

Einfluss von Föhn auf Schadstoffbelastung in Innsbruck

David Plavcan

Abteilung Waldschutz – Fachbereich Luftgüte

August 2012

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird untersucht, wie Föhn in Innsbruck die Schadstoffkonzentrationen von NO, NO₂, O₃ und PM10 beeinflusst. Dabei werden zunächst zwei Südföhnfälle und ein Nordföhnereignis genauer betrachtet. Anschließend wird die statische Abhängigkeit der Schadstoffkonzentrationen in Innsbruck von Windgeschwindigkeiten bei Föhn mit anderen Windereignissen verglichen.

Dazu wurden objektive Föhnklassifikationen verwendet, mit denen der Zeitraum vom 1.1.2006 bis 1.7.2012 nach allen Nord- und Südföhnfällen durchsucht wurde.

Es wurde gefunden, dass Föhn im Sommerhalbjahr nahezu keinen Einfluss auf die Schadstoffe von NO, NO₂ und PM10 nimmt, während im Herbst und Winter Föhndurchbrüche in Innsbruck stets zu einem deutlichen Rückgang dieser Schadstoffkonzentrationen führen. Bei Ozon bewirkt Föhn stets eine Erhöhung der Konzentration, wobei der Einfluss hierbei ebenfalls im Winterhalbjahr deutlich stärker ausgeprägt ist.

Höhere Windgeschwindigkeiten führen – mit Ausnahme von O₃ – im Winterhalbjahr allgemein zu einer Abnahme der Schadstoffkonzentrationen. Bei Föhn ist die Windgeschwindigkeitsabhängigkeit sehr schwach oder gar nicht ausgeprägt, da bei Föhn Absinken immer zu guter Durchmischung und Ausräumung der bodennah produzierten Schadstoffe führt.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Inhaltsverzeichnis	2
1 Einleitung	3
1.1 Motivation und Zielsetzung	3
1.2 Föhndefinition und potentielle Temperatur	3
1.3 Föhntheorie	4
2 Methode	6
2.1 Datengrundlage	6
2.1.1 Stationsdaten	6
2.1.2 Sonstige Daten	7
2.2 Föhnklassifikation	8
2.2.1 Südföhn nach Föst (2006)	8
2.2.2 Nordföhn nach Haas (2006)	8
3 Fallstudien	10
3.1 Südföhn 2. bis 9. November 2011	10
3.1.1 Synoptische Entwicklung	10
3.1.2 Wetter- und Schadstoffsituation im Raum Innsbruck	11
3.2 Südföhn 14. Juli 2010	15
3.2.1 Synoptische Entwicklung	15
3.2.2 Wetter- und Schadstoffsituation im Raum Innsbruck	15
3.3 Nordföhn 16./17. Dezember 2011 (Orkantief Joachim)	16
3.3.1 Synoptische Entwicklung	16
3.3.2 Wetter- und Schadstoffsituation im Raum Innsbruck	17
3.4 Überprüfung der automatischen Föhnklassifikation	19
4 Statistische Auswertung	20
5 Diskussion und Schlussfolgerungen	24
Literatur	25
Danksagung	26

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Der Innsbrucker Raum ist aufgrund seiner besonderen Lagen nördlich der niedrigsten Passverbindung über dem Alpenhauptkamm (Brenner; 1373 m Seehöhe) besonders vom Südföhn geprägt. Die relative Föhnhäufigkeit beträgt über 20% im nördlichen Wipptal, 6% an der Station Innsbruck–Universität und 5% an der Station Innsbruck–Flughafen (Föst 2006). Zusätzlich tritt Nordföhn mit einer relativen Häufigkeit von 0.7% an der Universität und 1.3% am Flughafen auf (Haas 2006). Somit weht im Mittel etwa 7% des Jahres Föhn in Innsbruck, und zu etwa 15% ist Innsbruck durch den Föhn im Wipptal beeinflusst.

Aufgrund dieses relativ häufigen Auftretens von Föhn wird vermutet, dass sich dieser positiv auf die Luftqualität in Innsbruck auswirkt. Dies soll in dieser Arbeit überprüft werden, indem zunächst einige Fallstudien betrachtet werden und schließlich eine statistische Auswertung durchgeführt werden soll. Dabei soll auch untersucht werden, inwiefern sich der Einfluss von Föhn auf die Schadstoffkonzentrationen von anderen Windereignissen unterscheidet.

1.2 Föhndefinition und potentielle Temperatur

Die aktuelle Definition von Föhn wurde 1992 von der World Meteorological Organisation (WMO) erstellt und lautet:

Föhn ist ein Wind, der im Allgemeinen auf der Leeseite von Gebirgen auftritt und dabei durch Absinken wärmer und relativ trockener wird.

Beim Absinken im Lee von einem Gebirge findet eine (trocken)adiabatisch Erwärmung¹ der Luft durch Kompression statt. Dabei bleibt der absolute Wassergehalt der Luft konstant, da aber die Luft wärmer wird und dadurch mehr Wasser "aufnehmen" kann, sinkt dabei die relative Luftfeuchtigkeit.

Bei trockenadiabatischen Prozessen bleibt die sogenannte *potentielle Temperatur* θ erhalten und wird deshalb bei der Beschreibung von Föhn verwendet. Die potentielle Temperatur ist definiert als

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_d}{c_p}} \quad (1)$$

wobei T die Temperatur in Kelvin, p der Luftdruck in hPa, $p_0 = 1000 \text{ hPa}$ Standarddruck, $R_d = 287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ die Gaskonstante für trockene Luft und $c_p = 1004.67 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ist. Somit gibt die potentielle Temperatur die Temperatur an, welche ein Luftpaket nach trockenadiabatischem Absinken auf dem 1000 hPa Niveau erreichen würde. Dadurch lassen sich Temperaturen aus unterschiedlichen Höhen vergleichen. Bei Durchmischung haben alle Stationen die gleiche potentielle Temperatur. Linien mit konstanter potentieller Temperatur heißen Isentropen.

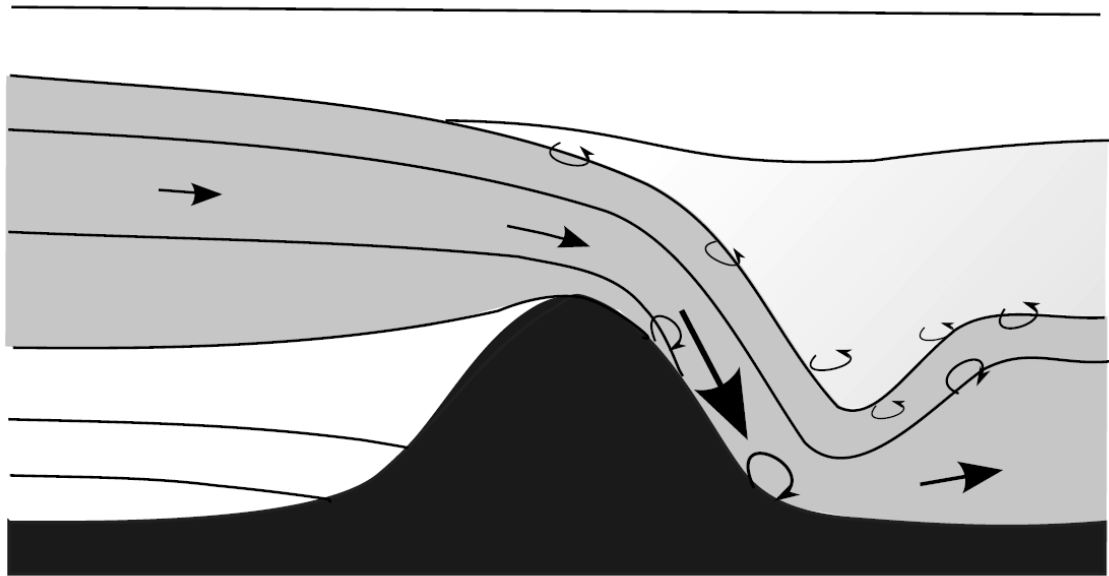


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Föhn mit Querschnitt entlang eines Gebirges. Links befindet sich die Luvseite, rechts das Lee. Eingezeichnet sind Isentropen entlang denen sich die Luft bewegt. Die Föhnströmung ist dabei grau eingezeichnet. (Übernommen aus (Jackson et al. 2012))

1.3 Föhntheorie

In Abb. 1 ist der Föhn schematisch dargestellt. Die Föhnströmung kommt dabei etwa aus Kammniveau und sinkt im Lee bis zum Boden ab, wobei sie beschleunigt und turbulent durchmischt wird. Im Luv ist dabei die Luft stabil geschichtet, weshalb auch die kältere Luft aus tieferen Schichten des Gebirge nicht überströmen kann. Die landläufig verbreitete Meinung, dass bei Föhn die Luft im Luv aus den Tälern feuchtadiabatisch über den Gebirgskamm aufsteigt, ist falsch. In vielen Fällen gibt es sogar keinen Niederschlag. Die antreibende Kraft ist nicht nur die synoptischskalige Anströmung, sondern hauptsächlich der Druckgradient, welcher zum einen Teil aus dem synoptischen Druckgradienten, zum anderen – wesentlich wichtigeren Teil – aus unterschiedlichen temperierten Luftmassen, welche durch das Gebirge getrennt werden besteht. Dabei drückt die kältere Luft mit der größeren Dichte in Richtung der Wärmeren. Die Erwärmung in den Tälern wird also nicht dadurch bewirkt, dass eine wärmere Luftmasse advehiert wird, sondern durch die relativ hoch reichende Durchmischung.

Nach aktueller Föhnforschung unterscheidet man zwischen zwei Arten von Föhn, dem *seichten* ("gap flow") und *hochreichenden* Föhn (Gohm and Mayr 2004). Bei seichtem Föhn reicht die Föhnströmung nicht über den Hauptkamm, sondern strömt nur durch die Pässeinschnitte. Dieser Typ wird nur von Temperatur- und Druckgradienten angetrieben. Bei hochreichendem Föhn sorgt zusätzlich zu diesen Gradienten eine quer zu dem Gebirge gerichtete synoptische Strömung dafür, dass die Luft auch den Hauptkamm überströmt.

Im Innsbrucker Raum gibt es aufgrund des tiefen Brennereschnittes häufig die

¹trockenadiabatische Prozesse sind Vorgänge, bei denen keine Wärme hinzugefügt wird

seichte Variante des Föhns. Bei hochreichen Föhn gibt es eine Mischung aus beiden Typen, da immer ein Teil der Strömung über die Brennersenke fließt.

2 Methode

2.1 Datengrundlage

2.1.1 Stationsdaten

Für diese Arbeit wurden Daten verschiedener Stationsbetreiber verwendet. Eine Übersicht aller Stationen zeigt die Tabelle 1. Für die meteorologischen Parameter wurden die teilautomatischen Wetterstationen (TAWES) des IMG¹ und der ZAMG² verwendet. Die Daten der ZAMG lagen bereits in 10 Minuten Mittelwerten vor, welche sich jeweils zum Termin auf die vergangenen 10 Minuten beziehen. Die Daten des IMG¹ lagen in Einminuten Intervallen vor, aus denen die 10 Minuten Mittelwerte berechnet wurden. Die Stationsdaten vom Land Tirol lagen als Halbstundenmittelwerte vor, welche sich auf die vergangene halbe Stunde beziehen. An den Stationen des IMG¹ und der ZAMG wurden die potenziellen Temperaturen berechnet, welche für die Föhnanalysen nötig sind. Die Standorte aller verwendeten Stationen sind in Abb. 2 zu sehen.

