

*Auswertung des Tempis-Hangprofils  
Innsbruck für das  
Jahr 2016*

**ZAMG Kundenservice Tirol und Vorarlberg**

Susanne Drechsel, Johannes Vergeiner und Manfred Bauer

Innsbruck, März 2017

## 1. Stationen

Verteilt über das Stadtgebiet Innsbruck und in verschiedenen Höhenlagen der Nordkette sind im Jahr 2015 in einer Kooperation der ZAMG mit dem Land Tirol und der Stadt Innsbruck insgesamt sechs Tempis-Stationen errichtet bzw. erneuert worden: am Hauptbahnhof bei der Berufsfeuerwehr (HBF), im Olympischen Dorf (ODO), beim Alpenzoo (ALP), auf der Hungerburg (HUB), am Rastlboden (RAS) und auf der Höttinger Alm (HOE). An allen Stationen wird Temperatur und Feuchte gemessen, an den Stationen Bahnhof und Olympisches Dorf auch Wind. Abbildung 1 zeigt die Standorte im GoogleEarth Orthofoto.



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).

Mit Hilfe der Tempis-Stationen lassen sich vertikale Profile von Temperatur und Feuchte erstellen. Dabei gilt es allerdings zu beachten, dass sich die Stationen alle auf der vornehmlich nach Süden ausgerichteten Nordkette befinden. Sie bilden nicht die sogenannte „freie Atmosphäre“ ab, sondern sind Strahlungseinflüssen und den daraus resultierenden Hangwinden ausgesetzt, was wiederum die Temperatur beeinflusst.

Zur Ergänzung bzw. Erweiterung der Vertikalprofile werden zudem die teilautomatischen Stationen (TAWES) der ZAMG am Flughafen (FLH) und auf dem Patscherkofel (PAK) verwendet, sowie die von der ZAMG und dem Institut für Atmosphäre und Cryosphäre in Kooperation betriebene Station Universität (UNI). Am Patscherkofel ist der Einfluss der Topographie auf Temperatur, Feuchte und Wind nur mehr gering. Die Station kommt somit der „freien Atmosphäre“ am nächsten. In Tabelle 1 sind Informationen zu den Tempis-Stationen und den TAWES zusammengefasst.

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°24'18.37"	47°15'38.36"	611	25	6	JA	JA	JA
OLYMPISCHES DORF	ODO	11°26'47.24"	47°16'12.16"	635	65	6	JA	JA	JA
ALPENZOO	ALP	11°23'51.06"	47°16'51.54"	668	3	3	JA	JA	NEIN
HUNGERBURG	HUB	11°23'50.54"	47°17'16.37"	920	11.5	0	JA	JA	NEIN
RASTLBODEN	RAB	11°23'25.38"	47°17'42.84"	1204	6.5	0	JA	JA	NEIN
HÖTTINGER ALM	HOE	11°21'52.45"	47°17'59.44"	1566	3	3	JA	JA	NEIN
FLUGHAFEN	FLH	11°21'23.60"	47°15'35.80"	578	25/2	2	JA	JA	JA
INNSBRUCK UNI	UNI	11°23'03.30"	47°15'35.50"	578	47/2	2	JA	JA	JA
PATSCHERKOFEL	PAK	11°27'44.00"	47°12'32.00"	2252	28/2	2	JA	JA	JA

Tabelle 1: In den ersten fünf Spalten sind Name, Kürzel, Seehöhe (m ü.N.N.) und Koordinaten 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 die Masthöhe. In den letzten drei Spalten wird festgehalten, ob Temperatur (T), relative Feuchte (rh) und Wind gemessen werden.

Im Folgenden werden nur die Tempis-Stationen detaillierter beschrieben. Die zugehörigen Abbildungen befinden sich im Appendix A.

### 1.1 Station Hauptbahnhof (HBF)

Die Station befindet sich mitten in der Stadt, direkt östlich des Hauptbahnhofs (vgl. Abb. A1 im Appendix) auf dem rund 25 m hohen Schlauchturm der Berufsfeuerwehr (Abb. A2). Der Turm überragt auch die meisten der höheren Gebäude der Umgebung ein wenig. Die Messinstrumente für Temperatur, Feuchte und Wind befinden sich auf einem 6 m hohen Masten (Abb. A3), die Sensorhöhe wird mit 611 m ü.N.N. angegeben, was einer Höhe von gut 30 m über Grund entspricht.

Der Standort ist als urban zu bezeichnen und ist umgeben von mehrstöckigen Gebäuden, asphaltierten Flächen sowie Grünanlagen mit Bäumen.

Im Vergleich zu einer unverbauten Umgebung ist bei einem städtischen Mikroklima ein sogenannter Wärmeinseleffekt zu erwarten. Aufgrund des geringeren Grünflächenanteils kommt es tagsüber in der Vegetationsperiode zu weniger Verdunstung und damit zu weniger Kühlung. Gleichzeitig wirken die (aufgeheizten) Gebäude als Wärmespeicher. Die Temperatur ist damit durchschnittlich etwas höher als in unverbaute Umgebung. Zudem ist die Luft trockener und der Wind wird durch die städtische Verbauung abgeschwächt.

### 1.2 Station Olympisches Dorf (ODO)

Die Station befindet sich auf einem rund 60 m hohen Hochhausturm im Olympischen Dorf in Innsbruck (Abb. A4). Der Turm, der die meisten Gebäude der Umgebung weit überragt, befindet sich am Ostrand der Stadt, nahe dem linken Innufer etwa auf Höhe des Baggersees. Die Messinstrumente für Temperatur, Feuchte und Wind befinden sich auf einem 6 m hohen Masten (Abb. A5), die Sensorhöhe wird mit 635 m ü.N.N. angegeben, was einer Höhe von etwa 65 m über Grund entspricht (Abb. A6).

Am Standort wird bei westlichen Windrichtungen ein städtischer Einfluss mit Wärmeinseleffekt (siehe voriger Absatz) erwartet, bei Ostwind überwiegt der Einfluss der unverbauten, großteils landwirtschaftlich genutzten Felder.

### 1.3 Station Alpenzoo (ALP)

Die Station befindet sich im Gelände des Innsbrucker Alpenzoos, rund 100 Höhenmeter über dem Talboden und nördlich des Inns (Abb. A7). Der 3 m hohe Messmast befindet sich an dem nach Südosten orientierten Hang, oberhalb der Vogelvoliere und unterhalb eines asphaltierten Weges (Abb. A8). Die Mastspitze mit den Messinstrumenten für Temperatur und Feuchte überragen das Niveau des Weges um etwa 1 m. Westlich und östlich säumen, bzw. überragen Bäume und Büsche die Station (Abb. A9). Die Sensorhöhe wird mit 668 m ü.N.N. angegeben. In Summe ist der Standort als nach Südosten offen, ansonsten durch Vegetation bzw. den Weg nördlich der Station als geschützt zu charakterisieren. Er befindet sich noch im Einflussbereich der Stadt, vor allem bei strahlungsbedingten Hangaufwinden, während die nächtliche Abkühlung am Standort eher abgeschwächt sein dürfte.

