

Auswertung

des TEMPIS-Hangprofils Innsbruck

für das Jahr 2022

Durchführung

GeoSphere Austria
Regionalstelle Tirol und Vorarlberg

Erstellt von
Dr. Susanne Drechsel
und
Dr. Johannes Vergeiner

Innsbruck, am 28.03.2023

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Stationen des Innsbrucker Hangprofils	3
3	Datenverfügbarkeit und -qualität im Jahr 2022	5
4	Auswertung der Temperatur im Jahr 2022	5
4.1	Monats- und Jahresmitteltemperatur	5
4.2	Temperaturprofile	7
4.3	Stabilität	10
4.4	Inversionen	13
4.5	Einordnung in die Innsbrucker TEMPIS-Reihe seit 1999	16
5	Auswertung der Feuchte im Jahr 2022	18
6	Auswertung des Windes im Jahr 2022	21
6.1	Windrichtung	21
6.2	Windgeschwindigkeiten: 10 Minuten Mittelwind	22
6.3	Windgeschwindigkeiten: 2 Sekunden Böen	24
6.4	Kalmen	25
6.5	Wind während Inversionsbedingungen	26
7	Zusammenfassung	29

1 Einleitung

Die Auswertung des TEMPIS Hangprofils für das Jahr 2022 liefert nun bereits den siebten Jahres-Überblick über die Temperatur- und Feuchteverteilung der Innsbrucker Talatmosphäre und die Windverhältnisse im Inntal. Neben den bekannten Stabilitäts- und Inversionsanalysen inklusive der Zeitreihe des Inversionsgeschehens in der Innsbrucker Talatmosphäre (in Abschnitt 4.5) wurde das aktuelle Jahr in den Kontext der mittleren Inversionshäufigkeit und –stärke der Gesamtmessreihe 1999 – 2022 gestellt. Darüber hinaus wurde *zum ersten Mal* untersucht, wie sich der *Wind während Inversionsbedingungen* verhält.

2 Stationen des Innsbrucker Hangprofils

Bei den Stationen gibt es keine Veränderungen zu den letzten 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 **TEMP**eratur-**Informations-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 GeoSphere Austria am Flughafen (FLH) und auf dem Patscherkofel (PAK), sowie der in Kooperation mit dem Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften betriebenen Station Universität (UNI). Abbildungen A1 bis A6 im Appendix zeigen die einzelnen Stationen in ihrer Umgebung.

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.

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.

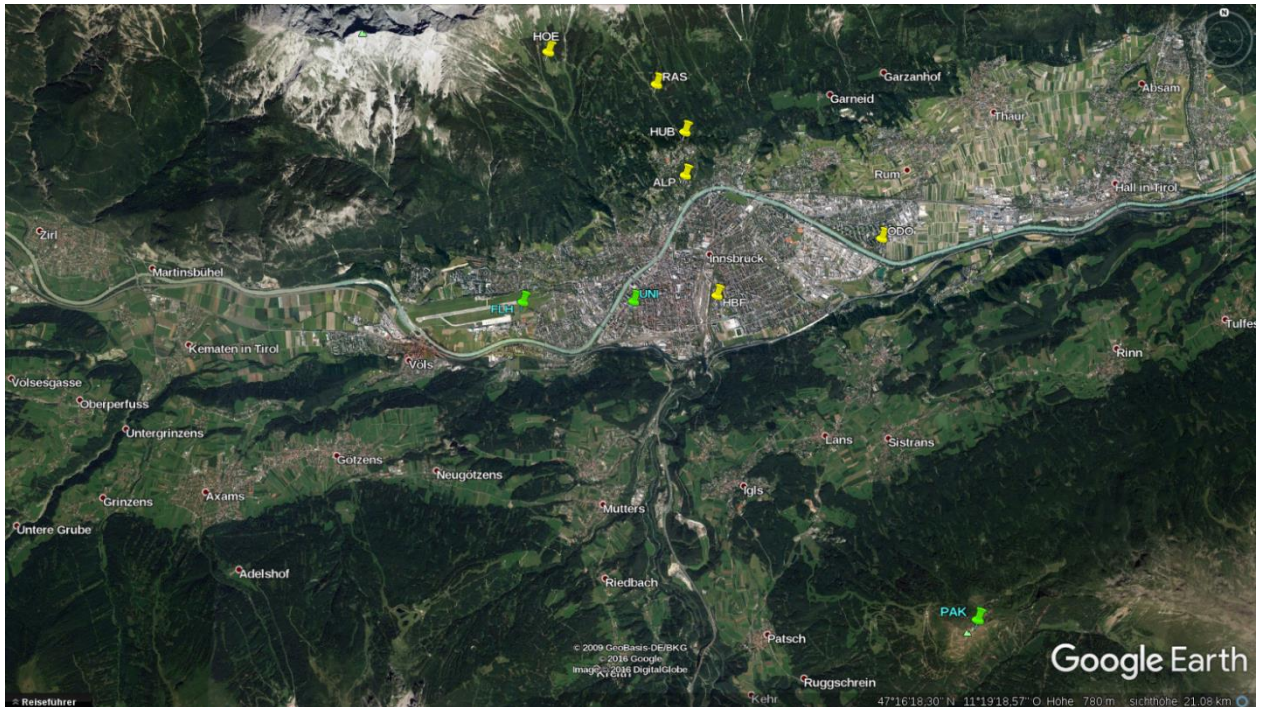


Abbildung 1: Satellitenfoto mit den Standorten der TEMPIS-Stationen (gelb) und zusätzlich der TAWES der GeoSphere Austria (grün) im Bereich Innsbruck, der Nordkette und auf dem Patscherkofel (Quelle: Google Earth).

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.

3 Datenverfügbarkeit und -qualität im Jahr 2022

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.

Die Datenverfügbarkeit für die Standorte bzw. Parameter für das Jahr 2022 liegt bei den Talstationen bis inklusive zur Hungerburg hinauf, sowie am Patscherkofel größtenteils zwischen knapp 98 und 100 %, wobei die Ausfälle oft nur wenige Stunden dauerten. Eine klare Ausnahme davon ist die Station Olympisches Dorf, wo nur rund 61 % der Feuchtedaten zur Verfügung stehen. Ursache für den fast fünfmonatigen Datenausfall vom 22.5. bis zum 12.10. war ein defektes Hygrometerkabel. Vom 11. bis 18.7. fehlen auch die anderen Parameter der Station. Bei den Stationen Rastlboden und Höttinger Alm beträgt die Datenverfügbarkeit 92,2 bzw. 94,4 %. Auf der HOE verursachten Modemprobleme übers ganze Jahr immer wieder mehrstündige bzw. mehrtägige Ausfälle. Am RAB kam es gleich zu Jahresbeginn bis zum 19.1. zu einem fast dreiwöchigen Ausfall. Auf dem Patscherkofel ist in der zweiten Novemberhälfte der Feuchtesensor ausgefallen. Er konnte erst Anfang Dezember ausgetauscht werden, weshalb hier nur 96 % der Daten vorhanden sind.

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.

4 Auswertung der Temperatur im Jahr 2022

Für die Auswertung ist eine Mindestverfügbarkeit von 80 % an 10-Minuten Daten im betrachteten Zeitintervall gefordert. Diese Voraussetzung wurde für die Temperatur abgesehen von RAB im Januar und ODO im Juli an allen Stationen und in allen Monaten im Jahr 2022 erfüllt.

4.1 Monats- und Jahresmitteltemperatur

Tabelle 2 zeigt die Monats- und Jahresmittel der Temperatur an allen betrachteten Stationen im Jahr 2022. Die Jahresmittelwerte lagen bei rund 11 °C im Stadtgebiet und 2,2 °C auf dem Patscherkofel. Damit war es um 1,2 – 1,9 °C wärmer als im Vorjahr und mit wenigen Ausnahmen auch wärmer als in den letzten sechs Jahren seit Beginn der hochauflösenden TEMPIS-Reihe 2016 (nicht gezeigt). Nur 2018 lagen die Werte in der Stadt bis inklusive zur HBG um bis zu 0,4 °C über denen von 2022. Betrachtet man die bis 1877 zurückreichenden

Temperaturreihen Universität Innsbruck, stellt sich heraus, dass 2022 zusammen mit 2018 die beiden wärmsten Jahre seit Messbeginn sind.

Bezogen auf das aktuelle Klimamittel 1991-2020 war es sowohl an der UNI als auch auf dem PAK um 1,3 ° wärmer als im Referenzzeitraum. Dabei waren an der UNI und am PAK nur die beiden Monate April und September (um 0,2 bis 1,3 C) unterdurchschnittlich, alle anderen Monate (um 0,5 bis 4,2 °C) überdurchschnittlich temperiert (vergleiche Tabelle 3). Bis zum RAB hinauf lagen alle Monatsdurchschnittstemperaturen über dem Gefrierpunkt. Selbst auf der HOE zeigen nur die Wintermonate Dezember bis Feber leicht frostige Mittelwerte, auf dem PAK verlängert sich der Zeitraum von November bis April auf ein halbes Jahr. Über das gesamte Höhenprofil betrachtet fiel der Juli am wärmsten aus, jedoch deutlich weniger heiß als der Rekordjuni 2019, welcher (zusammen mit dem Juni 2003) mit einem Monatsmittel von knapp 22 °C in der Stadt der heißeste Monat der Messgeschichte seit 1877 war.

NAME	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
FLH	0,4	2,3	6,4	9,4	16,1	19,6	20,2	19,8	13,6	12,5	5,3	0,7	10,6
UNI	0,9	3,0	7,4	10,0	16,6	20,2	20,9	20,5	14,0	13,0	5,8	1,3	11,2
HBF	1,1	2,9	8,6	9,5	16,2	19,9	20,5	20,2	13,8	13,2	5,9	1,3	11,2
ODO	1,0	2,7	7,2	9,3	16,0	19,6	NA	20,0	13,6	13,5	5,9	1,3	10,7
ALP	1,2	2,9	7,4	9,6	16,0	19,4	20,1	20,0	13,4	13,3	6,0	1,5	11,0
HBG	0,7	2,0	5,7	7,4	13,9	17,6	18,1	18,0	11,6	12,5	5,3	1,2	9,5
RAB	NA	0,8	3,9	5,4	12,1	15,8	16,5	16,2	10,5	12,2	4,5	1,0	8,7
HOE	-0,6	-0,7	1,8	3,4	9,9	14,1	14,8	14,6	8,4	11,0	3,3	-0,1	6,8
PAK	-5,1	-5,4	-3,0	-1,7	5,3	9,8	10,5	10,0	4,0	6,5	-1,3	-3,9	2,2

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 2022. 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.

Abweichungen 2022 vom Klimamittel 1991 - 2020													
NAME	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
UNI	1,5	1,8	0,9	-0,2	2,1	2,4	1,6	1,6	-0,6	3,0	1,3	0,5	1,3
PAK	0,8	1,0	1,2	-0,3	2,5	3,1	1,7	0,9	-1,3	4,2	0,8	1,0	1,3

Tabelle 3: Temperaturabweichungen 2022 in °C in den einzelnen Monaten und des Gesamtjahres vom Klimamittel 1991 - 2020. Quelle: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring/>

Der Temperaturunterschied von 0,6 °C im Jahresschnitt 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. Details zum Stadteffekt sind im Bericht für 2020 in Abschnitt 4.5 zusammengefasst.

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 Feber, April, Juli und Dezember 2022 zu sehen.