Als Referenzstationen wurden Innsbruck–Universität für die meteorologische Werte und die Station Innsbruck–Fallmerayerstraße für Schadstoffmessungen ausgewählt, da diese Stationen mit 700 m horizontaler Entfernung sehr nah beieinander liegen. Eine geringe Distanz zwischen der meteorologischen Station und Schadstoff Station ist wichtig, damit die Schadstoffkonzentrationen mit meteorologischen Wer-

¹Institut für Meteorologie und Geophysik

²Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Station	geo. Breite [Grad]	geo. Länge [Grad]	Seehöhe [m]	Parameter	Eigen- tümer
Innsbruck– Universität	47.259	11.384	580	T,rF,p,ff,fx,dd	IMG ¹
Ellbögen	47.188	11.429	1080	T,rF,p,ff,fx,dd	IMG ¹
Sattelberg	47.011	11.479	2108	T,rF,p,ff,fx,dd	IMG ¹
Patscherkofel	47.123	11.274	2247	T,rF,p,ff,fx,dd	ZAMG
Brenner	47.007	11.508	1373	T,rF,p,ff,fx,dd	ZAMG
Reutte	47.494	10.715	843	T,p	ZAMG
Innsbruck– Fallmerayer.	47.2626	11.3924	577	NO _x ,PM10	LAND
Innsbruck– Andech.	47.2713	11.4169	570	O ₃	LAND
Nordkette	47.3056	11.3760	1958	O ₃	LAND
Sadrach	47.2699	11.3747	678	T,rF,ff,dd	LAND

Tabelle 1: Geographische Lage, Seehöhe, gemessene Parameter (T = Lufttemperatur, rF = relative Feuchte, ff = mittlere Windgeschwindigkeit, fx = Windböe, dd = Windrichtung, p = Luftdruck, NO_x = Stickstoffmonoxid und -dioxid, O₃ = Ozon, PM 10 = Feinstaub) und Eigentümer (IMG¹ = Institut für Meteorologie und Geophysik Innsbruck, ZAMG = Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, LAND = Land Tirol) der verwendeten Stationen.

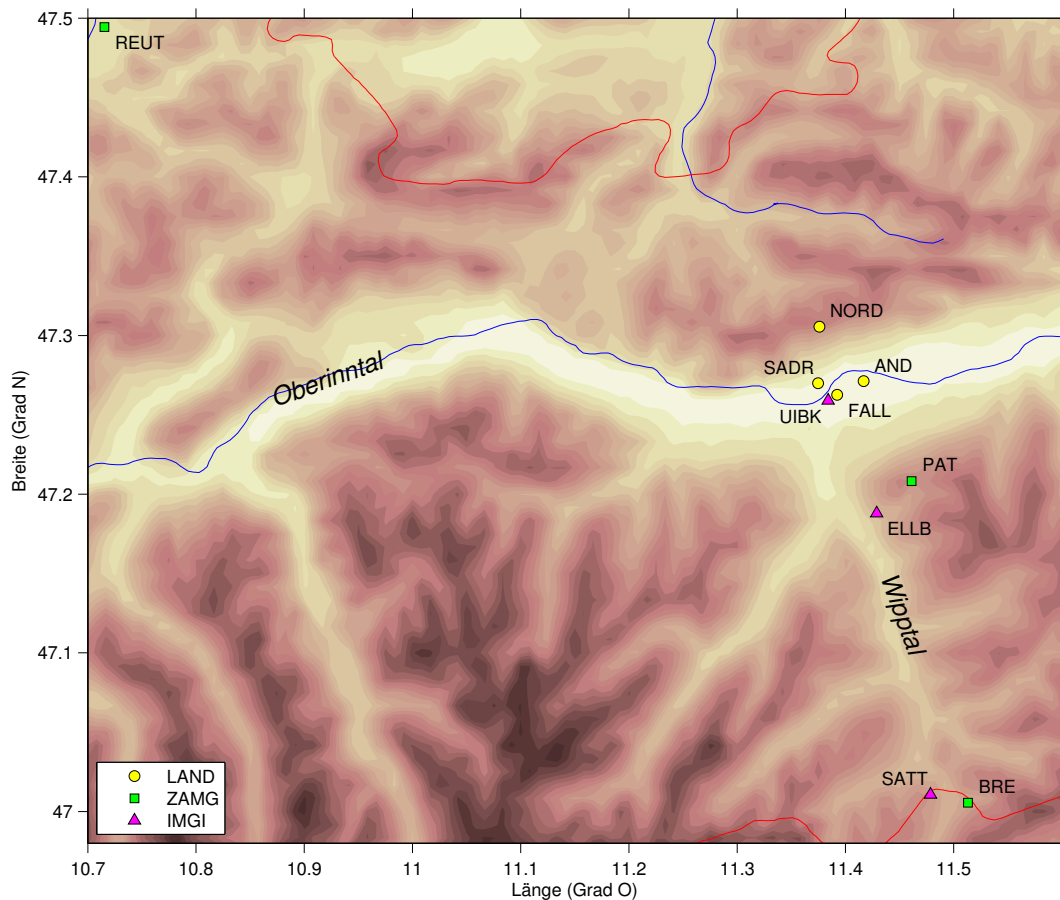


Abbildung 2: Übersichtskarte aller verwendeten Stationen. Dargestellt sind im Hintergrund Topographie, Flüsse (blau) und Tiroler Landesgrenzen (rot). Eingezeichnet sind alle Stationen unterteilt nach Betreiber, wobei die Stationen vom Land Tirol gelb (LAND), von der ZAMG grün und des IMG magenta markiert sind. Dabei beschreiben die Abkürzungen folgende Stationen: AND = Innsbruck–Andechstraße, FALL = Innsbruck–Fallmerayerstraße, SADR = Sadrach, NORD = Nordkette, BRE = Brenner, REUT = Reutte, PAT = Patscherkofel, ELLB = Ellbögen, SATT = Sattelberg und UIBK = Innsbruck–Universität.

ten, welche Aufschluss über Föhn geben verglichen werden können.

2.1.2 Sonstige Daten

Zusätzlich zu diesen Stationsdaten wurden zur Analyse der Wetterlagen Bodewetterkarten des Deutschen Wetterdienstes und Wetterkarten mit Satellitenbildern der ZAMG verwendet. Vertikalsondierungen des Innsbrucker Flughafens (jeweils um 03 UTC) wurden herangezogen³, um die vertikale Schichtung zu analysieren. Die vom Land Tirol archivierten Webcamaufnahmen in 10 Minuten Intervallen wurden verwendet um bei den Fallstudien die Bewölkungs- und Wetterverhältnisse im Inntal zu darzustellen.

³Quelle: University of Wyoming

2.2 Föhnklassifikation

Um Auswertungen der Schadstoffe bei Föhn vorzunehmen, müssen die Zeitpunkte bei denen Föhn in Innsbruck geweht hat, gefunden werden. Diese Suche wird mit Hilfe von objektiven Föhnklassifikation durchgeführt.

2.2.1 Südföhn nach Föst (2006)

Zur Analyse von Südföhn wird in dieser Arbeit die objektive Föhnklassifikation von Föst (2006) angewandt. Föst hat in seiner Arbeit Wind – und θ – Kriterien entwickelt, anhand denen sich automatisch Föhnereignisse in Ellbögen und Innsbruck finden lassen.

Das θ – Kriterium beruht auf dem physikalischen Prinzip der Durchmischung. Beim Absinken der Föhnströmung vom Alpenhauptkamm ins Tal erwärmt sich die Luft trockenadiabatisch (Ausnahme Dimmerföhn). Somit müssen Tal – und Bergstation die gleiche potentielle Temperatur haben. Da aber bei Südföhn auch potentiell kältere Luft durch den Brenneinschnitt nach Innsbruck strömt, kann eine vollständige Durchmischung mit Patscherkofel selten erreicht werden (hochreichender Föhn). Deshalb hat sich eine Differenz von -3.8 K zwischen Berg- und Talstationen als das am besten geeignete θ – Kriterium für die Referenzstation Patscherkofel herausgestellt (Föst 2006).

Die Windkriterien wurden mit der jeweiligen mittleren Windrichtung und einer Abweichung definiert:

Station	Mittlere Windrichtung [Grad]	Erlaubte Abweichung [Grad]
Innsbruck (UNI)	187	+63/ – 167
Ellbögen	137	+45/ – 45
Patscherkofel	163	+40/ – 40

Tabelle 2: Windkriterien der Referenz- und Talstationen bei Südföhn (Föst 2006)

Als Mindestwindgeschwindigkeit wurden für Innsbruck 2 m s^{-1} eingeführt. In Innsbruck gibt es bei den Windrichtungen besonders große Abweichungen (siehe Tab. 2), da es bei Rotorföhn auch zu nördlichen Windrichtungen kommen kann. Wegen diesen großen Abweichungsbereich ist besonders im Sommer die Unterscheidung zwischen Taleinwind und Föhn schwierig. Deshalb ist das Windkriterium von Ellbögen nötig, wodurch nur Föhn klassifiziert wird, falls Ellbögen Südwind hat. Es gibt allerdings auch Fälle, bei denen Ellbögen Südwind hat und in Innsbruck trotzdem Einfließen vorherrscht. Nach Föst (2006) sind aber solche Fälle selten.

Für die Südföhnanalyse in Ellbögen wurde die Föst (2006) Klassifikation von Strobl (2009) etwas verbessert. Dabei wurde die mittlere Windrichtung bei Föhn in Ellbögen aus Tab. 2 auf 133 Grad geändert. Ferner wurde eine Mindestwindgeschwindigkeit für Ellbögen von 2.4 m s^{-1} festgelegt. Die Grenzwerte für die θ – Kriterien wurden auf $+0.5\text{ K}$ zum Brenner und -1.8 K zum Sattelberg festgelegt.

2.2.2 Nordföhn nach Haas (2006)

Haas (2006) hat sich in seiner Arbeit mit Nordföhn in Innsbruck beschäftigt und eine Nordföhnklassifikation erstellt. Dabei gibt es im Gegensatz zur Südföhnklassifikation

kein θ – Kriterium, da eine geeignete Referenzstation fehlt und da bei Nordföhn häufig keine trockenadiabatische Durchmischung mit den Bergstationen hergestellt ist, weil diese bei Nordföhnlagen oft in Wolken liegen (Haas 2006).

Die Windkriterien wurden hierbei nicht nur durch Windrichtungen festgelegt, sondern jeweils auch stationsspezifische Mindestwindgeschwindigkeiten definiert:

Station	Windgeschwindigkeit [m s ⁻¹]	Windrichtung [Grad]
Sattelberg	≥ 5.1	340 – 20
Ellbögen	≥ 3.2	305 – 357
Innsbruck (UNI)	≥ 2.7	211 – 309

Tabelle 3: Windkriterien für Nordföhn (Haas 2006)

Wie in Tabelle 3 dargestellt, weht bei Nordföhn in Innsbruck der Wind überwiegend aus westlichen Richtungen, was auch die Windrichtungen bei thermischen Talauswind entspricht. Um diesen auszuschließen, hat Haas (2006) ein Luftdruckkriterium eingeführt. Da bei Nordföhn der höhere Druck nördlich von Innsbruck vorhanden sein muss, hat er definiert, dass der Luftdruck in Garmisch um mindestens 0.1 *hPa* höher sein muss als in Innsbruck. Da es nicht möglich war, diese Stationsdaten für diese Arbeit rechtzeitig zu beschaffen, wurde als Ersatz die Station in Reutte mit ähnlicher topographische Lage verwendet.

