

Windsysteme im Winter 07/08 im Raum Schwaz

Auswirkungen auf Luftschadstoffe im Bereich der
Autobahn

Eine Diplomarbeit eingereicht am



INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND GEOPHYSIK,
UNIVERSITÄT INNSBRUCK

zur Erlangung des akademischen Grades
MAGISTER DER NATURWISSENSCHAFTEN

eingereicht von
WOLFGANG GURGISER

INNSBRUCK, JUNI 2009

Vorwort

Die Grundlage dieser Arbeit bildet ein gemeinsames Messprojekt vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Atmosphärische Umweltforschung, der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Betreuer Herr Schäfer) und vom Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck (Betreuer Herr Obleitner).

Die Grundidee von Herrn Schäfer, nach dem sehr umfangreichen „Alpnap“ Projekt weitere Messungen durchzuführen, entstand durch Fragen, die nach dieser Kampagne im Winter 2005/06 offen blieben. Ich persönlich wurde im Sommer 2007 darüber informiert.

Die Möglichkeit, Mitarbeiter eines Messprojektes zu sein, war für mich eine große Motivation, da ich bereits vor Projektstart überzeugt war, dass eine derartige Arbeit vor Abschluss des Studiums einen unschätzbaren (Erfahrungs-)Wert mit sich bringt, der im späteren Berufsleben sehr nützlich sein wird.

Vor allem die geringen personellen Ressourcen, die im Vergleich zu früheren Projekten geringe Unterstützung durch wissenschaftliche Mitarbeiter, die teilweise fehlenden finanziellen Mittel,... haben zwar dazu geführt, dass oft in sehr kurzer Zeit (z.B. Sponsorsuche) viele Probleme gelöst werden mussten und viel Energie nicht nur von mir, sondern auch von meinem unersetzlichen Partner, Herrn Bilgeri und unseren Betreuern von den Instituten von Nöten war. Diese Umstände haben aber auch bewirkt, dass vor allem wir Studenten außergewöhnlich viele Erfahrungen aus den verschiedensten Bereichen (Sponsorsuche, Messkonzept, Öffentlichkeitsarbeit, Messgeräte und Messprobleme, Datenaufbereitung,...) im Zuge unserer bescheidenen Kampagne mitgenommen haben.

Heute, nach Abschluss der schlussendlich rund 6 Monate langen Messphase und sämtlicher, für diese Arbeit nötigen Datenauswertungen sind die Stresszustände, Mühen und Plagen, die Winter und Frühjahr 2007/08 mit sich brachten, fast vergessen. Nicht vergessen sind aber viele Punkte, die bei einer möglichen zukünftigen Messkampagne (wo auch immer), zu berücksichtigen sind, um sich dem (ewigen) Ziel, möglichst alle Daten, die man im Messkonzept einplant, neuerlich zu stellen.

Sehr erfreulich ist, dass es schlussendlich trotz manch widriger Umstände und der vielen, bereits vor unserer Zeit durchgeführten Untersuchungen möglich war, einige alpinmeteorologische Theorien mit Messdaten zu belegen und einige neue Facetten im Wechselspiel „Emission-Immission-Meteorologie“ aufzuzeigen.

Ein herzlicher Dank soll daher bereits an dieser Stelle all jenen gelten, die uns die Teilnahme und Durchführung „unseres“ Projektes sowie die wissenschaftliche Auswertung der Datensätze ermöglicht haben! Eine detaillierte Erwähnung unserer Betreuer, Helfer, Spon-

soren und „messunabhängigen“ Unterstützer im Hintergrund folgt in Punkt A.7.

Abschließend sei erwähnt, dass diese Arbeit mehr Themenbereiche umfasst als geplant, weil die fehlenden Auswertungsmöglichkeiten (wegen Datenlücken) durch andere Untersuchungen ersetzt werden mussten. Trotzdem habe ich versucht, Verbindungen zwischen den Themen aufzuzeigen und diese im Text zu verknüpfen. Dies führte möglicherweise dazu, dass für Außenstehende manche Textstellen im ersten Moment etwas schwer zu verstehen sind. Hierfür bitte ich um Nachsicht!

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vi
Abkürzungsverzeichnis	vii
Summary	1
Zusammenfassung	2
1 Einleitung	5
1.1 Über die Geschichte zum heutigen Wissensstand	5
1.2 Fragestellung	14
1.3 Inhaltsüberblick	14
2 Grundlagen	17
2.1 Alpine Windsysteme	17
2.1.1 Tal- und Hangwinde	18
2.1.2 Fallwinde (Föhn)	22
2.2 Atmosphärische Grenzschicht	23
2.2.1 Definition Grenzschicht und Mischungsschicht	24
2.2.2 Vertikalschichtung und Inversionen	24
2.3 Luftschadstoffe und Atmosphärenchemie	27
2.3.1 Definitionen	27
2.3.2 Stickoxid	27
2.3.3 Feinstaub	29
2.3.4 Quellen im Bereich der Messorte	30
3 Messgebiet, Messaufbau und Messdaten	33
3.1 Topographie des Gebietes	33
3.1.1 Definition Untersuchungsgebiet	33
3.1.2 Umgebende Topographie	35
3.2 Messaufbau	36
3.2.1 Messpunkte	36
3.2.2 Eignung der Standorte	39

3.2.3	Messgeräte und Datenqualität	39
3.2.4	AWS und NO _x -Analysator LT und AL	40
3.2.5	Hobo TM	42
4	Statistische Messdatenanalyse und Interpretation	47
4.1	Winterüberblick	47
4.1.1	Klimainformationen	47
4.1.2	Stationsvergleich	50
4.1.3	Selektion von „Sonnentagen“	52
4.2	Regionale Windsysteme	54
4.2.1	Klassifizierung	54
4.2.2	Vorherrschende Systeme	60
4.2.3	Hang- und Querwindzirkulationen	64
4.2.4	Antriebe	74
4.3	Kleinskalige Meteorologie und Luftschadstoffkonzentration A12 Vomp	85
4.3.1	Winterüberblick Emission und Immission	85
4.3.2	Emissionsunabhängige Schwankungen	88
4.3.3	Einfluss der Windarten auf die Immission an Station LT	91
4.3.4	Besondere Tage(sgänge)	100
5	Schlussfolgerungen	113
5.1	Bekannte und neue Erkenntnisse	113
5.2	Ausblick	116
A	Ergänzende Informationen, Abbildungen und Tabellen	119
A.1	Erfahrungen und Probleme mit Messstandorten	119
A.2	Konzeptvorschlag für ein zukünftiges Projekt	123
A.3	Ergänzungen zu Punkt 4.2.4, Antriebe	125
A.4	Ergänzende Übersicht zu Punkt 4.3, Meteorologie-Luftschadstoffe	126
A.5	Betrachtung Häufigkeiten je Windart	130
A.6	Qualitätssicherung Station LT 2007	132
A.7	Messeindrücke	134
	Literaturverzeichnis	136
	Danksagung	141
	Curriculum Vitae	143

Abbildungsverzeichnis

1.1	Querschnittsfläche versus Inversionshöhe	7
2.1	Volumseffekt	18
2.2	Skizze Talatmosphäre	26
2.3	<i>NO</i> und <i>NO</i> ₂ , 27.05.05	31
3.1	Topographie Inntal	34
3.2	Messpunkte Sonnenhang	35
3.3	Hobosensor	42
4.1	Monatsniederschlag IBK	48
4.2	T-Verlauf Station BAS	49
4.3	Monatsmitteltemperaturen	50
4.4	Föhngrenze Innsbruck	51
4.5	Sonnentag Ja/Nein	53
4.6	Übersicht zur Einteilung der Windarten	55
4.7	Häufigkeit der Windarten je Stunde	58
4.8	Mittlere Windvektoren	60
4.9	Häufigkeit der Windarten je Station	61
4.10	Windrichtung VB	65
4.11	Windrichtung BAS	66
4.12	Windrichtung LT	67
4.13	Windrichtung BT	68
4.14	Querwindzirkulationen	69
4.15	T-Differenz und Hangwind	71
4.16	Tagesgang Luftdruck und Temperatur	74
4.17	Druckdifferenz und Windrichtung	76
4.18	Tagesgangdifferenzen von T und p	77
4.19	Mittleres Vertikalprofil der Temperatur	79
4.20	Vergleich der Stationen KAP-BT-BAS	82
4.21	<i>NO</i> _x Emission	86
4.22	<i>NO</i> _x Immission	87
4.23	<i>NO</i> _x Emission und Immission	88

4.24	Verhältnis I/E	89
4.25	I/E und T-Gradient	90
4.26	NO_2/NO_x Verhältnis	93
4.27	Parameter je Windart LT	94
4.28	Mittleres PM10 und NOx je Stunde	100
4.29	Meteorologischer Überblick, 27.12.07	101
4.30	Gemischter Überblick, 27.12.07	102
4.31	Windvektoren BAS und LT, 03.01.08	103
4.32	NOx-Immission und T-Gradient, 03.01.08	103
4.33	T-Gradient, Windrichtung und Vergleich, 03.01.08	104
4.34	Meteorologischer Überblick 03.02.08	106
4.35	Meteorologischer Überblick 04.02.08	107
4.36	NOx-Immission, 04.02.08	108
4.37	NOx Emission und Immission, 22.01.08	110
4.38	Meteorologischer Überblick 22.01.08	111
5.1	Typische Winde bei Station LT an einem sonnigen Wintertag	116
A.1	Windrose Kreuzbichlkapelle Vomp	122
A.2	Orthofoto Inntal	125
A.3	Tagesgang p und BMT	126
A.4	Tagesmittel Emission	126
A.5	Gelände Bereich LT	127
A.6	Meteorologische Parameter je Windart LT	127
A.7	NO und NO2 an Sonnentagen	128
A.8	Mechanische Windsensoren an Mustertag	129
A.9	Idee zu Thudium2009, Fig.8	130
A.10	Qualität Meteorologie Station LT	132
A.11	Qualität NOx Station LT	133
A.12	Messeindrücke	134

Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften Tal-/Hangwinde	22
3.1	Messstandorte	37
3.2	Messungen Wetterstationen	39
3.3	Vergleichsmessungen Hobo-AWS	43
4.1	Klassifizierung Windarten VB	56
4.2	Klassifizierung Windarten LT	56
4.3	Klassifizierung Windarten BAS	57
4.4	Klassifizierung Windarten BT	57
4.5	Mittelwerte von diversen Parameter je Windart und Station	61
4.6	Tage mit synoptischem Taleinwind	91
4.7	Mittelwerte von Parametern je Windart LT	94

Abkürzungsverzeichnis

A12	.....	Inntalautobahn
Abb.	.....	Abbildung
AGL	.....	Above Ground Level
AL	.....	Messstation An der Leiten, Gemeindegebiet Vomp
ALPNAP	.....	Monitoring and Minimisation of Traffic-Induced Noise and Air Pollution Along Major Alpine Transport Routes
AMSL	.....	Above Mean Sea Level
BAS	.....	Messstation am Westrand von Schwaz
BMT	.....	Barometrische Mitteltemperatur
BT	.....	Messstation im Bachtal, Gemeindegebiet Vomp
Glg.	.....	Gleichung
IG-L	.....	Immissionsschutzgesetz Luft (BGB1. II Nr.263/2004, i.d.g.F.)
IMGI	.....	Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck
INNAP	.....	Boundary Layer Structure in the Inn Valley During High Air Pollution
INNOX	.....	NO _x -structure in the Inn Valley during High Air Pollution
KAP	.....	Messstation Kreuzbichlkapelle, Gemeindegebiet Vomp
LT	.....	Messstation 'Land Tirol' östlich der Raststätte A12 in Vomp
NMVOC	.....	Nicht methanhaltige flüchtige organische Verbindungen
p	.....	Druck
T	.....	Temperatur
Tab.	.....	Tabelle
VB	.....	Messstation am östlichen Vomperberg
VOC	.....	flüchtige organische Verbindungen
ZAMG	.....	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Summary

The primary goal of this work was to study the occurrence and the nature of wind systems in the area of Schwaz during a measurement period from December 2007 until February 2008. A second focus was on studying the effects of the dominant wind regimes on the concentration of air pollutants monitored at the Vomp-A12 measurement site, which is located close to the motorway.

Automatic weather stations as well as air pollution measurement systems (PM10) were operated at different elevations in a suitable valley section with a particular focus on the sun-exposed slopes. Considering further data like calculated traffic emissions and measured ambient air pollution parameters at site Vomp-A12, it was possible to investigate specific effects of emission, atmospheric chemistry, local meteorology and variations in the direction of air flow, respectively.

The meteorological analysis demonstrates that during the investigated period (01/12/07 - 29/02/08) the temperatures were above average and there were only few days with snow cover in the valley floor. The classification of the measured wind directions confirms a prevalence of along valley winds, which is particularly true for measurement sites at the valley bottom and at the elevated plateau above. However, these statistics also reveal the regular occurrence of cross valley flows. Outstandingly pronounced slope winds are observed in a small valley (Bachtal) extending upslopes to site Vomp-A12, which were unexpected relevant for winter months. It is liable that their development was strongly promoted by the lack of snow and specific topographic conditions.

Further analysis mainly concerns the effects of these slope at the small scale meteorological and air pollution conditions at site Vomp-A12. Compared to measurement sites below and above, this location is characterized by a comparatively high number of calm conditions ($v < 0.5 \text{ m/s}$). The diurnal variation of air pollution (NO_x) is characterized by a early morning and evening maximum, which is most pronounced during work days. The first maximum is strongly related to high emissions during hours with frequently calm meteorological conditions. Later on, upslope winds and valley winds develop, leading to lower concentrations. The second maximum can be related to typically worse mixing at this time of the day and enhanced advection towards the measurement site. These affects are associated with the initial phase of thermally driven downslope winds flowing out the Bachtal valley above the measurement site.

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Erfassung und Klassifizierung der im Inntal im Bereich der Gemeinden Schwaz und Vomp vorkommenden Windsysteme in den Wintermonaten Dezember 2007, Jänner und Feber 2008 sowie die Untersuchung ihres Einflusses auf die Luftschadstoffkonzentration entlang des Sonnenhanges und insbesondere im Bereich der Luftgüte-Messstation Vomp-A12.

Dabei wurden erstmalig neben Messstandorten im Bereich der Talmitte Messpunkte entlang des Sonnenhanges in Vomp zur zeitlich hochaufgelösten Erfassung von meteorologischen und schadstoffbezogenen Informationen installiert. Die Betrachtung von Emissions- und Immissionsdaten ermöglichte die Differenzierung der Einflüsse von verkehrsbezogener Emission, Atmosphärenchemie, lokaler Meteorologie und Standorteffekten auf die Stickoxidimmission an der Messstelle Vomp-A12. Die meteorologischen Untersuchungen zeigen zunächst, dass in diesem Talabschnitt während der Messperiode (01.12.07 bis 29.02.08) überdurchschnittliche Temperaturen und außergewöhnlich wenig Tage mit Schneebedeckung registriert wurden.

Die Klassifizierung der gemessenen Windrichtungen bestätigt, dass im Bereich der Talsohle am Westrand von Schwaz und am Vomperberg Talau- und Taleinwinde dominiert haben. Die vorliegende Arbeit zeigt jedoch auch Einflüsse von Föhnperioden und Zirkulationen entlang des Talquerschnittes auf.

Für die etwa 30m AGL gelegene Messstelle Vomp-A12 zeigt sich, dass dort windstille Phasen ($v < 0.5 \text{ m/s}$) vergleichsweise häufig waren und Zirkulationen quer zur Talachse des Inntales eine relativ wichtige Rolle spielen. Die weiteren Untersuchungen ergeben, dass „Talquerwinde“ im Bereich der Autobahn mit sehr regelmäßigen Hangwinden im darüberliegenden Bachtal zusammenhängen, deren Vorkommen während der Wintermonate bisher nicht bekannt war. Diese Untersuchungen lassen somit den Schluss zu, dass zumindest in schneearmen Wintern im Bereich Schwaz nicht nur Talwinde, sondern auch Zirkulationen quer zur Talrichtung in direktem Zusammenhang mit Hangwindströmungen vorkommen. Es kann weiter gezeigt werden, dass die Häufigkeit des Auftretens von Hangwinden vor allem von entsprechend günstigen Strahlungs- und Geländebedingungen, aber auch von der Stabilität der beteiligten Luftmassen und (lokalen) Überlagerungseffekten durch Talwinde abhängt.

Die Luftschadstoffkonzentrationen an der Messstelle Vomp-A12 sind während der Woche durch zwei Maxima, am Morgen und am Abend, gekennzeichnet. Das morgendliche Maximum in der Immission hat während synoptisch ungestörter Lagen seine Ursache in

ausbleibenden bis sehr schwachen Winden bei gleichzeitig hoher Emission. Ab dem Vormittag gewinnen Hangaufwinde an Bedeutung, die vor allem über verstärkten Luftmassenaustausch trotz gleich bleibender Emission zum mittäglichen Minimum führen. Ab dem mittleren Nachmittag setzen Hangabwinde ein. Mit diesen verschlechtern sich die Ausbreitungsbedingungen wieder und das sekundäre Abendmaximum in der Immission entsteht. Dieses wird trotz der im Laufe der ersten Nachthälfte einsetzenden windschwachen Phasen aufgrund sehr niedriger Emission über Nacht zum Teil abgebaut.

Kapitel 1

Einleitung

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit liegt im Raum Schwaz im Tiroler Unterinntal und somit in einem typischen alpinen Längstal, in dem gebirgssynoptische Besonderheiten von ruhigen Inversionslagen bis zu turbulenten Fallwinden auftreten. Diese Phänomene sind wissenschaftlich seit mehr als 100 Jahren Forschungsgegenstand. Seit Ende der 1960iger Jahre rückte zudem die Luftschadstoffthematik in Tälern ins Blickfeld der Wissenschaft. Im Anschluss wird ein kurzer Abriss über die Geschichte der Erforschung der thermisch gesteuerten Talwindzirkulationen sowie der Schadstoffbelastung bis zum heutigen Stand (mit Schwerpunkt auf jüngerer Literatur) gegeben. Auf die Geschichte der Fallwind- bzw. Föhnforschung wird bewusst nicht eingegangen, da die Untersuchung von Föhn nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit steht. Diesbezügliche Informationen sind in Mayr (1987), in Kuhn (1989) sowie in Gohm (2003) zu finden. Eine ausführlichere Zusammenfassung über die alpinen Windsysteme (inklusive Föhn) folgt im nächsten Kapitel.

Außerdem ist zu erwähnen, dass bis in die 1980iger Jahre eine üppige Sammlung an Untersuchungen zu sehr ähnlichen Themen entstanden ist. Dieser Umstand ist wohl darauf zurückzuführen, dass die Vernetzung der Wissenschaft sich nur langsam entwickelte, also staaten- oder gar kontinentübergreifende Forschung kaum existierte. Deshalb wird die Forschungsgeschichte im Folgenden nur anhand von Beispielen skizziert und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

1.1 Über die Geschichte zum heutigen Wissensstand

Bereits Ende der 1880iger Jahre beschäftigten sich österreichische Wissenschaftler mit der Erforschung der Talwindsysteme. So stellte Hann in der Meteorologischen Zeitschrift im Jahre 1879 erste Theorien auf (Hann 1879). Zunächst waren diese Theorien nicht vollständig plausibel, wehte doch im Schweizer Oberengadin der Wind am Nachmittag talauswärts¹ - entgegen Hanns Aussagen. Billwiller konnte jedoch im Jahre 1896 in einem Artikel in der 13. Ausgabe der Meteorologischen Zeitschrift unter dem Titel „Der

¹Durch eine spezielle Anordnung der Topographie und Wechselwirkung mit einem schmalen Nebental weht im Oberengadin der sogenannte Malojawind am Nachmittag talauswärts

Thalwind des Oberengadin“ dieses außergewöhnliche Phänomen erklären und Hanns Theorien als einzig gültig bestätigen.

Im Jahre 1910 veröffentlichte schließlich der österreichische Ozeanograph und Meteorologe Albert Defant, der 10 Jahre Professor und gleichzeitig Direktor des Instituts für Meteorologie und Geophysik an der Universität Innsbruck war, sein erstes Werk zum Thema Talwindssysteme² (Defant 1910). Defant stellte die bis heute gültige Theorie auf, dass die Talwinde durch thermisch erzeugte, periodische Tagesgänge des Drucks im Alpenvorland und im Alpental angetrieben werden. Ihm gelang es erstaunlich gut, theoretische Berechnungen der Tagesgänge von Druck und Temperatur aufzustellen, wenn man an die damals kaum vorhandenen Rechenhilfen denkt.

Dem nicht genug stellte er fest, dass die Amplituden von Temperatur und Druck eine Phasenverschiebung von je nach Jahreszeit 1 bis 2 Stunden aufweisen, wobei das Temperaturmaximum (und Minimum) immer dem Druckminimum (und Maximum) vorausseilt. Durch die Ergebnisse seiner theoretischen Berechnungen erkannte Defant, dass allein Talwinde nicht effizient genug sein konnten, um derart starke Druckschwankungen in den Tälern zu verursachen. Er war sich bewusst, dass die Ursache im „Abfließen über die Berge“ zu suchen sei - also im zusätzlichen Abtransport von Masse während Sonneneinstrahlung durch die heute als Hangwinde bekannten Strömungen (Defant 1910).

In den Folgejahren wurden die Theorien verfeinert und auf die Komponenten des Talwindsystems (Talwinde und Hangwinde) eingegangen. Um 1950 erstellte Defant schließlich weitere Veröffentlichungen mit klassischen Skizzen über die Zirkulationsmuster in den Tälern (Defant 1949).

Nach einer Phase mit wenig Veröffentlichungen folgten ab Ende der 1970iger Jahre weitere Untersuchungen zur immer noch detaillierteren Erforschung und Überprüfung der grundlegenden Theorien, in denen sich neben Whiteman and McKee (1980) aus Innsbrucker Sicht vor allem Vergeiner und Dreiseitl durch eine Vielzahl an Publikationen hervor taten (z.B. Dreiseitl et al. 1980).

Gleichzeitig trat in dieser Zeit ein neues, bislang nur aus europäischen Großstädten bekanntes Problem in Gebirgsräumen auf. Die zunehmende Besiedelung von Alpentälern durch Schwerindustrie und Wohngebieten in Kombination mit ungefilterten Emissionen führte zu einem Ansteigen der Schadstoffbelastungen (die Problemstoffe waren damals andere als heute) in den Talbereichen. Frühe Veröffentlichungen dazu lieferten unter anderem Orgill (1979). Darin weist er darauf hin, dass der Bau neuer fossiler Kraftwerksanlagen im Westen der USA zu einer signifikanten Verschlechterung der Luftqualität führen werde. Um die genauen Auswirkungen abschätzen zu können, würden detaillierte Kenntnisse von Transport und Verteilung von Luftschadstoffen in strukturiertem Gelände notwendig sein.

Eine weitere Arbeit zu diesem Thema im Alpenraum veröffentlichten

²Beim Lesen dieser Literatur ist insofern Vorsicht geboten, als dass die Bezeichnungen nicht mehr mit den heutigen Übereinstimmen. So entspricht der damalige Bergwind dem heutigen Taleinwind, der Talwind dem Talauswind

Vergeiner and Dreiseitl (1982). Darin lässt sich einerseits ein ausgeprägter Umweltschutzgedanke erkennen, andererseits sind die grundlegenden Unterschiede zwischen Flachland und Alpental, also der teils schlechte horizontale Luftmassenaustausch, der unterdrückte Vertikalaustausch bei hoher Stabilität etc. in Puncto Schadstoffausbreitung bereits angeführt. Im Zuge dieser Untersuchung wurden allerdings (noch) nicht die Effekte einer Straße, sondern die eines Industriebetriebs (Blei- und Zinkhütte Arnoldstein) analysiert. Dieser Typ von Emittenten war in der damaligen Zeit der Hauptverursacher von hoher Luftverschmutzung (Vergeiner and Dreiseitl 1982). Auf die Arbeit von Vergeiner and Dreiseitl (1987) wird in Kapitel II ausführlich eingegangen.

Spätestens in den 1990iger Jahren rückte die verkehrsbedingte Schadstoffthematik speziell in Österreich und Tirol immer mehr ins öffentliche Interesse, was aus zahlreichen Studien im Auftrag von Umweltbundesamt und Landesforstdirektion zu schließen ist. Den Anfang machte hierbei eine Studie von Dreiseitl (1991), die Informationen über die Besonderheiten des Inntals auflistet. Dazu zählen neben dem Auftreten von Stauwirkungen und hohen Temperaturtagesgängen vor allem die im Vergleich zu einer Alpenvorlandstation geringen mittleren Windgeschwindigkeiten aus nur wenig verschiedenen Richtungen. So liegt etwa die mittlere Anzahl der windstillen Stunden in München bei 1 %, in Innsbruck bei 20 %. Zudem wurde der vertikale Luftmassenaustausch untersucht, dessen Effizienz eine Funktion der Stabilität ist. Tritt ein Temperaturgradient von weniger als $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (Temperaturabnahme mit der Höhe) auf oder gar ein positiver Gradient (Temperaturzunahme mit Höhe) ist der Vertikalaustausch zwischen dieser Schicht und der freien Atmosphäre unterbunden. Wie dramatisch dadurch die Schadstoffbelastung ansteigt, hängt stark von der Höhe der Inversionsgrenze ab. Je niedriger diese liegt, desto kleiner wird klarer Weise das Volumen. Allerdings kommt in einem Alpental wie dem Inntal noch die spezielle Geometrie hinzu, die die Verringerung des Luftvolumens massiv verstärkt. Recht einfach kann man sich diesen Effekt vorstellen, wenn man an den Raum Innsbruck und ein Absinken der Inversion von einer Höhe über dem Mittelgebirge (z.B. 1200m) auf eine Höhe darunter (z.B. 800m) denkt (siehe bspw. Abb.1.1). Ähnliche Effekte sind im Bereich aller Plateauzonen (Mittelgebirge um Innsbruck, Mieminger Plateau, Vomperberg,...) im Inntal zu erwarten .

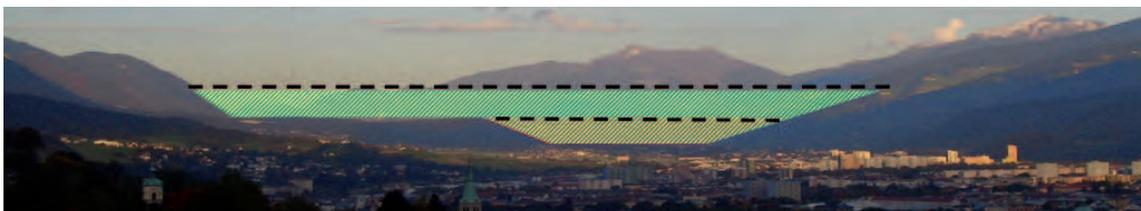


Abbildung 1.1: Vergleich von Querschnittsflächen in Abhängigkeit der Inversionshöhe im Inntal in der Höhe Wattens mit Plateau Gnadental. Bei geringerer Querschnittsfläche verringert sich auch das Luftvolumen unterhalb der Inversion drastisch.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass besonders tief liegende Inversionen typischer Weise sehr schwache horizontale Winde enthalten, also eine Kombination aus schwachem verti-

kalen und horizontalen Luftaustausch auftritt, die eine Verdünnung von Luftschadstoffen verhindert (Dreiseitl 1991).

Bereits im Folgejahr lieferten Dreiseitl and Stöhr (1992) eine weitere Publikation. Darin wird im Inntal erstmals über einen längeren Zeitraum die berechnete NO_x Emission der in Hall gemessenen NO_x Immission gegenübergestellt. Der in keiner Jahreszeit vorhandene direkte Zusammenhang führt zum Schluss, dass sowohl meteorologische als auch chemische Prozesse die Immission beeinflussen, wobei erstere Prozesse auch zweiteere beeinflussen, man also von einem System sprechen könnte, dessen Quelle die Emission ist, dessen Faktoren Parameter wie Temperatur, Strahlung aber auch Kinematik der Teilchen etc. sind. Das Endprodukt stellt die gemessene Immission dar. Durch einfache Modellierungen (Regression, Gauß) wurde versucht, die Bedeutung der einzelnen Faktoren herauszuarbeiten. Den größten Einfluss hat demnach der bodennahe vertikale Temperaturverlauf, also die Schichtung der untersten Luftmassen.

Eine weitere sehr interessante Erkenntnis (passend zur damaligen Diskussion um das Waldsterben) war die des Schadstofftransportes durch Hangwinde. Bekanntlich entwickeln sich unter Tags bei Sonneneinstrahlung in alpinen Tälern an den Hängen vertikal gering ausgedehnte Aufwinde. Diese führen dazu, dass am Vormittag mit Schadstoffen angereicherte Luft angesaugt und bergwärts transportiert wird. Dass die abtransportierten Luftvolumina zu gering waren, um einen nennenswerten Luftmassenaustausch am Talboden mit sich zu bringen, war entgegen früherer Meinungen z.B. von Whiteman and McKee (1978) bereits unumstritten (Vergeiner and Dreiseitl 1987). Um die Hangbewaldung bis in große Höhen schädigen zu können, reicht das Volumen jedoch aus, da es sich eben genau entlang des Hanges (ohne intensive Durchmischung) nach oben bewegt, sofern keine größeren topografischen Störungen vorliegen (Dreiseitl and Stöhr 1992).

Anfang der 90iger Jahre wurden schließlich in einem gemeinsamen Projekt der Alpenregionen Bayern, Tirol, Südtirol und Trentino eine umfangreiche Mess- und Modellierkampagne von Luftschadstoffen in Alpentälern durchgeführt. Dabei wird auf die besondere „Empfindlichkeit“ von Gebirgsräumen auf große Emissionseinträge hingewiesen. Außerdem wurde erkannt, dass durch die gebirgssynoptischen Zirkulationsmuster Schadstoffe transportiert und durch atmosphärenchemische Prozesse umgewandelt werden. Ebenso konnten die Wechselwirkungen von Ozon mit Stickoxiden und VOC gezeigt werden (Schlager and Graf 1993).

Im Jahre 1995 veröffentlichte die Landesforstdirektion eine weitere Studie, in der zum ersten Mal in aller Deutlichkeit auf die Problematik des begrenzten Tiroler Lebensraumes (nur 13 % der Fläche Tirols ist besiedelbar), den eine internationale Transitroute durchzieht, hingewiesen wurde. Zu den bereits bekannten meteorologischen Besonderheiten wird noch ein weiterer wichtiger Aspekt ergänzt. Bezüglich des Tagesganges der Konzentration von Stickoxiden wird festgestellt, dass die Belastungen in der Nacht hoch sind und am Morgen ihre Spitze erreichen. Bereits im Jahre 1995 wird daher darauf aufmerksam gemacht, dass Maßnahmen, die zur Verringerung der Emission in der Nacht

führen, besonders sinnvoll sind. Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass in dieser Untersuchung auch auf Probleme mit sehr hohen Ozonkonzentrationen im Sommer hingewiesen wird, die wiederum aufgrund von chemischen Reaktionen in Wechselwirkung mit der Stickoxidkonzentrationen stehen (Pack and Stöhr 1995).

Gegen Ende des Jahrzehnts traten dann vor allem in den Wintermonaten höher denn je belastete Zeiträume im Inntal auf, die neuerlich zu intensiver Forschungstätigkeit bis in die Gegenwart angeregt haben. Den Anfang bildete eine Studie von Wotawa et al. (2000) über die verkehrsbedingte Stickoxid-Belastung im Inntal, bei der ein weiteres Mal die Zusammenhänge zwischen Emission, Meteorologie, Topographie und Immission im Mittelpunkt standen. Dabei wurde im wesentlichen eine Erkenntnis, die Dreiseitl und Stöhr bereits 1991 darlegten, bestätigt. Demnach ist es speziell in der kalten Jahreszeit nicht möglich ist, allein Emission und Immission zu betrachten, da hier die Korrelation äußerst gering ausfällt. Nicht einmal die zusätzliche Einbeziehung von Windgeschwindigkeit und Temperaturgradienten konnte zufrieden stellende Ergebnisse liefern.

Eine entscheidende Weiterentwicklung im Vergleich zu bisherigen Arbeiten liefert erst die Einbringung der Schadstoffkonzentration der letzten 24 Stunden, was klar macht, dass während der typischen winterlichen Atmosphärenverhältnisse die Vorbelastung/Persistenz von belasteten Luftmassen einen entscheidenden Effekt ausmacht.

Die für diese Untersuchung verwendeten Daten stammen von mehreren Verkehrszählstellen und hinsichtlich Luftgüte von den Stationen Hall und Gärberbach. Die Station Vomp wurde erst im Jahre 1997 installiert und lieferte ab 1998 ganzjährige Datensätze. Die Autoren der Studie wiesen aber bereits darauf hin, dass in Vomp noch höhere Werte als in Hall, wo bezüglich NO_2 zeitweise die damals noch geltende Smogalarm-Grenze erreicht wurde, beobachtet wurden. Interessant ist weiter die Erkenntnis, dass hohe NO_2 -Konzentrationen im Sommer oft auf Advektion von Ozon aus größeren Höhen und nachfolgende chemische Reaktionen (werden im Laufe der Arbeit noch behandelt) zurückzuführen sind (Wotawa et al. 2000).

Die erste ausführliche Untersuchung, in die Daten der Messstelle Vomp A12 eingingen, war jene von Thudium and Kocsis (2000). Die Messstelle wird darin aufgrund ihrer Lage als äußerst aussagekräftig hinsichtlich der Emission der Inntalautobahn beschrieben. Weiter werden in dieser Studie zum ersten Mal meteorologische Bedingungen an der Messstelle Vomp sehr detailliert untersucht. Im Abschnitt 4.2 gehen die Autoren ausführlich auf die Rolle verschiedenen Winde bezüglich Schadstoffkonzentration ein. Dazu wurde zuerst eine Häufigkeitsverteilung der über eine Jahreszeit (Herbst und Frühjahr wurden zusammengefasst) gemittelten Windrichtungen in Abhängigkeit der Tageszeit errechnet³. Das Ergebnis zeigt, dass im Winter Talauswinde (in der Studie als Abwinde bezeichnet) zeitlich dominieren, jedoch höhere Windgeschwindigkeiten bei Taleinwinden auftreten (von Defant bereits 1910 in Bozen beobachtet). Zudem treten laut Studie über die Mittagszeit relativ häufig interessante Querwindzirkulationen (aus südlicher Richtung)

³Nachdem sich diese Arbeit nur den Verhältnissen im Zeitraum der höchsten Belastungsphase widmet, also den Wintermonaten, wird im folgenden nur auf die Ergebnisse in dieser Zeitspanne eingegangen

auf, die die Autoren auf die differentielle thermische Erwärmung der Talatmosphäre zurückführen. Quercirkulationen aus nördlichen Richtungen werden auf Kaltluftausfließen aus dem Vomperloch⁴ zurückgeführt (Thudium and Kocsis 2000).

In den Folgejahren wurden weitere Untersuchungen von Schadstoffkonzentration und Meteorologie im Inntales durchgeführt, darunter einige Diplomarbeiten am IMGI. Z.B. entwickelte Grießer (2003) ein Modell zur Simulierung der Immission. In einer weiteren Arbeit untersuchte Schnitzhofer (2005) die meteorologischen Ursachen von Schwankungen in der Luftschadstoffbelastung im Bereich der A12 in Vomp, wobei neben Stickoxiden (NO_x), Kohlenmonoxid (CO) und Feinstaub (PM10) temporär auch die Konzentration der VOC gemessen wurde. Bezüglich Schadstoffquellen konnte u.a. gezeigt werden, dass ein Großteil des Stickstoffmonoxids (NO) vom Schwerverkehr auf der Autobahn stammt. Bezüglich Meteorologie stellte Schnitzhofer (2005) fest, dass im Winter die Ausbreitungsbedingungen für Luftschadstoffe schlecht sind und nur Frontdurchgänge für einen Luftmassenaustausch sorgen. Außerdem gelang es (für einen Tag) erstaunlich gut, die NO Konzentration unter alleiniger Berücksichtigung von Emission aus dem Schwerverkehr und Schichtung der Talatmosphäre zu modellieren.

ALPNAP, INNAP, INNOX

Den bisherigen Höhepunkt der Forschungsaktivitäten und im Besonderen der Messtätigkeit stellten die im Winter 2005/06 gleichzeitig durchgeführten Projekte ALPNAP⁵, INNAP und INNOX dar. In der Folge beschäftigte sich Wittig (2007) in ihrer Arbeit in Fallstudien mit den Einflüssen der Großwetterlage auf die Talatmosphäre im Inntal. Zudem wurden an unterschiedlichen Orten Korrelationen zwischen Schadstoffkonzentrationen (NO_x, O₃, PM10, CO) und Temperatur bzw. Windgeschwindigkeit errechnet, die alle samt nur schwache Zusammenhänge lieferten. Ein weiterer Untersuchungsgegenstand war die Abnahme der Schadstoffbelastung mit der Entfernung zur Quelle (in diesem Fall die Inntalautobahn). Hier konnte gezeigt werden, dass jene Stoffe, die nicht direkt emittiert sondern erst durch chemische Reaktionen gebildet werden (speziell NO₂), ihre höchsten Konzentrationen oft erst in einiger Entfernung zur Autobahn erreichen.

Harnisch (2007) konnte aus flugzeuggetragenen Aerosolmessungen sehr aussagekräftige Abbildungen erstellen, die zeigen, dass die Talatmosphäre des Inntals im Raum Schwaz am frühen Morgen in mehrere Schichten mit hohen Aerosolkonzentrationen im untersten Niveau unterteilt ist. Im Laufe eines strahlungsreichen Tages beginnen Hangwinde am Sonnenhang aerosolreiche Luft von der untersten Schicht nach oben zu transportieren,

⁴Die These der Autoren, dass nördliche Winde aus dem Vomperloch stammen (Kaltluftausfluss) scheint topographisch nicht erklärbar. Nördlichen Winde müssten aus dem sogenannten Bachtal wehen.

⁵An dieser Stelle soll nicht auf die Projektorganisation und auf alle Forschungsbereiche/ergebnisse (siehe hierzu www.alpnap.org oder Heimann et al. 2007) eingegangen werden, sondern lediglich auf jene, die mit dieser Arbeit in Zusammenhang stehen

wogegen am Schattenhang und in der Talmitte aus Kontinuitätsgründen Quercirkulationen und leichtes Absinken weniger belasteter Luft auftreten. Somit existieren einerseits Asymmetrien in der Talatmosphäre, andererseits kommt es auch an Tagen, an denen die Inversion nicht vollständig aufgelöst wird während der höchsten Energieeinträge am Sonnenhang zu einem Vermischen von Luftmassen vor allem zwischen den unteren Schichten. Allerdings war dieser Effekt in der gezeigten Fallstudie zu schwach, um die Aerosolbelastung in Bodennähe durch Einmischung von Frischluft nachhaltig zu verringern (Bestätigung der Aussagen in der Arbeit von Dreiseitl and Stöhr 1992). Es konnten wahrscheinlich nur wenige Luftpakete das Kammniveau und somit in die freie Atmosphäre entweichen. Der Großteil wurde über die erwähnten internen Zirkulationsprozesse nur innerhalb der „Grenzschicht“ (als Obergrenze ist hier der Übergang zur freien Atmosphäre gemeint) verteilt. Ab dem Nachmittag begann sich die Talatmosphäre wieder vollständig und massiv zu stabilisieren und die einzelnen „Lücken in den Inversionsdeckeln“ schlossen sich (Harnisch 2007).

Eine ähnliche, diesmal lokale Untersuchung wurde im Zuge von Alpnap in Schwaz mittels Ballonsondierungen der untersten Atmosphäre im Bereich des ehemaligen Sportplatzes durchgeführt. Dabei wurde die Konzentration einer speziellen Aerosolart, nämlich der des Feinstaubes, neben anderen, meteorologischen Parametern, zu unterschiedlichen Tageszeiten gemessen. Die Ergebnisse sind den Aerosolmessungen mittels Flugzeug ähnlich. Die Feinstaubbelastung nahm in der Früh und am Morgen in den untersten 100m von einem Maximum am Boden beginnend stark und darüber bei sehr geringen Konzentrationen langsam gegen Werte nahe 0 ab. Zu Mittag wurde eine homogene Feinstaubkonzentration bis ca. 130m über Grund gemessen, die dann sprunghaft zurückging. Diese untersten 130m sind durch einen nahezu isothermen Temperaturverlauf mit der Höhe, begrenzt durch eine massive Inversion („capping inversion“), gekennzeichnet. Sodarmessungen, Modellierungen und Berechnungen der Stabilität anhand von Hangprofiltemperaturmessungen bestätigen, dass die stabile unterste Schicht während der Mittagszeit kurz aufbricht und Mischungsvorgänge auftreten (Heimann et al. 2007; Lehner 2008).

Staszewski (2008) beschäftigte sich in einer ergänzenden Arbeit mit der räumlichen Verteilung von Feinstaub in Bodennähe, die mittels mobilen Messgeräts im Gemeindegebiet von Schwaz und Vomp ermittelt wurde. Er konnte durch mehrere Fallstudien aufzeigen, dass die Feinstaubkonzentration neben der Quellstärke stark von der thermischen Stabilität abhängt. Zudem stellte er ähnlich wie Harnisch (2007) fest, dass es nicht zwingend notwendig ist, eine vorhandene Inversion komplett aufzulösen, um hohe Feinstaubbelastung am Talboden zu verringern. Vielmehr führt bereits ein Anheben der Inversion bzw. eine Labilisierung unterhalb der Inversion (etwa in Bodennähe oder am Sonnenhang) zu einer Durchmischung von Luftmassen und somit zur Verteilung des Feinstaubes auf das gesamte Luftvolumen unterhalb der Grenzschicht.

Das Vertikalprofil von Temperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit und Feinstaubkonzentration, das mittels Ballonsondierungen gemessen wurde, verwendete Kollmann (2008), um Informationen über Stabilität und Mischungsschichthöhe zu erlangen. Dabei verglich

er verschiedene Methoden zur Berechnung der Mischungsschicht aus den Gradienten der berechneten Größen und erhob die jeweiligen Stärken und Schwächen. Allgemeine Probleme mit der Festlegung der Mischungsschichthöhe treten dann auf, wenn die Talatmosphäre in mehrere Schichten unterteilt ist und wenn die Höhe der Ballonsondierung zu gering ist, um Zonen mit intensiven Gradienten zu erfassen.