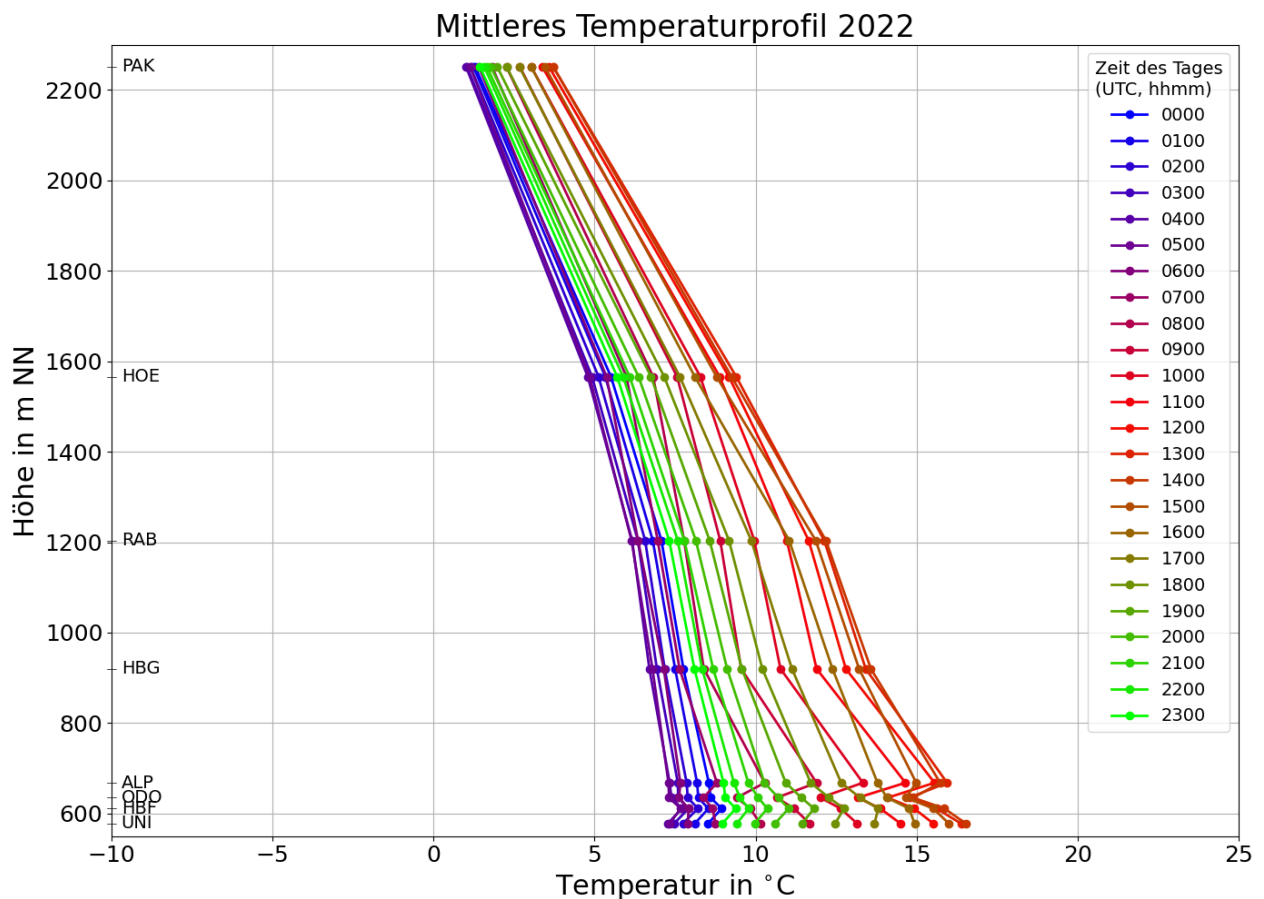


Abbildung 2: Mittlere stündliche Temperaturprofile im Jahresmittel 2022. Zur Umrechnung auf Mitteleuropäische Zeit (MEZ) ist eine Stunde zu addieren, 12 Uhr UTC entspricht also beispielsweise 13 Uhr MEZ.

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 also stabiler ist als tagsüber (rote und hellbraune Linien). Der Grund dafür ist, dass der mittlere Tagesgang in den unteren Niveaus mit etwa 8 bis 9 Grad an den Stationen UNI,

HBF, ODO und ALP deutlich größer ist als weiter oben¹ an den Stationen HOE und PAK mit nur ca. 3 bis 4 Grad. 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.

Ebenso sind die Profile im Allgemeinen während der kühlen Jahreszeit steiler, da es dann im Durchschnitt stabiler ist. Im Jahr 2022 traf dies besonders auf den Dezember zu. Dabei war es wie in Tabelle 3 gezeigt, an der UNI um 0,5 Grad wärmer als im Mittel von 1991-2020, und auf dem Patscherkofel um 1,0 Grad. Nach einem eher durchschnittlich temperierten Beginn folgte bis zur Monatsmitte eine ziemlich kalte Phase in Verbindung mit mehreren, teils markanten Tiefs, die mit Kaltluft gefüllt waren. Kurz vor Weihnachten stellte sich eine kräftige West- bis Südwestlage ein, die sehr milde Luftmassen mit sich brachte. Diese konnten sich allerdings nur an den höheren Stationen gut durchsetzen, während es im Tal bis in mittlere Niveaus deutlich kühler blieb, was in Summe eine stabile Schichtung zur Folge hatte.

Insgesamt hängt die Stabilität vor allem in der kalten Jahreszeit stark von den dominierenden Wettersystemen und deren Luftmassen ab. Je nach Ursprungsregion können diese für große Unterschiede in der Temperatur und der Schichtung sorgen. Hochdruckeinfluss geht zum Beispiel oft mit eher milder Luft in der Höhe einher, während sich im Tal Kaltluft bilden bzw. halten kann. Die Kürze des Tages und der sehr niedrige Sonnenstand bedingen in solchen Phasen eine vergleichsweise geringe Tageserwärmung. Damit bleibt es dann auch tagsüber viel stabiler als im Sommer, wenn hoher Sonnenstand an den langen Tagen die Talatmosphäre so stark er- bzw. überwärmen kann, dass es zu einer adiabatischen bzw. überadiabatischen und somit instabilen Schichtung kommt. Zudem sind Tiefdruckgebiete, die mit hohen Windgeschwindigkeiten für Durchmischung sorgen, im Winter tendenziell häufiger als in der warmen Jahreszeit. Daher unterscheiden sich Temperaturprofile im Winter von Jahr-zu-Jahr meist mehr als im Sommer: während die Profile z.B. aus den Jahren 2019 bis 2022 im Juli relativ ähnlich sind, findet man recht große Unterschiede im Feber (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 3).

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.

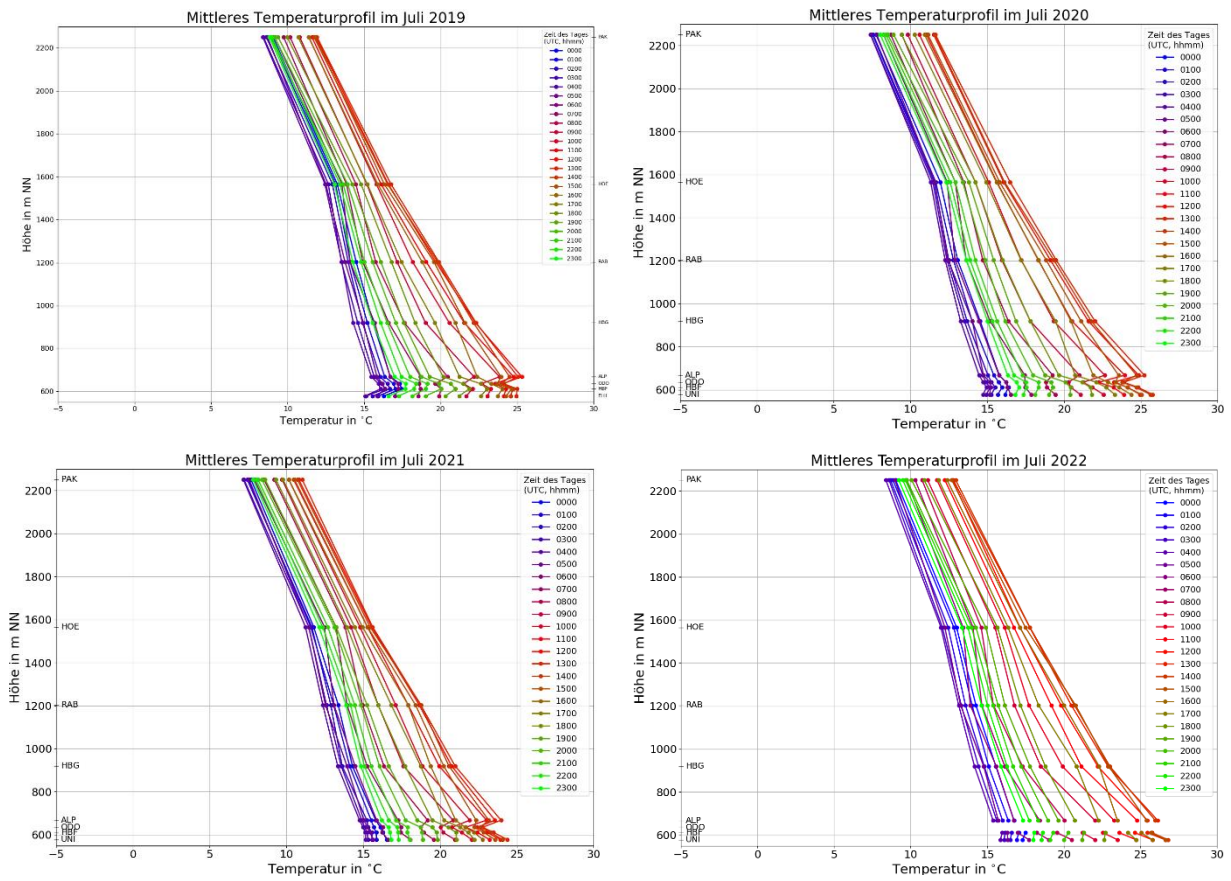


Abbildung 4: Die Temperaturprofile im Juli in den Jahren 2019 bis 2022 unterscheiden sich relativ wenig voneinander. Wetterlagen haben in dieser Jahreszeit nur einen geringen Einfluss.

