Wind ungehinderter durchgreifen kann, bzw. die innerstädtischen Stationen (v.a. HBF, aber auch UNI) am Ausgang des Wipptals. Beim thermisch induzierten Wind ist der nächtliche Talauswind in der Regel schwach, der Taleinwind fällt vor allem in der warmen Jahreszeit oft deutlich stärker aus. Starke bis sehr starke Winde werden im Zusammenhang mit Sturmtiefs (in der Regel aus der West- bis Nordrichtung), sowie Südföhnereignissen registriert. Dazwischen ist noch der als ‚vorföhniger West‘ bezeichnete Wind einzustufen, der bei Föhnlagen weht, wenn der eigentliche Föhn nicht bis zum Talboden durchgreifen kann. Dieser ist am FLH am stärksten ausgeprägt, aber auch an den anderen Stationen zu finden.

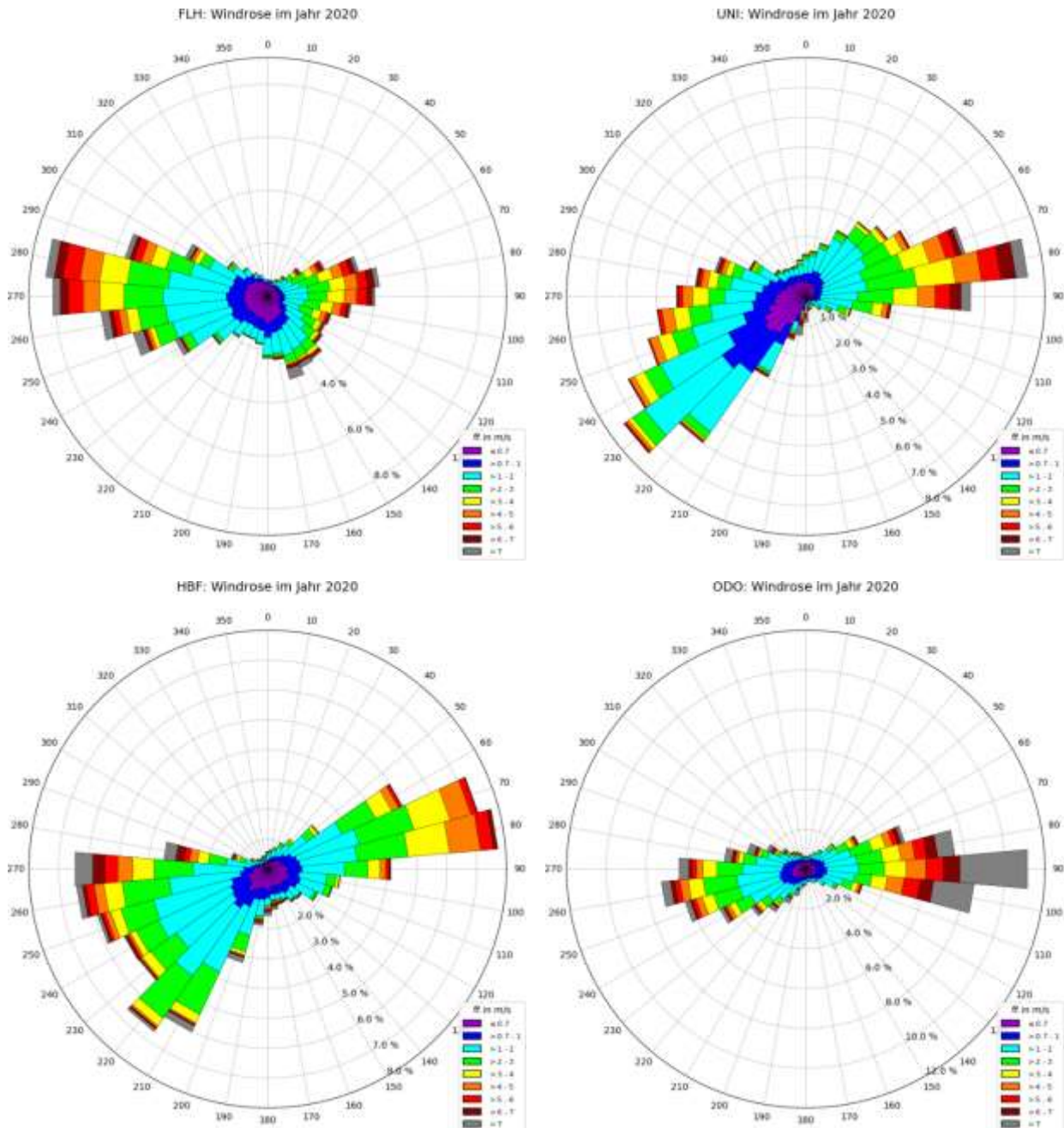


Abbildung 12: Windrosen, eingeteilt in 36 Richtungssektoren mit farbcodierten Geschwindigkeitsklassen am Flughafen (oben links), UNI (oben rechts), HBF (unten links) und ODO (unten rechts) für das Jahr 2020.

Auf dem Patscherkofel (nicht gezeigt) besteht die Windrose hauptsächlich aus zwei Keulen: eine breite aus NW bis NO mit geringen Sektorenhäufigkeiten (ca. 3 bis 8 %), und eine schmale aus SSO bis S. Dabei weist der 170°-Sektor mit ca. 21 % (bei insgesamt 36 Richtungssektoren) eine sehr starke Kanalisierung auf, es ist die „klassische Föhnrichtung“ auf dem Patscherkofel.

6.2 Windgeschwindigkeiten: 10 Minuten Mittelwind

Wie anhand der Tabelle 9 ersichtlich ist, lagen 2020 die Monatsmittel der mittleren Windgeschwindigkeiten an den Stationen am Talgrund zwischen 1,1 m/s und 4,0 m/s. Die