### 1.4 Station Hungerburg (HBG)

Die Station befindet sich wenig oberhalb des Stadtteils Hungerburg (Abb. A10) an Fuße der Nordkette auf einem eher flachen, nach Süden ausgerichteten Hang. Sie ist auf der ersten bzw. untersten Stütze der Seegruben-Kabinenbahn in einer Höhe von 11.5 m über Grund montiert (Abb. A11). Die Sensorhöhe beträgt damit 920 m ü.N.N. Um den Einfluss der Stützenkonstruktion zu minimieren, befinden sich die Messinstrumente für Temperatur und Feuchte auf einem ca. 1 m langen, nach Westen ausgerichteten Ausleger (Abb. A12). Der Standort liegt gut 350 m über der Talsohle und ist durch die vorgelagerte Geländeterrasse des Hungerburgbereiches deutlich von den direkten Einflüssen der Stadt abgeschirmt. Während die Station nach Westen und Süden recht frei gelegen ist, wird sie nach Norden bzw. hangaufwärts mit Ausnahme der schmalen Seilbahntrasse durch Wald abgeschirmt. Im Ostsektor wechseln Baumgruppen und Lichtungen. Aufgrund der Geländestruktur und des Bewuchses wird erwartet, dass die Hangzirkulation (Auf- und Abwinde) nur schwach ausgeprägt ist.

### 1.5 Station Rastlboden (RAB)

Die Station befindet sich im Bereich der Geländeverflachung des Rastlbodens auf den nach Süden ausgerichteten Hängen der Nordkette (Abb. A13). Sie ist ebenfalls auf einer Stütze der Seegrubenbahn (Abb. A14) in einer Höhe von 6.5 m über Grund auf einem nach Westen ausgerichteten, 1 m langen Ausleger montiert (Abb. A15). Die Sensorhöhe für Temperatur und Feuchte wird mit 1204 m angegeben. Abgesehen von der hier auch als Skipiste genutzten und daher etwas breiteren Seilbahnschneise ist der Standort von Wald umgeben. Die Stütze befindet sich auf einem Geländerrücken, der sich Richtung Südwest hinunter zieht. Im Nordostsektor wird die Station dadurch von Bäumen überragt, im Südwestsektor ist der Standort als recht offen zu bezeichnen. Aufgrund der Geländestruktur und des Bewuchses wird erwartet, dass die Hangzirkulation (Auf- und Abwinde) nur schwach ausgeprägt ist. Von der Stadt her ist hier kaum mehr ein Einfluss zu erwarten.

### 1.6 Station Höttinger Alm (HOE)

Die Station befindet sich oberhalb des Almgebäudes Höttinger Alm auf den nach Süden ausgerichteten Hängen der Nordkette (Abb. A16). Der 3 m hohe Mast steht auf freiem Almgebäude (Abb. A16-A18), die Sensorhöhe für Temperatur und Feuchte wird mit 1566 m angegeben. Das Gelände ist als mäßig steil zu bezeichnen und formt im Bereich der Station

einen leichten Rücken, der westlich und östlich durch schwach ausgeprägte Gräben, bzw. Kare abgegrenzt ist.

Aufgrund der Neigung und der Orientierung des Hanges, sowie der im Grunde hindernislosen Umgebung ist zu erwarten, dass Hangwinde einen maßgeblichen Einfluss auf die Temperatur- und Feuchteverhältnisse vor Ort haben.

## 2. Daten und Verfügbarkeit im Jahr 2016

**Mit Ausnahme der Station Höttinger Alm beträgt die Datenverfügbarkeit an allen Standorten im Jahr 2016 mindestens 99 %.**

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 höchste 2-Sekunden Wert in diesen 10 Minuten. Temperatur und Feuchte werden überall gemessen, Wind in Form von Richtung und Geschwindigkeit an den Stationen Flughafen, Innsbruck Uni, Hauptbahnhof, Olympisches Dorf und Patscherkofel. Tabelle 2 gibt eine Übersicht zur prozentuellen Verfügbarkeit aller Messparameter im Jahr 2016.

Die längsten Datenlücken gibt es durch einen defekten Temperatursensor am Standort Höttinger Alm, da die Station aufgrund der Lawinensituation zeitweilig nicht erreichbar war. Hier fehlen zwischen Mitte Februar und Anfang Mai in Summe 67 Tage. Über das Jahr gesehen liegt die Temperaturverfügbarkeit dort bei nur 81.5 %.

Weitere nennenswerte Datenlücken, auch an den anderen Stationen, sind größtenteils auf Logger- und/oder Übertragungsprobleme zurückzuführen und betreffen somit alle an der jeweiligen Station gemessenen Parameter. An der Hungerburg und am Rastlboden umfasst die längste Lücke rund 3 Tage in der ersten Septemberhälfte. Im Olympischen Dorf gibt es einen knapp 8 stündigen Ausfall Ende September. Alle anderen Ausfälle an den Stationen sind kürzer und treten übers Jahr verteilt auf.

STATION	TEMPERATUR	FEUCHTE	WIND
FLUGHAFEN	99.9	99.9	99.9
INNSBRUCK UNI	100.0	100.0	100.0
HAUPTBAHNHOF	99.9	99.9	99.9
OLYMPISCHES DORF	99.8	99.8	99.7
ALPENZOO	99.8	99.8	-
HUNGERBURG	99.1	99.1	-
RASTLBODEN	99.0	99.0	-
HÖTTINGER ALM	<b>81.5</b>	<b>81.5</b>	-
PATSCHERKOFEL	100.0	100.0	100.0

Tabelle 2: Verfügbarkeit der 10-Minuten Mittelwerte der gemessenen Parameter an den Tempis-Stationen und der TAWES im Jahr 2016.



### 3. Auswertung der Temperatur

#### 3.1 Monats- und Jahresmitteltemperatur

Für die Auswertung ist eine Mindestverfügbarkeit von 80 % an 10-Minuten Daten im betrachteten Zeitintervall gefordert. Daher ist für die Station Höttinger Alm die Bildung der Monatsmittel für Feber, März und April nicht möglich. In Tabelle 3 sind die Auswertungen für alle verfügbaren Stationen zusammengefasst.

NAME	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
FLH	-0.1	3.7	5.4	10.3	13.3	17.2	19.0	18.5	16.2	9.2	4.7	-1.1	9.7
UNI	0.7	4.5	6.1	11.1	14.0	17.8	19.6	19.1	16.9	9.7	5.2	-0.2	10.4
HBF	0.8	4.5	5.7	10.7	13.6	17.5	19.5	19.0	17.0	9.7	5.4	0.6	10.4
ODO	0.5	4.2	5.3	10.4	13.4	17.0	19.1	18.6	16.7	9.5	5.4	0.7	10.1
ALP	0.6	4.3	5.6	10.7	13.4	17.0	18.9	18.6	16.8	9.7	5.6	1.0	10.2
HBG	-0.1	3.5	3.5	8.5	11.4	14.8	16.9	16.6	15.1	8.0	3.9	1.8	8.7
RAB	-0.4	1.7	1.7	6.6	9.5	12.9	15.1	14.8	13.4	6.3	2.8	2.4	7.2
HOE	-1.4	-	-	-	7.4	11.1	13.7	13.5	12.2	4.5	1.5	2.1	6.7
PAK	-5.8	-5.1	-5.7	-0.8	1.9	6.6	9.3	9.2	7.4	0.2	-2.9	-1.9	1.0

Tabelle 3: Monats- und Jahresmittel der Temperatur in °C aus den Stundenwerten an den Messstationen (von oben nach unten der Höhe entsprechend sortiert). Die Auswertung basiert auf 10-Minuten Daten, insofern im betrachteten Mittelungszeitraum mindestens 90 % an Daten verfügbar sind.

Die Jahresmitteltemperatur für 2016 liegt bei rund 10 °C in der Stadt und am Alpenzoo, 8.7 °C auf der Hungerburg, 7.2 °C am Rastboden und 1.0 °C am Patscherkofel<sup>1</sup>. Der Temperaturunterschied von 0.7 °C zwischen den beiden gleich hoch gelegenen Stationen Flughafen und Innsbruck Universität rührt vom Stadteffekt her (vergleiche Abschnitt 1.1) und ist nicht nur im Jahresmittel, sondern auch in allen einzelnen Monaten zu finden.