3 Fallstudien

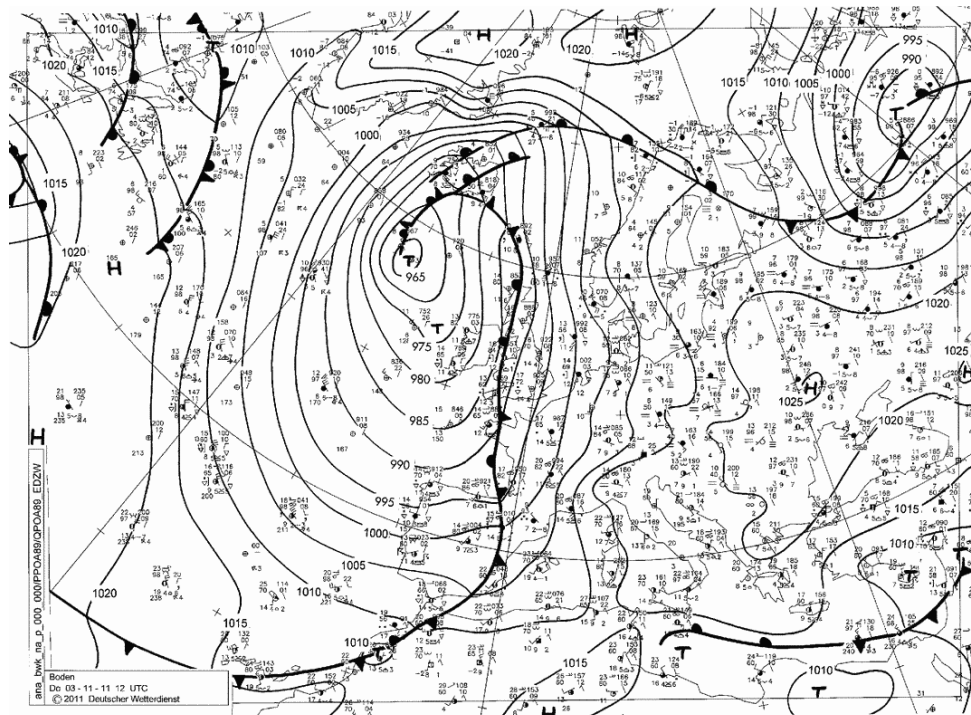
Zunächst sollen einige Fallbeispiele für Süd- und Nordföhn in Innsbruck betrachtet werden. Anhand dieser Fälle werden die beiden Föhnwinde in Innsbruck erklärt und ihr Einfluss auf die Luftgüte betrachtet.

3.1 Südföhn 2. bis 9. November 2011

Im Zeitraum vom 2. bis 9. November hat sich über den Ostalpenraum eine anhaltenden Südföhnwetterlage eingestellt, nachdem zuvor ein Hochdruckgebiet dominant war. In dieser Fallstudie sollen die ersten drei Tage dieser Föhnperiode untersucht werden, da hierbei der Übergang von einer herbstlichen stabilen Hochdruckwetterlage zum gut ausgeprägt Föhn betrachtet werden kann. Abschließend soll auch kurz das Verhalten der Schadstoffe nach Föhnende betrachtet werden.

3.1.1 Synoptische Entwicklung

Am 2. November befanden sich die Ostalpen noch an der Ostflanke des über Russland liegenden Hochs, während sich vom Atlantik langsam ein Tief mit einem umfangreichen Frontensystem näherte. Dessen Kaltfront erstreckte sich von Irland bis zur portugiesischen Westküste. An der Vorderseite wurden mit der südlichen Strömung warme Luftmassen bis nach Skandinavien transportiert. In Tirol nahm an den Bergstationen die südliche Anströmung langsam zu und um 17:20 UTC setzte Südföhn in Ellbögen ein, welcher dort bis zum 9. November 11 UTC durchgeweht hatte. Somit stand der 2. November zunächst noch unter Hochdruckeinfluss.



Am 3. November ist das Tief nahezu stationär über dem Nordostatlantik geblieben, wobei es sich noch etwas vertiefen konnte. Die Kaltfront hat Spanien nahezu vollständig überquert und erreichte um 12 UTC die Pyrenäen (siehe Abb. 3). Über Westfrankreich verwellte sich die Kaltfront und blieb nördlich von Frankreich nahezu stationär liegen. Über den Alpenraum verstärkte sich dabei der Druckgradient, wodurch der Föhn an Stärke gewinnen konnte, und am Abend Sturmstärke am Patscherkofel erreichte.

Am 4. November hat sich über den südlichen Pyrenäen ein Randtief gebildet, welches dafür sorgte, dass die Front welche schon Westdeutschland erreicht hatte, rückläufig wurde, wodurch die Föhnsituation in den Alpen weiterhin aufrechterhalten geblieben ist.

3.1.2 Wetter- und Schadstoffsituation im Raum Innsbruck

Wie schon oben erwähnt, war der 2. November ein gewöhnlicher Strahlungstag mit gut ausgeprägtem Talwindsystem (siehe Abb. 4, erst in der folgenden Nacht setzte Föhn im Wipptal ein. Bis 13 UTC gab es Ausfließen in Innsbruck. Danach konnte sich für ca. 4 Stunden Einfließen etablieren, welches am Abend wieder vom Talauswind abgelöst wurde. Dabei ist auffällig, dass mit dem Taleinwind die Schadstoffkonzentrationen von PM₁₀ auf $40 \mu\text{g m}^{-3}$ und von NO₂ auf $100 \mu\text{g m}^{-3}$ zunahmen, obwohl während dieser Zeit die maximale Durchmischung mit Ellbögen erreicht werden konnte. Mit der Winddrehung auf Talauswind nahm die NO₂ Konzentration ab, während das Maximum der Feinstaubkonzentration erst um 20 UTC erreicht wurde. Beim NO wurden zwei Maxima erreicht. Nachdem das Erste am frühen Vormittag bei ca. $170 \mu\text{g m}^{-3}$ lag, nahm mit der zunehmend besserer Durchmischung diese Konzentration wieder ab, bevor am Abend mit der Stabilisierung ein zweites, etwas geringeres Maximum erreicht wurde. Anschließend passte sich die NO-Konzentration der von NO₂ an und nahm in weiterer Folge den identischen Verlauf wie NO₂. Deshalb wird infolge nur noch der Verlauf der NO₂ -Konzentration besprochen.

Mit zunehmendem Föhneinfluss setzte ab etwa 00 UTC verstärkter Talauswind in Innsbruck ein, der sogenannte *vorföhnige Westwind*. Dieser wird durch den bei Föhn stärkeren synoptischen Druckfall im Alpenvorland und dem Leetief nördlich des Patscherkofels verursacht. Der starke Westwind weht etwa zwischen Zirl und dem Osten von Innsbruck, wodurch konstant Kaltluft aus dem Oberinntal nach Innsbruck transportiert wird, während im Wipptal der Föhn bläst. Dadurch bildet sich in Innsbruck eine starke Inversion zwischen der aus dem Wipptal kommenden, relativ warmen und der deutlich kälteren Luft im Inntal aus (siehe Abb. 5). Dieser vorföhnige Westwind nahm bis etwa 10 UTC kontinuierlich an Stärke zu und erreichte in Böen eine Stärke von etwas über 10 m s^{-1} (siehe Abb. 4). Während dieser Phase nahmen die Schadstoffkonzentrationen zunächst ab. Allerdings ist am frühen Morgen des 3. Novembers eine Zunahme erkennbar, bei der beide Schadstoffe nochmals ein sekundäres Maximum erreichen. Die Ozonkonzentration begann in Innsbruck ab etwa 06 UTC anzusteigen, wobei sich dieser Anstieg zunehmend beschleunigte.

Um 11 UTC ist der Föhndurchbruch in Innsbruck sehr gut erkennbar (vergleiche Abb. 4: Der Wind drehte von West (250°) auf Süd (190°) und nahm deutlich an Stärke zu. Bei der potentiellen Temperatur erkennt man ebenfalls einen deutlichen

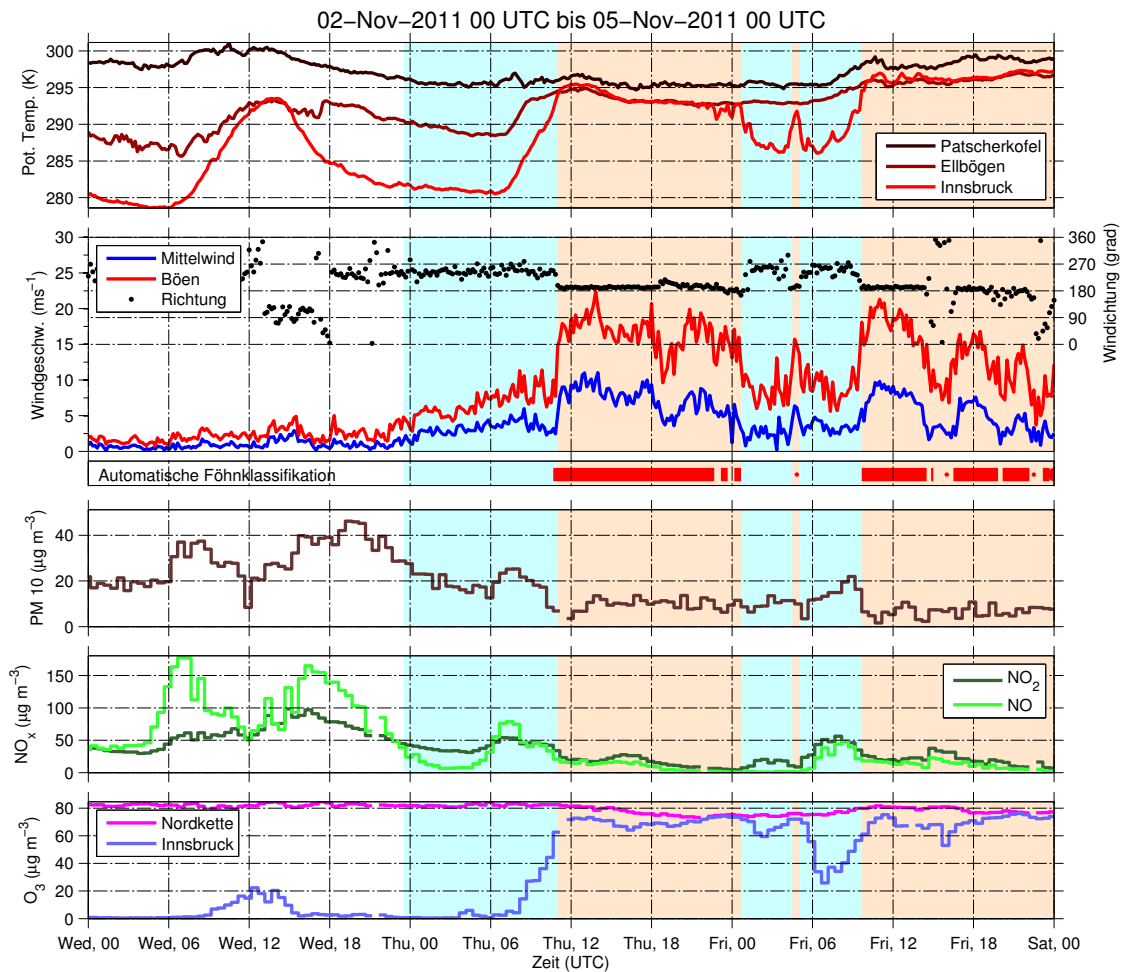


Abbildung 4: Zeitreihe der Föhn- und Schadstoffeentwicklung in Innsbruck vom 2. bis 5. November 2011. Im ersten Panel ist die potentielle Temperatur der Stationen Patscherkofel (schwarz), Ellbögen (braun) und Innsbruck (rot) eingezeichnet. Die zweite Box stellt die Windrichtung in Grad (schwarze Punkte), die mittlere Windgeschwindigkeit über 10 min (blaue Linie) und maximale Windböen (rot) in Innsbruck dar. Darunter sind die Perioden, welche mithilfe der Methode von Föst (2006) als Südföhn klassifiziert wurden rot dargestellt. Die drei untersten Achsen zeigen den Verlauf der Schadstoffkonzentration von Feinstaub (braun), NO (hellgrün), NO₂ (dunkelgrün) und O₃. Feinstaub und NO_x sind von der Station Fallmerayerstraße, Ozonwerte sind von der Station Andechsstraße (blau) und Nordkette (magenta). Die händisch ausgewerteten Perioden mit vorföhnigem Westwind sind hellblau, die mit Föhn in Innsbruck orange hinterlegt.