Lehner (2008) versuchte mit einem zweidimensionalen, numerischen Modell, das für winterliche Bedingungen während des Tages optimiert wurde, Schadstofftransporte entlang des Hanges zu simulieren. Dabei zeigte sich unter anderem, dass Hangaufwinde aufgespalten und zu einem Teil horizontal Richtung Talmitte abgelenkt werden, wenn sie auf sehr stabil geschichtete, vom Boden abgehobene Übergangszonen (Inversionsgrenzen) treffen. Des Weiteren unterbinde eine hohe Albedo (Schneebedeckung) die Entwicklung von Hangaufwinden. Hinsichtlich Modell konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse stark von den verwendeten Parametrisierungen abhängen.

Emeis et al. (2007) beschäftigten sich mit der Untersuchung der Schichtung der Talatmosphäre mittels optischer und akustischer Fernerkundungsverfahren. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Talatmosphäre im Inntal im Raum Schwaz während wolkenarmer Winternächte in mehrere Schichten unterteilt ist.

Schäfer et al. (2008) untersuchten schwerpunktmäßig die Ursachen für die Schwankungen und teils sehr hohen Konzentrationen von Stickoxid und Feinstaub im Winter 2005/06. Die Gründe liegen demnach im sehr kalten Winter mit ausgeprägten Kaltluftschichten in der Talatmosphäre des Inntals während Hochdruckphasen. Bei Frontdurchgängen und Föhn zeigten sich an der Talsohle niedrigere Immissionen, wogegen am Hang höhere gemessen wurden. Die Autoren führen diesen Umstand u.a. auf die Hangwindzirkulation zurück. Außerdem konnte aufgezeigt werden, dass es im Messgebiet nicht nur im Jahresmittel eine Überschreitung des Stickstoffdioxidgrenzwerts gab, sondern sogar halbstündliche Grenzwerte häufig überschritten wurden. Ebenso stellte sich im Vergleich zu früheren Messungen heraus, dass der Anteil von NO_2 am NO_x aufgrund der zunehmenden direkten Emission im Steigen begriffen ist.

Auf diese Untersuchungen aufbauend wurden im Winter 2007/08 weitere Messungen durchgeführt. Erste Auswertungen konzentrierten sich dabei wieder auf die Zusammensetzung von NO_x und auf den Vergleich der Winter 2005/06 und 2007/08. Das mittlere Verhältnis von NO_2/NO_x lag dabei bei 0.3. Das relativ geringe Verhältnis wird auf den hohen Anteil an Schwerverkehr am Gesamtverkehr zurückgeführt. Hinsichtlich des Vergleichs zeigte sich, dass während des Winters 2007/08 trotz ähnlichem Verkehrsaufkommen auf der A12 wesentlich geringere Immissionen gemessen wurden. Die Ursache dürfte im wesentlich milderen und sehr schneearmen Winterverlauf liegen (Schäfer et al. 2008).

In der bislang aktuellsten Veröffentlichung beschäftigten sich Gohm et al. (2009) mit Schadstofftransporten in einem Alpental. Dazu wurden Messdaten (von bodengebunden Messsystemen und Vertikalsondierungen mittels Flugzeug), die im Zuge der erwähnten Projekte im Winter 2005/06 gesammelt wurden, verwendet. Dabei wurde festgestellt,

dass es drei wesentliche Transportmechanismen gibt. Diese sind Dichteströmungen, Talwinde und Hangwinde. Entscheidend für deren Ausprägung und in weiterer Folge für die Transporte ist dabei die Topographie. So können erstens Asymmetrien im Talquerschnitt aufgrund von unterschiedlicher kurzweiliger „Strahlungsausbeute“ z.B. zwischen Sonnen- und Schattenhängen entstehen, zweitens ist speziell bei sehr stabiler Schichtung kleinräumig mit einer sehr großen Variabilität in der Schadstoffkonzentration zu rechnen. Das bedeutet wiederum, dass es in komplexem Gelände nicht möglich ist, mit bodengebundenen Punktmessungen stichfeste Aussagen über größere Gebiete zu treffen.

Zusammengefasst konnte in den Untersuchungen auf verschiedene Arten gezeigt werden, dass die Stabilität (nicht nur in Talmitte) und die damit verbundene Möglichkeit der Ausbildung von Turbulenz und Durchmischung entscheidende meteorologische Einflüsse auf die Schadstoff- bzw. Aerosolkonzentration ausüben. Erstmals konnten zudem mittels komplexer Messverfahren die Asymmetrien, die sich während eines strahlungsreichen Tages in Verbindung mit den auftretenden Hangwindzirkulationen innerhalb des Talquerschnitts ausbilden, bildlich anhand von Messdaten dargestellt werden.

Neben den Forschungsaktivitäten hinsichtlich Meteorologie und Immission wurden auch über die Quellen der verschiedenen Schadstoffe umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Im Folgenden sollen nur die wichtigsten Erkenntnisse daraus als Grundlage für spätere Analysen im Rahmen dieser Arbeit erwähnt werden. Nachdem bezüglich Schadstoffen im Winter 2007/08 das Interesse auf Stickoxiden und Feinstaub lag, ist die Erkenntnis wichtig, dass die Hauptemissionsquelle von Stickoxiden im Verkehr zu finden ist, wogegen beim Feinstaub sehr lokale Quellen wie Hausbrand oder Industrieabgase berücksichtigt werden müssen.

An der Messstelle an der A12 in Vomp wird folglich die Konzentration der Stickoxide vom Verkehrsfluss auf der Autobahn massiv beeinflusst. So spiegeln sich Verkehrsspitzen in zeitlich leicht verschobenen Konzentrationsspitzen wider. Der Einfluss von nicht dem Verkehr zuzuordnenden Quellen ist hingegen beim Feinstaub auch an der Autobahnmessstelle ersichtlich. Daraus ergibt sich der weitere grundlegende Unterschied, dass die Stickoxidkonzentration mit zunehmendem Abstand zur Hauptemissionsquelle (A12) nahezu exponentiell abnimmt (Heimann et al. 2007, Abb. 7.21, S. 182). Im Gegensatz dazu treten beim Feinstaub immer wieder kleinräumige Maxima auf (etwa im Stadtgebiet von Schwaz), wie die mobilen Feinstaubmessungen gezeigt haben (Heimann et al. 2007; Staszewski 2008). Abschließend soll hier noch erwähnt werden, dass bei den Stickoxiden chemische Umwandlungsvorgänge berücksichtigt werden müssen, beim Feinstaub chemische Bildungsprozesse („sekundäre Nitrate“). Auf diese Reaktionen wird in Kapitel 2 eingegangen.

1.2 Fragestellung

Dieser Diplomarbeit liegt ein Messprojekt zugrunde, bei dem im Raum Schwaz sowohl meteorologische als auch luftschadstoffbezogene Messungen durchgeführt wurden (siehe Kapitel 3). Das Konzept dieser Arbeit war darauf ausgelegt, mit den im Messprojekt gewonnenen Daten folgende gebirgssynoptische und darauf aufbauend luftschadstoffbezogene Fragestellungen zu beantworten:

1. Welche Windrichtungen werden an verschiedenen Standorten registriert?
2. Wie können die Windrichtungen gewissen Windarten (Talwind, Talquerwind, Föhn) zugeordnet werden?
3. Wie häufig und zu welchen Tageszeiten treten gewisse Windarten (typischer Weise) auf?
4. Gibt es an einer oder mehreren Stationen ein Windsystem quer zur Talachse des Inntales?
5. Welche Prozesse treiben die verschiedenen Windarten an?
6. Wie wirken sich Windsysteme auf die NO_x-Konzentrationen an der Messstation östlich der Autobahnraststätte an der A12 in Vomp aus?
7. Werden die dortigen Messungen von Hangwindzirkulationen u.a. aus dem nahe gelegenen Bachtal beeinflusst?
8. Wie sind typische Tagesgänge der NO_x-Konzentration zu erklären?
9. Gibt es Tagesgänge, die sich aus nicht emissionsbedingten Gründen deutlich von den mittleren Verhältnissen unterscheiden und wenn ja, woraus resultieren sie?

1.3 Inhaltsüberblick

In Kapitel 2 werden die wichtigsten Grundlagen alpiner Windsysteme und atmosphären-chemischer Prozesse hinsichtlich Reaktionen Stickoxid und Feinstaub dargestellt.

In Kapitel 3 wird zunächst über die Topographie von Schwaz und seiner Umgebung informiert. Anschließend werden alle Messstandorte aufgelistet und die dortigen Messgeräte beschrieben. Abschließend werden Informationen über die vor Beginn der Auswertungen durchgeführten Qualitätskontrollen bezüglich der Messdaten angeführt.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse präsentiert und gleich anschließend interpretiert, um das Nachvollziehen der Überlegungen durch die Nähe von Abbildung zu Analyse zu

erleichtern.

Zu Beginn des Kapitels wird dabei ein kurzer Überblick über den Winter gegeben. Im nächsten Schritt werden im ersten Hauptteil der Arbeit die gemessenen Windsysteme beschrieben und diskutiert. Der zweite Hauptteil widmet sich anschließend dem Einfluss der verschiedenen Windarten auf die Immission an der Messstation östlich der Autobahnraststätte an der A12 in Vomp.

In Kapitel 5 werden zunächst die wichtigsten Erkenntnisse, die im Rahmen der Datenauswertung erhoben werden konnten, präsentiert und mit früheren Arbeiten verglichen. Anschließend werden Ideen für zukünftige Intensivmessphasen bzw. zur Erweiterung des permanenten Messnetzes vorgestellt.

Im Anhang werden schließlich zu verschiedenen Punkten Zusatzinformationen geliefert, auf die aus Gründen der Übersichtlichkeit im Hauptteil der Arbeit verzichtet wurde.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Alpine Windsysteme

Das Windsystem in Gebirgen besteht im wesentlichen aus den Windarten Talwind, Hangwind und Fallwind (Föhn) und kann in Hinblick auf den Antrieb in zwei Strömungstypen unterteilt werden: In kleinskalig thermisch oder großskalig synoptisch provozierte Strömungen. Dabei werden die synoptisch direkt induzierten Gradientwinde im Tal mehr oder weniger stark modifiziert (z.B. durch Kanalisation, durch notwendiges Absinken, diabatische Erwärmung/Abkühlung,...).

Einen Grenzfall zwischen den zwei Antriebsarten stellt der so genannte seichte Föhn, auf den später noch eingegangen wird, dar. Zudem treten häufig Synoptik und lokale Thermik gemeinsam auf und führen zu positiven und negativen Rückkoppelungseffekten (Vergeiner and Dreiseitl 1987).

In früheren Arbeiten ist es bereits gelungen, die Eigenschaften der einzelnen Windsysteme so genau zu erforschen, dass eine Unterscheidung zwischen den Windarten in vielen Fällen möglich ist. Nachdem diese Unterscheidung ein wichtiger Schritt im Rahmen dieser Arbeit sein wird, soll im Folgenden auf die Windarten (Talwind, Hangwind, Fallwind) und ihre Eigenschaften eingegangen werden, um bei der Datenauswertung entscheiden zu können, nach welchen Kriterien eine Zuteilung einer gemessenen Windgeschwindigkeit samt Richtung zu einer Windart möglich ist. Gleich vorweg muss festgehalten werden, dass sich die Trennung der Windarten in der Praxis ohne genaue synoptische Analyse wesentlich schwieriger gestaltet, da man nur von einer begrenzten Anzahl an meteorologischen Parametern Messwerte besitzt, die zudem nur wenige Messpunkte abdecken.

Beispiel:

Um sich diese Schwierigkeiten vorstellen zu können, braucht man nur an Föhn und Talauswind denken. Beide Winde wehen im Inntal bei Schwaz aus derselben Richtung. Zudem kann Föhn den Talauswind nur antreiben (so genannter vorföhniger Westwind), ohne dass er selbst bis zum Talboden durchgebrochen ist - eine alleinige Betrachtung der Windrichtungen im Tal und am Patscherkofel wird also nicht reichen. Wetterkarten helfen auch nur wenig weiter, da sie erstens nicht automatisch mit den übrigen Messwerten verarbeitet werden und zweitens keine exakte

Auskunft geben können, ob bspw. der Föhn ins Tal durchbricht oder nicht (ihre Verwendung wird im Wesentlichen im Zuge der Überprüfung der Ergebnisse nach Plausibilität stattfinden, z.B. Südfohn bei Nordostanströmung unmöglich).

2.1.1 Tal- und Hangwinde

Tal- und Hangwinde gehören zu den regional angetriebenen Windsystemen. Beide entstehen mehr oder weniger direkt durch differentielle Erwärmung von Luftmassen in einem Tal. Trotzdem weisen sie unterschiedliche Merkmale auf, die nun zunächst einzeln genauer beschrieben und anschließend zusammengefasst in Form einer Tabelle gegenübergestellt werden.

2.1.1.1 Talwinde

Die direkten Antriebe der Talwinde sind periodische, horizontale Druckdifferenzen zwischen dem Alpenvorland und dem Talinneren. Warum treten jedoch bei gleichen synoptischen Bedingungen Druckunterschiede auf? Dafür gibt es mehrere Gründe. Die wichtigste Ursache ist der sogenannte „Volumseffekt“ (siehe Abb. 2.1). Damit ist gemeint, dass das Luftvolumen um und über einer inneralpiner Station bis zum Kammniveau kleiner ist als jenes über einer Station im Flachland. Das hat zur Folge, dass unter Tags im Tal die gleiche Menge an Energie zur Erwärmung von weniger Luft zur Verfügung steht bzw. nachts weniger Luft abgekühlt wird. Folglich steigen bei Sonneneinstrahlung die Temperaturen z.B. in Innsbruck schneller und stärker als in München, wogegen sie in der Nacht schneller sinken. Das bedeutet, dass die Tagesgänge der Temperatur in Innsbruck im Mittel größer als in München sind ($\Delta\bar{T}_{IBK} > \Delta\bar{T}_{MUEN}$).

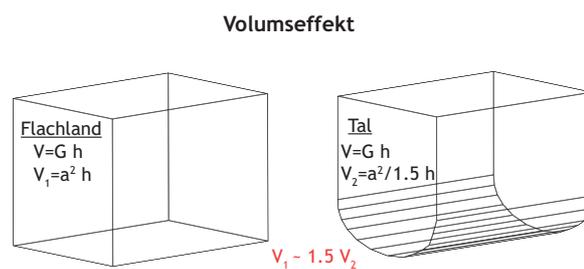


Abbildung 2.1: Vergleich des Luftvolumens über einem Ort im Flachland und in einem Tal.

Allerdings haben Messungen gezeigt, dass der theoretisch berechnete Volumseffekt allein nicht die gesamte Differenz der Tagesgänge ($\Delta T_{IBK} - \Delta T_{MUEN}$) erklären kann. Es muss also noch andere Gründe geben, die unter Tags zur vergleichsweise starken Erwärmung der Luft in einem Tal führen. Der Schlüssel zur Ergründung dieser liegt wiederum in der Betrachtung der Topographie, genauer gesagt jener Flächen, die als Heizung für die Luft dienen. Während nämlich im Flachland fühlbare Wärmeströme einzig von unten für die Energieübertragung sorgen, wird die Luft in Tälern durch Hänge lokal auch in größeren

Höhen erwärmt. Vereinfacht kann man sich vorstellen, dass in einem Alpental neben dem Fußboden je nach Sonneneinstrahlung auch Teile der Wände beheizt sind, sobald die Sonne scheint. Allein dadurch würde folglich die Erwärmung schneller von statten gehen (in der Nacht werden bei klarem Himmel die Heizflächen zu Kühlflächen). Um die Größenordnung dieses Effekts genauer einschätzen zu können, entwickelte Steinacker 1984 (für das Inntal) die so genannte „Flächenhöhenverteilung“, die Auskunft darüber gibt, wie viel (Heiz-/Kühl-)Fläche pro Höhenzone vorhanden ist (Steinacker 1984).

Einen weiteren Beitrag zum größeren Tagesgang kann eine Abtrennung der Talatmosphäre in zwei oder mehrere Schichten, die separat von den Hängen beheizt werden, liefern (Vergeiner and Dreiseitl 1987).

Im Zuge der Diskussion über Temperaturschwankungen haben vor allem Vergeiner and Dreiseitl (1987) auch die Mitteltemperatur innerhalb der Grenzschicht untersucht, da höchstens ein Vertikalprofil der Temperatur pro Tag (Radiosondenaufstieg Flughafen IBK) vorliegt. Die so genannte „barometrische (virtuelle) Mitteltemperatur“ lässt sich mit Hilfe der hydrostatischen Gleichung und der Zustandsgleichung für ideale Gase herleiten (Vergeiner and Dreiseitl 1987; Pichler 1997):

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial z} &= -g \cdot \rho \\ \rho &= -\frac{\partial p}{\partial z} \cdot \frac{1}{g}\end{aligned}\quad (2.1)$$

$$p \cdot \frac{1}{\rho} = R_L \cdot T \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}\frac{dp}{p} &= -\frac{g}{R_L} \cdot \frac{dz}{T} \quad / \int \\ \ln \frac{p_2}{p_1} &= -\frac{g(z_2 - z_1)}{R_L \bar{T}}\end{aligned}$$

$$\bar{T} = \frac{g(z_2 - z_1)}{R_L \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}} \quad (2.3)$$

g steht in der Gleichung für die Schwerkraft, R_L für die Gaskonstante der trockenen Luft. Dreiseitl und Vergeiner verwenden für den Druckwert $p_2(z_2)$ Messdaten der Zugspitze.

Warum ist jedoch diese relativ ausführliche Diskussion der Temperaturgegensätze in Hinblick Winde gerechtfertigt?

Der Grund liegt darin, dass Temperatur und Druck eng miteinander verbunden sind. Jede Temperaturstörung bewirkt auch eine Druckstörung. Daher baut sich unter Tags ein positiver Temperatur- und Druckgradient (Druckgradient = $-\nabla p$; Definition nach Pichler 1997, S. 16) von München nach Innsbruck auf. In der Nacht findet ein Vorzeichenwechsel statt. Genau diese Druckgradienten sind wie angedeutet der direkte Antrieb der Talwinde ($p_{IBK} < p_{Muenchen} \Rightarrow$ positiver Druckgradient von München nach Innsbruck \Rightarrow Taleinwind).

Man könnte sich nun fragen, wann der Talwind, dessen Zweck der Ausgleich der Temperatur/Druckstörung ist, die Gradienten auflöst. Dazu halten Vergeiner and Dreiseitl (1987) fest, dass der Talwind sein Ziel bei weitem nicht erreicht, weil die Strömung von der Reibung gehemmt wird. Gerade deshalb treten im Bereich von Engstellen in Tälern die stärksten Gradienten auf, weil dort die Strömung beschleunigt wird und folglich die Reibung (sogar annähernd quadratisch) zunimmt (Vergeiner and Dreiseitl 1987, S.284). Man darf auch nicht vergessen, dass an den Hängen mit den Hangwinden laufend Masse abtransportiert wird, solange Sonnenbestrahlung gegeben ist. Die endgültige langsame Aufhebung der Temperatur- und Druckunterschiede bzw. deren Umkehr bewirkt erst der Sonnenuntergang, wobei das Talwindssystem träge ist und zeitverzögert reagiert. So kann es vorkommen, dass trotz bereits vorhandener Hangabwinde (diese reagieren sehr schnell auf Umgebungseinflüsse) noch leichtes Einfließen auftritt.

In der Praxis wird das Talwindssystem oft von synoptischen Effekten beeinflusst und modifiziert, doch gerade im Winter ist die Wahrscheinlichkeit für relativ ungestörte Bedingungen verhältnismäßig hoch (Vergeiner and Dreiseitl 1987; Haiden 2005; Heimann et al. 2007). Zur späteren Untersuchung des Antriebes des Talwindsystems wird noch die „barometrische Höhenformel“ benötigt. Sie ermöglicht es, Drücke auf eine Einheitsfläche mit konstantem z -Wert zu reduzieren und lautet (Kraus 2004):

$$p(z_0) = p(z_1) \cdot \exp\left(\frac{g(z_1 - z_0)}{R_L \cdot \bar{T}}\right) \quad (2.4)$$

Die Gleichung ist im Vergleich zum Original hinsichtlich Vorzeichenkonvention leicht abgewandelt. z_1 steht dabei für die Höhe, in der die zu reduzierende Druckmessung durchgeführt wurde, z_0 für das Referenzniveau, für das der Druck berechnet werden soll. R_L ist die spezifische Gaskonstante für trockene Luft. \bar{T} steht für die mittlere Temperatur in der Luftschicht zwischen den beiden Höhen, da bei dieser Variante der barometrischen Höhenformel als Vereinfachung eine isotherme Atmosphärenschichtung angenommen wird (Kraus 2004).

2.1.1.2 Hangwind

Nach dem Talwind soll nun der Hangwind beschrieben werden, der im Gegensatz zum Talwind sehr schnell auf Umgebungseinflüsse reagiert. Vergeiner and Dreiseitl (1987), S.271 beschreiben ihn als das „kleinskalige Ende eines ganzen Spektrums thermisch angetriebener lokaler Zirkulationen...“. Zur möglichst verständlichen Beschreibung des Hangwindes ist es nötig, zwischen Hangauf- und Hangabwind zu unterscheiden. Bei beiden spielen zwar Strahlungsflüsse eine wichtige Rolle, doch sind ihre Merkmale teils gegensätzlich.

Hangaufwind (anabatischer Wind)

Der Antrieb des Hangaufwindes ist die Sonneneinstrahlung auf die Hangoberfläche, welche je nach Albedo und Hangneigung (Einfallswinkel der Strahlung) mehr oder weniger stark

aufgeheizt wird. Dadurch bildet sich meist innerhalb weniger Minuten ein fühlbarer Wärmefluss vom Hang in die angrenzenden Luftmassen, die sich dadurch erwärmen ($\Theta_{\text{Hangluft}} \neq \text{const}$, deshalb anabatischer Wind) und deren Dichte sich reduziert. Dies hat zwei Folgen: Erstens reduziert sich der Druck direkt über dem Hang, wodurch sich ein Druckgradient zum Hang ausbildet. Zweitens ist das Luftpaket leichter als die Umgebung in einiger Entfernung vom Hang. Das resultierende Kräftepaar (ohne Reibung), das auf das Luftpaket wirkt, hat schließlich eine hangparallele Aufwärtsbewegung zur Folge, sofern die Kräfte ausgewogen sind und die Topographie relativ homogen ist.

Nachdem dieser Vorgang mit einer Labilisierung der Luft einhergeht, darf man nicht annehmen, dass dieser anabatische Wind als kontinuierlicher Luftstrom mit scharfer Obergrenze auftritt. Vielmehr besteht er aus einzelnen Luftblasen, die sich in Bodennähe lösen und hochgradig turbulent nach oben strömen. In der Praxis kann dieses oben nicht nur hangparallel bedeuten, sondern auch senkrecht, insbesondere bei wenig stabiler Schichtung und bei sehr steiler Topographie bzw. Absätzen (vgl. Seegrube Innsbruck). Diese bewirken eine Ablösung des Hangaufwindes (Rafelsberger 2007). Jedenfalls kommt es im Bereich des Übergangs von Hangwindenschicht zur „normal“ temperierten Talatmosphäre zu Durchmischungsvorgängen mit Entrainment und Detrainment. Dadurch wird je nach Schichtung ein gewisser Anteil an Energie an die Talatmosphäre abgegeben.

Positiv wirken sich abschließend zusammengefasst also eine leicht stabile Schichtung (sonst Ablösung vom Hang) der Talatmosphäre und eine geringe Albedo (z.B. bei braun-gebrannten Hängen im Herbst) auf den Hangaufwind aus. Da in diesem Fall das Interesse dem Winter gilt, kann festgehalten werden, dass öfters auch tagsüber stabile Schichtungen während Hochdruckphasen auftreten, es jedoch zu einer massiven Erhöhung der Albedo kommen kann, wenn Hänge und/oder Wälder schneebedeckt sind. Nicht vergessen darf man jedoch, dass sich der tiefe Sonnenstand auf die effektive Strahlungsflussdichte bzw. die Energiebilanz der Hänge positiv auswirkt, da der Winkel der Sonneneinstrahlung nahe 90 Grad liegt. Dies kann speziell bei dunklem Untergrund (Felsen, Wald) zu Rückkoppelungseffekten mit der Albedo führen, weil der Schnee schneller schmilzt (siehe auch Gohm et al. 2009).

Hangabwind (katabatischer Wind)

Auch beim Hangabwind spielt der fühlbare Wärmefluss eine wichtige Rolle. Bei trockener Atmosphäre kühlt sich in der Nacht die Oberfläche durch eine negative langwellige Strahlungsbilanz ab. Als Ausgleich tritt ein fühlbarer Wärmefluss von der Luft oberhalb des Hanges zum Hang hin auf. Die Luft gibt also Energie in Form von Wärme ab. Dadurch sinkt ihre Temperatur und die Dichte erhöht sich. Folglich wirken auf das Luftpaket die Druckgradientkraft vom Hang weg und die Schwerkraft senkrecht nach unten. Die resultierende Bewegung verläuft dem Hang entlang talwärts. In diesem Fall ist die Strömung viel weniger turbulent, kontinuierlich und die Grenze der Hangwindenschicht schärfer. Das Abfließen der kalten, schweren Luft (Eigenschaft eines katabatischen Windes) lässt sich

sehr gut mit einem ruhigen Wasserlauf vergleichen, sofern keine Hindernisse auftreten und keine Masse z.B. aus Stabilitätsgründen Richtung Talmitte abgelenkt wird (Haiden 2005).

2.1.1.3 Gegenüberstellung

Eigenschaft	Talwind	Hangwind
Scale (horizontal)	10^3m bis 10^5m	10^2m bis 10^3m
Neigung der Topographie	$<1\text{‰}$	$>1\text{‰}$
Antrieb	∇p Alpenvorland - Tal	∇p Hang - Talmitte, Auftrieb/Abtrieb aufgrund von Dichtestörung
Reaktionszeit	$\approx h$	$\approx \text{min}$
Vertikalausdehnung	max. bis Kammniveau ($\approx 1600m$ für Inntal)	max. bis 50m (größte Ausdehnung bei Aufwinden)
Geschwindigkeit	bis 15 m/s	bis 5m/s

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der Merkmale von regionalskalig angetriebenen Tal- und Hangwinden.

2.1.2 Fallwinde (Föhn)

Nachdem im Winter 2007/2008 während der Messphase einige Föhnperioden zu verzeichnen waren, muss auch diese Windart genauer beschrieben werden. Es ist festzuhalten, dass im Folgenden nur auf den häufigsten Fallwind im Inntal, den Südföhn, eingegangen wird und sich die Bezeichnung Föhn immer auf diesen Typ bezieht. Andere Föhnarten, z.B. Nordföhn, kommen im Raum Schwaz nicht vor bzw. können nicht eindeutig identifiziert werden. Ebenso ist festzuhalten, dass die Föhnluft im Raum Schwaz ihren größten Absinkprozess im Raum Innsbruck bereits abschließt und sich anschließend entlang des Inntales ostwärts bewegt. Über die südlich angrenzenden sogenannten Tuxer Voralpen werden im Bereich Schwaz keine nennenswerten Absinkvorgänge beobachtet, weil das Zillertal in südlicher Richtung noch vor dem Alpenhauptkamm liegt und die Luftmassen dort kanalisiert werden.

„Dynamischer“ Südföhn entsteht bei großräumiger Anströmung der Alpen aus südlichen bis südwestlichen Richtungen meist an der Trogvorderseite eines Tiefs über Westeuropa und damit verbundenen positiven Druckgradienten von Süd nach Nord. Die Vertikalerstreckung reicht bis in die obere Troposphäre. Wichtig bei Föhn ist, dass auf der Luvseite bodennahe Luftschichten nicht in die Strömung eingebunden, also blockiert werden. Erst dann kann das kennzeichnende Absinken von Luft aus größeren Höhen zum Ausgleich des Massenverlustes einsetzen. Damit einher geht eine meist nahezu trockenadiabatische Erwärmung der Luftmassen bis zum Boden und somit eine deutlich höhere Temperatur im Lee. Ein zusätzlicher Erwärmungseffekt tritt im Falle von Niederschlagsbildung durch die Hebung der Luftmassen (oberhalb der „geblockten“ Schichten) im Luv auf. Während

sich die Luft im Luv nach oben aufgrund von anhaltender Kondensation (latente Wärme) nur feuchtadiabatisch abkühlt, erwärmt sich die Luft im Lee beim Absinken trockenadiabatisch, wenn der Luftmasse durch Niederschlag genug Feuchte entzogen worden ist (Umwandlung von latenter in fühlbare Wärme).

Der seichte Föhn tritt im Gegensatz zum vorigen Typ bei gradientschwachen Lagen auf. Die Grundvoraussetzung sind in diesem Fall unterschiedlich temperierte Luftmassen südlich und nördlich der Alpen. Lagert über Südtirol Kaltluft, die, wie im Winter manchmal zu beobachten von Westen um die Alpen herumtransportiert wurde, wogegen über Nordtirol und dem Alpenvorland milde Luftmassen vorzufinden sind, baut sich ein thermisch bedingter Druckgradient mit höherem Druck im Süden auf. Folglich beginnt Luft von Süden aus höheren Schichten (potentiell wärmer) wie aus einem riesigen See durch die Brennerlücke nach Norden zu fließen und dort Richtung Tal mit verbundener trockenadiabatischer Erwärmung abzusinken. Die Vertikalausdehnung des seichten Föhns ist wie der Name andeutet geringer und liegt maximal bei rund 3km.

Bezüglich des Föhndurchbruchs bis zum Boden trotz zunächst stabiler Verhältnisse ist es u. a. nach Zängl (1999) wichtig, dass ein positiver Druckgradient vom Inntal in das Alpenvorland existiert und somit die bodennahe Kaltluft ausfließt. Eine andere oder zusätzliche Möglichkeit ist die diabatische Erwärmung der Talatmosphäre und somit ein Auflösen der stabilen Schicht von unten.

Wenn man nun nochmals an das Eingangs erwähnte Problem der Unterscheidung von Talauswind und Föhn, die in Schwaz aus der gleichen Richtung kommen, denkt, bieten sich aufgrund der speziellen Eigenschaften der Föhnluft einige Differenzierungsmöglichkeiten an! Etwa dass die Luft im Vergleich zu der vorherigen Luftmasse mild und sehr trocken ist, da der Föhn einen annähernd trockenadiabatischen vertikalen Temperaturgradienten erzeugt - was sonst im Winter kaum möglich ist. In diesem Zusammenhang erwähnt Haiden (2005) aber eine noch eindeutigerere Identifizierungsmöglichkeit. Bei Föhnspielen aufgrund des kontinuierlichen Luftmassenaustausches diabatische Prozesse nur eine kleine Rolle. Das bedeutet, dass die potentielle Temperatur im Tal in etwa gleich jener auf Bergstationen ist. Im Inntal sollte also der Vergleich von $\theta_{Patscherkofel}$ mit $\theta_{AWS-Tal}$ zumindest im Winter eine gute Zuteilungsmöglichkeit sein.

Die Definition der potentiellen Temperatur θ lautet (Etling 2002):

$$\theta = T \cdot \left(\frac{1000hPa}{p} \right)^{\left(\frac{R}{c_p} \right)} \quad (2.5)$$

Mit T = Stationstemperatur [°K], p = Stationsdruck [hPa], R = Gaskonstante für trockene Luft ($287 \frac{J}{kg \cdot K}$) und c_p = spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck ($1005 \frac{J}{kg \cdot K}$).

2.2 Atmosphärische Grenzschicht

Nachdem sich sämtliche Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit auf die untere (Tal-)Atmosphäre beziehen und die Begriffe Grenzschicht bzw. Mischungsschicht, Inver-

sion(sdeckel), Schichtung,... immer wieder erwähnt werden, sollen in diesem Punkt Definitionen und eine sehr kurze Beschreibungen der „Atmosphärischen Grenzschicht“ sowie eng verwandter Begriffe Platz finden. Ebenso soll Abb. 2.2 einen schematischen Überblick über Prozesse innerhalb einer „Talatmosphäre“ geben. Als Literaturgrundlage (auch für Abb. 2.2) dienen hierzu Kraus (2004) und Stull (2000).

2.2.1 Definition Grenzschicht und Mischungsschicht

Die (atmosphärische) Grenzschicht ist jene Atmosphärenschicht, in der Einflüsse vom Boden spürbar sind. Dies sind sowohl rein dynamische Effekte durch die Bodenreibung als auch thermodynamische Prozesse (Wärmeflüsse und andere „Transporte“ vom Boden in die Luft). Oberhalb der Grenzschicht beginnt die sogenannte „Freie Atmosphäre“, in der direkte Einflüsse vom Boden kaum eine Rolle spielen. Kraus (2004) gibt für die Dicke der Grenzschicht einen Wert von 1000m an, wobei große Variationen möglich sind. Ebenso bezieht sich dieser Wert auf flaches Terrain. Im Untersuchungsgebiet reichen die höchsten Gipfel bis 2500m AMSL, sodass weit über 1000m AMSL zumindest noch mit dynamischen Einflüssen der Topographie auf Wind-, Temperatur-, ...felder zu rechnen ist. Das im Rahmen dieser Arbeit wichtige ist dabei aber nur die Schichtung vom Boden bis zum Übergang Grenzschicht - Freie Atmosphäre. Sobald nämlich in diesem Höhenintervall eine Zone mit positiven Temperaturgradienten in z-Richtung auftritt, liegt ein „Inversionsdeckel“ vor, der den Austausch zwischen den zwei Schichten aus thermischen Gründen fast vollständig verhindert. Einzig Reibung zwischen den Luftmassengrenzen sorgt für unterschiedlich starke mechanische Durchmischung, ist aber speziell in windgeschützten Alpentälern allein meist zu schwach, um die Inversion aufzubrechen.

2.2.2 Vertikalschichtung und Inversionen

Allgemein formuliert gibt es drei Schichtungsarten:

- $\partial T/\partial z < -1^\circ$ bzw. $\partial\theta/\partial z > 0^\circ \Rightarrow$ STABIL
- $\partial T/\partial z = -1^\circ$ bzw. $\partial\theta/\partial z = 0^\circ \Rightarrow$ NEUTRAL
- $\partial T/\partial z > -1^\circ$ bzw. $\partial\theta/\partial z < 0^\circ \Rightarrow$ LABIL

Die Grenzschichten in Alpentälern zeichnen sich, wie zahlreiche frühere Untersuchungen ergaben (u.a. Heimann et al. 2007), gerade im Winter durch sehr stabile Verhältnisse aus. Inversionen bleiben während „strahlungsintensiver“ Lagen (wenig Bewölkung) tage- bis wochenlang erhalten. Beim Begriff Inversion ist jedoch zwischen zwei Typen zu unterscheiden:

- Bodeninversion - die kälteste Luft ist direkt über der Erdoberfläche (hauptsächlich nachts und am frühen Morgen)

- Abgehobene Inversionen (auch „Capping Inversion“; hauptsächlich tagsüber) - die Grenzschicht ist bis zum Übergang in die freie Atmosphäre durchmischt (deshalb auch „Mischungsschicht“) und neutral geschichtet. Durch die Vermischung von potentiell kälteren Luftmassen am Boden mit potentiell wärmeren knapp unterhalb der freien Atmosphäre entsteht im Übergangsbereich ein stark positiver T und θ Gradient.

Dass sich an einem sonnigen Standort ganztägig eine Bodeninversion hält, ist selbst bei schneebedecktem Boden (abgesehen von den ersten Zentimetern über der Schneedecke) unwahrscheinlich. Ebenso ist es jedoch kaum möglich, dass sich an einem Wintertag ohne großskaligen synoptischen Einfluss die Inversion in allen Niveaus abbaut. Dafür ist die Erwärmung der Luft vom Boden zu schwach.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der im Zusammenhang mit Inversionen in Tälern nicht vergessen werden darf, ist die Schichtung an den Hängen. So ist sowohl tagsüber als auch in der Nacht davon auszugehen, dass zwar im Großteil des Talquerschnitts eine oder mehrere Inversionen zu finden sind, diese jedoch an den Hängen von Hangwinden durchstoßen werden.

Tagsüber ist das an sonnigen Tagen dadurch möglich, dass sich entlang der Hänge aufgrund von hoher „Strahlungsausbeute“ eine warme Hangluftschicht entwickelt, aus denen die in Punkt 2.1.1.2 beschriebenen Hangwinde resultieren. Dabei darf man sich jedoch wie erwähnt keinen homogenen, dem Hang folgenden Aufwindschlauch vorstellen. Viel mehr ist mit komplexen Zirkulationsmuster (auch in Folge von Ausgleichsströmungen) in horizontaler und vertikaler Richtung zu rechnen. Weiterführende Informationen hierzu liefert u.a. Vergeiner (1983), S.115.

Nachts ist mit intensiver Kaltluftproduktion entlang von schneebedeckten Hängen zu rechnen. Diese Luftmassen können dann je nachdem, wie stark die Temperaturstörung ausfällt, eine gewisse Strecke Richtung Talsohle fließen. Je kälter sie im Vergleich zur Umgebungsluft sind, desto weiter. Aktuelle Untersuchungen hierzu siehe Whiteman and Zhong (2008a) und Whiteman and Zhong (2008b).

Abb. 2.2 gibt eine bildliche Zusammenfassung der beschriebenen Phänomene und dem, was im Inntal im Raum Schwaz im Winter zu erwarten ist. Natürlich ist die Skizze nur eine idealisiert und vereinfachte Darstellung. In der Praxis ist anzunehmen, dass der Verlauf der potentiellen Temperatur θ mit der Höhe speziell in den Übergangszeiten um Sonnenauf- und Untergang wesentlich unregelmäßiger aussieht. Z.B. können mehrere Inversionsschichten vertikal übereinander liegen. Speziell für die Frage, wie viel „Mischungsvolumen“ für Schadstoffe zur Verfügung steht, ist tagsüber wichtig, in welcher Höhe der erste „Inversionsdeckel“ liegt und ob dieser zumindest an den Talrändern von Hangwinden durchbrochen werden kann.

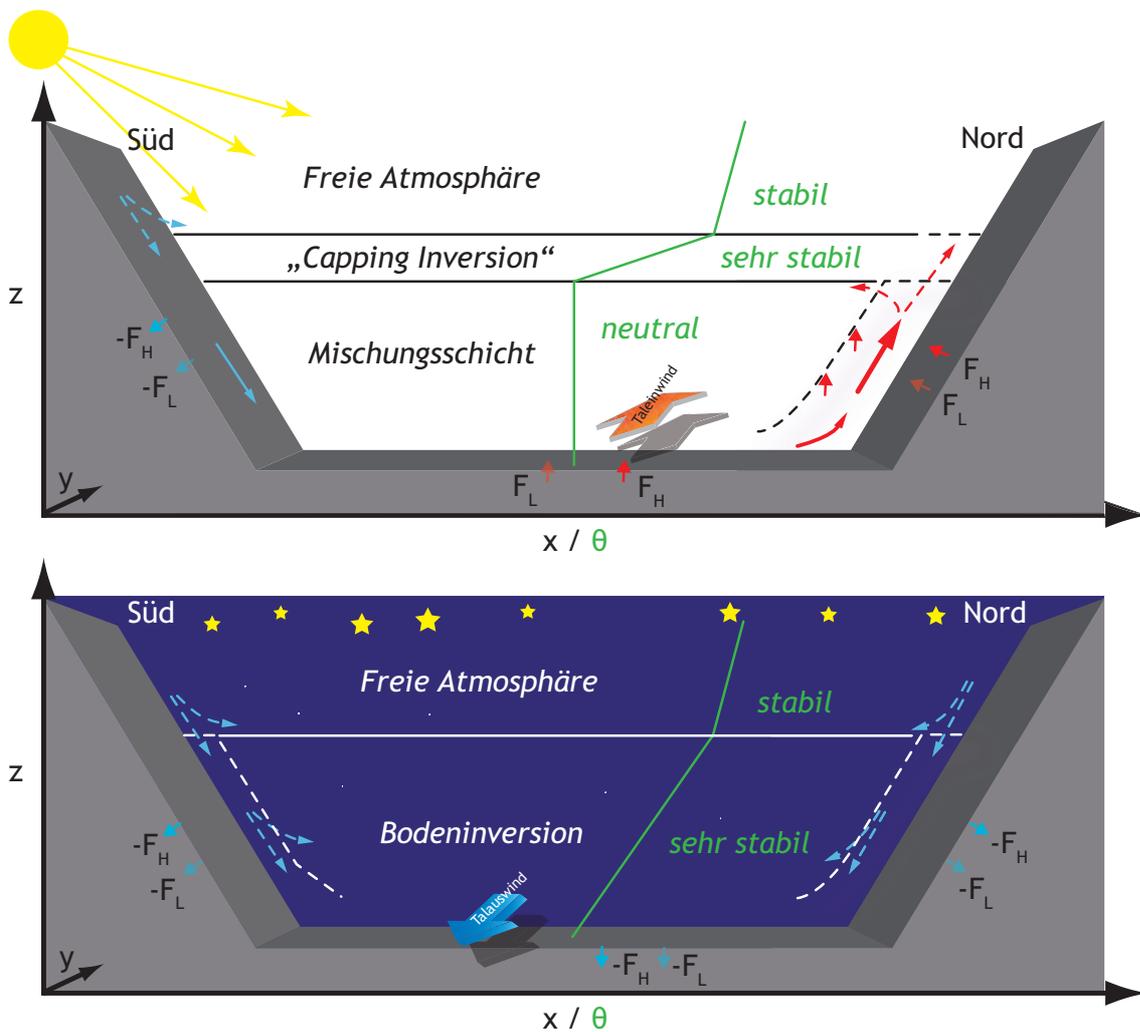


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der unteren Atmosphäre in einem Tal im Winter bei Tag und bei Nacht mit $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ Verlauf. θ entspricht der potentiellen Temperatur. Das Tal soll in positive y -Richtung ansteigen.

