

# Auswertung

des TEMPIS-Hangprofils Innsbruck

für das Jahr 2023

## **Durchführung**

GeoSphere Austria  
Regionalstelle Tirol und Vorarlberg

Erstellt von  
Dr. Susanne Drechsel  
und  
Dr. Johannes Vergeiner

Innsbruck, am 27.03.2024

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Stationen des Innsbrucker Hangprofils .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Datenverfügbarkeit und -qualität im Jahr 2023.....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung der Temperatur im Jahr 2023 .....</b>	<b>5</b>
4.1	Monats- und Jahresmitteltemperatur.....	5
4.2	Temperaturprofile.....	7
4.3	Stabilität .....	8
4.4	Inversionen.....	11
4.5	Einordnung in die Innsbrucker TEMPIS-Reihe seit 1999.....	15
<b>5</b>	<b>Auswertung der Feuchte im Jahr 2023.....</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Auswertung des Windes im Jahr 2023.....</b>	<b>21</b>
6.1	Windrichtung.....	21
6.2	Windgeschwindigkeiten: 10 Minuten Mittelwind.....	23
6.3	Windgeschwindigkeiten: 2 Sekunden Böen.....	24
6.4	Kalmen.....	26
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>27</b>

# 1 Einleitung

Die Auswertung des TEMPIS Hangprofils für das Jahr 2023 liefert nun bereits den achten Jahres-Überblick über die Temperatur- und Feuchteverteilung der Innsbrucker Talatmosphäre und die Windverhältnisse im Inntal. Neben den Stabilitäts- und Inversionsanalysen wurde auch die Gesamtreihe des Inversionsgeschehens in der Innsbrucker Talatmosphäre um das Jahr 2023 erweitert. Darüber hinaus gibt es zum ersten Mal eine Analyse der saisonalen Entwicklung der Inversionshäufigkeit (Abschnitt 4.5).

## 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 **TEMPeratur-Informationen-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 2023

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 verschiedenen Parameter im Jahr 2023 liegt bei den Talstationen (FLH, UNI, HBF, ODO), sowie Hungerburg und Patscherkofel bei 99,8 bis 100 %. Längere Ausfälle gab es hingegen bei den Stationen Alpenzoo (95,7 %), Rastelboden (93,2 %) und Höttinger Alm (89,2 %). Beim ALP ist dies hauptsächlich auf eine defekte SIM-Karte zurückzuführen, sodass keine Datenübertragung zwischen 24. Jänner und 8. Februar erlaubte. Beim RAB gibt es eine gut drei wöchige Datenlücke ab dem 8. Februar, deren Ursache nicht geklärt werden konnte. Auf der HOE sorgen Verbindungsprobleme für wiederholte Ausfälle bei der Datenübertragung. Dabei sind die meist eine Stunde bis 1,5 Tage langen Lücken über das ganze Jahr verteilt, eine leichte Häufung gab es im Juli zu verzeichnen.

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 2023

Für die Auswertung ist eine Mindestverfügbarkeit von 80 % an 10-Minuten Daten im betrachteten Zeitintervall gefordert. Diese Voraussetzung wurde aufgrund der oben beschriebenen Ausfällen im Alpenzoo im Jänner und Februar nicht erfüllt, sowie am Rastlboden im Februar und auf der Höttinger Alm im Juli.

#### 4.1 Monats- und Jahresmitteltemperatur

Tabelle 2 zeigt die Monats- und Jahresmittel der Temperatur an allen betrachteten Stationen im Jahr 2023. Die Jahresmittelwerte lagen zwischen 11,2 °C (UNI) in der Talsohle (der Wert von 11,5 am ALP wurde aufgrund des gut zweiwöchigen Ausfalls im Winter hier nicht mit eingerechnet) und 1,9 °C auf dem Patscherkofel. Damit war es 2023 geringfügig kühler bzw. ähnlich warm wie 2018 und 2022, und wärmer als in allen anderen Jahren seit dem jeweiligen Messbeginn an den Stationen FLH (seit 1951), UNI (seit 1877) und PAK (seit 1940, unter Zuhilfenahme der Klimadatenreihe auf <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring>).

Bezogen auf das aktuelle Klimamittel 1991-2020 fielen an der UNI zehn der zwölf Monate überdurchschnittlich warm aus. Nur der April war zu kühl (vergleiche Tabelle 3), in der achtjährigen TEMPS-Reihe war es teils in der Stadt und an der HBG der kälteste April. Am PAK waren zudem auch der Januar und der November unterdurchschnittlich temperiert, sowie in einem sehr geringfügigen Maß der Mai. In Summe war es damit 2023 an der UNI gegenüber dem langjährigen Durchschnitt um 1,3 °C zu warm und am PAK um 1,0 °C. Besonders die beiden Monate September und Oktober stechen an beiden Stationen heraus mit einer Abweichung von +3,3 bis +4,3 °C – der September war damit der heißeste in der Messgeschichte an den beiden Stationen. Dies gilt natürlich auch für die deutlich kürzere TEMPIS-Reihe, wo es im September über das ganze Profil und im Oktober bis zur HBG hinauf die beiden bisher wärmsten Monate waren.

Dementsprechend lagen bis zur Höttinger Alm hinauf fast alle Monatsdurchschnittswerte über dem Gefrierpunkt. Nur der Jänner brachte am RAB und auf der HOE 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. Er war 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 war.

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

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 2023. Sind im betrachteten Mittelungszeitraum weniger als 80 % an Daten verfügbar, wurde kein Mittel berechnet (NA). Die Farbcodierung der Zellen in „blau=kalt“ und „rot=warm“ soll eine schnelle Einordnung erleichtern. Zudem jene Werte fett rot (blau) formatiert, die - auf eine Nachkommastelle berechnet - den bisherigen Maximalwert (Minimalwert) seit 2016 übertreffen (unterschreiten).

Abweichungen 2023 vom Klimamittel 1991 - 2020													
NAME	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
UNI	1,6	2,1	1,4	-1,3	0,2	1,9	1,2	1,0	3,5	3,3	0,0	1,6	1,3
PAK	-0,3	2,1	1,3	-2,1	-0,1	2,1	1,2	0,8	4,3	3,4	-2,1	1,9	1,0

Tabelle 3: Temperaturabweichungen 2023 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  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Jahreschnitt zwischen den beiden gleich hoch gelegenen Stationen FLH und UNI war ähnlich wie in den Vorjahren. Der höhere Wert an der UNI 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 Juni und Dezember 2023 zu sehen.

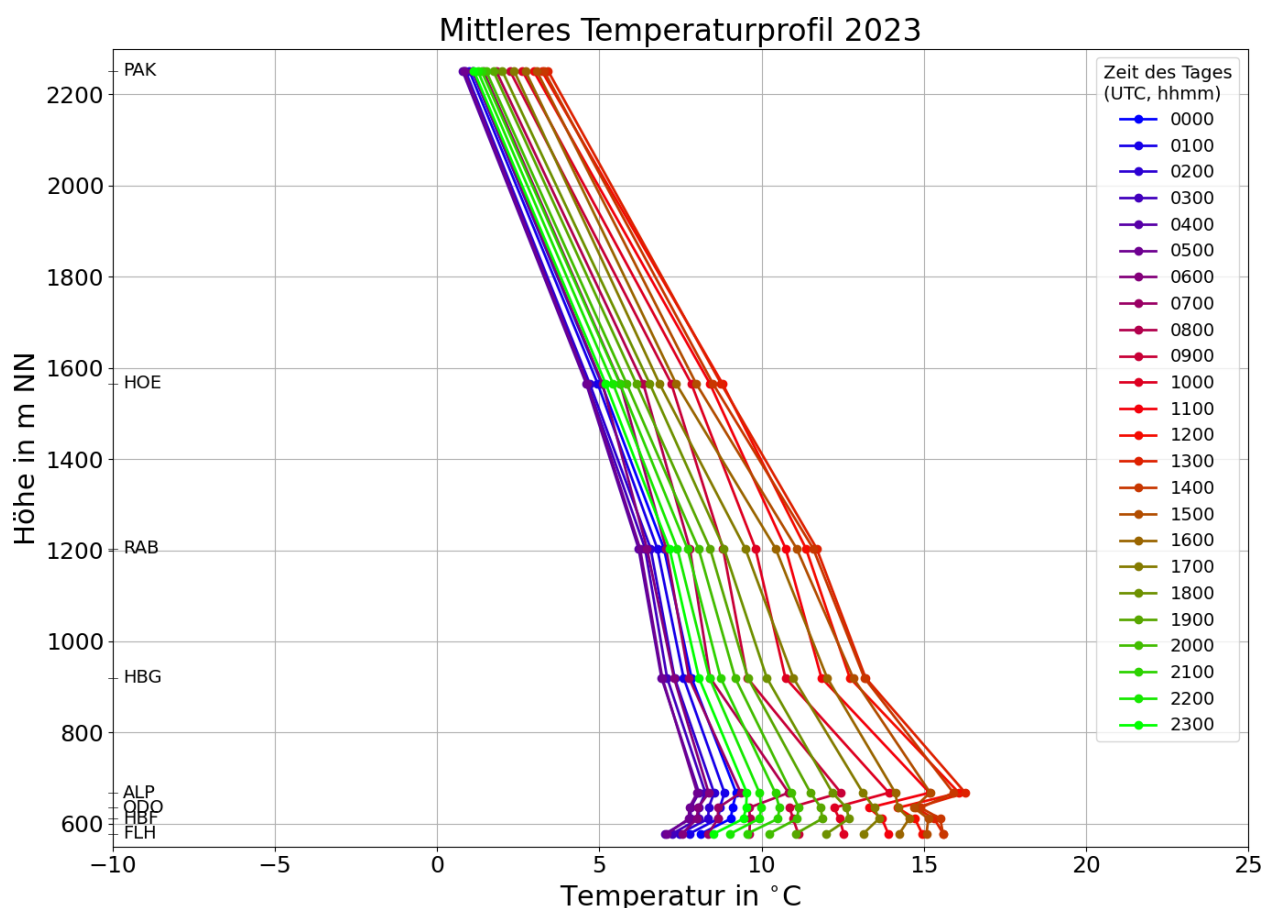


Abbildung 2: Mittlere stündliche Temperaturprofile im Jahresmittel 2023. Zur Umrechnung auf Mitteleuropäische Zeit (MEZ) ist eine Stunde zu addieren, 12 Uhr UTC entspricht also beispielsweise 13 Uhr MEZ.

