

Auswertung des TEMPIS-Hangprofils Innsbruck für das Jahr 2019

Durchführung
Kundenservice Tirol und Vorarlberg

Erstellt von
Dr. Susanne Drechsel
und
Dr. Johannes Vergeiner

Inhalt

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Stationen des Innsbrucker Hangprofils | 3 |
| 3 | Datenverfügbarkeit und -qualität im Jahr 2019 | 5 |
| 4 | Auswertung der Temperatur im Jahr 2019 | 6 |
| 4.1 | Monats- und Jahresmitteltemperatur | 6 |
| 4.2 | Temperaturprofile | 7 |
| 4.3 | Stabilität | 9 |
| 4.4 | Inversionen | 14 |
| 4.5 | Stabilitätsanalysen in dünnen Schichten unterhalb der Hungerburg | 17 |
| 4.6 | Einfluss der städtischen Wärmeinsel auf die Stabilitätsauswertung | 19 |
| 4.7 | Einordnung in die Innsbrucker TEMPIS-Reihe seit 1999 | 20 |
| 4.8 | Vergleich mit anderen Inversionsstudien | 22 |
| 5 | Auswertung der Feuchte | 24 |
| 6 | Auswertung des Windes | 26 |
| 6.1 | Windrichtung | 26 |
| 6.2 | Windgeschwindigkeiten: 10 Minuten Mittelwind | 28 |
| 6.3 | Windgeschwindigkeiten: 2 Sekunden Böen | 29 |
| 6.4 | Kalmen | 30 |
| 7 | Fazit | 32 |
| 8 | Literatur | 32 |

1 Einleitung

Die Auswertung des TEMPIS Hangprofils für das Jahr 2019 liefert nun bereits den vierten Jahres-Überblick über die Temperatur- und Feuchteverteilung der Innsbrucker Talatmosphäre und die Windverhältnisse im Inntal. Anhand der Auswertungen hat sich inzwischen gezeigt, dass insbesondere die Stabilitäts- bzw. Inversionsanalysen der sehr dünnen Schichten im Bereich vom Talboden sehr empfindlich auf verschiedene Einflüsse reagieren. Dazu gehören vor allem der städtische Wärmeineffekt, die Höhe der Station über Grund, Messungenauigkeiten und lokale Unterschiede wie z.B. Lage in Talmitte versus Lage am Hang. In Abschnitt 4.5 und 4.6 werden diese Einflüsse auf Stabilität und Inversionen detaillierter gezeigt. Um den Stadteffekt zu beseitigen, wird ab diesem Bericht für sämtliche Stabilitätsauswertungen die Station Flughafen anstelle von Innsbruck Universität verwendet. Die Problematik der lokalen Unterschiede und Messungenauigkeiten kann hingegen nicht gelöst werden. Daher werden die sehr dünnen Schichten unterhalb der Hungerburg - also bis bzw. zwischen Hauptbahnhof, Olympischem Dorf und Alpenzoo – mit sehr wenigen Ausnahmen nicht mehr ausgewertet. Stattdessen wird ab diesem Bericht die deutlich mächtigere und in ihrer Aussagekraft stabilere Schicht zwischen Flughafen und Hungerburg als unterste Schicht verwendet. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass der Inhalt des vorliegenden Berichts um einige Ergebnisse aus den älteren, seit 1999 ausgewerteten TEMPIS-Reihen erweitert werden konnte.

2 Stationen des Innsbrucker Hangprofils

Bei den Stationen gibt es keine Veränderungen zu den vergangenen drei Jahren bzw. Berichten. Vereinzelt mussten Koordinaten- und Höhenangaben gegenüber den vorigen Angaben leicht korrigiert werden. Die wichtigsten Informationen zu den jeweiligen Standorten sind kurz in diesem Kapitel zusammengefasst, weitere Details sind im Appendix im Abschnitt A1 zu finden.

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

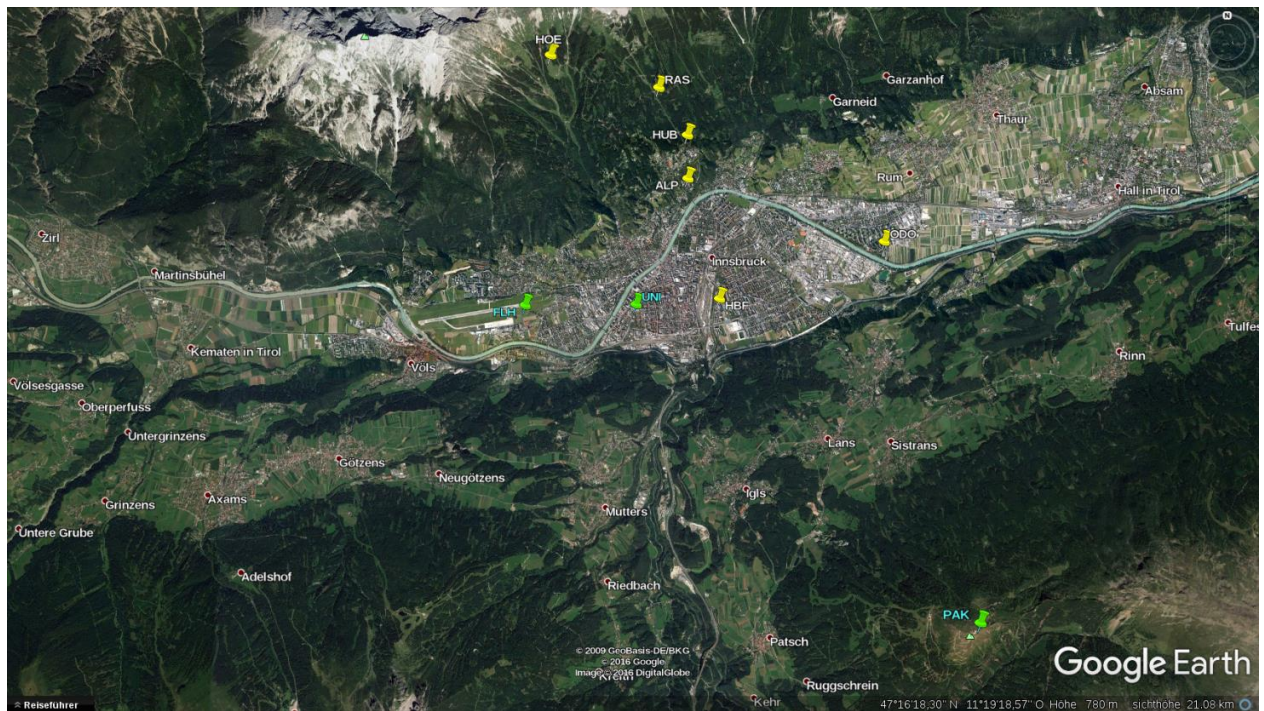


Abbildung 1: Satellitenfoto mit den Standorten der Tempis-Stationen (gelb) und zusätzlich der TAWES der ZAMG (grün) im Bereich Innsbruck, der Nordkette und auf dem Patscherkofel (Quelle: Google Earth).

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

| Name | Kürzel | geogr. Länge (WGS 84) | geogr. Breite (WGS 84) | Höhe ü.d. Meer (m) | Höhe ü. Grund (m) | MAST (m) | T | rh | Wind |
|------------------|--------|-----------------------|------------------------|--------------------|-------------------|----------|----|----|------|
| Hauptbahnhof | HBF | 11,405103 | 47,260656 | 611 | 25 | 6 | ja | ja | ja |
| Olympisches Dorf | ODO | 11.446341 | 47.270121 | 635 | 65 | 6 | ja | ja | ja |
| Alpenzoo | ALP | 11.397504 | 47.280986 | 665 | 3 | 3 | ja | ja | nein |
| Hungerburg | HBG | 11.397366 | 47.287872 | 907 | 11,5 | 0 | ja | ja | nein |
| Rastlboden | RAB | 11.390418 | 47.295204 | 1208 | 6,5 | 0 | ja | ja | nein |
| Höttinger Alm | HOE | 11,364569 | 47,299844 | 1566 | 3 | 3 | ja | ja | nein |
| Flughafen | FLH | 11.356537 | 47.259953 | 578 | 25/2 | 2 | ja | ja | ja |
| Innsbruck Uni | UNI | 11.384243 | 47.259850 | 578 | 47/2 | 2 | ja | ja | ja |
| Patscherkofel | PAK | 11.462274 | 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 Tempis-Stationen gilt dies für alle Parameter, bei den TAWES bezieht sich der erste Wert auf die Windmessung, der zweite auf Temperatur und Feuchte), in der siebten Spalte wird die Masthöhe angeführt. In den letzten drei Spalten wird festgehalten, ob Temperatur (T), relative Feuchte (rh) und Wind gemessen werden.

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

3 Datenverfügbarkeit und -qualität im Jahr 2019

Die Datenverfügbarkeit für das Jahr 2019 beträgt für die meisten Standorte 99,4 bis 100 %, wobei die Ausfälle oft nur wenige Stunden dauerten. An der Station Hauptbahnhof fiel der interne Datenspeicher zwischen 9. April und 15. Mai aus. Vor allem durch diese sehr lange Lücke sind dort sämtliche Parameter nur zu 90 % des Gesamtzeitraums verfügbar.

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

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

Bei den TAWES gab es 2019 keine nennenswerten Probleme bei den in diesem Bericht verwendeten Parametern. Bei den TEMPIS-Stationen sind die folgenden Anmerkungen zu machen: Am HBF sorgten Akku-Defekte für den oben genannten größeren Ausfall im April und Mai. Am 22. Juli wurde ein Fehler bei der Feuchtemessung erkannt, der Sensortausch erfolgte (erst) am 23. August. Auch im ODO war die Feuchtemessung zwischen 15. und 25. Juni fehlerhaft. Vergleiche mit UNI und ALP legen zudem nahe, dass die Temperaturmessung in diesem Zeitraum geringfügig (um etwa +0.5 °C) zu hoch ausgefallen ist – konkrete Belege dafür gibt es jedoch nicht, bei entsprechenden Auswertungen ist dies aber im Hinterkopf zu behalten. Bei der Überprüfung ähnlicher Fehlermeldungen an den Stationen Alpenzoo und Höttinger Alm (3. - 12. Juli) konnten keine klar erkennbaren Abweichungen gefunden werden. Hingegen ist die Notiz aus dem Servicebericht für die HOE am 2. Juli „Hüttenlüfter wieder angesteckt; durch Schneelast herausgezogen“ mit Sicherheit nicht vernachlässigbar. Ohne Belüftung muss man an windschwachen Tagen insbesondere bei sonnigen Verhältnissen mit deutlicher Überwärmung rechnen. Der Zeitpunkt des Belüftungsausfalls ist jedoch nicht bekannt – wahrscheinlich

irgendwann zwischen 6. Jänner und spätestens Mai (letzte große Schneefälle), die größten Schneehöhen wurden um den 12. Feber verzeichnet. Daher sind die Temperaturen der Höttinger Alm im ersten Halbjahr generell mit einer gewissen Vorsicht zu genießen und sind vermutlich zumindest einen Teil dieser Zeit zu hoch.

4 Auswertung der Temperatur im Jahr 2019

Für die Auswertung ist eine Mindestverfügbarkeit von 80 % an 10-Minuten Daten im betrachteten Zeitintervall gefordert. Diese Voraussetzungen werden größtenteils erfüllt, nur für die Station Hauptbahnhof können für April und Mai keine Monatsmittel bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst

4.1 Monats- und Jahresmitteltemperatur

In Innsbruck wie auch österreichweit war das Jahr 2019 das drittwärmste seit Beginn der Aufzeichnungen 1877. Im Stadtgebiet bis zur Höhe Alpenzoo lag die Jahresmitteltemperatur bei knapp 11 °C und nahm bis zum Patscherkofel hinauf auf 1,3 °C ab (siehe Tabelle 2). Damit fiel 2019 zwischen 0,3 und 0,7 °C kühler aus als 2018 (wärmstes Jahr der Messgeschichte), jedoch 0,3 bis 0,8 °C wärmer als die Jahre 2016 und 2017 (abgesehen von HOE 2016 mit längeren Ausfallzeiten). Die Station HBF zeigte die geringste Temperaturänderung gegenüber 2018 mit nur -0,3 °C – hier schlägt sich das Fehlen des unterdurchschnittlich temperierten Monats Mai 2019 zu Buche. Während es 2019 am HBF 0,1 °C wärmer war als an der UNI, war es in den drei Vorjahren gleich warm bzw. um 0,1 Grad kühler. Daher dürfte der Jahresmittelwert am HBF durch die längeren Ausfallzeiten um etwa 0,1-0,2 °C zu hoch sein und würde bei einer entsprechenden Korrektur eher im Bereich von 10,7 bis 10,8 °C liegen.

| NAME | JAN | FEB | MAR | APR | MAI | JUN | JUL | AUG | SEP | OKT | NOV | DEZ | JAHR |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| FLH | -1,9 | 2,2 | 6,4 | 10,8 | 10,8 | 21,1 | 19,8 | 19,0 | 14,6 | 11,6 | 5,0 | 2,1 | 10,2 |
| UNI | -1,3 | 3,1 | 7,1 | 11,4 | 11,3 | 21,9 | 20,6 | 19,7 | 15,2 | 12,3 | 5,7 | 2,8 | 10,8 |
| HBF | -1,3 | 3,5 | 6,9 | NA | NA | 21,8 | 20,4 | 19,6 | 15,2 | 12,6 | 5,8 | 3,3 | 10,9 |
| ODO | -1,6 | 3,4 | 6,8 | 11,0 | 10,8 | 21,6 | 20,1 | 19,2 | 14,9 | 12,4 | 5,8 | 3,4 | 10,7 |
| ALP | -1,5 | 3,2 | 6,6 | 10,8 | 10,5 | 20,9 | 19,8 | 19,1 | 14,9 | 12,4 | 6,1 | 3,5 | 10,6 |
| HBG | -2,7 | 2,6 | 5,0 | 8,8 | 8,4 | 19,5 | 17,9 | 17,3 | 13,2 | 11,5 | 5,1 | 2,8 | 9,1 |
| RAB | -3,7 | 2,4 | 3,6 | 6,8 | 6,5 | 18,0 | 16,2 | 15,8 | 11,7 | 10,6 | 3,9 | 2,0 | 7,9 |
| HOE | -5,6 | 2,0 | 1,7 | 4,3 | 4,2 | 16,0 | 14,4 | 14,2 | 10,2 | 8,8 | 2,3 | 0,8 | 6,1 |
| PAK | -10,1 | -2,9 | -3,6 | -1,2 | -1,0 | 11,0 | 10,0 | 9,8 | 6,1 | 4,2 | -2,9 | -3,4 | 1,3 |

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 2019. Sind im betrachteten Mittelungszeitraum weniger als 80 % an Daten verfügbar, wurde kein Mittel berechnet (NA). Die Farbcodierung in „blau= kalt“ und „rot=warm“ soll eine schnelle Einordnung erleichtern.