Abschließend soll die physikalische Verbindung zwischen Temperatur und potentieller Temperatur in Erinnerung gerufen werden, damit man sich zum $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ -Verlauf auch den $\frac{\partial T}{\partial z}$ -Verlauf vorstellen kann:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_p} = \frac{\partial T}{\partial z} + 1^\circ K/100m \quad (2.6)$$

Glg. 2.6 stellt die Berechnung der Änderung der potentiellen Temperatur θ mit der Höhe nach Kraus (2004) dar.

Detaillierte Untersuchungen über die atmosphärische Grenzschicht in Alpentälern sind unter anderem in der Sammlung von Brem et al. (1985) zu finden.

2.3 Luftschadstoffe und Atmosphärenchemie

In diesem Punkt wird auf Bildung, Umwandlung sowie Abbau/Deposition von Stickoxiden und Feinstaub eingegangen. Zum leichteren Verständnis werden zunächst einige allgemeine Definitionen bzw. Abkürzungen angeführt, anschließend wird auf Quellen und Senken von Stickoxiden und Feinstaub eingegangen, abschließend eine kurze Überleitung ins nächste Kapitel gegeben, in dem auf die regionalspezifischen Quellen der Schadstoffe im Bereich der zur Verfügung stehenden Messorte eingegangen wird.

2.3.1 Definitionen

Primäre Komponenten: Komponenten, die direkt emittiert werden (z.B. NO)

Sekundäre Komponenten: Komponenten, die hauptsächlich durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre entstehen (z.B. NO_2).

HO_2 = Hydroperoxidradikal	NO = Stickstoffmonoxid
HNO_3 = Salpetersäure	NO_2 = Stickstoffdioxid
NH_3 = Amoniak	$NO_x = NO + NO_2$ = Stickoxide
$(NH_4)_2SO_4$ = Amoniumsulfat	NH_4NO_3 = Amoniumnitrat
O_3 = Ozon	$NM VOC$ = Non-methan Volatile Organic Compounds
RO_2 = Peroxyradikal	SO_2 = Schwefeldioxid

Feinstaub: PM (particular matter), meist in Verbindung mit einer Größenklassifikation. So steht PM10 laut dem Immissionsschutzgesetz Luft nicht für Feinstaubpartikel kleiner $10\mu m$ (!), sondern für jene Partikel, „die einen gröÙenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von $10\mu m$ eine Abscheidewirksamkeit von 50% aufweist“ (Spangl 2004b). Der Grund für diese komplizierte Definition liegt darin, dass die Messanordnung den menschlichen Atemorganen nachgebaut wurde. Die Menge an gemessenem Feinstaub entspricht also ungefähr jener Menge, die über die Atemwege in den menschlichen Körper aufgenommen wird. Je kleiner die Partikel, desto eher werden sie aufgenommen. Die gesundheitsschädliche Wirkung von Feinstaub ist allgemein bekannt (Schneider 2006).

2.3.2 Stickoxid

Wie bereits erwähnt fasst man unter NO_x NO und NO_2 zusammen. Während NO ein direktes Emissionsprodukt von Verbrennungen bei hohen Temperaturen ist, wird NO_2 (noch) in eher geringen Mengen direkt emittiert, hauptsächlich durch chemische Reaktion von NO mit anderen Molekülen in der Atmosphäre gebildet¹. Am NO_2 Anteil der Luft

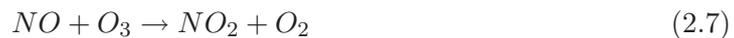
¹An dieser Stelle muss festgehalten werden, dass die direkte Emission von NO_2 stark im Zunehmen begriffen ist, da bei hochmodernen Motoren speziell mit Partikelfilter zwar Feinstaubemission reduziert, jedoch vermehrt NO_2 freigesetzt wird (Heimann et al. 2007; Spangl et al. 2006). Die Auswirkungen von direkt bzw. indirekt emittiertem Gas bleiben natürlich die gleichen.

ist man besonders interessiert, weil dieser für die menschliche Lunge sehr schädlich ist² (Spangl 2004a; WHO 2003).

Im Folgenden werden die unterschiedlichen NO_2 Quellen und Senken angeführt (Spangl 2004a; Seinfeld 1986):

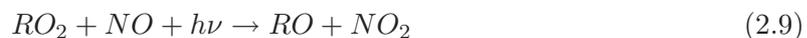
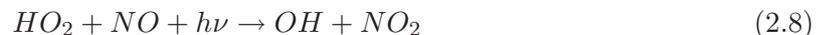
Quellen:

Reaktion NO mit O_3 :



Die Verfügbarkeit von O_3 ist also eine wesentliche Voraussetzung für eine effiziente NO_2 Bildung. Gerade bei geringen Ozonkonzentrationen im Winter kann in Bereichen mit hohen NO Konzentrationen das gesamte O_3 aufgebraucht werden. Folglich ist die NO_2 Bildung nach Gleichung 2.7 gestoppt. Interessante bzw. kritische Situationen treten dann auf, wenn im Zuge von starken Tiefdrucksystemen (stratosphärische) Luftpakete aus großer Höhe nach unten gemischt werden. Diese Luft enthält nämlich ein zusätzliches Reservoir an (natürlichem) Ozon.

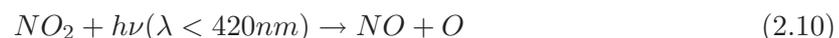
Reaktion NO mit freien Radikalen:



Die Reaktion von NO und HO_2 oder RO_2 stellt bei Sonneneinstrahlung eine NO_2 Quelle ohne Ozonbeteiligung dar. Sonneneinstrahlung ist deshalb nötig, weil die freien Radikale durch Photolyse von NMVOC entstehen. Erwähnenswert hierbei ist noch, dass das auf diese Weise gebildete NO_2 eine Nettoozonquelle darstellt, sofern es nach Gleichung 2.10 abgebaut wird. Deshalb ist hier in Gleichung 2.10 die vollständige Umwandlung in O_3 angeführt, obwohl bodennahes Ozon im Winter allgemein kein Problem darstellt.

Senken:

Photolyse von NO_2 :

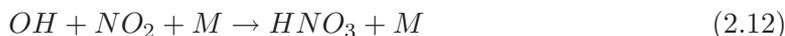


Bei Sonnenschein kommt es zu einer Aufspaltung des NO_2 und zu einer „Umkehrreaktion“ - aus NO_2 wird wiederum O_3 . Es leuchtet ein, dass diese NO_2 Senke in der Nacht nicht

²Weitere interessante Informationen hierzu WHO (2003), Kapitel 7 (www.euro.who.int/document/e79097.pdf)

wirksam sein kann. Sehr wichtig ist, dass die Photolyse von NO_2 bei Sonnenhöchststand (!) länger dauert als Reaktion 2.7, die Quelle ist in diesem Fall also größer als die Senke.

Oxidation von NO_2 :



Gleichung 2.12 stellt ein Beispiel für Oxidationen von Stickstoffdioxid und Umwandlung in HNO_3 dar. Diese Gleichung leitet gleichsam in den nächsten Punkt über, denn Salpetersäure reagiert in Folge in der Luft mit NH_3 zu NH_4NO_3 , einem sekundären Feinstaubpartikel. Das bedeutet also, dass die NO_2 Konzentration auch die Feinstaubkonzentration beeinflusst (Seinfeld 1986).

Abschließend sei hier noch erwähnt, dass im Jahr 2006 in Vomp der höchste NO_2 Jahresmittelwert ($76\mu g/m^3$) Österreichs registriert wurde (Spangl et al. 2007), im Jahr 2007 der zweithöchste ($64\mu g/m^3$). Der Rückgang beim Jahresmittelwert wird auf die im Winter 2006/07 vorhandene permanente Geschwindigkeitsbegrenzung zurückgeführt (Spangl et al. 2008).

2.3.3 Feinstaub

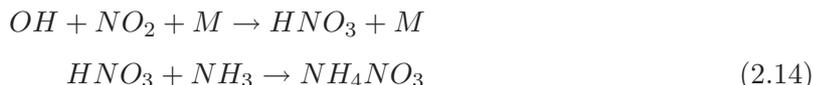
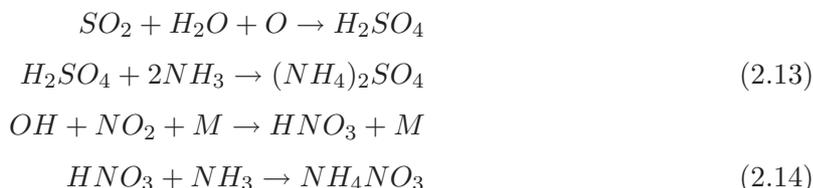
Bei Feinstaub handelt es sich nicht um ähnliche Moleküle, sondern um sehr viele verschiedene Stoffe, von direkt und natürlich emittierten Pollen über Gesteinsstaub bis hin zu sekundären, hauptsächlich anthropogen verursachten Partikel wie das erwähnte Ammoniumnitrat. Ebenso ist zu beachten, dass unter Feinstaub nicht nur feste Partikel sondern auch flüssige fallen. Entscheidend ist nur die Größe. Gerade wegen seiner geringen Größe ist Feinstaub in hohem Ausmaß gesundheitsschädlich, da er zu einem gewissen Teil bis in die menschliche Blutbahn eindringen kann. Je nach Partikelart verursacht er dort Schäden, die zu einer nachweisbaren Verringerung der Lebensqualität führen können³.

Relativ komplex ist beim Feinstaub die Quellenerhebung, da sie regional sehr stark schwankt. In Frage kommen als anthropogene Verursacher prinzipiell Verkehr (sowohl aus Abgasen als auch aus Reifenabrieb etc.), Hausbrand, Industrie und Gewerbe. Für Österreich relevante natürliche Quellen sind Saharastaub, lokale Staubaufwirbelungen und biologische Produkte wie Bakterien etc., wobei letztere im Winter vernachlässigbar sind. Informationen über den Anteil der jeweiligen Quellen an der Gesamtemission sind in Heimann et al. (2007), S.171, Abb.7.9 zu finden.

Chemische Reaktionen spielen auch beim Feinstaub eine wesentliche Rolle. Laut der WHO sind sekundär gebildete Nitrat- und Sulfataerosole gewöhnlich der Hauptbestandteil des Feinstaubes (WHO 2003, S.8). Die nötigen Grundbausteine stellen Gase dar,

³Weitere sehr interessante Informationen hierzu z.B. in der WHO Studie „Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide“, Kapitel 5 (www.euro.who.int/document/e79097.pdf)

die meist aus hochtemperierten Verbrennungsprozessen fossiler Energieträger entstehen und anschließend in der Atmosphäre Reaktionen mit anderen Molekülen eingehen. Im Folgenden sollen zwei Beispiele gegeben werden (WHO 2003):



Diese Gleichungen zeigen, wie aus Vorläufersubstanzen (SO_2^4 , NO_2) über die Atmosphärenchemie Feinstaub ($(NH_4)_2SO_4$, NH_4NO_3) gebildet wird. Die Verfügbarkeit der Vorläufersubstanzen bietet somit bereits ein Indiz für die im nächsten Punkt zu behandelnden lokalen Quellen.

Abschließend sei noch erwähnt, dass ein großes Problem hinsichtlich Feinstaub die lange Verweildauer in der Luft ist. Kleinstpartikel mit Durchmesser um $0.1\mu m$ bleiben bis zu 10 Tage in der Luft. Dieses Problem wird noch massiver, wenn der Luftaustausch eingeschränkt ist und keine unbelasteten Pakete eingemischt werden. Dann tritt nämlich wie in der Einleitung erwähnt ein Akkumulationseffekt auf. Zudem kann es durch Aufwirbelung im Bereich von Straßen zum „Wiedereintrag“ kommen (WHO 2003; Schneider 2006).

2.3.4 Quellen im Bereich der Messorte

Im Folgenden wird nun kurz auf die wichtigsten Luftschadstoffquellen im Bereich der Messorte, die für diese Untersuchung herangezogen werden, eingegangen werden. Außer bei der Station A12 Vomp Raststätte wurden über die jeweiligen Anteile der Quellen an der Gesamtemission noch keine Untersuchungen durchgeführt, sodass im Folgenden nur Abschätzungen gemacht werden. Eine Beschreibung der Lage der Messstationen wird in Kapitel 3 gegeben. Die ersten beiden Stationen sind permanente Einrichtungen des Landes Tirol zur Überwachung der Luftgüte. Die restlichen Stationen sind nur temporär im Zuge des Messprojektes im Winter 07/08 installiert worden.

2.3.4.1 Vomp - Raststätte - A12

Bezüglich NO_x ist die Situation an der Messstelle an der A12 in Vomp klar. Über den gesamten Tag betrachtet⁵ ist der Verkehr auf der A12 für den Hauptteil der NO Emission verantwortlich, aus dem wiederum NO_2 gebildet wird (Thudium 2002b). Interessant ist hierbei, dass es beim NO_2 im Gegensatz zu NO eine Hintergrundbelastung gibt, wie Weber (2005) in einer Untersuchung während einer Totalsperre der A12 aufzeigen konnte (siehe Abb. 2.3).

⁴Die SO_2 Belastung ist in den Industriestaaten durch die Verwendung von schwefelfreien Brennstoffen deutlich reduziert worden

⁵Bei südlichen Anströmungen gilt dies nicht, diese treten aber verhältnismäßig selten auf

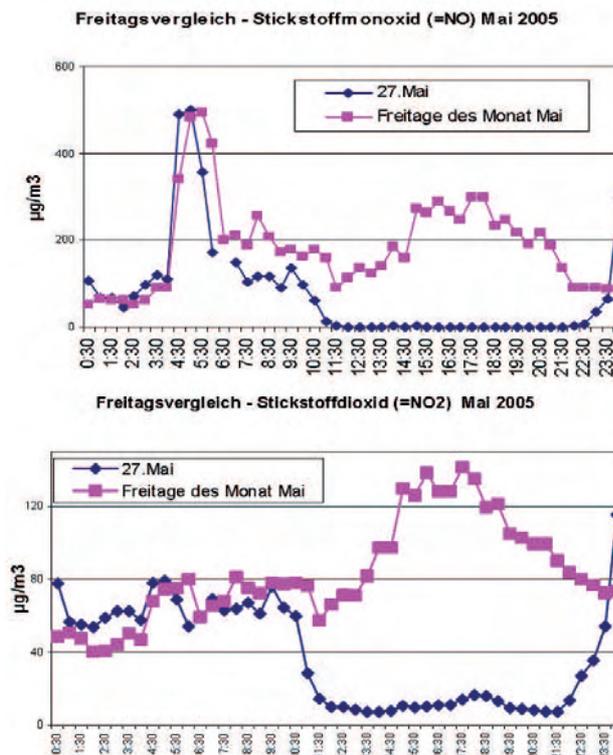


Abbildung 2.3: Vergleich der NO und NO_2 Konzentrationen an der Messstelle Vomp A12 im Mai 2005 an normalen Freitagen und bei gesperrter Autobahn am Freitag, den 27. Mai (Weber 2005, S.2-3).

Kommentar: Eine Hypothese hierzu wäre, dass an dem sehr strahlungsreichen Tag (27.05.05) sämtliches NO aus autobahnfremden Quellen (z.B. lokaler Verkehr) sofort mit dem ausreichend vorhandenen Ozon⁶ reagiert hat und somit in NO_2 umgewandelt wurde (siehe Glg. 2.7). Diese Reaktion läuft wie bereits erwähnt schneller ab als die Photolyse von NO_2 , was erklären würde, warum die NO Konzentration konstant im Bereich der Nachweisgrenze gelegen, die NO_2 -Belastung einen Sockelbetrag jedoch nicht unterschritten hat (siehe Abb. 2.3).

Allgemein formuliert würde dies heißen, dass es emissionsseitig eine NO Hintergrundbelastung gibt, die an strahlungsreichen Sommertagen rasch zu einer „chemiebedingten“ NO_2 Hintergrundbelastung umgewandelt wird und daher in einem Abstand zur Emissionsquelle⁷ mehr als Immission messbar ist.

Bezüglich Feinstaub ist die Autobahn ebenfalls eine Quelle, jedoch liegen auch andere Emittenten in der Umgebung vor. Im Winter sind dies vor allem Hausbrand aus angrenzenden Siedlungen und Staub von nahe gelegenen Dorfstraßen. Landwirtschaftliche Tätigkeiten spielen in dieser Jahreszeit keine Rolle. Inwieweit sich die Schottergrube westlich von Vomp und die Baustelle der Brenner Eisenbahngesellschaft östlich von Vomp auf die Konzentration auswirkt, ist fraglich und wird für den Untersuchungszeitraum auch nicht leicht zu beantworten sein, da im Winter 07/08 keine hochaufgelösten Feinstaubmessungen für diese Messstation zur Verfügung stehen.

⁶siehe bspw. Ozondaten der Messstelle Kramsach/Angerberg an diesem Tag

⁷im Falle der Sperre der A12 ist die Station LT relativ weit von anderen großen Emissionsquellen entfernt

2.3.4.2 Vomp - An der Leiten

Diese Station liegt etwas weiter von der Autobahn entfernt als die vorige, sodass vermutlich zu der NO_x Quelle Autobahn auch noch die lokalen Verkehre im Bereich der neu entstandenen Einkaufszonen und der Durchzugsverkehr auf der L222 hinzukommen.

Feinstaubquellen sind in diesem Bereich zahlreich vertreten. Zum einen liegt die Station mitten im Wohngebiet, zum anderen wird dieses Wohngebiet von der A12, von Gewerbebetrieben und Industrieanlagen sowie regionalen Verkehrswegen eingeschlossen.

2.3.4.3 Bachtal

Im Bachtal ist bezüglich NO_x festzuhalten, dass es nur kleine Quellen in Form von wenig befahrenen Dorfstraßen in der Umgebung gibt. Ähnliches ist hinsichtlich Feinstaub zu erwarten, wobei hier noch eine Siedlung zwischen Autobahn und Messstandort sowie Aktivitäten am nahe liegenden Militärstützpunkt als möglicher Emittent berücksichtigt werden muss. Treten hohe Konzentrationen auf, werden vermutlich Luftpakete von den Winden vom Bereich der A12 antransportiert.

2.3.4.4 Kreuzbichlkapelle

Im unmittelbaren Bereich der Kapelle gibt es keine NO_x Quellen. Unterhalb befindet sich neben der A12 das Gemeindezentrum, dass von der L222 durchzogen wird. Durch Geschäftstätigkeiten und Durchzugsverkehr treten hier erhöhte lokale Verkehre auf.

Feinstaubmessungen wurden bei der Kapelle nicht durchgeführt. Zu den eben genannten Verkehrsquellen kommt aber jedenfalls noch der Hausbrand des dicht besiedelten Ortskernes hinzu.

Kapitel 3

Messgebiet, Messaufbau und Messdaten

Zunächst sollen zwei Abbildungen für Überblick über die im Winter 2007/08 mit Kernmessphase von 01.12.07 bis 29.02.08 eingerichteten bzw. permanent vorhandenen Messpunkte sorgen (Abb. 3.1, Abb. 3.2). Anschließend wird das Messgebiet hinsichtlich seiner Topographie kurz in Textform beschrieben. Dieser Punkt leitet auf den nächsten über, denn genau aufgrund der Geländeanordnung wurde im Oktober 2007 der schlussendliche Messaufbau gewählt. Die Ideen, die mit den Messpunkten verbunden sind, sollen hier Platz finden, denn eine wichtige Frage lautet, ob im Nachhinein wieder die selben Standorte gewählt worden wären. Im Anschluss werden die verwendeten Messinstrumente vorgestellt. Dazu passend wird abschließend auf die gewonnenen Daten und deren Qualität eingegangen.

3.1 Topographie des Gebietes

3.1.1 Definition Untersuchungsgebiet

Das Gebiet von Interesse im Rahmen dieser Arbeit umfasst jene Teile des Gemeindegebietes von Vomp und Schwaz, die im Inntal bis in eine Höhe von rund 1200m liegen. Speziell untersucht wurde in diesem Bereich ein Querschnitt, der sich von der sogenannten Bergereben im Nordwesten (höchster roter Punkt in Abb. 3.1 auf der orographisch linken Seite) über den Vomperberg durch das Bachtal zur Messstation an der A12 (siehe Abb. 3.2) bis zur Talsohle zieht. Von dort wiederum verläuft die Messlinie erst über den Pirchanger, dann über den Arzberg bis zum südöstlichsten Punkt (höchster roter Punkt in Abb. 3.1 auf der orographisch rechten Seite). Im Bereich des Gemeindegebietes von Vomp wurde dieser Querschnitt mit den Messpunkten Kapelle und Bereich „Vomper Felder“ (westlichster Roter Punkt in Abb. 3.2) um knapp 1.5km nach Westen erweitert (Abb. 3.2). Die Einbeziehung der Messstation „Vomp - An der Leiten“ (schwarzer Punkt Abb. 3.2.) bedeutet eine geringfügige Ausdehnung (ca. 200m) nach Osten. Kleinräumige Untersuchungen sind für den Bereich Vomp „Messstelle A12 - Bachtal“ vor-

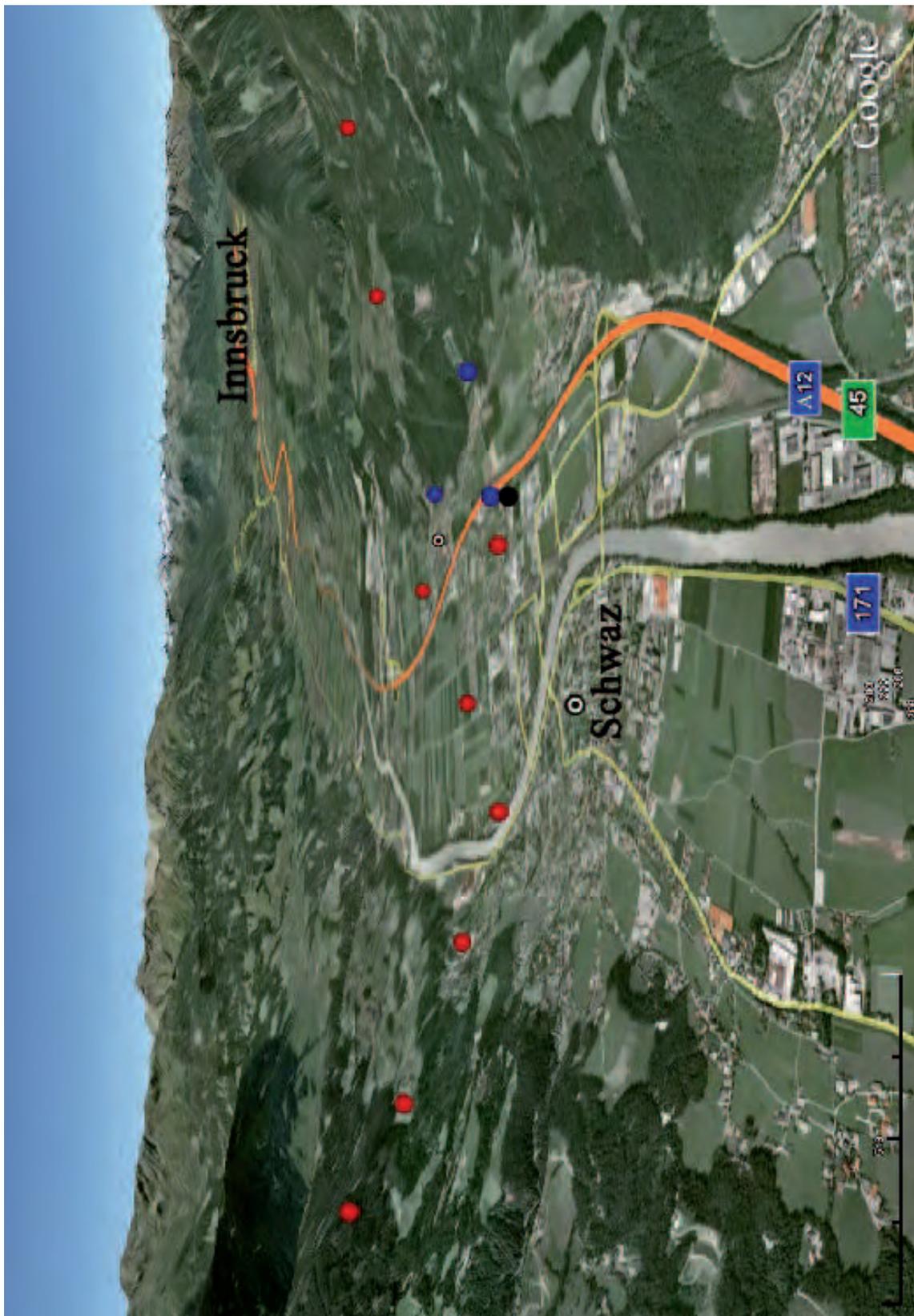


Abbildung 3.1: Inntal von Ost nach West. Orange Linie: Inntalautobahn A12; Rote Punkte: Meteorologische Messungen; Blaue P.: Meteorologische- und luftschadstoffbezogene Messungen; Schwarze P.: Reine Luftschadstoffmessungen



Abbildung 3.2: „Sonnenhang“ im Bereich Vomp von Südost nach Nordwest inklusive Konturen des Bachtals. Beschriftung wie Abb. 3.1.

gesehen, da hier eine konzentrierte Messanordnung vorliegt.

3.1.2 Umgebende Topographie

Das Messgebiet liegt im mittleren Unterinntal etwa 30km östlich von Innsbruck. Das Inntal hat in diesem Bereich eine Breite von rund 1.5km, verläuft in Fließrichtung des Inns ungefähr von Südwest nach Nordost und wird vom Karwendel im Nordwesten und den Tuxer Voralpen im Südosten begrenzt. Der Übergang von Talsohle zum Hangfuß des Kellerjochmassivs verläuft im Bereich von Schwaz sehr abrupt und bis in eine Höhe von 1500m gleichförmig stark ansteigend. Im Gemeindegebiet von Vomp verläuft der Übergang etwas sanfter und stufenweise. Zuerst knapp 300m bis zum ersten Plateau, dem Vomperberg, anschließend weitere 300m bis zu einem kleineren Plateau (sogenannte Bergereben), dann durchgehend relativ steil bis Kammniveau in rund 2000m (wenig westlich bis 2500m). Zu vermerken ist hier, dass der Vomperberg vom Bachtal im Osten begrenzt wird und ab dort der Übergang nicht mehr stufenweise, sondern erst mäßig, dann stark steigend bis Kammniveau erfolgt.

Im Hinblick auf die Datenauswertung jedenfalls zu beachten sind einige auffallende topographische Unregelmäßigkeiten, die im Bereich Schwaz-Vomp auftreten und möglicherweise gewisse Messungen direkt beeinflussen:

1. Das Inntal macht in diesem Gebiet von Ost nach West eine leichte Kurve in eine

südlichere Richtung. Prallhangeffekte scheinen daher möglich.

2. Der Talquerschnitt verkleinert sich - aus folgenden Gründen:

- Das Kellerjoch ist auf der orographisch rechten Seite im Vergleich zu den anderen Gebirgsstöcken in dieser Linie nach Nordenwesten Richtung Inn versetzt. Das gleiche trifft für den östlichen Ausläufer der Vomperkette in entgegengesetzte Richtung auf der anderen Talseite hinsichtlich der östlichen Vorläufergebirge (Staner Joch, Rofan,...) zu.
- Oberhalb der Gemeinde Vomp breitet sich ein Plateau aus (Vomperberg), das in den untersten Schichten den Querschnitt verkleinert.
- Ergänzend kann hinzugefügt werden, dass sich die mittlere Kammhöhe in diesem Bereich von Ost nach West um rund 200m erhöht (auch wenn das keinen Einfluss auf den definierten Talquerschnitt hat). Die Luftbewegung wird also bis in größere Höhe von der Topographie beeinflusst als weiter östlich.

3. Westlich von Vomp mündet das sogenannte Vomperloch in das Inntal. Das ist deshalb erwähnenswert, da das Vomperloch mit einer Länge von mehr als 12km nach dem Achenal das längste aus Nordwesten einmündende Seitental des Unterinntals ist. Das Tal ist zwar extrem schmal, hat aber gerade im Winter ein gewaltiges Kaltluftzugsgebiet, da es von bis zu 1500m hohen, teils nordexponierten Wänden und Hängen eingeschlossen wird.

Nicht zu vergessen ist ein vergleichsweise sehr kleines und rasch ansteigendes Tal, das genau gegenüber dem Vomperloch ins Inntal mündet, da es ebenso als Abfluss relativ großer, im Winter nahezu immer schneebedeckter - hochgelegener Flächen dient.

Das an der Ostgrenze des Vomper Gemeindegebiet einmündende Stallental hat vermutlich keinen direkten Einfluss z.B. auf die Windrichtungsmessung im Talboden, da das Messgebiet davon durch einen Geländekamm (Vomperjoch) scharf abgetrennt ist.

3.2 Messaufbau

3.2.1 Messpunkte

Alle Messpunkte sind in Abb. 3.1 dargestellt (inklusive der permanenten Messstationen zur Luftgüteüberwachung), müssen aber wegen der nur als Orientierung zu gebrauchenden Karte genau definiert werden. Im Folgenden soll zunächst eine Tabelle mit sämtlichen Messstandorten für meteorologische und schadstoffbezogene Instrumente (von Südost nach Nordwest) Überblick verschaffen. Zudem wird in der Tabelle eine Abkürzung für jeden Ort eingeführt, um die weiteren Ausarbeitungen zu erleichtern. Anschließend wird die Umgebung jedes Messpunktes kurz beschrieben und wird auf die Lage fix vorhandener Messeinrichtungen eingegangen, deren Daten im Rahmen der Arbeit verwendet werden können.

Ort	Lage	GPS-Höhe	Gerät	Abkürzung
Arzberg2	N47 19.861 E11 43.151	1104m	Hobo	AB2
Arzberg1	N47 19.958 E11 42.887	884m	Hobo	AB1
Pirchanger	N47 20.127 E11 42.459	605m	Hobo	PA
Innhöfe	N47 20.442 E11 42.275	547m	Hobo	INN
Schwaz West	N47 20.413 E11 41.735	540m	AWS	BAS
Schützenweg	N47 20.871 E11 41.680	551m	Hobo	SW
Raststätte A12 Vomp	N47 20.926 E11 41.852	565m	AWS, NO_x -A	LT
Vomp West	N47 20.301 E11 40.902	573m	Hobo	VW
Bachtal	N47 21.098 E11 41.165	643m	AWS, PM10-A	BT
Kapelle	N47 20.631 E11 40.897	640m	AWS	KAP
Vomperberg1	N47 20.979 E11 40.280	888m	AWS	VB
Vomperberg2	N47 21.357 E11 40.072	1090m	Hobo	VB2
An der Leiten	N47 20.998 E11 41.643	545m	PM10-A, NO_x -A	AL

Tabelle 3.1: Im Zuge des Messprojekts gewählte Standorte für verschiedene Messsysteme. AWS=Automatische Wetterstation, Hobo=Temperatur- und Feuchtemessgerät, -A=Analysator. Eine Beschreibung der Messgeräte folgt in Punkt 3.2.3.

AB2: Standort AB2 bildet den höchsten Temperaturmesspunkt auf der Schattseite und ist am Arzberg in unwegsamem Gelände in einer Lichtung umgeben von Wald situiert. Während des Winters ist wegen der Bäume und der Lage am lokal nördlich ausgerichteten Hang keine direkte Sonneneinstrahlung auf das Gerät möglich.

AB1: Standort AB1 liegt im Bereich eines Weilers am Arzberg. Der Messpunkt ist von einer steil ansteigenden Wiese umgeben. Direkte Sonneneinstrahlung auf das Gerät ist möglich.

PA: Standort PA liegt mitten im Siedlungsgebiet des Pirchangers an einer sehr wenig befahrenen Gasse. Direkte Sonnenbestrahlung ist im Winter kaum möglich.

INN: Standort INN liegt im Bereich der Innhöfe ca. 50m nördlich des Inns. Der Standort ist von einer Wiese umgeben. Direkte Sonneneinstrahlung ist möglich.

BAS: Standort BAS liegt in einem Abstand von ca. 100m zum westlichen Siedlungsrand der Stadt Schwaz in der Mitte des Inntals umgeben von weiten landwirtschaftlichen Flächen. Direkte Sonneneinstrahlung ist möglich. Der Standort eignet sich aufgrund der zentralen Lage zur Messung der meteorologischen Verhältnisse in Talmitte in Bodennähe.

SW: Standort SW liegt direkt an einer Gemeindestraße umgeben von Siedlung einerseits,

Feldern andererseits. Direkte Sonneneinstrahlung ist möglich.

LT: Standort LT (Messstation Land Tirol) liegt direkt an der A12 östlich der Autobahnraststätte Vomp. Eine Beeinflussung der Windmessung durch lokale Strukturen (Autobahnüberführung) in der Umgebung ist zu erwarten. Direkte Sonneneinstrahlung ist möglich.

VW: Standort VW liegt am westlichen Siedlungsende des Ortsteils Vomp-Dorf und ist Umgeben von Wiesen und einer kaum befahrenen Straße. Direkte Sonneneinstrahlung ist möglich.

BT: Standort BT liegt im Bereich des Schießplatzes von Vomp im stark ansteigenden Bachtal. Unterhalb des Standortes grenzt die Bachtalsiedlung an das Militärgelände an, oberhalb breitet sich tal- bzw. hangaufwärts relativ naturbelassenes Waldgebiet aus. Diese Station scheint ideal zur Erfassung des Hangwindsystems in einem kleinen Seitental zu sein, da der Standort vom Talwindsystem des Inntales abgeschirmt ist und die Talachse des Bachtals quer zum Inntal stetig ansteigend (Neigung $> 1\%$) nach oben verläuft. Folglich werden Hangwinde im Tal kanalisiert und leicht messbar gemacht.

KAP: Standort KAP liegt unmittelbar vor der Kreuzbichlkapelle, die auf einem der Talflanke vorgelagerten Hügel steht. Die Kapelle selbst beeinflusst den Messpunkt jedenfalls hinsichtlich der Luftströmung. Direkte Sonneneinstrahlung ist möglich. Dieser Standort ist deshalb interessant, da hier im Gegensatz zum Bachtal sowohl Talwindsysteme als auch Hangaufwinde angreifen können.

VB: Standort VB liegt am Plateau oberhalb von Vomp auf einer kleinen Geländekuppe. Östlich davon liegt ein kleiner Heustadel, der einen schwachen Einfluss auf die Wetterstation ausüben könnte. Direkte Sonneneinstrahlung ist möglich, wird aber durch einen hohen Baum südlich des Messpunktes über die Mittagszeit beeinflusst.

VB2: Standort VB2 liegt oberhalb des Vomperbergs direkt an einem selten benützten Forstweg im steil ansteigenden Wald. Direkte Sonneneinstrahlung ist aufgrund von Abschattung durch einen Baumstamm nicht möglich.

AL: Standort an der Leiten liegt wie bereits erwähnt mitten im Wohngebiet. Hier werden keine meteorologischen Parameter gemessen.

Die Hobosensoren, die an den Standorten ohne AWS eingesetzt wurden, sind natürlich bewusst in möglichst gleiche Höhen auf Sonnen- und Schattenseite platziert worden, um

horizontale Temperaturverläufe quer zur Talachse untersuchen zu können.

Ergänzende Windmessung

Zu den beschriebenen Messorten wurden kurzfristig noch vier mechanische Windsensoren auf den Wiesen zwischen Autobahn und Bachtal positioniert (kleine rote Punkte in Abb. 3.2). Deren Ziel war es, eventuell auftretende Hangwindeffekte genauer beurteilen zu können.

3.2.2 Eignung der Standorte

Siehe hierzu Punkt A.1.

3.2.3 Messgeräte und Datenqualität

3.2.3.1 AWS

Die meteorologischen „Herzstücke“ der Auswertungen bilden die eingesetzten Wetterstationen, die folgende Komponenten gemessen haben:

Station	Parameter
BAS	T, RH, ws, wd, $kw \downarrow$, $kw \uparrow$, $lw \downarrow$, $lw \uparrow$
LT	T, RH, ws, wd, $kw \downarrow$
BT	T, RH, ws, wd, p
KAP	T, T_d , ws, wd, $kw \downarrow$
VB	T, T_d , ws, wd, p, $kw \downarrow$, $kw \uparrow$

Tabelle 3.2: Gemessene Komponenten je Wetterstation. T=Temperatur, RH=Relative Feuchte, ws= Windgeschwindigkeit, wd=Windrichtung, kw=kurzwellige Strahlung, lw=langwellige Strahlung, \downarrow Einstrahlung, \uparrow Ausstrahlung, p=Luftdruck, T_d =Taupunkttemperatur.

Um die Datenqualität gewährleisten zu können, wurden nach Beendigung des Messprojektes sämtliche Wetterstationen für 10 tägige Vergleichsmessungen im Bereich von Messpunkt BAS installiert. Im Folgenden werden in einer Tabelle die berechneten Quadrate der Korrelationskoeffizienten und die Regressionsgleichungen für jene Parameter, deren Absolutwerte detailliert verglichen werden (z.B. Temperatur), angeführt. Als Referenzgerät wurde die Station BAS gewählt.

Für alle anderen Messparameter, die teilweise nicht an allen Stationen gemessen wurden, dienen Zeitverläufe zum Vergleich mit dem Verlauf der Referenzstation BAS als Kontrolle. Dabei konnte festgestellt werden, dass nur bei der Messung von kurzwelliger Strahlung zeitweise Abweichungen auftreten. Die Fehler liegen aber nach einer Offsetkorrektur meist im einstelligen Wattbereich, sodass die Daten ihren Zweck im Rahmen dieser Arbeit erfüllen. Dieser ist nicht exakte Unterschiede (wenige Watt) zwischen den Stationen zu berechnen sondern zu erheben, wann und wo direkte Sonneneinstrahlung auftritt.

	BT	KAP	VB
T	$R^2=0.997$ $y=1.0171\text{BAS}-0.08$	$R^2=0.998$ $y=1.0187\text{BAS}+1.4732$	$R^2=0.998$ $y=1.0148\text{BAS}-0.9986$
WS	$R^2=0.922$ $y=1.0493\text{BAS}+0.0484$	$R^2=0.900$ $y=0.9423\text{BAS}+0.1256$	$R^2=0.981$ $y=1.0398\text{BAS}+0.1635$
RH	$R^2=0.996$ $y=0.9973\text{BAS}-0.7402$	$R^2=0.991$ $y=1.0081\text{BAS}-3.6005$	$R^2=0.994$ $y=1.0187\text{BAS}-0.3721$

Auf die Winddaten der AWS am Standort KAP musste verzichtet werden, da die zu geringe Entfernung des AWS-Standortes zum Gebäude bzw. die umgebende Topographie zu einer unkorrigierbaren Verfälschung der Windmessungen führte. Weitere Details siehe A.1.

3.2.4 AWS und NOx-Analysator LT und AL

Von der Abteilung Waldschutz (Fachbereich Luftgüte) und von der Abteilung Verkehrsplanung des Amtes der Tiroler Landesregierung wurden uns für die Station LT sämtliche gemessenen Komponenten der AWS (siehe Tabelle 3.2) und NOx Messungen (Halbstundenmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sowie halbstündlich berechnete Emissionsdaten zur Verfügung gestellt. Auch die NOx Daten der Station AL wurden als Halbstundenmittelwerte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) zur Verfügung gestellt.

Meteorologie:

Bezüglich der Datenqualität wurde von den Betreibern der Station das Vergleichsprotokoll vom Sommer 2007 zur Überprüfung der meteorologischen Sensoren zur Verfügung gestellt. Das Protokollblatt, auf dem die Ergebnisse zusammengefasst sind, ist im Anhang zu finden (siehe A.10).

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Sensoren äußerst gute Werte geliefert haben. Die etwas geringere Korrelation beim Wind ist unter Berücksichtigung der gestörten Windverhältnisse (kleinstscalige Ablenkungs- und Verwirbelungseffekte durch Autobahn und Autobahnüberführung) zu erwarten, da es nicht möglich ist, die Vergleichsmessung am exakt selben Punkt durchzuführen. Außerdem ist in Abb. A.10 zu erkennen, dass Nordwindrichtungen trotz geringer Abweichungen in der Realität aufgrund des Rechenverfahrens große Abweichungen verursachen (siehe größte negative Abweichung links unten).

Schadstoffmessungen LT und AL:

Zunächst ist festzuhalten, dass die NOx-Werte inklusive Komponenten (NO und NO_2) in Masse pro Volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) zur Verfügung gestellt wurden. Die Luftschadstoffkomponenten (NO_x und NO) wurden mit einem NOx-Analysator der Firma „Thermo Electron Corporation“, Modell 42i, gemessen. Genaue Informationen über das Messprinzip sind in der Bedienungsanleitung zu finden (Thermo Electron Corporation 2005). Die Berechnung von NO_2 und die Umrechnung von Mengenanteil (ppm) in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ erfolgen in diesem

Fall direkt im Gerät. Die Theorie dahinter passiert auf folgenden Umrechnungsgleichungen (Hocking 2005):

$$\begin{aligned} NO_2[ppb] &= NOx_{Gemessen}[ppb] - NO_{Gemessen}[ppb] \\ NO[\mu g/m^3] &= NO[ppb] \cdot 1.2471 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$NO_2[\mu g/m^3] = NO_2[ppb] \cdot 1.912 \quad (3.2)$$

Die Faktoren in Glg. 3.1 und Glg. 3.2 berechnen sich dabei für einen Druck von 1013hPa (entspricht 1atm) und eine Temperatur von 298°K auf folgende Weise (Hocking 2005):

$$V = \frac{nRT}{p} = \frac{1 \cdot 0.08206[(\text{atmL})/(\text{molK})] \cdot 298.15[\text{K}]}{1[\text{atm}]} = 24.46 \text{ [L/mol]} \quad (3.3)$$

$$x [\mu g/m^3] = \frac{ppb \cdot M[g/mol]}{V[L/mol]} \quad (3.4)$$

$$x [\mu g/m^3] = \frac{1 \cdot 10^{-9} \cdot M \cdot 10^6 [\mu g/mol]}{V \cdot 10^{-3} [m^3/mol]} = MA \cdot \overbrace{\frac{M}{V}}^{\text{FAKTOR}} [\mu g/m^3]$$

n...Teilchenanzahl	R...universelle Gaskonstante [(atm L)/(mol K)]
T...Temperatur [°K]	p...Luftdruck [atm]
M...Molekulargewicht[g/mol]	V...Molekülvolumen [L/mol]
MA...Molekülanzahl [ppb]	x...Molekül (z.B. NO)

$$M(N)=14, M(O)=16 \Rightarrow M(NO)=30, M(NO_2)=46$$

Den Faktor stellt schlussendlich der Bruch M/V dar, wobei M je nach Molekül variiert, wogegen V konstant¹ bleibt.