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 FLH, HBF, ODO und ALP deutlich größer ist als weiter oben<sup>1</sup> 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 FLH und ALP der größeren Messhöhe über Grund (vgl. Tabelle 1) zuzuschreiben.

Noch stärker ausgeprägt ist dieser Tagesgang der stündlichen Profile im Juni (vgl. Abbildung A7 im Appendix, links). Während es nachts noch einigermaßen stabil ist und die Profile damit steil, zeigt der bis zum frühen oder mittleren Nachmittag zunehmend flache Verlauf die immer labilere Schichtung an. In Summe ergibt sich daraus eine sehr weite Spreizung der Profile. Hingegen sind in der kühlen Jahreszeit die Profile ganztags steil, der Tagesgang gering und die Profile damit eng gedrängt. Gut zu sehen ist dies 2023 im Dezember (vgl. Abbildung A7 im Appendix, rechts). Diese im Durchschnitt ganztags stabile Schichtung im Dezember ist auch deshalb bemerkenswert, da der Monat von rasch durchziehenden Tiefdrucksystemen mit häufigen Niederschlägen geprägt war. Eine nennenswerte Hochdruckphase, die in dieser Jahreszeit üblicherweise für (sehr) stabile Verhältnisse sorgt, gab es „nur“ vom 16. bis zum 20.12. Wie Abbildung 5 zeigt, gab es zwar weitere stabile Phasen, allerdings stehen diese entweder mit rasch durchziehenden Hochs (erste Dezemberhälfte) bzw. der Lage am Südrand des Jetstreams (ab Weihnachten) im Zusammenhang.

### 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.

<b>Stabilitätsklasse</b>	<b>Temperaturänderung mit der Höhe [°C / 100 m]</b>	<b>Vertikaler Luftaustausch</b>
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.

<sup>1</sup> 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.



Die Stabilität und ihre zeitliche Entwicklung sind daher besonders im Hinblick auf Schadstoffkonzentrationen interessant. Die im Folgenden verwendeten Stabilitätsklassen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

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.

<b>Jahr 2023</b>					
Schicht	Häufigkeit (%)				
	sehr labil	labil	neutral	stabil	sehr stabil
FLH - HBG	0,8	17,8	44,3	21,9	15,1
HBG - RAB	0,8	16,8	55,9	22,2	4,3
RAB - HOE	0,8	14,7	47,5	32,1	5,0
HOE - PAK	0,4	17,0	72,4	10,2	0,0
<b>Mittel 2016 - 2022</b>					
Schicht	Häufigkeit (%)				
	sehr labil	labil	neutral	stabil	sehr stabil
FLH - HBG	0,6	14,6	44,7	24,3	15,8
HBG - RAB	0,9	16,7	50,5	25,0	7,0
RAB - HOE	0,9	16,0	44,4	33,4	5,4
HOE - PAK	0,5	17,9	71,8	9,7	0,1

Tabelle 5: Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Stabilitätsklassen in den übereinanderliegenden Schichten im Jahr 2023 (oben) sowie im Schnitt der Jahre 2016 - 2022.

Tabelle 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Stabilitätsklassen für vier aufeinanderfolgende Schichten vom Talboden bis zum Patscherkofel im Jahr 2023 sowie im Schnitt der Jahre 2016 bis 2022. (Sehr) stabile Lagen kommen am häufigsten in der bodennahen Schicht FLH – HBG vor. In dieser Schicht war es 2023 insgesamt zu 37 % stabil oder sehr stabil geschichtet, im 7-Jahresschnitt waren es 40,1 %. 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).

Die Stabilitätsverteilungen im Jänner und Oktober sind der Abbildung A8 im Appendix zu entnehmen. Interessant ist vor allem, dass im Oktober vor allem aufgrund von länger anhaltenden Südföhlagen viele stabile und sehr stabile Schichtungen bis zur Hungerburg registriert wurden. Ihr Vorkommen war – für den Frühherbst untypisch – ähnlich häufig wie im Jänner (links). Einzig im Dezember gab es noch deutlich mehr stabile Lagen (nicht gezeigt).

Die mittlere tageszeitliche Verteilung der Stabilitätsklassen in der Schicht zwischen Flughafen und Hungerburg ist in Abbildung 3 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.

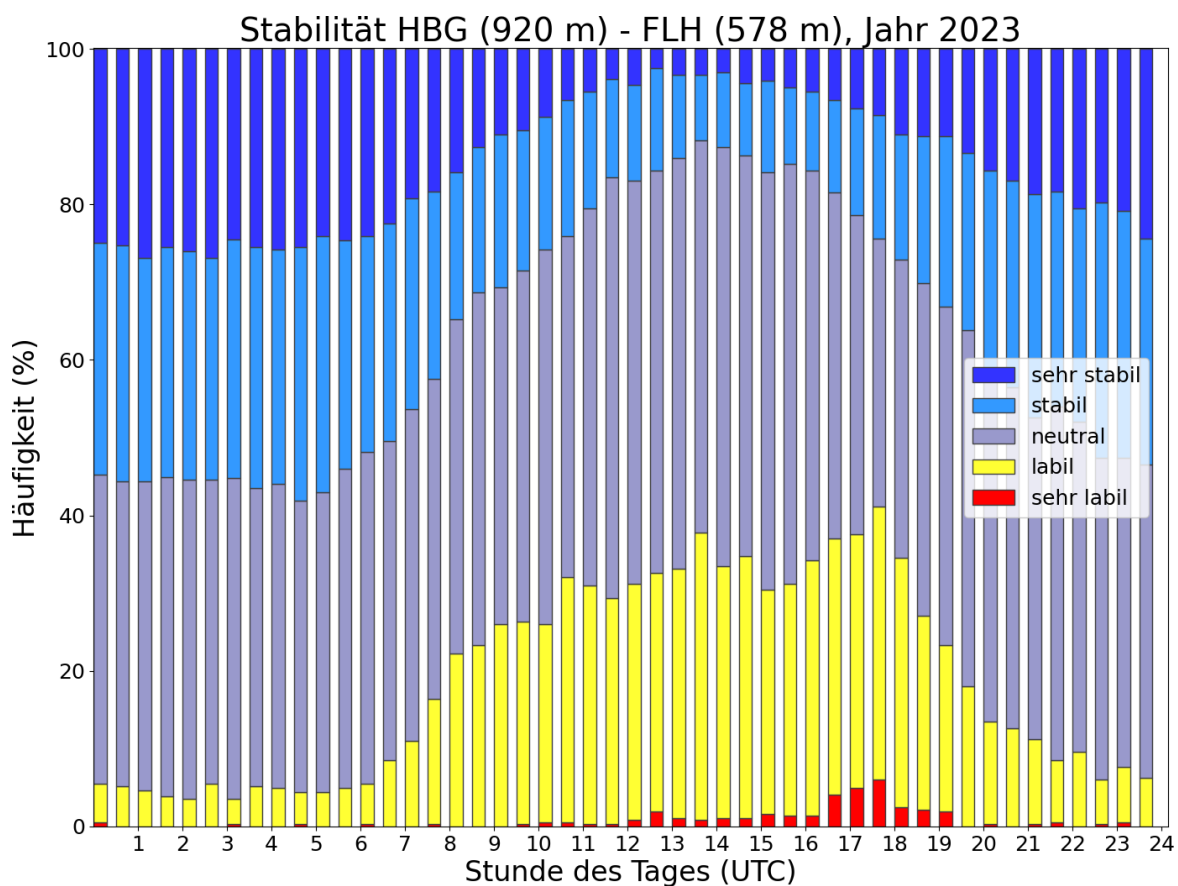


Abbildung 3: Tageszeitliche Verteilung der Stabilitätsklassen aus den halbstündlichen Temperaturmitteln in der 342 m dicken Schicht zwischen Flughafen und Hungerburg im Jahr 2023.

In der Abbildung A9 im Appendix wird der Tagesgang der Stabilität in den Monaten April und Dezember exemplarisch gezeigt. Der April 2023 war überwiegend trüb und nass. Durch Wind und Niederschlag konnten sich bodennah stabile Lagen nur vergleichsweise selten ausbilden, gerade tagsüber dominierten die leicht labilen bis neutralen Verhältnisse deutlich. Im Dezember 2023 hingegen war der Tagesgang kaum ausgeprägt und die stabilen Lagen dominierten 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 6 zusammengefasst.