Der kälteste Monat war überall der Jänner mit rund 0 °C in der Stadt und knapp -6 °C am Patscherkofel. Der wärmste Monat war der Juli mit durchschnittlich 19 bis 20 °C in der Stadt und gut 9 °C auf dem Patscherkofel. Dies zeigt auch, dass der jahreszeitliche Unterschied in der Talsohle deutlich größer ist als auf den umgebenden Berggipfeln.

#### 3.2 Temperaturprofile

Anhand der stündlichen, jeweils 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 A enthält Abbildung A19 die Monatsmittel für Jänner, Mai, Juli und Oktober. 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.

<sup>1</sup> Im Vergleich zum Klimamittel 1981 bis 2010 war es 2016 in der Stadt um 1.1 °C zu warm, auf dem Patscherkofel um 0.7 °C.

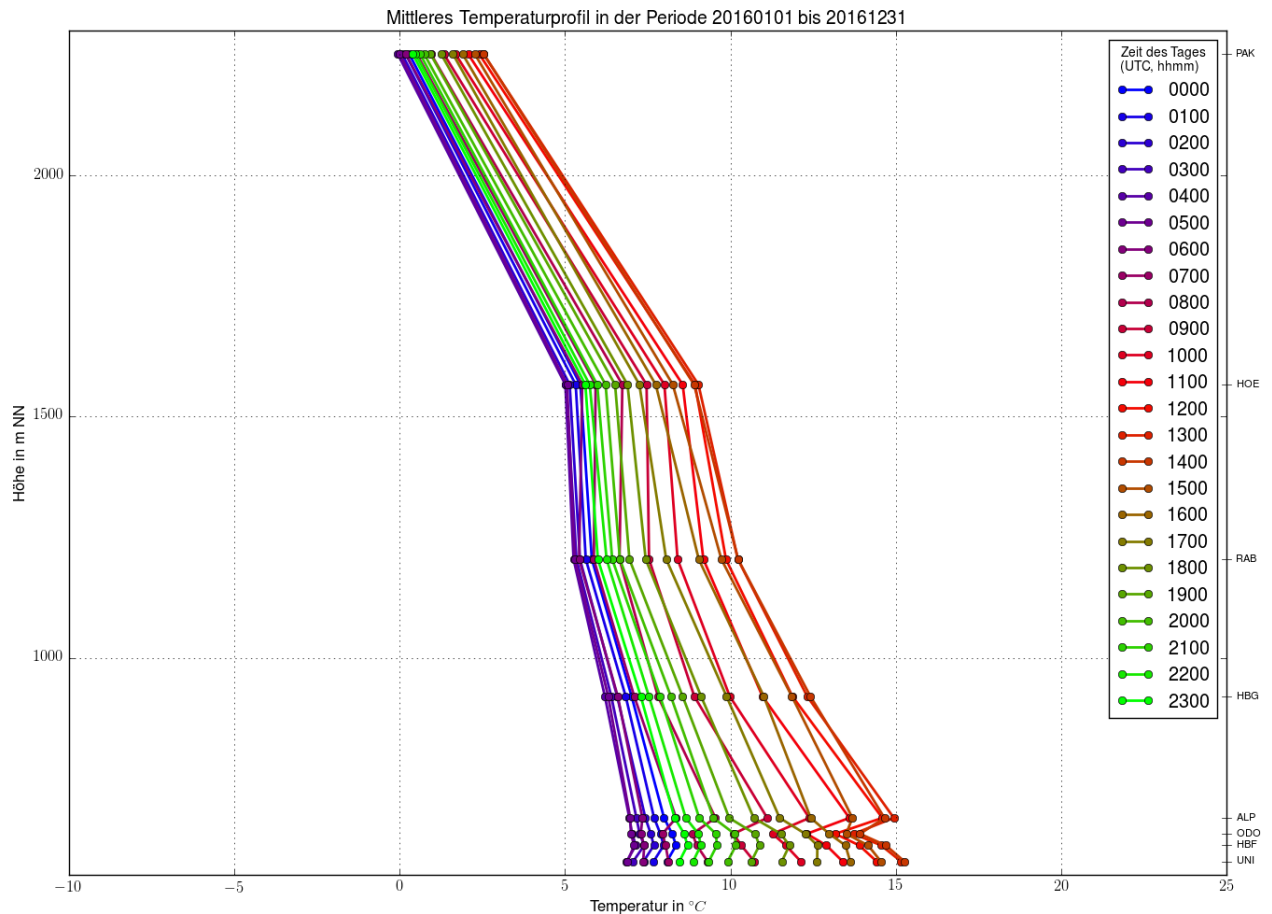


Abbildung 2: Stündliche Temperaturprofile im Jahresmittel. Zur Umrechnung auf Mitteleuropäische Zeit (MEZ) ist eine Stunde zu addieren, 12 Uhr UTC entspricht also beispielsweise 13 Uhr MEZ.

Schon aus den Jahresmitteln der stündlichen Profile lässt sich erkennen, dass nachts (grüne und blau-violette Linien) die Profile steiler sind, die Schichtung also stabiler ist als tagsüber. Grund ist, dass der mittlere Tagesgang in den unteren Niveaus (ca. 8 Grad an den Stationen UNI, HBF, ODO und ALP) deutlich größer als weiter oben (3 bis 3.5 Grad am PAK und HOE)<sup>2</sup>.

Ebenso ist es in der kalten bzw. kühlen Jahreszeit (Abb. A19, Jänner bzw. Oktober) stabiler, die Profile sind steiler und liegen enger beisammen, da der Tagesgang geringer ist. Im Frühjahr erwärmen sich vor allem die niedrigeren Niveaus, in der Höhe bleibt es noch kühler. Dadurch wird die Atmosphäre labiler, vor allem tagsüber. So wird es von Jänner bis Mai zur wärmsten Tageszeit in den untersten Schichten um etwa 14 Grad wärmer, am Patscherkofel nur um 8 bis 9 Grad. (Abb. 19, Mai). Zum Hochsommer hin wird die Atmosphäre weiter hinauf durchmischt, auch die höheren Schichten erwärmen sich mehr. So nehmen die Temperaturen von Mai bis Juli in den unteren Schichten ‚nur‘ um etwa 7 Grad zu, am Patscherkofel sind es ‚immerhin‘ rund 8.5 Grad zur wärmsten Tageszeit (Abb. A19, Juli). In Summe ist es damit im Juli ein wenig stabiler als im Mai.

<sup>2</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. In Tälern wie dem Inntal verstärkt sich der Effekt durch Hangwinde.

### 3.3 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 in den vorliegenden Auswertungen verwendete Einteilung in die verschiedenen Stabilitätsklassen ist 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 Tempis-Stationen und TAWES werden jeweils zwei benachbarte Niveaus verglichen. Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Klassen für die verschiedenen Schichten im Jahr 2016. Oberhalb des Alpenzoos dominiert überall die neutrale Schichtung, am häufigsten ist sie zwischen Höttinger Alm und Patscherkofel zu finden. In den beiden untersten Schichten, sozusagen am Talgrund, ist diese Klasse am seltensten und die Randklassen „sehr labil“ und „sehr stabil“ am häufigsten. Dies zeigt gut, dass die Stabilität von der Oberfläche durch Strahlungsprozesse gesteuert wird<sup>3</sup>.