Anstieg. Diese gleicht sich der Temperatur von Ellbögen an, wodurch ersichtlich ist, dass Durchmischung hergestellt wurde und die Föhnluft bis nach Innsbruck absinken konnte. Die potentielle Temperatur vom Patscherkofel wurde nicht erreicht, da durch die Brennersenke potentiell kältere Luft aus tieferen Niveaus über das Wipptal nach Innsbruck gelangte. Mit dieser guten Durchmischung wird auch Ozon nach unten gemischt, was man an dem Angleichen des Ozongehaltes der Station Innsbruck an die Station Nordkette gut in Abb. 4 sieht. Die Konzentrationen von Feinstaub und NO₂ fallen mit dem Durchbrechen des Föhns deutlich ab.

Aufgrund der nächtlichen Auskühlung kann der Föhn im Inntal meist nicht die ganze Nacht über erhalten bleiben. Das Oberinntal westlich von Innsbruck, welches der Föhn meist nicht erreichen kann, kühlt nachts stark ab, während in Innsbruck

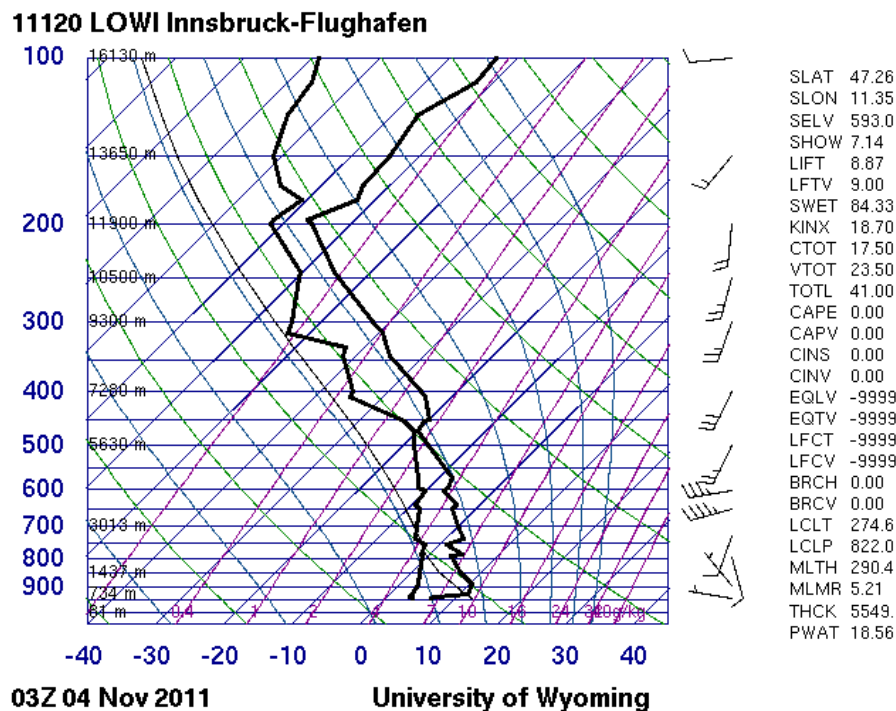


Abbildung 5: Radiosondenaufstieg vom 4. November 2011 03 UTC am Innsbrucker Flughafen im *Skew-T* Diagramm dargestellt. Dabei entsprechen die grünen Linien den Trockenadiabaten (Isentropen), die gekrümmten blauen Linien den Feuchtadiabaten, die geraden blauen Linien den Isothermen und die magenta Linien den konstanten Mischungsverhältnis (eine ausführlichere Erklärung zum *Skew-T* Diagramm findet man z.B. unter <http://www.wetteran.de/grundlagen/radiosondenaufstiege>). Eingezeichnet ist der vertikale Taupunkt- (linke Linie) und Temperaturverteilung (rechte Linie). Rechts geben Windfiedern Windrichtungen und -geschwindigkeiten an.

noch Föhn weht und die Temperatur somit nahezu konstant hoch bleibt. Hat sich im Oberinntal ausreichend mächtige Kaltluft aufgebaut, fließt diese auch nach Innsbruck, welche die unterste Luftschicht stabilisiert. Aufgrund dieser stabilen Schicht, kann die Föhnluft nicht mehr bis ins Inntal absinken und der Föhn hebt ab.

Dies kann man am 4. November um 01 UTC erkennen, als die Temperatur sprunghaft um 4 K gefallen ist, der Wind auf West gedreht hat und die Windgeschwindigkeit deutlich abgefallen ist (vergleiche Abb. 4). Nachdem der Föhn abgehoben ist, verweilen die Schadstoffkonzentrationen weiterhin auf konstant niedrigem Niveau. Gegen 4:30 UTC konnte der Föhn noch einmal vorübergehend durchbrechen, wonach es eine längere Föhnpause mit vorföhnige Westwind gab. Während dieser Föhnpause zeigen die Schadstoffkonzentrationen deutliche Veränderungen: Die Ozonkonzentration nahm von 80 auf $30 \mu\text{g m}^{-3}$ deutlich ab, während die NO_2 Konzentration von 10 auf $60 \mu\text{g m}^{-3}$ anstieg. Die Feinstaubbelastung nahm von 10 auf $20 \mu\text{g m}^{-3}$ zu. Nach dem Föhndurchbruch am späten Vormittag verhielten sich die Schadstoffkonzentrationen identisch wie am Vortag.

Dieses Verhalten setzte sich während dieser gesamten Föhnperiode fort: Während den Föhnphasen bewegen sich die PM_{10} Konzentrationen um $10 \mu\text{g m}^{-3}$ und die NO_2 Konzentrationen meist um $20 \mu\text{g m}^{-3}$. Während den längeren nächtlichen Föhnpausen in Innsbruck (*vorföhniger Westwind*) steigen die Konzentrationen auf 20 bzw.

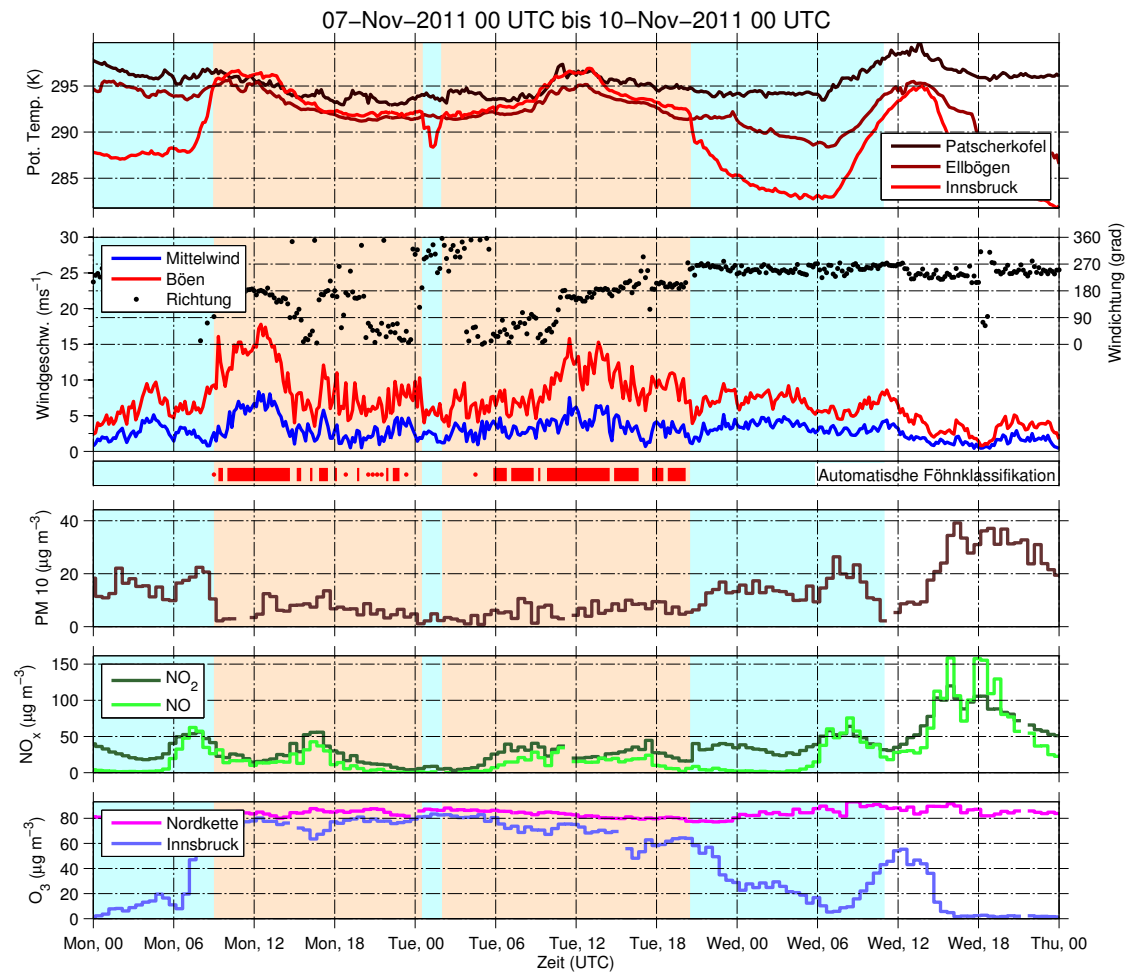


Abbildung 6: Zeitreihe der Föhn- und Schadstoffentwicklung in Innsbruck vom 7. bis 10. November 2011. Beschreibung siehe Abb. 4.

$50 \mu\text{g m}^{-3}$ an.

Am 8. November konnte der Föhn noch nahezu den gesamten Tag über in Innsbruck durchwehen. Am Vormittag erkennt man dabei für Südföhn etwas ungewöhnliche Windrichtungen überwiegend aus Nord. Dabei handelt es sich um den sogenannten *Rotorföhn*. Dabei reißt die Föhnströmung an der Kannte des Wipptals südlich von Innsbruck ab, und prallt an der Nordkette auf. Ein Teil der Strömung wird hierbei an der Nordkette nach unten abgelenkt und erreicht als Nordwind Innsbruck. Die Schadstoffkonzentrationen bewegen sich dabei auf den oben beschriebenen Niveaus. Nach 20 UTC hebt der Föhn in Innsbruck aufgrund der nächtlichen Auskühlung ab und es setzt vorföhniger Westwind ein.