Zur Berechnung von NOx [$\mu g/m^3$] wurde im Rahmen dieser Arbeit daher folgende Formel verwendet², wobei die Werte für NO und NO₂ aus den Gleichungen 3.1 und 3.2 stammen:

$$NOx[\mu g/m^3] = NO[\mu g/m^3] + NO_2[\mu g/m^3] \quad (3.5)$$

Die Berechnung von NOx [$\mu g/m^3$] nach dem IG-L lautet (Weber et al. 2009, S.29):

$$NOx[\mu g/m^3] = (NO[ppb] + NO_2[ppb]) \cdot 1.912 \quad (3.6)$$

Sobald in der Luft NO Moleküle vorhanden sind ist NOx kleiner als NOx-IGL, weil dem NO in Glg. 3.6 ein erhöhtes Molekulargewicht (M(NO) entspricht in diesem Fall M(NO₂)) zugesprochen wird.

¹ falls p=const, T=const

²Nicht gleich NOx-IGL! Weitere Informationen siehe Glg. 3.6 und Weber et al. (2009), S.12; S.29

Bezüglich **Messqualität** müssen laut dem IG-L zwingende Qualitätssicherungsmaßnahmen durchgeführt werden (weitere Informationen hierzu in Weber et al. (2008), S.7ff). Die Ergebnisse bestätigen mit einer Messunsicherheit von 10 % bei Halb- bzw. Einstundenmittelwerten die Einhaltung des Qualitätsziels von 15 % Messunsicherheit. Eine Übersicht über die Berechnung und die Ergebnisse für das zweite Halbjahr 2007 befindet sich im Anhang (siehe A.11). Ebenso sind die Ergebnisse im Luftgütebericht des Jahres 2007 veröffentlicht (Weber et al. 2008, S.7-8).

3.2.5 Hobo™

Zu den Wetterstationen kamen ursprünglich zehn **Hobosensoren**³, die T und RH messen und somit zur Profilmessung entlang der Hänge auf Sonnen- und Schattenseite bis 1200m eingesetzt wurden.



Abbildung 3.3: Abbildung des Hobosensors von Messpunkt VB2.

Eine Unsicherheit vor Projektstart war die Messqualität der kompakt konstruierten Hobo's (siehe Abb. 3.3). Zur Sicherheit wurden daher Hobosensoren (923 und 920) während des gesamten Projektes im Bereich der AWS LT und VB aufgestellt, um Langzeitvergleiche durchführen zu können. Zudem wurde nach Beendigung des Projekts eine Vergleichsmessung ohne kurzweiligen Strahlungseinfluss zwischen jenen Hobosensoren durchgeführt, die im nächsten Kapitel für Untersuchungen herangezogen werden. Da die mittleren Abweichungen der Sensoren vom gewählten Referenzsensor 920 im Bereich von 1/100 °C oder darunter lagen und die maximale Abweichung nur bei einem Sensor knapp über 1/10 °C erreichte, kann auf Anpassungen der Sensoren untereinander verzichtet werden.

³Hobo zu Deutsch: Landstreicher

Wesentlich interessantere Ergebnisse lieferten die erwähnten dauerhaften Vergleichsmessungen Hobo - AWS. Da eine Beeinflussung der Temperaturmessung durch kurzweilige Strahlung zu vermuten war, wurde der Temperaturvergleich in Zeiten mit wenig ($\leq 80 \text{ W/m}^2$) bis keiner und in Zeiten mit Strahlung ($>80 \text{ W/m}^2$) unterteilt.

	$kw \downarrow > 80 \text{ W/m}^2$		$kw \downarrow \leq 80 \text{ W/m}^2$	
	LT	VB	LT	VB
Glg.	$T=0.58+0.96 \cdot T_{923}$	$T=0.75+0.99 \cdot T_{920}$	$T=-0.20+0.95 \cdot T_{923}$	$T=0.63+1 \cdot T_{920}$
Max. Dif. [°]	1.10	1.51	2.23	1.6
R^2	0.9989	0.9985	0.9896	0.9940
\bar{v} [m/s]	0.86	2.46	1.20	2.73
Messwerte	1314	1998	446	720

Tabelle 3.3: Übersicht der wichtigsten Größen der Vergleichsuntersuchungen zwischen Station LT-Hobo923 und Station VB-Hobo920 in der Periode 22.12.07-01.03.08. Glg. steht für die Regressionsgleichung, Max. Dif. ist der größte gemessene Temperaturunterschied zwischen den Sensoren. R steht für den Korrelationskoeffizienten und \bar{v} gibt die mittlere Windgeschwindigkeit der verwendeten Messzeitpunkte wieder.

Wie in Tabelle 3.2.5 ersichtlich, treten sowohl strahlungsbedingt als auch standortbedingt Unterschiede auf. Es kann jedoch festgehalten werden, dass beide Hobosensoren unter strahlungsfreien Bedingungen um gemittelt rund 0.65° zu kühl messen. Deshalb wurde dieser Wert zu allen Messwerten sämtlicher Hobosensoren addiert.

Die Korrektur des Strahlungsfehlers gestaltet sich viel schwieriger, da dieser wohl zusätzlich von der Windgeschwindigkeit abhängt. Während Hobo923 bei Sonneneinstrahlung im Mittel nach Offsetkorrektur um 0.8° zu hohe Temperaturen misst, tritt bei Hobo920 keine relevante mittlere Abweichung mehr auf. Der Grund dürfte die bessere Druchlüftung von Hobo920 aufgrund der viel höheren mittleren Windgeschwindigkeiten am Vomperberg sein.

In der Praxis bedeutet dies, dass während der Messperiode die Temperaturmesswerte der Hobosensoren bei Sonneneinstrahlung und geringen Windgeschwindigkeiten maximal um fast 3° und im Mittel immerhin um 1.1° abgewichen sind. Eine allgemeine Korrektur ist unmöglich, da an den übrigen Messstandorten weder Informationen über Windgeschwindigkeit noch kurzweilige Strahlung vorliegen und diese Werte im stark strukturiertem Inntal räumlich enorm variieren.

Bekannt ist jedoch, dass Hobo918 und Hobo917 während der Messphase keiner direkten kurzweiligen Strahlung ausgesetzt waren. Hobo916 wird erst ab Mitte Feber in den Nachmittagsstunden besonnt, Hobo922 bereits ab Jänner ab der Mittagszeit. Weitere Hobosensoren sind für Stabilitätsuntersuchungen nicht unbedingt notwendig, da auf der Nordseite auf AWS LT und VB zurückgegriffen werden kann. Zusammenfassend ist also im Rahmen der Auswertungen zu beachten, dass während Sonnenschein am Südhang zu hohe Temperaturen gemessen worden sein könnten.

3.2.5.1 Wölfler

Die Wölfler-Windsensoren werden seit 1962 von der deutschen Wilh. Lambrecht KG⁴ hergestellt. Durch die Möglichkeit, 4 Wochen ohne Wartung mit einem relativ leicht zu transportierenden und im Feld zu installierenden Messgerät Windrichtung und Windweg (Berechnung der Windgeschwindigkeit möglich) zu messen, eröffneten sich für Forscher viele neue Möglichkeiten.

Die Wölflersensoren funktionieren mechanisch ohne Spannungszufuhr. Das Uhrwerk und die Wachsrollen müssen lediglich alle 4 Wochen aufgezogen bzw. getauscht werden. Trotz der rein mechanischen Funktionsweise können Windgeschwindigkeiten unter 0.5 m/s erfasst werden (Wilh. Lambrecht KG 1962).

Trotz ihres Alters waren am IMGJ gelagerte Wölflersensoren noch funktionstüchtig und konnten daher für Zusatzmessungen herangezogen werden. Das Problem dabei ist, dass heutzutage zu wenig Zeit zur sehr aufwendigen Digitalisierung der analogen Messdaten zur Verfügung steht.

Bezüglich Messdaten ist zuerst zu bemerken, dass es während der Messphase trotz des Alters der Sensoren nur zu sehr wenigen Datenausfällen gekommen ist.

Bezüglich Messqualität wurden zwar Vergleichsmessungen durchgeführt, nachdem die Daten aber im späteren Auswertungsteil keine substantielle Rolle spielen, wurde auf eine exakte, digitalisierte Auswertung des Vergleichs verzichtet und nur ein optischer Überblick durchgeführt, der im groben passende Ergebnisse lieferte. Ein Sensor fiel während der Vergleichsmessungen aus und wird daher nicht für Auswertungszwecke verwendet.

Aufgrund der teilweise in kurzen Zeiträumen sehr stark schwankenden Windrichtungsaufzeichnungen ($\pm 50^\circ$ Intervall) wäre ein genauere Vergleich ohnehin schwierig. Ebenso ist es daher kaum möglich, kleinräumige Winddrehungen in Südwest-Nordostrichtung entlang des Hanges z.B. aufgrund der kegelförmigen Ausbreitung eines Kaltluftstromes aus dem Bachtal nachzuweisen. Hierfür müsste sehr viel Zeit in die Aufbereitung der Daten bei gleichzeitig unsicheren Erfolgsaussichten investiert werden.

Geeignet sind die Daten jedoch, um mögliche Einflüsse vom Bachtal auf die Station LT zu verifizieren, da es im Falle von Einflüssen nicht sein kann, dass am dazwischenliegenden Hang andere Winde beobachtet werden.

3.2.5.2 DustTrakTM

Beim *DustTrakTM* (Modell 8520), der als PM10-Analysator im Bachtal verwendet wurde, handelt es sich um ein sehr kompaktes, optisches Feinstaubmessgerät. Zur Bestimmung der Feinstaubkonzentration wird ein gefilterter Luftstrom (Grobstaub und andere größere Partikel werden über einen Filter entfernt), der mittels einer internen Pumpe durch ein

⁴Heute: Wilhelm Lambrecht GmbH

bekanntes Volumen im Gerät geleitet wird, mit einem Laser bestrahlt. Der Laser hat eine Wellenlänge, die ungefähr der Größenordnung des Partikeldurchmessers entspricht, sodass Licht, das auf Partikel trifft, gleichmäßig in alle Richtungen gestreut wird. Ein rechtwinklig zum Strahl und Luftstrom angeordneter Detektor wandelt die auftreffenden abgelenkten Lichtstrahlen in ein Voltsignal um, das proportional zur Massenkonzentration ist.

Probleme bei optischen Verfahren bereiten die Abhängigkeit der Streuung vom Partikeldurchmesser, vom Brechungsindex und von den Absorptionseigenschaften eines Partikels. So ist nämlich auch das gewünschte Endprodukt, die Masse an Feinstaubpartikel pro Volumen (z.B. mg/m^3) von diesen Parametern abhängig. Beim *DustTrakTM* wird dieses Problem durch spezielle Kalibrierverfahren mit Spezialmessgeräten minimiert⁵. Eine derartige Kalibrierung wurde im Zuge einer grundlegenden Wartung des Geräts vor Beginn des Messprojekts durchgeführt.

Allgemein ist zu sagen, dass im Rahmen der Untersuchungen nicht die möglichst hohe Genauigkeit der Absolutwerte entscheidend ist, sondern die zeitlichen Verläufe der Konzentrationen, insbesondere bei Winddrehungen (TSI 2006; TSI 2004).

Nicht vergessen werden dürfen die vom Hersteller beschriebenen Probleme bei Messungen während Niederschlag. Der Überblick der Daten zeigt tatsächlich, dass manchmal während Niederschlagsperioden mit sehr hohen Luftfeuchten parallel hohe Feinstaubkonzentrationen gemessen werden, die nicht erklärt werden können. Deshalb wurden großzügig alle Feinstaubwerte, bei denen gleichzeitig eine Luftfeuchte größer 90% gemessen wurde, entfernt.

Hinsichtlich Datenqualität ist zu erwähnen, dass dieses Messgerät laut mündlicher Mitteilung von Johannes Vergeiner (Mitarbeiter IMGI; Oktober 2008) wenige Monate vor Messbeginn von der Herstellerfirma gewartet und anschließend am Innsbrucker Ölberg kurzzeitig verwendet wurde. Durch die zusätzliche optimale Unterbringung des Geräts in einer temperierten Umgebung und der plausiblen Datenwerte gibt es also keinen Grund, die Messqualität anzuzweifeln. Die trotzdem großen Datenlücken haben einzig mit Bedienungsproblemen zu tun. So war es aufgrund eines Bedienungsfehlers lange nicht möglich, den internen Speicher zu löschen, sodass keine Daten mehr aufgezeichnet werden konnten.

⁵Nähere Informationen und eine Skizze zur Messanordnung ist der Information „DustTrak Theory of Operation“ zu entnehmen. Online verfügbar auf der Internetseite des Herstellers (<http://www.tsiinc.de/>)

Kapitel 4

Statistische Messdatenanalyse und Interpretation

In diesem Kapitel werden alle Berechnungen und Abbildungen, die mit dem umfangreichen Datenmaterial durchgeführt bzw. erstellt wurden, präsentiert. Alle folgenden Datenverarbeitungen wurden mit MatlabTM durchgeführt. Alle angesprochenen Zeiten und Zeitskalen in Abbildungen sind in UTC. Als Auswertungsgrundlage dienen für alle Größen gemittelte (skalares Mittel; Ausnahme Wind vektoriell) 30 Minutenwerte¹. Die verwendeten Abkürzungen für die Messstandorte finden sich in Tabelle 3.1.

Zuerst wurden im **Punkt 4.1** Berechnungen zur Einschätzung der klimatologischen Eigenschaften des Winters 2007/08 durchgeführt, anschließend wurden im rein meteorologischen **Punkt 4.2** Klassifizierungen für die Windarten gewählt, die Winddaten damit automatisch zugeordnet und statistisch aufbereitet.

Im anschließenden **Punkt 4.3** wurden die verfügbaren Daten bezüglich Luftschadstoffen verarbeitet und mit Ergebnissen von kleinskaligen Winduntersuchungen im Bereich der Station LT östlich der Raststätte A12 in Vomp in Verbindung gebracht. Den Abschluss der kleinskaligen Analyse bilden Fallstudien, in denen versucht wird, atypische Tagesgänge in der Luftschadstoffkonzentration zu erklären.

4.1 Winterüberblick

4.1.1 Klimainformationen

Die drei Monate während der Kernmessphase (1.12.07 - 29.02.08) waren im Vergleich zum Mittel (1971 bis 2000) am Flughafen in Innsbruck um 2.8°C zu warm. Außerdem fielen nur knapp 60% des mittleren Niederschlages (siehe Abb. 4.1). Diese Umstände führten dazu, dass an nur 6 von 91 Tagen in Innsbruck eine Schneedecke von mehr als 1cm registriert wurde.

Im Raum Schwaz geht aus den Daten der Albedo (Station BAS) hervor, dass es nur 4 Tage mit durchgehender Schneebedeckung gab. Einzig der in der Silvesternacht gefallene

¹Auflösung der Messwerte: 1 Minute bei AWS, 2 Minuten bei Hobosensoren

Schnee blieb länger als einen Tag bis zum Föhndurchbruch am 3. Jänner liegen.

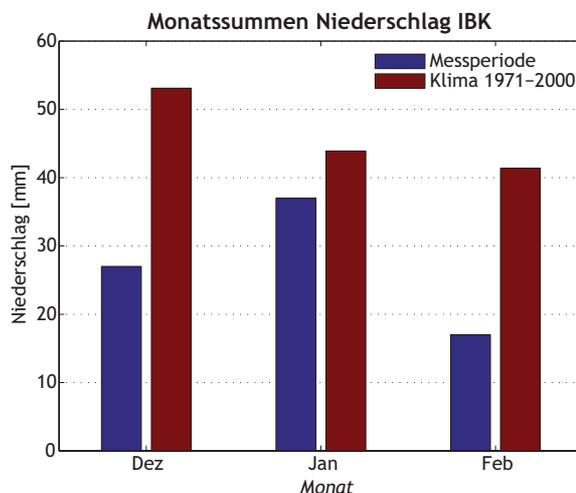


Abbildung 4.1: Monatssumme des Niederschlags in IBK-Flughafen im Dezember 2007 und Jänner und Feber 2008 sowie im Mittel von 1971-2000. Datenquelle: ZAMG

Betrachtet man die Monate im Detail, so wies der **Dezember 2007** mit -0.1°C eine geringe negative Abweichung vom Mittel (1971-2000) auf. Wenn man jedoch bedenkt, dass nur rund **50%** des mittleren Niederschlages gefallen sind und sich von Mitte bis Ende Dezember die längste Hochdruckperiode während der Messungen mit stark begünstigter Auskühlung in den Winternächten eingestellt hat, überrascht die nur leicht negative Temperaturanomalie. Eine vorhandene Schneedecke im Inntal hätte das Temperaturniveau sicher deutlich nach unten gedrückt.

Der **Jänner 2008** begann mit zwei sehr kalten Tagen. Am späten Abend des 02.01.08 wurde mit -13.3°C die tiefste Temperatur des gesamten Winters gemessen, ebenso wurde an diesem Tag mit -8.9°C die mit Abstand tiefste Tagesmitteltemperatur aufgezeichnet. Mitverantwortlich für die verhältnismäßig tiefen Temperaturen war neben den kalten Luftmassen die vorhandene Schneedecke im Inntal vom 01.01.08 bis zum 02.01.08. Bereits am nächsten Tag wurde die Kaltluft jedoch durch einen Südföhndurchbruch vollständig ausgeräumt, was am 03.01. zu einem Tagesgang der Temperatur von mehr als 17°C führte. Im weiteren Verlauf zeigte sich der Jänner sehr mild, sodass nach dem 02.01.08 kein einziger Eistag (Temperaturen ganztags unter 0°C) mehr auftrat. Dies führte zu einer Temperaturabweichung um $+3^{\circ}\text{C}$ im Vergleich zum Mittel (1971-2000). Die Abweichung der Niederschlagsmenge vom Mittel fiel in Innsbruck im Jänner mit **-16%** geringer als im Vormonat aus, die Abweichung der Sonnenscheindauer von **+13%** war ebenso nicht außergewöhnlich.

Anfang **Feber** traten im Messgebiet wieder zwei Föhnfälle mit hohen Temperaturen und der höchsten gemessenen Tagesmitteltemperatur (9.4°C am 05.02.08) auf, ehe sich gegen Mitte des Monats eine Hochdrucklage einstellte. Das Temperaturniveau lag um einiges höher als in der Periode Ende Dezember. Am 15. und 16. Feber wurde das Messgebiet kurzzeitig von arktischer Kaltluft beeinflusst, die aber nicht in der Lage war, die Tem-

peraturen auch tagsüber unter 0°C zu drücken und rasch von stetig milder werdenden Luftmassen aus Süden abgelöst wurde.

Gegen Ende Feber trat eine nochmalige Hochdruckphase mit völlig außergewöhnliche Bedingungen für diese Jahreszeit auf. So wurden von 23.02.08 - 27.02.08 Höchsttemperaturen von über 15°C gemessen, am 24.02.08 gar 20°C erreicht. Ebenso traten enorme Temperaturtagesgänge auf - der größte der Gesamtperiode wurde mit 19.5°C am 25.02.08 gemessen. Am 27.02.08 beendeten Niederschläge die Hochdruckperiode, nicht jedoch das milde Wetter, was sich an der höchsten Tagesmitteltemperatur (7.3°C) ohne Föhneinfluss zeigt. Zusammenfassend ergab sich für den Feber eine positive Temperaturanomalie von 2.3°C und ein Niederschlagsdefizit von **58%**. Damit in Verbindungen stehen **50%** mehr Sonnenstunden als im Mittel (Quelle:ZAMG).

Abschließend bewegt sich der Fokus von den Klimastationen in der Umgebung des Messgebiets zu den dortigen Messungen im Winter 2007/08. Abb. 4.2 übermittelt hierfür einen Eindruck über den Temperaturverlauf im Messzeitraum an der Talsohle bei Schwaz.

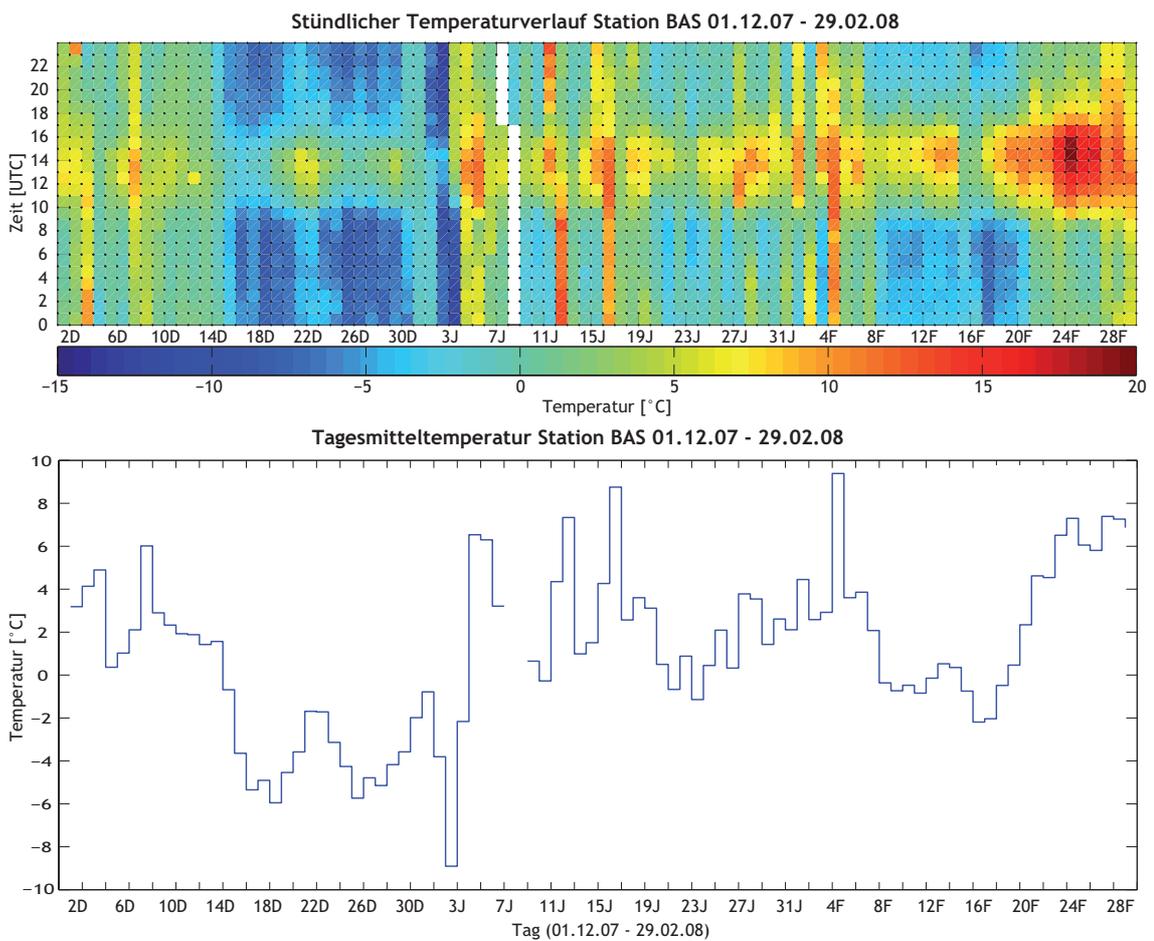


Abbildung 4.2: Stündlicher Temperaturverlauf (oben) und Tagesmitteltemperatur (unten) während der Gesamtperiode an der Station BAS im Bereich der Talsohle des Inntals bei Schwaz. Tage auf der x-Achse.

4.1.2 Stationsvergleich

Beim Vergleich der Monatsmitteltemperaturen in 4.3 zeigt zunächst noch einmal, dass klimatisch nur der Dezember in etwa im Normbereich der Temperatur lag. Es folgten ein sehr milder Jänner und Feber.

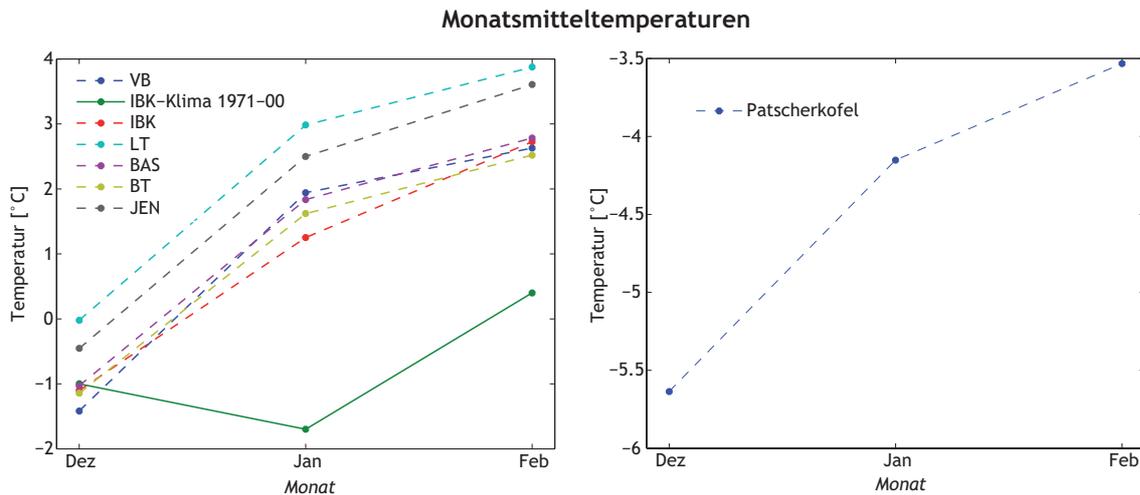


Abbildung 4.3: Monatsmitteltemperaturen (Dezember 2007, Jänner und Feber 2008) links an den Messstationen im Raum Schwaz (Höhen siehe Tabelle 3.1, in Innsbruck Flughafen (IBK; 579m AMSL) und Jenbach (JEN; 530m AMSL) mit Mittel 1971-2000 in Innsbruck sowie rechts am Patscherkofel (2250m AMSL) für die entsprechenden Monate. Datenquelle: ZAMG.

Weiter überrascht beim Vergleich der Stationen auf den ersten Blick, dass die Station Innsbruck Flughafen am unteren Ende der Temperaturkurven liegt und im Jänner gar die kälteste Mitteltemperatur aufweist (obwohl der Vomperberg rund 300m höher liegt). Eine mögliche Erklärung liefern die zahlreichen Föhnfälle im Jänner und Feber (sehr gut in Abb. 4.2 zu sehen). Es ist nämlich zu bedenken, dass gerade im Winter Fälle auftreten, bei denen der (Süd-)Föhn in Innsbruck am Boden nicht aufgespalten wird (in Ostwind Richtung Flughafen und Südwind Richtung Schwaz), sondern bei dem ausfließende Kaltluft aus dem Oberinntal bis zum Westrand der Stadt vordringt und somit einen Föhndurchbruch am Flughafen verhindert. Vom Zentrum Innsbrucks ostwärts dringen die milden Luftmassen jedoch vor und sorgen für sehr große horizontale Temperaturgradienten.

Ein Beispiel für eine derartige Situation zeigt Abb. 4.4. Für den Stationsvergleich bedeutet dies, dass es Zeiträume gibt, in denen alle Stationen außer IBK-Flughafen in deutlich milderen (Föhn-)Luftmassen liegen².

²Eine detailliertere Untersuchung dieses Phänomens wäre möglich, ist aber für die Fragestellungen dieser Arbeit nicht relevant.



Abbildung 4.4: Foto von der Unibrücke Richtung Westen von einer Föhnsituation in Innsbruck am 14.12.2008 (Nachmittag) mit Kaltluft am Flughafen, warmer Föhnluft aus dem Wipptal von der Unibrücke ostwärts.

Die nächste Auffälligkeit in Abb. 4.3 stellen die deutlich wärmeren Temperaturen der Talstationen am Sonnenhang (Station LT in Vomp und Station JEN in Jenbach) dar. Am stärksten ist der Unterschied im extrem sonnigen Feber ausgeprägt. Der Verdacht, dass es sich dabei (auch) um Gerätefehler handelt, kann wegen fehlender Vergleichsmessungen zwischen LT und BAS nicht ganz ausgeschlossen werden, ist aber aufgrund der permanenten Qualitätssicherungsmaßnahmen (siehe Punkt 3.2.4) für die Station LT durch die zuständige Behörde unwahrscheinlich. Vielmehr könnte es zumindest bei dieser Station so sein, dass sie tagsüber bei entsprechender Sonneneinstrahlung in einer dünnen, relativ warmen Hangwindschicht liegt, wogegen sich die in Talmitte und rund 20m tiefer gelegenen Station BAS in einer sehr flachen Kaltluftschicht, die sich im Bereich des tiefsten Punktes talauswärts bewegt, befindet.

Neben den bereits genannten Effekten erkennt man noch die im Winter abgeschattete Lage des Bachtals (Station BT), die dazu führt, dass dort im sonnenreichen Feber die tiefste Mitteltemperatur gemessen wird. Im Jänner zeigt sich weiter, dass das Bachtal aufgrund der Talausrichtung zwar von Föhnwinden abgeschirmt, aber aufgrund der Kleinheit des Tales die Entwicklung eines Mikroklimas durch lokale Kaltluftproduktion nur im mäßigen Ausmaß möglich ist.

Wegen der nur schwachen Kaltluftproduktion/-versorgung dürften am rund 50m tiefer, aber westlich der Einmündungszone des Wipptals gelegenen Flughafens (ausgeprägte Kaltluftversorgung aus dem nach Süden gut abgeschirmten Oberinntal) im Mittel tiefere Temperaturen gemessen worden sein. Ob Abwärme von Fahrzeugen auf der sehr nahe an der Station LT gelegenen Autobahn speziell während windschwacher und windstiller Phasen für eine lokale, positive Temperaturanomalie sorgen kann, ist unklar³.

Abschließend zeigt sich in Abb. 4.3 in den ähnlichen Monatsmitteln von Talsohle (Station BAS) und 330m AGL gelegenen Vomperberg (Station VB), dass sich im Winter

³Dazu müsste man unter Einbeziehung der Daten der Verkehrszählmessstelle Vomp und Annahmen über die Wärmeabgabe von Fahrzeugklassen Berechnungen durchführen.

2007/08 höhere Temperaturen in der Höhe bei Temperaturinversionen und höhere Temperaturen im Tal bei durchmischten Verhältnissen im Monatsmittel nahezu ausgleichen. Anders ausgedrückt hoben sich also Zeit mit positivem bzw. negativem vertikalem Temperaturgradienten mehr oder weniger stark auf.

4.1.3 Selektion von „Sonnentagen“

Da kurzwellige Strahlung im Rahmen dieser Arbeit als Antrieb von Windsystemen (siehe Kap. 2) und als wesentlicher Einflussfaktor auf die Stabilität eine Rolle spielt, ist es sinnvoll, ein Kriterium zu entwickeln, das jeden Tag automatisch kategorisiert. So können gezielt wolkenarme/wolkenreiche Perioden für Detailuntersuchungen ausgewählt werden. Um die Tage vergleichbar zu machen, sind die in weiterer Folge angeführten Berechnungen nötig. Schlussendlich werden alle Tage, an denen grob mindestens $\frac{2}{3}$ der maximal möglichen kurzwelligen Strahlung gemessen wurde, als Sonnentag eingeordnet.

Diese Prozedur ist ziemlich aufwendig, da erstens nur Strahlungsflussdichten (W/m^2) gemessen wurden (keine Sonnenscheindauer⁴), zweitens die Topographie eine stärkere Zu-/Abnahme der maximal möglichen Sonnenscheindauer mit der Jahreszeit bewirkt. Im Folgenden wird nun das „Rezept“ der Zuteilung beschrieben:

4.1.3.1 Zuteilungsverfahren

Berechnung Sonnenscheindauer (Raffler 2005) und Korrekturfaktor:

$$\alpha = \sin(360 \cdot (x - a)) \cdot \epsilon \quad (4.1)$$

$$t = (\arcsin(\tan(\alpha) \cdot \tan(\beta) + 90)) \cdot \frac{24}{180} \quad (4.2)$$

$$r_1 = \frac{\min(t)}{t} \Rightarrow r_1(20.12.) = 1 \quad (4.3)$$

Variable	Definition	Einheit
α	Deklination (jedes Tages)	[°]
ϵ	Deklination der Äquinoktien (23.5)	[°]
x	Julianischer Tag	[]
a	Frühlingsbeginn (Julianischer Tag)	[°]
β	Geographische Breite (47.34 für Schwaz)	[°]
t	astronomische Sonnenscheindauer (SD)	[h]
r_1	Referenzfaktor Sonnenscheindauer	[]

Empirische Berechnung Topographiekorrekturfaktor und Anwendung zur Strahlungsnormierung:

⁴Die automatische Berechnung der Sonnenscheindauer aus Strahlungsflussdichten wäre mglw. eine Alternative zum hier gewählten Weg

$$r_2 = r_1 - (1 - r_1) \cdot e \quad (4.4)$$

$$\overline{kw} \downarrow_{norm} = \overline{kw} \downarrow \cdot r_2 \quad (4.5)$$

Variable	Definition	Einheit
r_2	Referenzfaktor SD & Topographie	[]
e	Empirisch bestimmter Faktor (<i>hier 1.5</i>)	[]
\overline{kw}	Tagesmittel der kurzwelligen Einstrahlung	$[W/m^2]$
$\overline{kw} \downarrow_{norm}$	Normiertes Tagesmittel der kurzwelligen Einstrahlung	$[W/m^2]$

Zusammenfassung in Worten:

1. Berechnung des Tagesmittelwerts der kurzwelligen Einstrahlung
2. Berechnung der astronomischen Sonnenscheindauer für den Standort Schwaz
3. Berechnung des Referenzfaktors r_1 für jeden Tag zur Elimination der unterschiedlichen Tageslänge
4. Berechnung des Referenzfaktors r_2 für jeden Tag durch empirische Anpassung des Faktors r_1 zur Elimination des Topographieinflusses
5. Normierung jedes Tagesmittelwertes durch Multiplikation mit dem dazugehörigem r_2

Abschließend ist festzuhalten, dass die sehr einfache Korrektur des Topographieinflusses nur deshalb möglich ist, weil der Standort Schwaz erstens nicht von sehr kurzzeitigen Schwankungen der Sonnenscheindauer aufgrund von nahe stehenden Hindernissen betroffen ist und zweitens nur eine Zeitspanne von 3 Monaten zu normieren ist. Eine ganzjährige Anwendbarkeit des Algorithmus ist nicht gegeben.

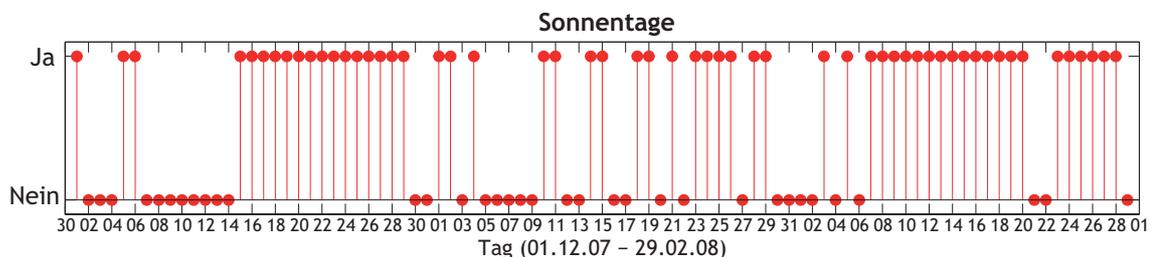


Abbildung 4.5: Klassifizierung jedes Tages in Sonnetage Ja/Nein anhand der empfangenen Menge an kurzwelliger Strahlung. Kriterium und Erklärung siehe Text.

4.2 Regionale Windsysteme

In diesem Punkt werden meteorologische Untersuchungen über Windsysteme im Raum Schwaz durchgeführt. Schwerpunkte sind hier die Einteilung der Windrichtungen in Windarten und die statistische Auswertung (Häufigkeiten) dieser je Standort.

4.2.1 Klassifizierung

Zunächst wurde für jede Wetterstation eine Windrose mit Häufigkeitsverteilung der auftretenden Windrichtungen erstellt und diese in ein Ortofoto am jeweiligen Standort eingefügt. Dies ermöglicht ein möglichst genaues Klassifizieren der Talein- und Auswindrichtungen sowie von Talquerzirkulationen. Talquerzirkulationen sind dabei an den Stationen VB, LT und BAS Strömungen im Talquerschnitt, die entweder definitionsgemäß (siehe Tabelle 2.1) Hangwinde sind oder eng mit ihnen verwandt sind. Querwinde im Inntal entsprechen Tal- bzw. Hangwinden im Bachtal (Talachse steht in ca. 90° Winkel zur Inntalachse).

Als **Calmen** werden nach der Definition der ZAMG bei allen Stationen jene Zeiträume festgelegt, in denen die Windgeschwindigkeit Werte kleiner 0.5 m/s annimmt⁵. Abb. 4.6 gibt einen optischen Überblick über die gewählten Richtungsintervalle je Windrichtung. Alle weiteren Einteilungsregeln enthalten die folgenden Tabellen, die zunächst nach Höhe geordnet Auskunft über die 3 Stationen im Inntal, anschließend über die Station im Bachtal, geben. Die Berechnung der potentiellen Temperatur erfolgte nach Gleichung 2.5.

4.2.1.1 Einteilung der Windrichtung in Sektoren

Abb. 4.6 und die folgenden Tabellen zeigen die gewählte Abgrenzung der Windrichtungssektoren. Alle Richtungen, die in diese Sektoren und Zusatzkriterien (wegen Föhn) hineinfallen, entsprechen dann einer bestimmten Windart.

In jedem Fall ist zu beachten, dass die Abgrenzungen subjektiv sind und in der Natur keine solche Grenzen existieren. Vielmehr gibt es Übergangszonen, in denen zwei Windarten kombiniert auftreten. Trotzdem macht es Sinn, eine Einteilung vorzunehmen, weil bspw. in der Talmitte bereits jene Fälle interessant sind, bei denen die Talwinde abgelenkt werden.

Wichtig ist zudem die Kurve des Inntales westlich von Schwaz zu berücksichtigen, die in Abb. 4.6 nicht mehr zu sehen ist. Weitere Erklärungen für die gewählten Abgrenzungen befinden sich unmittelbar vor den jeweiligen Tabellen.

⁵alle Messstationen können Windgeschwindigkeiten unter 0.5 m/s erfassen

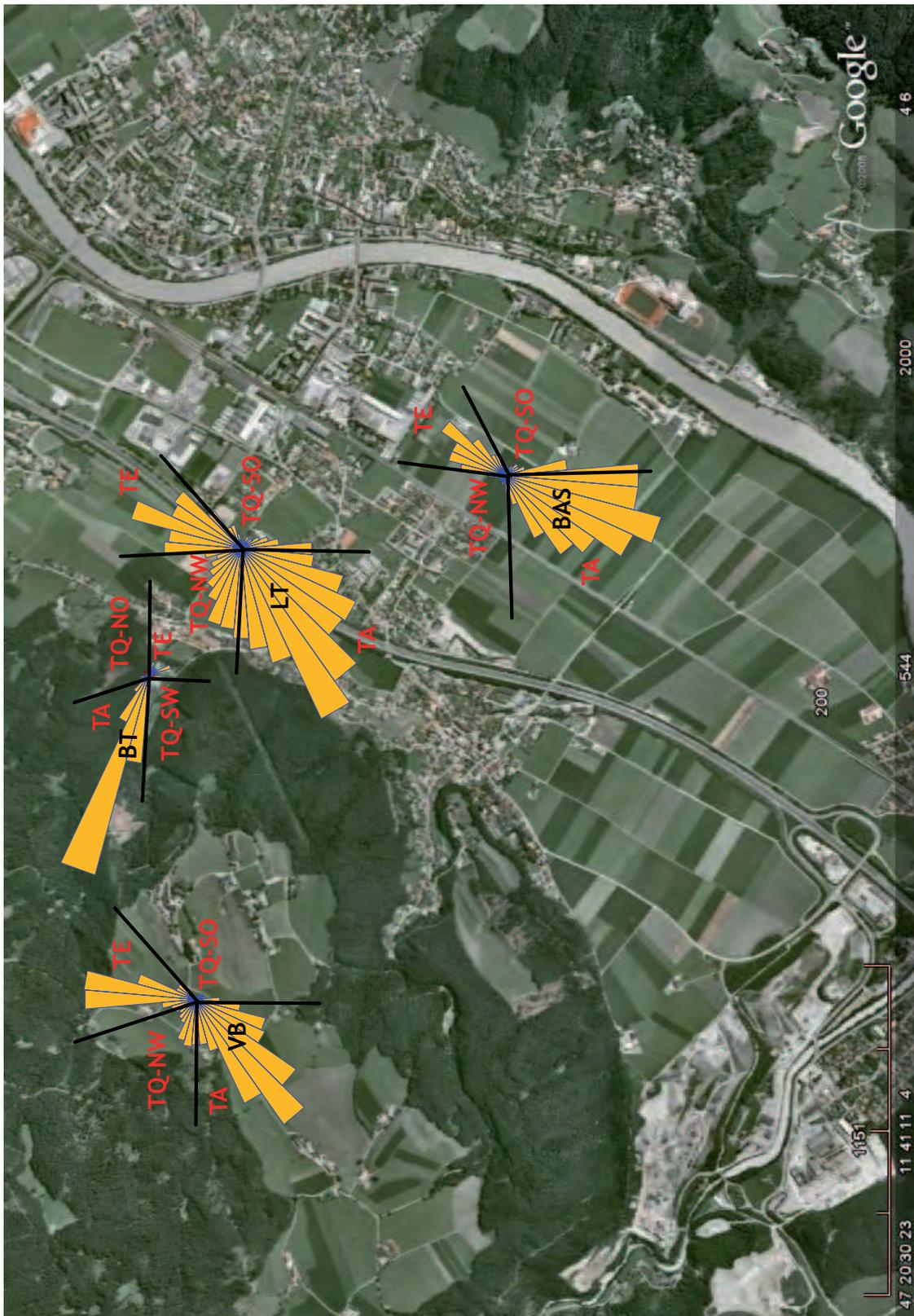


Abbildung 4.6: Häufigkeitsverteilung und Zuteilungen von Windrichtungen zu Windarten je Standort. Die genauen Abgrenzungen sind in den folgenden Tabellen angeführt. TA=TalAus (inklusive Föhn), TE=TalEin, TQ-Richtung= Talquerwind aus NordOst/SüdOst/SüdWest/NordWest.