Dieses Muster tritt beispielsweise im Mai noch stärker hervor, da die Einstrahlung tagsüber recht stark ist, während der Dezember von der stabilen Hochdruckphase gekennzeichnet ist und es bis zum Rastlboden hinauf generell (sehr) stabil ist (siehe Abbildung A20 und A21 im Appendix).

<sup>3</sup> Bei windschwachen Hochdrucklagen unterliegt die Stabilität Strahlungsprozessen. Die Sonnenstrahlung erwärmt vor allem Oberflächen (weniger die Luft) und 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) 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) Schichtungen ergibt.



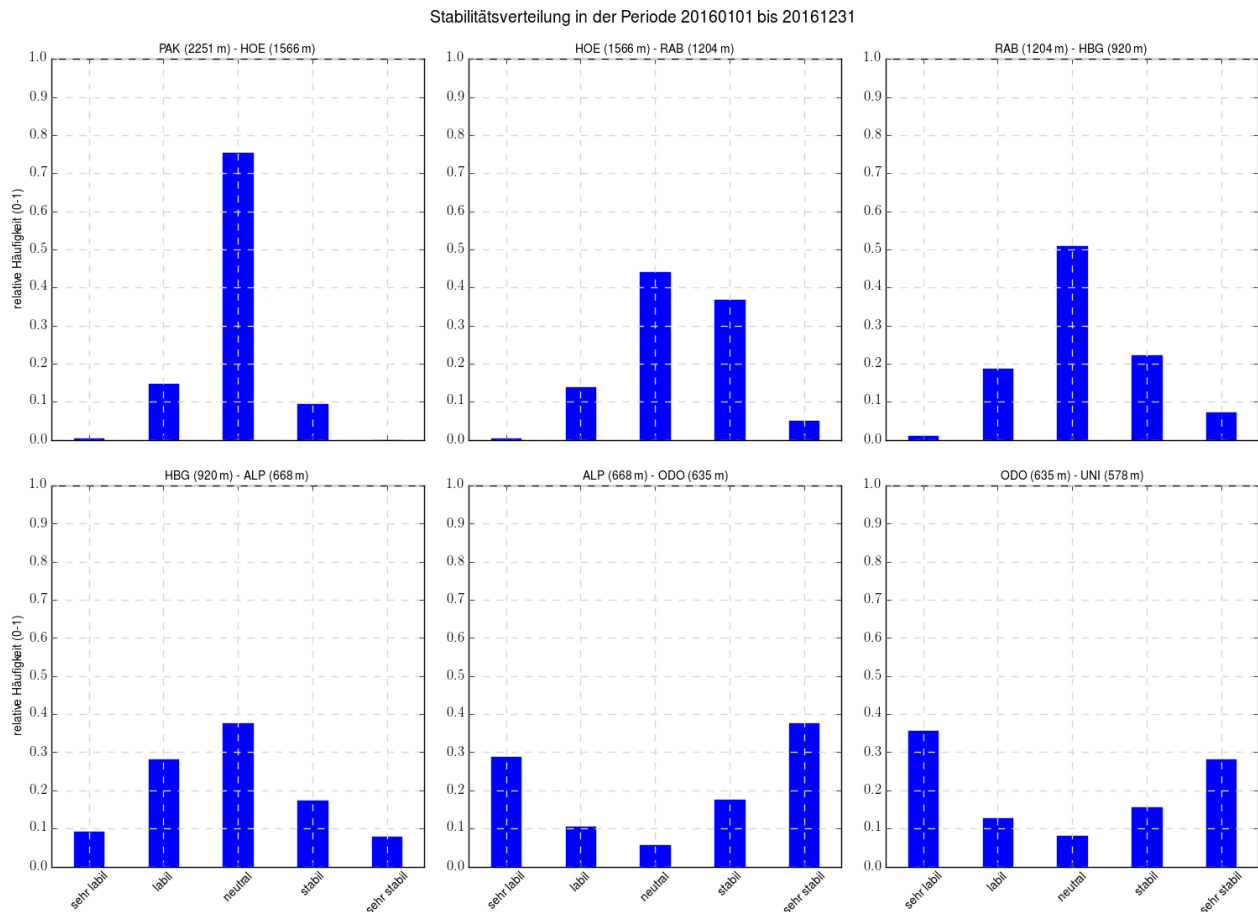


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Stabilitätsklassen im Jahr 2016 zwischen Patscherkofel und Höttinger Alm (oben links), Höttinger Alm und Rastlboden (oben mitte), Rastlboden und Hungerburg (oben rechts), Hungerburg und Alpenzoo (unten links), Alpenzoo und Olympischem Dorf (unten mitte), Olympischem Dorf und Innsbruck Uni (unten rechts).

Besonders relevant bezüglich der Schadstoffkonzentration bzw. –belastung ist natürlich jene Schicht, in der die hauptsächliche Emission (durch Verkehr, Heizung, Industrie, ...) stattfindet und in der gleichzeitig der Großteil der Bevölkerung lebt. Am interessantesten ist deshalb die Schicht zwischen Olympischem Dorf und Innsbruck Uni, die knapp 60 m misst. Abbildung 4 zeigt den Tagesgang der Häufigkeit der verschiedenen Stabilitätsklassen im Jahr 2016 für diese Schicht. Man sieht gut, dass die Stabilität mit zunehmendem Strahlungsangebot im Tagesverlauf erst abnimmt, und nachmittags, nach Sonnenhöchststand, bis in die Abendstunden wieder zunimmt. Nachts bleibt es bis Sonnenaufgang relativ gleichmäßig stabil. Den Zusammenhang zwischen Stabilität und Strahlungsangebot findet man grundsätzlich auch im Jahresverlauf, während der einzelnen Monate. So ist es in der kalten Jahreszeit grundsätzlich stabiler als in der warmen. Allerdings hat auch die Häufung von bestimmten Wetterlagen einen Einfluss. So fällt auf, dass es im Dezember einen deutlich höheren Anteil an stabilen und sehr stabilen Verhältnissen im Vergleich zum Jänner gibt (vergleiche Abb. A22). Ursache ist die anhaltende Hochdruckphase im Dezember 2016, während der Jänner durch unbeständiges, nasses Wetter mit nur wenig Sonne (und daher eher labilen Lagen) gekennzeichnet war. Ebenso war auch der April in Summe labiler als der Juli.