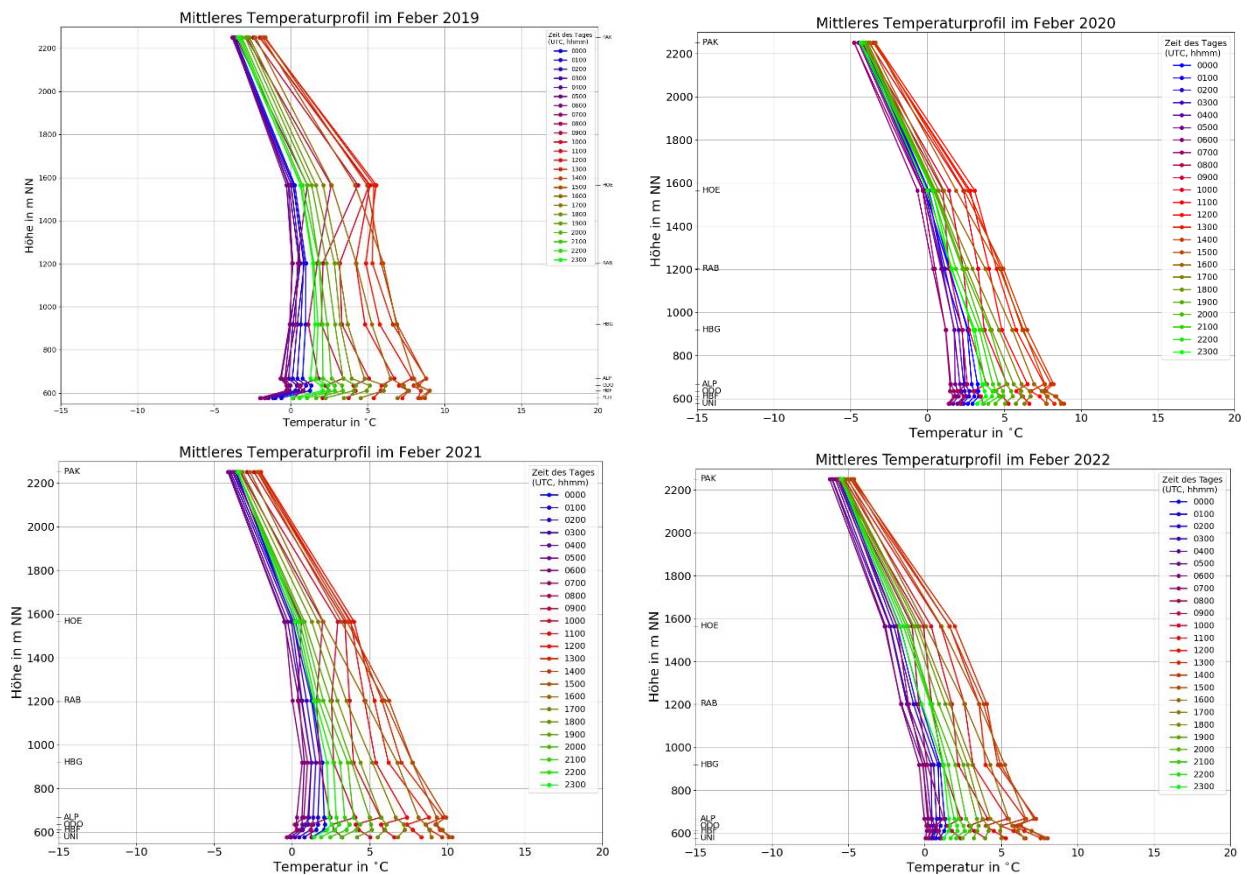


Abbildung 3: Die Temperaturprofile im Feber in den Jahren 2019 bis 2022 unterscheiden sich recht stark voneinander, was den starken Einfluss von Wetterlagen in dieser Jahreszeit verdeutlicht.

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.

Jahr 2022					
Schicht	Häufigkeit (%)				
	sehr labil	labil	neutral	stabil	sehr stabil
FLH - HBG	0,8	14,7	44,0	24,8	15,9
HBG - RAB	0,9	15,4	52,3	24,5	7,0
RAB - HOE	1,0	14,9	44,9	34,3	4,9
HOE - PAK	0,3	16,7	72,4	10,6	0,0
Mittel 2016 - 2021					
Schicht	Häufigkeit (%)				
	sehr labil	labil	neutral	stabil	sehr stabil
FLH - HBG	0,6	14,6	44,9	24,2	15,8
HBG - RAB	0,9	16,9	50,2	25,0	7,0
RAB - HOE	0,8	16,1	44,3	33,2	5,5
HOE - PAK	0,5	18,1	71,8	9,5	0,1

Tabelle 5: Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Stabilitätsklassen in den übereinanderliegenden Schichten im Jahr 2022 (oben) sowie im Schnitt der Jahre 2016 - 2021.

Tabelle 6 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Stabilitätsklassen für vier aufeinanderfolgende Schichten vom Talboden bis zum Patscherkofel im Jahr 2022 sowie im Schnitt der Jahre 2016 bis 2021. (Sehr) stabile Lagen kommen am häufigsten in der bodennahen Schicht FLH – HBG vor. In dieser Schicht war es 2022 insgesamt zu knapp 41 % stabil oder sehr stabil geschichtet, im 6-Jahresschnitt waren es 40 %. Mit zunehmender Höhe der Schicht über Grund ist es öfter neutral geschichtet. Der recht hohe Anteil an stabilen Lagen vom Rastlboden bis zur Höttinger Alm kommt – wie auch in den anderen Schichten - überwiegend aus den Nachtstunden (nicht gezeigt). Es wäre eine vertiefte Untersuchung wert, inwiefern diese Häufung an abgehobenen stabilen Schichten zwischen 600 und 1000 m über Grund die reale Talatmosphäre widerspiegelt. Sicher ist, dass auch die lokale Lage der Stationen sowie die jeweiligen Sonnenauf- und -untergangszeiten eine Rolle spielen.

Die Stabilitätsverteilungen im Jänner und Mai sind der Abbildung A8 im Appendix zu entnehmen. Im Jänner 2022 dominierten stabile und sehr stabile Lagen bis zur Höttinger Alm, also bis etwa 1000 m über Grund. Im Mai hat sich dies grundlegend verändert und in allen Schichten waren neutrale Verhältnisse am häufigsten.

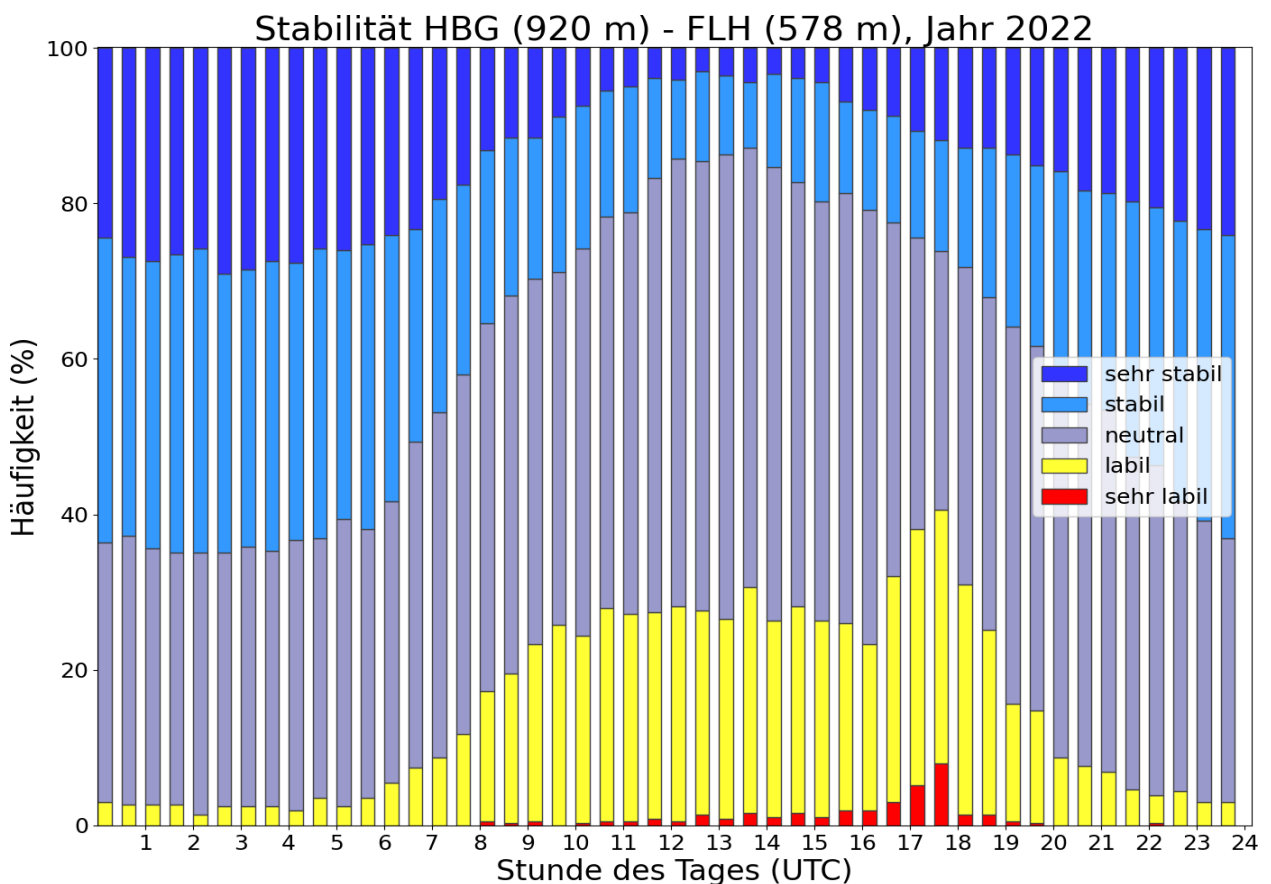


Abbildung 5: Tageszeitliche Verteilung der Stabilitätsklassen aus den halbstündlichen Temperaturmitteln in der 342 m dicken Schicht zwischen Flughafen und Hungerburg im Jahr 2022.

Die mittlere tageszeitliche Verteilung der Stabilitätsklassen in der Schicht zwischen Flughafen und Hungerburg ist in Abbildung 5 dargestellt. Im Jahresschnitt dominierten nachts ab etwa 21 UTC bis in die Morgenstunden um ca. 7 UTC die (sehr) stabilen Verhältnisse (ca. 50 bis 60 %), ansonsten die neutrale Schichtung. Mit der Einstrahlung stieg die Häufigkeit der labilen Klasse vormittags auf über 20 %, den Maximalwert erreichte sie zwischen etwa 17 und 18 UTC mit knapp 40 %. Die Abendspitze der labilen Werte ist wohl auf das späte Temperaturmaximum am Flughafen zurückzuführen, bedingt durch die begünstigte Sonneneinstrahlung. Die mittlere tageszeitliche Stabilitätsverteilung ist jener der Vorjahre sehr ähnlich.

In der Abbildung A9 im Appendix wird der Tagesgang der Monate August und Dezember exemplarisch gezeigt. Im August nahmen die labilen Schichtungsverhältnisse untertags aufgrund des hohen Strahlungsangebotes schnell zu, am späten Nachmittag überschritt ihre Häufigkeit die 50 %-Marke. Die übrige Zeit dominierte die neutrale Schichtung, während es nur nachts überwiegend stabil geschichtet war. Im Dezember hingegen ist der Tagesgang sehr geringer und die stabilen Lagen dominieren den ganzen Tag über.

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)						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1-2	258	347	331	296	295	265	285	0,9	1,3	1,3	1,1	1,1	1,0	1,0
3-6	76	85	109	84	79	83	69	0,9	1,0	1,4	1,0	1,0	1,0	0,8
7-12	40	46	53	49	35	37	36	1,0	1,2	1,4	1,4	1,0	1,0	1,0
13-24	90	76	91	88	99	81	101	5,1	4,0	5,2	4,9	5,5	4,4	5,5
25-49	49	80	81	83	66	77	83	4,7	7,7	7,9	8,3	6,6	7,8	8,4
≥ 49	16	13	14	16	23	22	13	6,3	4,4	3,9	4,0	8,3	5,6	4,5
SUMME								19,0	19,7	21,1	20,7	23,5	20,7	21,2

Tabelle 6: Häufigkeit verschiedener Dauerstufen mit (sehr) stabiler Schichtung zwischen Flughafen (578 m) und Hungerburg (920 m), sowie deren Gesamtdauer in den Jahren 2016 bis 2022. Fett gedruckte Werte bedeuten, dass sie 2022 höher oder niedriger sind als in den Jahren zuvor. Wie in Tabelle 4 definiert, bedeutet (sehr) stabil eine Temperaturabnahme von höchstens 0,4 °C/100 m. HMW steht für Halbstundenmittelwert.