Am 9. November haben sie die Druckgegensätze über Mitteleuropa abgebaut und das Hochdruckgebiet von Nordosteuropa hat seinen Einfluss wieder auf die Alpen genommen, womit auch auch im Wipptal der Föhn gegen 11 UTC aufhörte. Damit nahm auch der verstärkte Westwind in Innsbruck rasch ab. Mit dem Hochdruckeinfluss verlief dieser Tag anschließend als gewöhnlicher Strahlungstag. Mit Ende der Föhnlage ist ein deutlicher Anstieg der Schadstoffkonzentration erkennbar. Die Feinstaubkonzentration erreichte $40 \mu\text{g m}^{-3}$ und NO_2 etwas über $100 \mu\text{g m}^{-3}$.

3.2 Südfohn 14. Juli 2010

3.2.1 Synoptische Entwicklung

Der 13. Juli verlief wechselhaft mit Durchzug eines schwachen Frontensystems. Am 14. Juli hat sich in den Nordalpen vorübergehend eine Südfohnlage eingestellt. An der Vorderseite des Tiefdruckgebietes über Irland hat sich über Zentralfrankreich ein Randtief gebildet, welches im Alpenraum für verstärkte Südanströmung sorgte. Am Abend des 15. Juli ist die Kaltfront dieses Tiefdruckgebietes durchgezogen.

3.2.2 Wetter- und Schadstoffsituation im Raum Innsbruck

Um 10 UTC setzte Südfohn in Ellbögen ein, während im Inntal noch Taleinwind vorgeherrscht hatte. Mit weiterer Erwärmung konnte auch in Innsbruck der Föhn um 13:30 UTC durchbrechen, was an der Windddrehung von Ost auf Süd zu erkennen ist (vergleiche Abb. 7). Dabei bleiben die PM₁₀ und NO₂ Konzentrationen nahezu unverändert. Kurz nach 18 UTC drehte der Wind auf nordöstliche Richtungen bei weiterhin erhaltener Durchmischung mit Ellbögen, was auf Rotorfohn schließen lässt. Gegen 20 UTC hebt der Föhn in Innsbruck kurz ab (siehe in Abb. 7 Verlauf

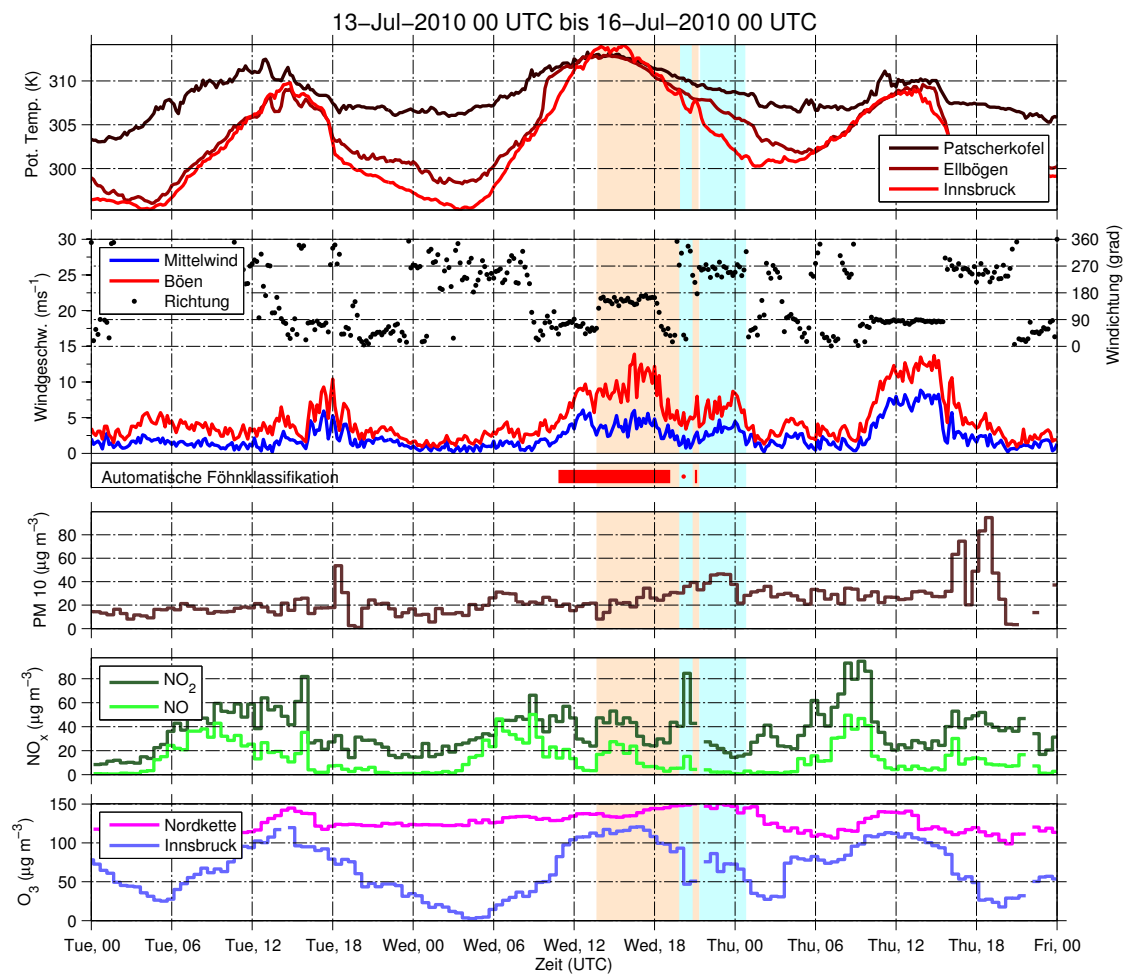


Abbildung 7: Zeitreihe der Föhn- und Schadstoffeentwicklung in Innsbruck vom 13. bis 16. Juli 2011. Beschreibung siehe Abb. 4 .

der potentiellen Temperatur). Während dieser kurzen Föhnpause ist eine markante Zunahme von NO_2 von 40 auf über $80 \mu\text{g m}^{-3}$ zu beobachten. Da der Föhn nur wenig höher noch weiterweht (an der Station Sadrach gab es diese Föhnpause nicht), ist die Inversion sehr seicht, und es konnte sich eine hohe NO_2 Konzentration in dieser dünnen Schicht rasch anreichern. Anschließend hat der Föhn für eine kurze Weile wieder den Talboden erreicht, womit diese Konzentration wieder an das vorhergehende Niveau gesunken ist. Um 21 UTC hob der Föhn endgültig ab und es setzte verstärkter Talauswind ein, wobei die PM 10 Konzentration leicht anstieg und der NO_2 Gehalt leicht abnahm. In Ellbögen ist der Föhn um 01 UTC am 15. Juli abgehoben, womit diese Föhnlage endete.

3.3 Nordföhn 16./17. Dezember 2011 (Orkantief Joachim)

3.3.1 Synoptische Entwicklung

Am 15. Dezember 2011 befand sich Nordtirol auf der Rückseite eines langsam nach Osten abziehenden Tiefdruckgebietes, während sich über dem Atlantik vor den Britischen Inseln schon das Orkantief Joachim stark entwickelte. Am Abend und in der ersten Nachthälfte nahm ein kleines Zwischenhoch Einfluss auf die Ostalpen, was für vorübergehendes Aufklaren sorgte. Am Morgen des 16. Dezember befand sich Joachim bereits über den Benelux Staaten und die Warmfront hat die Ostalpen erreicht. Aufgrund der hohen Nord-Süd Druckunterschiede setzte in den Ostalpen intensiver Südföhn ein (siehe Abb. 8). Am Abend erreichte Joachims Kaltfront die Nordalpen, womit die Anströmung von Süd auf Nord drehte und der Südföhn beendet wurde. Mit der starken Nordanströmung wurde sehr kalte Luft in den Alpenraum advehiert.

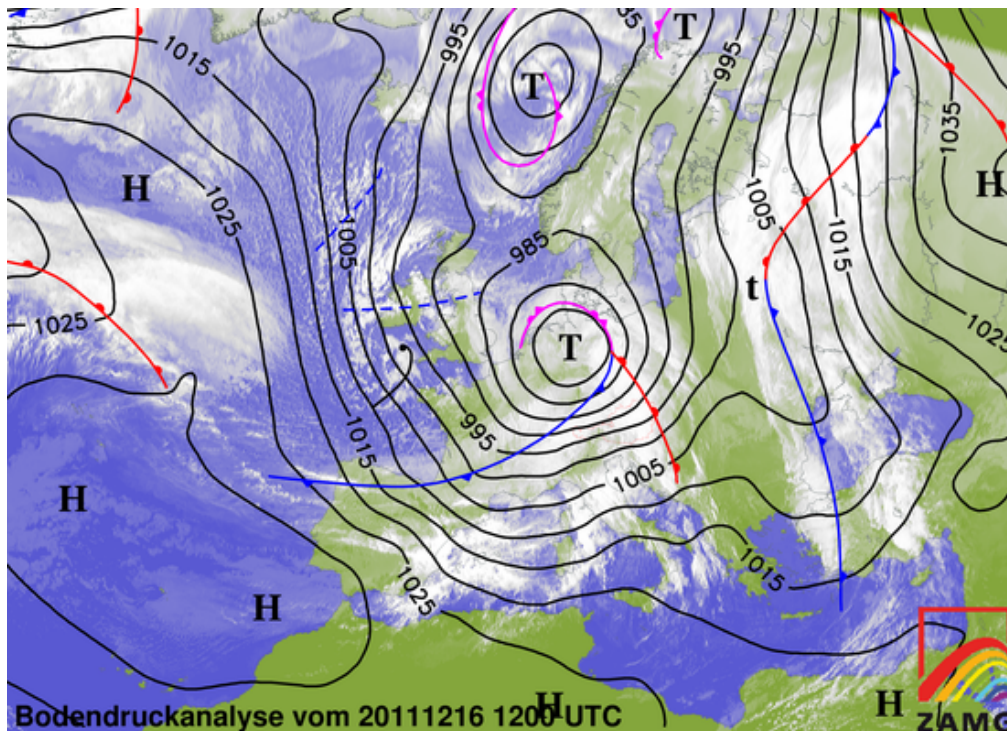


Abbildung 8: Wetterkarte der ZAMG vom 16. Dezember 2011 12 UTC mit Satellitenbild, Bodendruckfeld und Frontenanalyse.