4.2.1.2 VB1-Station

Am Vomperberg liegt die Besonderheit der Abgrenzung im Taleinwindsektor, da dieser im Vergleich zur Talachse verschoben ist (siehe Abb. 4.6). Der Grund dürfte in der vorgelagerten Topographie zu finden sein, die dem Taleinwind im Bereich der Station eine Nordkomponente aufzwingt. Zweifel, dass es sich wirklich um Taleinwind handelt, gibt es aufgrund von Häufigkeit, Intensität und Vergleich mit anderen Standorten nicht.

Windart	Klassifikation
Föhn	$130 < wdKofel < 190 \ \& \ 180 < wdVB1 < 270 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{VB1} < 5 \ \& \ wsVB1 > 0.5$
Talauswind	$190 \leq wdKofel \text{ oder } wdKofel \leq 130 \ \& \ 180 < wdVB1 < 270 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{VB1} > 5 \ \& \ wsVB1 > 0.5$
Taleinwind	$340 < wdVB1 \text{ oder } wdVB1 < 50 \ \& \ wsVB1 > 0.5$
Talquer SüdOst	$50 \leq wdVB1 \leq 180 \ \& \ wsVB1 > 0.5$
Talquer NordWest	$270 \leq wdVB1 \leq 340 \ \& \ wsVB1 > 0.5$

Tabelle 4.1: Einteilung der Windarten für die Station VB1 am Plateau oberhalb von Vomp in 888m AMSL. Die wd-Werte (Windrichtung) sind in Grad angegeben, die ws-Werte (Windgeschwindigkeit) in m/s.

4.2.1.3 Station LT

Die Windrose im Bereich der Station LT fällt speziell bei westlichen Richtungen (Talauswindsektor) breiter als bei den anderen Stationen aus (siehe Abb. 4.6). Der eindeutige Grund hierfür ist die westlich vorgelagerte Autobahnüberführung, die zu kleinräumigen Ablenkungen und Turbulenzen führt.

Windart	Klassifikation
Föhn	$130 < wdKofel < 190 \ \& \ 180 < wdLT < 280 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{LT} < 5 \ \& \ wsLT > 0.5$
Talauswind	$190 \leq wdKofel \text{ oder } wdKofel \leq 130 \ \& \ 180 < wdLT < 280 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{LT} > 5 \ \& \ wsLT > 0.5$
Taleinwind	$0 < wdLT \text{ oder } wdLT < 50 \ \& \ wsLT > 0.5$
Talquer SüdOst	$50 \leq wdLT \leq 180 \ \& \ wsLT > 0.5$
Talquer NordWest	$280 \leq wdLT \text{ oder } wdLT \leq 0 \ \& \ wsLT > 0.5$

Tabelle 4.2: Einteilung der Windarten für die 563m AMSL gelegene Station LT östlich der Raststation A12 Vomp. Die wd-Werte (Windrichtung) sind in Grad angegeben, die ws-Werte (Windgeschwindigkeit) in m/s. Als Druckwert wurde der auf 563m AMSL reduzierte Druck der Station BT herangezogen.

4.2.1.4 Station BAS

Am schwierigsten ist die Trennung nach Windarten an der Station BAS im Übergangsbereich von Talquer Südost (TQ-SO) zu Talauswind (TA). Schlussendlich wurde aber bei 180° eine Grenze gezogen, bei der anzunehmen ist, dass alle südlicheren Windrichtungen zumindest nicht mehr aus reinem Talauswind bestehen können und teilweise sogar reine Hangabwinde vom Bereich des Arzbergs darstellen.

Windart	Klassifikation
Föhn	$130 < wdKofel < 190 \ \& \ 180 < wdBAS < 270 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{BAS} < 5 \ \& \ wsBAS > 0.5$
Talauswind	$190 \leq wdKofel \text{ oder } wdKofel \leq 130 \ \& \ 180 < wdBAS < 270 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{BAS} > 5 \ \& \ wsBAS > 0.5$
Taleinwind	$5 < wdBAS < 60 \ \& \ wsBAS > 0.5$
Talquer SüdOst	$60 \leq wdBAS \leq 180 \ \& \ wsBAS > 0.5$
Talquer NordWest	$270 \leq wdBAS \text{ oder } wdBAS \leq 5 \ \& \ wsBAS > 0.5$

Tabelle 4.3: Einteilung der Windarten für die 550m AMSL gelegene Station BAS in der Talmitte des Inntales am Westrand von Schwaz. Die wd-Werte (Windrichtung) sind in Grad angegeben, die ws-Werte (Windgeschwindigkeit) in m/s. Als Druckwert wurde der auf 550m AMSL reduzierte Druck der Station BT herangezogen.

4.2.1.5 BT-Station

Die Abgrenzung der Windsektoren ist für das Bachtal bei Betrachtung der Windrose denkbar einfach. In dem schmalen Tal treten praktisch nur zwei Windrichtungen auf, wobei die Talein- bzw. Hangaufwindrichtung in der Windrose nur schwer zu erkennen ist. Die weiteren Untersuchungen zeigen aber, dass diese Windart zwar nur wenige Stunden am Tag, aber doch sehr regelmäßig beobachtet werden kann.

Windart	Klassifikation
Föhn	$130 < wdKofel < 190 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{BT} < 5 \ \& \ wsBT > 0.5$
Talauswind	$280 \leq wdBT \leq 340 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{BT} > 5 \ \text{oder} \ 130 < wdKofel \ \text{oder} \ wdKofel > 190 \ \& \ wsBT > 0.5$
Taleinwind	$90 \leq wdBT \leq 190 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{BT} > 5 \ \text{oder} \ 130 < wdKofel \ \text{oder} \ wdKofel > 190 \ \& \ wsBT > 0.5$
Talquer SüdWest/ Hangauf	$190 < wdBT < 280 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{BT} > 5 \ \text{oder} \ 130 < wdKofel \ \text{oder} \ wdKofel > 190 \ \& \ wsBT > 0.5$
Talquer NordOst/ Hangab	$340 < wdBT \ \text{oder} \ wdBT < 90 \ \& \ \theta_{Kofel} - \theta_{BT} > 5 \ \text{oder} \ 130 < wdKofel \ \text{oder} \ wdKofel > 190 \ \& \ wsBT > 0.5$

Tabelle 4.4: Einteilung der Windarten für die 664m AMSL gelegene Station BT im Bachtal im Gemeindegebiet von Vomp. Die wd-Werte (Windrichtung) sind in Grad angegeben, die ws-Werte (Windgeschwindigkeit) in m/s. Föhn wird im Bachtal nicht nach Richtung definiert. Entscheidungskriterium ist, ob die charakteristische Föhnluft ins Tal eindringen kann.

4.2.1.6 Tageszeitliches Auftreten der Windarten

Abb. 4.7 stellt mit der Häufigkeitsverteilung der Windarten je Stunde am Tag eine erste Möglichkeit dar, die Qualität der Klassifizierung zu kontrollieren. Es wäre bspw. kein gutes Zeichen, wenn an den Stationen am Sonnenhang (VB, LT, BT) südöstliche Querwinde, die mit Hangaufwinden in Verbindung stehen, häufig in der Nacht auftreten würden. Erklärend ist noch festzuhalten, dass diese Statistik 91 Tage (1.12.07-29.02.08) umfasst, in weiterer Folge also zu jeder vollen Stunde 91 Messwerte vorliegen⁶.

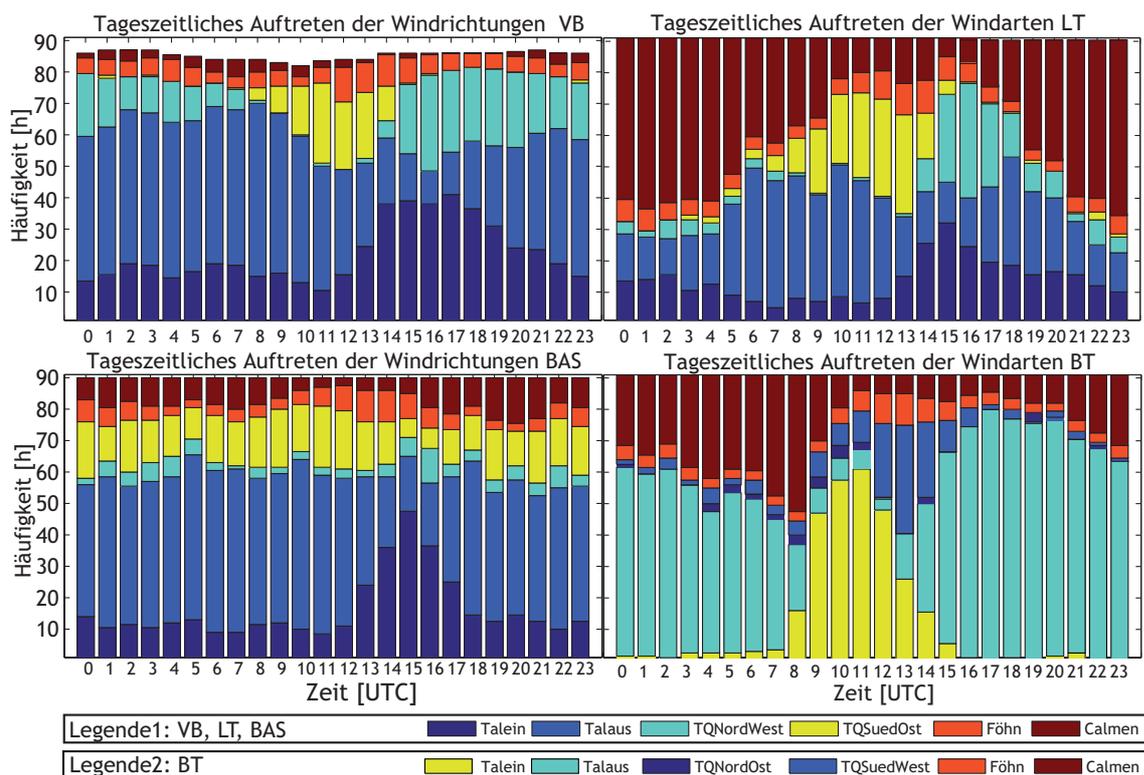


Abbildung 4.7: Häufigkeit des Auftretens der Windarten je Stunde in Stunden an den verschiedenen Stationen. Unterschiedliche Legenden beachten! Der Sinn der verschiedenen Legenden liegt darin, dass alle Windrichtungen im Bachtal die gleichen Farben haben wie an den anderen Stationen haben. Somit sind Zusammenhänge besser erkennbar (z.B. Bachtal und LT gelb \Rightarrow Stationen liegen in gleicher Strömung). Wegen Datenausfällen nicht bei allen Stationen exakt 91 Werte je Stunde.

Die Ergebnisse der Abbildung zeigen, dass an der Station VB und BAS die hellblau markierten Talauswindstunden überwiegen, wobei die größte Häufigkeit in den Nacht- und Morgenstunden auftritt. Taleinwinde können zu jeder Tageszeit vorkommen, das Maximum in der Häufigkeit ist am Nachmittag zu verzeichnen. Dieses wird durch regional erzeugte Taleinwinde, die nur zu dieser Zeit auftreten, verursacht. Taleinwindfälle zu anderen Tageszeiten sind rein synoptisch großskalig bedingt.

An der Station LT können zwar auch Talwinde beobachtet werden, doch sind dort vor

⁶Kurzzeitige Geräteausfälle führten bei den Stationen VB und BAS zu geringen Datenverlusten

allem Talauswinde seltener. Stattdessen kommt es gerade während der Nachtstunden zu sehr vielen windstillen Phasen.

Querwinde (Winde im rechten Winkel zur Talachse des Inntals) kommen an allen Stationen vor. Im Bachtal (Seitenttal im rechten Winkel zum Inntal) entsprechend diese Winde Talwinden. Es ist zu erkennen, dass an den nahe bis gänzlich am Hang gelegenen Stationen VB, LT und BT Tageszeiten existieren, während denen südöstliche/nordwestliche Querwinde bzw. Talwinde (BT) typischer Weise auftreten. Im Bereich der Station BAS ergibt sich kein eindeutiges Bild, nordwestliche Querwinde sind überhaupt sehr selten. Dieser Umstand überrascht jedoch aufgrund der Lage der Station in Talmitte nicht. Ebenso treten in der Häufigkeit der südöstlichen Querwinde nur leichte Variationen auf. Der Grund liegt darin, dass vom nahe gelegenen Arzberg, der im Winter nur am mittleren Nachmittag kurzzeitig Sonneneinstrahlung erhält, fast zu jeder Zeit Kaltluftpakete zur Station vorstoßen und Talwinde zumindest ablenken können.

In den folgenden Punkten wird ausführlich auf alle statistischen Ergebnisse je Station, den damit in Verbindung stehenden Phänomenen und auf Gemeinsamkeiten zwischen den Messorten eingegangen.

4.2.2 Vorherrschende Systeme

Im folgenden soll zu aller erst eine Abbildung über die „mittlere⁷“ Windrichtung je Tageszeit einen Eindruck vom Windregime während des Messzeitraums geben. Föhnzeiträume wurden vor der Mittelung eliminiert, da diese typische tageszeitliche Abläufe verwischen würden.

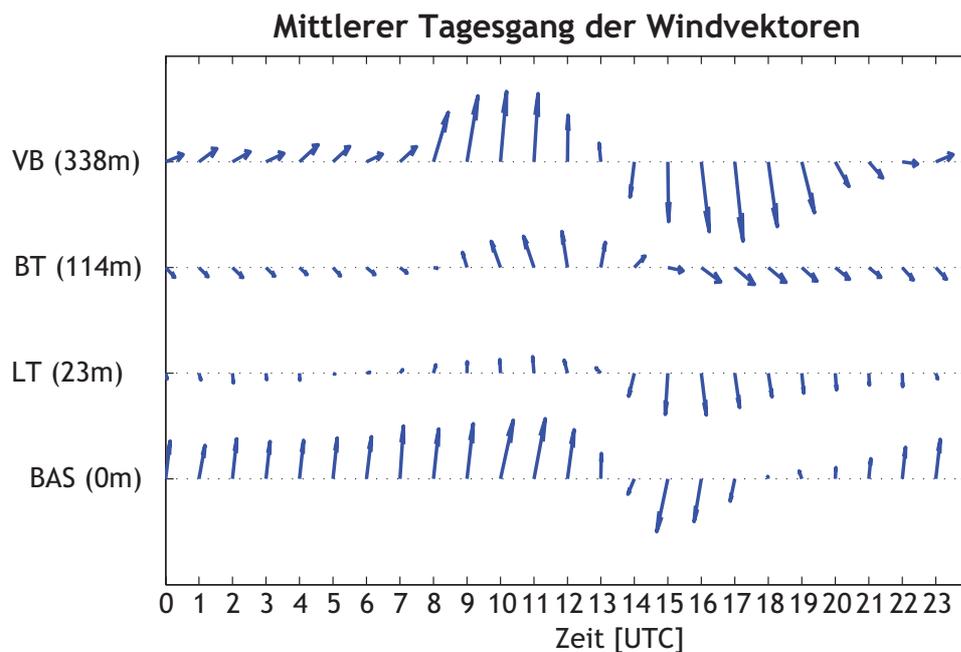


Abbildung 4.8: Qualitative Darstellung des mittleren Tagesgangs (beide vektoriell gemittelt) der Windgeschwindigkeit und Windrichtung an den 4 AWS Standorten. Pfeile von Nordwinden stehen rechtwinklig auf die x-Achse und zeigen nach unten, Ostwindpfeile verlaufen parallel und zeigen nach links. Föhnperioden wurden dabei ausgeklammert, weil sie die typischen Richtungswechsel verfälschen würden. Windgeschwindigkeiten unter 0.5 m/s wurden 0 gesetzt. Alle Höhenangaben sind in AGL (BAS=0). Da selbst vektorielle Mittelungen bei Winden heikel sind, weil Richtungen entstehen können, die in der Natur kaum vorkommen, ist diese Abbildungsart mit Vorsicht zu betrachten. Ihre Berechtigung erhält sie in diesem Fall durch sehr dominante und tageszeitlich regelmäßige Windsysteme in der Talatmosphäre des Inntals.

4.2.2.1 Statistischer Überblick

Abb. 4.9 stellt die Ergebnisse der Anwendung der in Punkt 4.2.1 beschriebenen Klassifizierung auf die Winddaten der Stationen dar. Tabelle 4.5 wiederum gibt neben Windgeschwindigkeit Auskunft über mittlere Werte anderer meteorologischer Größen je Windart.

⁷vektorielles Mittel

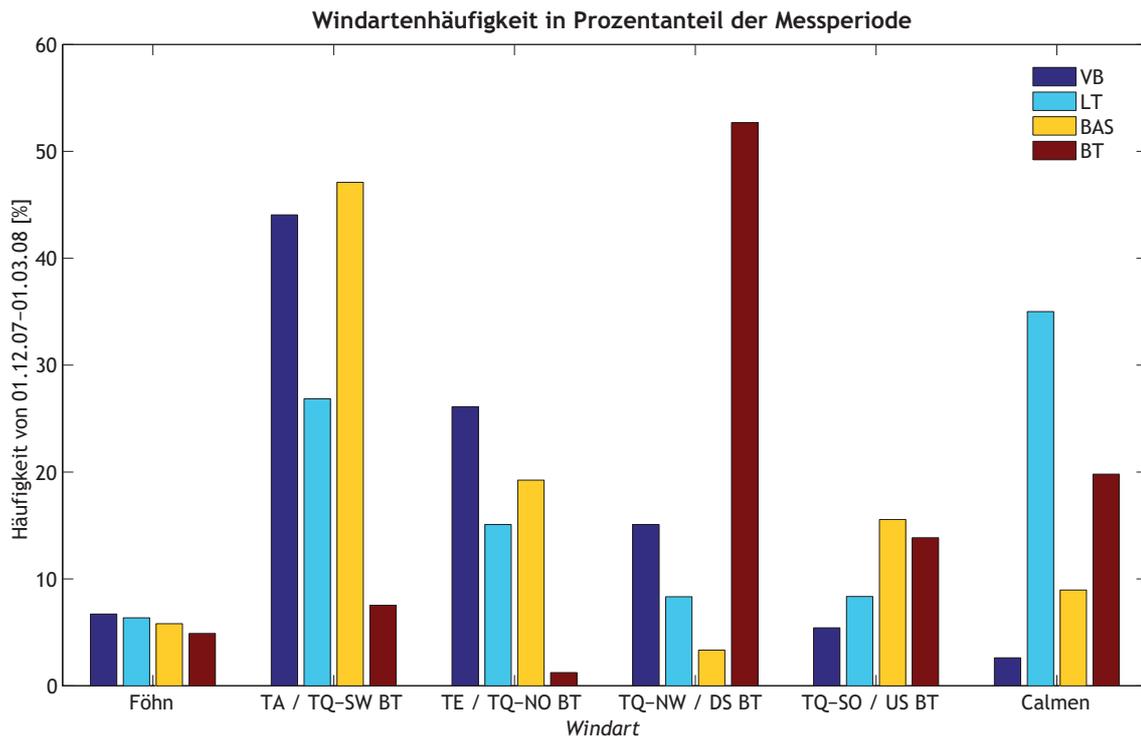


Abbildung 4.9: Häufigkeit des Auftretens definierter Windarten an den verschiedenen AWS Standorten in Prozentanteil an dem Zeitraum 01.12.07 - 03.01.08. TA=TalAus, TE=TalEin, US=UpSlope (Hangaufwind), DS=DownSlope (Hangabwind), TQ-Richtung= Talquerwind aus NordOst/SüdOst/SüdWest/NordWest. Da die Talachse des Bachtals (NW-SO) normal auf die Innentalachse (NO-SW) im Raum Schwaz steht, wurden unterschiedliche Bezeichnungen für die AWS BT verwendet. Die Klassifizierung der Windart erfolgt für jeden Standort individuell. Weitere Informationen siehe 4.2.1. ACHTUNG: Bei Föhn fehlen am VB wegen Datenausfällen rund 2%.

Station	Föhn	TE	TA	TQ NW	TQ SO
VB	7.2m/s	2.6m/s	2.4m/s	1.3m/s	1.5m/s
	138h (+48h)	535h	902h	310h	111h
LT	1.9m/s	2.1m/s	0.9m/s	1.0 m/s	1.1m/s
	139h	329h	587h	183h	183h
BAS	5.1m/s	2.6m/s	2.0m/s	1.7m/s	1.6m/s
	126h	388h	1018h	100h	336h
BT	1.4m/s	0.8m/s	1.0m/s	1.1m/s	1.4m/s
	27h	388h	165h	1151h	302h

Tabelle 4.5: Mittlere Windgeschwindigkeit je Windart und Station sowie Häufigkeit des Regimes in Stunden. Im Bachtal entsprechen südöstliche Querwinde Talein-, nordwestliche Talauswind. Talwinde entsprechen Querwinden. Genaue Definitionen siehe Tab.4.4. ACHTUNG: Bei Föhn fehlen am VB wegen Datenausfällen 48h.

4.2.2.2 Calmen

Das erste zu diskutierende Phänomen ist die „Windstille“ ($v \leq 0.5 \text{ m/s}$). An der Messstation LT wehte während der Dreimonatsperiode während fast 40% der Zeit (entspricht knapp 32 Tage) kein Wind mit Intensitäten über 0.5 m/s (vor allem in den Nachtstunden). Trotz der durch eine Brücke leicht abgeschirmten Lage der Station überraschen diese Zahlen, da im Bereich der Talsohle ca. 1km weiter Richtung Talmitte und rund 25m tiefer keine 200 windstillen Stunden registriert wurden.

Eine mögliche Erklärung liefert die Lage der Station am Nordrand des gekrümmten Inntalbereichs: Bei den dominanten Talauswinden (siehe Abb. 4.9), die genau in jenen Zeiten am Morgen und am Abend typisch sind, in denen die größte Häufung an windstillen Zeiträumen gemessen wurde, liegt der Bereich A12 Vomp gegenüber des Prallhangs (Prallufer) am Hangfuß des Kellerjochs in Schwaz, der durch die Biegung des Inntals in diesem Bereich entsteht. Denkt man an das wasserähnliche Ausfließen der Kaltluft, dürfte die Station bei synoptisch ruhigen Wetterlagen während der Nachtstunden in einer „ruhigen Zone“ (Gleitufer) liegen.

Die Station mit den zweithäufigsten Calmenphasen liegt im Bachtal. Hier fällt auf, dass Calmen über Mittag sehr selten, in der zweiten Nachthälfte häufiger als in der ersten sind (siehe auch Abb. 4.13). Bei Vergleich mit den vorherrschenden Wetterlagen stellt sich heraus, dass der Talauswind bei Frontdurchgängen (04. bis 06.12.07; 30.12.07 bis 01.01.08; 20.01. bis 22.01.08; 06.02.08) häufig versiegt, wogegen der Taleinwind trotzdem fast immer für wenige Stunden einsetzt. Diese gegensätzlichen Phänomene hängen damit zusammen, dass bei dichter Bewölkung (teils mit Niederschlägen) die Kaltluftproduktion an den Hängen unterbunden ist. Gleichzeitig verringern (Kalt-)Frontdurchgänge die Stabilität, sodass tagsüber trotz reduzierter Erwärmung Hangaufwinde einsetzen können.

Für die Theorie, das Bachtal läge nachts unter einem beständigen Inversionsdeckel, sodass Hangabwinde nicht mehr zur Station gelangen können, finden sich kaum Anhaltspunkte. Eher scheint es typisch zu sein, dass im Laufe der Nacht eine Umstellung von kontinuierlichem hin zu schwallartigem Kaltluftabfluss (im Gleichgewicht mit der Stabilität) stattfindet, was sich in einer zunehmend verringerten mittleren Windgeschwindigkeit widerspiegelt.

An den beiden anderen Stationen (VB und BAS) sind Calmen sehr selten bis selten und treten nicht bevorzugt während bestimmter Tageszeiten auf.

4.2.2.3 Talwinde

Abb. 4.8 und Abb. 4.9 zeigen, dass Talauswinde an den Standorten VB und BAS während der drei Wintermonate dominieren, wobei in Schwaz an der Talsohle die größte Häufigkeit vorliegt. Dies spricht für die Plausibilität der Klassifikation, da die Kaltluft am Talboden zuletzt ausgeräumt wird. Ähnliche Ergebnisse wurden für den Winter 2005/06 für die Station in Schwaz erhoben (Wittig 2007).

Das Verhältnis von Taleinwind- zu Talauswindstunden erscheint mit einem Wert von rund

1:2 für die Winterperiode im Vergleich zu den Berechnungen von Wittig (2007) relativ hoch. Dieser Umstand dürfte einerseits direkt mit der geringen Anzahl der Stunden mit Schneebedeckung nicht nur im Inntal selbst sondern auch an den sonnseitigen Hängen in Verbindung stehen. Durch die geringe Albedo konnte sich selbst in der Zeit des Sonnentiefstandes um den 21. Dezember während einer Hochdruckphase zumindest über kurze Zeiträume ein Talein- und Hangaufwindregime aufbauen.

Andererseits resultiert er daraus, dass viele, teils mehrtägig (!) anhaltende Taleinwindperioden (z.B. 10. bis 15. Dezember; 15. bis 17. Feber), die in Abb. 4.9 dem Taleinwind zugeordnet werden, nicht durch regionalskalig entstandene Anisothermie angetrieben wurden sondern durch großskalige synoptische Störungen. Eine Aufspaltung der Taleinwinde für die Station LT erfolgt in Punkt 4.3.3.

Abb. 4.8 liefert ein weiteres sehr interessantes Detail: Speziell am Vomperberg erkennt man, dass sich die Windgeschwindigkeit am Vormittag vor dem Richtungswechsel im Mittel stark erhöht, in sehr abgeschwächter Form trifft dies auch für den Wind an der Talsohle bei Schwaz zu. Eine Erklärung für das Phänomen der sich intensivierenden Winde trotz bereits einsetzendem Abbau und beginnender Umkehr der Druckgradienten⁸ liefert Vergeiner (1983), S. 59. So ermögliche die Labilisierung der Luftschichten in der Talatmosphäre, dass Windimpuls aus höheren Schichten nach unten gemischt werden kann.

Diese Theorie passt bestens zu den Ergebnissen der Abbildung, da die Erhöhung der Windgeschwindigkeit am Vomperberg kurz nach Sonnenaufgang einsetzt und sich trotz Mittelung über drei Monate (!) extrem scharf von dem nächtlichen Regime abhebt. Dass das Phänomen im Bereich der Talsohle in Schwaz viel schwächer ausgeprägt ist, hängt damit zusammen, dass die Station tiefer liegt (der Windimpuls von oben kann den trägen und ohnehin bereits relativ schnellen Kaltluftfluss nur geringfügig beschleunigen), viel später Sonne erhält und somit die Labilisierung erst dann ihr Maximum erreicht, wenn der Talauswind auch in der Höhe bereits einschläft bzw. die Windumkehr stattfindet.

Dass im Bereich der Station LT und BT nichts auffallendes passiert, ist in beiden Fällen durch die abschirmende Wirkung der Topographie (Vomperbergplateau) zu erklären. In weiterer Folge können sich begünstigt durch die Abschirmung der regionalskaligen Winde die kleinskaligen Hangwindzirkulationen, auf die noch ausführlich eingegangen wird, ausbilden.

4.2.2.4 Föhn

Im Untersuchungszeitraum traten im Gebiet Schwaz fünf intensive Föhnperioden auf, die an der Talsohle rund 125 Föhnstunden bewirkten. Diese summierten sich von 3. bis 6., 11. bis 12. und 15. bis 16. Jänner sowie 1. bis 2. und 4. bis 6. Feber auf. Kurze Föhndurchbrüche wurden außerdem am 3. Dezember und während der außergewöhnlich warmen Periode von 24. bis 27. Feber registriert.

Am Vomperberg, rund 330m AGL, wurden 137 Föhnstunden gemessen. Dabei fehlen jedoch rund 48 Stunden, in denen die Datenaufzeichnung unterbrochen war. Die dann re-

⁸Hangaufwinde „saugen“ bereits Masse aus der Talatmosphäre ab (siehe Abb. 4.14 (b))

sultierende Differenz von rund 60 Stunden zur Talsohle zeigt, dass es einige Föhnfälle am Vomperberg gab, während denen ein Durchbruch bis zum Talboden ausblieb.

Interessant fällt bezüglich Föhn der Vergleich der Talsohle (Station BAS) mit dem Bereich A12 Raststätte Vomp (Station LT) aus. Obwohl die Station in Vomp nur 23m höher liegt, wurden um 5% mehr Föhnstunden gemessen. Das deutet darauf hin, dass der Föhn in Bodennähe auf der Sonnenseite aus Stabilitätsgründen tendenziell etwas länger weht.

Ebenso ist erstaunlich, dass die mittlere Windgeschwindigkeit bei Föhn an der Station LT nur 1.9 m/s beträgt, in der Talsohle hingegen 5.1 m/s. Hier dürfte es wie bei Talauswinden an der A12 zu einer Abschirmung kleinskalig durch eine Brücke, großskalig durch den Vomperberg kommen. Dazu kommt wie bereits in Punkt 4.2.1 diskutiert die Kurve des Inntales, die beschleunigte Westwinde im südlichen Teil des Talquerschnittes verursacht.

4.2.3 Hang- und Querwindzirkulationen

4.2.3.1 Vorbemerkungen

Als Hang- bzw. Querwindzirkulationen werden hier zunächst alle gemessenen Windrichtungen der Standorte diskutiert, die eher rechtwinklig als parallel auf die gebogene Talachse des Inntales (etwa $20^\circ \leftrightarrow 210^\circ$) im Bereich Schwaz stehen. Dies ist trotz der anschließenden gemeinsamen Untersuchung aller Standorte notwendig, um das Regime jeder Station in Wechselwirkung mit der Topographie kennen zu lernen.

Darauf aufbauend kann in einem weiteren Schritt untersucht werden, ob es sich möglicherweise nicht (nur) um kleinräumige Strömungen handelt, sondern Zirkulationen im Scale des Talquerschnittes. Die Untersuchungsanregung hierzu liefert die Arbeit von Vergeiner (1983), Kap. VII, in der von Hinweisen auf thermisch bedingte Südkomponenten in der Bodenwindverteilung im Inntal berichtet wird.

Vorweg ist zu berücksichtigen, dass Querwindzirkulationen in der Talmitte nur dann gut beobachtet werden können, wenn das großskalige Talwindssystem schwach ausgeprägt ist oder gerade seine Richtung wechselt, da es sonst zu einer Überlagerung kommt. Bis zu einem gewissen Grad gilt das auch für freie und wenig steile Hangflächen (Standort VB und LT) bis in Höhe der Grenzschicht (siehe auch Punkt 2.2), da das Talwindssystem bis in diese Höhe wirkt. Allerdings kommen hier stark diabatische Effekte hinzu, die zeitweise für ein kleinskaliges Klima sorgen.

Messtation BT unterscheidet sich von den anderen Stationen deutlich. Hier können keine vergleichsweise großskaligen „Inntalwinde“ angreifen. In der Folge bildet sich meist ein „Mikroklima“ aus.

4.2.3.2 Analyse Station VB - Sonnenhang, 333m AGL

Abb. 4.10 stellt alle zur vollen Stunde gemessenen 30 Minutenmittelwerte der Windrichtung an der Station VB dar. Ganztägig dunkelblaue Streifen deuten synoptische Taleinwinde an. Dunkelblaue Felder am späten Nachmittag (speziell im Feber) stellen regional erzeugte Taleinwinde dar.

Der helle Streifen am späten Vormittag zeugt von lokal induzierten Südkomponenten

(Hangaufwindeinfluss), die dunkelroten Zonen ab ca. 15:00 Uhr UTC von lokal induzierten Nordwestkomponenten (Hangabwindeinfluss).

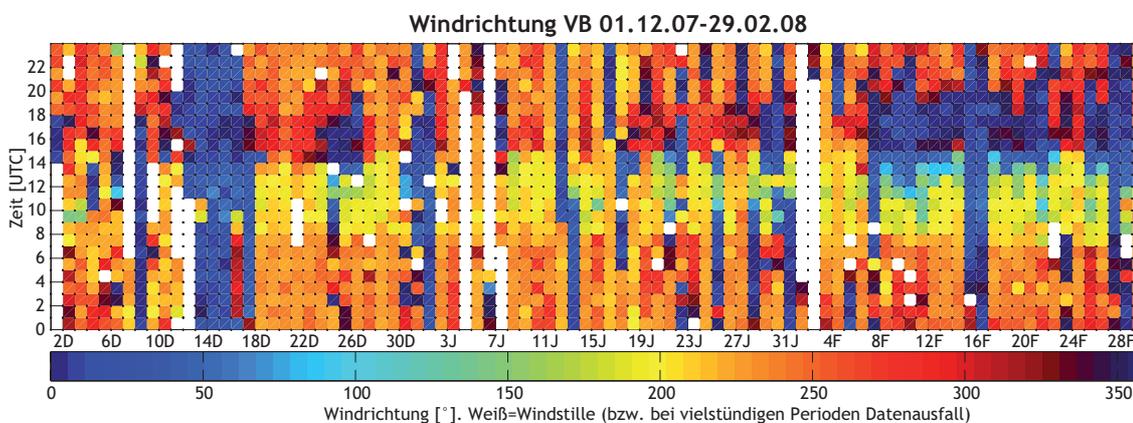


Abbildung 4.10: Windrichtungsverlauf während der Gesamtperiode an der Messstation VB am Vomperberg 333m AGL. Tage auf der x-Achse, Tageszeit auf der y-Achse. Nördliche Querwinde rot, südliche Querwinde grün bis gelb.

Querwinde aus nordwestlicher Richtung machen am Vomperberg rund 15% der beobachteten Winde aus und sind hauptsächlich durch Kaltluftabfließen von den Hängen in Falllinie zur Station zu erklären, da die noch 1000m höher aufragende Vomper Kette Gradientwinde aus dieser Richtung vollständig abhält. Ebenso können weder föhnartige noch katabatische Winde aus dem Vomperloch zum östlichen Vomperberg vordringen.

Die Betrachtung der Windgeschwindigkeit zeigt, dass die nordwestlichen Querwinde im Mittel mit nur 1.3m/s die geringsten Windgeschwindigkeit aufweisen (siehe Tabelle 4.5). Der Grund, warum diese Winde nach 20:00 Uhr UTC viel seltener als die Stunden zuvor gemessen werden, dürfte folgender sein: Topographisch betrachtet befindet sich oberhalb der Station ein nur schmales, gleichförmig ansteigendes Band, das im Westen von der sog. Bergereben begrenzt wird, im Osten von Bachtal und sog. Mahdgraben. Dieses schmale Band ist vermutlich mit einer ähnlich schmalen Zone mit Kaltluftabfließen verknüpft. Die Station VB liegt am Westrand dieser Zone. Sobald es zu einer geringfügigen Ablenkung der Hangabwinde nach Osten kommt, können diese nur mehr stromabwärts der Station gemessen werden. Für diese Ablenkung sorgt der typischer Weise ab ca. 20:00 Uhr UTC einsetzende bzw. stärker werdende Talauswind.

Mit den Querwinden aus südöstlicher Richtung (rund 8% Anteil) verhält es sich folgendermaßen: Diese Winde haben ihren Ursprung im Hangaufwind, der am Vormittag bei entsprechender Besonnung und schwachem Talauswind zur Station vordringt, jedoch meist nach etwa 1 bis 2 Stunden von Taleinwinden abgelöst oder zumindest überlagert wird, die plausibler Weise einige Zeit nach Einsetzen der Hangwinde aufleben. Detailuntersuchungen haben gezeigt, dass an Tagen mit ganztägig schneebedeckten Hängen am Plateaubereich unterhalb der Station diese Querwinde nicht gänzlich ausbleiben (z.B. 02.01.08, 23.01.08). Eher sind sie nur schwächer und werden von Talauswinden leicht unkenntlich gemacht.

4.2.3.3 Analyse Station BAS - Talmitte, Talsohle

Abb. 4.11 stellt alle zur vollen Stunde gemessenen 30 Minutenmittelwerte der Windrichtung an der Station BAS dar. Ganztägig dunkelblaue Streifen deuten synoptische Taleinwinde an. Dunkelblaue Felder am späten Nachmittag (speziell im Feber) stellen regional erzeugte Taleinwinde dar.

Südliche Querwinde (gelbe Felder) und nördliche Querwinde (rötliche Felder) kommen zu allen Tageszeiten vor. Die Stunden ihres häufigsten Auftretens kann mit dieser Abbildungsart nicht erkannt werden (siehe hierzu Abb. 4.14).

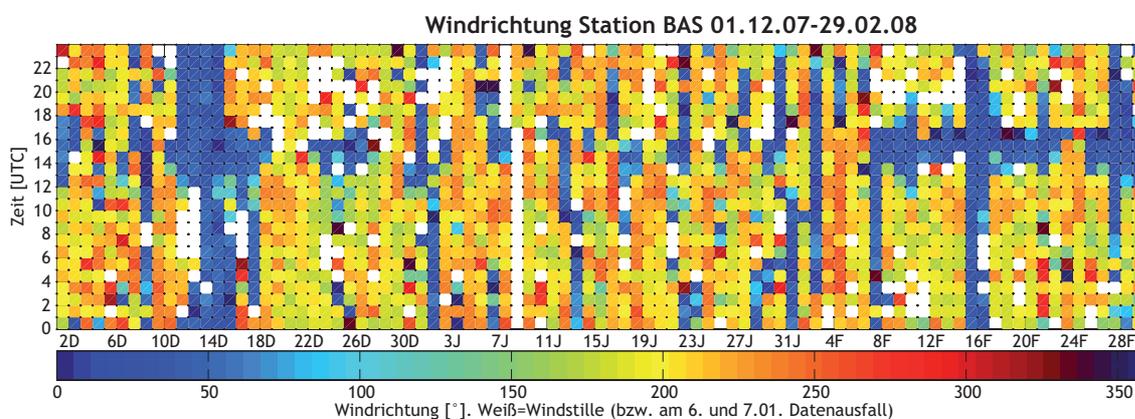


Abbildung 4.11: Windrichtungsverlauf während der Gesamtperiode an der Messstation BAS in der Talsohle des Inntales westlich von Schwaz. Tage auf der x-Achse, Tageszeit auf der y-Achse. Nördliche Querwinde rot, südliche Querwinde (hell)blau.

Talquerwinde aus nördlichen Richtungen spielen bei der Station BAS am Westrand von Schwaz eine kleine Rolle. Weitere Informationen dazu in Punkt 4.2.3.6.

Querwinde aus dem südlichen Sektor sind an der Station BAS mit einem fast 20% Anteil zwar häufig vertreten, es muss aber eindeutig hinzugefügt werden, dass diese Winde meist eine Mischung aus Querwind und Talauswind sind (siehe Abb. 4.6).

Die Ursache für die Südkomponente in der Windrichtung ist vermutlich im südlich gelegenen Arzberg und der horizontalen Anisothermie der Talatmosphäre im Querschnitt zu finden. Vergleicht man die mittlere⁹ Strahlungsbilanz pro Stunde mit dem selben Mittel der südlichen Querwindhäufigkeit, erhält man eine zeitweise Erklärung, warum Querwinde bzw. Ablenkungen der Talauswinde im Bereich der Station beobachtet werden können:

So erreichen Querwinde genau um ca. 13:00 Uhr UTC ihre größte Häufigkeit, wenn die Strahlungsbilanz an der Station ihr Maximum erreicht. Die Luft wird am Talboden zu dieser Zeit also erwärmt, wogegen die Hänge des Arzbergs teilweise noch im Schatten liegen. Durch die Erwärmung der Talsohle wird die Bodeninversion abgebaut, sodass

⁹Mittel über gesamte Messperiode

auch bodennah Masse Richtung Sonnenhang transportiert werden kann. Folglich kann die kältere Luft schwallartig von den Hängen zur Station in der Talmitte vordringen bzw. nachrücken. Das plötzliche, sonderbare Umschwenken der Windrichtung von Südwest auf Süd konnte während der Messphase vor Ort beobachtet werden.

Das eindeutige Minimum der Südwindhäufigkeit tritt um 16:00 Uhr UTC genau dann auf, wenn die Strahlungsbilanz an der Station BAS ihr Vorzeichen wechselt und der Sonnenhang in Vomp zum Schattenhang mit bereits vorhandenen Hangabwinden geworden ist. Knapp zuvor erhalten sowohl Arzberg als auch Talsohle die letzten Sonnenstrahlen (in Abhängigkeit des Sonnenstandes), wobei der sehr flache Sonnenstand durch die Hangneigung am Arzberg bei gleicher Albedo mehr W/m^2 einbringt. Nicht zufällig treten die wenigen Nordwestwindfälle um diese Tageszeit bevorzugt auf.