Der im Klimamittel 1981-2010 leicht unterdurchschnittlich temperierte Jänner (vergleiche Tabelle 3) fiel mit durchwegs frostigen Mittelwerten zwischen $-1,3\text{ °C}$ (UNI, HBF) und $-10,1\text{ °C}$ (PAK) am kältesten aus. Unterhalb des Patscherkofels waren alle anderen Monatsmittel positiv. Kälter als im Klimamittel 1981-2010 war sonst nur noch der Mai mit einer sehr deutlichen Abweichung von $-3,2\text{ °C}$ an der UNI. Der Juni war der mit Abstand heißeste Monat mit fast 22 °C Mitteltemperatur in der Stadt. Damit lagen die Temperaturen an der UNI um $4,8\text{ °C}$ über dem Klimamittel 1981-2010, zusammen mit dem Juni 2003 die höchsten Werte seit dem Messbeginn 1877.

| Abweichungen vom Klimamittel 1981 - 2010 | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| NAME | JAN | FEB | MAR | APR | MAI | JUN | JUL | AUG | SEP | OKT | NOV | DEZ | JAHR |
| UNI | -0,5 | 2,8 | 1,8 | 1,7 | -3,2 | 4,8 | 2,0 | 1,5 | 0,8 | 2,5 | 1,7 | 2,8 | 1,5 |
| PAK | -4,1 | 3,8 | 1,3 | 1,2 | -3,8 | 5,2 | 1,6 | 1,5 | 1,0 | 1,9 | -0,1 | 2,0 | 1,0 |

Tabelle 3: Temperaturabweichungen in $^{\circ}\text{C}$ in den einzelnen Monaten und im Jahr 2019 vom Klimamittel 1981 – 2010. Quelle: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring/>

Der Temperaturunterschied von $0,6\text{ °C}$ zwischen den beiden gleich hoch gelegenen Stationen FLH und UNI ist ähnlich wie in den Vorjahren und rührt vom Stadteffekt her (vergleiche Appendix Abschnitt 1.1) und ist nicht nur im Jahresmittel, sondern auch in allen einzelnen Monaten zu finden.

4.2 Temperaturprofile

Anhand der stündlichen, über das Jahr bzw. die einzelnen Monate gemittelten Temperaturprofile kann man sowohl den tageszeitlichen als auch den jahreszeitlichen Verlauf der Temperaturschichtung zwischen Innsbruck und dem Patscherkofel betrachten. Abbildung 2 zeigt das Jahresmittel. In Appendix sind in Abbildung A7 die Monatsmittel für Jänner, Feber, Mai und Juni 2019 zu sehen. Aus den Temperaturprofilen lassen sich auch Aussagen zur Stabilität in den Schichten zwischen den Stationen ableiten. Grundsätzlich gilt, je steiler (senkrechter) ein Temperaturprofil, desto weniger nimmt die Temperatur mit der Höhe ab (oder sogar zu), umso stabiler ist also die Schicht. Anhand des tageszeitlichen Verlaufs in der Abbildung 2 kann man erkennen, dass die Profile nachts (grüne und blau-violette Linien) generell steiler sind, es ist also stabiler als tagsüber (rote und hellbraune Linien). Der Grund dafür ist, dass der mittlere Tagesgang in den unteren Niveaus (2019 waren es 8 bis 9 Grad an den Stationen UNI, HBF, ODO und ALP) deutlich größer war als weiter oben (3 bis 4 Grad am PAK und HOE) ¹. Im Bereich der Talsohle bis zum Alpenzoo wird die Abnahme des Tagesganges mit der Höhe von den Effekten der städtischen Wärmeinsel, der Messhöhe über Grund und der Hanglage überdeckt. So ist der etwas geringere Tagesgang an den Stationen HBF und ODO gegenüber UNI und ALP der größeren Messhöhe über Grund (vgl. Tabelle 1) zuzuschreiben.

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

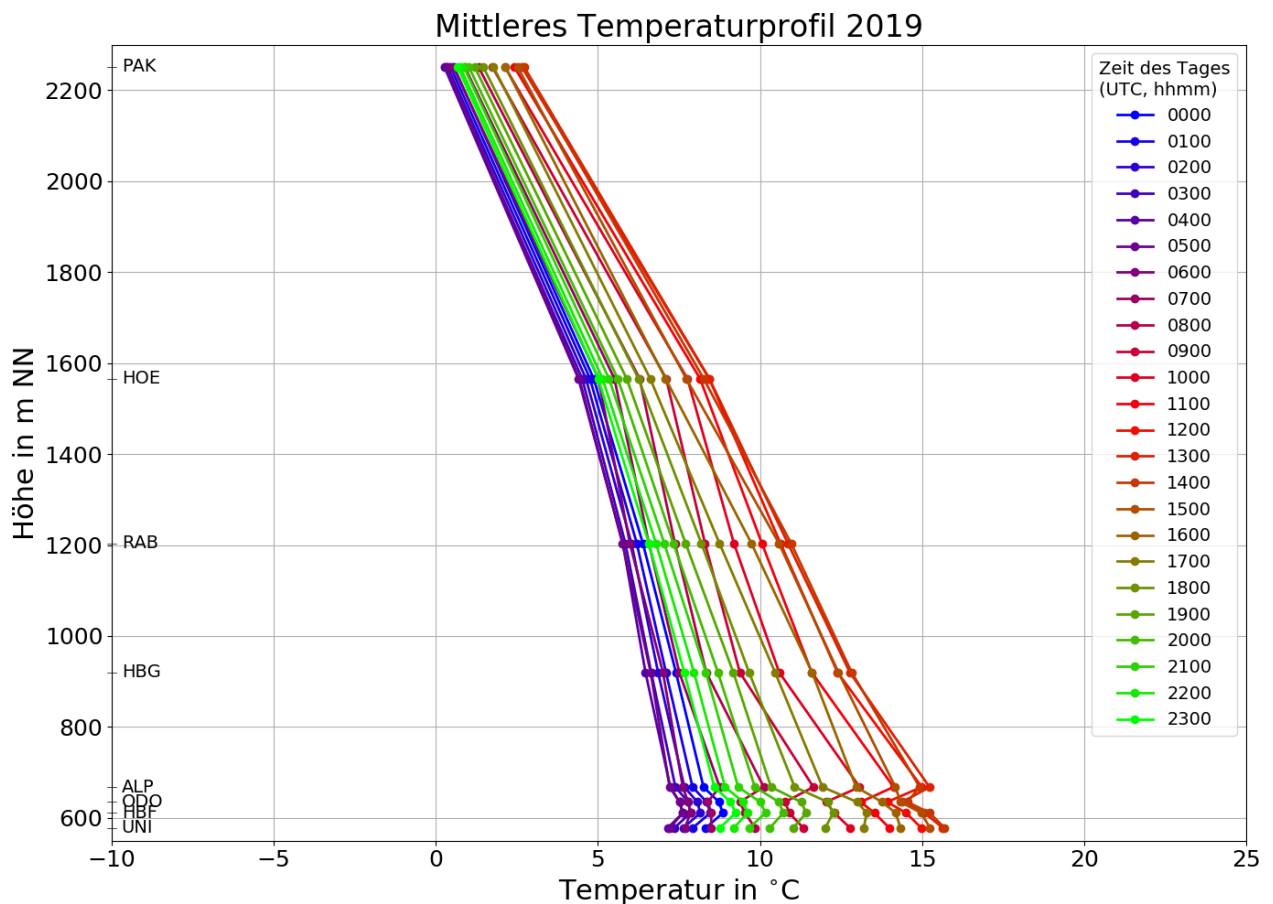


Abbildung 2: Mittlere stündliche Temperaturprofile im Jahresmittel 2019. Zur Umrechnung auf Mitteleuropäische Zeit (MEZ) ist eine Stunde zu addieren, 12:00 Uhr UTC entspricht also beispielsweise 13:00 Uhr MEZ.

Ebenso sind die Profile im Allgemeinen während der kühlen Jahreszeit steiler, da es dann im Durchschnitt stabiler ist. 2019 traf dies besonders auf den Feber zu, welcher durch eine Häufung von Hochdruckwetter überdurchschnittlich sonnig (+50 % im Vergleich zum langjährigen Mittel), warm (+2,8 °C an der UNI und +3,8 °C auf dem PAK) und trocken ausfiel. Umgekehrt war der Jänner einer der wenigen Monate, in denen es kälter als im langjährigen Mittel war. Der Durchzug von zahlreichen Fronten sowie nachfolgender Tiefdruckeinfluss waren dafür verantwortlich und sorgten häufig für gut durchmischte und damit neutral geschichtete Luftmassen. Die oberen beiden Grafiken der Abbildung A7 im Appendix zeigen diese Verhältnisse möglicherweise erst auf den zweiten Blick. Dazu sollte man sich auf die Nachtstunden konzentrieren, während denen die Profile im Jänner deutlich geneigter sind als im Feber. Tagsüber kommt es im Feber vor allem auf der Höttinger Alm zu einer starken Temperaturzunahme, was den Eindruck von Labilität erwecken kann. Dies ist sehr wahrscheinlich der in diesem Monat sehr großen Schneehöhe geschuldet. Der Temperatursensor ragte wenn dann nur wenig aus der Schneedecke heraus, möglicherweise war er auch teilweise leicht eingeschneit. Dadurch kommt es an den vielen sonnigen Tagen ab Sonnenaufgang zu einem entsprechenden Strahlungsfehler, der für eine deutliche Überwärmung sorgt. Dieser Effekt ist etwas weniger stark ausgeprägt auch im März und April zu finden, kaum mehr aber im relativ trüben Mai (Abbildung A7 unten links). In den Herbstmonaten war es in Summe allgemein stabiler als im Frühjahr, was neben den Wetterlagen

auch mit der unterschiedlichen Schneebedeckung zu tun hat. So erwärmen sich im Frühjahr vor allem die niedrigen, bereits aperen Niveaus, während der Schnee in höheren Lagen noch für kühlere Verhältnisse sorgt. Dadurch wird die Atmosphäre labiler, vor allem tagsüber. Zum Hochsommer hin wird die Atmosphäre weiter hinauf durchmischt, auch die höheren Schichten erwärmen sich mehr, wodurch es dann sogar ein wenig stabiler wird. Im Juni, der österreichweit als heißester der Messgeschichte einging, war es für die Jahreszeit wiederum recht stabil. Nur die heißen Nachmittagsstunden weisen stärker geneigte Profile auf (Abbildung A7 unten rechts).

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. In der Auswertung von 2019 wurde als unterste Schicht jene zwischen Flughafen und Hungerburg verwendet (vgl. Abschnitte 1, 4.5 und 4.6).

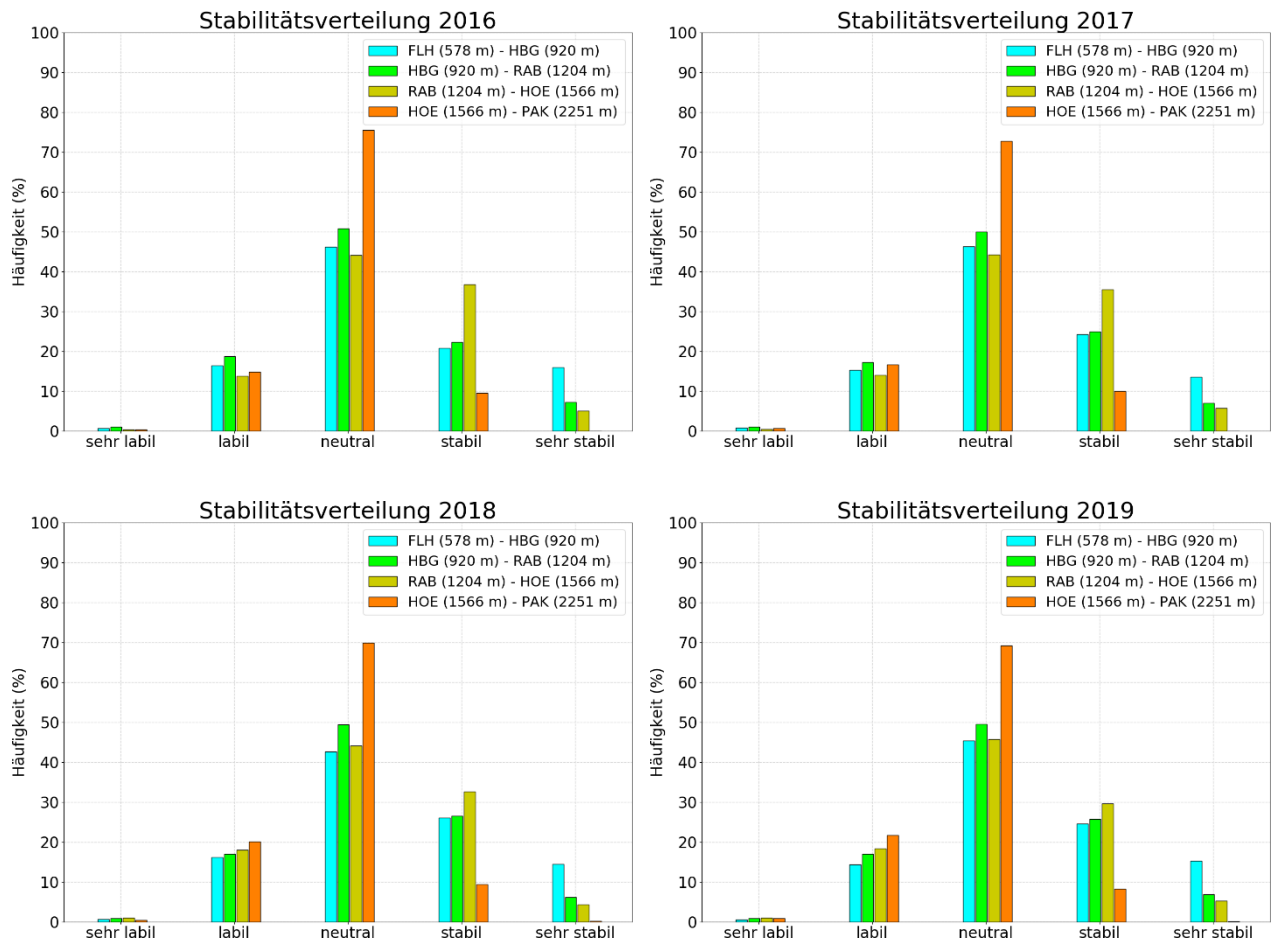


Abbildung 3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Klassen für die neu eingeteilten Schichten für die Jahre 2016-2019. Grundsätzlich ist sie in allen vier Jahren recht ähnlich. In allen hier dargestellten Schichten dominiert die neutrale Schichtung, am häufigsten mit rund 70 % ist sie zwischen Höttinger Alm und Patscherkofel zu finden. In den anderen Schichten liegt die Häufigkeit zwischen gut 40 und etwa 50 %.