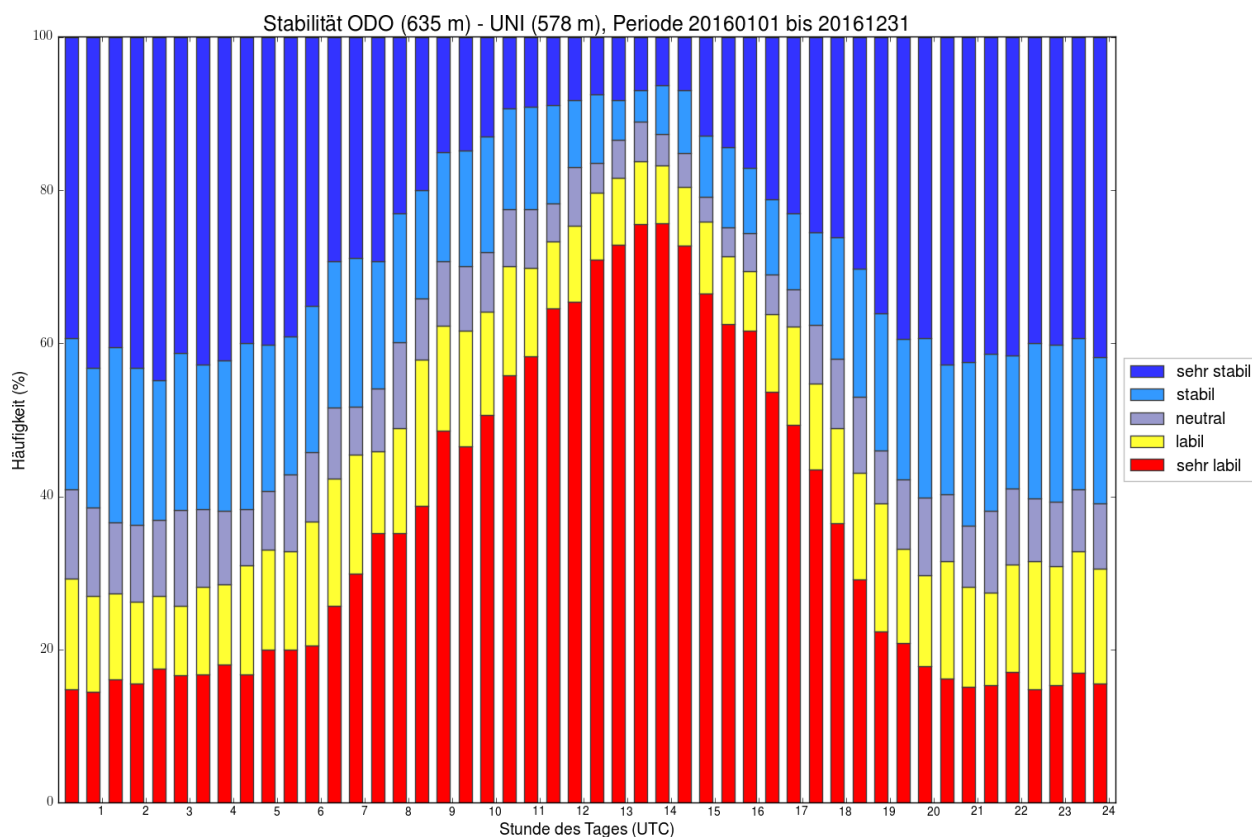


Abbildung 4: Häufigkeit der verschiedenen Stabilitätsklassen aus den stündlichen Temperaturmitteln in der rund 60 m dicken Schicht zwischen der Messung am Hochhaus im Olympischen Dorf und der Messung Innsbruck Uni 2 m über Grund im Jahr 2016.

### 3.4 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 zeigt die Verteilung der Inversionshäufigkeit in den verschiedenen Schichten im Jahr 2016. In der untersten Schicht zwischen Innsbruck Uni und dem Olympischen Dorf gibt es in über einem Drittel des Gesamtzeitraums eine Inversion (34 %). In der darüber liegenden Schicht bis zum Alpenzoo hinauf scheint die Inversion noch häufiger (43 %) anzutreffen zu sein. Allerdings ist davon auszugehen, dass dabei ein nicht genau zu beziffernder Anteil auf die geschützte Südhanglage des Alpenzoos zurückzuführen ist. Die Sonne erwärmt hier die Luft schneller als am Talgrund. Aufgrund der fehlenden Luftzirkulation kommt es zu einer Art ‚Wärmestau‘ und dadurch zu ‚künstlichen‘ Inversionen. Würde in der Talmitte auf gleicher Höhe wie am Alpenzoo gemessen werden, würde das Bild höchstwahrscheinlich anders aussehen und die Inversionen wohl seltener sein als in der untersten Schicht. Oberhalb vom Alpenzoo nimmt die Inversionshäufigkeit auf 13 bis 17 % ab.

Interessanter als die Inversionen zwischen den einzelnen Schichten ist jeweils die vom Boden (hier Innsbruck Uni) ausgehende. Die Häufigkeiten im Jahr 2016 sowie in den einzelnen Monaten sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

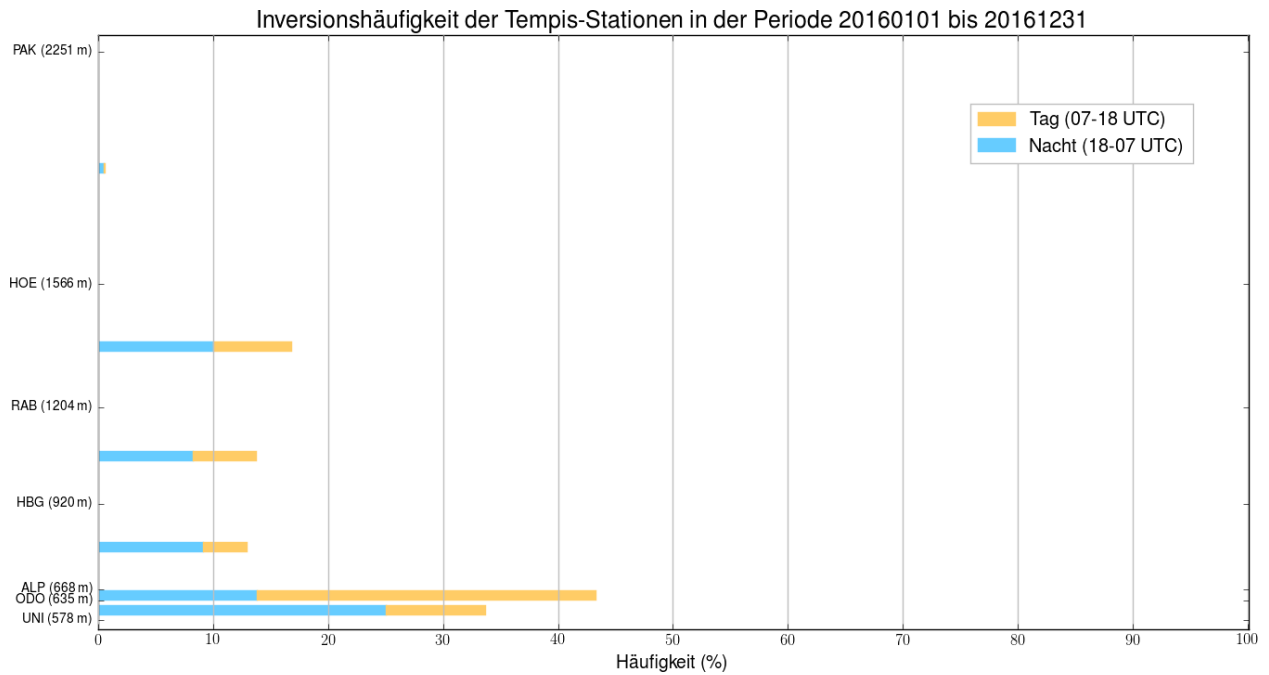


Abbildung 5: Häufigkeit der Inversionen in den verschiedenen Schichten im Jahr 2016. Gelbe Balken stehen dabei für den Anteil zwischen 7 und 18 UTC (8 und 19 MEZ), blau für den Anteil zwischen 18 und 7 UTC (19 und 8 MEZ), vereinfacht also für den Tages- und Nachtanteil.

Sowohl übers Jahr gesehen, als auch in allen einzelnen Monaten nimmt die Inversionshäufigkeit mit zunehmender Schichtdicke ab. Flache Inversionen sind also häufiger als hoch reichende. Unterhalb der Hungerburg gibt es in etwa zu einem Drittel der Gesamtzeit eine Inversion (37 bis 31 %). Darüber nimmt die Häufigkeit bis zur Höttinger Alm auf 18 bis 15 % ab, wobei sich die Inversionen immer mehr auf die kühle bis kalte Jahreszeit konzentrieren. Der Patscherkofel liegt nur zu 4 % der Gesamtzeit innerhalb einer Inversion und diese beschränkt sich hauptsächlich auf den Dezember (im Durchschnitt an jedem 3. Tag) und den Jänner (durchschnittlich an jedem 10. Tag).