Die Gesamtdauer aller (sehr) stabilen Phasen war 2022 mit 21,2 Wochen vergleichbar mit jener der Jahre 2018, 2019 und 2021 und markant kürzer als im Jahr 2020. Damit ist 2022 hinsichtlich der Häufigkeit stabiler Lagen als durchschnittliches Jahr in der vorhandenen Datenreihe zu klassifizieren.

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 bzw. -belastungen) kommen.

Abbildung 6 zeigt die Verteilung der Inversionshäufigkeit in den aufeinanderfolgenden Schichten FLH-HBG, HBG-RAB, RAB-HOE und HOE bis PAK im Jahr 2022. Im Großen und Ganzen nahm die Inversionshäufigkeit wie auch in den Vorjahren mit der Höhe ab. Die Ausnahme war die Schicht Rastlboden bis Höttinger Alm, da sich in diesem Höhenbereich – wie bereits im Abschnitt 4.3 erwähnt – ein wenig öfter abgehobene Inversionen bildeten. Im Jahr 2022 kamen Inversionen in der untersten Schicht zu knapp 25 % vor, bei (gut) 13 bzw. fast 15 % in den beiden folgenden Schichten und nur zu rund 1 % der Zeit herrschten in der Schicht zwischen Höttinger Alm und Patscherkofel Inversionsbedingungen. Wenig überraschend kam eine Temperaturzunahme mit der Höhe mehrheitlich nachts (hier definiert als Zeit von 18 bis 07 Uhr UTC) vor.

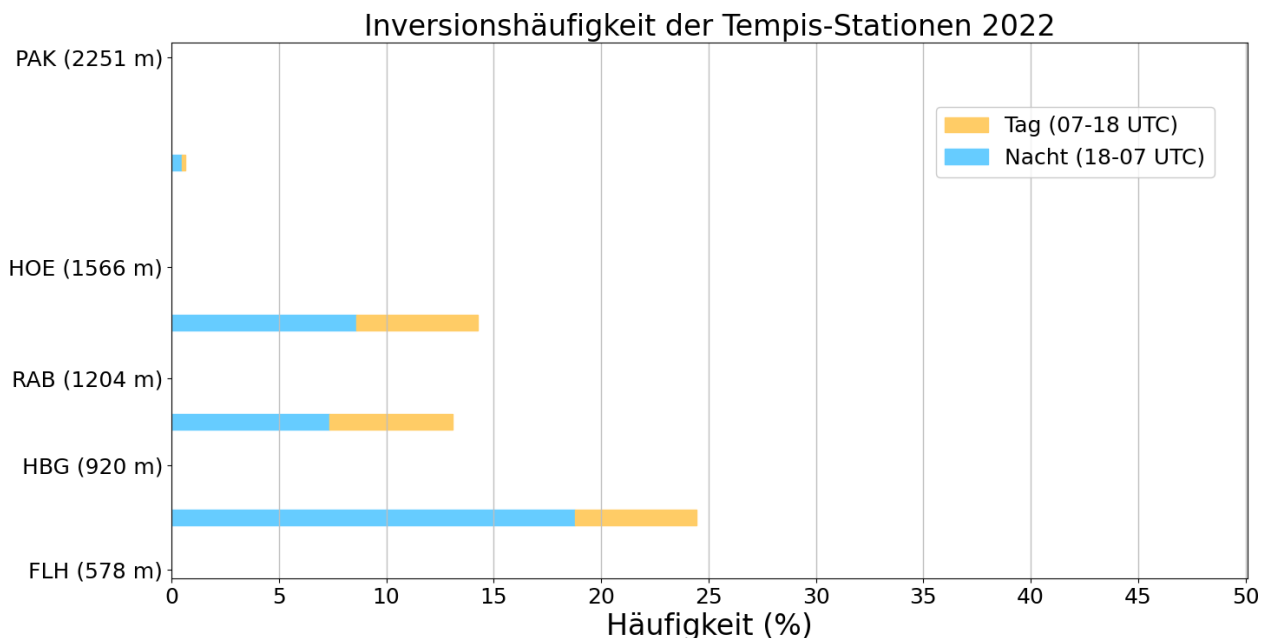


Abbildung 6: Häufigkeit der Inversionen in den verschiedenen Schichten im Jahr 2022. Gelbe Balken stehen dabei für den Anteil zwischen 7 und 18 UTC (8 und 19 MEZ), blau für den Anteil zwischen 18 und 7 UTC (19 und 8 MEZ), vereinfacht also für den Tages- und Nachtanteil.

In Abbildung 7 wird der zeitliche Verlauf der Inversionen im Jahr 2022 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 der Legende gezeigte Farbkodierung in Schritten von $0,5\text{ °C}/100\text{ m}$ 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.

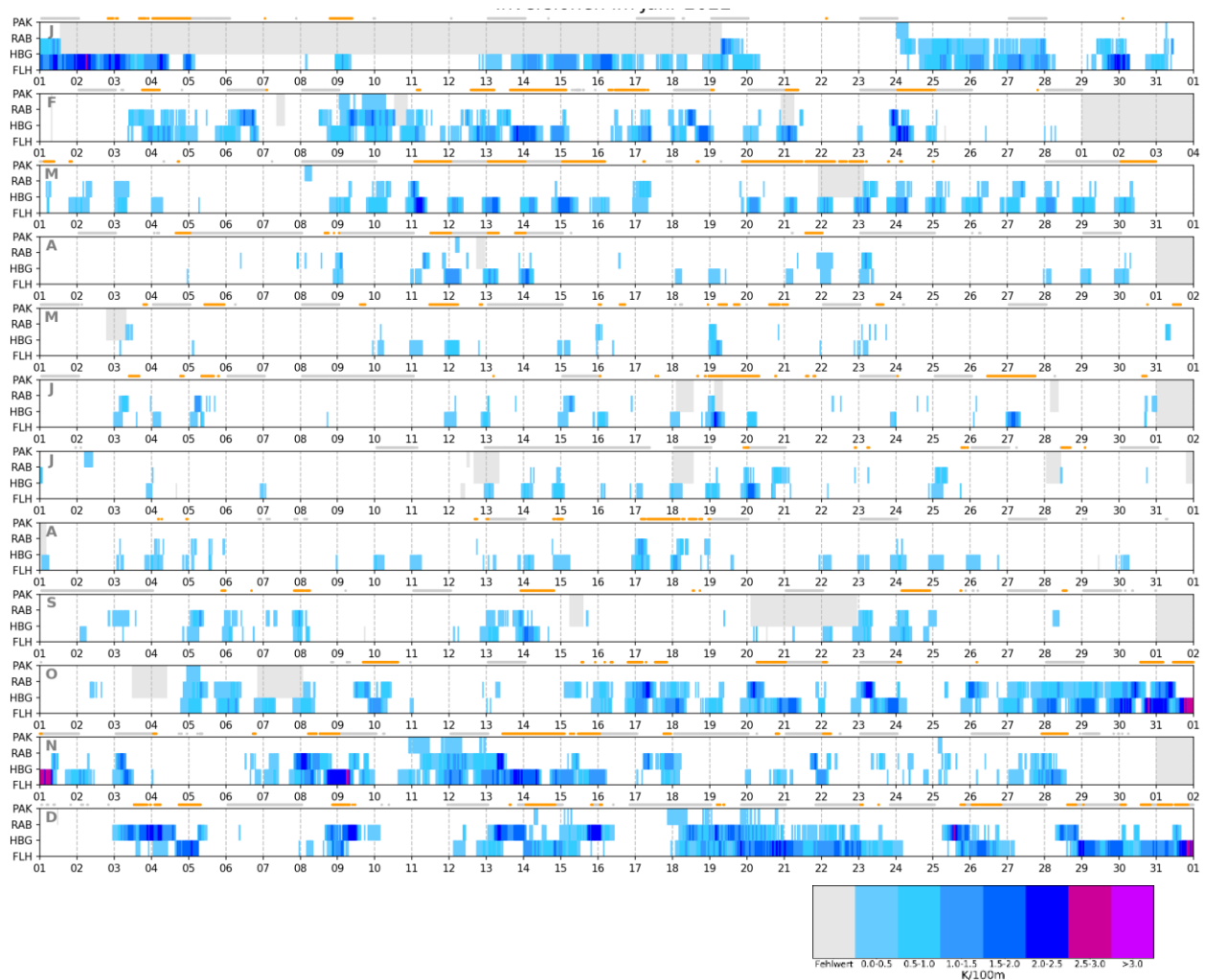


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der Inversionen im Jahr 2022 in den Schichten FLH – HBG, HBG – RAB und RAB – PAK auf Basis von Halbstundenmittelwerten samt Legende mit Zuordnung der Farbskala (rechts unten). Weitere Erklärungen sind dem Text zu entnehmen.

Der saisonale Verlauf der Inversionen tritt klar zu Tage. Bis etwa Mitte Februar und ab Mitte Oktober gab es längere stabile Phasen, die Inversionen reichten in der Mehrzahl bis zum Rastlboden hinauf. Zu beachten ist hier der Ausfall der Station RAB bis 19. Jänner, sodass in diesem Zeitraum keine Informationen über höherreichende Inversionen verfügbar sind. Von März bis September sind deutlich weniger Inversionen zu verzeichnen und diese beschränken sich überwiegend auf Nachtzeiten. Gleichzeitig kann eine Abnahme der Inversionsstärke

(ausgedrückt durch die Farbe) festgestellt werden. Wenn der Föhn im Wipptal weht, so baut er Inversionen oberhalb der Hungerburg meist ab. Dies ist beispielsweise in der Periode von 13. bis 16. November gut zu erkennen. Betrachtet man für das Inversionsgeschehen nicht die aufeinanderfolgenden Schichten, sondern verwendet für alle die gleiche Basisstation, ergeben sich weitere Einblicke.

Tabelle 7 fasst die monatlichen bzw. jährlichen Inversionshäufigkeiten für 2022 im Vergleich zum Schnitt der Vorjahre zusammen. Die Tabelle enthält im Sinne der Vollständigkeit auch die sehr dünnen Schichten unterhalb der HBG. Deren Absolutzahlen² ist zwar nicht allzu hohe Bedeutung zuzumessen, die zeitliche Entwicklung seit 2016 ist dennoch von Interesse.

Wie gehabt konzentrierten sich die Inversionen ganzjährig auf die Schicht unterhalb der Hungerburg und waren in der kalten Jahreszeit (Oktober bis Februar) erwartungsgemäß häufiger als in der warmen. Im März und Oktober wurden im Jahr 2022 viele Inversionen verzeichnet, im April und September 2022 waren teils so wenig Inversionen zu verzeichnen wie noch nie (seit 2016). Ab der Hungerburg nahm die Häufigkeit der Inversionen mit zunehmender Schichtdicke stark ab.