HMW-Dauer	Anzahl								Gesamtdauer (Wochen)
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2023
1-2	258	347	331	296	295	265	285	<b>245</b>	0,9
3-6	76	85	109	84	79	83	69	<b>96</b>	1,1
7-12	40	46	53	49	35	37	36	<b>58</b>	<b>1,5</b>
13-24	90	76	91	88	99	81	101	<b>69</b>	<b>3,7</b>
25-49	49	80	81	83	66	77	83	<b>86</b>	<b>8,5</b>
≥ 49	16	13	14	16	23	22	13	<b>8</b>	<b>3,6</b>
SUMME (Wochen)	19,0	19,7	21,1	20,7	23,5	20,7	21,2	<b>19,3</b>	19,3

Tabelle 6: Häufigkeit verschiedener Dauerstufen mit (sehr) stabiler Schichtung zwischen Flughafen (578 m) und Hungerburg (920 m) in den Jahren 2016 bis 2023, sowie deren Gesamtdauer in Wochen. Blau (braun) gedruckte Werte bedeuten, dass die Gesamtdauer 2023 höher (niedriger) war 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 2023 mit 19,3 Wochen relativ kurz, nur im Jahr 2016 gab es noch weniger solcher Perioden mit unterdrücktem vertikalen Luftaustausch. Nur acht der stabilen Phasen dauerten im Jahr 2023 mindestens zwei Tage lang an, das ist der mit Abstand geringste Wert seit der Neuerrichtung der Hangprofil-Stationen.

#### 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 4 zeigt die Verteilung der Inversionshäufigkeit in den aufeinanderfolgenden Schichten FLH-HBG, HBG-RAB, RAB-HOE und HOE bis PAK im Jahr 2023. 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 2023 kamen Inversionen in der untersten Schicht zu 23 % vor, bei (knapp) 10 bzw. ca. 14 % in den beiden folgenden Schichten und nur zu < 1 % der Zeit herrschten in der Schicht zwischen Höttinger Alm und Patscherkofel Inversionsbedingungen. Wenig überraschend kam eine Tempe-

raturzunahme mit der Höhe mehrheitlich nachts (hier definiert als Zeit von 18 bis 07 Uhr UTC) vor.

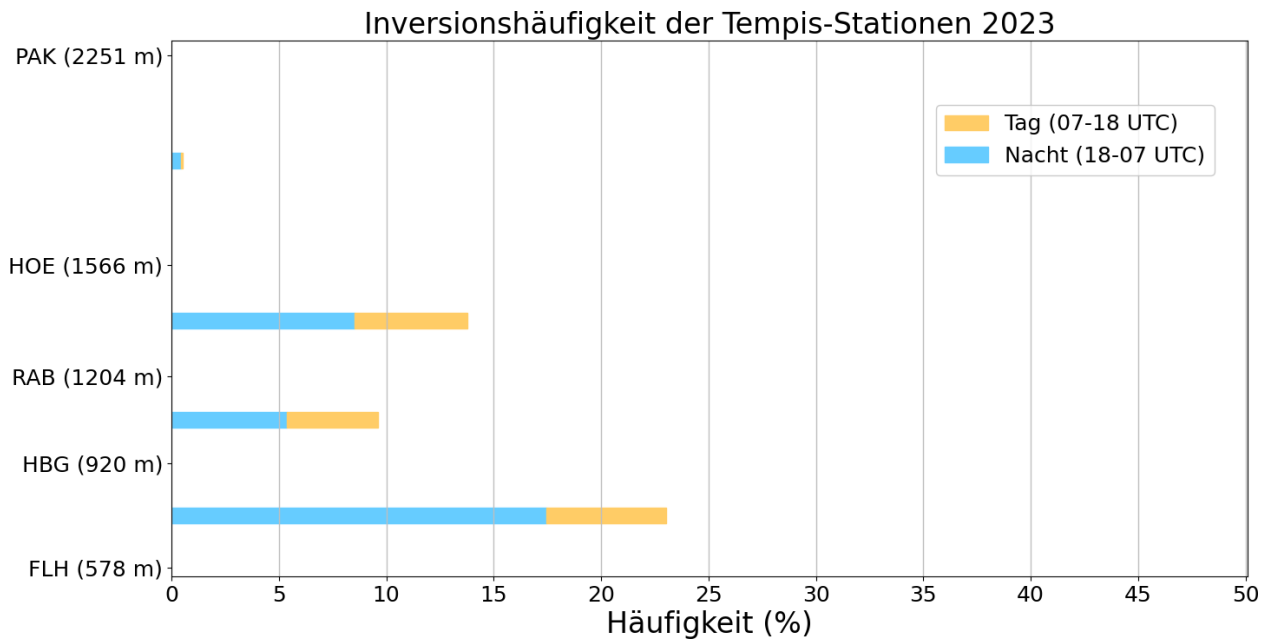


Abbildung 4: Häufigkeit der Inversionen in den verschiedenen Schichten im Jahr 2023. Gelbe Balken stehen dabei für den Anteil zwischen 7 und 18 UTC (8 und 19 MEZ), blau für den Anteil zwischen 18 und 7 UTC (19 und 8 MEZ), vereinfacht also für den Tages- und Nachtanteil.

In Abbildung 5 wird der zeitliche Verlauf der Inversionen im Jahr 2023 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 °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.

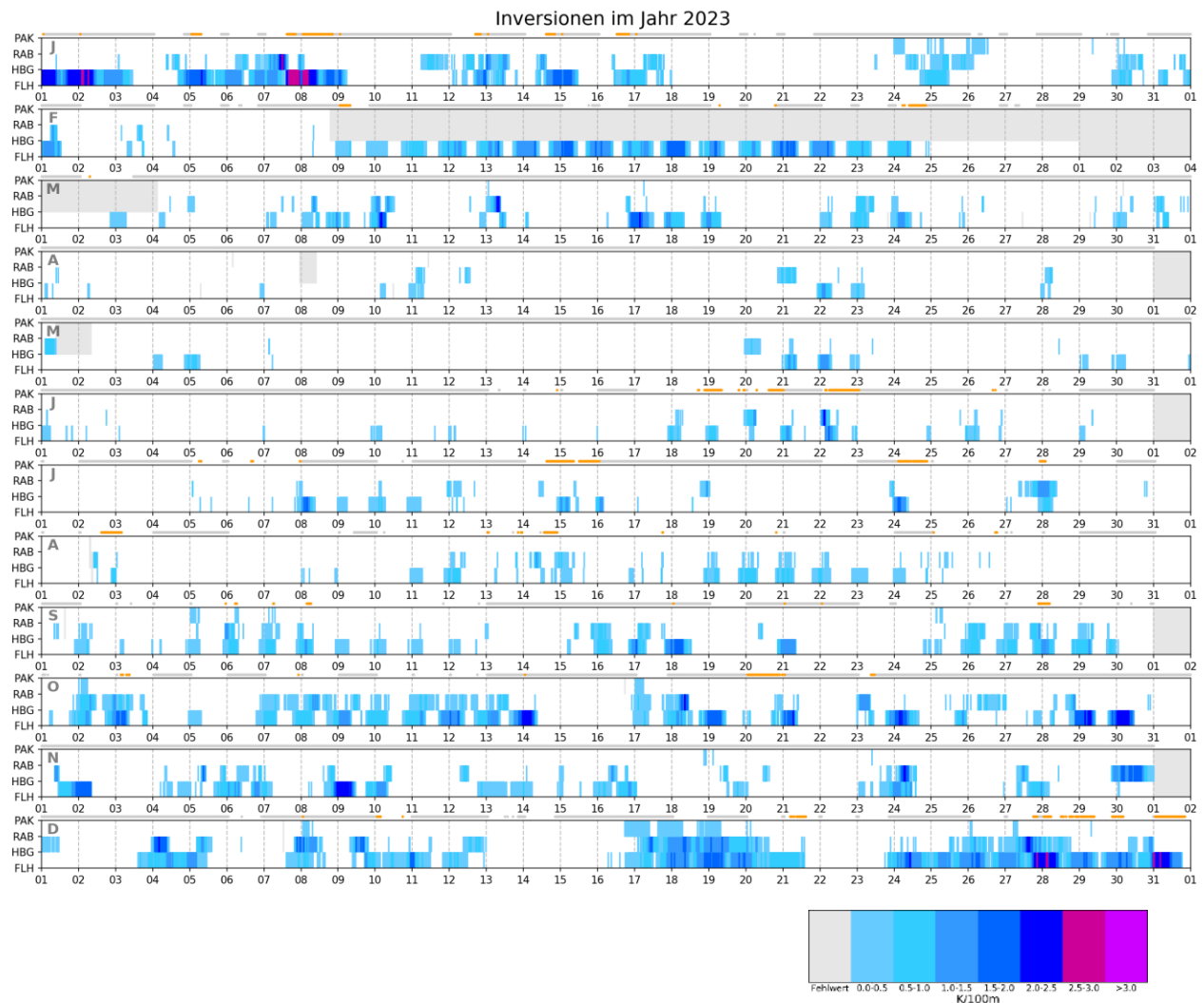


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Inversionen im Jahr 2023 in den Schichten FLH – HBG, HBG – RAB und RAB – PAK auf Basis von Halbstundenmittelwerten samt Legende mit Zuordnung der Farbskala (rechts unten). Weitere Erklärungen sind dem Text zu entnehmen.

Der saisonale Verlauf der Inversionen tritt klar zu Tage. Bis etwa Ende Februar und ab Oktober gab es längere stabile Phasen, die Inversionen reichten in der Mehrzahl bis zum Rastlboden hinauf. Zu beachten ist hier der gut dreiwöchige Ausfall der Station RAB ab 8. Februar (siehe Abschnitt 3), 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. Die bodennahe Inversion wird durch die darüber fließende warme Luft gleichzeitig verstärkt. Dies ist beispielsweise am 7. und 8. Jänner 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 2023 im Vergleich zum Schnitt der Vorjahre zusammen. Die Tabelle enthält im Sinne der Vollständigkeit auch die sehr dünnen Schichten unterhalb der HBG.