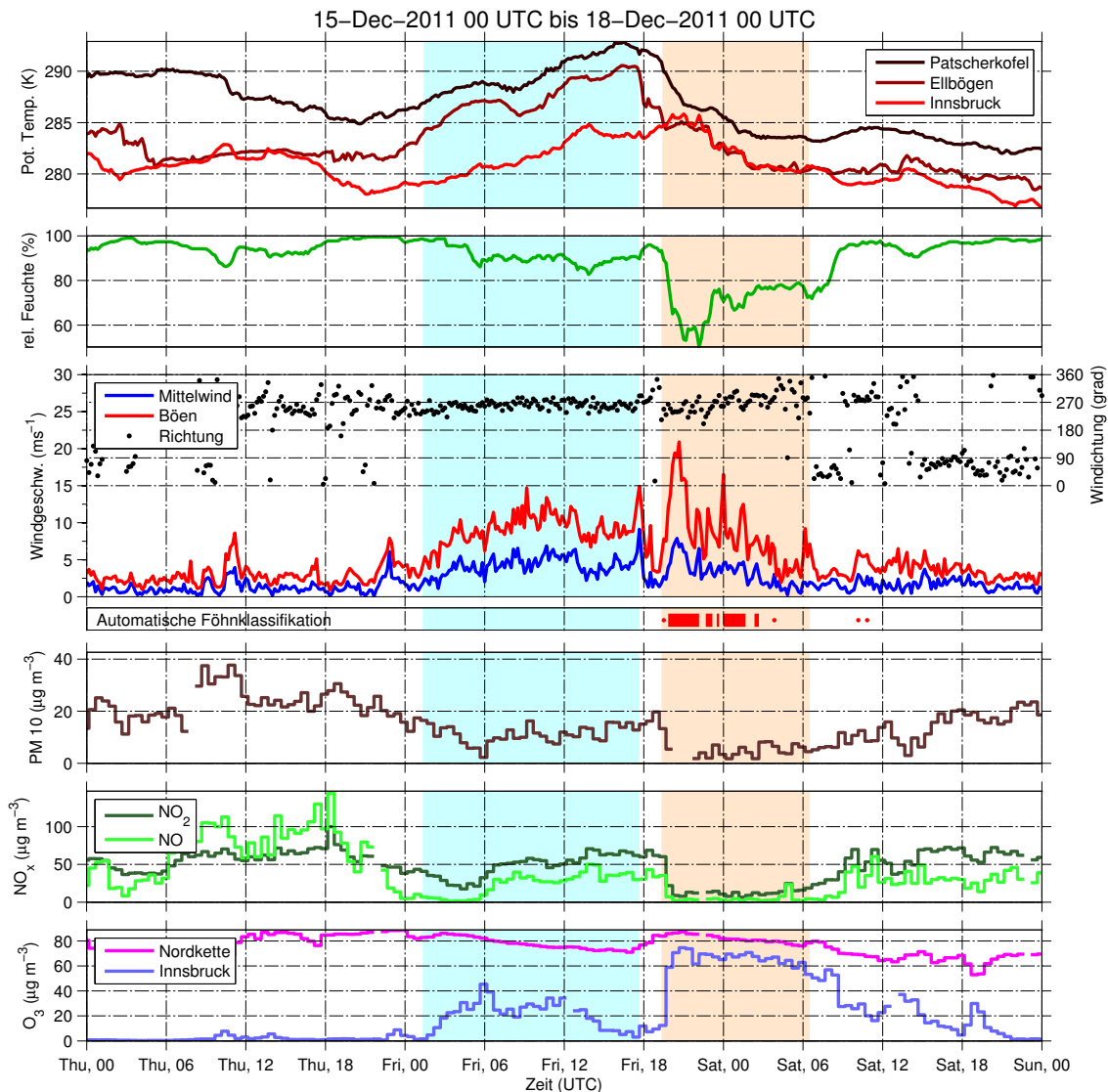


Abbildung 9: Zeitreihe der Föhn- und Schadstoffeentwicklung in Innsbruck vom 15. bis 18. Dezember 2011. Beschreibung siehe Abb. 4, rot hinterlegt ist jetzt aber die Nordföhnperiode. Zusätzlich ist jetzt in eine weitere Achse mit der relativen Feuchte von Innsbruck dargestellt.

Am 17. Dezember zog das Tief langsam nach Nordosten ab.

3.3.2 Wetter- und Schadstoffsituation im Raum Innsbruck

Der 15. Dezember war von Hochnebel und tiefer Bewölkung dominiert und verlief relativ schwachwindig (siehe Windverlauf in Abb. 9). Dabei war die unterste Luftschicht im Inntal zwischen Innsbruck und Ellbögen Untertags durchmischt, was man anhand der identischen potentiellen Temperaturen in Abb. 9 erkennt. Darüber gab es eine stark ausgeprägte Inversion. Dabei bewegten sich die Schadstoffkonzentrationen von NO um $100 \mu\text{g m}^{-3}$, von NO_2 um die $60 \mu\text{g m}^{-3}$ und von PM10 um $30 \mu\text{g m}^{-3}$.

Am Abend wurde der Hochnebel gegen 17 UTC von der aufkommenden Föhnströmung rasch aufgelöst, wodurch es im Inntal abkühlen konnte (siehe Tempera-

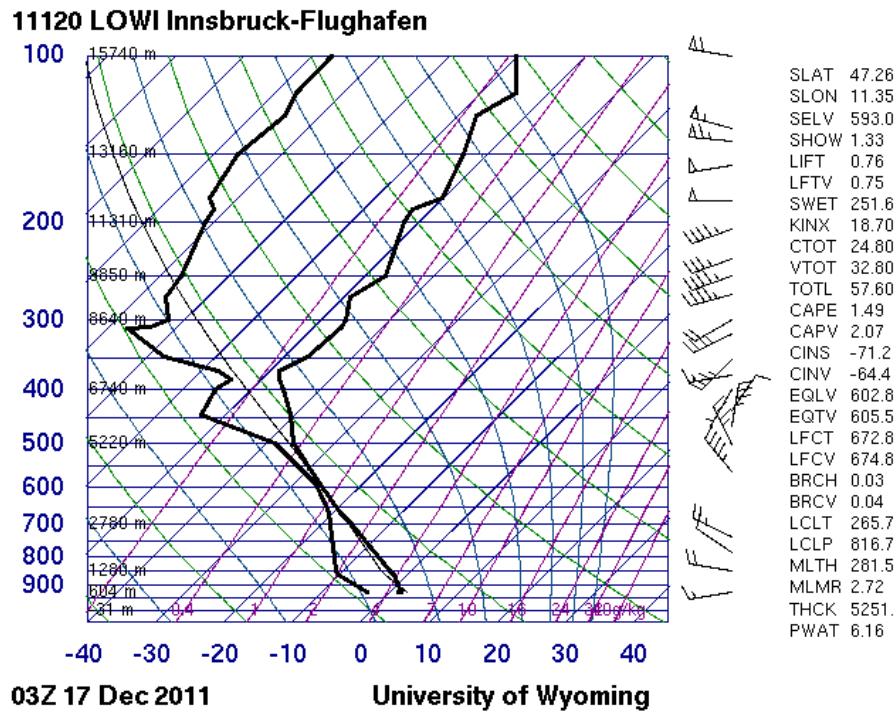


Abbildung 10: Radiosondenaufstieg vom 17. Dezember 2011 03 UTC am Innsbrucker Flughafen. Eingezeichnet ist der vertikale Taupunkt- (linke Linie) und Temperaturverteilung (rechte Linie). Rechts geben Windfedern Windrichtungen und -geschwindigkeiten an.

turverlauf Innsbruck in Abb. 9). Kurz vor Mitternacht setzte im Wipptal Südföhn ein, welcher im Innsbrucker Raum starken *voröhnige Westwind* induzierte. Dieser wehte bis zum nächsten Abend, wodurch auch im Inntal leichte Erwärmung einsetzte (siehe hellblau gekennzeichnete Periode in Abb. 9). Trotz Orkanböen von bis zu 160 km h^{-1} am Patscherkofel konnte der Südföhn bis zum Talboden (nach Innsbruck) nicht durchbrechen, da (in der Höhe) ständig Warmluft advehiert wurde (siehe Anstieg der potentiellen Temperaturen von Patscherkofel und Ellbögen) und starke Niederschläge im Oberinntal in Form von Schneefall die Luft kühlten, welche mit dem Westwind nach Innsbruck transportiert wurde. Somit lag eine relativ tief liegende Inversion zwischen der warmen Föhnluft in Ellbögen und der Kaltluft im Inntal vor. Die Feinstaubkonzentration belief sich während dieser Periode um die $15 \mu\text{g m}^{-3}$, während NO_2 nach vorübergehender Abnahme sich auf etwa dem gleichen Niveau wie am Vortag bewegte. Der NO -Anteil sank schon mit der Zunahme vom Westwind rasch unter den NO_2 -Wert ab, und nahm im weiteren Verlauf dieser Fallstudie den identischen Verlauf von NO_2 an.

Um 17:30 UTC erreichte die Kaltfront den Innsbrucker Raum, womit der Südföhn im Wipptal rasch aufhörte und die Temperatur zu sinken begann. In Innsbruck flaute somit der *vorföhnige Westwind* rasch ab. Mit dem Kaltfrontdurchgang stieg allerdings die Temperatur in Innsbruck leicht an (siehe Verlauf der potentiellen Temperatur in Abb. 9), da im Inntal unterhalb der Inversion noch immer die kalte Luft lagerte. Deshalb verlief dieser Kaltfrontdurchgang in Innsbruck zunächst relativ windschwach. Mit weiterer Abkühlung in der Höhe (Patscherkofel, Ellbögen) wurde schließlich Durchmischung mit Innsbruck erreicht, und der Nordföhn konnte

um 19:30 UTC an der Station Universität durchbrechen. Diesen Föhndurchbruch erkennt man auch an der starken Zunahme der Windgeschwindigkeit und an dem deutlichen Rückgang der relativen Feuchte (siehe Abb. 9). Man erkennt bei diesem Nordföhn weiters, dass der Wind aus westlichen Richtungen kommt (dies ist auch die häufigste Windrichtung bei Nordföhn in Innsbruck). Dabei gelangt die Föhnluft durch die Einschnitte westlich des Karwendelgebirges ins Inntal und fließt dann weiter nach Innsbruck Zängl (2006).

Bei diesem Föhndurchbruch fällt eine deutliche Abnahme der PM₁₀ und NO₂ Konzentrationen und ein deutlicher Anstieg vom O₃ auf (siehe die drei untersten Achsen in Abb. 9). Während der gesamten Nordföhnperiode liegt der Wert von PM₁₀ bei ca. $5 \mu\text{g m}^{-3}$ und NO₂ bei ca. $15 \mu\text{g m}^{-3}$. Im Radiosondenaufstieg von 03 UTC (während der Nordföhnphase) in Abb. 10 erkennt man, dass die Luft bis 500 hPa hoch, relativ gut durchmischt war. Deswegen konnten die bodennah produzierten Schadstoffe gut ausgeräumt werden.

Am 17. Dezember gegen 6:30 UTC ließ der Nordföhn in Innsbruck langsam nach und Taleinwind setzte ein. Danach stiegen die Schadstoffkonzentrationen langsam an, nur der Wert von Ozon ging zurück.

3.4 Überprüfung der automatischen Föhnklassifikation

Anhand dieser Fallstudien können auch die automatische Föhnklassifikation mit den manuell analysierten Föhnperioden überprüft werden.

Die Klassifikation für Südföhn von Föst (2006) stimmt insgesamt gut mit der manuelle analysierten Perioden überein (vergleiche Automatische Föhnklassifikation in Abb. 4, 6 und 7). Es fällt aber auf, dass insgesamt eher zu wenig Föhn gefunden wurde. Schwierigkeiten treten dabei besonders bei dem relativ seltenen Rotorföhn und während den nächtlichen Föhnperioden auf. Da in der Nacht meist kältere Luft aus den Seitentälern des Wipptals in die Föhnströmung miteingemischt wird, kann das θ – Kriterium nicht erfüllt werden. Dagegen wurde bei dem betrachteten Sommerfall Föhn etwa zwei Stunden zu früh klassifiziert, da zwar das Kriterium der Durchmischung gegeben war, allerdings noch Taleinwind den Föhn verhinderte.

Die Klassifikation für Nordföhn von Haas (2006) erfasst den hier analysierten Fall relativ gut (vergleiche automatische Föhnklassifikation in Abb. 9), allerdings fällt auch hier auf, dass zu wenig Föhn automatisch gefunden wurde. Ebenfalls muss bedacht werden, dass diese Klassifikation nicht auf den sehr selten Nordföhn direkt über die Nordkette ausgelegt wurde (Haas 2006).

Insgesamt muss bei den folgenden statistischen Betrachtungen bedacht werden, dass beide Klassifikationen gewissen Grenzen und Einschränkungen unterliegen, wodurch keine hundertprozentige Erfassung aller Föhnfälle möglich ist.