In den nun nicht mehr dargestellten sehr dünnen Schichten zwischen UNI und ODO, bzw. ODO und ALP ist die Klasse der neutralen Schichtung wie in den Vorjahren am seltensten vertreten und die Randklassen „sehr labil“ und „sehr stabil“ am häufigsten. Dies hat wie in den Abschnitten 4.5 und 4.6 beschrieben mit dem Stadteffekt bzw. der Lage am Südosthang zu tun. Da die betroffenen Stationen aber verschieden stark vom Stadteffekt, der Messhöhe über Grund sowie der Lage im Gelände geprägt sind und damit die Interpretation der Stabilitätsverteilung nicht eindeutig ist, wurde auf die Darstellung dieser sehr dünnen Schichten (im Gegensatz zu den Vorjahren) verzichtet.

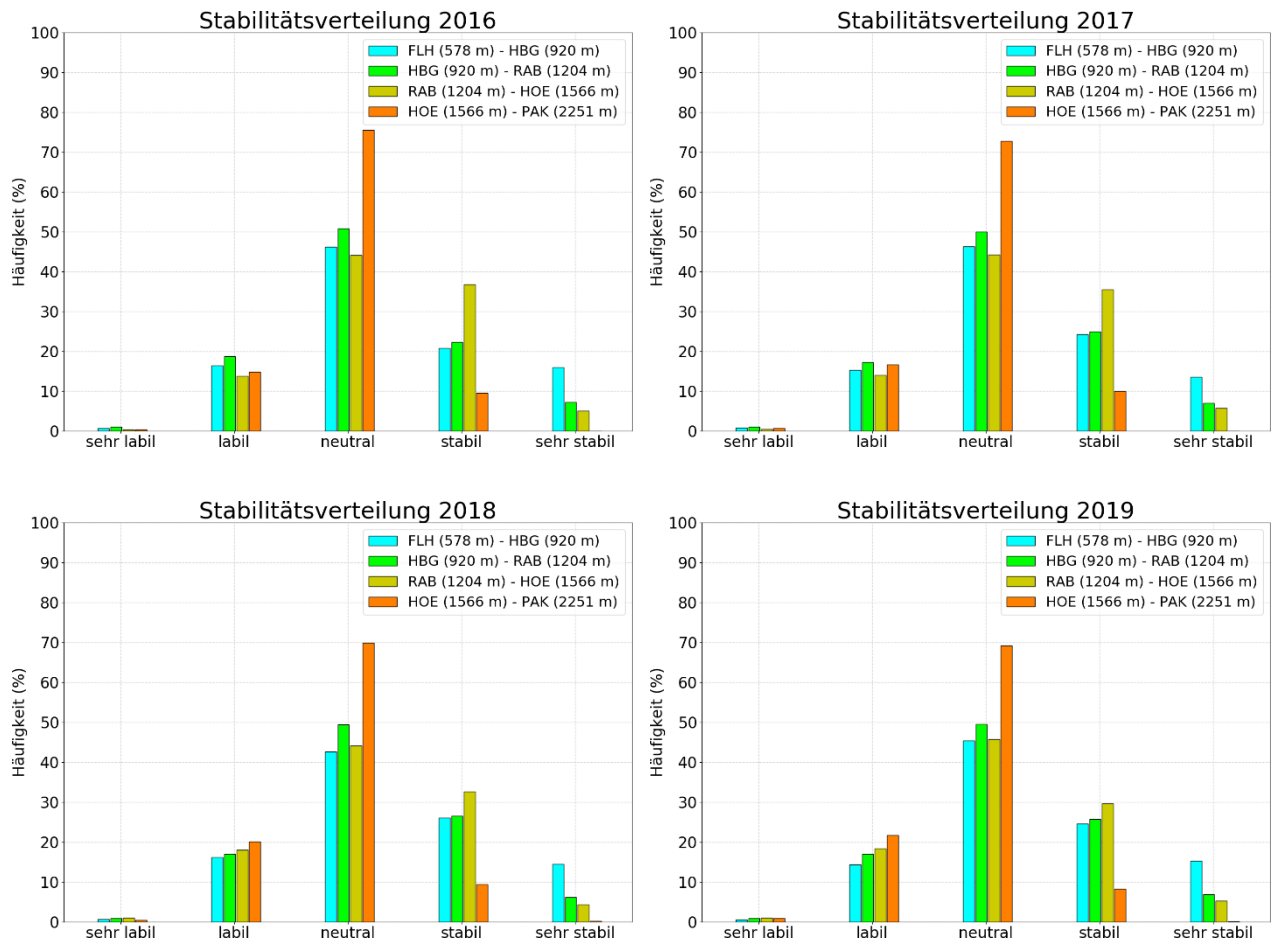


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Stabilitätsklassen in den übereinanderliegenden (verschiedenfarbig markierten) Schichten in den Jahren 2016 (links oben), 2017 (rechts oben), 2018 (links unten) und 2019 (rechts unten).

In der hier gezeigten und als repräsentativ erachteten untersten Schicht FLH bis HBG ist es zu etwa 40 % der Zeit stabil bzw. sehr stabil (25 bzw. 15 %). Die labile Klasse kommt zu rund 15 % der Zeit vor, die sehr labilen Phasen sind hingegen äußerst selten. In den einzelnen Monaten sieht die Verteilung besonders in dieser für die Schadstoffkonzentration relevanten Schicht teilweise sehr unterschiedlich aus. Während es im Feber zu rund 2/3 der Gesamtzeit stabil bis sehr stabil war, war dies im Mai nur zu etwa 14 % der Zeit der Fall (siehe Abbildung A8 im Appendix). So kategorisiert, war es mit absteigender Häufigkeit auch im Dezember (65 %), November (60 %), Oktober (52 %) und Jänner (51 %) überwiegend stabil. Die Analyse von Sonnenscheindauer, Windverhältnissen und Wetterlagen zeigt recht gut, dass die Stabilität nicht nur durch lokale Strahlungsprozesse, sondern auch regionale Einflüsse wie Föhn und durch großräumige Wetterlagen gesteuert wird². In den Vorjahresberichten wurde jeweils nur auf die Strahlungsprozesse verwiesen.

² Bei windschwachen Hochdrucklagen unterliegt die Stabilität Strahlungsprozessen. Die Sonnenstrahlung erwärmt vor allem Oberflächen und erst diese die darüber liegende Luft. Die involvierte Schicht wird (sehr) labil. Nachts kühlen ebenfalls vor allem Oberflächen aus und kühlen die darüber liegende Luft, die involvierte Schicht wird (sehr)

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

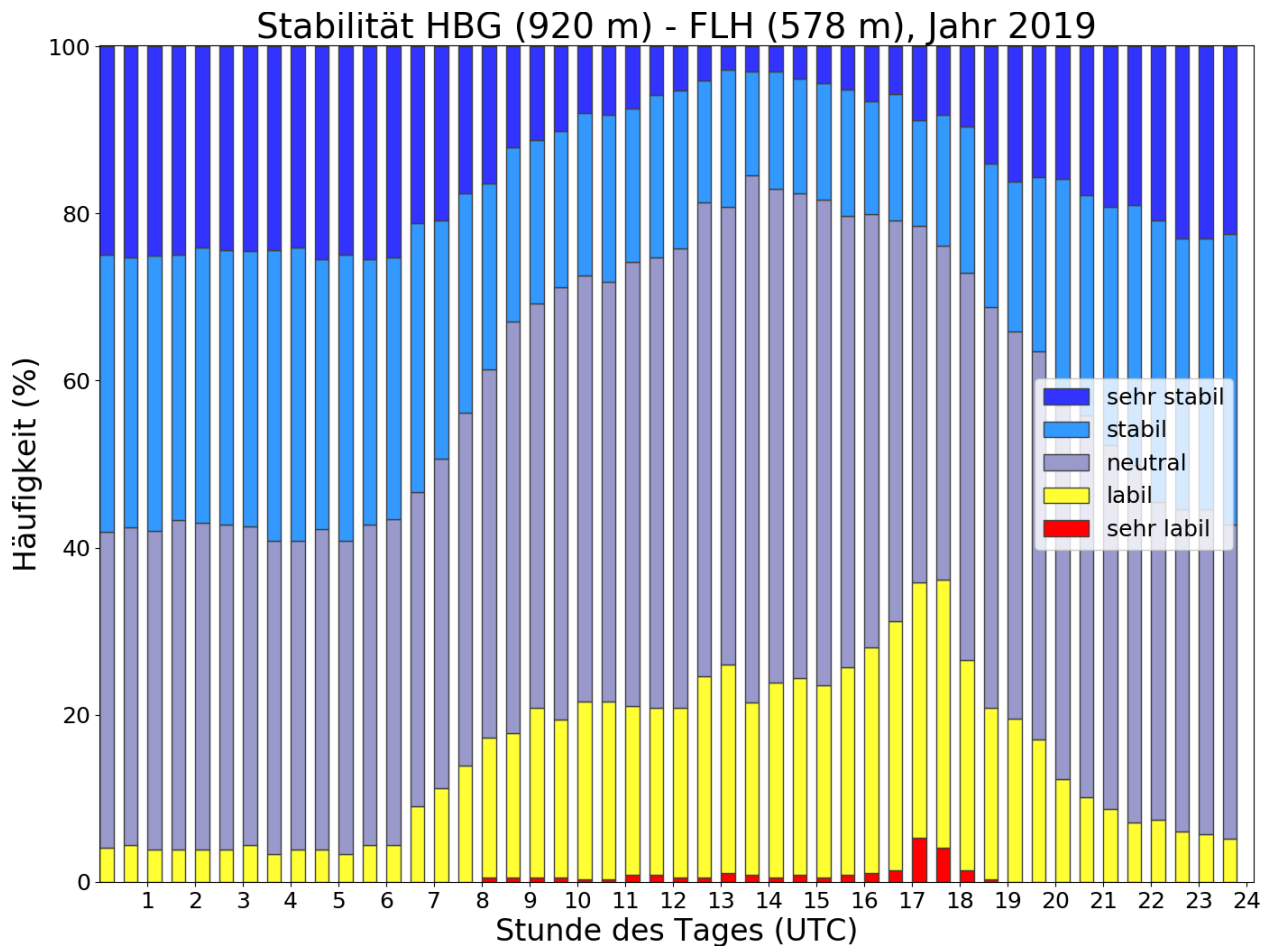


Abbildung 4: Tageszeitliche Verteilung der Stabilitätsklassen aus den halbstündlichen Temperaturmitteln in der 342 m dicken Schicht zwischen Flughafen und Hungerburg im Jahr 2019.

Grundsätzlich dominieren nachts ab etwa 22 UTC bis in die Morgenstunden um ca. 7 UTC die (sehr) stabilen Verhältnisse (ca. 50 bis 60 %), ansonsten die neutrale Schichtung. Mit der Einstrahlung steigt die Häufigkeit der labilen Klasse vormittags auf knapp über 20 %, den Maximalwert erreicht sie zwischen etwa 17 und 19 UTC mit knapp 40 %. Sehr labil ist es kaum (weniger als 5 %). Die Lage der Station Hungerburg am Südhang sorgt hier mittags und am frühen Nachmittag vermutlich für ein leichtes ‚Überhitzen‘ und damit für höhere Stabilitätswerte. Die Abendspitze der labilen Werte ist wohl auf das späte Temperaturmaximum am Flughafen

stabil. Damit ist die Stabilität bei windschwachen Hochdrucklagen von der Tages- und der Jahreszeit abhängig. An Hängen produzierte kalte bzw. warme Luft sinkt bzw. steigt auf und wird somit abtransportiert. Bei sehr windigen und/oder niederschlagsreichen Phasen findet von oben her eine Durchmischung statt, wodurch sich eine neutrale (oder leicht labile bis leicht stabile) Schichtung ergibt.

zurückzuführen, was an der begünstigten Sonneneinstrahlung liegt. Im Mittel übers Jahr tritt die neutrale Klasse am häufigsten auf.

In den einzelnen Monaten zeigt sich der komplexe Zusammenhang zwischen Stabilität, Strahlungsangebot und Wetterlagen (siehe Abbildung A9 im Appendix). Der relativ milde Feber war stabiler als der in Innsbruck über 4 °C kältere Jänner. Wie schon erwähnt, war letzterer von Tiefdruckeinfluss, Frontdurchgängen mit starkem Wind und Höhenkaltluft geprägt, die einerseits zu kalten Verhältnissen und andererseits größeren Temperaturunterschieden zwischen Talniveau und höheren Lagen und damit labileren Verhältnissen führten. Im Juni, der auch Rekordhitze brachte, war es stabiler als im über 10 °C (!) kälteren Mai. Ein ausgeprägtes, anhaltendes Hoch nordafrikanischen Ursprungs sorgte im Juni für eine starke Erwärmung nicht nur im Talbereich, sondern auch in höheren Niveaus. Dadurch wurde es nachts im Talgrund mit guter Abstrahlung nahezu immer stabil bis sehr stabil und auch tagsüber labilisierte es nur mäßig.