Wenige Stunden nach Sonnenuntergang steigt die Querwindhäufigkeit aus Süd wieder auf ein höheres Niveau an, das bis zum mittäglichen Maximum mit leichten Schwankungen von Stunde zu Stunde erhalten bleibt und mit stärkerer Auskühlung (\Rightarrow Schwallartige Kaltluftabflüsse) an den höheren Hängen durch Schneebedeckung erklärt werden kann.

4.2.3.4 Analyse Station LT - Sonnenhang; 20m AGL

Abb. 4.12 stellt alle zur vollen Stunde gemessenen 30 Minutenmittelwerte der Windrichtung an der Station LT dar. Ganztäglich dunkelblaue Streifen deuten synoptische Taleinwinde an. Dunkelblaue Felder am späten Nachmittag (speziell im Feber) stellen regional erzeugte Taleinwinde dar. Die weißen Felder stehen nicht mit Datenausfällen, sondern den ausgeprägten Calmen an diesem Standort in Verbindung.

Der gelbe Streifen am Vormittag zeigt das sehr regelmäßige Auftreten von südlichen Querwinden (Hangaufwindeneinfluss) an, der häufig am Nachmittag direkt von nördlichen Querwinden (rote Felder; Hangabwindeneinfluss) abgegrenzt wird.

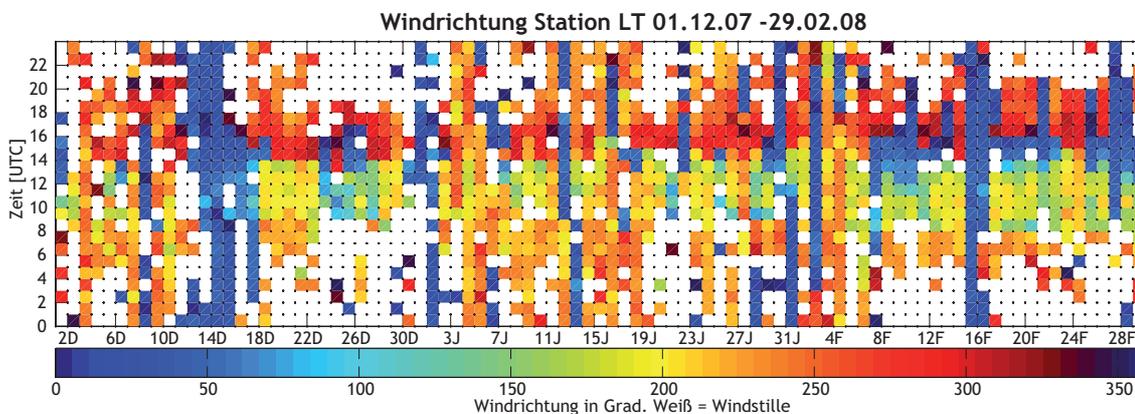


Abbildung 4.12: Windrichtungsverlauf während der Gesamtperiode an der Messstation LT östlich der Raststation A12 Vomp. Tage auf der x-Achse, Tageszeit auf der y-Achse. Nördliche Querwinde rot, südliche Querwinde hellgrün.

Querwinde aus den Sektoren Nordwest und Südost treten an der Station LT nahezu gleich oft auf und sind im Vergleich zu den Standorten VB und BAS überdurchschnittlich wichtig. Beide verdanken ihre Entstehung dem Hangwindssystem oberhalb der Station, denn die Winde aus südöstlichen Richtungen (entspricht Hangaufwind) treten am häufigsten zwischen Sonnenaufgang und Mittag auf, jene aus nordwestlicher Richtung (entspricht Hangabwind) zwischen 15:00 Uhr und 18:00 Uhr UTC. Warum die Hangabwinde danach kaum noch gemessen werden können, wird in Punkt 4.2.3.6 behandelt.

4.2.3.5 Analyse Station BT - Seitental, 120m AGL

Abb. 4.13 stellt alle zur vollen Stunde gemessenen 30 Minutenmittelwerte der Windrichtung an der Station BT dar. Sie zeigt, dass es im kleinen und schmalen Bachtal praktisch nur zwei Windrichtungen gibt, die sehr regelmäßig auftreten. Einzig Calmen, die bevorzugt in Phasen mit synoptischem Einfluss zu beobachten sind (z.B. Mitte Dezember), sorgen für Unterbrechungen.

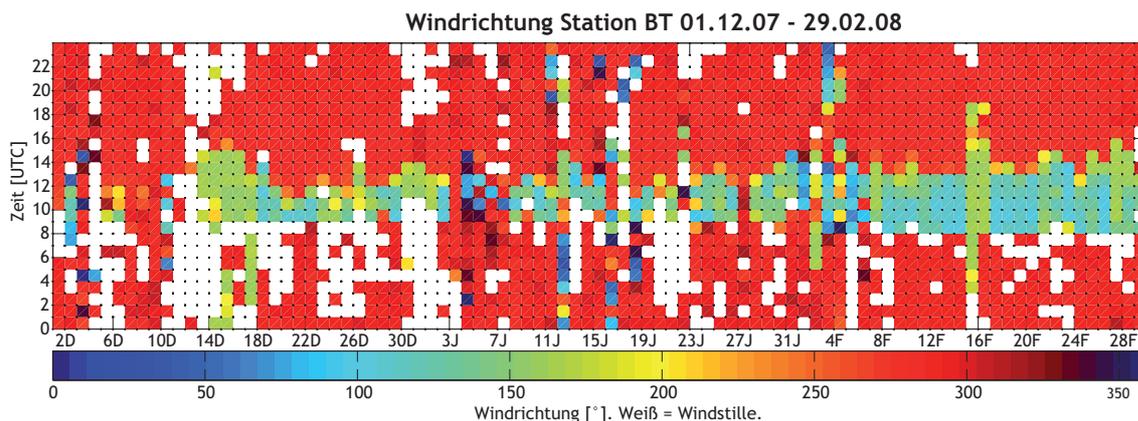


Abbildung 4.13: Windrichtungsverlauf während der Gesamtperiode an der Messstation im Bachtal. Tage auf der x-Achse, Tageszeit auf der y-Achse. Hangabwinde rot, Hangaufwinde grün bis blau.

Allgemein formuliert ist das Querwindssystem des Inntals ist dem Bachtal sein Tal- bzw. Hangwindregime. Das Verhältnis von Hangab- zu Hangaufwindhäufigkeit beträgt rund 4:1.

Im Bachtal liegen, wie Abb. 4.13 verdeutlicht, im Gegensatz zu anderen Standorten sehr homogene Windverhältnisse hinsichtlich der Richtung vor, also große Regelmäßigkeit, geringe Richtungsabweichungen nicht nur beim Hangabwind, anhaltende Turbulenzen nahezu ausschließlich während Föhnperioden. Diese Ergebnisse bestätigen, dass sich das Bachtal hervorragend zur Erfassung des Hangwindregimes eignet, wobei nicht zu vergessen ist, dass das Bachtal im Winter bereits ab dem frühen Nachmittag vom Vomperberg abgeschattet wird und so Hangabwinde im Vergleich zu umliegenden Hängen wohl früh einsetzen.

4.2.3.6 Regionalskalige (Ausgleichs-)Strömungen im Talquerschnitt

Zunächst ist festzuhalten, dass mit dem Begriff Ausgleichsströmungen Luftbewegungen gemeint sind, die durch den reduzierten Druck am Sonnenhang, der durch die höhere Temperatur und den Abtransport von Masse durch Hangaufwinde entsteht, angetrieben werden. Deren Ziel ist, die Unterschiede im Talquerschnitt auszugleichen.

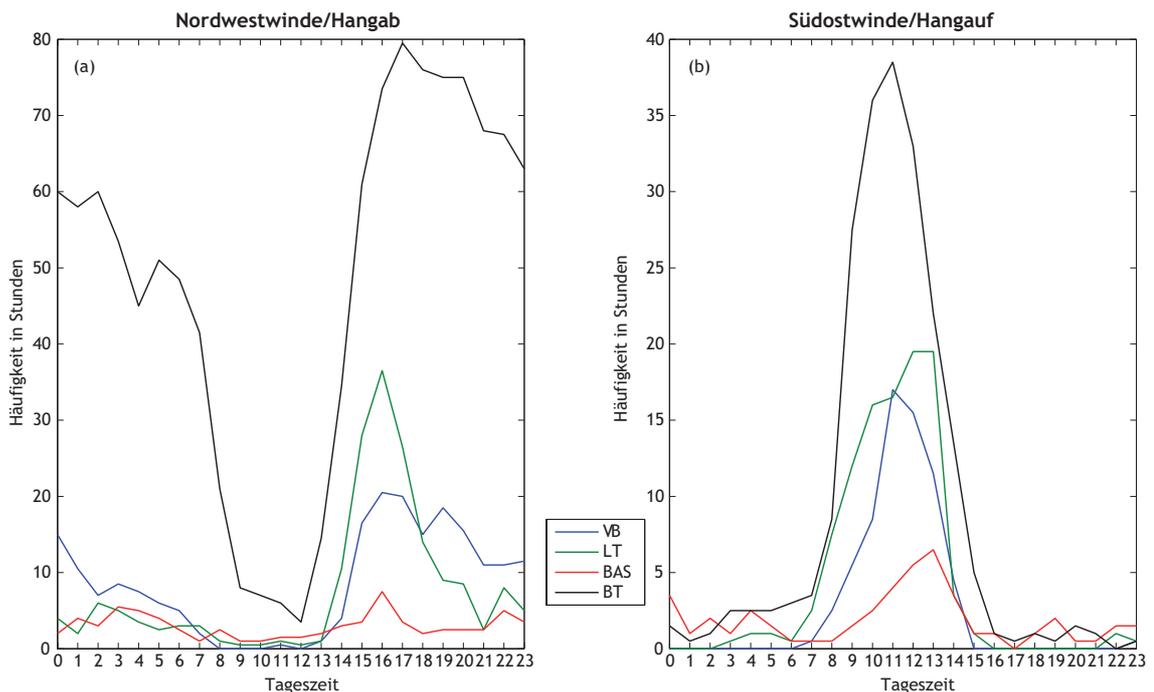


Abbildung 4.14: Häufigkeit des Auftretens von (a) nördlichen (280° - 0° bzw. 330° bei Station VB) und (b) südlichen Winden (120° - 180°; 120° - 170° und TemperaturLT - TemperaturBAS < 1 bei Station BAS) im Zeitraum 01.12.07 bis 29.02.08. Maximale Häufigkeit sind 91 Stunden. Nördliche Winde entsprechen im Bachtal Hangaufwinden, südliche Winde Hangaufwinden. Unterschiedliche y-Skalen beachten. Erklärung für unterschiedliche Windrichtungsdefinitionen im Text.

Nachdem klar ist, dass an allen Stationen Winde quer zur Inntalachse auftreten, wurde in Abb. 4.14 das tageszeitlich typische Auftreten dieser an den verschiedenen Standorten verglichen. Um ein hohes Maß an Vergleichbarkeit zu erreichen und um Mischungen aus zwei Windarten für diese Untersuchung zu entfernen, wurden die Klassifizierungen für die Winde je Station im Vergleich zur Klassifikation in Punkt 4.2.1 vereinheitlicht und die Sektoren verkleinert. Geringe Unterschiede zwischen den Stationen sind jedoch weiterhin notwendig, um individuell die talparallelen Winde zu eliminieren.

Das Temperaturkriterium (TemperaturLT - TemperaturBAS < 1) im Zuge der Definition der südlichen Querwinde bei der Station BAS dient dazu, nur jene Fälle zu zeigen, bei denen eine Wechselwirkung zwischen LT und BAS möglich ist. Das ist nur dann der Fall, wenn die Luft im Bereich der Station BAS nicht wesentlich kälter als an der Station LT

ist.

Das Vergleichsergebnis in Abb. 4.14 zeigt eindeutig, dass es im Inntal im Raum Schwaz im Winter 2007/08 nicht nur ein talparalleles Windregime gab sondern auch ein Windsystem im Talquerschnitt als Fortsetzung der Hangzirkulationen.

Die **Nordwinde** in Abb.4.14 (a) haben an allen Stationen um 16:00 Uhr UTC ihre größte Häufigkeit, obwohl nur die Station LT in ungefährender Falllinie zur Station im Bachtal liegt. Die rund 1km vom Nordhang entfernte Station BAS weist die mit Abstand geringsten Zahlen auf. Dies hängt nicht nur mit dem größten Abstand, sondern auch mit den dort ausgeprägten Talwinden zusammen. Schwache Nordwinde werden vermutlich Richtung Talmitte durch mechanische Turbulenz in talparallele Winde eingebunden und vollständig abgelenkt/aufgelöst. Weiter bewirkt die Lage an der Talsohle, dass sich die kälteste Luft nach Sonnenuntergang bei synoptisch relativ ruhigen Lagen dort sammelt bzw. mit dem Talauswind heran fließt. In der Folge kann der Hangabwind thermisch bedingt nicht mehr bis zum Boden durchdringen.

Der selbe Effekt tritt an der 23m höher gelegenen Station LT auf, sobald die Obergrenze des bodennahen Kaltluftstromes¹⁰ über die Station steigt oder sich lokal Kaltluft ansammelt. Bis ca. 20:00 Uhr UTC dringt der Hangabwind jedoch sehr häufig zu dieser Station vor. Durch Berechnung von ΔT BT - LT (siehe Abb. 4.15) wird deutlich, warum: Gegen 14:00 Uhr UTC erreicht $-\Delta T$ ein Maximum und die Luft ist ausreichend schwer, um den Taleinwind oder Hangaufwind zu unterwandern. Wegen der kurzen Distanz vom Bachtal zur A12 ist mechanische Turbulenz nicht in der Lage, für (dauerhafte) Durchmischung und in Folge Ablenkung/Auflösung zu sorgen. Zwingender Weise nähert sich ΔT dadurch langsam dem Wert 0 an. Einen Vorzeichenwechsel finden man während strahlungsintensiven Tagen im Dezember ab ca. 20:00 Uhr UTC (in Abb. 4.15 wegen Mittelung über alle Wetterlagen nicht erkennbar), im Feber erst ab der zweiten Nachthälfte (im Jänner gab es für treffsichere Aussagen zu wenige hintereinander folgende Sonnentage).

An der am höchsten gelegenen AWS am Vomperberg (Station VB) deutet der im Vergleich zur Station LT viel flachere Abfall der Nordwestwindhäufigkeit am Abend darauf hin, dass hier nicht regelmäßig extrem stabile Schichtungen bis in über Stationshöhe ansteigen. So können bis in die frühen Morgenstunden immer wieder Kaltluftpakete von den Hängen vordringen. Erst mit der Erwärmung der Hänge in der Früh wird dieses Phänomen vollständig unterbunden. Der Blick ins Detail liefert für den Vomperberg folgende weitere Erkenntnisse:

- In der klaren Nacht von 2. auf 3. Jänner waren die Bäume schneebedeckt. Gleichzeitig ist die Windrichtung im Vergleich zu anderen klaren Nächten ohne eingeschneiten Wald dauerhaft nach Norden in Fallrichtung zum Hang verschoben. Intensive lang-

¹⁰Von Kaltluftsee kann man hier nicht sprechen, da an der Station BAS kaum Calmen auftreten

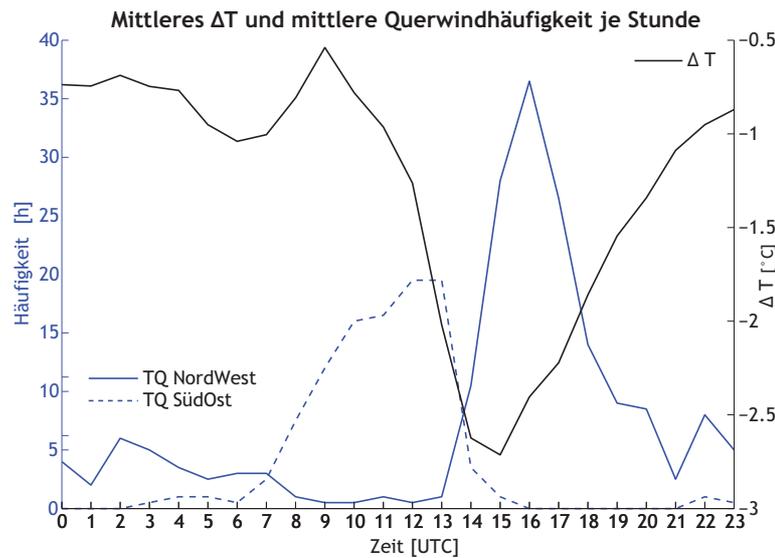


Abbildung 4.15: Mittel von ΔT Bachtal-LT über die Gesamtperiode je Stunde und Häufigkeit des Auftretens der zwei Querwindrichtungen an der Station LT. Unterschiedliche y-Skalen beachten.

wellige Ausstrahlung in Folge der Schneeoberflächen¹¹ oberhalb der Station ermöglichen folglich ein gehäuftes Vordringen von Hangabwinden.

- In der sehr warmen Phase Ende Februar gibt es sonderbare Fälle, während denen am Nachmittag und in der Nacht von Norden warme und trockene Luft (Fallwind) zur Station gelangt (z.B. vom 24. Nachmittags bis 25. Feber in der Früh).

Abb. 4.14(b) behandelt die **Südwinde** und birgt interessante Details. Nennenswerte Südwindhäufigkeit tritt an allen Stationen nur unter Tags auf und hängt eindeutig mit Hangaufwinden zusammen. Die geringere Gesamthäufigkeit von Hangaufwinden im Winter resultiert aus der kurzen Sonnenscheindauer. Wiederum zeigt sich, dass im Bachtal Hangwinde, in diesem Fall Hangaufwinde, am seltensten bzw. nahezu nie gestört werden, wogegen dies bei anderen Stationen, etwa am Vomperberg, der Fall ist (siehe auch Abb. 4.9).

Im Detail betrachtet fällt der zeitlich gleichmäßige Abfall der Häufigkeit im Gegensatz zum variierenden Anstieg auf. Dieser Umstand lässt sehr interessante Schlüsse zu:

Die Station LT weist die zweithäufigste Südwind- bzw. Hangaufwindhäufigkeit auf und reagiert früher als die höher gelegene Station VB. Im ersten Moment stellt dies ein Plausibilitätsproblem dar, da Hangaufwinde in der Höhe früher einsetzen sollten, weil dort zuerst Sonneneinstrahlung und Erwärmung anzutreffen ist. Berücksichtigt man jedoch die Überlegungen aus Punkt 4.2.2.2, so wird deutlich, dass der Hangaufwind im Bereich der A12 besser vom Talauswind abgeschirmt ist als am Vomperberg. Gleichzeitig wirkt das Bachtal wie eine Röhre, die Luft von unterhalb ansaugt. Am Vomperberg fehlt Vergleichbares.

¹¹Während der Messperiode selbst am Vomperberg und etwas oberhalb ein seltenes Phänomen

Ein weiterer spannender Umstand ist die Tatsache, dass das Maximum der Häufigkeit an der Station LT dann erreicht wird, wenn diese im Bachtal schon wieder stark rückläufig ist. Diese „Unregelmäßigkeit“ liefert die frühe Abschattung im Bachtal. Das bedeutet, dass sich am frühen Nachmittag Hangaufwinde zwischen den Standorten BT und LT entwickeln, die nicht mehr mit dem Bachtal selbst nicht mehr in Verbindung stehen. An einzelnen Tagen wird dabei Masse aus dem Bereich der Talmitte oder von noch weiter südlich vom Talboden (!) nachgeführt, worauf das gleichzeitige Maximum bei der Station BAS hinweist.

Die eben erwähnte Station BAS liefert neben dem späten Maximum den langsamsten Anstieg der Häufigkeit und überhaupt die wenigsten Fälle. Wenig überraschend, wenn man bedenkt, dass erstens die Sonne die Station BAS als letzte Station erreicht, dass zweitens die Station BAS am tiefsten liegt und drittens die Station BAS am weitesten vom Sonnenhang entfernt ist. Am Vormittag, wenn die Hangaufwindzirkulation aufgrund des hinsichtlich Strahlungsausbeute optimalen Sonneneinfalls am besten ausgebildet ist, liegen die Station BAS und weite Teile des stromaufwärtigen Inntales noch im Schatten. Es gibt also erst gegen Mittag einen Mechanismus, der die bodennah dahin strömende Kaltluft erwärmen kann und eine Wechselwirkung mit der Hangwindzirkulation ermöglicht (Erfüllung Temperaturkriterium in Abb. 4.14, die vorher aus Dichtegründen unterbunden war. Interessant wäre, ob oberhalb der Kaltluftschicht Querzirkulationen zum Druckminimum am Sonnenhang stattfinden. Hierzu bräuchte es an passenden Tagen (vorzüglich keine Bewölkung und geringe Albedo am Sonnenhang; schwache Talauswinde) geeignete Vertikalsondierungen im Talquerschnitt.

Am Vomperberg fällt das Maximum mit jenem im Bachtal um 11:00 Uhr UTC zusammen. Der Grund liegt jedoch nicht darin, dass die Hänge um und über der Station ab Mittag keine Sonne mehr erhalten, sondern dass die Taleinwindwahrscheinlichkeit deutlich zunimmt. Diese Windart kann aufgrund der in Talmitte versetzten Lage des Vomperbergs (gültig für östliche Anströmung) voll angreifen und die Hangaufwinde überlagern (\bar{v}_{Talein} ist um 60% größer als \bar{v}_{TQSued}).

Die Frage, wie die südlichen Querwinde auf Schneebedeckung reagieren, lässt sich aufgrund der wenigen verfügbaren Fälle nur eingeschränkt beantworten: Zumindest am 2. Jänner kann festgehalten werden, dass an den Stationen VB, LT und BT diese Winde nicht ausblieben, obwohl die Albedo an diesem Tag eindeutig erhöht war ($\bar{\alpha}_{BAS} > 0.8$, $\bar{\alpha}_{VB} > 0.6$). Erklärend wirkt dabei der Umstand, dass die vorhandene Kaltluft hochreichend (zumindest bis Patscherkofelniveau) war und am Vortag die gesamte Talatmosphäre durchmischt wurde. So konnte sich keine intensive Inversion aufbauen, was für die Hangwinde förderlich war.

Zusammengefasst gibt es also folgende (von einander nicht unabhängige) Faktoren¹², die das Hang- und Talquerwindregime beeinflussen:

¹²Man muss hier von einem System sprechen, da die Parameter intensiv wechselwirken

- Das Talwindssystem: Aufgrund der viel größeren Intensität überlagert und eliminiert es Hangwinde an ungeschützten Standorten.
- Die Stabilität: Sie bestimmt, ob Luftmassen miteinander wechselwirken können oder nicht und ob sich somit Zirkulationen an den Talrändern Richtung Mitte ausbreiten können.
- Die Topographie: In günstig geformten Bereichen (homogen, ideale Hangneigung für hohe „Strahlungsausbeute“, Kanalisierung,...) entstehen gut ausgeprägte Hangwindbänder, die auch die darunter liegenden Zonen im Haupttal beeinflussen.

Daneben spielen natürlich Faktoren wie Vegetation eine nicht zu unterschätzende Rolle. Für deren Untersuchung ist der Messaufbau jedoch nicht ausgelegt und geeignet. Auf den Antrieb der Talquerzirkulationen wird in Punkt 4.2.4.2 eingegangen.

4.2.4 Antriebe

4.2.4.1 Horizontale Druckgradienten Inntal - Alpenvorland

Aus früheren Untersuchungen (Vergeiner 1983; Klötzer 1986) ist bekannt, dass Talwinde während synoptisch ruhiger Wetterlagen durch regionale, thermisch erzeugte Druckgradienten angetrieben werden. Deshalb sollte ein Vergleich des Luftdrucks im Inntal mit jenem im Alpenvorland einen eindeutigen Zusammenhang mit dem Talwindssystem liefern.

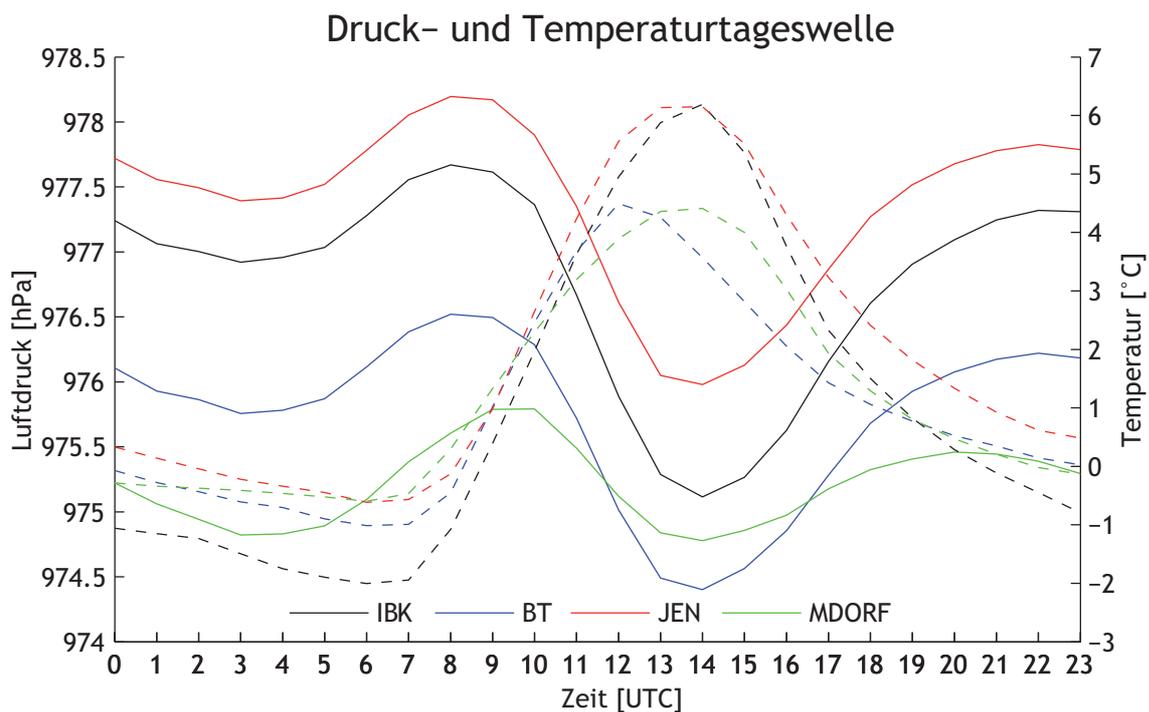


Abbildung 4.16: Mittlerer Tagesgang des Luftdrucks (durchgezogen) und der Temperatur (strichliert). Der Luftdruck wurde auf das Niveau der (niedrigsten) Station MDorf reduziert. IBK=Innsbruck Flughafen (584m), BT=Bachtal (635m; aus Karte, nicht eigene GPS-Höhe), JEN=Jenbach (539m), MDORF=Mühldorf am Inn (410m). Eine Übersichtskarte des Vergleichsgebietes befindet sich im Anhang (A.2).

Abb. 4.16 stellt einen solchen Vergleichsversuch dar. Der Kurven- bzw. Wellenverlauf der durchgezogenen Drucklinien ähnelt im Falle Innsbrucks eindeutig den Ergebnissen von Vergeiner (1983), S.44. Zudem kann man deutlich erkennen, dass die mittlere Amplitude des Tagesgangs des Druckes im Alpental wesentlich größer als im Alpenvorland ist. Weil diese Druckwellen durch Tagesgänge in der Temperatur entstehen, sind strichliert die mittleren Temperaturverläufe je Stunde eingezeichnet. Die gegenläufige Temperaturwelle kommt trotz Mittelung über alle Tage sehr gut zum Vorschein, ebenso die Dämpfung der Amplitude im Alpenvorland.

Nicht unerwähnt darf die verringerte Amplitude im Bachtal bleiben. Ihre Form entsteht durch die verkürzte Sonnenscheindauer im Vergleich zu den anderen Standorten und die Lage am Hang (\Rightarrow Kaltluft fließt zur Talsohle ab).

Abb. 4.16 enthält aber auch eine gravierende Unplausibilität! Betrachtet man die Druckverläufe, so fällt auf, dass sich nur die Stationen Bachtal und Mühldorf schneiden, obwohl alle Drücke auf ein einheitliches Höhenniveau reduziert sind. Dies würde bedeuten, dass im Mittel im Winter 2007/08 zu jeder Stunde ein positiver Druckgradient von Innsbruck oder Jenbach nach Mühldorf gewirkt hätte. Daraus resultiert ein eindeutiger Widerspruch unter anderem zu Abb. 4.8. Es ist nämlich unmöglich, dass im Mittel zwar am Nachmittag Taleinwinde auftreten, gleichzeitig der Druckgradient aber talauswärts weist. Jedenfalls haben Detailuntersuchungen gezeigt, dass es Tage gibt, an denen der Taleinwind gegen den Druckgradienten wehen würde (z.B. 7. und 9.12.07; 18.12.07 uvm.).

Weil sich Wind immer nur von hohem zu niedrigeren Druck bewegt, ist klar, dass die Windmessung die Druckmessung oder -berechnung in Frage stellt und nicht umgekehrt. Gleichzeitig attestieren sich die Druckverläufe im Bachtal und Mühldorf gegenseitig Plausibilität¹³, sofern die Druck- oder Höhenwerte nicht falsch sind. Die Suche nach Fehlerquellen hat bislang dazu geführt, dass einige ausgeschlossen werden können:

- Vereinfachte Druckreduktionsgleichung: Die Station BT wurde nach der selben Methode (siehe Gleichung 2.4) wie Jenbach und Innsbruck reduziert. Außerdem wirkt sich eine Änderung der Mitteltemperatur nur sehr schwach auf den berechneten Druckwert aus.
- Falsche Stationshöhen: Die von ZAMG und DWD zur Verfügung gestellten Höhenangaben bezüglich Druckmessung (IBK=584m AMSL, JEN=539m, MDORF=410m) wurden richtig eingesetzt. Das schließt natürlich nicht aus, dass die Werte selbst nicht exakt stimmen¹⁴.
- Fehl- oder ungenaue Messung: Eine völlige Fehlmessung kann ausgeschlossen werden, da die Werte in Innsbruck Flughafen den am IMG I gemessenen gleichen und die Tagesamplituden den Beispielen in früheren Arbeiten (Klötzer 1986) entsprechen. Zudem ergibt für Jenbach die Korrelation mit Innsbruck den Wert 1. Ob die Genauigkeit der Messungen zum Zeigen des gewünschten Effekts ausreichen, ist unklar.

Problemlösungsansätze:

Die Druckreduktion reagiert auf zwei Größen sehr sensibel. Das sind einerseits der gemessene Absolutwert und das ist andererseits die Höhendifferenz zwischen den Stationen. Beide führen im Messbereich bei geringfügiger Abweichung (8 Meter \approx 1hPa) zu einem annähernd linearen Offset¹⁵.

¹³Trotzdem ist die Station Bachtal nur suboptimal für einen Vergleich, da sie nicht in der Talsohle liegt - an der dortigen Station wurde leider kein Druck gemessen.

¹⁴Dreiseitl (IMG I) teilte mündlich mit, dass Steinacker durch ähnliche Berechnungen feststellte, dass die Höhe der Station Zugspitze falsch sei.

¹⁵Von Linearität kann man trotz der Multiplikation sprechen, weil größere Druckwerte im Vergleich zu kleineren nur geringfügig verstärkt werden, da das Ergebnis der Exponentialfunktion 1.0xx liefert und bei Variationen von Δh von ± 30 m nur an der dritten Nachkommastelle schwankt. Die Linearität des Fehlers verringert sich mit zunehmenden Δh - es ist also sehr sinnvoll, nur auf die Höhe der niedrigsten Station und nicht auf Meeresniveau zu reduzieren.

Wegen der Linearität ergibt sich die Möglichkeit, eine einfache Korrektur anzubringen. Im Endeffekt ist wichtig, dass während der Taleinwindphasen am Nachmittag der Druck im Alpental im Mittel tiefer ist als im Vorland. Der Haken liegt daran, dass dann Wind- und Druckmessungen rein rechnerisch voneinander abhängig sind und man die natürliche Abhängigkeit nur mehr mit eingeschränkter Aussagekraft nachweisen kann. Zeigen lässt sich aber noch, dass die Tageswelle gut zu den Talwindrichtungen passt, wenn bspw. in Innsbruck alle Druckwerte um 1hPa reduziert werden.

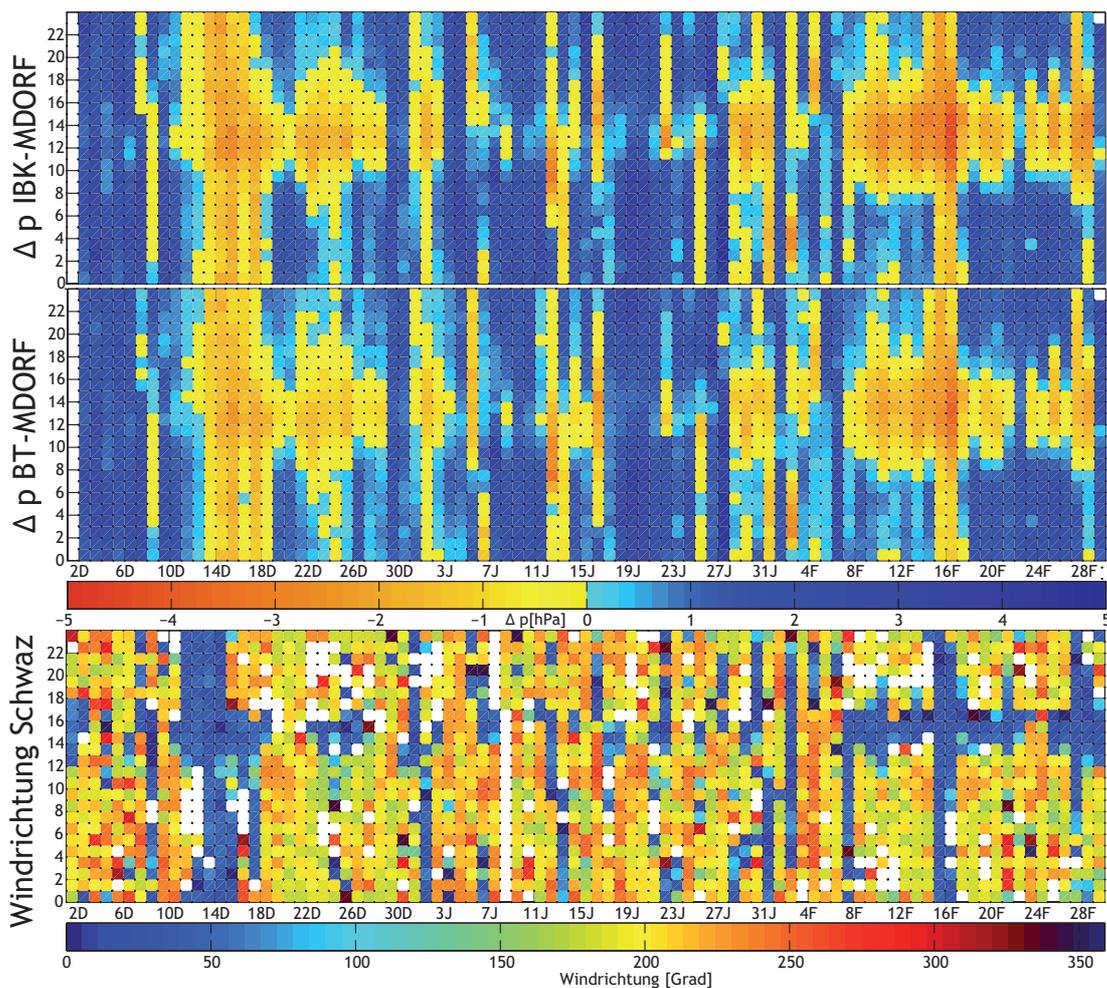


Abbildung 4.17: Oben und Mitte: Druckdifferenz Innsbruck-Mühldorf und Bachtal-Mühldorf [hPa]. Weiß steht für Datenlücken. Den reduzierten Druckwerten von Innsbruck wurde 1hPa subtrahiert.

Unten: Windrichtung an der Station BAS in Schwaz in Grad. Dunkelblaue Farbtöne bedeuten Talauswind im Inntal, gelbe Töne Taleinwind oder Föhn. Weiß steht für Windstille.

Tage auf x-Achse, Tageszeit auf y-Achse. Datenausfall an Station BAS von 8. bis 9. Jänner.

Betrachtet man Abb. 4.17 fällt auf, dass längere Phasen mit negativen $\Delta p_{IBK-MDORF}$ Werten oft mit Zeiten von Taleinwinden zusammenpassen und umgekehrt positive Werte mit Talauswind einhergehen. Natürlich darf hier nicht die Trägheit des Talwindsystems vergessen werden, die eine zeitversetzte Reaktion des Windes auf den Druckgradienten

bewirkt. Kleinräumige Unregelmäßigkeiten, wie sie im Inntal zur Genüge vorkommen können (Vergeiner 1983), bewirken zusätzliche Störungen.

Gut erkennbar sind in dieser Abbildungsform zudem synoptisch großskalige Ereignisse, bei denen den ganzen Tag negative Druckgradienten verbunden mit anhaltendem Taleinwind auftreten. Die längste solche Phase trat Mitte Dezember auf.

Beim Vergleich von synoptisch ungestörten Phasen im Dezember und Feber fällt auf, dass im Feber die Druckunterschiede bereits merklich größer sind, in der Folge der Taleinwind schneller reagiert, kräftiger ausfällt (hier nicht ersichtlich) und länger weht.

Eine andere Variante den Antrieb des Talwindes zu beschreiben, bei der die unsichere Druckreduktion gänzlich vermieden wird, stellt die Berechnung von Differenzen in den Tagesgängen von Druck und Temperatur dar.

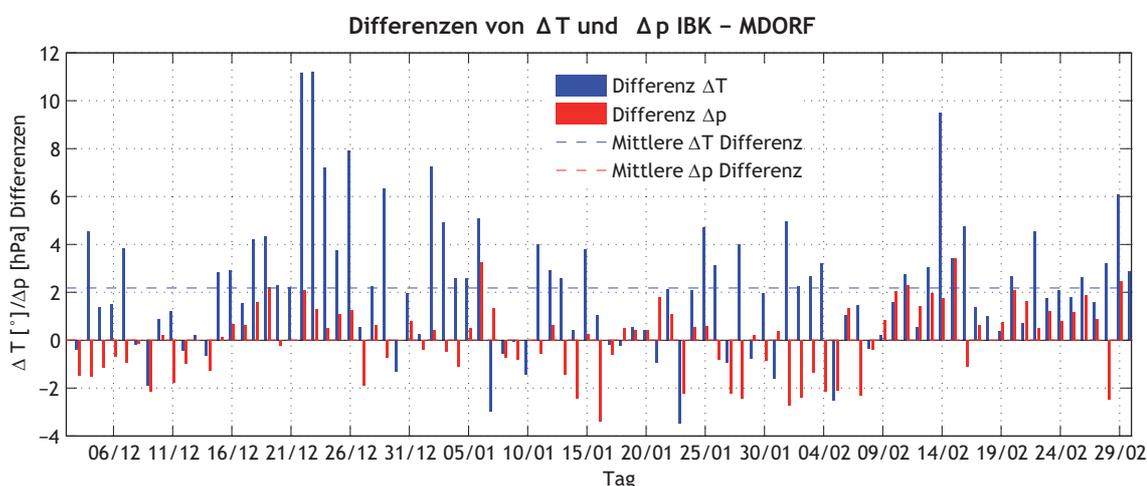


Abbildung 4.18: Differenz des Tagesganges $\Delta T_{IBK} - \Delta T_{MDorf}$ und $\Delta p_{IBK} - \Delta p_{MDorf}$. Zusätzlich sind die Mittelwerte über die Gesamtperiode eingetragen. Die mittlere Δp Differenz ist schwer zu erkennen, da sie genau auf der 0 Linie verläuft.

Abb. 4.18 zeigt, dass der Temperaturtagesgang in Innsbruck (Alpental) im Mittel um über 2° größer ist als in Mühldorf (Alpenvorland) und nur an wenigen Tagen in Innsbruck kleiner ist. Wenn dies der Fall ist, überqueren meist Fronten das Messgebiet. Diese sorgen in Mühldorf für einen Luftmassenwechsel (\Rightarrow große T-Amplitude), wogegen im Inntal die Luftmasse speziell bei schwachen Warmfronten und maskierten Kaltfronten großteils erhalten bleibt (z.B. am 7.01.08, 23.01.08, 5.02.08).

Beim Druck sind die mittleren Verhältnisse ausgeglichen, wobei ein Blick in die Bodenkarten zeigt, dass während großräumig gradientschwacher Lagen und Hochdruckeinfluss die größeren Tagesgänge im Inntal aufgezeichnet werden. Ebenso wird klar, dass während dieser Lagen auch die Differenzen vom Temperaturtagesgang positiv sind.

Sobald starke Druckgradienten im Bereich der Ostalpen auftreten, sind die Differenzen entkoppelt und zeigen oft unterschiedliche Vorzeichen (z.B. 27.12.07, 14.01.08, 16.01.08, 01.02.-04.02.08, uvm.). Gleichzeitige negative Vorzeichen scheinen immer dann aufzutre-

ten, wenn schwache Druckgradienten bei gleichzeitig bewölktem Wetter (zumindest im Inntal) vorherrschen. Im Untersuchungszeitraum ist dies selten der Fall (z.B. im Feber an 2 von 29 Tagen).

Abschließend wurde durch den Vergleich von Druck- und barometrischer Mitteltemperaturwelle (siehe Punkt 2.1.1.1 und Gleichung 2.3), den bereits Vergeiner (1983), S.43ff. durchgeführt hat, eine weitere Möglichkeit der Überprüfung der Messqualität genutzt. Die daraus resultierende Abbildung (siehe A.3) ist jener von Vergeiner äußerst ähnlich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass während der Messphase typische Druck- und Temperaturtageswellen beobachtet werden konnten. Die unterschiedlichen Amplituden zwischen Inntal und Alpenvorland haben das Talwindssystem angetrieben, was aufgrund eines nicht zu behebbenden Fehlers nur mit eingeschränkter Aussagekraft gezeigt werden kann. Um dem Problem auf den Grund zu gehen, müssten zuerst alle Stationshöhen sehr genau nachgemessen werden. Sollten auch diese stimmen, wären die Messsensoren zu vergleichen. Abschließend wäre noch zu überlegen, ob die Stationen aufgrund ihrer Lage für die Erhebung des effektiven Antriebes eventuell nicht geeignet sind.