4 Statistische Auswertung

Nach einigen Fallstudien sollen nun statistisch die Schadstoffkonzentrationen bei Föhn mit föhnfreien Ereignissen verglichen werden und in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeiten betrachtet werden. Dabei werden alle möglichen Ereignisse in folgende vier verschiedene Klassen (mit jeweiligem Anteil) unterteilt:

kein Föhn (79.0%) Es wurde in Ellbögen kein Südföhn und in Innsbruck kein Süd- oder Nordföhn klassifiziert. Somit enthält diese Klasse alle Fälle, bei denen Föhn auf Innsbruck keinen oder nur sehr wenig Einfluss hat.

Südföhn (7.0%) Diese Klasse beinhaltet alle Fälle, bei denen der Südföhn bis auf den Talboden nach Innsbruck durchgebrochen war.

Nordföhn (0.9%) In Innsbruck weht Nordföhn.

Föhn in Ellbögen, kein Föhn in IBK (13.1%) Hierbei handelt es sich um die Fälle, bei denen Föhn in Ellbögen bereits weht, aber aufgrund stabiler Luftschichtung im Inntal nicht bis auf den Talboden nach Innsbruck durchbrechen konnte. Dabei weht in Innsbruck meist der *vorföhnige Westwind*, weshalb in weiterer Folge diese Klasse auch so abgekürzt (*vorföhnige Westwind*) wird. Allerdings treten besonders am Anfang und Ende der Föhnlage auch schwächere Winde auf.

Da die Verteilungen im Frühling und Sommer bzw. Herbst und Winter nahezu identisch sind, genügt eine Unterteilung in Winter- (23. September — 20. März) und Sommerhalbjahr (21. März — 22. September). An der relativen Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten (siehe Abb. 11 unten) ist erkennbar, dass sowohl im Winter, als auch im Sommer geringe Windgeschwindigkeiten um 1 m s^{-1} dominieren. Dabei treten in der Klasse *kein Föhn* im Winterhalbjahr kaum Geschwindigkeiten über 7 m s^{-1} auf. Stärkere Winde kommen nur bei Föhn vor. Im Sommer sind höhere Windgeschwindigkeiten mit einem wesentlich höheren Anteil vertreten, da der Taleinwind meist gut ausgeprägt ist und "Outflows" (Katluftausfließen von Schauern und Gewittern) auftreten.

Die Bandbreite der Windgeschwindigkeiten bei *Föhn in Ellbögen, ohne Föhn in Innsbruck* ist groß, da das Vorhandensein und Stärke des *vorföhnigen Westwindes* davon abhängt, wie weit der Föhn noch bis ins Inntal absinken kann. Im Sommerhalbjahr liegen die Häufigkeiten dieser Klasse bei allen Windgeschwindigkeiten deutlich tiefer, weil die stärkere Sonnenstrahlung die seichten Inversionen meist rasch auflösen kann und der Föhn bis nach Innsbruck absinken kann.

Die NO Konzentration zeigt im Winterhalbjahr eine starke Windgeschwindigkeitsabhängigkeit bis etwa 4 m s^{-1} , welche mit einer steilen Abnahme der Konzentration verbunden ist, wobei auch die Bandbreite schnell kleiner wird (siehe Abb. 11 oben links). Eine weitere Erhöhung der Windgeschwindigkeit hat nur noch eine sehr geringe Reduktion des Schadstoffs zur Folge. Dabei zeigen alle Klassen nahezu identisches Verhalten, nur beim *vorföhnigen Westwind* ist eine leicht Zunahme bei hohen Windgeschwindigkeiten ersichtlich. Bei geringen Windgeschwindigkeiten von 2 bis 4 m s^{-1} fällt aber auf, dass bei Südföhn die Schadstoffkonzentration geringer ausfällt und die Bandbreite eng ist. Im Sommerhalbjahr zeigt die NO Konzentration

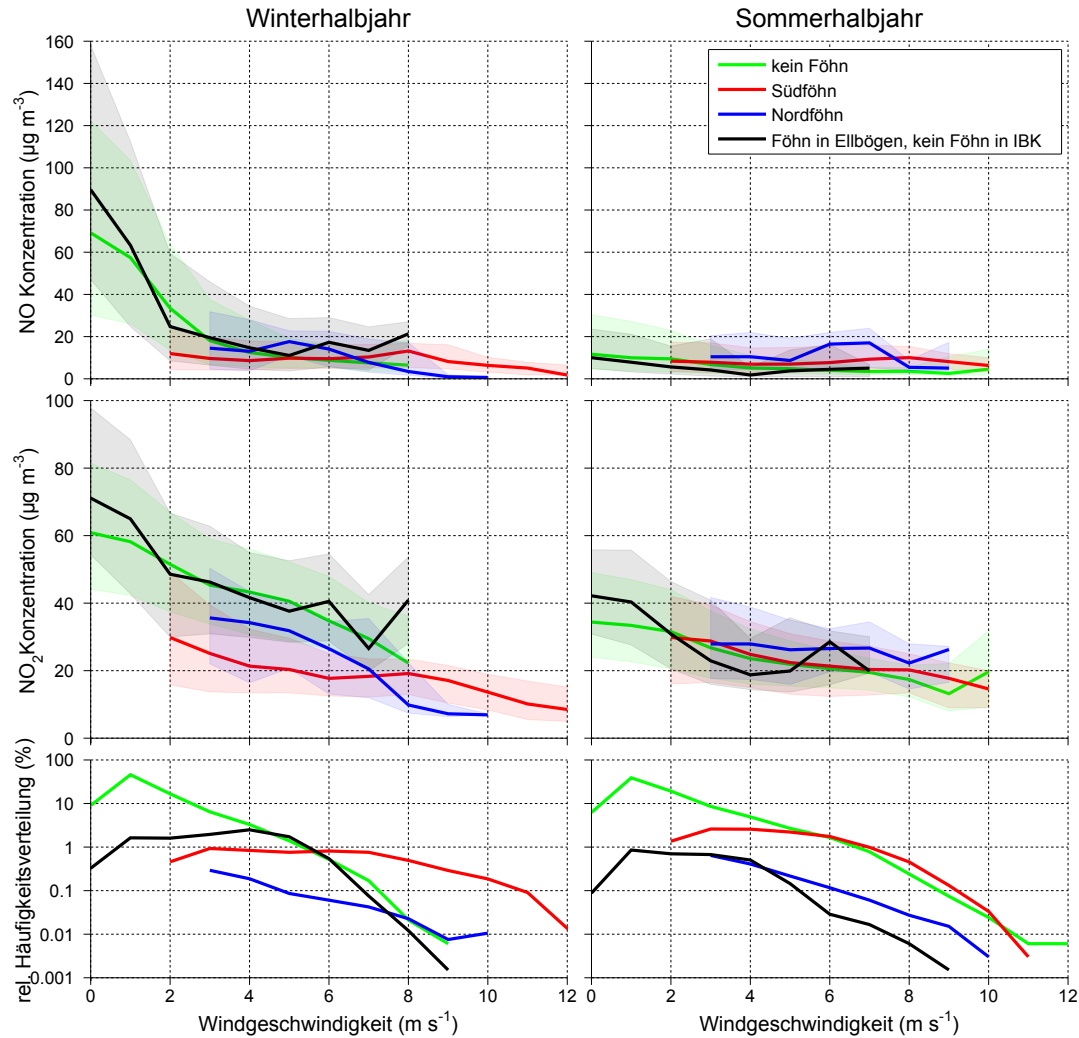


Abbildung 11: Abhängigkeit der Schadstoffkonzentrationen von Windgeschwindigkeiten und relative Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten in Innsbruck für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1.1.2006 bis 1.7.2012, unterteilt in Winterhalbjahr (links) und Sommerhalbjahr (rechts). Dargestellt sind vier verschiedene Klassen: kein Föhn in Innsbruck und Ellbögen (grün), Südföhn in Innsbruck (rot), Nordföhn in Innsbruck (blau) und Föhn in Ellbögen aber kein Föhn in Innsbruck (schwarz). Die beiden oberen Achsenpaare geben die Verteilung der Schadstoffkonzentrationen von NO und NO₂ an, wobei jeweils die Mediane eingezeichnet sind, und die Flächen zwischen den 25er und 75er Perzentilen in der jeweiligen Farbe eingefärbt sind. Die untersten, logarithmisch skalierten Achsen zeigen die rel. Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeiten der jeweiligen Klassen.

keine Abhängigkeiten von der Windgeschwindigkeit (vergleiche Abb. 11 oben rechts). Hierbei bewegen sich alle Klassen auf einem niedrigen Niveau von ca. $10 \mu\text{g m}^{-3}$. Bei *Nordföhn* fällt ein kleines Maximum bei 6 und 7 m s^{-1} auf. Vermutlich liegt es an der geringen Anzahl der Fälle, von denen einige mit etwas höheren Konzentrationen verbunden waren.

Auch die NO₂-Konzentration zeigt im Winter eine deutliche Abhängigkeit von Windgeschwindigkeiten, wobei es jetzt deutlichere Unterschiede zwischen den Klassen gibt (siehe Abb. 11 Mitte links). *Kein Föhn* und *vorföhniger Westwind* verhalten

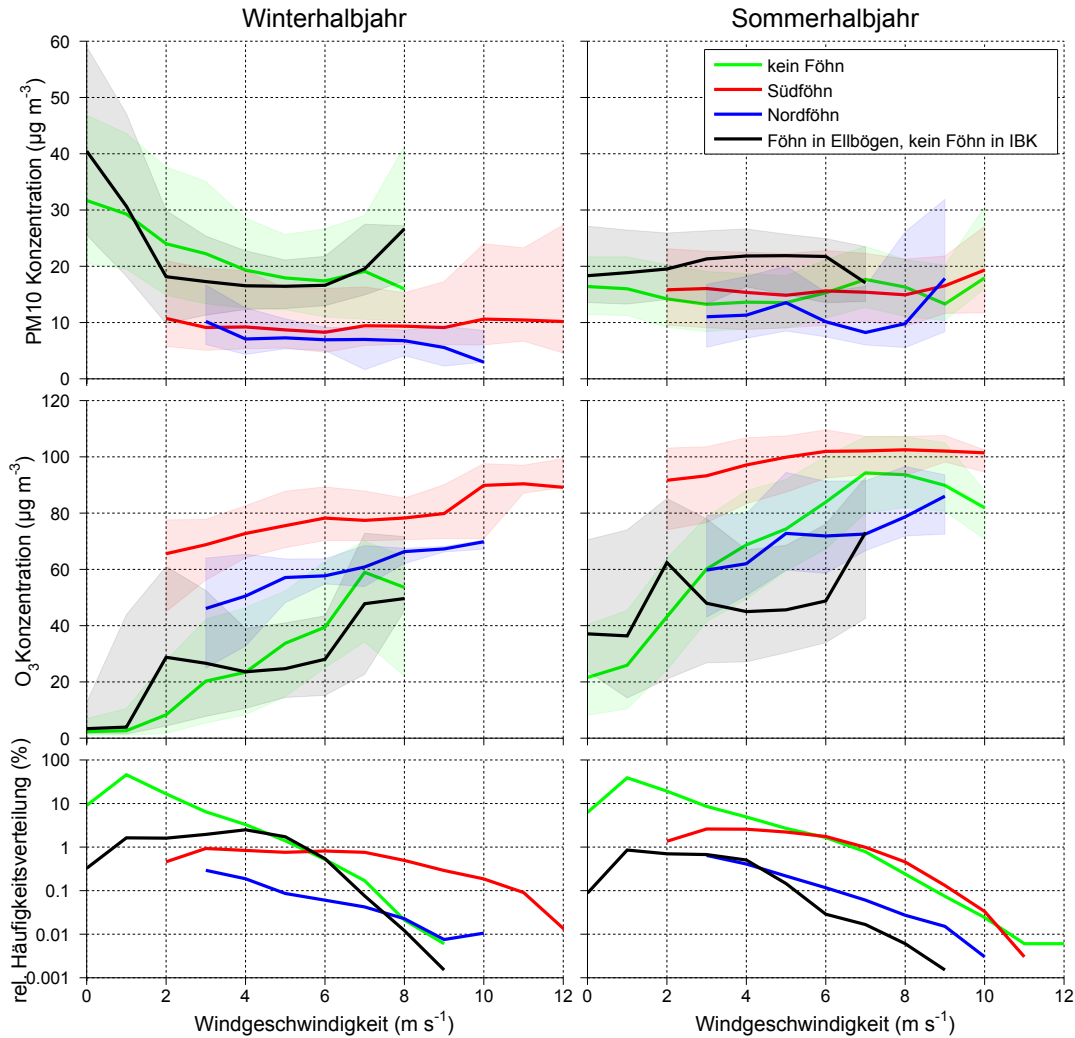


Abbildung 12: Identisch wie bei Abb. 11. Dargestellt sind jetzt die Schadstoffe PM10 und O₃.