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

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

Tabelle 5: Häufigkeit verschiedener Dauerstufen mit (sehr) stabiler Schichtung zwischen Flughafen (587 m) und Hungerburg (920 m), sowie deren Gesamtdauer in den Jahren 2016 bis 2019. Wie in Tabelle 4 definiert, bedeutet (sehr) stabil eine Temperaturabnahme von höchstens 0,4 °C/100m. HMW steht für Halbstundenmittelwert.

Die Gesamtdauer aller (sehr) stabilen Phasen ist seit 2016 relativ konstant und liegt 2019 in Summe bei knapp 21 Wochen, im Jahr davor war es eine halbe Woche mehr, 2016 bzw. 2017 war es mit 19 bzw. knapp 20 Wochen etwas weniger. Wie schon im Vorjahr waren kürzere Phasen bis maximal 24 Stunden meist häufiger als 2016 und 2017, längere Phasen hingegen seltener.

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 stabil bis sehr stabil. Problematisch sind vor allem lang anhaltende Inversionslagen. Schadstoffe aus Verkehr, Hausbrand und Industrie sammeln sich dabei in der Inversionsschicht an. Wenn wie im Inntal das Gebirge auch horizontalen Austausch einschränkt, kann es zu hohen Schadstoffkonzentrationen (-belastungen) kommen.

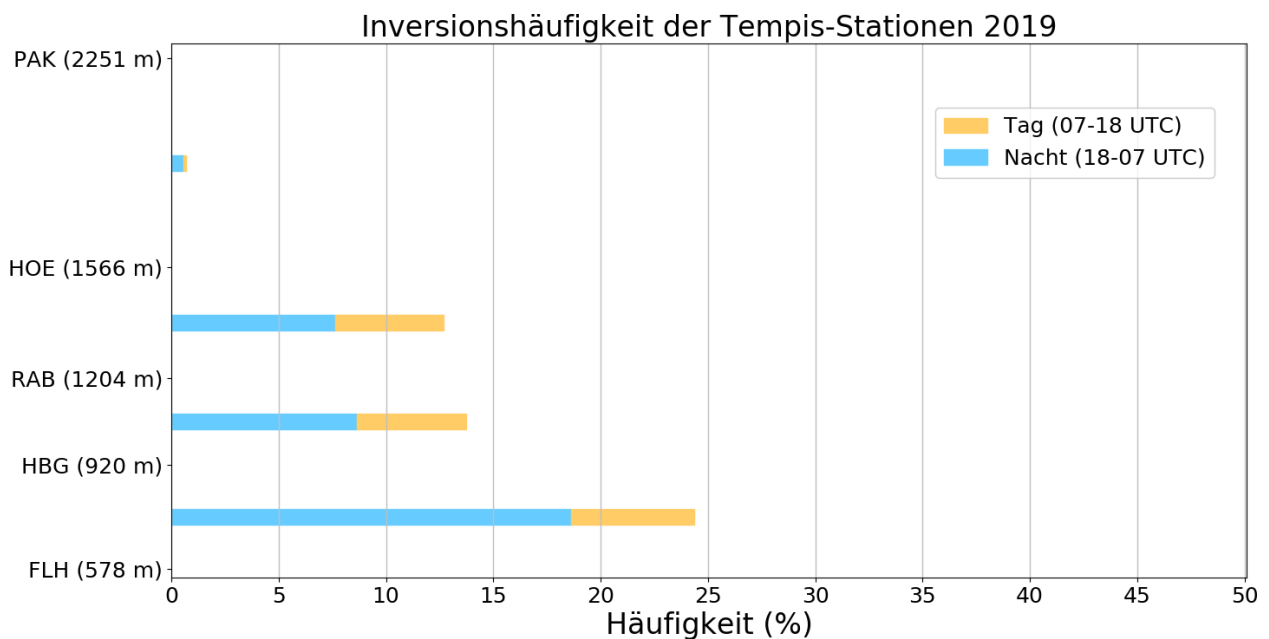


Abbildung 5: Häufigkeit der Inversionen in den verschiedenen Schichten im Jahr 2019. Gelbe Balken stehen dabei für den Anteil zwischen 7 und 18 UTC (8 und 19 MEZ), blau für den Anteil zwischen 18 und 7 UTC (19 und 8 MEZ), vereinfacht also für den Tages- und Nachtanteil.

Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Inversionshäufigkeit in den aufeinanderfolgenden Schichten FLH-HBG, HBG-RAB, RAB-HOE und HOE bis PAK im Jahr 2019. Die sehr dünnen Schichten unterhalb der Hungerburg, die in den Vorjahren ausgewertet wurden, wurden durch die Gesamtschicht zwischen FLH und HBG ersetzt (siehe Abschnitte 4.5 und 4.6). Im Großen und Ganzen nimmt die Inversionshäufigkeit mit der Höhe ab. Sie liegt bei ca. 25 % in der untersten Schicht, bei knapp 15 % in den beiden folgenden Schichten und nur zu rund 1 % der Zeit herrschen in der Schicht zwischen Höttinger Alm und Patscherkofel Inversionsbedingungen. Die Häufigkeitsverteilungen der Vorjahre (nicht gezeigt) sind annähernd gleich und liegen zwischen 22 und 24 % in der untersten Schicht, bei 12 bis 14 % zwischen HBG und RAB, bei 13 bis 17 % zwischen RAB und HOE und um 1 % darüber.

Zu erwarten wäre eigentlich eine Abnahme der Häufigkeit von Inversionen, je weiter eine Schicht vom Talboden entfernt ist. Interessant ist daher, dass Inversionen in der Schicht zwischen RAB und HOE über das Jahr gemittelt in etwa gleich häufig und in manchen Monaten sogar häufiger sind als in der Schicht darunter. Unter Berücksichtigung der Vorjahre trifft diese Aussage vor

allem in der warmen Jahreszeit zu, beginnend ab März oder April mit Maximum im Juni oder Juli und teils bis weit in den Herbst oder Frühwinter hinein. Analysen der Auf- und Untergangszeiten³ der Sonne an den Stationen, der Monatsmittel der stündlichen Temperaturprofile (z.B. Abbildung A7 im Appendix für Mai und Juli) und der monatlichen Tagesgänge der Stabilitätsverhältnisse in den Schichten (analog zu den Abbildungen A9 im Appendix) legen nahe, dass diese Besonderheit zum einen den nächtlichen (vor Sonnenaufgang), eher kühlen Verhältnissen am RAB geschuldet ist. Dadurch werden die Schichtungsverhältnisse in Bezug auf die Hungerburg tendenziell Richtung labiler und in Bezug auf die Höttinger Alm Richtung stabiler verschoben. Zum anderen – und dies gilt eher ganzjährig – erwärmt sich die Luft nach Sonnenaufgang auf der HOE deutlich schneller als am RAB, weshalb sich stabile Schichtungen in dieser oberen Schicht deutlich weiter in den Vormittag hinein ziehen als zwischen HBG und RAB.

In der kühlen Jahreszeit nimmt die Inversionshäufigkeit in der Regel von unten nach oben ab. In Abbildung A10 im Appendix sieht man dies z.B. in den Monaten Jänner (links oben) und Feber (rechts oben), wobei letzterer im Jahresverlauf bis zur HOE die größten Inversionshäufigkeiten (FLH-HBG ca. 48 %, HBG-RAB ca. 42 %, RAB-HOE 39 %) aufweist. Am seltensten sind sie im Mai (links unten). Im Juli (rechts unten) erkennt man die angesprochene Zunahme der Häufigkeit von der Schicht HBG-RAB zu RAB-HOE.

Betrachtet man für das Inversionsgeschehen nicht die aufeinanderfolgenden Schichten, sondern verwendet für alle die gleiche Basisstation, ergeben sich weitere Einblicke. Tabelle 6 fasst die monatlichen bzw. jährlichen Inversionshäufigkeiten für 2019 und die Vorjahre zusammen, im Gegensatz zu den früheren Berichten wird aber der Flughafen anstelle von Innsbruck Uni als Basisstation verwendet (siehe Abschnitt 4.6). Nach wie vor enthält die Tabelle auch die sehr dünnen Schichten unterhalb der HBG. Auch wenn den Absolutzahlen⁴ aus den nun mehrfach erwähnten Gründen nicht allzu hohe Bedeutung zuzumessen ist, kann die zeitliche Entwicklung seit 2016 von Interesse sein.

Wie gehabt konzentrierten sich die Inversionen ganzjährig auf die Schicht unterhalb der Hungerburg und waren in der kalten Jahreszeit erwartungsgemäß häufiger (Oktober bis Feber) als in der warmen. Ab der Hungerburg nahm die Häufigkeit der Inversionen mit zunehmender Schichtdicke stark ab. Die höchsten Inversionshäufigkeiten traten 2019 im Feber bzw. Dezember auf. In den untersten Niveaus bis zum Alpenzoo herrschten in diesen beiden Monaten zwischen 66 und 79 % Inversionsbedingungen, bis hinauf zur Höttinger Alm zwischen 37 und 49 % und bis zum Patscherkofel immerhin noch zu 22 bzw. 18 %. Hinter den sehr stabilen Monaten Dezember 2016 und Jänner 2017 waren das die höchsten Werte für bis zum PAK reichende

³ auf der Höttinger Alm geht die Sonne zwischen März und September orographisch bedingt ein wenig später oder in etwa zur gleichen Zeit auf wie am Rastboden (rund um 5-6 UTC)

⁴ Wegen des Stadteffekts kommt es bei Verwendung des FLH als Basisstation in den dünnen Schichten unterhalb der HBG zu einer (deutlichen) Überschätzung der Inversionshäufigkeit. Vergleiche auch Abschnitt 4.6. In Tabelle A1 im Appendix sind für den Vergleich die Inversionshäufigkeiten in den dünnen Schichten unterhalb der HBG mit Basisstation UNI angeführt.

Inversionen. Im Jänner gab es für die kalte Jahreszeit auffallend selten Inversionsbedingungen, im Schnitt über alle Schichten waren es ‚nur‘ 32 %, im Mittel 2016-2018 waren es hingegen 53 %.

| | Δz | JAN | FEB | MAR | APR | MAI | JUN | JUL | AUG | SEP | OKT | NOV | DEZ | JAHR |
|------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 2019 | | | | | | | | | | | | | | |
| HBF | 33 | 64 | 79 | 57 | 52 | 46 | 69 | 71 | 76 | 74 | 69 | 72 | 76 | 69 |
| ODO | 57 | 46 | 69 | 50 | 48 | 40 | 58 | 53 | 52 | 51 | 56 | 63 | 67 | 54 |
| ALP | 90 | 48 | 68 | 43 | 36 | 27 | 42 | 46 | 46 | 50 | 54 | 60 | 66 | 49 |
| HBG | 342 | 24 | 48 | 23 | 14 | 5 | 16 | 13 | 11 | 19 | 38 | 40 | 44 | 24 |
| RAB | 626 | 23 | 49 | 17 | 10 | 3 | 12 | 6 | 9 | 14 | 37 | 35 | 45 | 21 |
| HOE | 988 | 16 | 48 | 15 | 6 | 1 | 8 | 3 | 5 | 7 | 26 | 23 | 37 | 16 |
| PAK | 1673 | 2 | 22 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 7 | 1 | 18 | 5 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 2018 | | | | | | | | | | | | | | |
| HBF | 33 | 81 | 56 | 54 | 67 | 49 | 53 | 58 | 60 | 64 | 70 | 70 | 74 | 63 |
| ODO | 57 | 75 | 41 | 48 | 67 | 49 | 43 | 51 | 55 | 53 | 63 | 64 | 65 | 56 |
| ALP | 90 | 73 | 51 | 51 | 66 | 51 | 48 | 54 | 56 | 58 | 62 | 66 | 65 | 59 |
| HBG | 342 | 55 | 15 | 24 | 26 | 13 | 6 | 9 | 12 | 17 | 34 | 40 | 36 | 24 |
| RAB | 626 | 48 | 17 | 18 | 17 | 7 | 1 | 2 | 6 | 14 | 29 | 45 | 36 | 20 |
| HOE | 988 | 37 | 13 | 11 | 11 | 1 | 0 | 2 | 3 | 13 | 23 | 35 | 30 | 15 |
| PAK | 1673 | 8 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 2 | 7 | 10 | 3 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 2017 | | | | | | | | | | | | | | |
| HBF | 33 | 82 | 70 | 61 | 52 | 64 | 63 | 60 | 66 | 60 | 75 | 69 | 74 | 66 |
| ODO | 57 | 71 | 58 | 50 | 39 | 48 | 45 | 43 | 49 | 46 | 62 | 50 | 62 | 52 |
| ALP | 90 | 79 | 64 | 56 | 46 | 48 | 49 | 38 | 46 | 41 | 61 | 50 | 60 | 53 |
| HBG | 342 | 51 | 38 | 21 | 13 | 11 | 9 | 5 | 12 | 11 | 34 | 25 | 37 | 22 |
| RAB | 626 | 50 | 40 | 13 | 8 | 5 | 3 | 3 | 9 | 8 | 30 | 24 | 34 | 19 |
| HOE | 988 | 44 | 31 | 12 | 4 | 3 | 2 | 3 | 9 | 5 | 29 | 25 | 25 | 16 |
| PAK | 1673 | 30 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 9 | 13 | 6 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 2016 | | | | | | | | | | | | | | |
| HBF | 33 | 80 | 65 | 51 | 53 | 56 | 57 | 68 | 71 | 75 | 61 | 60 | 90 | 66 |
| ODO | 57 | 62 | 52 | 37 | 40 | 42 | 36 | 46 | 50 | 58 | 48 | 49 | 83 | 50 |
| ALP | 90 | 61 | 52 | 42 | 44 | 39 | 31 | 40 | 48 | 59 | 48 | 44 | 94 | 50 |
| HBG | 342 | 39 | 33 | 13 | 16 | 11 | 3 | 5 | 9 | 24 | 20 | 26 | 85 | 24 |
| RAB | 626 | 36 | 25 | 8 | 12 | 9 | 2 | 2 | 3 | 19 | 16 | 27 | 81 | 20 |
| HOE | 988 | 32 | 17 | 10 | 15 | 2 | 2 | 2 | 4 | 13 | 13 | 21 | 76 | 18 |
| PAK | 1673 | 14 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 4 | 45 | 6 |

Tabelle 6: Die Inversionshäufigkeit (in %) zwischen Flughafen und der jeweiligen Station in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2019 (oben) und den Jahren davor seit 2016. Unter Δz ist die Schichtdicke (in m) angegeben. Die Häufigkeiten sind farbkodiert – je dunkler der Zellhintergrund, umso höher die Häufigkeit. Zahlen in weißer Schrift zeigen an, dass die Inversionshäufigkeiten aufgrund von Stationsausfällen nur für den Anteil der vorhandenen Daten bestimmt werden konnten.