Die Trennung von großskalig synoptisch und kleinskalig thermisch induzierten Druckänderungen, wie sie bspw. Klötzer (1986) durchgeführt hat, würde im Rahmen dieser Arbeit zu weit führen. Der Wind reagiert ohnehin nur auf die endgültig auftretenden Druckgradienten.

4.2.4.2 Horizontale Anisothermie/Asymmetrie im Talquerschnitt

Kurz wiederholt besagt die Theorie, dass Hangauf-/Hangabwinde dann entstehen, wenn die Luft knapp über den Hängen eine andere Temperatur erreicht als die umgebende Luft Richtung Talmitte in gleicher Höhe.

Ist sie wärmer, entsteht ein Druckgradient zum Hang, der in Kombination mit der Auftriebskraft, die auf die leichteren Luftmassen wirkt, zu einer turbulenten Aufwärtsbewegung entlang des Hanges führt. Ist sie kälter, wirkt der Druckgradient Richtung Talmitte, die Schwerkraft senkrecht nach unten - ein relativ gleichmäßiges Abfließen der Luftmassen entlang des Hanges resultiert (Vergeiner and Dreiseitl 1987).

Nachdem im Rahmen dieses Messprojekts keine Vertikalsondierungen im Bereich der Talmitte durchgeführt wurden, kann diese Fragestellung vorerst nur beschränkt untersucht werden. In diesem Punkt muss die grobe Annahme gemacht werden, dass während des Winters die Messpunkte (mit Hobosensoren bestückt) am Schattengang (Süden) zwischen den frühen Morgenstunden und dem Sonnenuntergang ähnliche Temperaturen wie die Luftmassen in Talmitte in gleicher Höhe aufweisen. Damit sollte zumindest der Motor des Hangaufwindes am Sonnenhang nachgewiesen werden können. Während der typischen Hangabwindzeiten ist die Annahme grundfalsch, deren Antrieb lässt sich also nur dann nachweisen, wenn auch in Talmitte ein vertikales Temperaturprofil vorliegt. Eine Abschätzungsmöglichkeit der Temperatur außerhalb der Hangzone wird in Punkt 4.2.4.3 diskutiert.

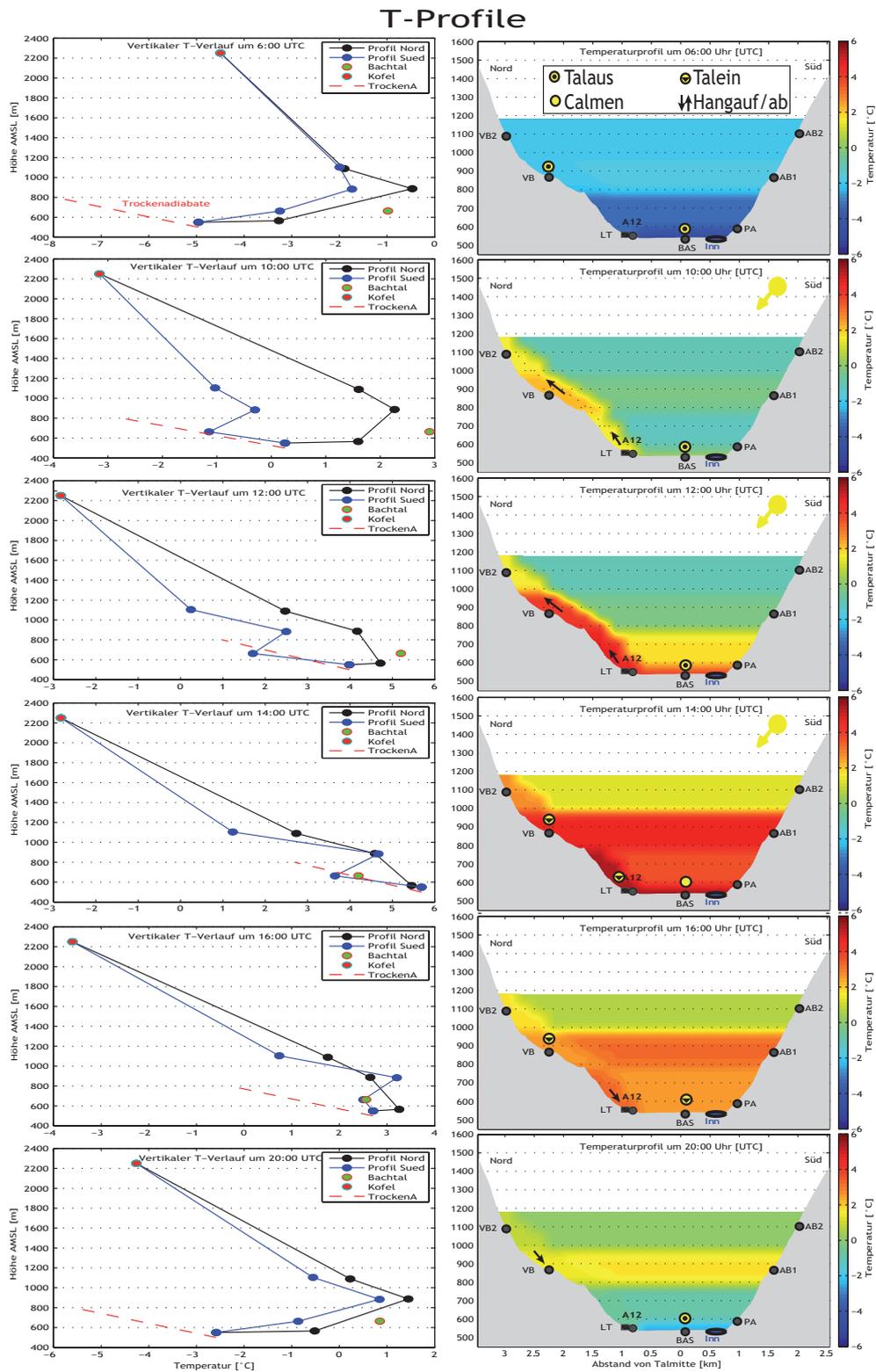


Abbildung 4.19: Mittlere Vertikalprofile der Temperatur zu verschiedenen Tageszeiten. Die Abbildungen links zeigen den Vertikalverlauf für Nord- und Südhang ergänzt durch die Stationen Patscherkofel (Kofel) und Bachtal. Die Abbildungen rechts stellen eine Mischform aus Messung und theoretischem Wissen dar. Das Temperaturprofil wird aus nur sieben Messungen (runde Kreise mit Beschriftung) an den Rändern interpoliert und ist daher vor allem in der Talmitte unterbestimmt. Die Windinformationen stammen von den AWS. Alle Temperatur- und Windwerte entstehen durch Mittelung über jene Perioden, in denen mehr als zwei „Sonnentage“ (siehe Abb. 4.5) hintereinander auftreten.

Abb. 4.19 zeigt, dass die Talatmosphäre um 06:00 Uhr UTC in den untersten Niveaus sehr stabil geschichtet ist und die Temperaturunterschiede zwischen Nord- und Südseite außer in rund 900m Höhe¹⁶ nahezu verschwunden sind. Nach Sonnenaufgang (10:00 Uhr UTC) steigen die Temperaturen am Sonnenhang (Norden) während der gering bewölkten Perioden (siehe Abb. 4.5) rasch an, wobei sich die Erwärmung von oben nach unten arbeitet. Dadurch bildet sich in allen Messniveaus eine große Temperaturdifferenz zwischen Sonn- und Schattengang (und wohl auch der Talmitte) aus. Mit der Entstehung dieser geht das Einsetzen der Hangaufwinde, die im Mittel bis knapp über Mittag anhalten, am Nordhang einher (vgl. Abb. 4.14 (b)).

Kommentar:

Die höheren Temperaturen am Vormittag am Sonnenhang sind im Untersuchungszeitraum die einzige plausible Erklärung für die südlichen Querwinde an den Stationen VB, LT und BT. Dass eine großräumige Südströmung am Vormittag an der Station LT als Südwind gemessen werden könnte (Thudium, Siegrist, and Maly 2001), kann vollständig ausgeschlossen werden.

Durch die extreme Abschirmung der Topographie spielt erstens mechanische Durchmischung eine geringe Rolle. Zweitens müssten Südwinde im Mittel von mindesten 2500m (Zillertaler Alpen) zur Station LT herabsinken und sich im Zuge dieses Prozesses um rund 19°C erwärmen. Die Lufttemperatur im Bereich der Talsohle müsste also um 19°C wärmer sein als im 2500m Niveau, damit der Wind bis zum Boden vordringen kann. Dies ist im Winter extrem selten.

Selbst wenn aber aus thermischen und mechanischen Gründen ein Föhndurchbruch möglich wäre, treten an der Station keine Südwinde auf. Der Grund liegt darin, dass die Brennerfurche der tiefste Einschnitt im Tiroler Alpenhauptkamm ist und großskalige Südwinde kanalisiert durch das Wipptal Richtung Inntal wehen (Kuhn 1989). Im Bereich Innsbruck münden sie ins Inntal und werden Richtung Osten als Westwinde abgelenkt.

Gegen 12:00 Uhr UTC fällt in Abb. 4.19 auf, dass die Temperaturunterschiede mit der Höhe abnehmen. Der Grund dafür dürfte sein, dass ab dem Vomperbergniveau (rund 300m AGL) die (mechanische) Durchmischung aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten, die erst durch die Labilisierung der Luftmassen auftreten, um diese Zeit (vgl. Abb. 4.8) viel größer ist als im Bereich des Messpunktes PA, sodass es in der Höhe im Vergleich zu tieferen Schichten zu einem stärkeren Abbau von Temperaturunterschieden im Talquerschnitt durch mechanische Durchmischung kommt. Dass sich die noch tiefere Station BAS ebenso wie höhere Stationen relativ stark erwärmt, ist kein Widerspruch sondern hängt mit der im Vergleich zu PA nördlicheren Lage zusammen, die wesentlich mehr Sonnenstunden zulässt.

Mit dem weiteren teilweisen (600m Niveau) bis völligen Abbau (900m Niveau) des Temperaturunterschiedes am frühen Nachmittag schwächt sich der Antrieb des Hangaufwindes

¹⁶Die Topographie liefert den Verdacht, dass sich Messpunkt AB1 zu dieser Zeit immer oder zumindest ab und zu in einer dünnen Hangabwindschicht befand, wogegen am Punkt VB Talauswind gemessen wurde.

ab und es kommt zu einer Überlagerung durch die einsetzenden Taleinwinde.

Ab dem mittleren Nachmittag ändert sich im Vomperbergniveau das Vorzeichen der Temperaturdifferenz, gleichzeitig treten an der Station LT Hangabwinde auf (vgl. Abb. 4.14 (a)). Die folgenden Messungen um 16:00 Uhr UTC bestätigen, dass die getroffene Annahme über die Temperatur in der Talmitte nach Sonnenuntergang nicht korrekt sein kann (keine kühle Hangschicht als Antrieb für die gemessenen Hangabwinde). Sehr wahrscheinlich bewegt sich die wärmste Luft in der Horizontalen in Talmitte einwärts, wogegen an den Talrändern speziell unterhalb bereits länger abgeschatteter Hänge (Bachtal, Pirchanger¹⁷) die Luft kälter ist und aus diesem Grund die nachzuweisenden Hangabwinde wehen können.

Nach Sonnenuntergang beginnen sich die Temperaturegensätze zwischen Nord und Süd wieder abzubauen (außer PA und Bachtal). Die wärmste Luft dürfte in der Talmitte gefunden werden, sodass (wie gemessen) von den Hängen Kaltluft abfließen kann, die das Tal im gesamten Querschnitt von unten her auffüllt und das Vordringen der Hangwinde bis zum Talboden thermisch unterbindet¹⁸ (siehe auch 4.2.3.6).

4.2.4.3 Hangwindantrieb durch Temperaturvergleich KAP - BT

Überlegungen:

Bereits mehrfach wurde in dieser Arbeit erwähnt, dass horizontale Temperaturunterschiede zwischen Hangluft und Talluft Hangwinde hervorrufen (Vergeiner and Dreiseitl 1987). Nachdem für den Untersuchungszeitraum im Messgebiet keine Vertikalprofile der Temperatur verfügbar sind, wird eine andere Lösung gesucht, um Informationen über die Temperatur in der Talatmosphäre in gleicher Höhe wie Station BT, welche durch besonders viele Hangwindstunden hervor sticht, zu erhalten.

Eine Möglichkeit könnte hier die Temperaturmessung der Station KAP sein, da diese in praktisch gleicher¹⁹ Höhe gelegen, Richtung Talmitte versetzt aber nur rund 900m entfernt ist (siehe Punkt 3.2 und Abb. 3.2). Durch die exponierte Lage können Talwinde sehr gut zur Messstation vordringen. Folglich ist zu erwarten, dass zumindest außerhalb der Vormittagsstunden, während denen im Bereich der Station intensive Sonneneinstrahlung möglich ist und sich in der Folge auch hier eine Hangaufwindzirkulation entwickeln könnte²⁰, die Temperatur für die Talatmosphäre repräsentativ ist. Hangabwinde sind an der Station nicht zu erwarten, weil oberhalb topographisch bedingt keine idealen „Kühlflächen“ existieren, eventuelle kleine Kaltluftströmungen entlang der tiefsten Einschnitte neben der Station vorbei fließen und die geländebedingte Abschirmung der Taleinwinde fehlt.

¹⁷Hier kann man aufgrund der nördlichen Ausrichtung den ganzen Tag von einem Schattenhang sprechen.

¹⁸Nach 20:00 Uhr UTC werden an der Station LT im Mittel nur mehr selten Hangabwinde registriert

¹⁹Nur 3m Differenz

²⁰Die Winddaten der Station KAP lassen aufgrund eines Messproblems keine sicheren Schlüsse zu (siehe A.1).

Ergebnisse:

Abb. 4.20 (a) zeigt die Temperaturdifferenz zwischen KAP und BT sowie die Hangwindhäufigkeit an der Station BT. Eine Berechnung der potentiellen Temperatur(differenz) ist nicht nötig, weil die Messpunkte auf gleicher Höhe liegen.

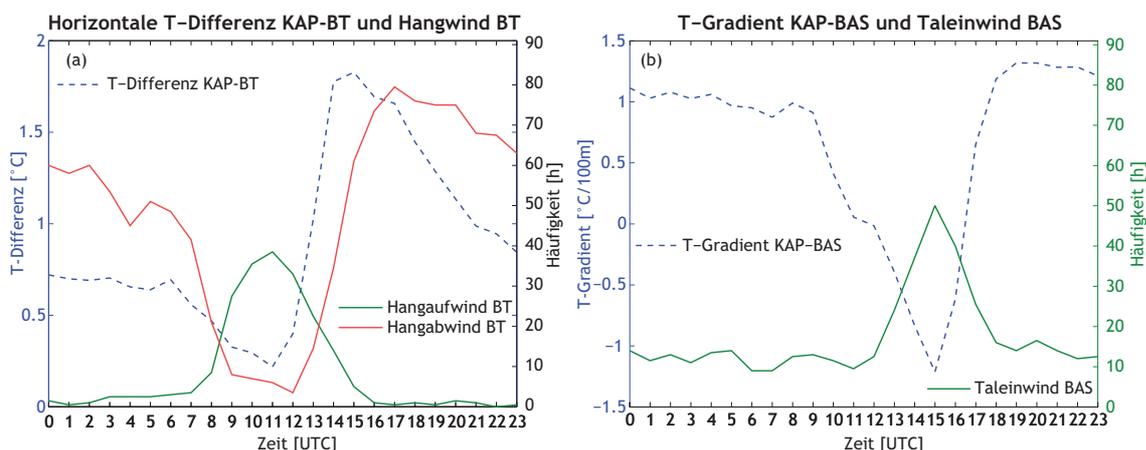


Abbildung 4.20: (a) Mittlere horizontale Temperaturdifferenz Station KAP - Station BT und Hangwindhäufigkeit in h an der Station BT während der gesamten Messperiode. (b) Mittlerer vertikaler Temperaturgradient Station KAP - Station BAS und Taleinwindhäufigkeit in h an der Station BAS.

Das Ergebnis der Abbildung deutet an, dass es nun im Gegensatz zur Abb. 4.19 möglich ist, den Antrieb von Hangabwinden zu zeigen, weil die Messpunkte speziell am Nachmittag in verschiedenen Luftmassen liegen (Talwindsschicht KAP, Hangwindsschicht BT), wie aus den großen mittleren Temperaturdifferenzen trotz der räumlichen Nähe hervorgeht. So ist die Lufttemperatur im Mittel im Bachtal wesentlich kälter, wodurch sich die schwere Luft entlang des Hanges talwärts bewegen kann und sogar an rund 40% aller gemessenen Tage bis zum Bereich der 100 Meter tiefer gelegenen Station LT vordringen kann (siehe Abb. 4.14).

Erst sobald auch an der Station LT kühlere Talauwinde eintreffen oder lokale Auskühlung stattfindet, kann der Hangabwind aus thermischen Gründen nicht mehr zur Station vordringen²¹.

Am Vormittag ist die Situation anders und kein Nachweis des Antriebes möglich. Das Minimum der Temperaturdifferenz um 11:00 Uhr UTC deutet an, dass bei entsprechenden strahlungsreichen und großskalig ungestörten Bedingungen sich im Bereich beider Messpunkte Hangaufwindzonen entwickeln. Die Hangaufwinde werden im Vergleich zu Hangabwinden am Standort KAP wie bereits eingangs erläutert insofern begünstigt, als dass Talauwinde aus Westen am Vormittag topographisch wesentlich stärker ab-

²¹Dieses Phänomen kann nicht durch Berechnung der potentiellen Temperaturen beider Standorte untersucht werden, da an der Station LT keine Luftdruckdaten verfügbar sind.

geschwächt werden als Taleinwinde aus Osten am Nachmittag und zwar Heizflächen (\Rightarrow Hangaufwind) unterhalb der Station vorhanden sind jedoch kaum Kühlflächen (\Rightarrow Hangabwind) oberhalb.

Abschließend steht eine weitere „Feinheit“ der Abbildung 4.20 (b) im Mittelpunkt, die im wesentlichen die vorherigen Analysen untermauert. So fällt auf, dass am Vormittag zeitgleich die höchste Hangaufwindhäufigkeit und die niedrigste Temperaturdifferenz auftreten. Am Nachmittag sind die Maxima verschoben und die höchste Temperaturdifferenz um 15:00 Uhr UTC läuft der höchsten Hangabwindhäufigkeit um 17:00 Uhr UTC voraus. Aus theoretischer Sicht muss jedenfalls die Temperaturstörung der Druckstörung und in Folge der Ausgleichsströmung (Wind) vorangehen. Die erwähnten Unterschiede zeigen also auf andere Weise, dass am Vormittag beide Stationen in der Hangwindsschicht liegen und Temperaturunterschiede durch ähnliche Prozesse (diabatische Erwärmung, Advektion von Luftpaketen aus Gebieten unterhalb der Standorte) abgebaut werden.

Ab Mittag wird das gesamte Bachtal vom Vomperberg abgeschattet, wogegen sich bei der Kapelle, die repräsentativ²² für die Talatmosphäre ist, nur der Einstrahlungswinkel ändert, jedoch keine großräumigen Abschattungseffekte in der Umgebung auftreten. Somit schläft zwar der Antrieb der Hangaufwinde durch den ungünstigeren Einstrahlungswinkel ein. Gleichzeitig greifen aber Taleinwinde an. Im neben der Sonne auch vom Talwind abgeschirmten Bachtal setzt im Gegensatz dazu lokale Kaltluftproduktion ein, sodass die Temperaturunterschiede zwischen den zwei Standorten nach 12:00 Uhr UTC rasant ansteigen. Rund ein bis zwei Stunden später reagieren die Hangabwinde auf die aufgebauten Temperatur- und Druckunterschiede.

Diese Zeitdifferenz ist kein Widerspruch zu den in Tabelle 2.1 angeführten Reaktionszeiten bei Hangwinden von wenigen Minuten. Es ist nämlich zu bedenken, dass die Temperaturmessung im Bachtal in der Übergangszeit von Sonne zu topographisch erzeugtem Schatten nicht für das gesamte Tal repräsentativ ist. An der Station geht die Sonne tendenziell früher unter als in höher gelegenen Bereichen. Somit dauert es auch etwas länger, bis sich oberhalb der Station ähnlich starke Temperaturgegensätze zwischen Hangschicht und Talatmosphäre ausbilden können. Erst die Gegensätze etwas oberhalb der Station führen aber zu messbaren Strömungen am Messpunkt selbst.

Abb. 4.20 (b) stellt den angekündigten Beleg dar, dass die Kapelle am Nachmittag typischer Weise in der gleichen Luftmasse wie die Station BAS in der Talmitte liegt und somit für die Lufttemperatur in der Talatmosphäre außerhalb von Hangwindzonen repräsentativ ist. So zeigt der Temperaturgradient zwischen den vertikal 100m entfernten Stationen (\Rightarrow TT-Gradient entspricht T-Differenz), dass zwischen 14:00 und 16:00 Uhr UTC, wenn die größte Taleinwindhäufigkeit auftritt, im Mittel etwa trockenadiabatische Durchmischung zwischen den Standorten vorliegt. Dieser Umstand beweist, dass die Station KAP typischer Weise am Nachmittag nicht in einer Hangwind- sondern in einer

²²Begründung dieser Behauptung folgt mit der Beschreibung von Abb. 4.20(b)

Talwindzone liegt.

Weiter ist zu erkennen, dass sich Station KAP am Vormittag in der Regel in wärmeren Luftmassen befindet. Der Grund hierfür ist in räumlich variabler diabatischer Erwärmung (KAP besonnt, BAS im Schatten) zu sehen. Auch in der Nacht ist es im Bereich der Talsohle im Mittel um mehr als 1°C kälter, wobei der Grund nun im Abfließen von Kaltluft zum tiefsten Punkt zu suchen ist.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die am Eingang dieses Punktes vorgestellten Ideen und Theorien bestätigt werden konnten. Ganz nebenbei zeigt sich im Rahmen dieser Untersuchungen, welche enormen Temperaturgradienten trotz Mittelung über viele Tage sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung am Sonnenhang im Bereich von Vomp gemessen wurden.

4.3 Kleinskalige Meteorologie und Luftschadstoffkonzentration A12 Vomp

In diesem Punkt wird das Untersuchungsgebiet auf die Umgebung der Station LT im Bereich östlich der Autobahnraststätte A12 Vomp verkleinert. Außerdem werden nun neben kleinskaligen meteorologischen Untersuchungen auch Emission und Luftschadstoffkonzentrationen sowie deren Variationen während des Winters bzw. während einzelner Tage analysiert.

4.3.1 Winterüberblick Emission und Immission

4.3.1.1 Emission

Abb. 4.21 stellt die vom Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Verkehrsplanung, zur Verfügung gestellten, halbstündlichen Gesamtemissionswerte (Berechnung laut Landesgesetzblatt für Tirol 2007, Nr.72., S.215ff.) dar. Die Werte sind in $g/km/h$ angegeben.

Die Immissionsmessung hingegen ist eine Momentanmessung zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. ein Mittel über viele Momentanmessungen zu verschiedenen Zeitpunkten mit der Einheit $\mu g/m^3$. Würde man also in einen abgeschlossenen Würfel mit dem Volumen von $1m^3$ ab dem Zeitpunkt $h=0$ $1000\mu g/m^3/h$ NOx emittieren (mit der Annahme, dass sich die Schadstoffe gleichmäßig auf das Volumen verteilen), würde man zum Zeitpunkt $h=1$ $1000\mu g/m^3$ Immission messen, zum Zeitpunkt $h=2$ $2000\mu g/m^3$. Betrüge das Volumen $2m^3$, würde sich der Immissionswert halbieren, weil bei vollständiger Durchmischung der Mittelwert der NOx Konzentration über das gesamte Volumen gemessen wird.

Das Volumen, auf das sich die Emission verteilt, ist in der Natur außerhalb abgeschlossener Räume noch bei Windstille viel größer als $1 m^3$, weil selbst Abgase, die von einem stehenden Auto ohne Fahrtwind emittiert werden, durch ihre erhöhte Temperatur im Vergleich zur Umgebung sich relativ zur Umgebungsluft nach oben bewegen und sich solange vermischen, bis die Temperatur ausgeglichen ist. Zusätzlich kommt das Gesetz der Dispersion zum Tragen. Allerdings kann während Calmen eine Anhäufung²³ von Schadstoffen in der Luft im Gegensatz zu Perioden mit intensiven Winden (Verteilungsvolumen sehr groß) nicht vernachlässigt werden.

Weiter ist zu bedenken, dass die Emissionsquelle in der Praxis immer eine gewisse Distanz von der Immissionsmessstelle entfernt ist, was erstens bedingt, dass sich die Emissionen ausbreiten (sonst wäre die Immission 0) und zweitens das Volumen vergrößert wird. Außerdem steigt mit zunehmender Entfernung selbst von einer starken Emissionsquelle der Einfluss der im Falle von NOx vorhandenen weiteren Quellen (lokaler Verkehr, Hausbrand,...). Die Messstelle Vomp weist aber einen vergleichsweise sehr geringen Abstand zur Emissionsquelle Autobahn auf (im Mittel rund 10m) und bietet sich daher für die nachfolgenden Vergleiche der Autobahnemission mit der Immission an.

²³Austauschkoeffizienten bei ausschließlich molekularer Diffusion klein \Rightarrow Quelle zeitweise größer als Senke

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es sich beim in der weiteren Arbeit verwendeten „Verhältnis“ I/E um kein klassisches (\Rightarrow dimensionsloses) Verhältnis handelt, weil nach der Division die Einheit ppb km h / g übrig bleibt. Dennoch hat der Vergleich der beiden Größen eine hohe Aussagekraft über die Ausbreitungsbedingungen der Schadstoffe und wird häufig verwendet (z.B. in Thudium and Kocsis 2000 oder Landesgesetzblatt für Tirol, Stück 34, Jahr 2008, Verordnung 68).

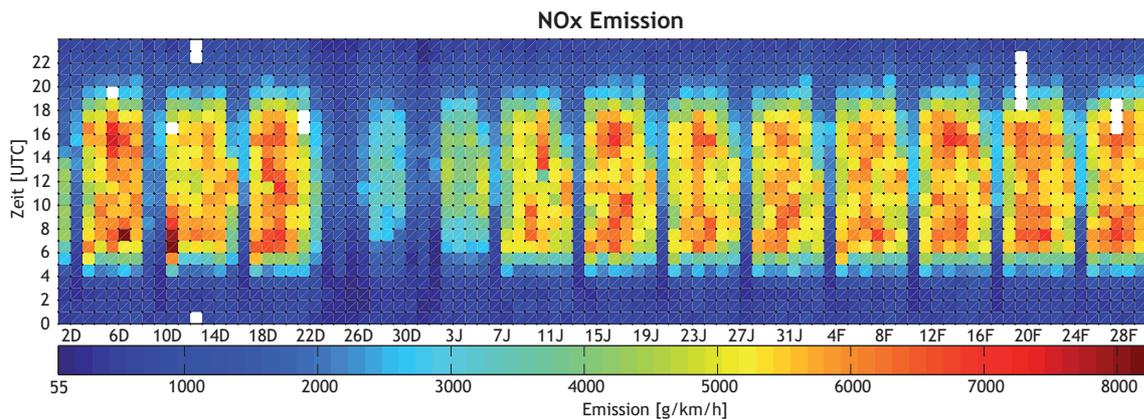


Abbildung 4.21: Berechnete, halbstündlich integrierte NO_x Emission für die A12 im Bereich Vomp. Tage (30.11.07 - 01.03.08) auf der x-Achse. Quelle: Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Verkehrsplanung

Die Emissionsdaten in Abb. 4.21 spiegeln typische Verkehrszyklen, die durch gesetzliche Rahmenbedingungen²⁴ und menschliche Gewohnheiten entstehen, wieder. Im Folgenden eine kurze Aufzählung der wichtigsten Auffälligkeiten der Abbildung:

- Relativ hohe Emissionen treten von Montag bis Freitag von 4:00 Uhr UTC (Ende Nachtfahrverbot LKW) bis etwa 19:00 Uhr UTC auf (Beginn Nachtfahrverbot LKW)
- An Samstagen liegt die Emissionsspitze am Vormittag. Um 14:00 Uhr UTC (Beginn Wochenendfahrverbot LKW) setzt früher als an den Wochentagen der Rückgang ein.
- An allen Sonntagen (Sonn- und Feiertagsfahrverbot LKW) treten ganztägig deutlich reduzierte Emissionswerte auf
- In der Weihnachtszeit (ohne Advent) sind die Emissionen drastisch reduziert
- Die Morgen- und Abendspitzen sind schwach und unregelmäßig ausgebildet, sodass tagsüber die Emissionen auf hohem Niveau relativ konstant bleiben.
- Der höchste Emissionswert (8246 g/km/h) wurde für den 10. Dezember 7:00 Uhr UTC berechnet, der niedrigste zugelassene²⁵ am 25. Dezember um 02:30 Uhr UTC.

²⁴weitere Informationen dazu enthält die Arbeit von Bilgeri (2009)

²⁵Rohwerte kleiner $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurden gemäß den Überlegungen Thudium et al. (2001), S.40 entfernt

- Im Laufe der Untersuchungsperiode treten nur am Wochenende signifikante Trends in der Emissionsentwicklung auf (siehe auch A.4)

Der höchste berechnete Emissionswert (10.12.07) während der Monate Dezember, Jänner und Feber erklärt sich durch den Umstand, dass der vorangehende Samstag in Österreich ein gesetzlicher Feiertag (Sonn- und Feiertagsfahrverbot LKW) war. Somit kam es zu einer Verschiebung von LKW-Verkehren auf den nächsten Werktag.

Weiter führt der im Feber verstärkte Wintersporttourismus zu einem Ansteigen der Emission am Wochenende (speziell am Samstag als Hauptreisetag).

4.3.1.2 Immission

Zunächst ist zu bemerken, dass die Immission zumindest tagsüber eine Größenordnung kleiner ist als die Emission (natürlich dürfen die im vorherigen Punkt erwähnten Probleme bei diesem Vergleich nicht vergessen werden!). Das bedeutet, dass sich die Emission in einen Kubikmeter Luft in einem abgeschlossenen System in einer halben Stunde auf 10 Kubikmeter ausbreiten bzw. verdünnen würde. Die Natur ist alles andere als ein abgeschlossenes System und die Verbreitung erfolgt selbst bei lokalskaliger Windstille durch die von Fahrzeugen erzeugten kleinstskaligen Luftbewegungen und durch Dispersion auf wesentlich größere Luftvolumina. Diese Luftvolumina sind jedoch meist keine Reinluft, sondern bergen bereits ein unterschiedlich großes Reservoir an Schadstoffen in sich.

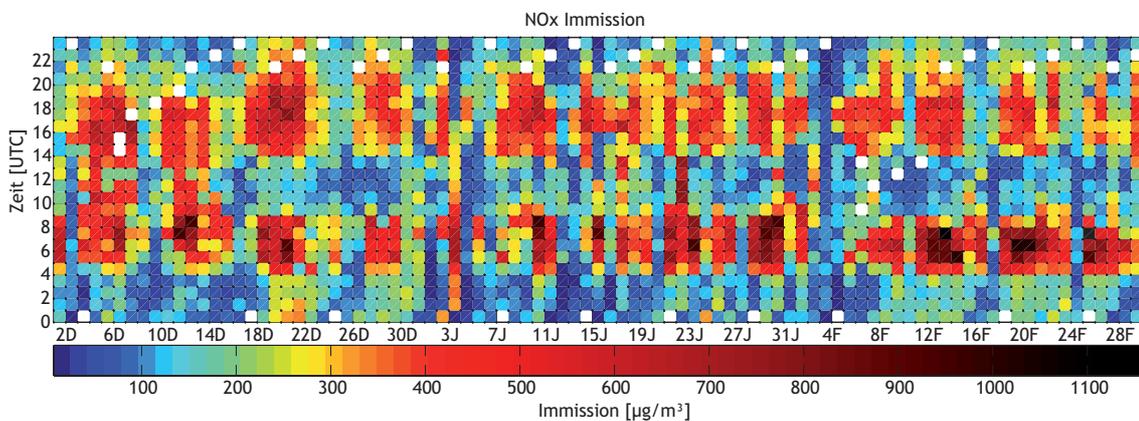


Abbildung 4.22: NOx Immission als Halbstundenmittelwert an der Messstelle LT östlich der Raststätte A12 Vomp. Tage (30.11.07 - 01.03.08) auf der x-Achse.

Die vielen Einflüsse, die auf dem Weg von der Emission auf der Autobahn zur Immission in der rund 10m entfernten Messstation wirken, spiegeln sich in der unregelmäßigen Struktur der Abb. 4.22 (im Vergleich zu Abb. 4.21) wider.

Auf den ersten Blick fällt jedoch auf, dass die Extremwerte der Immission ausnahmslos in den frühen Vormittagsstunden auftreten. Ebenso stechen die in der Immission deutlich ausgeprägten Morgen- und Abendspitzen ins Auge, die nur an wenigen Tagen (speziell Anfang Dezember) nicht durch Minima um Mittag unterbrochen werden.

In den folgenden Punkten gilt es emissionsunabhängig zu untersuchen, warum die erkennbar regelmäßigen Muster (siehe Abb. 4.23, welche die einhöckerige Emissionskurve im Gegensatz zur zweihöckerige Immissionskurve zeigt) entstehen und wie die dazugehörigen Ausnahmen (z.B. 22.01.08 in Abb. 4.22) zu erklären sind.

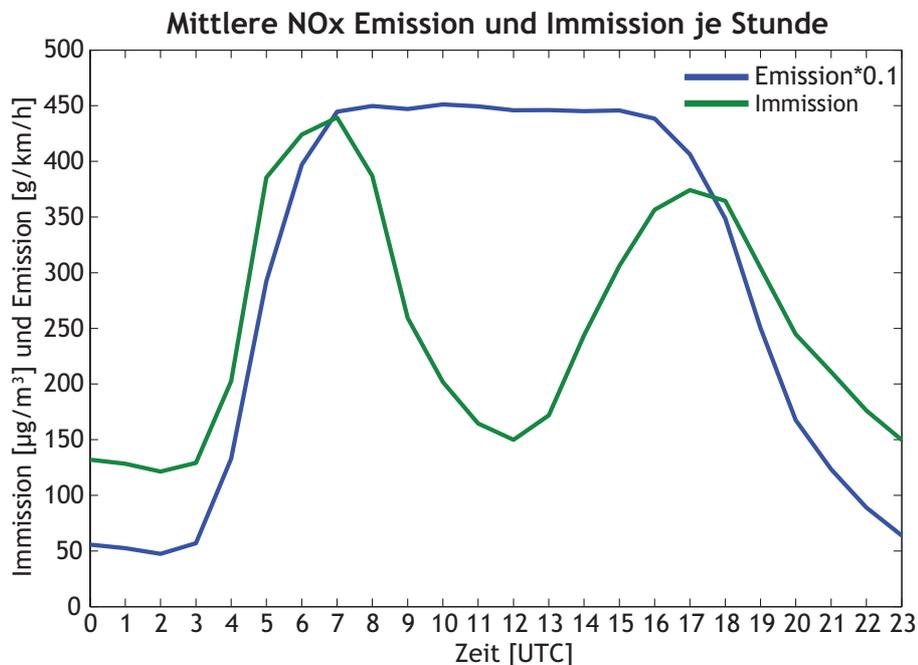


Abbildung 4.23: Halbstündlich integrierte NO_x Emission und halbstündlich gemittelte Immission (von 01.12.07 bis 29.02.08). Die Emission wurde mit dem Faktor 0.1 multipliziert.

4.3.2 Emissionsunabhängige Schwankungen

4.3.2.1 Immission zu Emission

Die Berechnung des Verhältnisses von Immission zu Emission stellt laut der Literatur (Thudium and Kocsis 2000, S.41ff.) eine interessante Möglichkeit dar, nur jene Auswirkungen auf die Schadstoffbelastung zu zeigen, die Meteorologie und Chemie verursachen. So bedeuten Verhältnisse nahe 0 gute Durchmischung der schadstoffreichen Luftpakete und chemischen Abbau von NO₂ Molekülen (vgl. Glg. 2.11 und Glg. 2.3.2), wogegen Werte größer 0.1 bereits zunehmend schlechtere Ausbreitungsbedingungen von NO_x Molekülen oder den Herantransport von vorbelasteten Luftmassen andeuten. Werte um oder über 1 entstehen selten und nur dann, wenn extrem niedrige Emissionswerte mit vorbelasteten Luftmassen zusammentreffen²⁶. Nicht zu Letzt ist zu erwarten, dass auch die Lage der Quelle zur Messstation unter variierender Anströmrichtung einen (erheblichen) Einfluss auf das Verhältnis hat, da sich der Quelltyp der Emission bezogen auf den Standort der Immissionsmessung ändert (im Fall der Station LT Linienquelle

²⁶Da aufgrund der Nähe der Station LT im Rahmen dieser Arbeit vor allem die Wirkung der Autobahnemission untersucht wird, sind diese hohen Werte von keinem erhöhten Interesse

bei westlichen Winden, Punktquelle bei nördlichen Winden, stromabwärtige Quelle bei Südwinden).

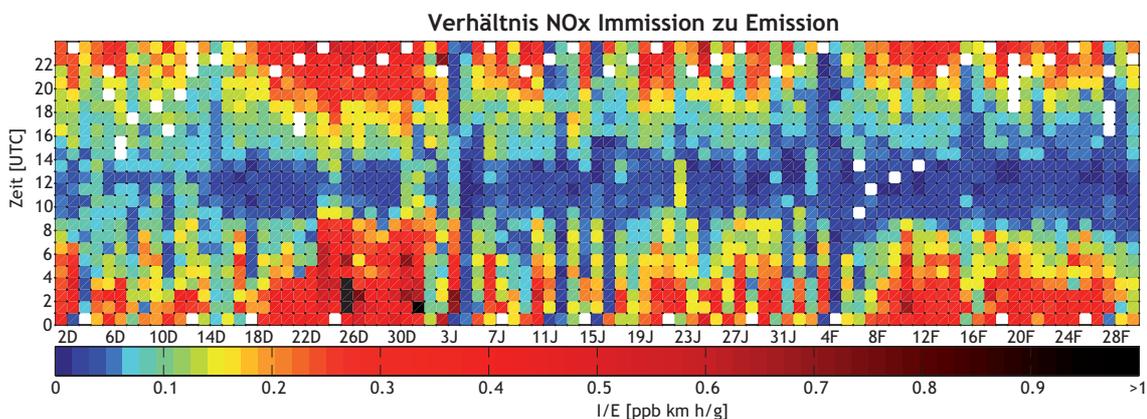


Abbildung 4.24: Verhältnis NOx-Immission (Halbstundenmittelwert) zu NOx-Emission (halbstündlich integrierter Wert) für die Messstelle östlich der Raststätte A12 Vomp. Tage (30.11.07 - 01.03.08) auf der x-Achse.

Das auffälligste Merkmal von Abb. 4.24 ist der von links nach rechts breiter werdende und abgesehen von den ersten Dezembertagen kaum unterbrochene dunkelblaue Streifen über Mittag. Er zeigt an, dass trotz hoher Emission (vgl. Abb. 4.23) sehr geringe Immissionswerte gemessen werden. Die Durchgängigkeit des Streifens bzw. der ausgeprägte Tagesgang in Abb. 4.25 (a) trotz Berücksichtigung aller Werte lässt unter Einbeziehung von Wetterkarten den Schluss zu, dass nur starke synoptische Störungen (Anfang Dezember) den typischen Tagesgang unterbrechen können. Diese Aussage gilt im speziellen dann, wenn Gradientwinde bis zur Messstation vordringen können. Ist dies der Fall (z.B. 03.01. ab ca. 12:00 Uhr UTC bis 04.01. 16:00 Uhr UTC; 11.01. bis 12.01.; z.B. 15.01. bis 16.01), wird ein ganztägig niedriges Verhältnis von Immission zu Emission beobachtet. Weitere Details dazu in Punkt 4.3.3.

Die Häufung roter Farbfelder in Abb. 4.24 von Mitte bis Ende Dezember lässt sich dadurch erklären, dass zu dieser Zeit einerseits der Ostalpenraum unter dem Einflussbereich eines ausgeprägten Hochdruckgebiets lag (\Rightarrow schlechte Ausbreitungsbedingungen während der langen Nächte) und die Luft in der Folge mit Schadstoffen nicht nur von der Autobahn (ebenso hohe Heiztätigkeit) angereichert wurde, andererseits aufgrund der Weihnachtszeit deutlich geringere Emissionen verzeichnet wurden (\Rightarrow hohes I/E Verhältnis).

Daraus wird auch klar, dass größere Probleme hinsichtlich der Einhaltung von Immissionsgrenzwerten nur dadurch ausblieben, dass zufällig während der austauschärmsten Phasen der gesamten Messperiode die geringsten Emissionen auftraten.