geringste mittlere Windgeschwindigkeit am Talboden wurde im Jänner gemessen (in dem es sehr stabil war, siehe Abschnitte 4.3 und 4.4), die höchste im Feber (UNI) bis März (restliche Stationen). Im Jahresmittel war der Wind am Talboden ähnlich stark wie 2016 und 2017 und etwas schwächer als 2018 und 2019. Am Patscherkofel wehte der Wind – wie auch in den letzten Jahren - in der kalten Jahreszeit stärker als in der von Hochdruck dominierten warmen.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
2020													
FLH	1,3	3,2	2,7	2,2	2,2	2,4	1,8	2,0	1,5	2,2	1,3	2,4	2,1
UNI	1,1	2,4	2,5	2,1	2,4	2,3	2,0	1,9	1,6	1,9	1,2	1,9	1,9
HBF	1,3	2,7	2,6	2,3	2,2	2,3	1,9	2,0	1,6	2,2	1,4	2,1	2,0
ODO	1,6	2,9	4,0	3,1	3,6	3,5	3,1	2,7	2,2	2,9	2,3	2,4	2,9
PAK	7,5	9,0	6,3	5,1	5,7	5,5	3,9	4,7	5,0	8,5	5,2	9,2	6,3
2019													
FLH	2,1	1,8	2,5	3,1	2,0	2,7	2,0	2,0	1,7	2,4	2,7	2,4	2,3
UNI	1,6	1,5	2,3	2,6	1,9	2,5	2,0	1,9	1,7	2,0	2,1	2,0	2,0
HBF	1,6	1,7	2,4	NA	NA	2,7	2,0	1,9	1,8	2,1	2,5	2,4	2,1
ODO	2,0	2,3	3,1	4,6	2,7	4,2	2,9	2,6	2,3	3,3	3,2	3,2	3,0
PAK	7,9	7,3	7,7	9,3	5,7	6,8	4,2	5,3	5,1	10,1	12,3	10,3	7,7
2018													
FLH	2,6	1,9	2,5	3,5	2,7	2,0	1,9	2,4	1,6	2,5	2,6	2,0	2,4
UNI	2,1	2,0	2,3	2,9	2,4	2,2	2,0	2,2	1,7	2,1	2,2	1,5	2,1
HBF	2,6	2,0	2,7	3,5	2,4	2,2	2,0	2,3	1,8	2,4	2,5	1,8	2,4
ODO	2,6	3,1	3,4	4,3	NA	3,1	2,9	3,1	2,5	3,3	3,3	2,0	3,1
PAK	10,3	5,9	8,6	10,5	6,2	4,4	3,7	4,7	3,9	10,1	10,5	7,3	7,2
2017													
FLH	1,9	2,4	2,4	2,3	2,6	2,5	2,1	2,1	1,6	1,6	1,5	2,2	2,1
UNI	1,6	2,1	2,0	2,2	2,2	2,3	1,9	1,8	1,5	1,4	1,4	1,8	1,8
HBF	1,9	2,1	2,2	2,2	2,4	2,3	1,9	1,9	1,7	1,6	1,5	2,2	2,0
ODO	1,9	2,5	3,2	3,4	3,5	3,2	2,8	2,8	2,0	1,9	1,6	2,4	2,6
PAK	7,6	9,2	8,2	6,8	6,4	5,9	5,2	6,0	5,6	5,9	7,7	9,6	7,0
2016													
FLH	1,8	2,5	2,5	2,8	2,8	2,0	1,8	1,7	1,7	2,0	2,3	1,5	2,1
UNI	1,4	2,1	2,3	2,5	2,3	1,9	1,8	1,7	1,6	1,9	2,1	1,2	1,9
HBF	1,6	2,3	2,2	2,5	2,4	1,9	1,8	1,8	1,8	2,1	2,5	1,6	2,0
ODO	1,8	3,3	3,6	4,3	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2,8	3,5	1,8	2,9
PAK	7,5	10,6	6,9	9,3	7,5	4,2	4,4	3,7	5,1	6,9	10,5	6,6	6,9