Erwartungsgemäß sind Inversionen nachts (18 bis 7 UTC, Tabelle A2 im Appendix) sehr viel häufiger als tagsüber (7 bis 18 UTC, Tabelle A3 im Appendix). Mit zunehmender Schichtdicke nahm die Häufigkeit nachts (mit marginalen Ausnahmen) in allen Einzelmonaten ab. Tagsüber

sind die ‚künstlichen‘ Inversionen am Alpenzoo aufgrund der Überwärmung in der Südhanglage erkennbar, sodass die Häufigkeiten zumindest jene des ODO immer übertreffen.

Ein kurzer Vergleich der Ergebnisse bezüglich der Wahl der Basisstation – FLH oder UNI – zeigt, dass der Inversionsanteil in allen Schichten und in allen betrachteten Zeiträumen mit dem FLH als Basisstation höher ist. Das liegt klarerweise daran, dass der FLH kaum im Einflussbereich des städtischen Wärmeinseleffektes und somit kälter als die UNI ist. Das Verhältnis dieser beiden Inversionsanteile liegt recht unabhängig von der Schichthöhe zwischen 1.1 und etwa 1.6 im Winterhalbjahr (Oktober-März), und oft zwischen 1.7 und 2.4, vereinzelt aber auch über 4 im Sommerhalbjahr.

4.5 Stabilitätsanalysen in dünnen Schichten unterhalb der Hungerburg

Bei Stabilitätsanalysen wird die Temperaturänderung innerhalb einer Schicht und damit in Abhängigkeit deren Mächtigkeit betrachtet. Je dünner die Schicht ist, umso empfindlicher sind die Auswertungen auf Einflüsse auf die Temperaturverhältnisse. Beim Innsbrucker Hangprofil sind besonders die dünnen Schichten unterhalb der Hungerburg betroffen, wo sich lokale Unterschiede durch teils relativ große horizontale Distanzen auswirken: Während der FLH eher frei liegt, sind UNI und HBF stark vom städtischen Wärmeinseleffekt betroffen, ODO zumindest bei leichtem Westwind, weniger bei Ostwind. Im Gegensatz zu diesen Stationen liegt die von viel und teils höherer Vegetation umgebene Station ALP auf einem nach Südosten exponierten Hang mit verstärkter Einstrahlung am Vormittag und je nach Jahreszeit früherer Abschattung am Nachmittag oder Abend. Die unterschiedlichen Messhöhen über Grund (ODO über 60 m, HBF 25 m, sonst 2 bis 3 m) wirken sich durch die maßgeblichen Strahlungsprozesse (vgl. Fußnote 2 in Abschnitt 4.3) ebenfalls auf die Temperaturentwicklung aus. Die Einflüsse sind in Abhängigkeit von Jahreszeit, teils auch Witterung unterschiedlich stark und sind in den Stabilitätsanalysen nicht immer eindeutig zu quantifizieren. Am augenscheinlichsten sind sie in der Auswertung des Tagesgangs der Inversionen bzw. Inversionshöhen, wenn als unterste Schicht jene bis zum ALP verwendet wird, egal ob UNI oder FLH als Basis dient (Abbildung 6 mit Basisstation UNI).

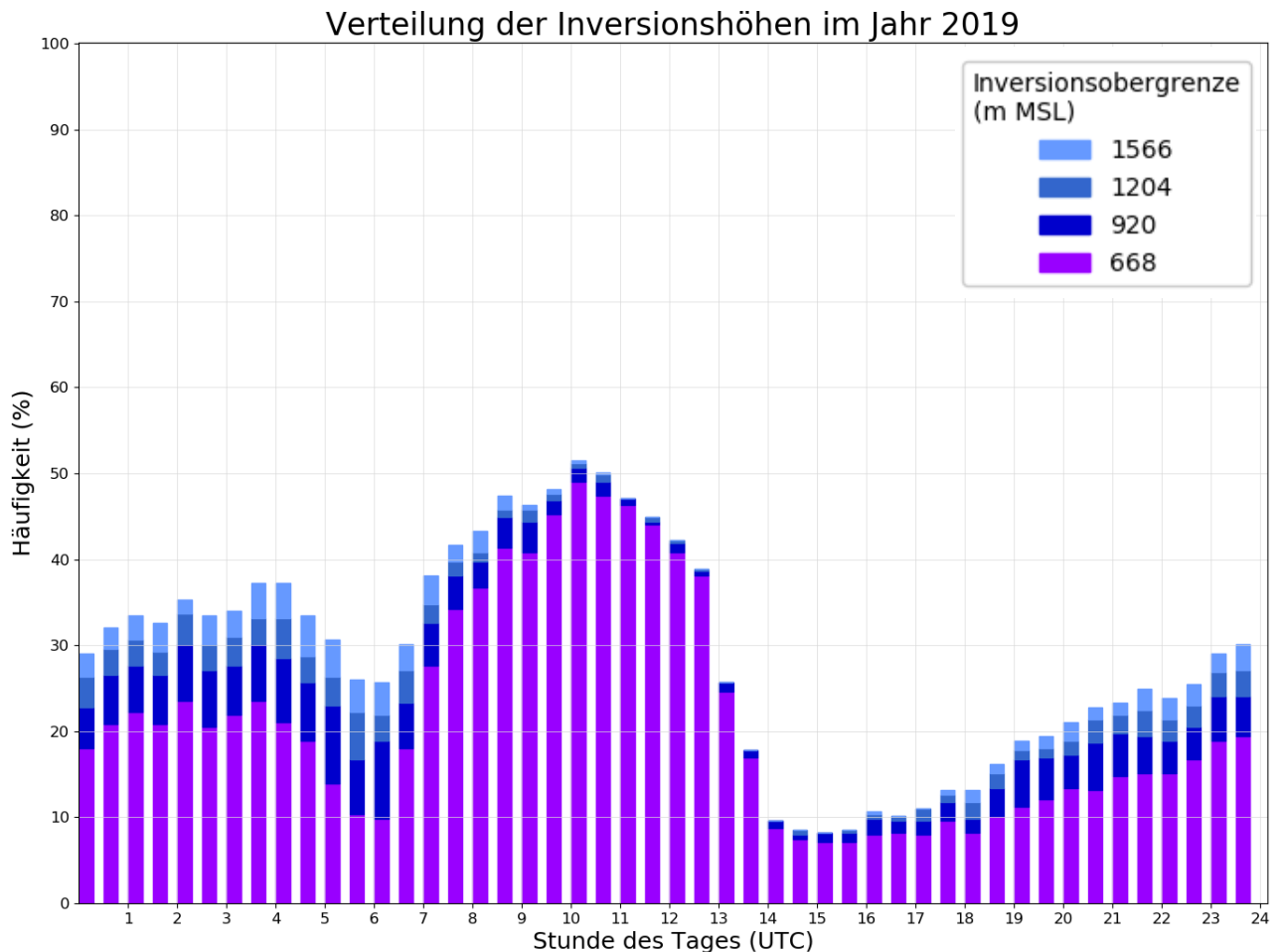


Abbildung 6: Tagesgang der Inversionshöhen 2019, wie sie ausgehend von der Basisstation UNI durch die Stationen ALP (668 m), HBG (920 m), RAB (1204 m) und HOE (1566 m) definiert werden.

In einem echten Vertikalprofil ist das Maximum der Inversionen (und damit auch der Inversionshöhen, die ja von der untersten Schicht ausgehend bestimmt werden) am Morgen vor Sonnenaufgang zu erwarten, das Minimum am Nachmittag nach dem Sonnenhöchststand. Im Innsbrucker Hangprofil ist die Verteilung am Nachmittag und nachts zumindest nachvollziehbar. Statt einer Abnahme der Inversionshäufigkeiten am Vormittag kommt es im Gegenteil zu einem Peak zwischen ca. 7 und 13 UTC. Dieser ist nur durch die unterschiedlichen lokalen Gegebenheiten zu erklären. Aufgrund der starken Besonnung am Südosthang ist es an der Station ALP vormittags in ca. 30 bis gut 45 % des Jahres wärmer als an der UNI. Wird der FLH als Basisstation verwendet, sind es sogar 40 bis gut 60 %.

Die Inversionshäufigkeit wird zwischen 7 und 13 UTC stark überschätzt. Ab Mitte Nachmittag könnte sie durch die frühere Abschattung hingegen unterschätzt werden, während sie nachts im Großen und Ganzen als realistisch eingeschätzt wird. Die Station ALP eignet sich damit höchstens für die Auswertung der nächtlichen Inversionen, für die Darstellung der allgemeinen Stabilitätsverhältnisse wird sie daher in Zukunft nicht mehr herangezogen. Bei den noch dünneren Schichten vom FLH bzw. UNI bis zum HBF (Schichtdicke 33 m) oder zum ODO (Schichtdicke 57 m) sind die lokalen Einflüsse noch dominanter, es werden eher horizontale

Temperaturunterschiede an Stelle von vertikalen betrachtet. Abbildung 7 zeigt den deutlich realistischeren Tagesgang der Inversionshöhen, ausgehend von der Basisstation FLH ohne die Verwendung der Schichten unterhalb der Hungerburg (Achtung: andere Skalierung wie in Abbildung 6). Hier folgt die tageszeitliche Entwicklung der Erwärmung, bzw. Durchmischung und damit der Auflösung von Inversionen.

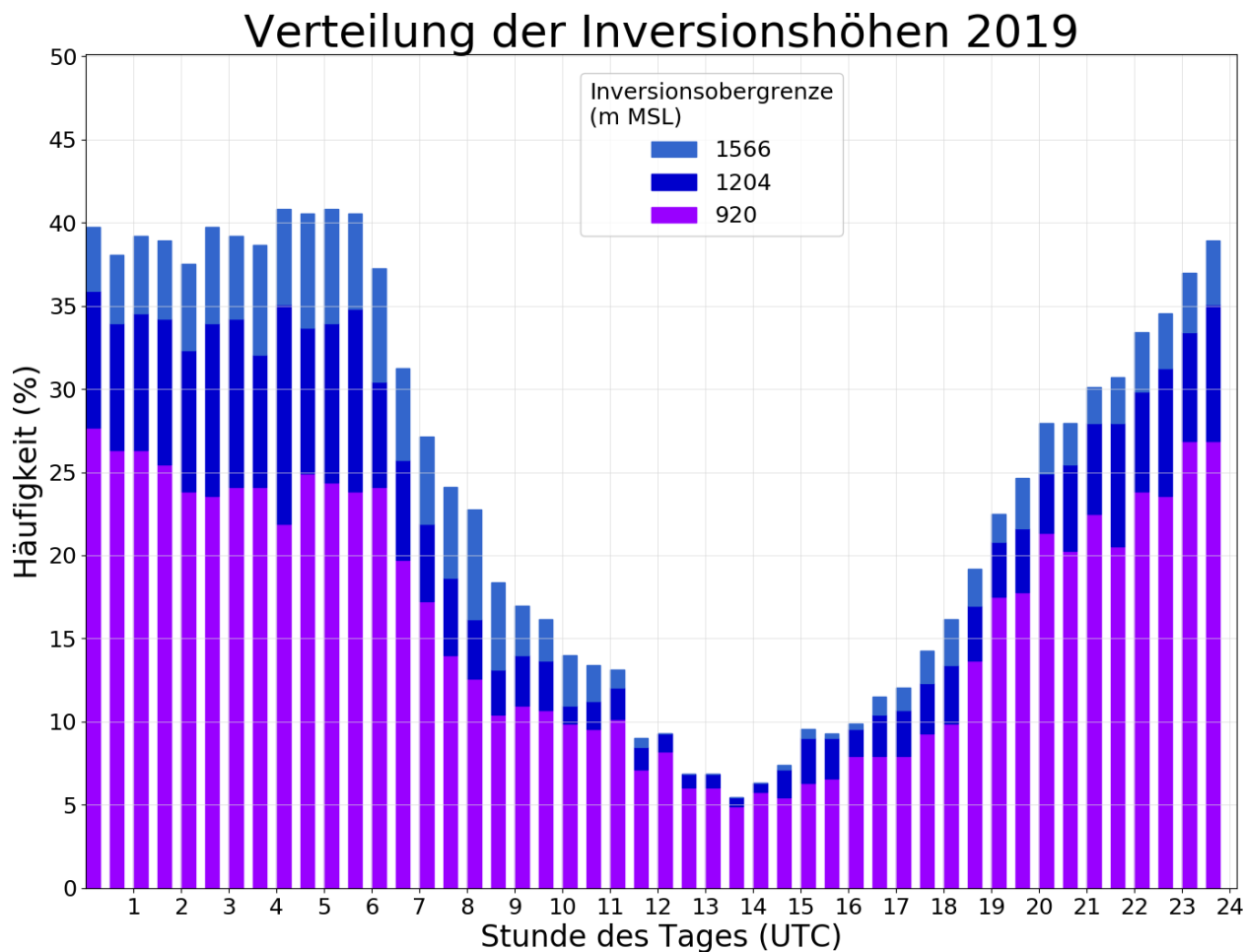


Abbildung 7: Tagesgang der Inversionshöhen 2019, wie sie ausgehend von der Basisstation FLH durch die Stationen HBG (920 m), RAB (1204 m) und HOE (1566 m) definiert werden.

4.6 Einfluss der städtischen Wärmeinsel auf die Stabilitätsauswertung

Der Effekt der städtischen Wärmeinsel wird recht deutlich, wenn man den Tagesgang der Stabilitätsklassen in der Schicht bis zur Hungerburg in Abhängigkeit der Wahl der Basisstation – UNI oder FLH – vergleicht (Abbildung 8).

Einerseits speichert die Stadt Wärme und kühlt nachts langsamer aus, andererseits erwärmt sie sich tagsüber den starken Versiegelungsgrad und die schwächere Durchlüftung schneller. Der Flughafen liegt freier mit recht viel Gras- bzw. Wiesenumgebung, die nächtliche Auskühlung wird weniger behindert, tagsüber ist die Durchlüftung besser. Die Station Hungerburg auf der Stütze der Nordkettenbahn befindet sich abgeschirmt vom Stadteffekt ebenfalls „im Grünen“, sodass

Verdunstung aus der umgebenden Vegetation und gute Durchlüftungsbedingungen für Kühlung sorgen.