	Δz	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
2022														
HBF	33	66	62	60	47	46	54	54	56	47	63	62	65	57
ODO	57	59	55	60	43	41	46	41	50	42	63	62	62	53
ALP	90	64	58	66	50	39	38	43	52	32	61	60	62	52
HBG	342	45	36	34	10	5	9	8	13	11	40	38	47	25
RAB	626	44	32	23	6	2	4	4	4	9	41	34	54	20
HOE	988	40	24	15	4	1	3	2	3	5	34	30	42	17
PAK	1673	22	6	1	1	0	0	0	0	1	12	10	15	6
Schnitt 2016-2021														
HBF	33	79	70	57	59	54	60	62	64	67	67	67	78	66
ODO	57	66	59	46	49	42	45	47	49	52	57	58	69	53
ALP	90	70	62	50	53	41	43	44	46	52	56	59	71	54
HBG	342	48	38	21	19	10	9	8	10	17	32	37	51	25
RAB	626	43	35	15	12	5	5	3	6	13	28	37	49	21
HOE	988	36	29	13	9	2	3	2	4	9	22	33	42	17
PAK	1673	16	10	2	0	0	0	0	0	1	6	12	19	6

² Wegen des Stadteffekts kommt es bei Verwendung des FLH als Basisstation in den dünnen Schichten unterhalb der HBG zu einer (deutlichen) Überschätzung der Inversionshäufigkeit.

Minimum 2016-2021														
HBF	33	64	56	51	52	46	53	51	45	60	60	52	74	61
ODO	57	46	41	37	39	36	36	40	35	46	48	49	62	50
ALP	90	48	51	42	36	27	31	37	32	41	47	44	60	49
HBG	342	24	15	13	13	5	3	4	6	11	20	25	36	22
RAB	626	23	17	8	7	3	1	2	2	8	16	24	34	19
HOE	988	16	13	10	4	1	0	2	1	5	13	21	25	15
PAK	1673	2	3	0	0	0	0	0	0	0	2	1	10	3
Maximum 2016-2021														
HBF	33	92	79	61	72	64	69	71	76	75	75	79	90	69
ODO	57	79	69	50	67	49	58	53	55	58	63	71	83	56
ALP	90	86	76	57	72	51	51	54	56	59	64	78	94	59
HBG	342	76	52	25	30	13	16	13	12	24	38	62	85	30
RAB	626	72	49	20	19	9	12	6	9	19	37	62	81	25
HOE	988	65	48	18	15	3	8	3	9	13	29	62	76	21
PAK	1673	39	22	5	1	0	0	0	1	5	12	36	45	9

Tabelle 7: Die Inversionshäufigkeit (in %) zwischen Flughafen und der jeweiligen Station in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2022 (oben) angegeben, gefolgt vom Durchschnitt bzw. minimalen und maximalen Werten zwischen 2016-2021. Mit Δz ist die Schichtdicke (in m) angegeben. Die Häufigkeiten sind farbkodiert – je dunkler der Zellhintergrund, umso höher die Häufigkeit. Im obersten Abschnitt „2022“ sind zudem jene Werte fett blau (braun) formatiert, die den bisherigen Maximalwert (Minimalwert) übertreffen (unterschreiten).

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 vom Talboden in größere Höhen über Grund nahm die Häufigkeit nachts in allen Einzelmonaten mit ganz wenigen Ausnahmen ab. Tagsüber sind die ‚künstlichen‘ Inversionen am Alpenzoo aufgrund der Überwärmung in der Südhanglage augenscheinlich, sodass die Häufigkeiten jene aller anderen Schichten übertrafen.

4.5 Einordnung in die Innsbrucker TEMPIS-Reihe seit 1999

In einem Projekt der ZAMG (durch die Zusammenlegung mit der GBA seit 1.1.2023 GeoSphere Austria), das vom Land Tirol unterstützt wurde, konnten alte TEMPIS Daten beginnend mit dem Jahr 1999 digitalisiert, kontrolliert und analysiert werden. Diese Reihe wird nun laufend ergänzt. Im Zusammenhang mit dem hier vorliegenden Bericht eignen sich die Stationen Hungerburg (HBG) und Rastlboden (RAB) für Stabilitätsvergleiche, da deren Standorte 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 mittlerweile für die Hungerburg 20 Jahre an Temperaturdaten vor, für den Rastlboden 19 und für den Patscherkofel alle 24.

In Abbildung 8 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 22,2 und 36,2 %, bis zum RAB zwischen 18,6 und 31,1 % und bis zum PAK zwischen 1,8 und 10,8 %.

Im Jahr 2022 lag die Inversionshäufigkeit bis zur Hungerburg bei 24,5 %, bis zum Rastlboden bei 20,3 % und bis zum Patscherkofel bei 5,5 %. Damit war sie in allen drei Schichten vergleichbar mit jenen der Jahre 2016 bis 2019 sowie 2021 und deutlich geringer als im Jahr 2020, in dem die höchsten Werte seit der Neuaufstellung der Stationen (also seit 2016) verzeichnet wurden. Insgesamt ist seit 1999 kein signifikanter Trend bei den Inversionen beobachtbar.

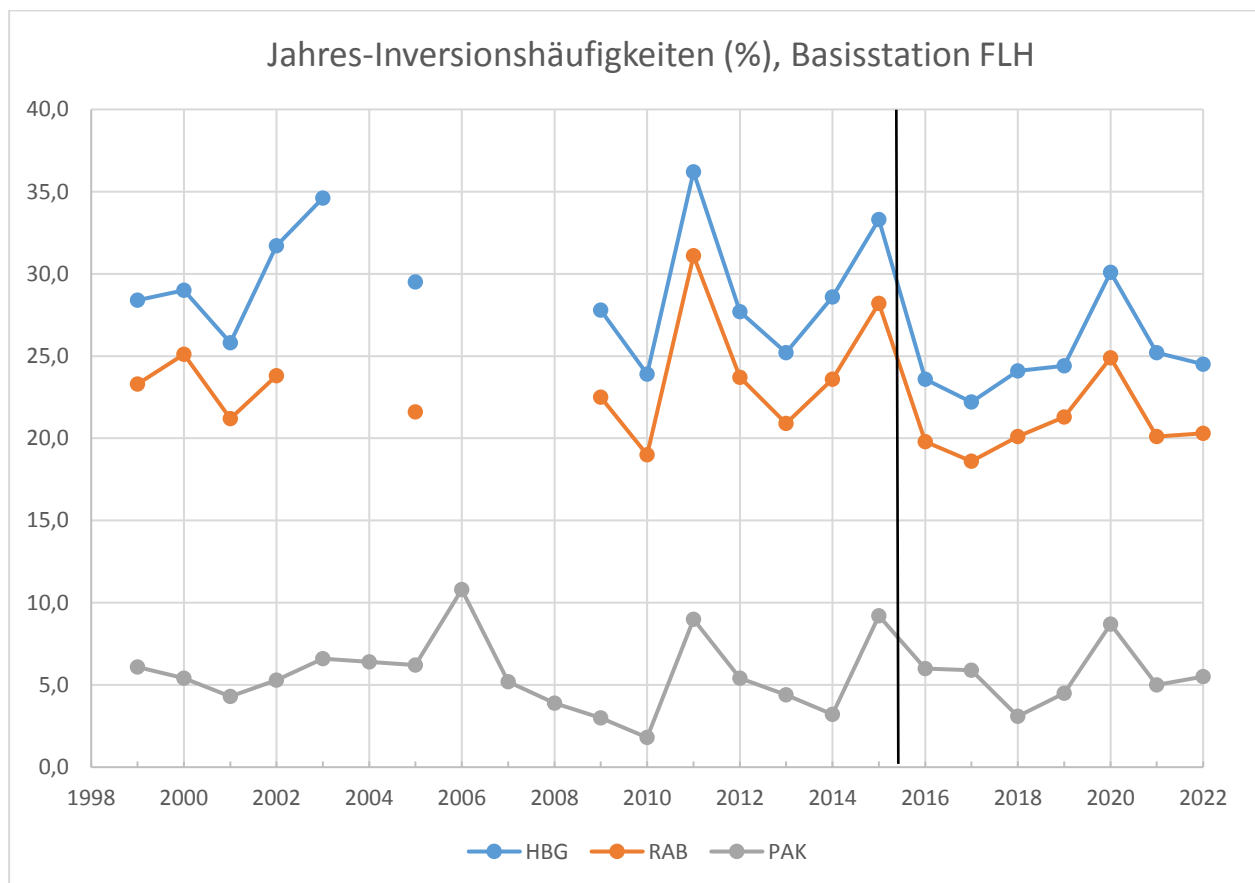


Abbildung 8: Jahres-Inversionshäufigkeiten der langjährigen TEMPIS-Reihen von 1999 bis 2022 (bis 2018 basierend auf 30-Minuten-Daten, ab 2019 auf 10-Minuten-Daten) für die Schichten zwischen Flughafen und Hungerburg (blau), Rastlboden (orange) und Patscherkofel (grau). Der schwarze Trennstrich markiert die Grenze zwischen altem und neuem Hangprofil.

5 Auswertung der Feuchte im Jahr 2022

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 % (solange genügend Kondensationskerne vorhanden sind, was in der Troposphäre fast immer der Fall ist). 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.

Tabelle 8 zeigt die Feuchteverteilung über die Talatmosphäre in den einzelnen Monaten und im Jahresmittel 2022 (oben). Um die Werte einordnen zu können, folgen in den drei Tabellenabschnitten darunter Durchschnitt bzw. minimale und maximale Werten zwischen 2016-2021. Fett blau (rot) gedruckte Werte aus dem Jahr 2022 bedeuten, dass sie den bisherigen Maximalwert (Minimalwert) übertreffen (unterschreiten).

Übers Jahr gerechnet lag die relative Feuchte 2022 an allen Stationen im Bereich von 70-75 %. Wie auch in den Vorjahren ist der höchste Wert auf dem PAK zu finden, welcher häufig in Wolken steckt und die Feuchte dann 100 % erreicht. In der Reihung folgt dann bereits der FLH mit 74 %. Bei einem (hypothetisch) gleichen absoluten Feuchtegehalt wie an den anderen Talstationen sorgen am FLH die etwas kühleren Verhältnisse für höhere relative Feuchtwerte. Hinzu kommt, dass es hier im Vergleich zu den stärker versiegelten Bereichen in der Stadt mehr Vegetation gibt, die Feuchte abgibt. Am trockensten ist es damit am HBF, sowie auf der HOE, wo es im Gegensatz zu den Tallagen auch in der kalten Jahreszeit, insbesondere im Jänner recht trocken war. Der nahezu niederschlagsfreie³ März sticht über alle Höhenlagen als trockenster Monat im Jahr 2022 heraus. Er ist mit 14 bis 20 Prozentpunkten unter dem Durchschnitt der trockenste März seit 2016. Deutlich feuchter war es 2022 ab dem niederschlagsreichen (und kühlen) September an allen Stationen, wobei am FLH mit 91 % der absolut höchste Monatsmittelwert über alle Stationen seit 2016 registriert wurde.