Tabelle 9: Monats- und Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s an den Stationen mit Windmessung in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2020 (oben) und den Jahren davor seit 2016.

In Tabelle 10 sind die drei stärksten Windereignisse jeder Station gelistet. Die höchsten 10-Minuten Mittel wurden 2020 bei Südföhlagen (28.01., 27.02., 29.02., 02.03., 03.10., 04.12., 27./28.12.) registriert bzw. im Zusammenhang mit Frontdurchgängen (meist mit Westwind:

04.02., 26.02., 27.06., 01.08.; einmal mit Nordwind: 23.05.). Anders als in den vergangenen Jahren wurden die zwei stärksten Ereignisse im Tal am Flughafen (mit Westwind bei Frontdurchgang) gemessen und nicht im Olympischen Dorf, wo bei Föhn hohe Windgeschwindigkeiten erreicht werden.

	FLH			UNI			HBF			ODO			PAK		
	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd
1.	26.02.	25,0	281	23.05.	16,6	344	01.08.	14,4	270	02.03.	20,6	216	03.10.	39,5	167
2.	04.02.	21,0	269	29.02.	12,6	188	26.02.	13,6	272	28.12.	20,4	225	27.12.	33,4	174
3.	28.01.	18,2	284	28.12.	12,4	191	27.06.	13,3	254	27.02.	19,4	211	04.12.	33,0	167

Tabelle 10: Datum, Windgeschwindigkeit im 10-Minutenmittel (ff, in m/s) und Windrichtung (dd, in Grad) der jeweils drei stärksten Ereignisse im Jahr 2020.

6.3 Windgeschwindigkeiten: 2 Sekunden Böen

Interessanter als der Mittelwind über den Gesamtzeitraum oder die einzelnen Monate sind vor allem im Hinblick auf Schadenspotential Starkwindereignisse. Als Untergrenze für Schadereignisse gelten Windböen von 6 Beaufort (=10,8 m/s), deutlich kritischer ist aber der Schwellenwert von 8 Beaufort (=17,2 m/s). Tabelle 11 gibt eine Übersicht zur prozentuellen Überschreitungszeit der beiden Grenzwerte. Die Grenzwerte wurden 2020 an allen fünf Stationen seltener überschritten als in den beiden Vorjahren. Die Überschreitungshäufigkeit lag jedoch bei den Stationen am Talgrund in der Bandbreite der vergangenen Jahre, am Patscherkofel wurden die niedrigsten Werte seit 2016 registriert.