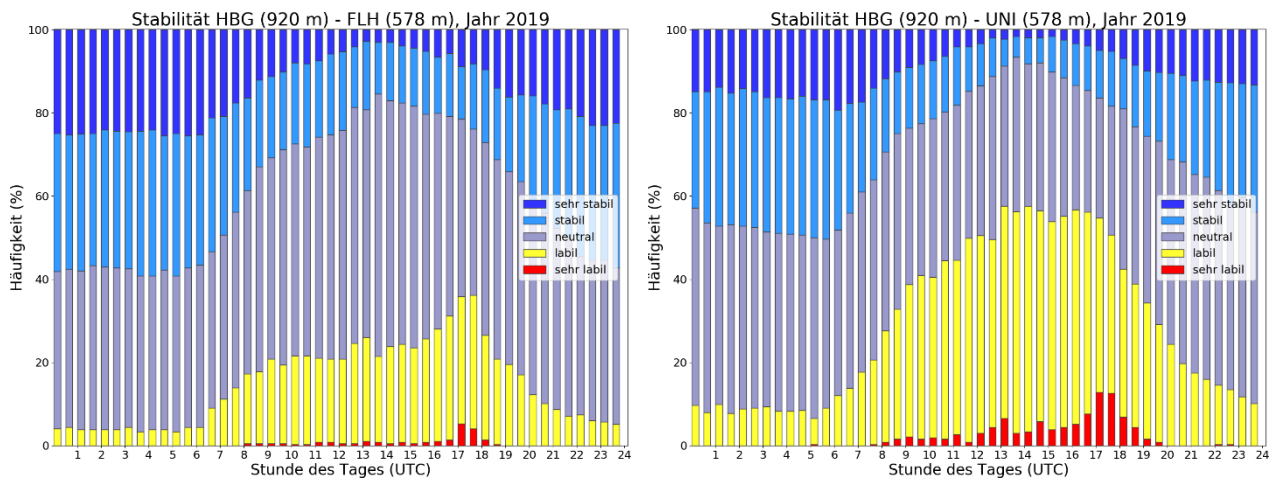


Abbildung 8: Tagesgang der verschiedenen Stabilitätsklassen 2019 zwischen Flughafen und Hungerburg (links), bzw. zwischen Innsbruck Universität und Hungerburg (rechts).

Mit FLH als Basisstation sind daher sehr stabile bzw. stabile Situationen häufiger als mit der UNI (im Jahresschnitt ca. 15 bzw. 25 % gegenüber 10 bzw. 20 %). Auch die neutrale Schichtung kommt etwas öfter vor (ca. 35 gegenüber 30 %), während es deutlich seltener labil ist (ca. 15 gegenüber 28 %) ist. Die Klasse sehr labil kommt unabhängig von der Basisstation selten und quasi nur tagsüber vor, mit der UNI aber doch sichtbar mehr als mit dem FLH (dort weniger als 1 %, mit UNI ca. 2 %). Da der Wärmeinseleffekt in der vertikalen Ausdehnung begrenzt ist, besonders während stabiler Phasen, dürfte die UNI eher nur für Stabilitätsanalysen in der vom Stadteffekt beeinflussten Schicht – maximal bis zur Hungerburg – geeignet sein. Die Verwendung des FLH als Basisstation wird als repräsentativer für den Großraum Innsbruck bzw. auch das Inntal allgemein erachtet. Die Stabilitätsanalysen basieren daher in Zukunft vor allem auf dieser Basisstation, UNI wird nur teilweise ergänzend verwendet.

4.7 Einordnung in die Innsbrucker TEMPIS-Reihe seit 1999

In einem Projekt der ZAMG, das vom Land Tirol unterstützt wurde, konnten alte TEMPIS Daten beginnend mit dem Jahr 1999 digitalisiert, kontrolliert und analysiert werden. Im Zusammenhang mit dem hier vorliegenden Bericht eignen sich die Stationen Hungerburg und Rastlboden für Stabilitätsvergleiche, da sie 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 insgesamt von etwas höheren Temperaturen ausgehen muss, was die größere Messhöhe aber ein wenig ausgleichen dürfte. Abzüglich jener Jahre mit zu großen Ausfällen liegen aus diesem Projekt bis inklusive 2018 für die Hungerburg 16 Jahre an Temperaturdaten vor und für den Rastlboden 15.

In

Abbildung 9

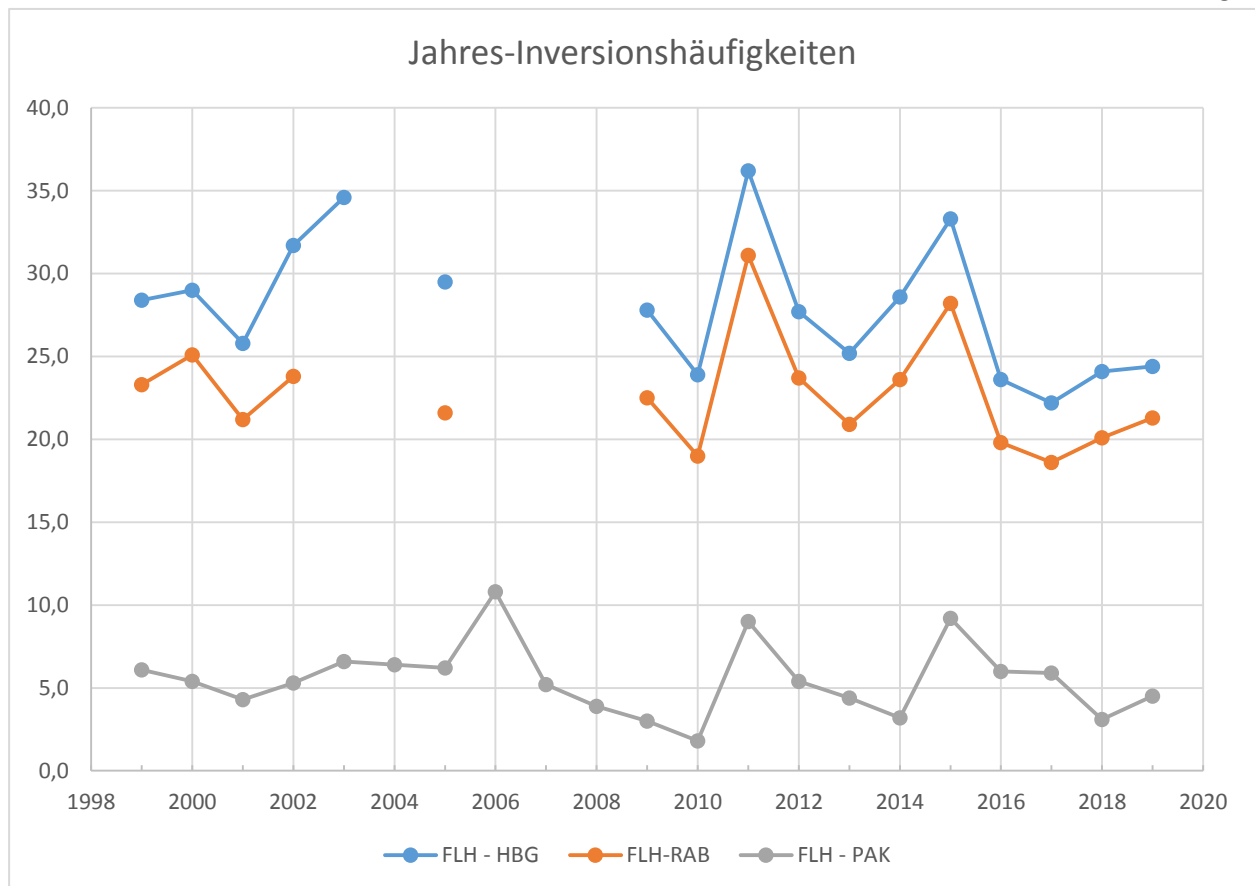


Abbildung 9 ist die langjährige Entwicklung der Inversionshäufigkeiten in den Schichten Flughafen bis Hungerburg, Rastlboden und Patscherkofel zu sehen, die Jahreswerte für 2019 wurden ergänzt. Leichte Abweichungen zu den hier verwendeten Daten in den Überschneidungsjahren 2016 bis 2018 bewegen sich im Größenbereich von 0,1 bis 0,2 Prozentpunkten und rühren von der zeitlichen Auflösung der Daten her. Diese war in der Analyse der langjährigen TEMPIS-Reihe 30-Minuten, in den seit 2016 vorliegenden Jahresberichten wurden 10-Minuten-Daten verwendet. In der untersten Schicht FLH bis HBG schwankt die Inversionshäufigkeit zwischen 22 und 36 %, bis zum RAB zwischen 19 und 31 % und bis zum PAK zwischen 2 und 11 %. Inversionen kommen in allen Monaten vor (nicht gezeigt), der Schwerpunkt ist zwischen Oktober und Februar zu finden, mit doch deutlich wechselnden Anteilen von Jahr-zu-Jahr. In den letzten vier Jahren seit 2016 war der Inversionsanteil bis zum Rastlboden hinauf unterdurchschnittlich. Ein Grund dafür mag sein, dass die TEMPIS-Stationen ab Ende 2015 belüftet und damit weniger überwärmt sind. Ein statistisch signifikanter Trend ist jedoch nicht auszumachen.

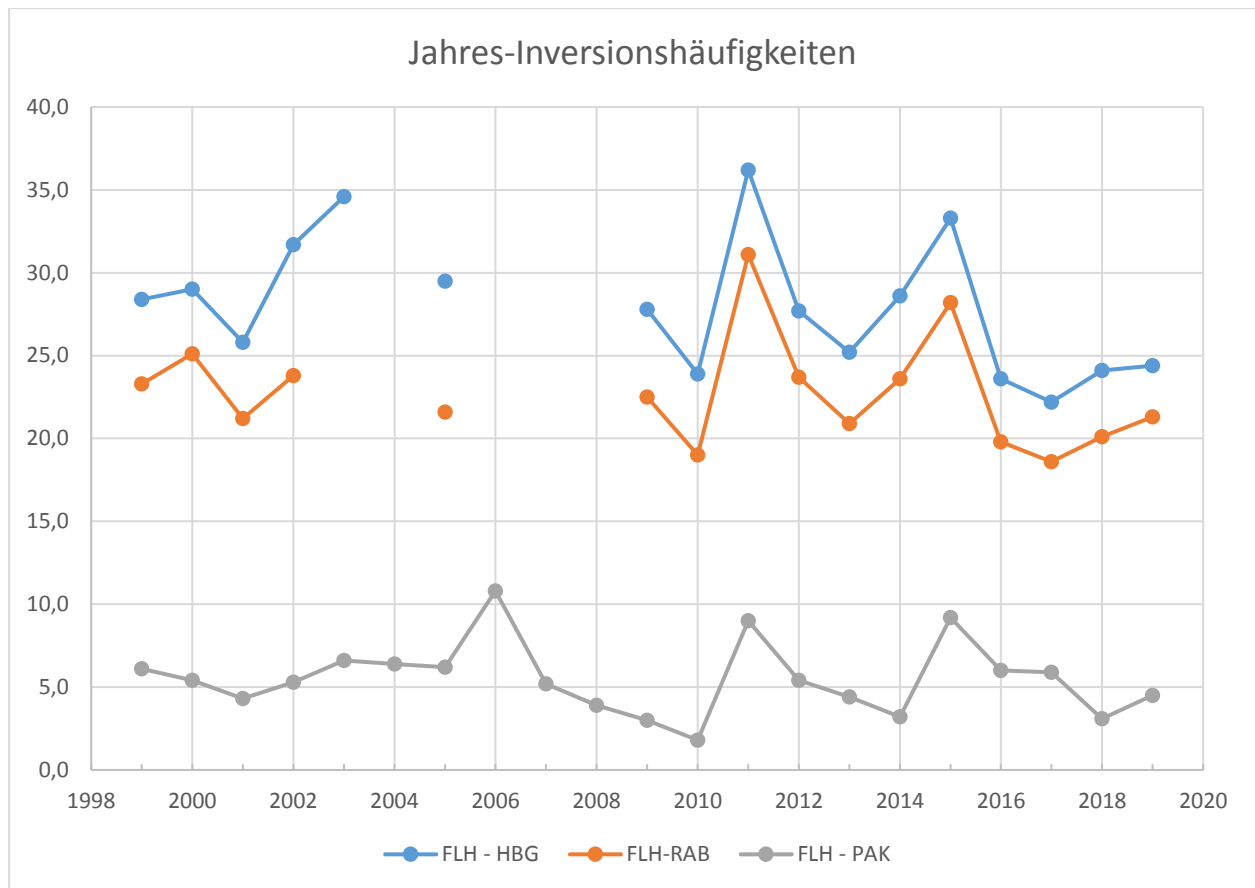


Abbildung 9: Jahres-Inversionshäufigkeiten der langjährigen TEMPIS-Reihen seit 1999-2018 (30-Minuten-Daten), ergänzt mit den Zahlen des Jahresberichtes 2019 (10-Minuten-Daten) für die Schichten zwischen Flughafen und Hungerburg (blau), Rastlboden (orange) und Patscherkofel (grau).