	$\Delta z$	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
<b>2023</b>														
<b>HBF</b>	33	<b>54</b>	57	<b>48</b>	<b>34</b>	<b>38</b>	53	<b>48</b>	52	72	<b>76</b>	57	71	<b>55</b>
<b>ODO</b>	57	53	54	47	<b>28</b>	<b>32</b>	47	43	47	<b>61</b>	66	<b>48</b>	62	<b>49</b>
<b>ALP</b>	90	58	69	49	<b>31</b>	32	43	<b>36</b>	38	59	64	<b>43</b>	<b>39</b>	<b>48</b>
<b>HBG</b>	342	36	40	18	<b>4</b>	5	8	9	12	<b>26</b>	38	27	54	23
<b>RAB</b>	626	34	<b>7</b>	13	<b>1</b>	2	4	<b>6</b>	6	19	35	<b>18</b>	47	<b>17</b>
<b>HOE</b>	988	26	35	<b>7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	2	3	8	<b>14</b>	27	<b>11</b>	42	15
<b>PAK</b>	1673	7	14	1	0	0	0	0	0	3	7	1	19	4
<b>Schnitt 2016-2022</b>														
<b>HBF</b>	33	77	69	57	57	53	59	61	63	64	66	66	76	64
<b>ODO</b>	57	65	58	48	48	42	45	46	49	50	58	58	68	53
<b>ALP</b>	90	69	61	53	52	40	42	43	47	49	57	59	70	54
<b>HBG</b>	342	47	38	23	18	9	9	8	11	16	33	37	50	25
<b>RAB</b>	626	43	35	16	11	5	5	3	6	12	30	37	49	21
<b>HOE</b>	988	37	29	13	8	2	3	2	4	9	24	33	42	17
<b>PAK</b>	1673	17	9	2	0	0	0	0	0	1	7	12	19	6
<b>Minimum 2016-2022</b>														
<b>HBF</b>	33	64	56	51	47	46	53	51	45	47	60	52	65	57
<b>ODO</b>	57	46	41	37	39	36	36	40	35	42	48	49	62	50
<b>ALP</b>	90	48	51	42	36	27	31	37	32	32	47	44	60	49
<b>HBG</b>	342	24	15	13	10	5	3	4	6	11	20	25	36	22
<b>RAB</b>	626	23	17	8	6	2	1	2	2	8	16	24	34	19
<b>HOE</b>	988	16	13	10	4	1	0	2	1	5	13	21	25	15
<b>PAK</b>	1673	2	3	0	0	0	0	0	0	0	2	1	10	3
<b>Maximum 2016-2022</b>														
<b>HBF</b>	33	92	79	61	72	64	69	71	76	75	75	79	90	69
<b>ODO</b>	57	79	69	60	67	49	58	53	55	58	68	71	83	56
<b>ALP</b>	90	86	76	66	72	51	51	54	56	59	64	78	94	59
<b>HBG</b>	342	76	52	34	30	13	16	13	13	24	40	62	85	30
<b>RAB</b>	626	72	49	23	19	9	12	6	9	19	41	62	81	25
<b>HOE</b>	988	65	48	18	15	3	8	3	9	13	34	62	76	21
<b>PAK</b>	1673	39	22	5	1	0	0	0	1	5	12	36	45	9

Tabelle 7: Inversionshäufigkeit (in %) zwischen Flughafen und der jeweiligen Station in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2023 (oben), gefolgt vom Durchschnitt bzw. minimalen und maximalen Werten zwischen 2016-2022. Mit  $\Delta z$  ist die Schichtdicke (in m) angegeben. Die Häufigkeiten sind farbkodiert – je dunkler der Zellenhintergrund, umso höher die Häufigkeit. Im obersten Abschnitt „2023“ sind zudem jene Werte fett blau (braun) formatiert, die den bisherigen Maximalwert (Minimalwert) übertreffen (unterschreiten).

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 September und Oktober wurden – verglichen mit den Vorjahren – relativ viele Inversionen verzeichnet. In den übrigen Monaten war die Häufigkeit normal bis un-



terdurchschnittlich. Im Jahresschnitt wurde die seit 2016 geringste Häufigkeit zu allen Stationen bis zum Alpenzoo sowie zum Rastlboden registriert (vgl. Abschnitt 4.5).

Erwartungsgemäß waren Inversionen wie in den Vorjahren nachts (18 bis 7 UTC, Tabelle A2 im Appendix) deutlich 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 meist übertrafen.

#### 4.5 Einordnung in die Innsbrucker TEMPIS-Reihe seit 1999

In einem Projekt der ZAMG (durch die Zusammenlegung mit der GBA seit 1.1.2022 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 21 Jahre an Temperaturdaten vor, für den Rastlboden 20 und für den Patscherkofel alle 25.

In Abbildung 6 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 16,8 und 31,1 % und bis zum PAK zwischen 1,8 und 10,8 %.

Im Jahr 2023 lag die Inversionshäufigkeit bis zur Hungerburg bei 23,0 %, bis zum Rastlboden bei 16,8 % und bis zum Patscherkofel bei 4,2 %. In der Schicht bis zum Rastlboden ist dies der niedrigste Wert in der ganzen Reihe. In der Schicht Flughafen – Hungerburg gab es nur einmal weniger Inversionen, das war im Jahr 2017 mit 22,2 %. Insgesamt ist aber seit 1999 kein signifikanter Trend nachweisbar, die witterungslagenabhängige Variabilität dominiert.

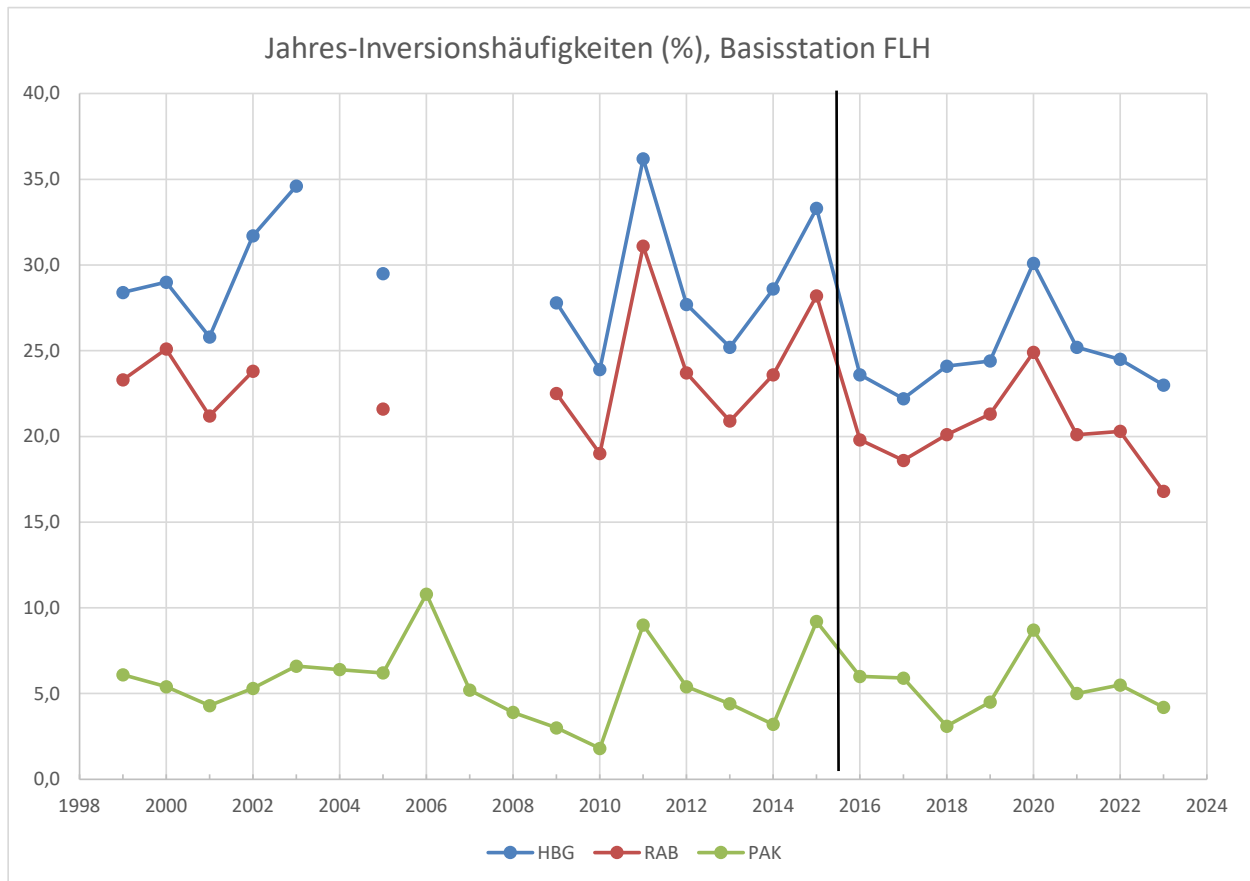


Abbildung 6: Jahres-Inversionshäufigkeiten der langjährigen TEMPIS-Reihen von 1999 bis 2023 (bis 2018 basierend auf 30-Minuten-Daten, ab 2019 auf 10-Minuten-Daten) für die Schichten zwischen Flughafen und Hungerburg (blau), Rastlboden (rot) und Patscherkofel (grün). Der schwarze Trennstrich markiert die Grenze zwischen altem und neuem Hangprofil.

Zeitreihen der jahreszeitlichen Häufigkeit von Inversionen werden in Abbildung 7 gezeigt. Zunächst fällt auf, dass es in einem Jahr relativ viele Inversionen in einer Jahreszeit und wenig in einer anderen geben kann. Das ist wenig verwunderlich, ist aber bei der Aufsummierung auf Jahreswerte mitzudenken.