³ An der Station UNI wurden im März 2022 nur 5 mm Niederschlag verzeichnet, am PAK waren es 6 mm.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
2022													
FLH	78	74	53	65	70	71	69	71	80	84	87	91	74
UNI	76	71	48	62	67	68	65	66	76	79	81	85	70
HBF	76	71	44	61	68	68	66	66	77	79	83	89	71
ODO	78	74	47	65	NA	NA	NA	NA	NA	NA	79	85	NA
ALP	77	73	46	64	72	73	70	70	82	80	83	87	73
HBG	74	70	48	68	75	74	72	72	83	78	80	83	73
RAB	NA	69	51	72	78	76	75	75	84	73	77	77	73
HOE	60	63	53	72	80	75	74	76	82	68	71	74	71
PAK	65	68	57	79	84	77	78	82	86	72	NA	75	75
Durchschnitt 2016-2021													
FLH	83	75	68	62	67	68	72	75	77	78	82	84	74
UNI	80	71	64	57	64	64	68	72	74	75	79	82	71
HBF	79	69	63	55	61	63	65	67	72	72	78	81	69
ODO	81	72	65	57	65	67	68	72	74	73	79	82	71
ALP	80	72	66	59	68	69	74	77	79	76	80	82	74
HBG	79	72	69	62	71	72	77	79	81	76	80	79	75
RAB	74	70	70	65	74	74	78	80	81	75	77	74	74
HOE	69	64	66	68	75	73	76	78	78	73	72	68	72
PAK	73	72	77	77	84	79	81	81	80	76	75	71	77

Minimum 2016-2021													
FLH	81	72	66	55	64	61	67	69	74	73	77	82	72
UNI	77	66	62	51	60	56	63	65	71	70	73	79	69
HBF	75	66	61	48	57	53	51	55	68	66	71	80	66
ODO	75	66	62	48	59	61	66	68	72	70	75	77	69
ALP	75	67	63	50	64	59	67	68	73	69	70	80	69
HBG	68	64	66	52	66	62	72	73	79	71	74	78	73
RAB	58	63	67	54	70	61	74	74	78	70	69	74	72
HOE	50	55	64	56	70	60	73	72	75	66	60	67	70
PAK	54	59	70	64	79	68	78	76	75	68	59	69	75

Maximum 2016-2021													
FLH	87	78	70	68	73	76	75	78	82	81	85	88	76
UNI	84	75	67	65	70	72	72	75	81	79	83	85	72
HBF	83	72	65	62	64	71	70	73	77	80	84	87	71
ODO	90	78	68	64	75	72	72	75	79	78	84	88	73
ALP	86	76	68	67	74	79	80	84	85	82	85	87	75
HBG	89	85	72	72	80	81	82	87	87	83	85	88	76
RAB	86	86	75	75	82	84	82	86	87	85	84	82	76
HOE	82	81	70	75	81	83	80	84	85	84	77	76	74
PAK	84	85	86	85	90	89	86	88	87	84	86	79	81

Tabelle 8: Relative Feuchte (in %) an den TAWES und TEMPIS-Stationen in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2022 (oben), gefolgt vom Durchschnitt bzw. minimalen und maximalen Werten zwischen 2016-2021. Die Häufigkeiten sind zur besseren Lesbarkeit auf ganze Werte gerundet und farbkodiert, wobei braun-rote Farben für eher trockene Verhältnisse stehen, blaue für feuchtere. In den Perioden mit weniger als 80 % an verfügbaren Daten wurden keine Mittel bestimmt, sie sind mit „NA“ gekennzeichnet. Im obersten Abschnitt „2022“ sind zudem jene Werte fett blau (rot) formatiert, die - auf eine Nachkommastelle berechnet - den bisherigen Maximalwert (Minimalwert) übertreffen (unterschreiten).

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 2022 an den Stationen Alpenzoo und Höttinger Alm in Abbildung 9 erkennen. Tagsüber war es im Jahresschnitt (und an den meisten Tagen) durch die Temperaturzunahme sowie die vertikale Durchmischung trockener als nachts.

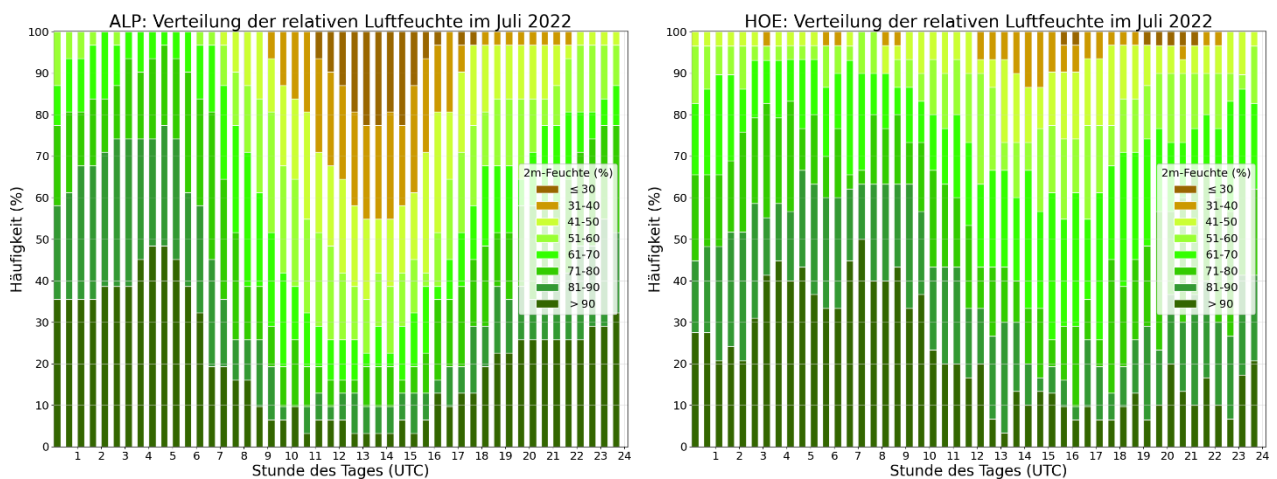


Abbildung 9: Tagesgang der Häufigkeitsverteilung der relativen Feuchte im Alpenzoo (links) und auf der Höttinger Alm (rechts) im Juli 2022.

6 Auswertung des Windes im Jahr 2022

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.

Abbildung 10 zeigt die 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.

Da das Talwindsystem thermodynamisch angetrieben wird, ändern sich die Häufigkeiten von Talein- und Talauswind von Jahr zu Jahr nur wenig. Wie häufig der Südföhn bläst, ist hingegen stärker von Witterungslagen gekennzeichnet und damit variabler.

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. 19% (bei insgesamt 36 Richtungssektoren) eine sehr starke Kanalisierung auf, es ist die „klassische Föhnrichtung“ auf dem Innsbrucker Hausberg.

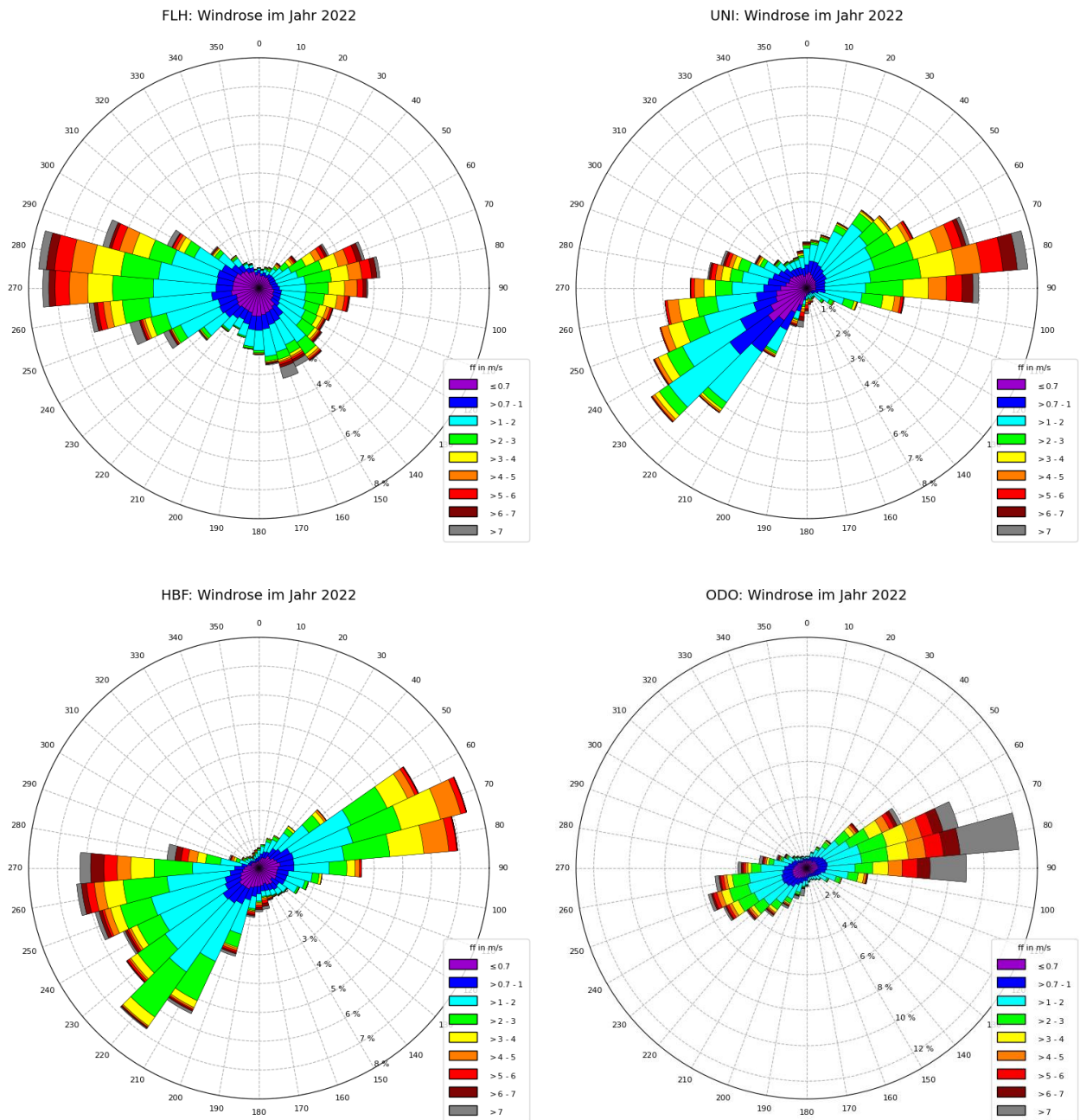


Abbildung 10: Windrosen, eingeteilt in 36 Richtungssektoren mit farbcodierten Geschwindigkeitsklassen am Flughafen (oben links), UNI (oben rechts), HBF (unten links) und ODO (unten rechts) für das Jahr 2022.