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

4.8 Vergleich mit anderen Inversionsstudien

Vergleiche mit Ergebnissen aus anderen Hangprofilen sind nur eingeschränkt möglich, da diese stark von Schichtdicke und lokaler Lage bestimmt werden. Thudium (2019) hat Inversionen an verschiedenen Standorten in den West- und Ostalpen ab Ende der 1990er bzw. Anfang der 2000er-Jahre untersucht. Auch hier verläuft die zeitliche Entwicklung sowohl an allen Hangprofil-Standorten untereinander, als auch im Vergleich zu den hier gezeigten Ergebnissen im Großen und Ganzen parallel. Die Häufigkeits-Niveaus von Inversionen sind aber sehr unterschiedlich und liegen zwischen 10 und 60 %. Am vergleichbarsten ist das sich ebenfalls im Inntal befindende Hangprofil bei Schwaz. Es wurde allerdings nur für die Jahre 2002 bis einschließlich 2016 bei der Auswertung herangezogen (Thudium, 2017), im neuesten Bericht wurde es ab 2016 durch das Innsbrucker TEMPIS Profil mit den Standorten Flughafen-Hungerburg ersetzt. In der rund 50 m dünneren Schicht in Schwaz ist die Inversionshäufigkeit über die an beiden Standorten verfügbaren Jahre mit einer mittleren Häufigkeit von 23 % um etwa 6 Prozentpunkte geringer als

in Innsbruck mit Basisstation Flughafen, bzw. um 1 Prozentpunkt höher, wenn die Innsbruck-Uni verwendet wird. Das Schwazer Profil befindet sich am Nord exponierten Hang außerhalb des dichteren Siedlungsbereiches, der Stadteffekt spielt hier also keine Rolle. Jedoch kommt es durch die schattiger gelegene „Bergstation“ etwas seltener zu Inversionsbedingungen als im Innsbrucker Profil mit der am Südhang gelegenen Station Hungerburg. Zudem berücksichtigt Thudium neben den Temperaturen auch die Luftfeuchte, wodurch die so bestimmten Häufigkeiten relativ gesehen etwa 7 % geringer ausfallen: Nach Thudium liegen sie in den Jahren 2016 bis 2018 beim Innsbrucker TEMPIS zwischen gut 20 und knapp 23 %, während die in diesem Bericht gezeigten Werte zwischen 22 und 24 % erreichen (vgl. Tabelle 6).

Eine (in der Studie von Thudium zunächst) als Tendenz interpretierte Abnahme der Inversionshäufigkeiten bis 2014 (mit dem Ausreißer-Jahr 2011) in Schichten von mehr als 200 m Dicke, wurde in den Folgejahren bis 2018 von stark schwankenden Häufigkeiten abgelöst. In Summe kann auch Thudium noch keinen – eventuell dem Klimawandel zuzuschreibenden – Trend feststellen, dafür sind längere Datenreihen notwendig. Hoher Luftdruck mit stabil geschichteten Luftmassen kann die Ausbildung bzw. Verstärkung von Inversionen begünstigen. Stabilität (wie in Abschnitt 4.3) und Hochdrucklagen⁵ über dem Ostalpenraum korrelieren insbesondere im Winter ($R^2=0,76$), sowie teilweise im Herbst ($R^2=0,55$) positiv miteinander. In den letzten 70 Jahren haben diese Lagen in allen Jahreszeiten statistisch signifikant zugenommen, im Winter⁶ um knapp 17 %. Großräumig ist dieser Trend aber gegenläufig zu den Ergebnissen der Studie von Hiebl und Schöner (2018), die Inversionen und mögliche Trends basierend auf gegitterten Temperaturdaten über Österreich untersucht hat. Im Gitterdatensatz des Temperaturminimums liegt die mittlere Inversionshäufigkeit über Gesamtösterreich in der Klimanormalperiode 1961 bis 1990 bei 21 %, in den Tälern von Westösterreich bei 15 bis 20 %. Von 1961 bis 2017 hat die Häufigkeit um durchschnittlich 11 % abgenommen. Nur in Teilen von Tirol konnte eine statistisch signifikante Zunahme festgestellt werden.

In Summe sind die Ergebnisse dieser Studie aufgrund ihrer Methoden, vor allem bezüglich der Bestimmung der Vertikalprofile, allerdings kaum mit dem hier analysierten Innsbrucker TEMPIS-Profil vergleichbar. Zur Trendanalyse der Inversionen oberhalb von Innsbruck bedarf es noch deutlich längerer Messreihen.

⁵ Über dem Ostalpenraum bestimmt, nach Jenkinson und Collison (1977) mit Einteilung in elf verschiedenen Lagen

⁶ Im Sommer beträgt die Zunahme 33 %, allerdings ist die Korrelation zwischen Stabilität und Hochdrucklagen sogar leicht negativ ($R^2=-0,31$)

5 Auswertung der Feuchte

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

| | JAN | FEB | MAR | APR | MAI | JUN | JUL | AUG | SEP | OKT | NOV | DEZ | JAHR |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 2019 | | | | | | | | | | | | | |
| FLH | 84 | 74 | 66 | 64 | 73 | 61 | 70 | 76 | 79 | 77 | 83 | 82 | 74 |
| UNI | 83 | 71 | 62 | 60 | 70 | 56 | 66 | 72 | 75 | 74 | 80 | 79 | 71 |
| HBF | 83 | 68 | 61 | NA | NA | 53 | 51 | 55 | 73 | 72 | 81 | 80 | 67 |
| ODO | 90 | 73 | 65 | 61 | 75 | 66 | 66 | 74 | 76 | 74 | 80 | 77 | 73 |
| ALP | 85 | 71 | 63 | 60 | 74 | 59 | 70 | 78 | 79 | 76 | 80 | 80 | 73 |
| HBG | 89 | 71 | 67 | 66 | 80 | 62 | 73 | 80 | 81 | 73 | 79 | 78 | 75 |
| RAB | 86 | 65 | 67 | 70 | 82 | 61 | 74 | 80 | 82 | 70 | 77 | 74 | 74 |
| HOE | 82 | 55 | 64 | 72 | 81 | 60 | 74 | 78 | 80 | 71 | 76 | 67 | 72 |
| PAK | 84 | 59 | 71 | 82 | 90 | 68 | 78 | 81 | 80 | 76 | 86 | 69 | 77 |
| 2018 | | | | | | | | | | | | | |
| | JAN | FEB | MAR | APR | MAI | JUN | JUL | AUG | SEP | OKT | NOV | DEZ | JAHR |
| FLH | 86 | 77 | 70 | 55 | 65 | 69 | 67 | 69 | 74 | 73 | 77 | 86 | 72 |
| UNI | 84 | 75 | 67 | 51 | 63 | 65 | 63 | 65 | 71 | 70 | 73 | 84 | 69 |
| HBF | NA | NA | 65 | 48 | 60 | 63 | 61 | 64 | 68 | 66 | 71 | 82 | 66 |
| ODO | 81 | 78 | 68 | 48 | NA | 68 | 66 | 68 | 74 | 70 | 75 | 88 | 71 |
| ALP | 75 | 76 | 65 | 50 | 65 | 68 | 67 | 68 | 73 | 69 | 70 | 85 | 69 |
| HBG | 77 | 85 | 71 | 52 | 69 | 75 | 72 | 73 | 79 | 71 | 74 | 88 | 74 |
| RAB | 76 | 86 | 74 | 56 | 71 | 77 | 75 | 74 | 78 | 71 | 69 | 82 | 74 |
| HOE | 73 | 81 | NA | NA | 72 | 76 | 73 | 72 | 75 | 70 | 66 | 73 | 72 |
| PAK | 78 | 82 | 84 | 72 | 81 | 82 | 78 | 79 | 75 | 75 | 73 | 74 | 78 |
| 2017 | | | | | | | | | | | | | |
| FLH | 82 | 76 | 68 | 68 | 64 | 64 | 74 | 75 | 82 | 79 | 85 | 86 | 75 |
| UNI | 78 | 72 | 64 | 65 | 60 | 60 | 71 | 73 | 81 | 77 | 83 | 85 | 72 |
| HBF | 75 | 70 | 61 | 62 | 57 | 58 | 69 | 70 | 77 | 72 | 81 | 82 | 70 |
| ODO | 76 | 72 | 63 | 64 | 59 | 61 | 70 | 72 | 79 | 73 | 83 | 83 | 71 |
| ALP | 78 | 71 | 66 | 67 | 64 | 65 | 77 | 78 | 85 | 79 | 85 | 85 | 75 |
| HBG | 75 | 69 | 69 | 72 | 66 | 67 | 80 | 79 | 87 | 76 | 85 | 84 | 76 |
| RAB | 70 | 66 | 69 | 75 | 70 | 70 | 81 | 79 | 87 | 74 | 84 | 82 | 76 |
| HOE | 65 | 65 | 66 | 75 | 70 | 69 | 77 | 75 | 85 | 67 | 77 | 76 | 72 |
| PAK | 63 | 72 | 72 | 81 | 79 | 74 | 80 | 76 | 87 | 68 | 78 | 79 | 76 |

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

Tabelle 7: Relative Feuchte in % an den TAWES und TEMPIS Stationen in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2019 (oben) und den Jahren davor seit 2016. Die Häufigkeiten sind farbkodiert, wobei braune Farben für eher trockene Verhältnisse stehen, blaue für feuchtere. In den Monaten mit weniger als 80 % an verfügbaren Daten wurden keine Mittel bestimmt, sie sind mit „NA“ gekennzeichnet. Monatswerte, die aufgrund von Messproblemen (siehe Kapitel 3) fragwürdig sind, sind in grauer Schrift und ohne Farbkodierung dargestellt.

Übers Jahr gerechnet lag die relative Feuchte 2019 zwischen 67 % am HBF und 77 % auf dem PAK (Tabelle 7, oben). Der niedrige Wert vom Hauptbahnhof ist allerdings aufgrund der Datenlücken sowie Messproblemen im Juli und August (sich Abschnitt 3) fragwürdig. Aus dem Vergleich mit UNI und FLH aus den Vorjahren ist er wahrscheinlich um 1 bis 2 Prozentpunkte zu niedrig. An der Station Innsbruck Uni sorgte der Garten mit Rasen und Bäumen für mehr Feuchte. Am feuchtesten war es auf dem Patscherkofel, der aufgrund seiner Höhe bereits oft in Wolken steckt.

In Tallagen ist im Winter die relative Feuchte tendenziell höher als in den wärmeren Jahreszeiten⁷. 2019 sticht der Jänner bis zur HOE als feuchtester Monat heraus. Im Anschluss war es bis Juli großteils recht trocken, nur der Mai zeigt zumindest ab der HBG darin eine leichte Unterbrechung. Der „Höhepunkt“ der Trockenheit wurde im Juni verzeichnet. Da die Böden durch den sehr niederschlagsreichen Vormonat (zum Teil mehr als) gesättigt waren, kam es trotz Rekordhitze und stark unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen dennoch kaum zu ähnlichen dürrebedingten Problemen wie im Vorjahr.

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 2019 an den Stationen Alpenzoo und Höttinger Alm in Abbildung 10 erkennen. Tagsüber ist es im Jahresschnitt (und an den meisten Tagen) durch die Temperaturzunahme sowie die vertikale Durchmischung trockener als nachts.

⁷ Betrachtet man die absolute Feuchte, ist diese in der warmen Jahreszeit höher, da wärmere Luft mehr Feuchte fassen kann.

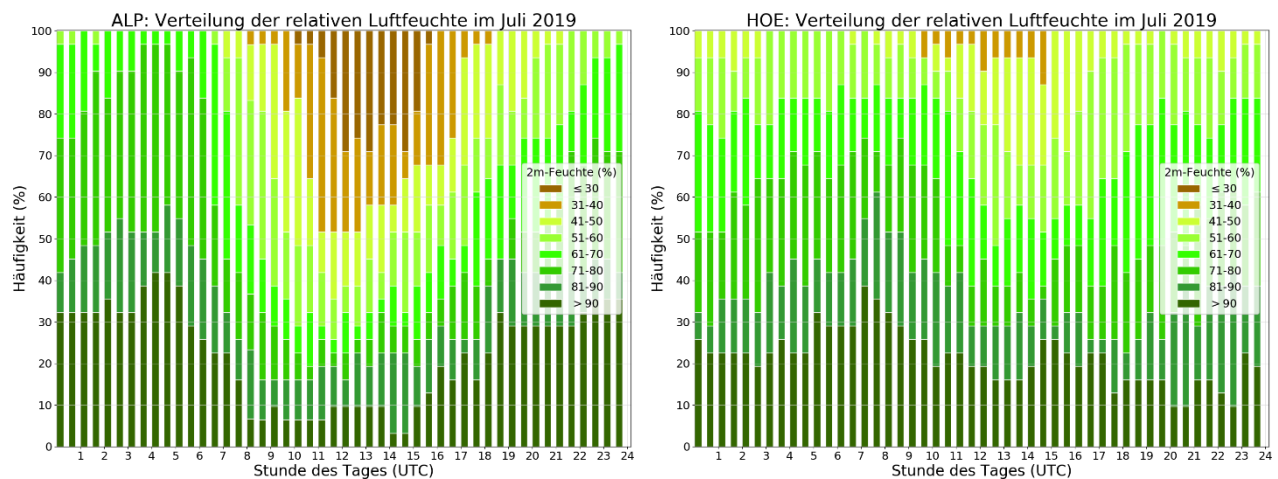


Abbildung 10: Tagesgang der Häufigkeitsverteilung der relativen Feuchte im Alpenzoo (links) und auf der Höttinger Alm (rechts) im Juli 2019.

6 Auswertung des Windes

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

6.1 Windrichtung

Die auftretenden Windrichtungen im Bereich vom Talgrund sind maßgeblich von der Ausrichtung der Achse des Inntals in der Umgebung von Innsbruck (W bis WSW nach O bis ONO) geprägt. Daher gibt es im Vergleich zu den Vorjahren kaum Änderungen in der Richtungs- und Geschwindigkeitsverteilung, auch nicht am HBF mit seinen längeren Ausfallzeiten im April und Mai.

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

Föhn nicht bis zum Talboden durchgreifen kann. Dieser ist am FLH am stärksten ausgeprägt, aber auch an den anderen Stationen zu finden.