NAME	$\Delta Z$	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
HBF	33	45	35	17	26	23	16	33	40	51	38	39	82	<b>37</b>
ODO	57	36	32	19	25	21	15	26	33	45	34	37	77	<b>33</b>
ALP	90	33	28	18	23	19	14	16	27	42	34	32	88	<b>31</b>
HBG	342	28	24	6	10	8	1	1	4	14	14	22	79	<b>18</b>
RAB	626	30	18	4	8	6	1	1	1	12	12	23	76	<b>16</b>
HOE	988	26	14	8	9	0	1	1	2	8	9	17	72	<b>15</b>
PAK	1673	9	4	0	0	0	0	0	1	0	1	3	35	<b>4</b>

Tabelle 5: Inversionshäufigkeit (in %) zwischen Innsbruck Uni und der jeweiligen Station in den einzelnen Monaten bzw. gesamt (fett) im Jahr 2016. Unter  $\Delta z$  ist die Schichtdicke (in m) angegeben. In den Monaten Februar bis April ist die Inversionshäufigkeit bis zur Höttinger Alm nur für den Anteil der vorhandenen Daten berechenbar (grau).

Das Maximum der Inversionshäufigkeit wurde im Jahr 2016 unabhängig von der Obergrenze im Dezember verzeichnet. Selbst bis zur Höttinger Alm gab es zu fast  $\frac{3}{4}$  der Zeit eine Inversion. Auch wenn noch keine Vergleichswerte für andere Jahre vorliegen, dürfte die Häufigkeit der

Inversion im Dezember 2016 außergewöhnlich hoch sein. Ursache dafür war die anhaltende, stabile Schönwetterperiode.

Im Sommer gibt es fast nur flache Inversionen. So liegt von Juni bis August die Inversionsobergrenze meist unterhalb des Hungerburg-Niveaus. Wenn Inversionen auftreten, sind sie also dünner als 342 m.

Die zuvor erwähnten ‚künstlichen‘ Inversionen am Alpenzoo sind in dieser Tabelle nicht eindeutig zu erkennen. Betrachtet man allerdings die Inversionshäufigkeit tagsüber (7 bis 18 UTC) und nachts (18 bis 7 UTC) getrennt, kristallisiert sich der Effekt der geschützten Südhanglage wieder klar heraus (vergleiche Tabellen A1 und A2 im Appendix). Nachts nimmt die Inversionshäufigkeit mit zunehmender Schichtdicke wie gehabt ab. Tagsüber findet man allerdings ein Maximum von 15 % für die Schicht Innsbruck Uni und Alpenzoo, während die Häufigkeit in den flachen Schichten (bis HBF bzw. ODO) bei nur knapp 10 % liegt und in den dickeren Schichten (bis HBG, RAB, bzw. HOE) bei 5 bis 6 %.

Vergleiche mit Ergebnissen aus anderen Hangprofilen sind nur eingeschränkt möglich, da diese stark von Schichtdicke und lokaler Lage bestimmt werden. Thudium (2014) hat Inversionen an verschiedenen Standorten in den Alpen untersucht, darunter auch für den gut vergleichbaren Standort in Schwaz. Die Schicht misst hier 294 m und beginnt 16 m ü.G.. Für die Jahre 2002 bis 2014 schwankt die Inversionshäufigkeit zwischen etwa 16 und 28 %, im Durchschnitt beträgt sie rund 23 %. Im Jahr 2016 liegt die Inversionshäufigkeit ziemlich genau im Bereich dieses Durchschnitts (pers. Mitteilung Krismer, März 2017). Die Inversionshäufigkeit ist damit in Schwaz also um ca. 5 Prozentpunkte höher als in der etwa 50 m dickeren Schicht zwischen Innsbruck Uni und Hungerburg. Geht man von einer abnehmenden Häufigkeit mit zunehmender Schichtdicke aus, werden die vorliegenden Ergebnisse Inversionshäufigkeit von Innsbruck bestätigt<sup>4</sup>.

## **4. 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 %.

Die Quelle für Wasserdampf ist (abgesehen von vernachlässigbaren chemischen Prozessen) ausschließlich die Erdoberfläche. Wasser, das an der Oberfläche von Gewässern oder von der Vegetation oder sonst nassen/feuchten Oberflächen verdunstet, gelangt über vertikalen Austausch in die Atmosphäre und kann mittels großräumiger Luftströmungen weiter transportiert werden.

Übers Jahr gerechnet beträgt die relative Feuchte ab dem Alpenzoo 75 bis 81 %, in der Stadt mit dem hohen Anteil an versiegelten Flächen liegt sie bei 70 bis 72 % (Abbildung 6, rechts).

<sup>4</sup> In der Arbeit von Thudium werden die Inversionen sehr wahrscheinlich nicht über die Temperaturdifferenz direkt bestimmt, sondern über die Differenz einer „quasi-potentiellen Temperatur“. Dabei wird zur Berücksichtigung der Feuchte pro 100 Höhenmeter die Temperaturdifferenz um 0.5 Grad erhöht (Zeni 2016). Die nimmt Inversionshäufigkeit nimmt somit laut Thudium mit zunehmender Schichtdicke sogar eher zu. In der flacheren Schicht bei Schwaz (154 m Dicke) ist die Inversionshäufigkeit um 3 Prozentpunkte niedriger und liegt bei ‚nur‘ etwa 20 %.

Den höchsten Wert (72 %) weist hier noch die Station Innsbruck Uni auf, die in einem Garten mit Rasen und Bäumen steht.

Der Dezember sticht ab dem Niveau Hungerburg als mit Abstand trockenster Monat heraus (49 bis 62 % relative Feuchte) – aufgrund der stabilen Schönwetterperiode waren sowohl der Horizontal- als auch der Vertikaltransport der Feuchte gering. Unterhalb der Hungerburg, in der stabilen (Inversions-) Schicht ist die Schicht deutlich feuchter (69 bis 78 % relative Feuchte) aufgrund der fehlenden Austauschprozesse und der relativ niedrigen Temperaturen (vgl. auch Abb. A23).