6.2 Windgeschwindigkeiten: 10 Minuten Mittelwind

Wie anhand der Tabelle 9 ersichtlich ist, lagen 2022 die Monatsmittel der mittleren Windgeschwindigkeiten an den Stationen am Talgrund zwischen 1,5 m/s und 3,6 m/s. Die geringste mittlere Windgeschwindigkeit am Talboden wurde in der kalten Jahreszeit registriert, konkret im Jänner und von Oktober bis Dezember, die höchste im Frühling (März und April, teilweise Juni). Im Jahresmittel war der Wind sowohl im Tal als auch am Berg etwas

schwächer als im Schnitt der Jahre 2016 bis 2021. Am Flughafen und am Patscherkofel wurde sogar der geringste Jahresmittelwert seit dem Aufbau des neuen TEMPIS-Profiles registriert.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
2022													
FLH	1,8	2,7	2,4	2,4	2,0	2,3	1,9	2,0	1,8	1,7	1,7	1,6	2,0
UNI	1,5	2,1	2,4	2,4	2,1	2,3	2,1	2,0	1,7	1,5	1,5	1,5	1,9
HBF	1,5	2,3	2,9	2,2	2,0	2,2	1,9	2,0	1,7	1,7	1,7	1,8	2,0
ODO	1,8	2,7	3,3	3,6	3,0	3,3	NA	3,0	2,4	1,9	1,9	1,8	2,6
PAK	6,9	8,0	6,1	5,7	4,3	5,7	4,4	3,9	5,4	7,5	6,9	8,1	6,1

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
6-Jahres-Schnitt 2016-2021													
FLH	2,0	2,3	2,4	2,8	2,5	2,4	2,0	2,0	1,6	2,1	2,0	2,0	2,2
UNI	1,6	2,0	2,2	2,5	2,3	2,3	2,0	1,9	1,7	1,9	1,8	1,7	2,0
HBF	1,9	2,2	2,3	2,6	2,4	2,3	1,9	2,0	1,8	2,1	2,0	2,0	2,1
ODO	2,1	2,8	3,3	3,9	3,4	3,4	2,9	2,8	2,3	2,9	2,7	2,2	2,9
PAK	8,3	8,3	7,2	8,0	6,6	5,4	4,6	4,9	4,9	8,4	8,9	8,3	7,0

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Minimum 2016-2021													
FLH	1,3	1,8	2,0	2,2	2,0	2,0	1,8	1,7	1,5	1,6	1,3	1,5	2,1
UNI	1,1	1,5	1,8	2,1	1,9	1,9	1,8	1,7	1,5	1,4	1,2	1,2	1,8
HBF	1,3	1,7	1,9	2,2	2,2	1,9	1,8	1,8	1,6	1,6	1,4	1,6	2,0
ODO	1,6	2,3	2,6	3,1	2,7	2,9	2,6	2,5	2,0	1,9	1,6	1,6	2,6
PAK	7,5	5,9	5,6	5,1	5,7	4,2	3,7	3,7	3,9	5,9	5,2	6,6	6,3

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Maximum 2016-2021													
FLH	2,6	3,2	2,7	3,5	2,8	2,7	2,2	2,4	1,7	2,5	2,7	2,4	2,4
UNI	2,1	2,4	2,5	2,9	2,7	2,5	2,1	2,2	1,8	2,1	2,2	2,0	2,1
HBF	2,6	2,7	2,7	3,5	2,6	2,7	2,0	2,3	1,9	2,4	2,5	2,4	2,4
ODO	2,6	3,3	4,0	4,6	4,2	4,2	3,1	3,1	2,6	3,3	3,5	3,2	3,1
PAK	10,3	10,6	8,6	10,5	8,2	6,8	6,4	6,0	5,6	10,1	12,3	10,3	7,7

Tabelle 9: Windgeschwindigkeit in m/s an den Stationen mit Windmessung in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2022 (oben) gefolgt vom Durchschnitt bzw. minimalen und maximalen Werten zwischen 2016-2021. In den Perioden mit weniger als 80 % an verfügbaren Daten wurden keine Mittel bestimmt, sie sind mit „NA“ gekennzeichnet. Im obersten Abschnitt „2022“ sind zudem jene Werte fett rot (blaut) formatiert, die - auf eine Nachkommastelle berechnet - den bisherigen Maximalwert (Minimalwert) übertreffen (unterschreiten).

In Tabelle 10 sind die drei stärksten Windereignisse jeder Station gelistet.

Die höchsten 10-Minuten Mittel wurden 2021 am Flughafen, an der Uni und am Hauptbahnhof bei West- bis Nordwestwind registriert. An den Stationen Olympisches Dorf und Patscherkofel lösten – wie schon im Vorjahr - Südlagen die höchsten Geschwindigkeiten aus, wobei es die Westlage vom 30. Juni im ODO auf Rang 3 geschafft hat.

	FLH			UNI			HBF			ODO			PAK		
	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd
1.	05.06.	23,4	276	21.02.	15,8	345	21.02.	15,8	333	24.04.	20,1	217	24.04.	31,2	172
2.	30.06.	20,7	250	28.07.	13,1	299	05.08.	12,9	261	03.11.	18,8	185	03.11.	30,2	167
3.	17.02.	17,5	295	17.02.	12,5	296	30.06.	12,7	268	30.06.	17,2	254	21.10.	29,0	166

Tabelle 10: Datum, Windgeschwindigkeit im 10-Minutenmittel (ff, in m/s) und Windrichtung (dd, in Grad) der jeweils drei stärksten Ereignisse im Jahr 2022.

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 Überschreitungshäufigkeiten des Jahres 2022 stellen generell die **niedrigsten Werte seit der Installation der neuen TEMPIS-Stationen** dar. Einzige Ausnahme ist die noch geringere Häufigkeit über 8 Beaufort am Flughafen im Jahr 2017.

	% Gesamtzeit >= 6 Beaufort					% Gesamtzeit >= 8 Beaufort				
	FLH	UNI	HBF	ODO	PAK	FLH	UNI	HBF	ODO	PAK
2022	3,9	3,5	3,8	6,9	25,3	0,9	0,2	0,3	0,7	8,3
2021	5,1	4,6	5,3	9,4	28,7	1,0	0,7	0,5	1,7	11,9
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 2022 bezogen auf die gesamte Periode des jeweiligen Jahres für alle Stationen mit Windmessung.

An den innerstädtischen Stationen UNI und HBF wird der Schwellenwert von 8 Beaufort eindeutig (2022 und in allen Jahren) am seltensten erreicht, was wohl auch an der abbremsenden Wirkung der Bebauung liegt.

In Tabelle 12 sind die drei stärksten Böenereignisse jeder Station gelistet. Spitzenreiter im Tal ist die Station Flughafen, mit einer bemerkenswerten Westwindböe von 39,7 m/s bzw. 143 km/h. Interessant ist auch, dass die kräftigsten Böen auf der West- und Ostseite der Stadt nicht an den gleichen Tagen bzw. Strömungslagen auftreten. Am Flughafen können Westwinde stark durchgreifen, über dem städtischen Siedlungsraum werden diese allerdings

auf dem weiteren Weg nach Osten abgeschwächt. Im Olympischen Dorf hingegen produzieren in der Regel Föhnwinde aus Richtung Süd bis Südwest die stärksten Windspitzen. Das liegt an der Lage der Station am Ausgang des Wipptales. Am Westende von Innsbruck ist wiederum der Föhn typischerweise nicht so stark ausgeprägt, da dessen Hauptast über das Unterinntal Richtung Alpenvorland strömt.

	FLH			UNI			HBF			ODO			PAK		
	Dat	ffx	ddx	Dat	ffx	ddx	Dat	ffx	ddx	Dat	ffx	ddx	Dat	ffx	ddx
1.	05.06.	39,7	285	07.02.	32,0	65	21.02.	27,8	339	24.04.	29,5	212	03.11.	40,3	161
2.	07.02.	31,3	345	05.06.	27,1	307	30.06.	24,9	254	25.07.	28,6	230	24.04.	38,9	179
3.	30.06.	30,9	246	21.02.	26,8	332	17.02.	24,6	280	03.11.	28,3	180	21.10.	34,1	152

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 2022.

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 2022. Längere windstille Perioden wurden 2022 nicht verzeichnet. Kalmen länger als 12 Stunden (ab 25 HMW) traten wie schon in den Vorjahren gar nicht auf.

Eine Kalmendauer von 6,5 bis 12 Stunden (13 bis 24 HMW) wurde noch bis zu sechsmal (am Flughafen) erreicht. Am Flughafen traten Kalmen in gut einem Viertel der Gesamtzeit auf (25,4 %), an den eher städtisch geprägten anderen Stationen am Talgrund mit 18,9 bis 19,7 % deutlich seltener.

HMW-Dauer	Anzahl Perioden				
	von	FLH	UNI	HBF	ODO
1-2	1764	1639	1380	1561	276
3-6	453	301	317	318	22
7-12	49	25	38	29	1
13-24	6	2	4	1	0
25-49	0	0	0	0	0
≥ 49	0	0	0	0	0
SUMME der HMW	4448	3403	3310	3448	408
SUMME (%)	25,4	19,4	18,9	19,7	2,3

Tabelle 13: Häufigkeit verschiedener Klassen der Kalmendauer und Summe aller Halbstundenmittelwerte (HMW) an den verfügbaren Windstationen im Jahr 2022. Bei Kalmen liegt die Windgeschwindigkeit im HMW unter 0,8 m/s.

Für die Stationen am Talgrund sind in der Tabelle 14 die prozentuellen Kalmenhäufigkeiten seit 2016 (gerundet auf ganze Prozent) zusammengefasst. Im Jahr 2022 waren windschwache Situationen vergleichsweise häufig, ihre Anzahl lag Großteils knapp innerhalb der Bandbreite der Vorjahreswerte. Am HBF waren Kalmen hingegen so zahlreich wie noch nie (in der kurzen Reihe seit 2016).

Das passt also ganz gut zum schon oben skizzierten eher windschwachen Jahr 2022.

	Kalmenhäufigkeit (% Gesamtzeit)						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FLH	23	24	21	24	25	24	25
UNI	20	20	17	18	21	18	19
HBF	17	17	14	15	18	17	19
ODO	18	20	16	17	18	18	20

Tabelle 14: Kalmenhäufigkeit in % der Gesamtzeit (auf Basis HMW) für die Jahre 2016 bis 2022.

6.5 Wind während Inversionsbedingungen

Die Motivation für die nachfolgende Auswertung ist, dass auch bei Inversionsbedingungen im Inntal recht kräftiger Wind wehen kann. Das überrascht, da die klassische Vorstellung von einem mehr oder weniger ruhenden Kaltluftkörper während Inversionsbedingungen in einem Tal ausgeht.

Um der Ursache nachzugehen, wurde zunächst an den mit Windsensoren ausgestatteten Stationen analysiert, wie die Windverteilung im Jahr 2022 mit bzw. ohne Inversion in der Schicht FLH – HBG aussieht. Links in Abbildung 11 sind die Windverhältnisse bei gleichzeitiger Inversion (Häufigkeit im Jahr: 24,5 %, siehe z. B. Abbildung 6) dargestellt.