Der Winter (Monate Dezember bis Februar, kurz DJF) ist die einzige Jahreszeit, in dem es eine relevante Anzahl von Inversionen vom Talboden bis zur Kammhöhe, also bis zum Patscherkofel, gibt. Das Maximum trat im Winter 2016/17 (= Dezember 2016 bis Februar 2017) mit bemerkenswerten 27,7 % auf. Insgesamt fällt in allen drei ausgegebenen Schichten auf, dass die Inversionshäufigkeit von Jahr zu Jahr stark variieren kann. Bekannte Einflussfaktoren sind die Häufigkeit von Luftmassenwechseln durch Fronten oder Föhn sowie die Schneebedeckung. In der Schicht FLH-HBG reicht die Bandbreite der Inversionshäufigkeit von 31,1 % aller Zeiten im Winter 2012/13 bis 60,5 % im Winter 2001/02. Ein zu- oder abnehmender Trend ist allerdings nicht auszumachen. Der vergangene Winter 2023/24 war im Auftreten von Inversionen mit 48,0 % nahe am langjährigen Schnitt.

Im Frühling (MAM) werden aufgrund der stärkeren Einstrahlung schon deutlich weniger Inversionen registriert. In der Schicht FLH-HBG reicht die Bandbreite von 9,1 % im Jahr 2023 bis 25,9 % in den Jahren 2003 und 2011. Im vergangenen Frühling wurde der klar niedrigste Wert der Reihe erreicht, der zweitniedrigste Wert der Inversionshäufigkeit trat 2016 mit 13,4 % auf. Insgesamt ist eine Tendenz zu weniger Inversionen seit dem Maximalwert im Jahr 2011 in den Schichten FLH-HBG und FLH-RAB zu beobachten. Wie aussagekräftig dieser Trend ist, werden die nächsten Jahre zeigen.

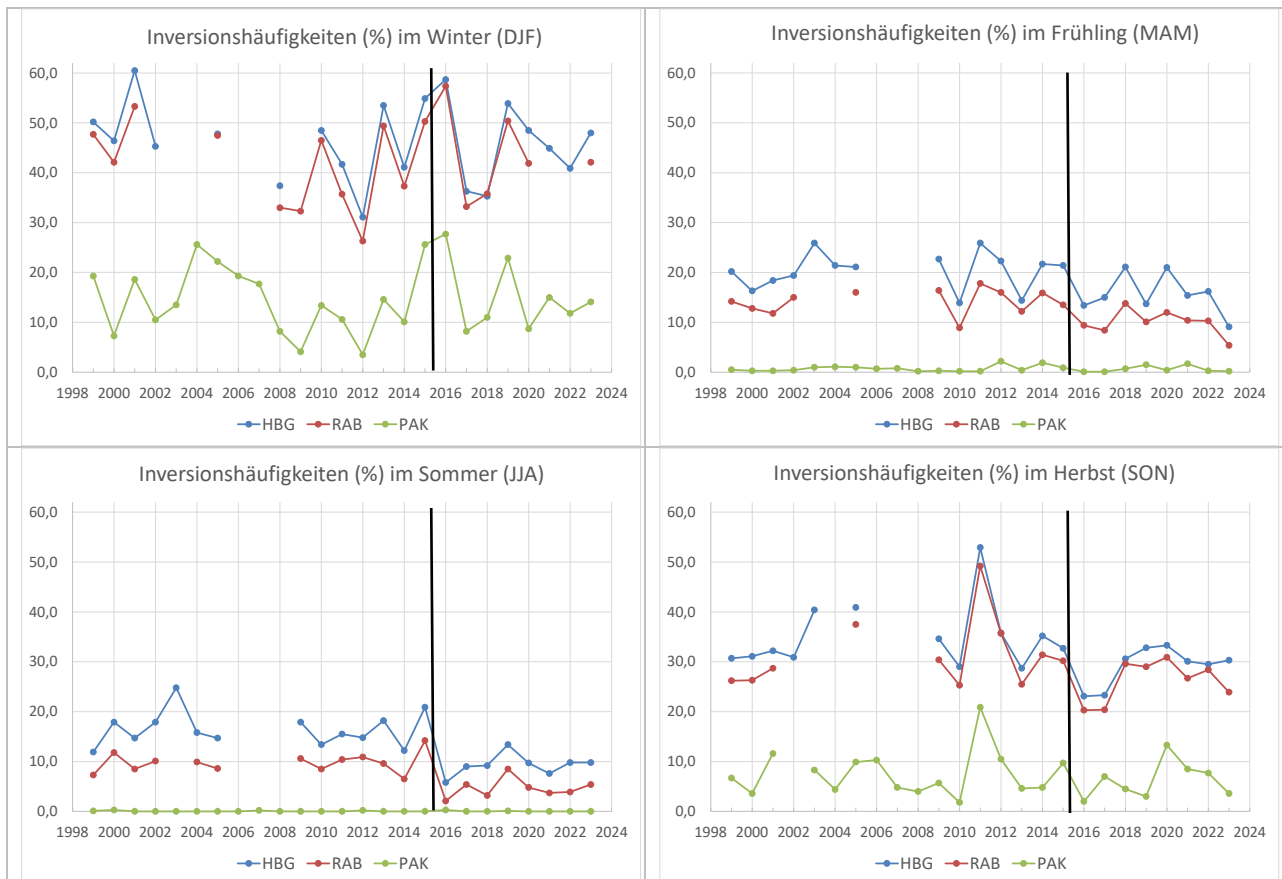


Abbildung 7: Wie Abbildung 6, aber getrennt nach Jahreszeiten. Links oben: Winter (DJF), rechts oben: Frühling (MAM), links unten: Sommer (JJA), rechts unten: Herbst (SON). Die y-Skala reicht im Sinne der Vergleichbarkeit bei allen vier Abbildungen bis 60 %. Im Winter entspricht die Jahreszahl dem zugehörigen Dezember, z.B. Winter 2016 = Dezember 2016 bis Februar 2017.

Im Sommer (JJA) gibt es erwartungsgemäß die geringsten Inversionshäufigkeiten. Deutlich sichtbar ist der Bruch des allgemeinen Niveaus 2016: davor schwankten die Werte zwischen 11,9 % im Sommer 1999 und 24,8 % im Sommer 2003. Mit der neuen TEMPIS-Reihe reicht die Bandbreite von 5,8 % im Sommer 2016 bis 13,4 % im Sommer 2019. Diese annähernde Halbierung dürfte auf die Ventilierung der Sensoren und den besseren Strahlungsschutz zurückzuführen sein. Die seit 2016 ermittelten Werte sind somit realistischer. Abgesehen von diesem Bruch ist kein Trend in den Daten auszumachen.

Im Herbst (SON) ist die oben genannte Inhomogenität vor/nach 2016 weniger klar ersichtlich. In der neuen Reihe ist kein zeitlicher Trend ersichtlich. Von Jahr zu Jahr gibt es teils große

Schwankungen, die geringste Inversionshäufigkeit wurde 2016 mit 23,1 % registriert, die höchste 2011 mit 52,9 %. Letzteres übertrifft sogar viele Winter-Werte und ist auf die außergewöhnlich hohe Anzahl an Hochdruckwetterlagen im Herbst 2011 zurückzuführen. Diese sorgen in der kalten Jahreszeit für starke nächtliche Auskühlung in Bodennähe.

## 5 Auswertung der Feuchte im Jahr 2023

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 2023 (oben). Um die Werte einordnen zu können, folgen in den drei Tabellenabschnitten darunter Durchschnitt bzw. minimale und maximale Werten zwischen 2016-2022. Fett blau (rot) gedruckte Werte aus dem Jahr 2023 bedeuten, dass sie den bisherigen Maximalwert (Minimalwert) übertreffen (unterschreiten).

Übers Jahr gerechnet lag die relative Feuchte 2023 an allen Stationen im Bereich von 71-78 %. 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 folgen dann bereits FLH und RAB mit jeweils 77 %. An allen Stationen ist es im Jahresschnitt feuchter als im Vorjahr (welches bis zum August recht trocken war mit dem trockensten März der gesamten Messreihe). An den Stationen FLH, HBF und RAB war 2023 sogar das im Durchschnitt feuchteste Jahr – wobei die Schwankungsbreite über die Jahre hinweg zwischen 3 und maximal 6 Prozentpunkten liegt.

Der Jahresverlauf ist von teils starken Schwankungen geprägt: die Monate Februar, Juni, September und Oktober waren dabei über das gesamte Profil eher trocken, an einigen Stationen sogar die bisher trockensten der jeweiligen Messreihe seit 2016. Während es im Februar vor allem der fehlende Niederschlag nach dem 3.2. war, ist die Situation im Herbst bei nur leicht unterdurchschnittlichen Niederschläge hauptsächlich auf die hohen Temperaturen zurückzuführen, im Juni ist es eine Kombination aus beidem. Im Gegensatz zu diesen trockenen Phasen stechen die Frühlingsmonate März, April und Mai heraus, die an zahlreichen Stationen

die feuchtesten der jeweiligen Messreihe waren, ebenso der November. Ursache waren die wiederholten und besonders im Mai und November teils starken Niederschläge bei gleichzeitig eher kühler Witterung.