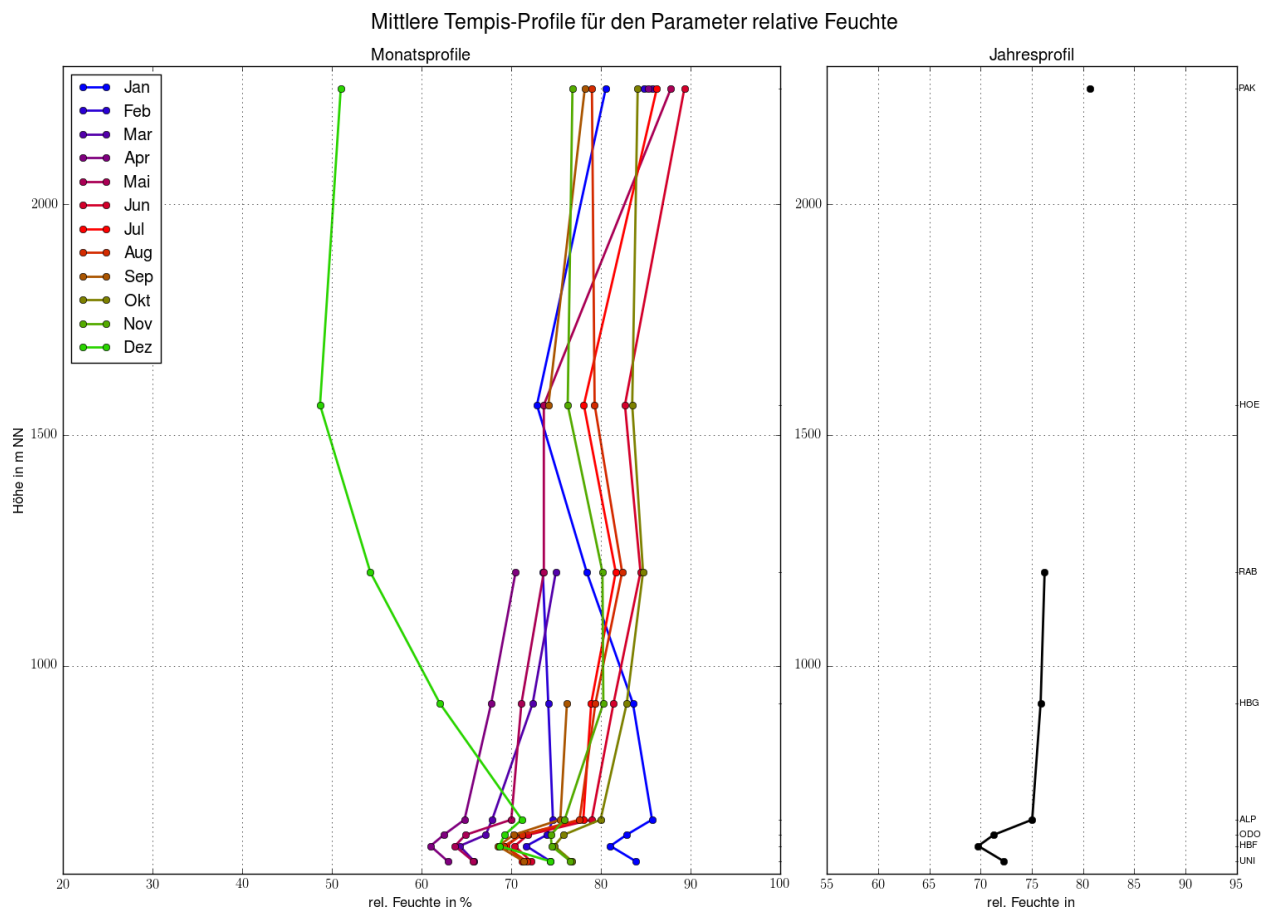


Abbildung 6: Vertikalprofile der relativen Feuchte in % im Jahr 2016 im Monats- (links) bzw. Jahresmittel (rechts).

In der Talsohle ist der Tagesgang stärker ausgeprägt als in höheren und (abseits der Feuchtequelle) allgemein trockeneren Niveaus. Dies lässt sich bereits aus dem Vergleich der Stationen Hauptbahnhof und Höttinger Alm in Abbildung 7 erkennen. Tagsüber ist es durch die Temperaturzunahme sowie die vertikale Durchmischung mit höheren (d.h. trockeneren) Schichten trockener als nachts. Maßgeblich für die Muster sind Stabilität der Atmosphäre (Vertikaltransport) und Wetterlagen (Horizontaltransport).

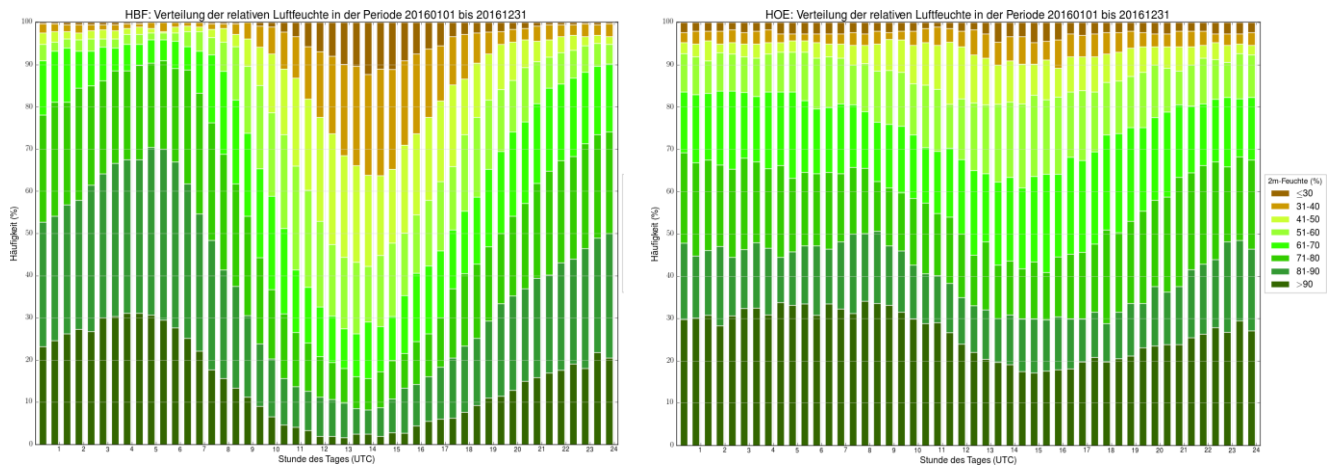


Abbildung 7: Tagesgang der Häufigkeitsverteilung der relativen Feuchte am Hauptbahnhof (links) und auf der Höttinger Alm (rechts) im Jahr 2016.

## 5. 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.

### 5.1 Windrichtung

Am Talgrund spiegelt die Verteilung der Windrichtungen an den verfügbaren Messstationen die Ausrichtung der Achse des Inntals in der Umgebung von Innsbruck (WSW nach ONO) wider, wie beispielsweise an der Station Olympisches Dorf in Abbildung 8 links zu sehen ist. Im Jahresschnitt ist dabei der taleinwärts gerichtete Wind (aus ONO) häufiger und stärker als der talauswärts gerichtete Wind. Am Patscherkofel dominieren dagegen die beiden Richtungen Nord und Süd. Letztere tritt am häufigsten auf, meist werden dabei Windgeschwindigkeiten von 7 m/s überschritten (Abbildung 8 rechts).

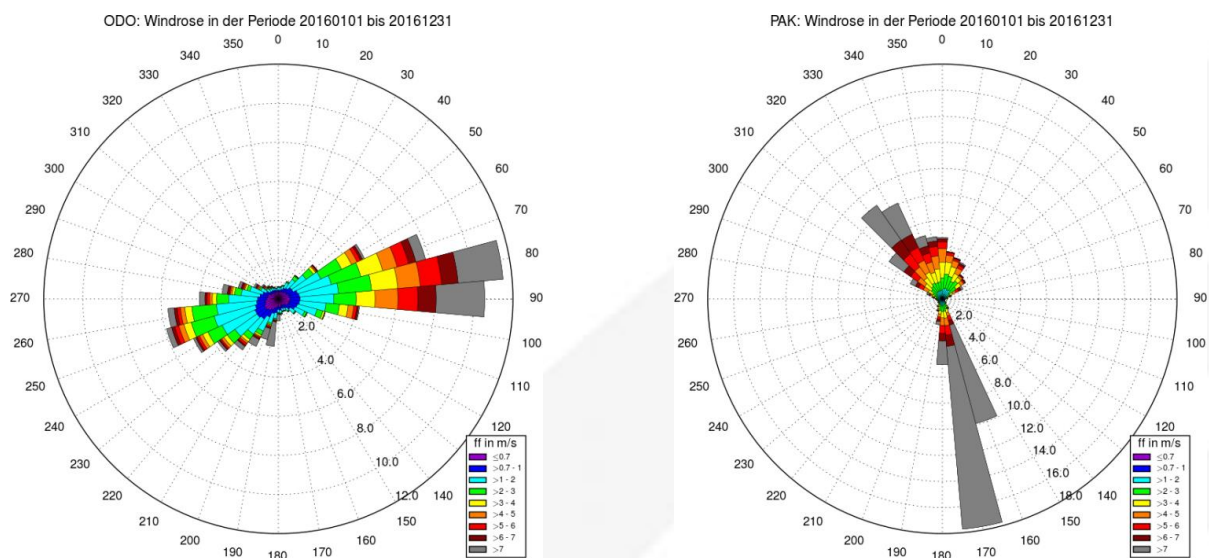


Abbildung 8: Windrosen mit Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und Farbskalierung der dabei auftretenden Geschwindigkeit für das Jahr 2016 für die Stationen Olympisches Dorf (links) und Patscherkofel (rechts).