	≥ 6 Beaufort					≥ 8 Beaufort				
	% Gesamtzeit					% Gesamtzeit				
	FLH	UNI	HBF	ODO	PAK	FLH	UNI	HBF	ODO	PAK
2020	4,6	4,2	4,7	9,9	25,5	1,0	0,7	0,8	1,5	10,1
2019	6,9	5,5	6,0	10,4	35,2	1,4	0,9	0,7	3,8	16,2
2018	6,3	5,4	6,9	10,8	31,7	1,1	0,8	0,9	2,5	15,1
2017	5,0	3,7	4,8	7,4	31,2	1,0	0,4	0,6	1,2	11,3
2016	4,8	4,5	6,1	8,7	28,1	0,7	0,6	0,7	2,2	13,5

Tabelle 11: Prozentuelle Überschreitungzeiten der Böen von 6 bzw. 8 Beaufort (mit Ausnahme der Station Patscherkofel farbkodiert) in den Jahren 2016 bis 2020 bezogen auf die gesamte Periode des jeweiligen Jahres für alle Stationen mit Windmessung.

In Tabelle 12 sind die drei stärksten Böenereignisse jeder Station gelistet. Spitzenreiter im Tal ist auch hier die Station Universität, mit einer Westwindböe von 143 km/h. Die meisten Ereignisse sind auch hier mit Föhn (erkenntlich an den südlichen Richtungen im ddx) oder Frontalereignissen (mit Böen aus Südwest bis Nordwest) verknüpft.

	FLH			UNI			HBF			ODO			PAK		
	Datum	ffx	ddx	Datum	ffx	ddx	Datum	ffx	ddx	Datum	ffx	ddx	Datum	ffx	ddx
1.	05.02.	39,6	267	23.05.	28,8	318	27.12.	26,0	159	27.02.	33,2	200	03.10.	48,6	174
2.	26.02.	35,0	278	29.02.	27,3	191	05.03.	25,5	197	02.10.	33,0	257	27.02.	41,3	160
3.	27.06.	32,3	243	28.07.	25,8	306	10.02.	25,0	196	04.12.	31,3	225	27.12.	39,7	182

Tabelle 12: Datum, Windgeschwindigkeit der 2-Sekunden Böe (ffx, in m/s) und dazugehörige Windrichtung (ddx, in Grad) der jeweils drei stärksten unabhängigen Ereignisse im Jahr 2020.

6.4 Kalmen

Windstille und sehr schwacher Wind werden als Kalmen bezeichnet. In Gebieten mit Schadstoffeintrag führen (längere) Perioden mit Kalmen auf Grund der geringen Durchmischung zu einer Erhöhung der Schadstoffkonzentration. In der vorliegenden Auswertung sind Halbstundenmittelwerte (HMW) mit Windgeschwindigkeiten von weniger als 0,8 m/s als Kalmen definiert.

Je länger die Kalmendauer, umso größer ist die Auswirkung auf die Schadstoffkonzentration. Tabelle 13 enthält die Übersicht zur Kalmen-Auswertung für 2020. Längere windstille Perioden wurden 2020 nicht verzeichnet. Kalmen länger als 12 Stunden (ab 25 HMW) traten wie schon in den Vorjahren gar nicht auf.

HMW-Dauer		ANZAHL PERIODEN				
von	bis	FLH	UNI	HBF	ODO	PAK
1	2	1697	1674	1337	1519	313
3	6	446	343	302	274	19
7	12	51	32	35	18	0
13	24	6	2	2	1	0
25	48	0	0	0	0	0
49	inf	0	0	0	0	0
Summe der HMW		4405	3656	3127	3079	444
Summe (%)		25,1	20,9	17,8	17,6	2,5

Tabelle 13: Häufigkeit verschiedener Klassen der Kalmendauer und Summe aller Halbstundenmittelwerte (HMW) an den verfügbaren Windstationen im Jahr 2020. Bei Kalmen liegt die Windgeschwindigkeit im HMW unter 0,8 m/s.