Gerade diese Kombination – wiederholte Niederschläge und kühle Witterung - deutet auf vermehrten Tiefdruckeinfluss hin und damit labile Verhältnisse. In solchen Phasen sind tendenziell relativ geringe Schadstoffansammlungen in der Talatmosphäre zu erwarten.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
<b>2023</b>													
<b>FLH</b>	84	71	73	72	74	63	74	76	77	77	87	90	77
<b>UNI</b>	79	65	67	67	70	59	68	70	70	70	81	84	71
<b>HBF</b>	81	64	69	69	72	59	71	73	69	68	81	85	72
<b>ODO</b>	77	63	67	67	69	58	68	70	70	69	83	86	71
<b>ALP</b>	NA	NA	70	71	75	64	75	74	73	69	84	86	74
<b>HBG</b>	78	64	71	75	78	64	76	76	74	68	83	80	74
<b>RAB</b>	78	NA	72	79	80	68	78	81	79	70	86	79	77
<b>HOE</b>	74	60	75	81	84	70	NA	73	72	64	79	66	73
<b>PAK</b>	75	63	79	87	88	76	81	79	75	71	85	71	78
<b>Durchschnitt 2016-2022</b>													
<b>FLH</b>	83	75	66	62	68	68	72	74	78	79	83	85	74
<b>UNI</b>	80	71	62	58	65	65	68	71	74	75	80	82	71
<b>HBF</b>	79	70	60	56	63	64	65	67	73	73	79	82	69
<b>ODO</b>	80	72	62	58	65	67	68	72	74	73	79	82	71
<b>ALP</b>	80	73	63	59	69	70	74	76	79	77	80	83	74
<b>HBG</b>	78	72	66	63	72	72	76	78	81	76	80	80	75
<b>RAB</b>	74	70	67	66	74	74	78	80	81	75	77	75	74
<b>HOE</b>	68	64	64	69	76	73	76	78	79	72	72	69	72
<b>PAK</b>	72	71	74	78	84	79	81	81	81	75	75	71	77
<b>Minimum 2016-2022</b>													
<b>FLH</b>	78	72	53	55	64	61	67	69	74	73	77	78	72
<b>UNI</b>	76	66	48	51	60	56	63	65	71	70	73	74	69
<b>HBF</b>	75	66	44	48	57	53	51	55	68	66	71	69	66
<b>ODO</b>	75	66	47	48	59	61	66	68	70	70	74	69	69
<b>ALP</b>	75	67	46	50	64	59	67	68	73	69	70	71	69
<b>HBG</b>	68	64	48	52	66	62	72	72	76	71	74	62	73
<b>RAB</b>	58	63	51	54	70	61	74	74	76	70	69	54	72
<b>HOE</b>	50	55	53	56	70	60	73	72	74	66	60	49	70
<b>PAK</b>	54	59	57	64	79	68	78	76	75	68	59	51	75

Maximum 2016-2022													
<b>FLH</b>	87	78	70	68	73	76	75	78	82	84	87	91	<b>76</b>
<b>UNI</b>	84	75	67	65	70	72	72	75	81	79	83	85	<b>72</b>
<b>HBF</b>	83	72	65	62	68	71	70	73	77	80	84	89	<b>71</b>
<b>ODO</b>	90	78	68	65	75	72	72	75	79	78	84	88	<b>73</b>
<b>ALP</b>	86	76	68	67	74	79	80	84	85	82	85	87	<b>75</b>
<b>HBG</b>	89	85	72	72	80	81	82	87	87	83	85	88	<b>76</b>
<b>RAB</b>	86	86	75	75	82	84	82	86	87	85	84	82	<b>76</b>
<b>HOE</b>	82	81	70	75	81	83	80	84	85	84	77	76	<b>74</b>
<b>PAK</b>	84	85	86	85	90	89	86	88	87	84	86	79	<b>81</b>

Tabelle 8: Relative Feuchte (in %) an den TAWES und TEMPIS-Stationen in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2023 (oben), gefolgt vom Durchschnitt bzw. minimalen und maximalen Werten zwischen 2016-2022. 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 „2023“ 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 2023 an den Stationen Alpenzoo und Höttinger Alm in Abbildung 8 erkennen. Tagsüber war es im Jahresschnitt (und an den meisten Tagen) durch die Temperaturzunahme sowie die vertikale Durchmischung trockener als nachts.

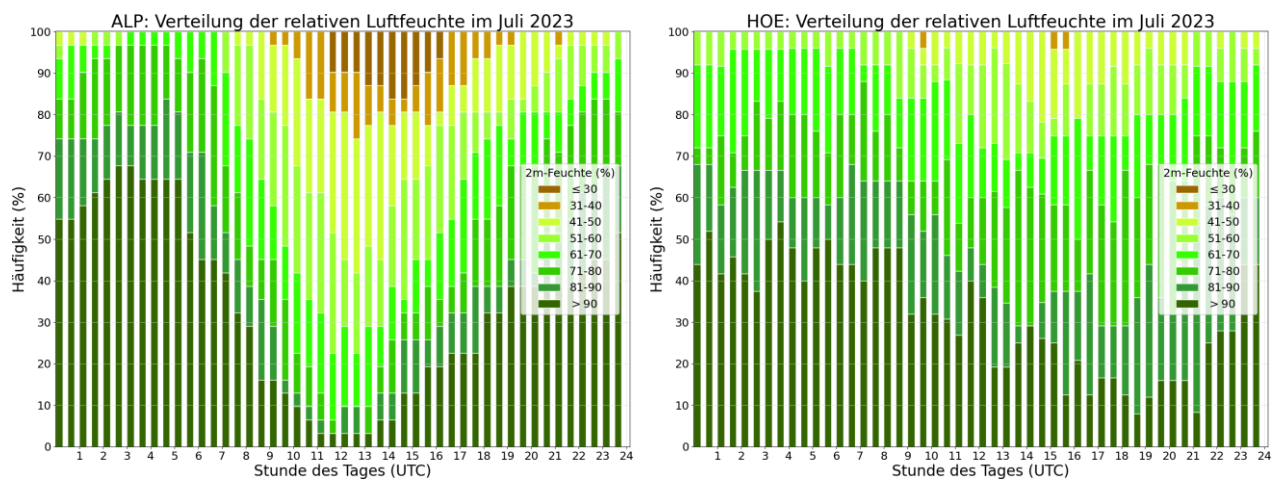


Abbildung 8: Tagesgang der Häufigkeitsverteilung der relativen Feuchte im Alpenzoo (links) und auf der Höttinger Alm (rechts) im Juli 2023.



## 6 Auswertung des Windes im Jahr 2023

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. Im Raum Innsbruck ist hier vor allem der Südföhn durch das Wipptal zu nennen.

### 6.1 Windrichtung

Im heurigen Bericht wird der Fokus auf die Jahr-zu-Jahr Variabilität in der Richtungsverteilung gelegt. Diese wird in Abbildung 9 für die beiden Stationen Flughafen und Universität im Zeitraum 2016 bis 2023 gezeigt. Betrachtet man die Grafiken, so ist die Windrichtungsverteilung in den einzelnen Jahren sehr ähnlich.

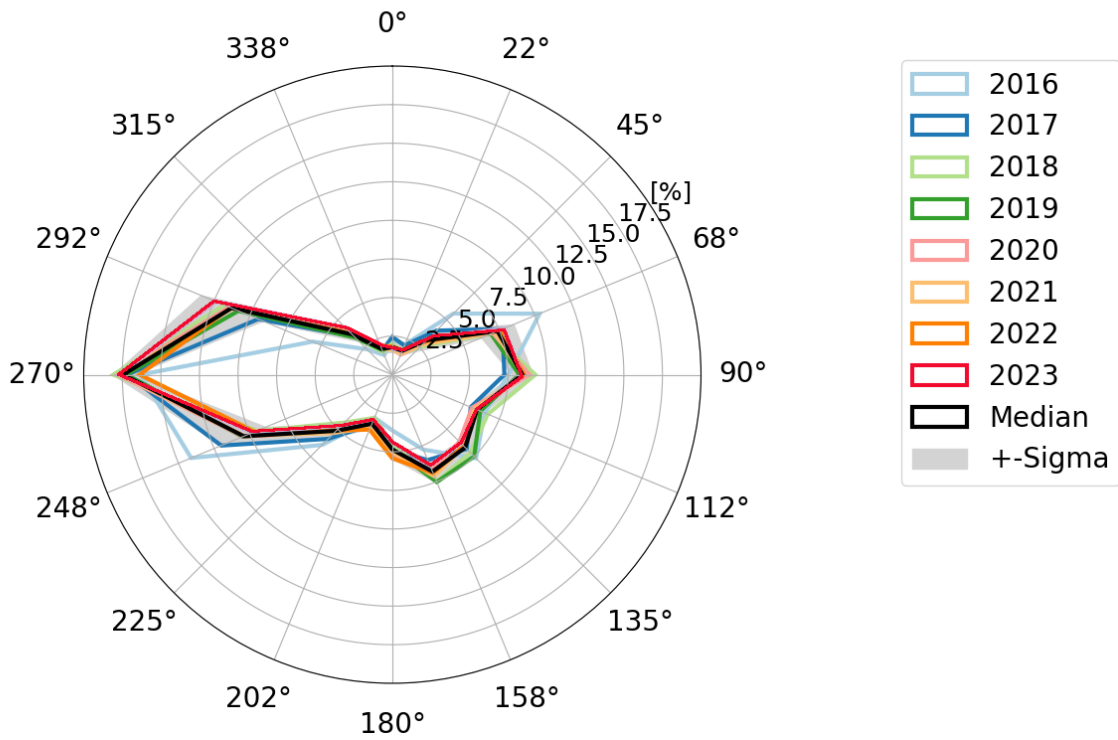
Die auftretenden Windrichtungen im Bereich vom Talgrund sind maßgeblich von der Ausrichtung der Achse des Inntals in der Umgebung von Innsbruck (W bis WSW nach O bis ONO) geprägt. Auch wenn in einzelnen Monaten bzw. Jahreszeiten manche Strömungslagen gehäuft auftreten, ändern sich die Häufigkeiten von Talein- und Talauswind von Jahr zu Jahr nur wenig. Dies liegt zunächst daran, dass das Talwindsystem thermodynamisch angetrieben und von der Topographie kanalisiert wird.

Zusätzlich ist im Raum Innsbruck der aus dem Wipptal kommende Föhn wichtig. Dessen Aufkommen wird von der Häufigkeit von Südlagen sowie der stark von der Jahreszeit abhängenden Stabilität in der bodennahen Schicht bestimmt.