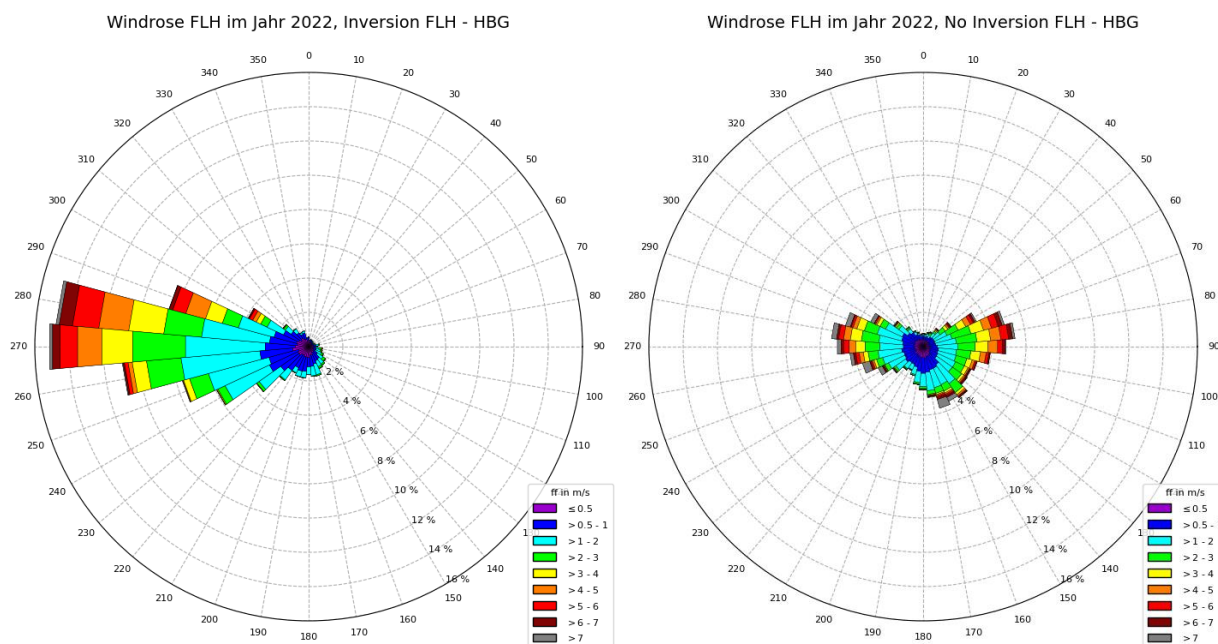


Abbildung 11: Geschwindigkeitskodierte Windrosen am Flughafen im Jahr 2022. Links: während Inversionsbedingungen zwischen FLH und HBG, rechts: wenn keine Inversion vorhanden ist.

Zwei Fakten stechen ins Auge: Erstens, wie eingangs erwähnt, dass es eine durchaus relevante Anzahl an Zeiten mit Inversionen gibt, an denen die mittlere Geschwindigkeit über 4 m/s (umgerechnet 14,4 km/h) liegt und damit von einem ruhenden Kaltluftkörper keine Rede sein kann. Konkret sind 10,8 % aller Inversionslagen davon betroffen, bei Windgeschwindigkeiten von über 2 m/s sind es sogar 29 %. Und zweitens, dass es sich dabei fast ausschließlich um Westwind handelt. Im Vergleich dazu kommen unter Nicht-Inversionsbedingungen (75,5 % der Zeiten im Jahr 2022) auch die Föhnwinde aus Süden und der Taleinwind aus Osten ähnlich häufig wie im Jahresschnitt vor. Der dominante Westwind während einer Temperaturzunahme mit der Höhe führt zur Hypothese, dass es sich dabei in der Regel um vorföhnigen Westwind handelt. Also um synoptisch verstärktes Ausfließen aus dem Inntal, während darüber schon Südföhn weht. Da dieser sich (noch) nicht bis zum Talboden durchsetzt, kann er als warmer Wind über der kälteren im Tal die Inversion verursachen oder – falls schon vorhanden – verstärken. Wenn diese Strömungsgage länger andauert bzw. mit Hilfe von Sonneneinstrahlung untertags, wird die bodennahe Inversion in der Regel irgendwann ausgeräumt.

Wenn diese Hypothese zutrifft, sollte am Patscherkofel Südwind vorherrschen, während im Inntal der Wind nicht zu schwach weht und es eine bodennahe Inversion gibt. Abbildung 12 oben zeigt die zugehörige Windrose am Patscherkofel, konkret muss die Windgeschwindigkeit am Flughafen 2 m/s überschreiten. Und es ist ganz klar: Unter den genannten Bedingungen kommt fast nur Wind aus Süden vor!

Eine zweite Art die Hypothese zu prüfen: Wenn Südföhn weht, dann sollte die Schicht über der Inversion, also ab der HBG, durch den Föhn annähernd trockenadiabatisch durchmischt

sein. Nach der vorliegenden Klassifizierung (siehe Tabelle 4) entspricht dies labilen Verhältnissen, wenn es nicht die ganze Schicht umfasst auch neutralen. Die Stabilitätsverteilung unter den oben genannten Voraussetzungen (Inversion und Windgeschwindigkeit am Flughafen > 2 m/s) wird in Abbildung 12 unten gezeigt. Auch hier bestätigt sich die Annahme weitgehend, dass es sich überwiegend um Föhnlagen handelt, bei denen es stärkeres Ausfließen im Inntal unter bodennaher Inversion gibt. HBG – RAB und RAB – HOE haben sehr ähnliche Stabilitätsverteilung, gesamt gute 70 % labil oder neutral. Immerhin noch knappe 30 % werden allerdings als stabil oder sehr stabil klassifiziert, das bedeutet, dass zu diesen Zeiten noch keine Durchmischung bis zur Hungerburg bzw. bis zum Rastlboden mit der (Föhn-)Luft am Patscherkofel stattgefunden hat.

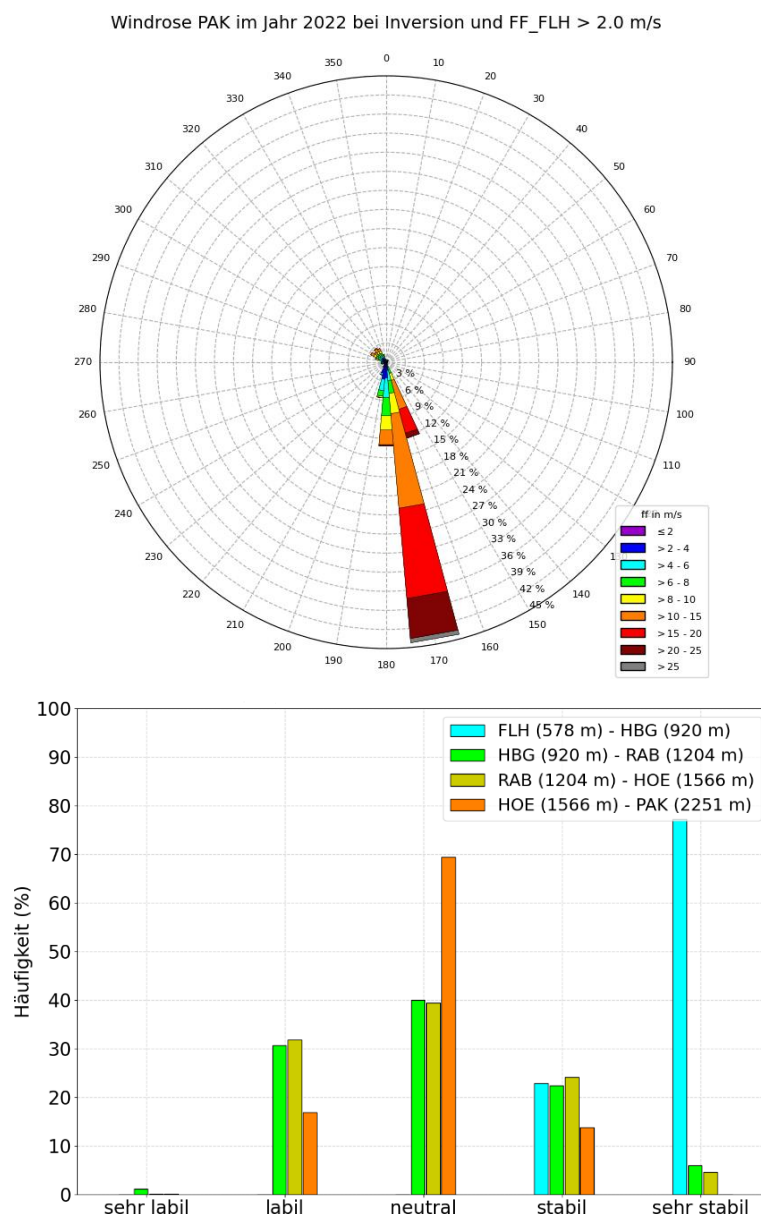


Abbildung 12: Oben: Geschwindigkeitskodierte Windrose am Patscherkofel im Jahr 2022 während Inversionen in der Schicht FLH – HBG und wenn die Windgeschwindigkeit am Flughafen 2 m/s übersteigt. Unten: Stabilitätsverteilung in vier ausgewählten Schichten unter den gleichen Voraussetzungen.

7 Zusammenfassung

Das TEMPIS-Profil liefert auch im Jahr 2022 zusammen mit den TAWES Messungen wertvolle Einblicke zu den Temperatur-, Feuchte- und Windverhältnissen der Talatmosphäre zwischen Innsbruck und dem Patscherkofel. Die Zeitreihe, die seit 2016 in dieser Form besteht, setzt die frühere, teils aber lückenhafte Reihe seit 1999 fort. Dies ermöglicht Aussagen zu etwaigen Trends bei den genannten Parametern, sowie der für die Luftqualität maßgeblichen Stabilität in den Schichten oberhalb der Stadt.

Nur knapp hinter 2018 war 2022 das zweitwärmste Jahr der TEMPIS-Reihe. Darüber hinaus war es das wärmste Jahr überhaupt an der seit 1877 bestehenden Station Innsbruck Universität und der seit 1967 geführten Messreihe auf dem Patscherkofel. In zehn von zwölf Monaten lag die Durchschnittstemperatur über dem Mittelwert von 1991-2020. Während das erste Quartal und hier vor allem der März recht trocken ausfielen, war es im letzten Quartal ab Oktober zumindest in den Schichten unterhalb der Hungerburg recht feucht.

Hinsichtlich der Häufigkeiten der (sehr) stabilen Schichtungen bzw. Inversionen lag 2022 in etwa im Durchschnittsbereich der letzten sieben Jahre, wobei 2020 einen Ausreißer nach oben und 2018 nach unten darstellt. In der untersten relevanten Schicht zwischen Flughafen und Hungerburg lagen zu einem Viertel (24,5 %) der Gesamtzeit Inversionsbedingungen vor, bis zum Rastelboden immerhin noch zu einem Fünftel (20,3 %). Hingegen waren hochreichende Inversionen nur noch zu gut einem Zwanzigstel (5,5 %) des Jahres zu finden, und dies hauptsächlich von Oktober bis Jänner.

Im Vergleich zu den Vorjahren war 2022 eher windarm. Im Durchschnitt lagen sowohl Mittelwind als auch Böen, sowie die Überschreitungshäufigkeiten von Starkwindereignissen mit 6 bzw. 8 Beaufort im unteren Schwankungsbereich der Vorjahre, zum Teil sogar noch darunter. Umgekehrt waren Kalmen mit Ausnahme der Station UNI vergleichsweise häufig, am HBF sogar so häufig wie noch nie in der Reihe seit 2016.

Erstmalig wurden die Windverhältnisse während Inversionsbedingungen näher betrachtet. Entgegen der üblichen Vorstellung, dass sich Inversionen nur bei windschwachen Situationen ausbilden, konnte gezeigt werden, dass es im Vorfeld von Föhndurchbrüchen relativ häufig zu windigen Inversionssituationen kommt. In knapp einem Drittel aller Inversionsfälle zwischen Flughafen und Hungerburg liegt die Windgeschwindigkeit über 2 m/s am Flughafen und in 11 % sogar über 4 m/s. Generell weht auf dem Patscherkofel bei den allermeisten Inversionsverhältnissen (kräftiger) Südwind. Dieser greift in Form von milder Föhnluft zwar relativ leicht bis zum Hungerburg-Niveau durch. Besonders in der kühleren Jahreszeit kann die Kaltluft im Tal nicht (rasch) ausgeräumt werden. Am Flughafen weht dann der sogenannte „vorföhnige West“, welcher auch durchaus recht lebhaft (und unangenehm kühl) ist.