Eine Kalmendauer von 6,5 bis 12 Stunden (13 bis 24 HMW) wurde sechsmal am Flughafen erreicht, sonst nur ein- bis zweimal. Gesamt traten Kalmen am Flughafen in etwas über einem Fünftel der Gesamtzeit auf (25,1 %), sonst im Bereich vom Talgrund mit 17,6 bis 20,9 %, und naturgemäß auf dem Patscherkofel selten mit rund 2,5 %. Der Grund, dass Kalmen an den Standorten in der Stadt grundsätzlich seltener sind als am relativ frei liegenden Flughafen, dürfte einerseits an der Höhe des Windsensors über Grund liegen⁵ und andererseits daran, dass sich die

⁵ Am Boden ist die Windgeschwindigkeit auf Grund der Rauigkeit und der daraus resultierenden Reibung Null. Mit der Höhe nimmt der Wind in einer logarithmischen Form zu.

Stadt mehr im Einflussbereich des Wipptals mit Föhn und nächtlichem Ausfließen befindet als der Flughafen. Für die Stationen am Talgrund sind in der Tabelle 13 die prozentuellen Kalmenhäufigkeiten seit 2016 (gerundet auf ganze Prozent) zusammengefasst. Im Jahr 2020 waren windschwache Situationen ähnlich häufig wie 2017 und etwas häufiger als in den anderen Vergleichsjahren.

	Kalmenhäufigkeit (% Gesamtzeit)				
	2016	2017	2018	2019	2020
FLH	23	24	21	24	25
UNI	20	20	17	18	21
HBF	17	17	14	15	18
ODO	18	20	16	17	18

Tabelle 14: Kalmenhäufigkeit in % der Gesamtzeit (auf Basis HMW) für die Jahre 2016 bis 2020.

7 Fazit

Auch im Jahr 2020 konnte bei den TEMPIS-Stationen eine hohe Messqualität erreicht werden. Nennenswerte Ausfälle betreffen ein defektes Kabel im O-Dorf, wodurch die Werte der relativen Feuchte von Mitte Juni bis Anfang Juli fehlen, sowie ein Defekt bei der Belüftung der Station Rastlboden zwischen 14. und 24. September.

Das Jahr 2020 war wieder sehr warm, konkret das fünftwärmste der Messgeschichte. Das spiegelt sich auch in den Hangprofilmessungen wider.

Die Inversionshäufigkeit in der Schicht Flughafen – Hungerburg war mit zirka 30 % höher als in den vergangenen Jahren, wobei im Jänner besonders viele stabile Lagen verzeichnet wurden. Ein statistisch signifikanter Trend ist bei der vertikalen Schichtung jedoch nicht feststellbar. Aus einer Zeitreihendarstellung der Inversionen in ausgewählten Schichten samt Föhninformation konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen bzw. bestätigt werden.

Ein weiterer Fokus liegt im vorliegenden Bericht auf dem Stadteffekt. Interessanterweise gibt es zwei Situationen, in denen die städtische Überwärmung besonders hoch ist. Und zwar einerseits nachts im Winter, wenn die Heizwärme die Innenstadt weniger stark auskühlen lässt. Und andererseits im Hochsommer, in dem sich das Stadtzentrum mit seinem hohen Versiegelungsgrad durch starke Einstrahlung im Vergleich zum Umland stark aufheizen kann. Tendenziell ist die städtische Überwärmung umso geringer, umso stärker der Wind ist, weil dieser zu einer besseren horizontalen Verteilung beiträgt.

Detaillierte Ergebnisse des Inversionsvorkommens im Zeitraum 1999 – 2020 sowie des Einflusses der städtischen Bebauung auf die meteorologischen Verhältnisse sind dem Bericht „Vertiefende Analysen des erweiterten Innsbrucker Hangprofiles“ zu entnehmen, der im Rahmen eines internen Projektes erstellt wurde und auf Anfrage gerne zugeschickt wird.