Betrachtet man die Richtungsverteilung am Flughafen, so fällt das Jahr 2016 mit einer größeren Abweichung vom Periodenmittel (in schwarz) auf. In allen anderen Jahren ist die Differenz zum Periodenmittel in den einzelnen Richtungssektoren kleiner als 2 %. Die Windrichtungsverteilung im Jahr 2023 (in rot) entsprach recht gut dem langjährigen Schnitt, einzig Westnordwestströmungen traten klar häufiger auf.

Ähnlich verhält es sich mit der Messung an der Universität (auf dem Dach des Bruno-Sander Hauses). Das Jahr 2016 sticht mit weniger Talaus- und mehr Taleinwinden etwas heraus. 2019 gab es auffällig viel Föhn, wie der dunkelgrüne Zacken bei 180 ° (Wind aus Süden) zeigt. Im vergangenen Jahr 2023 war die Windverteilung nahe am Periodenmittel mit – wie bereits oben erwähnt – etwas überdurchschnittlichem Windaufkommen aus Westnordwest. Zeiten mit Südföhn gab es hingegen etwas seltener als im Durchschnitt der letzten acht Jahre.

# 11804 INNSBRUCK-FLUGPLATZ



# 11803 INNSBRUCK-UNIV.

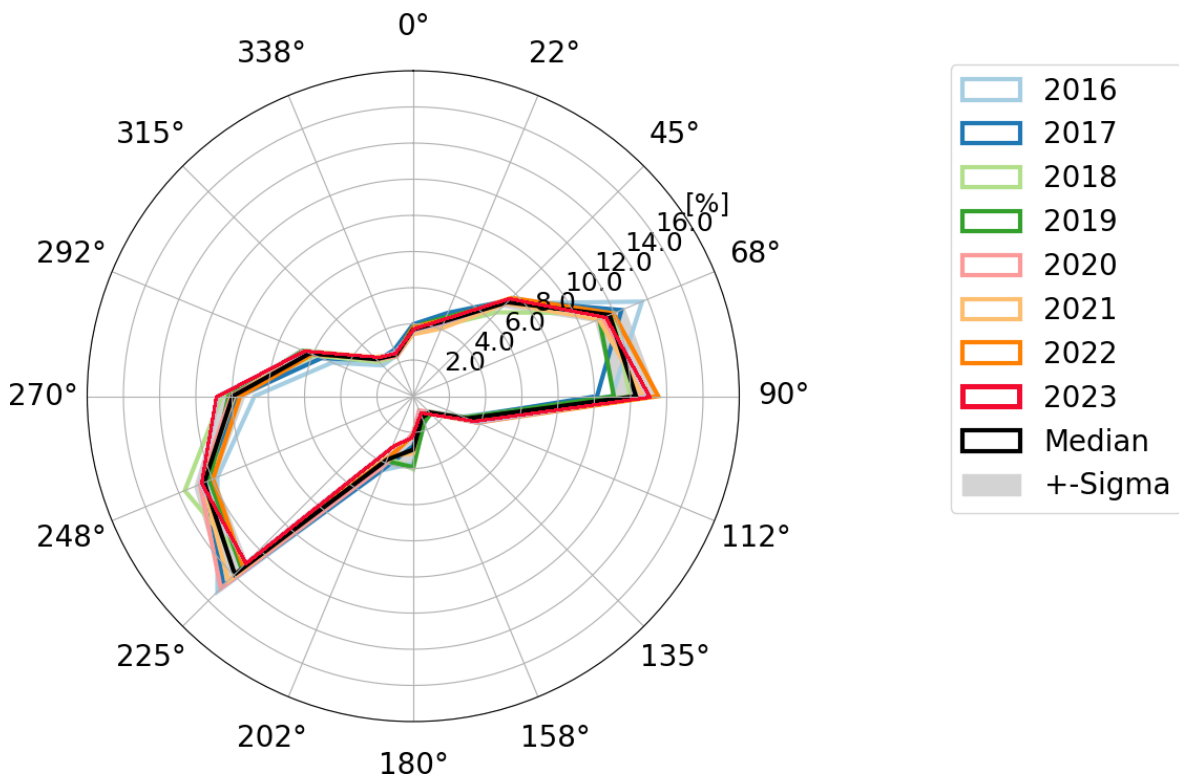


Abbildung 9: Vergleich der Jahreswindverteilungen der Einzeljahre der Periode 2016 bis 2023 am Flughafen (oben) und an der Universität (unten).

## 6.2 Windgeschwindigkeiten: 10 Minuten Mittelwind

Wie anhand der Tabelle 9 ersichtlich ist, lagen 2023 die Monatsmittel der mittleren Windgeschwindigkeiten an den Stationen am Talgrund zwischen 1,6 m/s und 3,5 m/s. Die geringste mittlere Windgeschwindigkeit am Talboden wurde in der kalten Jahreszeit registriert, konkret im Dezember an der Station UNI, die höchste im Juni an der Station ODO. Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit entsprach im Tal etwa dem Schnitt der Jahre 2016 bis 2022, am Patscherkofel wehte der Wind etwas schwächer als im 7-Jahresschnitt, was überwiegend am eher windarmen Verlauf im Winter und Frühjahr lag.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
<b>2023</b>													
FLH	1,9	2,2	2,6	2,3	2,0	2,1	2,1	2,1	1,8	2,2	2,6	2,0	<b>2,2</b>
UNI	1,8	1,8	2,2	2,3	2,1	2,3	2,1	1,8	1,8	1,9	2,0	1,6	<b>2,0</b>
HBF	2,1	1,8	2,2	<b>2,0</b>	<b>1,8</b>	2,2	2,0	1,9	<b>2,0</b>	2,2	2,3	1,8	<b>2,0</b>
ODO	2,1	2,7	2,9	3,4	3,1	3,5	3,0	2,5	2,5	2,8	2,8	2,0	<b>2,8</b>
PAK	<b>6,7</b>	6,3	7,4	5,5	4,5	4,2	5,3	5,5	5,6	9,8	9,6	7,7	<b>6,5</b>

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
<b>7-Jahres-Schnitt 2016-2022</b>													
FLH	2,0	2,4	2,4	2,7	2,4	2,3	2,0	2,0	1,7	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	1,8	1,7	1,6	1,9
HBF	1,8	2,2	2,4	2,6	2,3	2,3	1,9	2,0	1,8	2,1	2,0	1,9	2,1
ODO	2,0	2,8	3,3	3,9	3,4	3,4	2,9	2,8	2,3	2,7	2,5	2,2	2,8
PAK	8,1	8,3	7,1	7,6	6,3	5,4	4,6	4,7	4,9	8,2	8,6	8,3	6,9

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
<b>Minimum 2016-2022</b>													
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	2,0
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	2,0	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	6,9	5,9	5,6	5,1	4,3	4,2	3,7	3,7	3,9	5,9	5,2	6,6	6,1

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
<b>Maximum 2016-2022</b>													
FLH	2,6	3,2	2,7	3,5	2,8	2,7	2,2	2,4	1,8	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	2,9	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 2023 (oben) gefolgt vom Durchschnitt bzw. minimalen und maximalen Werten zwischen 2016-2022. Im obersten Abschnitt „2023“ sind jene Werte fett rot (blau) formatiert, die - auf eine Nachkommastelle berechnet - den bisherigen Maximalwert (Minimalwert) übertreffen (unterschreiten).

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

An allen vier Talstationen ist der 11. Juli unter den Top 2. An diesem Tag zog spätabends bzw. nachts eine Gewitterlinie mit einer ausgeprägten Böenfront über Tirol. Die weiteren Ereignisse sind mit West- oder Föhnlagen verbunden. Im Olympischen Dorf ist der Wind schon aufgrund der Stationsaufstellung am Hochhausdach stärker als an den anderen Talstationen, zudem kommt der Föhn hier besser zur Geltung, weil die Station direkt im Föhnast liegt, der aus dem Wipptal kommt und Richtung Unterland weiterfließt. Im Stadtzentrum (UNI, HBF) sind die Geschwindigkeiten aufgrund der erhöhten Rauigkeit reduziert. Am Patscherkofel lösten – wie schon in den Vorjahren – Südlagen die höchsten Geschwindigkeiten aus.

	FLH			UNI			HBF			ODO			PAK		
	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd
<b>1.</b>	11.07.	21,8	276	11.07.	12,9	300	17.08.	12,0	243	11.07.	23,3	285	20.10.	43,2	172
<b>2.</b>	22.12.	17,6	290	18.07.	12,6	302	11.07.	11,4	269	20.10.	22,4	193	02.11.	35,1	170
<b>3.</b>	24.11.	17,6	288	13.03.	11,2	188	13.03.	11,4	166	29.10.	18,7	188	13.03.	33,4	164

Tabelle 10: Datum, Windgeschwindigkeit im 10-Minutenmittel (ff, in m/s) und Windrichtung (dd, in Grad) der jeweils drei stärksten Ereignisse im Jahr 2023.

### 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 2023 liegen innerhalb der Bandbreite der vergangenen Jahre und sind dabei auf der niedrigen Seite. Im Vergleich zum Vorjahr, als die niedrigsten Werte seit der Installation der neuen TEMPIS-Stationen registriert wurden, sind die Überschreitungshäufigkeiten von 6 Beaufort klar höher, jene von 8 Beaufort nur geringfügig. An den innerstädtischen Stationen UNI und HBF wird der Schwellenwert von 8 Beaufort eindeutig (2023 und in allen anderen Jahren) am seltensten erreicht, was wie bereits erwähnt an der abbremsenden Wirkung der Bebauung liegt.