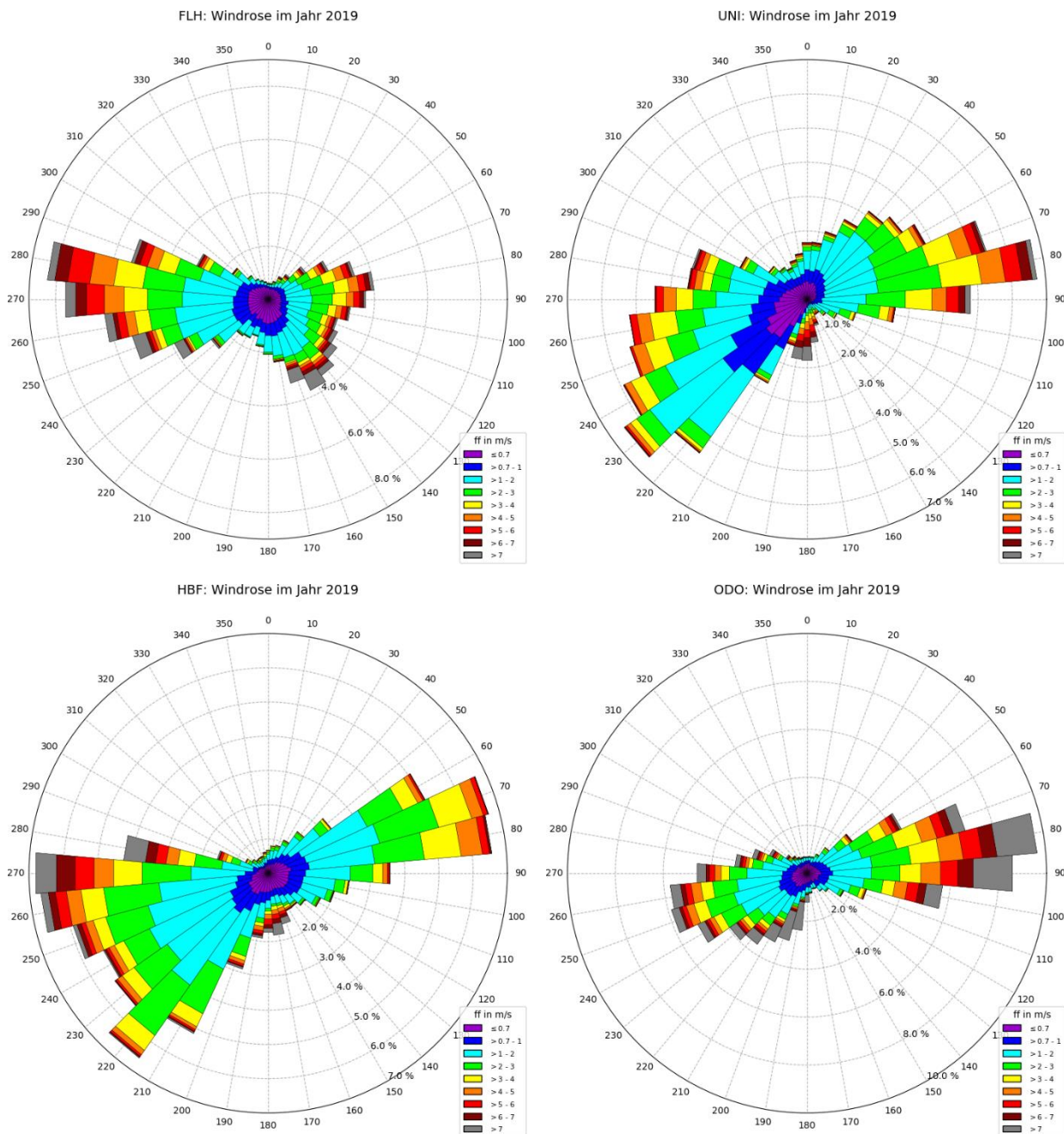


Abbildung 11: Windrosen, eingeteilt in 36 Richtungssektoren mit farbcodierten Geschwindigkeitsklassen am Flughafen (oben links), UNI (oben rechts), HBF (unten links) und ODO (unten rechts) für das Jahr 2019.

Auf dem Patscherkofel (nicht gezeigt) besteht die Windrose hauptsächlich aus zwei Keulen: eine breite aus NW bis NO mit geringen Sektorenhäufigkeiten (ca. 3-8 %), und eine schmale aus SSO bis S. Dabei weist der 170°-Sektor mit ca. 22 % (bei insgesamt 36 Richtungssektoren) eine sehr starke Kanalisierung auf, es ist die „klassische Föhnrichtung“ auf dem Patscherkofel.

6.2 Windgeschwindigkeiten: 10 Minuten Mittelwind

Wie anhand der Tabelle 8 ersichtlich ist, lagen 2019 die Monatsmittel der mittleren Windgeschwindigkeiten an den Stationen am Talgrund zwischen 1,5 m/s an der UNI und 4,6 m/s im ODO. Großteils war der Wind etwas stärker als 2016 und 2017, aber schwächer als 2018 (2016 1,2 - 4,3 m/s; 2017 1,4 - 3,5 m/s, 2018: 1,5 - 4,3).

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

Tabelle 8: Monats- und Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s an den Stationen mit Windmessung in den einzelnen Monaten bzw. gesamt im Jahr 2019 (oben) und den Jahren davor seit 2016.

Am Patscherkofel war es mit einem Jahresmittelwert von 7,7 m/s das windigste Jahr seit 2016. Oktober bis Dezember sind dabei mit über 10 m/s vertreten, der November stellt mit 12,3 m/s den windigsten Monat im Rahmen dieser Berichtreihe dar (davor war es der Feber 2016 mit 10,6 m/s).

In Tabelle 9 sind die drei stärksten Windereignisse jeder Station gelistet. Die höchsten 10-Minuten Mittel wurden 2019 hauptsächlich bei Südföhlagen registriert, am Flughafen auch im Zusammenhang mit Kaltfronten nach Föhnende (06.07. und 04.03.). Abgesehen vom

Patscherkofel gab es wie schon in den Vorjahren die höchsten Windgeschwindigkeiten im Olympischen Dorf. Am „schwächsten“ war der Wind in der Stadt auf dem Universitäts-Gebäude. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die UNI nicht unmittelbar in der Föhnschneise liegt und die verbaute Umgebung für eine Reduktion des Windes sorgt.

| | FLH | | | UNI | | | HBF | | | ODO | | | PAK | | |
|----|--------|------|-----|--------|------|-----|--------|------|-----|--------|------|-----|--------|------|-----|
| | Datum | ff | dd | Datum | ff | dd | Datum | ff | dd | Datum | ff | dd | Datum | ff | dd |
| 1. | 06.07. | 18,9 | 295 | 08.05. | 11,2 | 189 | 04.03. | 14,2 | 253 | 20.12. | 22,8 | 195 | 07.03. | 36,4 | 172 |
| 2. | 04.03. | 16,9 | 264 | 07.06. | 11,1 | 189 | 10.06. | 12,3 | 258 | 20.10. | 22,5 | 196 | 20.12. | 35,3 | 168 |
| 3. | 13.03. | 16,6 | 286 | 25.04. | 10,9 | 186 | 09.12. | 12,1 | 244 | 25.04. | 21,1 | 182 | 16.12. | 35,3 | 164 |

Tabelle 9: Datum, Windgeschwindigkeit im 10-Minutenmittel (ff, in m/s) und Windrichtung (dd, in Grad) der jeweils drei stärksten Ereignisse im Jahr 2019.

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).

Die Grenzwerte wurden 2019 am FLH, auf der UNI und am PAK häufiger überschritten als in den Vorjahren, am HBF und ODO war es teilweise etwas weniger oft als 2018. Tabelle 10 gibt eine Übersicht zur prozentuellen Überschreitungszeit der beiden Grenzwerte.

| | >= 6 Beaufort | | | | | >= 8 Beaufort | | | | |
|------|---------------|-----|-----|------|------|---------------|-----|-----|-----|------|
| | % Gesamtzeit | | | | | % Gesamtzeit | | | | |
| | FLH | UNI | HBF | ODO | PAK | FLH | UNI | HBF | ODO | PAK |
| 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 10: Prozentuelle Überschreitungzeiten der Böen von 6 bzw. 8 Beaufort (mit Ausnahme der Station Patscherkofel farbkodiert) im Jahr 2019 bezogen auf die gesamte Periode des jeweiligen Jahres für alle Stationen mit Windmessung.

In Tabelle 11 sind die drei stärksten Böenereignisse jeder Station gelistet. Spitzenreiter im Tal war 2019 wie schon in den Vorjahren die Station Olympisches Dorf mit knapp 124 km/h am 20.12. (2016: 110 km/h, 2017: 165 km/h, 2018: 105 km/h).

Wie schon beim Mittelwind standen 2018 fast alle der gelisteten Top-3-Ereignisse im Zusammenhang mit Föhn. Ausnahmen waren die beiden Ereignisse im Jänner am Flughafen, die

von Sturmtiefs aus West- bis Nordwest verursacht wurden, sowie das schon beim Mittelwind sehr starke Gewitter am 6. Juli.

| | FLH | | | UNI | | | HBF | | | ODO | | | PAK | | |
|----|--------|------|-----|--------|------|-----|--------|------|-----|--------|------|-----|--------|------|-----|
| | Datum | ffx | ddx | Datum | ffx | ddx | Datum | ffx | ddx | Datum | ffx | ddx | Datum | ffx | ddx |
| 1. | 06.07. | 32,9 | 292 | 20.12. | 24,8 | 206 | 06.03. | 24,6 | 169 | 20.12. | 34,4 | 195 | 16.12. | 43,4 | 168 |
| 2. | 02.01. | 30,1 | 255 | 24.04. | 24,5 | 146 | 20.10. | 23,9 | 166 | 15.11. | 31,8 | 229 | 07.03. | 42,8 | 164 |
| 3. | 14.01. | 28,8 | 260 | 06.03. | 24,4 | 169 | 17.12. | 23,3 | 142 | 24.04. | 31,4 | 203 | 23.11. | 42,5 | 162 |

Tabelle 11: Datum, Windgeschwindigkeit der 2-Sekunden Böe (ffx, in m/s) und dazugehörige Windrichtung (ddx, in Grad) der jeweils drei stärksten unabhängigen Ereignisse im Jahr 2019.

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 mit Windgeschwindigkeiten von weniger als 0,8 m/s als Kalmen definiert. Am Flughafen traten Kalmen wie schon in den Vorjahren in etwas über einem Fünftel der Gesamtzeit auf (21 bis 24 %), sonst im Bereich vom Talgrund mit 14 bis 20 %, und naturgemäß auf dem Patscherkofel selten mit rund 2 %. Der Grund, dass Kalmen an den Standorten in der Stadt grundsätzlich seltener sind als am relativ frei liegenden Flughafen, dürfte einerseits an der Höhe des Windsensors über Grund liegen⁸ und andererseits daran, dass sich die Stadt mehr im Einflussbereich des Wipptals mit Föhn und nächtlichem Ausfließen befindet als der Flughafen.

| HMW-Dauer | | ANZAHL PERIODEN | | | | |
|---------------|-----|-----------------|------|------|------|-----|
| von | bis | FLH | UNI | HBF | ODO | PAK |
| 1 | 2 | 1582 | 1527 | 1179 | 1471 | 255 |
| 3 | 6 | 428 | 292 | 249 | 299 | 20 |
| 7 | 12 | 47 | 18 | 21 | 14 | 0 |
| 13 | 24 | 8 | 1 | 2 | 2 | 0 |
| 25 | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 49 | inf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe der HMW | | 4133 | 3169 | 2624 | 3052 | 385 |

Tabelle 12: Häufigkeit verschiedener Klassen der Kalmendauer und Summe aller Halbstundenmittelwerte (HMW) an den verfügbaren Windstationen im Jahr 2019. Bei Kalmen liegt der HMW unter 0,8 m/s.

⁸ Am Boden ist die Windgeschwindigkeit auf Grund der Rauigkeit und der daraus resultierenden Reibung Null. Mit der Höhe nimmt der Wind in einer logarithmischen Form zu. In einer Höhe von rund 1 km über Grund ist der Einfluss der Bodenreibung schließlich vernachlässigbar.

Je länger die Kalmendauer, umso größer ist die Auswirkung auf die Schadstoffkonzentration. Tabelle 12 enthält die Übersicht zur Kalmen-Auswertung für 2019. Längere windstille Perioden wurden 2019 nicht verzeichnet. Die Klasse 12 bis 24 Stunden trat wie schon in den Vorjahren gar nicht⁹. Eine Kalmendauer von 6,5 bis 12 Stunden (13 bis 24 HMW) wurde achtmal am Flughafen erreicht, sonst nur ein- bis zweimal.

Für die Stationen am Talgrund sind in der Tabelle 13 die prozentuellen Kalmenhäufigkeiten seit 2016 zusammengefasst. Demnach bewegt sich die Kalmendauer 2019 in der Bandbreite der Vorjahre.

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

Tabelle 13: Kalmenhäufigkeit in % der Gesamtzeit (auf Basis HMW) für die Jahre 2016 bis 2019.

⁹ Durch einen Berechnungsfehler wurde für 2017 an zwei Stationen die Klasse 12 bis 24 Stunden fälschlicherweise je einmal ausgegeben. Ansonsten gab es durch die Fehlerbehebung nur sehr geringfügige Abweichungen bei den in den Vorjahresberichten gezeigten Tabellen, die hier den Tabellen 12 und 13 entsprechen.

7 Fazit

Die mit wenigen Ausnahmen guten Messdaten der Tempis-Stationen lieferten für das Jahr 2019 erneut wertvolle Einblicke in die Talatmosphäre entlang des Südhangs der Nordkette, ergänzt durch die Stationen in Innsbruck und auf dem Patscherkofel. Bezogen auf die Temperaturen, Stabilitäts- und Kalmendauer ordnete sich das Jahr in die Bandbreite der Vorjahre ein. Die Unterschiede in den Verteilungen der Stabilität waren marginal. In der (aus einem anderen Projekt stammenden) Langzeitmessreihe beginnend mit 1999 setzt sich die seit 2016 unterdurchschnittliche Häufigkeit von Inversionen fort. Bisher ist aber kein statistisch signifikanter Trend feststellbar, die geringere Häufigkeit kann auch mit den bis 2015 nicht ventilierten Temperaturmessungen zusammenhängen.

8 Literatur

Hiebl, J. und Schöner, W., 2018: Temperature inversions in Austria in a warming climate – changes in space and time, *Met. Zeitschrift* Vol.27 No.4 (2018), S. 309 – 323.

Jenkinson, A. F., 1977: An initial climatology of gales over the North Sea, *Synoptic Climatology*. Meteorological Office, Bracknell: Branch Memorandum No. 62.

Thudium, J. und Chélala, C., 2017: Zur Entwicklung der Häufigkeit atmosphärischer Inversionen im Alpenraum 1997 – 2016, *Oekoscience AG*, 22.05.2017 / 5992 70.

Thudium, J. und Chélala, C., 2019: Zur Entwicklung der Häufigkeit atmosphärischer Inversionen im Alpenraum 1997 – 2018 mit spezieller Betrachtung zu Tirol, *Oekoscience AG*, 20.09.2019 / 5844 90.