sich hierbei sehr ähnlich, mit einer Abnahme von etwa $5 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Geschwindigkeitszunahme um 1 m s^{-1} , wobei beim *vorföhniger Westwind* wieder eine Konzentrationszunahme bei der höchsten Windgeschwindigkeit vorhanden ist. Die beiden Verläufe von *Nord-* und *Südföhn* bewegen sich hierbei immer auf einen deutlich niedrigeren Niveau als die beiden anderen Klassen, wobei der *Nordföhn* eine starke Geschwindigkeitsabhängigkeit von etwa $4 \mu\text{g m}^{-3}$ pro 1 m s^{-1} zeigt. Während des Sommerhalbjahrs zeigen die Konzentrationsverteilungen nur noch eine schwache Abhängigkeit von den Windgeschwindigkeiten von nur ca. $2 \mu\text{g m}^{-3}$ pro 1 m s^{-1} , wobei auch hier alle Klassen nahezu identisch liegen (siehe Abb. 11 Mitte rechts).

Bei Feinstaub gibt es im Winter sehr unterschiedliche Abhängigkeiten von den Klassen (siehe Abb. 12 oben links). Bei *keinem Föhn* findet eine kontinuierliche schwache Abnahme mit zunehmender Windstärke, wobei bei der höchsten Klasse das obere Quartil bei der höchsten Geschwindigkeitsklasse ansteigt. Bei den Fällen mit *vorföhnigem West* gibt es zunächst eine sehr steile Abnahme der Schadstoffkonzentration bis 2 m s^{-1} , wonach die Konzentration mit weiterer Windgeschwindigkeitszunahme bis etwa 7 m s^{-1} nahezu konstant bleibt. Bei der höchsten Geschwin-

digkeitsklasse ist wieder ein Anstieg ersichtlich. Der Median bei *Südföhn* bleibt hierbei über alle Geschwindigkeiten konstant bei $10 \mu\text{g m}^{-3}$, wobei bei den höchsten Geschwindigkeiten das obere Quartil etwas ansteigt. Geringste PM10 Konzentrationen kommen bei *Nordföhn* vor, welche mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten etwas abnehmen. Während des Sommerhalbjahrs ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit wiederum kaum vorhanden (siehe Abb. 12 oben rechts). Auffallend ist jedoch, dass bei *vorföhnigem Westwind* die höchsten Feinstaubkonzentrationen vorkommen und bei *Nordföhn* im Mittel die geringsten. Zwischen *keinen Föhn* und *Südföhn* gibt nahezu keine Unterschiede. Beide Verteilungen bleiben im Mittel bei etwa $15 \mu\text{g m}^{-3}$ konstant.

Komplett gegensätzliches Verhalten zu den bisher betrachteten Schadstoffen ist beim Ozon festzustellen (siehe Abb. 12 Mitte rechts und links). Hierbei ist allgemein eine Zunahme der Konzentrationen mit höheren Windgeschwindigkeiten ersichtlich. Ausgesprochen interessant ist der Befund, dass das Konzentrationsverhalten von Ozon von der Jahreszeit nahezu unabhängig ist, wenn für die sommerlichen Ozonkonzentrationen ein etwa $20 \mu\text{g m}^{-3}$ höherer "Sockelbetrag" im Vergleich zum Winterhalbjahr angesetzt wird. Dabei treten die höchsten O_3 Konzentrationen bei *Südföhn* auf, wobei hier nur eine sehr geringe Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit besteht. Bei *Nordföhn* ist die Ozonbelastung stets geringer. Die stärkste Zunahme an Ozon gibt es bei der Klasse *kein Föhn* mit etwa $10 \mu\text{g m}^{-3}$ pro 1 m s^{-1} stärkeren Wind.

Etwas ungewöhnlich ist der Verlauf bei *vorföhnigem West*. Hierbei folgt nach einem kurzen, flachen Abschnitt ein steiler Anstieg bis 2 m s^{-1} wo jeweils ein erstes Maximum erreicht wird. Anschließend gibt es eine leichte Abnahme und Abflachung, bevor nach wieder einem steilen Anstieg das absolute Ozon-Maximum erreicht wird. Vermutlich hängt das erste Maximum bei 2 m s^{-1} mit der Methode der Föhnklassifikation zusammen. Als Mindestgeschwindigkeit ab welcher Südföhn klassifiziert wird wurde 2 m s^{-1} festgelegt (Föst 2006). Folglich werden Messwerte mit einer als 2.0 m s^{-1} geringeren Windgeschwindigkeit immer als "kein Föhn in Innsbruck" kategorisiert und fallen daher in die Klasse *vorföhniger Westwind*, auch wenn es sich dabei schon möglicherweise um Föhn gehandelt hat.

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von Föhn auf die Schadstoffbelastung in Innsbruck für den Zeitraum vom 1.1.2006 bis 1.7.2012 untersucht. Dabei wurden zunächst einige Fallstudien angefertigt und anschließend eine statistische Untersuchung vorgenommen.

Zur Identifikation der Süd- und Nordföhnzeiträume wurden Föhnklassifikationen von Föst (2006) und Haas (2006) angewandt. Diese ermöglichten es, die meisten Zeiträume mit Föhn zu analysieren. Dabei wurden vier verschiedene Klassen betrachtet mit kein Föhneinfluss auf Innsbruck, Föhn im Wipptal ohne Föhn in Innsbruck, Södföhn bis zum Talboden und Nordföhn bis zum Talboden in Innsbruck. Allerdings haben auch diese beiden Verfahren Grenzen und Einschränkungen, wodurch einige Zeiten mit Föhn nicht als solche zugeordnet werden konnten, aber andererseits manchmal auch etwas zu viel Föhn identifiziert wurde.

Die Ergebnisse der Fallstudienbetrachtungen haben gezeigt, dass der Föhn nur einen vorübergehenden Einfluss auf die Schadstoffkonzentrationen hat. Wenige Stunden nach Beendigung von Föhnlagen haben die Konzentrationen bei allen untersuchten Fällen wieder ein ähnlich hohes Niveau erreicht als vor dem Föhn.

Anhand der Fallstudien war ersichtlich, dass Föhn im Winterhalbjahr zu starker Reduktion der Schadstoffkonzentrationen (abgesehen von Ozon) führte, während beim Sommerfall nur geringe Änderungen festgestellt werden konnten. Dieses Bild konnte auch bei der statistischen Betrachtungen bestätigt werden.

Bei allen Fallstudien wird auch deutlich, dass Föhn immer zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration führt. Aufgrund der guten Durchmischung und absinkenden Luftmassen aus Kammniveau oder Gebirgseinschnitt wird bei Föhndurchbruch Ozon aus höheren Luftschichten ins Tal hinab transportiert. Auch dieser Befund ist durch statistische Betrachtungen bestätigt. Im Mittel werden die höchsten Ozonkonzentrationen bei Södföhn erreicht, während bei Nordföhn der Median unterhalb der Fälle ohne Föhneinfluss liegt.

Falls der Föhn im vorderen Wipptal weht, aber noch nicht bis ins Inntal durchbrechen kann, führt dies im Herbst und Winter bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m s^{-1} in Innsbruck im Mittel zu einer Erhöhung der Schadstoffbelastung (abgesehen von Ozon) im Vergleich zu den von Föhn nicht beeinflussten Fällen. Erklären lässt sich dies mit dem Verstärken und Absinken der Inversion zwischen der warmen absinkenden Föhnluft und der Kaltluft im Inntal. Bei höheren Windgeschwindigkeiten wird dieser Effekt durch stärkere Turbulenzen kompensiert und der Verlauf ist identisch mit den föhnfreien Ereignissen.

Bei durchgebrochenen Föhn gibt es nahezu keine Abhängigkeit der Schadstoffkonzentrationen von der Windstärke. Dies bedingen die bei Föhn aus Kammniveau oder Gap-Höhe absinkenden sauberen Luftmassen, welche die schadstoffbelastete (NO , NO_2 und PM_{10}) Luft im Inntal nahezu vollständig ersetzt, unabhängig von der Stärke des Föhns.

Literatur

- Föst, F., 2006: Eine objektive föhnklimatologie für das wipp- und in-
ntal. URL http://imgi.uibk.ac.at/sekretariat/diploma_theses/Foest_Fritz_2006_Dipl.pdf, 157 pp., URL http://imgi.uibk.ac.at/sekretariat/diploma_theses/Foest_Fritz_2006_Dipl.pdf.
- Gohm, A. and G. Mayr, 2004: Hydraulic aspects of föhn winds in an alpine valley. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **130**, 449–480.
- Haas, G., 2006: Nordföhn und niederschlag in innsbruck. URL http://imgi.uibk.ac.at/sekretariat/diploma_theses/Haas_Georg_2006_Dipl.pdf, 91 pp., URL http://imgi.uibk.ac.at/sekretariat/diploma_theses/Haas_Georg_2006_Dipl.pdf.
- Jackson, P. L., G. Mayr, and S. Vosper, 2012: Dynamically driven winds. *Mountain Weather Research and Forecasting*, –, –, in print.
- Strobl, A., 2009: Eine südföhn-statistik für das oberinntal und ein vergleich mit dem wipptal. 105 pp.
- Zängl, G., 2006: North foehn in the austrian inn valley: A case study and idealized numerical simulations. *Meteorolog. Atmos. Phys.*, **91**, 85–105.

Danksagung

Besonderer Dank gebührt Ao. Univ.-Prof. Dr. Georg Mayr, der für die Beschaffung vom Großteil der für diese Arbeit notwendigen Daten gesorgt hat. Seine Unterstützung bei einigen Fragen war auch immer hilfreich.

Dr. Johannes Vergeiner von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) möchte ich für die Unterstützung bei Fragen zur Druckreduktion und Beschaffung der Daten von Reutte danken.

Ferner danke ich der ZAMG für die Bereitstellung der Daten, welche für diese Arbeit unentbehrlich gewesen sind.

Auch dem Land Tirol gebührt Dank für Bereitstellung der Messdaten von Schadstoffkonzentrationen und der Webcamfotos, welche ebenfalls für diese Arbeit notwendig waren.

Andreas Krismer danke ich für Unterstützung bei Fragen zu den Schadstoffen und sonstige Unterstützung während diese Praktikums.