	% Gesamtzeit >= 6 Beaufort				
	FLH	UNI	HBF	ODO	PAK
2023	4,7	3,8	4,2	8,1	27,9
2022	3,9	3,5	3,8	6,9	25,3
2021	5,1	4,6	5,3	9,4	28,7
2020	4,6	4,2	4,7	9,9	25,5
2019	6,9	5,5	6,0	10,4	35,2

	% Gesamtzeit >= 8 Beaufort				
	FLH	UNI	HBF	ODO	PAK
2023	0,9	0,3	0,3	1,0	10,2
2022	0,9	0,2	0,3	0,7	8,3
2021	1,0	0,7	0,5	1,7	11,9
2020	1,0	0,7	0,8	1,5	10,1
2019	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 Überschreitungszeiten der Böen von 6 bzw. 8 Beaufort (mit Ausnahme der Station Patscherkofel farbkodiert) in den Jahren 2016 bis 2023 bezogen auf die gesamte Periode des jeweiligen Jahres für alle Stationen mit Windmessung.

In Tabelle 12 sind die drei stärksten Böenereignisse jeder Station gelistet. Generell zeigt sich das bekannte Bild, dass die stärksten Winde in Innsbruck bei West-, Nordwest- bzw. Südlagen auftreten (vgl. Abschnitt 6.2). Dabei können diese in allen Jahreszeiten auftreten. Besonders erwähnenswert ist das starke Ereignis am 18. Juli 2023. Am Flughafen wurde die stärkste Böe mit 161 km/h (44,6 m/s) registriert. So hohe Windspitzen treten im Tal nur alle paar Jahre auf. In Zusammenhang mit einer organisierten Gewitterlinie hatte der Durchzug einer ausgeprägten Gewitterlinie neben dem Starkwind eine Abkühlung um gute 10 °C und einen Druckanstieg von ca. 8 hPa bei einsetzendem Regen zur Folge (siehe Abbildung 10). Die Fallböen führten zu großen Schäden in Tirols Wäldern.

	FLH			UNI			HBF			ODO			PAK		
	Dat	ffx	ddx	Dat	ffx	ddx	Dat	ffx	ddx	Dat	ffx	ddx	Dat	ffx	ddx
1.	18.07.	44,6	275	18.07.	29,5	256	18.07.	35,6	348	11.07.	39,9	291	20.10.	54,6	184
2.	11.07.	36,7	281	11.07.	27,6	280	11.07.	28,2	281	20.10.	39,5	178	02.11.	41,4	157
3.	19.02.	28,7	301	13.03.	25,5	166	13.03.	24,6	161	18.07.	38,8	330	13.03.	40,2	170

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 2023.

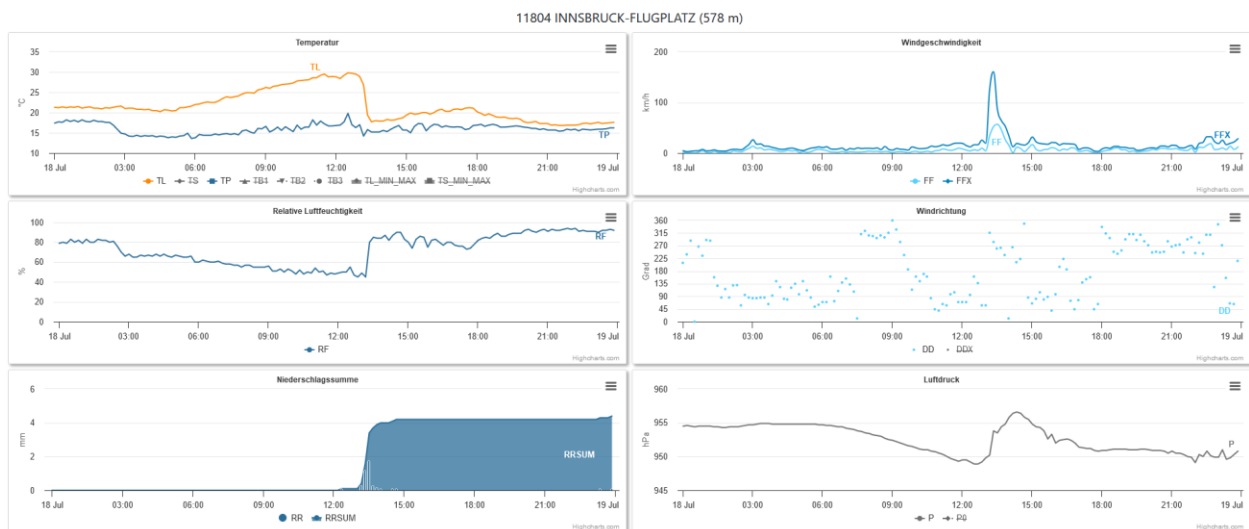


Abbildung 10: Zeitreihen der Messwerte am Flughafen Innsbruck vom 18. Juli 2023. Von links oben nach rechts unten: Temperatur und Taupunkt, Mittelwind und Windspitzen, relative Luftfeuchte, Windrichtung, Niederschlagssumme und Luftdruck.

## 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 2023. Längere windstille Perioden wurden 2023 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 auch nur maximal zweimal (am Hauptbahnhof) erreicht.

Am Flughafen traten Kalmen zu 22,8 % der Gesamtzeit auf (Vorjahr: 25,4 %), an den eher städtisch geprägten anderen Stationen am Talgrund mit 17,9 bis 18,9 % etwas seltener.

HMW-Dauer	Anzahl der Kalmen-Perioden 2023					
	von	FLH	UNI	HBF	ODO	PAK
1-2		1597	1530	1352	1460	253
3-6		417	286	314	336	17
7-12		39	15	32	22	0
13-24		1	1	2	1	0
25-49		0	0	0	0	0
≥ 49		0	0	0	0	0
SUMME der HMW		4003	3131	3204	3305	364
SUMME (%)		22,8	17,9	18,3	18,9	2,1

Tabelle 13: Häufigkeit verschiedener Klassen der Kalmendauer und Summe aller Halbstundenmittelwerte (HMW) an den verfügbaren Windstationen im Jahr 2023. 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 2023 lag die Häufigkeit windschwacher Situationen bei allen vier Talstationen innerhalb der Bandbreite der vergangenen Jahre. Hinsichtlich der Kalmen ist 2023 also als normales Jahr einzustufen.

	Kalmenhäufigkeit (% Gesamtzeit)							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<b>FLH</b>	23	24	21	24	25	24	25	23
<b>UNI</b>	20	20	17	18	21	18	19	18
<b>HBF</b>	17	17	14	15	18	17	19	18
<b>ODO</b>	18	20	16	17	18	18	20	19

Tabelle 14: Kalmenhäufigkeit in % der Gesamtzeit (auf Basis HMW) für die Jahre 2016 bis 2023.



## 7 Zusammenfassung

Das TEMPIS-Profil liefert auch im Jahr 2023 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.

Zusammen mit 2018 und 2022 zählt 2023 zu den wärmsten Jahren nicht nur der TEMPIS-Reihe, sondern auch an der seit 1877 bestehenden Station Innsbruck Universität und der seit 1967 geführten Messreihe auf dem Patscherkofel. In der Stadt lag die Durchschnittstemperatur in neun von zwölf Monaten über dem Mittelwert von 1991-2020, auf dem PAK in acht. Während das gesamte Frühjahr dank wiederholter Niederschläge recht feucht ausfiel, war es im Februar, Juni, September und Oktober über das gesamte Profil recht trocken.

Hinsichtlich der Häufigkeiten der (sehr) stabilen Schichtungen bzw. Inversionen ordnet sich 2023 im hinteren Bereich der letzten acht Jahre ein, teils auch an letzter Stelle. In der für die Luftqualität maßgeblichen Schicht zwischen Flughafen und Hungerburg herrschten während 23 % der Gesamtzeit Inversionsbedingungen. 2020 waren es rund 30 %, 2011 (allerdings mit der älteren Stationsausstattung) sogar gut 36 %. Nur 2017 gab es in dieser Schicht mit ca. 22 % noch eine Spur weniger Inversionszeiten als 2023. Hochreichende Inversionen bis zum Patscherkofel wurden in 4,2 % der Zeit verzeichnet, und dies hauptsächlich im Winter von Dezember bis Februar, sowie im Oktober.

Heuer wurde erstmals die saisonale Inversionshäufigkeit im Laufe der Jahre untersucht. Wenig überraschend sticht der Winter mit den höchsten Häufigkeiten hervor, allerdings auch mit den stärksten Schwankungen von Jahr zu Jahr. Zwar wird im Frühjahr ein leicht abnehmender Trend (auf einem generell eher niedrigen Niveau) angedeutet, dies ist aber aufgrund der Kürze der Gesamtreihe sowie der Umstellung auf die verbesserten Messstationen ab 2016 (noch) nicht sehr aussagekräftig. In den übrigen Jahreszeiten ist dieser Trend jedenfalls nicht festzustellen, im Sommer ist hingegen die Inhomogenität der Messreihe mit einem deutlichen Rückgang der Inversionshäufigkeit ab 2016 recht klar ersichtlich, die durch die Ventilierung der Sensoren und einen verbesserten Strahlungsschutz erklärt werden kann.

Die Windstärke war 2023 recht durchschnittlich, am Patscherkofel leicht unterdurchschnittlich. Die gilt sowohl für den Mittelwind als auch die Böen, sowie die Überschreitungshäufigkeiten von Starkwindereignissen mit 6 bzw. 8 Beaufort und ebenso die Kalmen. Die Analyse der Windrichtungsverteilung hat ergeben, dass diese sich über die Jahre sehr konstant verhält. Einzig ein geringfügig überdurchschnittliches Windaufkommen aus Westnordwest konnte für 2023 festgestellt werden.