## 5.2 Windgeschwindigkeiten: 10 Minuten Mittelwind

Im Monats- bzw. Jahresmittel sind die mittleren Windgeschwindigkeiten an den Stationen am Talgrund gering und liegen zwischen 1.2 und 4.3 m/s. Am Patscherkofel ist der Wind wesentlich stärker, der Jahresmittelwert liegt hier bei 6.9 m/s, das höchste Monatsmittel wurde mit 10.6 m/s im Feber erreicht (vergleiche Tabelle 6).

NAME	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
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 6: Monats- und Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s an den Stationen mit Windmessung.

In Tabelle 7 sind die drei stärksten, voneinander unabhängigen Windereignisse jeder Station gelistet. Sieht man vom Patscherkofel ab, sind die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten mit 72 bis 77 km/h auf dem Hochhausturm im Olympischen Dorf bei Wind aus südlicher Richtung aufgetreten. Am „schwächsten“ ist der Wind in der Stadt an der Universität.

	FLH			UNI			HBF			ODO			PAK		
	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd	Datum	ff	dd
1.	25.06.	19.6	269	23.02.	12.7	334	25.06.	12.7	243	09.02.	21.5	183	21.11.	37.7	168
2.	13.04.	18.8	262	06.02.	10.3	187	23.05.	11.9	248	18.11.	21.2	187	09.02.	37.5	164
3.	21.11.	16.0	147	15.01.	10.3	288	13.04.	11.9	247	07.02.	20.1	190	07.02.	36.7	165

Tabelle 7: Datum, Windgeschwindigkeit im 10-Minutenmittel (ff, in m/s) und Windrichtung (dd, in Grad) der jeweils drei stärksten Ereignisse im Jahr 2016.

## 5.3 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). Dieser Schwellenwert wurde im Jahr 2016 am häufigsten (abgesehen vom Patscherkofel) im Olympischen Dorf überschritten, nämlich an 194 verschiedenen Tagen oder zu 8.7 % des Gesamtzeitraums, gefolgt vom Flughafen mit 130 Tagen oder 4.8 % des Gesamtzeitraumes. An den Stationen Hauptbahnhof und Innsbruck Uni wurden die 6 Beaufort an jeweils 119 Tagen überschritten. Auf den Gesamtzeitraum bezogen, war dies am Hauptbahnhof zu 6.1 %, an der Uni ‚nur‘ zu 4.5 % der Fall.

Kritischer für Schadereignisse ist der Schwellenwert von 8 Beaufort (= 17.2 m/s), er tritt naturgemäß deutlich seltener auf. Im Olympischen Dorf war dies an 48 Tagen (2.2 % der Gesamtzeit) der Fall, am Flughafen an 43 Tagen (0.7 %), am Hauptbahnhof an 39 Tagen (0.7 %) und an der Uni an 34 Tagen (0.6 %).

In Tabelle 8 sind die drei stärksten, voneinander unabhängigen Böenereignisse jeder Station gelistet. Als Spitzenböe 2016 wurde am Flughafen 110 km/h im Zusammenhang mit einem Gewitter am 30. Juni beobachtet. An der Uni brachte stürmischer Südföhn am 9. Februar eine Böe von 98 km/h. Am selben Tag wurden auch die höchsten Böen am Hochhausdach des

Olympischen Dorfes mit 121 km/h und am Patscherkofel mit 159 km/h gemessen. Am Schlauchturm der Berufsfeuerwehr nahe dem Bahnhof trat die stärkste Windböe mit 93 km/h bei einem Südföhnereignis am 13. Oktober auf.

	FLH			UNI			HBF			ODO			PAK		
	Datum	ffx	ddx	Datum	ffx	ddx	Datum	ffx	ddx	Datum	ffx	ddx	Datum	ffx	ddx
1.	25.06.	30.6	282	09.02.	27.3	160	13.10.	25.7	192	09.02.	33.6	184	09.02.	44.2	162
2.	21.11.	29.0	152	02.07.	23.9	289	06.02.	23.9	153	21.11.	30.2	179	21.11.	43.8	166
3.	13.04.	26.6	273	06.02.	23.7	174	18.11.	23.5	178	16.04.	29.5	197	07.02.	43.7	166

Tabelle 8: Datum, Windgeschwindigkeit der 2-Sekunden Böe (ffx, in m/s) und Windrichtung (ddx, in Grad) der jeweils drei stärksten Ereignisse im Jahr 2016.

### 5.3 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 häufigsten sind Kalmen mit knapp 23 % am Flughafen, am seltensten erwartungsgemäß am Patscherkofel (2.4 %). Dass am Hauptbahnhof mit 17 %, bzw. im Olympischen Dorf mit 18 % Kalmen seltener als am relativ frei liegenden Flughafen sind, dürfte einerseits an der Höhe des Windsensors über Grund liegen<sup>5</sup> und andererseits daran, dass sich die Stadt mehr im Einflussbereich des Wipptals mit Föhn und nächtlichem Ausfließen befindet als der Flughafen.

Je länger die Kalmendauer, umso größer ist die Auswirkung auf die Schadstoffkonzentration. Im Jahr 2016 liegt die längste Kalmendauer in der Klasse 6.5 bis 12 Stunden, am häufigsten wurden diese am Flughafen (4 mal) und im Olympischen Dorf (3 mal) registriert. An der Universität trat diese Klasse nur 1 mal auf, am Hauptbahnhof und auf dem Patscherkofel nie. Tabelle 9 enthält die Übersicht zur Kalmen-Auswertung.

HMW-DAUER		ANZAHL PERIODEN				
VON	BIS	FLH	UNI	HBF	ODO	PAK
1	2	1676	1628	1345	1460	279
3	6	403	321	281	277	20
7	12	36	26	27	28	1
13	24	4	1	0	3	0
25	48	0	0	0	0	0
49	INF	0	0	0	0	0
SUMME DER HMW		4027	3496	2964	3145	426

Tabelle 9: Häufigkeit verschiedener Klassen der Kalmendauer und Summe aller Halbstundenmittelwerte (HMW) an den verfügbaren Windstationen im Jahr 2016. Bei Kalmen liegt der HMW unter 0.8 m/s.

<sup>5</sup> 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.

## Literatur

**Thudium, J. und Chélala, C., 2015:** *Zur Entwicklung der Häufigkeit atmosphärischer Inversionen im Alpenraum 1997 – 2014.* Oekoscience AG.

**Thudium, J. und Chélala, C., 2017:** *Stickoxidimmissionen und Klima im Tiroler Unterinntal, Entwicklung 2010-2016.* Oekoscience AG.

**Zeni, V., 2016:** *Inversionsbestimmung im Inntal anhand von zwei Hangprofilen.* Bachelorarbeit an der Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Juli 2016.