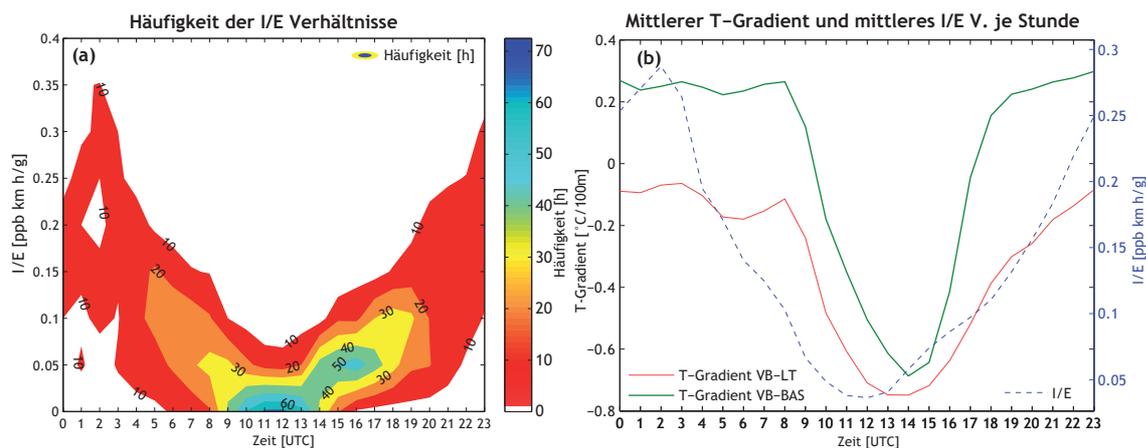


Abbildung 4.25: (a) Häufigkeitsverteilung je Stunde in Stunden des Verhältnis NO_x-Immission (Halbstundenmittelwert) zu NO_x-Emission (halbstündlich integrierter Wert) für die Messstelle LT. (b) Mittlerer Tagesgang des T-Gradient VB-LT und VB-BAS sowie des Verhältnisses I/E. Für beide Berechnung wurden alle Messwerte von 01.12.07 bis 29.02.08 verwendet.

Die bereits erwähnte Abb. 4.25 (a) zeigt auf andere Weise eindrucksvoll, wie dominant sich der Tagesgang des I/E Verhältnisses während der gesamten Messperiode präsentiert. Bezieht man in die Überlegungen Abb. 4.25 (b) ein, welche Informationen über den vertikalen Temperaturgradienten und der Stabilität liefert, ergeben sich neue Details: Die besten Durchmischungsverhältnisse ($I/E \rightarrow 0$) treten häufig ca. 2 Stunden früher als das Stabilitätsminimum zwischen Station VB und LT bzw. Station VB und BAS auf. Wird dieses erreicht, beginnen sich die Ausbreitungsbedingungen an der Station LT schon wieder zu verschlechtern (die Berechnung der Stabilität aus den Messwerten speziell von BAS und VB dürfte aufgrund der intensiven Taleinwinde und der exponierten Lage des Vomperbergs vor allem bei nordöstlichen Anströmungen trotz der Verwendung von einem bodengebundenen und zum Hang verschobenen Messpunkt am Nachmittag für die untere Talatmosphäre repräsentativ sein).

Dieses Entwicklung ist außergewöhnlich oft ab 14:00 Uhr UTC zu beobachten und führt zu einer eindeutigen Asymmetrie in Abb. 4.25 (a). Durch das Vorwissen aus Punkt 4.2 ergibt sich sofort der Zusammenhang mit Hang(ab)winden (siehe Abb. 4.14 (a)).

Dies bedeutet in weiterer Folge, dass für die Ausbreitungsbedingungen von Schadstoffen an der A12 an bestimmten (schneefreien) strahlungsreichen Wintertagen der horizontale Temperaturgradient vom Hang (im Bachtal) zur Talmitte neben dem vertikalen Temperaturgradient sehr wichtig ist (siehe hierzu Abb. 4.19, links).

Dieser Gradient ist an sonnigen Tagen zwischen 9:00 und 12:00 Uhr UTC zum Hang maximal positiv (\Rightarrow Hangaufwind) und zwischen 14:00 und 16:00 Uhr UTC zum Hang maximal negativ (\Rightarrow Hangabwind) und passt zeitlich gut zu den Extrema der Häufigkeit in Abb. 4.25 (a).

Dass Hangaufwinde im Vergleich zu Calmen in der Früh die Ausbreitungsbedingungen für Stickoxide, die auf der Autobahn emittiert werden, verbessern, scheint plausibel. In-

wieweit sie aber Hangaufwinde durch die geringere vertikale Ausdehnung und verringerte Turbulenzen (im Vergleich zu Hangaufwinden) verschlechtern, bereits vorbelastete Luft heranführen (ein starker Hinweis darauf ist, dass an Sonnentagen die Asymethrie allein auf einen Anstieg der NO_2 Konzentration mit den einsetzenden Hangabwinden einhergeht, siehe auch Abb. A.7) oder ob auch die Lage Quelle - Messung zur Strömung bedeutend ist (diese Möglichkeit darf auch bei Hangaufwinden nicht außer Acht gelassen werden!), wird in Punkt 4.3.3.5 diskutiert.

4.3.3 Einfluss der Windarten auf die Immission an Station LT

4.3.3.1 Ergebnisübersicht und Vorbemerkungen

Im Zuge dieser Spezialuntersuchung für die Station LT ist es sinnvoll, auch die östlichen Winde in eher direkt synoptisch bzw. eher direkt thermisch angetrieben (wie die westlichen Winde in Föhn und Talauswind) zu unterteilen, weil trotz des geringeren Unterschiedes bezüglich der Luftmassen (kein Föhneffekt, da Inntal nach Nordosten offen) Unterschiede hinsichtlich Intensität, Stabilität und O_3 Advektion zu erwarten sind. Eine einfache Möglichkeit, diese Aufspaltung durchzuführen, ist jene Tage zu finden, an denen der Taleinwind nicht nur vom frühen Nachmittag bis frühen Abend auftrat. Ein thermisch lokal erzeugter Taleinwind kann im Winter nämlich keinesfalls in der Früh entstehen. Die Auswahl der synoptisch (von Nordwest bis Nordost) beeinflussten Tage erfolgte mittels Abb. 4.12 unter Einbeziehung von Bodenkarten (Plausibilitätskontrolle). Natürlich gibt es einige Fälle, die sehr schwierig zuzuordnen sind, dabei geht es aber immer nur um wenige Stunden, da längere Perioden eindeutig zu klassifizieren sind. Ergebnis:

Tage mit direkt synoptisch getriebenen Taleinwind

Dezember 2007	8, 12, 13, 14, 15, 18	$\Sigma=6$
Jänner 2008	1, 6, 12, 13, 16, 22, 27, 28, 30, 31	$\Sigma=10$
Feber 2008	2, 15, 16, 27, 28(Vormittag)	$\Sigma=5$

Tabelle 4.6: Tage, an denen Taleinwindzirkulationen direkt mit synoptischen Systemen in Verbindung gebracht werden können.

Die gemessenen 329 Stunden Taleinwind an der LT spalten sich somit in 104 Stunden thermisch bedingt, 226 Stunden direkt synoptisch bedingt, auf.

Die in Kürze folgende Tabelle 4.7 und Abb. 4.27 enthalten mit dem Verhältnis NO_2/NO_x eine neue, bislang nicht diskutierte Größe, die definitionsgemäß nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Was besagt dieses Verhältnis?

Rein rechnerisch gibt es Auskunft, wie hoch der Anteil von NO_2 am NO_x (hier: $NO_2[\mu g/m^3] + NO[\mu g/m^3]$) ist. Aus der Höhe des Anteils lassen sich in weiterer Folge unter Einbeziehung luftchemischer Prozesse (siehe Punkt 2.3 bzw. Gleichung 2.7) und dem typischer Weise noch²⁷ kleinen NO_2/NO_x Verhältnis der Emission (siehe Punkt 2.3.2

²⁷In den letzten Jahren hat ein Anstieg der direkten NO_2 Emission durch den Einsatz moderner Dieselmotoren eingesetzt (Spangl et al. 2006, S.8)

oder Thudium (2002a)) einige Rückschlüsse über die Luftmasse treffen:

Je größer das Verhältnis, desto höher ist der NO_2 Anteil der Emission und desto mehr Reaktionspartner (O_3 laut Glg. 2.7, freie Radikale laut Glg. 2.8) sind zur Umwandlung von NO in NO_2 vorhanden (und/oder desto mehr NO_2 wird direkt emittiert).

Je kleiner das Verhältnis, desto weniger Reaktionspartner sind vorhanden (und desto höher ist der NO Anteil an der Stickoxidemission)²⁸.

$NO_2/NOx \mapsto 0$	$NO_2/NOx \mapsto 1$
wenig Reaktionspartner, wenig Direktmission	viele Reaktionspartner, viel Direktmission

Nach den vorhin präsentierten Überlegungen könnte man meinen, dass das Verhältnis in Abb. 4.26 (a) im Winter an der Station LT neben der Emission intensiv vom O_3 Angebot abhängt. Allerdings ist zu bedenken, dass bei stark eingeschränktem Luftaustausch (typisch für Sonntage) nur zu bestimmten Tageszeiten (vor allem Vormittags) O_3 advehiert wird, also Glg. 2.7 nur temporär funktionieren kann (siehe auch Schnitzhofer 2005, S.40). Warum erreicht der Anteil von NO_2 am NOx an strahlungsintensiven Tagen zu Mittag sein Maximum?

Der Grund ist eindeutig in der typischen südlichen Anströmrichtung auf die Station LT verbunden mit den besten Durchmischungsbedingungen (thermische Turbulenz) zu sehen, die nach ihrem Einsetzen dazu führt, dass vergleichsweise wenig NO Moleküle direkt von der nahe liegenden Autobahn eintreffen (nur über den Umweg von Rezirkulationsprozessen) und O_3 verfügbar ist. Zur Station LT gelangt nun Luft aus der Talsohle, sodass Emissionsquellen (lokale Verkehre, Hausbrand, Industrie, vor allem aber früher emittierte Autobahnemissionen) weiter entfernt sind. Sollten in der Luft zudem freie Radikale verfügbar sein, ist nach Sonnenaufgang NO_2 Produktion nicht nur nach Glg. 2.7 sondern auch nach Glg. 2.8 möglich, sodass in Summe neben dem verringerten NO Angebot mehr NO_2 verfügbar ist und das Verhältnis rasch ansteigt²⁹.

Es kann festgehalten werden, dass an Tagen mit direktem synoptischen Einfluss (\Rightarrow talparallele Winde) O_3 Advektion ganztags möglich ist. Im Gegensatz dazu ist die Advektion an synoptisch ungestörten, strahlungsintensiven Tagen (\Rightarrow Talquerzirkulationen und Calmen) nur zeitweise möglich.

Der nächtliche Anstieg des Verhältnisses bei schwachen bis ausbleibenden Winden dürfte nicht mit der Umwandlung des unter Tags gebildeten O_3 (nach Glg. 2.11) in NO_2 (\Rightarrow NO Verbrauch) zusammenhängen, da ein O_3 Verbrauch nach Schnitzhofer (2005) nur bei sehr geringen NO Konzentrationen auftritt. Diese treten trotz der stark verringerten Emissionen in der Nacht im Bereich der Autobahn nicht auf. Eher könnte der Anstieg durch die Veränderung der Fahrzeugzusammensetzung (PKW-Anteil erhöht) und einer damit verbundenen stärkeren Direktmission von NO_2 zu erklären sein (\Rightarrow wenig NO , viel NO_2).

Die geringeren NO_2/NO Verhältnisse bei Sonntagen in der Nacht sind wohl rein meteorologisch bedingt. Vermutlich spielt die Advektion von Vorläufersubstanzen (O_3 und freie

²⁸Weitere Informationen zu diesem Thema stellt u.a. das Umweltbundesamt zur Verfügung (Spangl 2004a, S.79ff.).

²⁹Außerdem ist entscheidend, dass die Produktion durch Photolyse schneller als der Abbau durch Photolyse funktioniert, vgl. Punkt 2.3.2

Radikale), die in klaren Nächten (bei Sonnentagen zu erwarten) im Gegensatz zu bewölkten Nächten (synoptischer Einfluss) durch typischer Weise ausbleibende Winde³⁰ stark eingeschränkt wird, eine Rolle. Als Ursache ausgeschlossen werden kann eine (zufällig) höhere Emission an Sonnentagen ($\overline{E}(\text{ST}) = 2800 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\overline{E}(\text{KST}) = 2945 \mu\text{g}/\text{m}^3$). In diesem Punkt könnten weitere Fallstudien, Spezialmessungen und Auswertungen durch Atmosphärenchemiker zum besseren Verständnis beitragen.

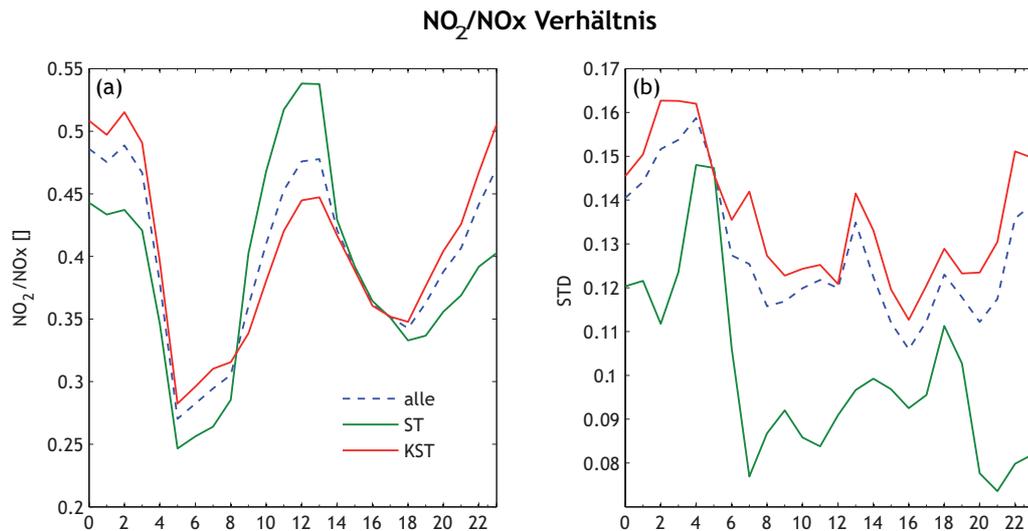


Abbildung 4.26: Mittleres NO_2/NO_x Verhältnis (a) und Standardabweichung (b) je Stunde für alle Tage (blau punktiert), für **mindestens zwei** Sonnentage (ST) in Folge und für die übrigen Tage (KST) an der Station LT. Informationen über Sonnentage siehe Punkt 4.1.3.

Nach abgeschlossener Unterteilung und Einführung des NO_2/NO_x Verhältnisses findet sich im Anschluss Tabelle 4.7 und Abb. 4.27, die mittlere Werte verschiedener Größen je Windart zusammenfassen. Die Ergebnisse werden im Anschluss für jede Windart diskutiert.

Bezüglich der in der Bildunterschrift erwähnten hohen Standardabweichung selbst beim I/E Verhältnis ist der Grund in der unmittelbaren Nähe der Immissionsmessung zur Emissionsquelle zu sehen. So kann z.B. selbst bei südlicher Anströmung (Autobahn liegt stromabwärts der Station LT) während kurzzeitiger Phasen mit Calmen oder Turbulenzen (möglicherweise nicht nur natürlich, sondern auch durch Verkehr auf der Autobahn ausgelöst) die Emission entgegen der allgemeinen Stromrichtung zur Station vordringen und so große Schwankungen verursachen.

³⁰ $\overline{v}(\text{ST})$ ist im Mittel über alle Stunden um 40% kleiner als $\overline{v}(\text{KST})$

Parameter	Föhn	TE-T	TE-S	TA	TQ NW	TQ SO	Calmen
\bar{v} [m/s]	1.9	1.6	2.3	0.9	1.0	1.1	-
\bar{T} [°C]	9.9	4.5	2.2	2.3	3.3	3.7	-0.1
$\frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$ VB-LT [°C/100m]	-0.7	-0.6	-0.9	-0.4	-0.5	-0.6	0.0
\overline{RH} [%]	47	75	87	85	80	80	91
$\overline{kw_{Ein}}$ [W/m ²]	71	64	49	94	17	285	22
$\overline{NO_x}$ [µg/m ³]	116	240	188	309	309	136	268
\overline{NO} [µg/m ³]	65	148	118	221	210	82	188
$\overline{NO_2}$ [µg/m ³]	52	92	70	88	99	55	80
$\overline{NO_2/NO_x}$ []	0.45	0.38	0.37	0.28	0.32	0.40	0.30
\bar{E} [µg/m ³]	3127	3128	2797	3632	3302	4510	1813
\bar{I}/\bar{E} [ppb km h/g]	0.037	0.077	0.067	0.085	0.094	0.030	0.148

Tabelle 4.7: Mittelwerte verschiedener Parameter je Windart an der Station LT. TE-T=TalEin-Thermisch induziert, TE-S=TalEin-Synoptisch induziert, TA=Talaus, TQ=Talquer NordWest/SüdOst. Alle Werte sind gerundet, deshalb ergibt die Summe nicht immer exakt 100%. Verhältnismittel werden aus vorher gemittelten Konzentrationen berechnet. Hinsichtlich Schadstoffparameter treten selbst beim Verhältnis I/E hohe Standardabweichungen auf, die auf die unmittelbare Nähe der Station zur Emissionquelle zurückzuführen sind.

Verschiedene Parameter je Windart Station LT

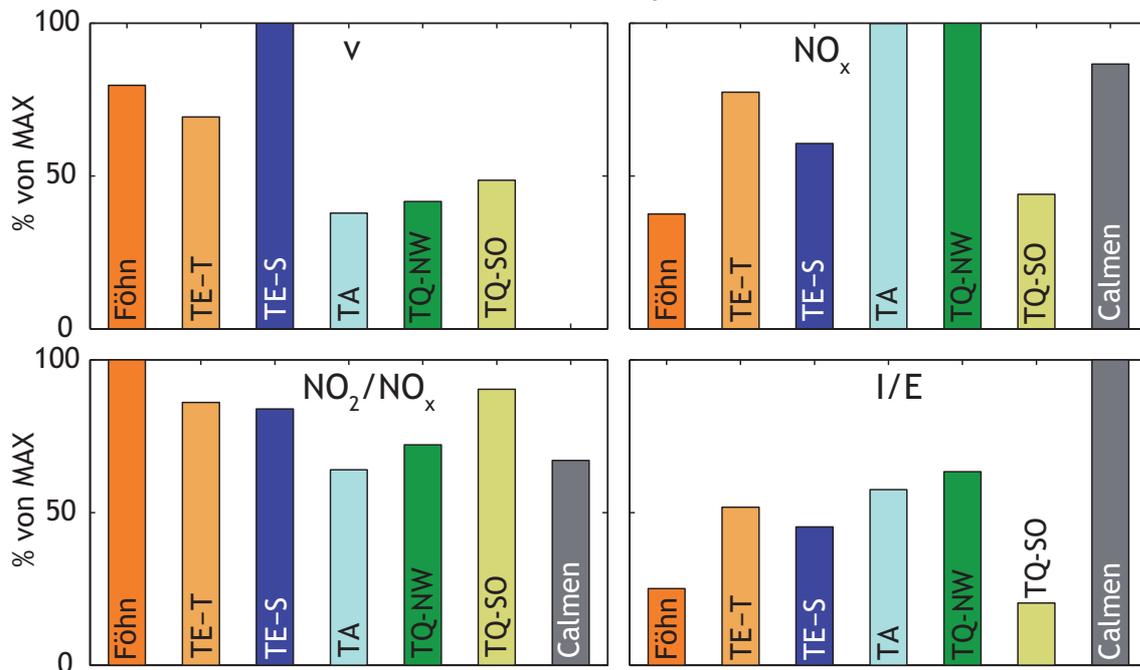


Abbildung 4.27: Prozentanteil vom Maximalwert (der bei einer Windart erreicht wird) von gemittelten Parametern je Windart. Als Datengrundlage dienen die Werte in Tabelle 4.7. TE-T=TalEin-Thermisch induziert, TE-S=TalEin-Synoptisch induziert, TA=Talaus, TQ=Talquer NordWest/SüdOst. Eine grafische Darstellung weiterer Parameter befindet sich in A.6

4.3.3.2 Einfluss von Calmen

Welchen Einfluss haben ausbleibende Winde auf die Stickoxidkonzentration in der Luft wenige Meter neben der A12 in Vomp? Tabelle 4.7 und Abb. 4.27 zeigen, dass überraschender Weise im Mittel während Calmen nicht die höchsten Immissionen gemessen werden. Die Überraschung legt sich, wenn man die letzten zwei Zeilen der Tabelle in die Überlegungen einbezieht. Man erkennt, dass während der Calmenphasen, die sich am häufigsten während der Nacht einstellen (siehe Abb. 4.7), die Emission im Vergleich zu den anderen Windarten mit Abstand am niedrigsten ausfällt. Trotzdem ergibt sich für Calmenphasen das höchste I/E Verhältnis, welches auf die zu erwartenden relativ schlechten Ausbreitungsbedingungen hinweist.

Sehr interessant ist das geringe NO_2/NO_x Verhältnis während windstillen Phasen trotz geringer Emission und meistens fehlender Sonnenstrahlung zum Abbau (Photolyse) von NO_2 . Es liefert den Hinweis, dass für die Umwandlung von NO zu NO_2 kein Reaktionspartner (O_3 oder freie Radikale) mehr vorhanden sind.

Dies erklärt sich dadurch, dass während der Nachtstunden lokal weder neues gebildet noch bei Windstille welches advehiert werden kann. Das bedeutet in weiterer Folge, dass das NO_2/NO_x Verhältnis während windstillen und kurzweilig strahlungsfreien Perioden im wesentlichen davon abhängt, wie viel O_3 zu Beginn der Calme verfügbar ist. Die relativ hohe Standardabweichung in der zweiten Nachthälfte (siehe Abb. 4.26 (b)) und der Blick ins Detail z.B. in der Nacht von 04.02. auf 05.02.08 untermauern diese Theorie.

Am 04.02.08 wehte an der Autobahn bis kurz vor Mitternacht Föhn, welcher ozonreiche Luft (Überlegungen dazu im anschließenden Unterpunkt) heran transportierte. Während der nachfolgenden Calme stellten sich außergewöhnlich hohe NO_2/NO_x Verhältnisse ein, die erst um rund 04:00 Uhr UTC beendet wurden, als die Emission auf der Autobahn wieder kräftig anstieg (\Rightarrow großer NO Eintrag) und vermutlich alle O_3 Moleküle verbraucht worden waren.

4.3.3.3 Einfluss von synoptisch direkt induzierten Strömungen

Vorbemerkung: In diesem Punkt werden sowohl Föhn als auch Taleinwinde, die eindeutig mit synoptischen Störungen in Verbindung stehen, untersucht. Das Interesse gilt im besonderen der unterschiedlichen Intensität (\rightarrow stärkere Durchmischung) und O_3 Verfügbarkeit (\Rightarrow Einfluss auf Chemie) im Vergleich zu thermisch angetriebenen Winden.

Während Föhnphasen treten allgemein die geringsten Stickoxidbelastungen auf. Durch das Absinken von Luft aus der freien Atmosphäre kommt es zu einem Vordringen relativ sauberer Luftmassen verbunden mit einem völligen Ausräumen von „alter“ Luft aus der Talatmosphäre, was neben dem sprunghaften Temperaturanstieg unter anderem im markanten Rückgang der Luftfeuchte zu erkennen ist. Zudem werden bei Föhn zumindest in der Talmitte die höchsten Windgeschwindigkeiten verbunden mit der intensivsten Turbulenz gemessen, was zur Folge hat, dass alle Emissionen im Vergleich zu thermischen Talwinden auf riesige Luftvolumina verteilt werden.

Allerdings ist zu bemerken, dass bei Föhn der Anteil des besonders gesundheitsschädlichen NO_2 überdurchschnittlich hoch ist. Der Grund dafür liegt darin, dass bei Föhn ozonhaltige Luft aus größeren Höhen zum Boden transportiert wird (Wotawa, Seibert, et al. 2000). Somit kommt es zu einem kontinuierlichen Nachschub an O_3 und einer begünstigten NO_2 Produktion.

Anströmrichtung auf Station: Bei Föhn wird die Station LT von Westen angeströmt, die Autobahn liegt also als Linienquelle in der Strömung. Allerdings kommt es aufgrund der meist hohen Windgeschwindigkeiten und dem Hindernis wenige Meter stromaufwärts der Station (Autobahnüberführung) zu verstärkter Turbulenz, sodass sicherlich auch Luft von abseits oder oberhalb (in der Vertikalen) der Autobahn zur Station vordringt und die Ausbreitungsbedingungen für Luftschadstoffe überdurchschnittlich gut sind.

Während Phasen mit synoptisch bedingtem Einfließen aus Osten ins Inntal (siehe Tabelle 4.6) werden im Bereich der Station LT im Mittel die höchsten Windgeschwindigkeiten gemessen. Das weist zunächst darauf hin, dass Winde aus Osten im Gegensatz zu Winden aus Westen an der Station kaum abgeschwächt werden³¹. Der Umstand, dass Föhn (entspricht in Schwarz Westwind) aber nur im Nahbereich der Station LT (im Gegensatz zur Station BAS) abgeschwächt wird, dürfte einen Beitrag dazu leisten, dass bei intensiven synoptischen Taleinwinden trotz höherer Windgeschwindigkeit als bei Föhn ein höheres I/E Verhältnis auftritt. Einen weiteren Beitrag leistet der Umstand, dass bei östlicher Anströmung keine Föhneffekte auftreten, da zu überströmende Topographie fehlt. Das heißt, dass in unteren Niveaus keine Luft blockiert wird, somit der Eintrag von Luft aus größerer Höhe nur durch vertikale Turbulenz zustande kommt und in Folge nur ein partieller Luftmassenaustausch stattfindet.

Mit der verringerten Luftzufuhr aus der Höhe geht eine verringerte Ozonadvektion einher, die sich im unauffälligen NO_2/NO_x Verhältnis widerspiegelt. Hier muss jedoch erwähnt werden, dass im Winter 2007/08 während der Messphase keine starken (Sturm)Tiefs mit tiefer Stratosphäre über Mitteleuropa auftraten und der synoptische Taleinwind relativ oft durch die Lage an der Rückseite eines Hochdruckgebiets angetrieben wurde. Dadurch kam es zu keiner auffälligen O_3 Einmischung aus hohen Niveaus.

Einer der wenigen Tage mit synoptisch induziertem tiefen Druck aus Norden im Inntal (12.01.08) weist ein leicht erhöhtes NO_2/NO_x Verhältnis auf, obwohl Gradientwinde an diesem Tag nicht dauerhaft zur Station LT vordringen konnten. Es scheint möglich, dass über den Umweg von Hangwinden ozonreiche Luft advehiert wurde.

Die **Anströmrichtung** bei Taleinwind lässt die Autobahn ebenso wie bei Föhn als Linienquelle wirken.

³¹Dieser Schluss deckt sich mit den Überlegungen in Punkt 4.2.2.2

4.3.3.4 Einfluss von „thermischen“ Talwinden

Während **Talauswind**phasen wurden im Mittel neben den nördlichen Querwinden die höchsten NO_x Immissionen gemessen. Dies hängt aber wohl nicht ausschließlich mit eingeschränkten Ausbreitungsbedingungen zusammen, sondern jedenfalls mit hohen Emissionen während der in der Früh besonders häufig vorhandenen Winde (vgl. Abb. 4.7, rechts). Die **Anströmrichtung** lässt in diesem Fall vermuten, dass die Emission der Autobahn auf der Nordseite des Inntals im Bereich Vomp als Linienquelle im trägen und langsamen Kaltluftstrom wirkt.

Während „thermischer“ **Taleinwind**phasen liefern die Werte und Balken in Tabelle 4.7 und Abb. 4.27 ein eher unauffälliges Bild. Es empfiehlt sich aber jedenfalls ein Vergleich mit direkt synoptisch getriebenen Taleinwinden. Dabei fällt auf, dass sich die beiden Taleinwindarten im Vergleich zu Talauswind und Föhn nur wenig unterscheiden. Die Gründe sind folgende:

Erstens kann Föhn nicht mit synoptischem Taleinwind verglichen werden, weil, wie bereits erwähnt, nur bei ersterem Luft in untersten Niveaus geblockt wird und von Höhenluft ersetzt werden muss. Zweitens sind auch regional angetriebene Talaus- und Taleinwinde hinsichtlich ihrer Eigenschaften sehr verschieden. Bei Talauswind handelt es sich um einen trägen Kaltluftstrom, der zwingend mit einer Inversion (Obergrenze variabel) und folglich zumindest teilweiser stabiler Schichtung der Talatmosphäre verbunden ist. Taleinwinde treten im Gegensatz dazu erst dann auf, wenn sich die Talatmosphäre von unten erwärmt und/oder zumindest entlang der Sonnenhänge die Inversionsgrenzen durchbrochen werden und Masse aus der Talatmosphäre in die freie Atmosphäre abtransportiert wird. Sie treten also jedenfalls in jenen Zeiten, in denen die Stabilität ihr Minimum erreicht oder kurz danach auf (vgl. Abb. 4.8 und Abb. 4.25 (b)). Daher sind sie ihren synoptischen „Verwandten“ sehr ähnlich, weil während deren typischen Erscheinen bei Kaltluftadvektion auch keine stabile Schichtung vorliegt. Somit erklären sich auch die viel geringeren Unterschiede hinsichtlich Ausbreitungsbedingungen (I/E Verhältnis).

Abschließend soll ein stark vereinfachtes (!) Rechenbeispiel für einen typischen Talaus-/Taleinwindtag (10.02.08) für die Talmitte in Schwaz³² Informationen über die räumliche Verschiebung von Luftpaketen geben:

Luft, die um 8:00 Uhr UTC die Station BAS passiert, bewegt sich mit einer mittleren Geschwindigkeit von rund 2.5 m/s talauswärts (unter der Annahme, dass sich die Geschwindigkeit entlang der Talachse nicht wesentlich ändert). Diese Strömung dauert bis etwa 14:00 Uhr UTC, also 5 Stunden an. Das Luftvolumen³³ hat in dieser Zeit rund 54km zurück gelegt und befindet sich im Raum Wörgl. Anschließend dreht die Windrichtung bis etwa 17:00 Uhr UTC verbunden mit einem

³²die Lage der Station LT eignet sich für eine einfache Rechnung nicht, da hier wesentlich komplexere Bedingungen mit stark abgeschwächten Talauswinden, nachfolgenden Querwinden hangaufwärts und anschließenden Hangabwindeinflüssen vorherrschen.

³³Ohne exakte Grenzen, da mechanische Turbulenz zu ständiger Durchmischung von Luftpaketen führt.

Anstieg der mittleren Geschwindigkeit auf rund 4.5 m/s. Die Luftmasse legt in dieser Zeit rund 50km zurück und erreicht somit in etwa den Ausgangspunkt der Betrachtung.

Es ist zu erwarten, dass bei fehlender Schneebedeckung nach Sonnenaufgang Erwärmung vom Boden einsetzt und somit vertikale Durchmischung (Ausdehnung in z-Richtung hängt von Schichtung und Wärmeflüssen am Boden ab) auslöst. Es treten dann also sowohl mechanische als auch thermische Turbulenz auf. Folglich ist es für eine realistische Betrachtung wesentlich plausibler, von mittleren Eigenschaften einer Luftmasse in der gesamten Talatmosphäre statt von einzelnen Luftpaketen zu sprechen.

4.3.3.5 Einfluss von Querwinden

Südliche Querwinde verringern nicht nur die Immission der Station LT dramatisch, sondern bewirken sogar ein geringeres I/E Verhältnis als bei Föhn. **Sie sind somit entscheidend für das u.a. in Abb. 4.22 zu erkennende, sehr regelmäßige Minimum der Immission (speziell an sonnenreichen Tagen) bzw. von I/E in Abb. 4.25 zwischen etwa 09:00 Uhr UTC und 14:00 Uhr UTC (vgl. mit Abb. 4.7, rechts oben) verantwortlich.**

Der Grund dafür liegt in diesem Fall in der südlichen **Anströmrichtung** der Station LT, weil dies die einzige Richtung ist, bei der die Autobahnemission stromabwärts³⁴ liegt und nicht direkt zur Station gelangt sondern (nur) über Rezirkulationsprozesse in der Talatmosphäre (siehe hierzu u.a. Gohm et al. 2009), im Rahmen derer es zu vergleichsweise guter Durchmischung kommt. Dieser Umstand (Transport der Emission über größere Distanzen und in Luftmassen mit O_3 Angebot) spiegelt sich im zweit höchsten NO_2/NO_x Verhältnis wider.

Aufgrund fehlender Daten kann hinsichtlich der Stickoxide nicht untersucht werden, wie sich bei südlicher Anströmung der Station die Situation in den Feldern oberhalb der Autobahn und anschließend im Bachtal entwickelt. Sehr wohl ist aber, wie Abb. 4.28 zeigt, ein Vergleich von mittleren Feinstaubtagesgängen am Hangfuß (Vomp an der Leiten³⁵) und im Bachtal (Station BT) möglich. Natürlich darf dabei nicht vergessen werden, dass bei Feinstaub die Autobahn keine derart dominante Emissionsquelle darstellt und lokale Prozesse eine vergleichsweise wichtige Rolle spielen.

Das Ergebnis von Abb. 4.28 ist in mehrfacher Hinsicht erstaunlich! Erstens unterscheidet sich der zweihöckrige mittlere Tagesgang im Tal deutlich vom einhöckrigen im Bachtal. Zudem zeigt sich ein eindeutiger Zusammenhang mit den südlichen Querwinden bzw. Hangaufwinden, weil genau dann, wenn ihre Häufigkeit um etwa 9:00 Uhr UTC deutlich ansteigt (vgl. Abb. 4.7, rechts oben), die PM10 Konzentration im Tal markant abfällt, etwas oberhalb am Hang markant ansteigt.

Ziemlich überraschend ist die Deutlichkeit, wenn man bedenkt, dass es bei der Fein-

³⁴Abwärts ist hier nur auf die Stromlinien in horizontaler Richtung bezogen, weil stromabwärts der Station die Topographie ansteigt.

³⁵An der Station LT wurden im Winter 07/08 keine hochauflösenden Feinstaubmessungen durchgeführt.

staubmessung im Bachtal genau während der ausgeprägtesten Hochdruckperioden Mitte Dezember und Ende Feber zu längeren Datenausfällen kam (16.12.07 bis 30.12.07; 22.12.08 bis 29.02.08)³⁶. Die Transporte von Luftpaketen allgemein und feinstaubreicher Luft im speziellen den Sonnenhang aufwärts dürften also ziemlich robust gegen wechselnde Wetterbedingungen ohne stärkere Niederschläge sein. Während Niederschlag können keine Informationen geliefert werden, da die zeitgleichen Messwerte aufgrund von möglichen Fehlmessungen eliminiert werden müssen (siehe Punkt 3.2.3). In diesen Phasen ist aber ohnehin mit vergleichsweise wenig Feinstaub in der Luft zu rechnen.

Querwinde aus der entgegengesetzten Richtung, also aus **Nord**, wirken sich deutlich anders aus. Sie weisen nach Calmen das höchste I/E Verhältnis auf. Ähnlich wie bei Südwinden dürfte neben der Advektion belasteter Luft auch hier die Anströmrichtung einen Einfluss ausüben. Sie steht nämlich in diesem Fall im rechten Winkel auf die Autobahn und transportiert dort emittierte Schadstoffe direkt zur Station. Nicht vergessen werden darf zudem der „turbulenzärmere“ Charakter der Hangabwinde (Kaltluftstrom) im Vergleich zu Hangaufwinden.

Dass die heran transportierte Luft bereits vor Überquerung der Autobahn NO_x-Moleküle enthält, ist deshalb anzunehmen, weil besonders an stabil geschichteten Tagen die von Hangwinden antransportierte Luft aus thermischen Gründen nicht aus großer Höhe stammen kann. Somit muss die Luftmasse einen Anteil (dessen Größe ist hinsichtlich NO_x unbekannt) jener Schadstoffe, die bis zur Windumkehr hangaufwärts transportiert und in die Talatmosphäre verteilt wurden, enthalten. Je stabiler die Talatmosphäre geschichtet ist, desto höher dürfte der Anteil sein, weil dann tagsüber umso weniger Schadstoffe in die freie Atmosphäre entweichen können und nach Sonnenuntergang die Hangwinde Luft nur über kurze Vertikaldistanzen talwärts transportieren können, ehe sie sich ablösen.

Abb. 4.28 zeigt für das Bachtal, wo die Hangabwinde etwa 2h vor der Station LT um etwa 12:00 Uhr UTC (siehe Abb. 4.13) einsetzen, dass diese im Mittel 4 Stunden wehen, ehe die PM₁₀ Konzentration ihr Minimum erreicht. Es ist möglich, dass zur Zeit des Minimums aus thermischen Gründen (besonders großes $\Delta\Theta$ zwischen Hang und Talmitte) die Luft mit dem höchsten Ursprung (geringster PM₁₀ Eintrag) zur Station vordringen kann.

Natürlich kann PM₁₀ nicht mit NO_x gleichgesetzt werden, aber Abb. 4.28 zeigt, dass die Kurvenformen zwar um 1-2 Stunden verschoben, sonst jedoch ähnlich sind.

³⁶Die Repräsentativität des Mittels sollte bei Einbeziehung von 2/3 der Messwerte noch gegeben sein.

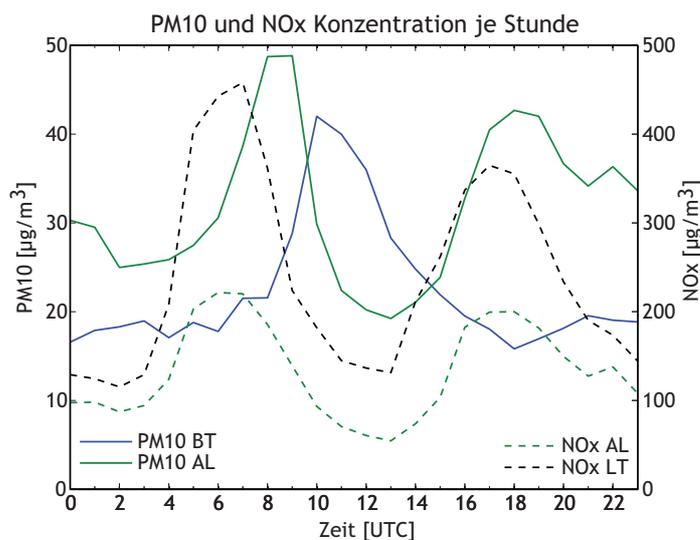


Abbildung 4.28: Mittlere PM10 Konzentration je Stunde an den Standorten BT und AL und NOx Konzentration je Stunde an den Standorten AL und LT. All jene Werte, bei denen zeitgleich im Bachtal die Luftfeuchte Werte größer 90% erreichte, wurden nicht berücksichtigt.

4.3.3.6 Abschließende Bemerkungen

Nachdem nun einige typische³⁷ Phänomene an der Station LT, die durch das komplexe Windfeld entstehen, untersucht wurden, kann festgehalten werden, dass bei allen Schadstoffuntersuchungen erhöhte Vorsicht geboten ist.

Es erscheint riskant, durch Verwendung langzeitgemittelter³⁸ Immissionswerte chemische Umwandlungsraten der Stickoxidemission der A12 zu berechnen (siehe Dünnebeil et al. 2009). Es darf nämlich die „Speicherung“ von NO_2 Molekülen (natürlich auch NO Moleküle) in der Luft einer Talatmosphäre während austauscharmer Wetterlagen nicht vergessen werden. So ist es wie bereits erwähnt denkbar, dass bereits vor einiger Zeit (z.B. vor mehreren Stunden) gebildetes NO_2 (zum Teil aus autobahnfernen Quellen; eventuell während Sonnenschein zwischenzeitlich umgewandelt) mit den (inversen) Winden wieder zur Station gelangt und in der Folge die Umwandlungsrate von emittiertem NO in NO_2 überschätzt und gleichzeitig der noch vorhandene NO Anteil unterschätzt würde. Weiter scheint es zu einfach, als Problemlösung für den Winter erhöhte NO_2 Hintergrundwerte anzunehmen, da diese stark von der Windart abhängen (z.B. bei Südwind Hauptanteil an Immission, bei Westwind gering). In der Folge lassen Berechnungen mit Mittelwerten keine definitiven Aussagen zu jenen Zeiten zu, in denen durch das Zusammenwirken mehrerer Faktoren die höchsten NO_2 Konzentrationen zu erwarten sind.

4.3.4 Besondere Tage(sgänge)

U.a. Abb. 4.22 zeigt, dass an sehr wenigen Tagen der typische Tagesgang der Immission (siehe Abb. 4.23) bzw. des Verhältnisses I/E (siehe Abb. 4.24 und Abb. 4.25) unterbro-

³⁷Außergewöhnliche Phänomene folgen in Punkt 4.3.4.

³⁸Monats- oder Jahresmittelwerte ohne Aufspaltung nach Anströmrichtung

chen ist. Tage um Weihnachten sind dabei weniger interessant, weil aufgrund der Feiertage verhältnismäßig wenig Emission auftrat.

In den folgenden Untersuchungen soll zuerst der 03.01.08 als klassisches Beispiel für einen Föhndurchbruch (\Rightarrow Föhn als Westwind an der Station LT) analysiert werden. Anschließend ist zu klären, ob während anderer Föhnfälle die gleichen Ergebnisse zu beobachten sind.

Einen weiteren, sehr interessanten Tag stellt der 22. Jänner 2008 dar. An diesem Tag wurden über Mittag die höchsten Immissionen des gesamten Tages sowie die höchsten mittäglichen Immissionen während aller Tage gemessen. Auch das I/E Verhältnis steigt am Vormittag im Gegensatz zu fast allen 90 anderen Tagen an.

4.3.4.1 Strahlungsreicher Mustertag

Damit es leichter möglich ist, während außergewöhnlicher Wetterlagen Besonderheiten in den Verläufen wichtiger Variablen zu erkennen, zeigen Abb. 4.29 und Abb.4.30 den Tagesgang einiger im späteren Verlauf diskutierten Größen für den sehr sonnigen (siehe Abb.4.30 (c)) 27.12.2007, der typisch für strahlungsreiche Tage im Winter 2007/08 ist.

An den zeitweise sehr ähnlichen Windrichtungen an den „Inntalstationen“ LT und VB (am Nachmittag eventuell sogar Station BAS) sowie der „Bachtalstation“ BT ist zu erkennen, dass die in den vorherigen Punkten beschriebenen Querzirkulationen an diesem Tag gut ausgeprägt waren. Auch die typischen Calmen an der Station LT sind am Morgen und in den Nachtstunden zu erkennen.

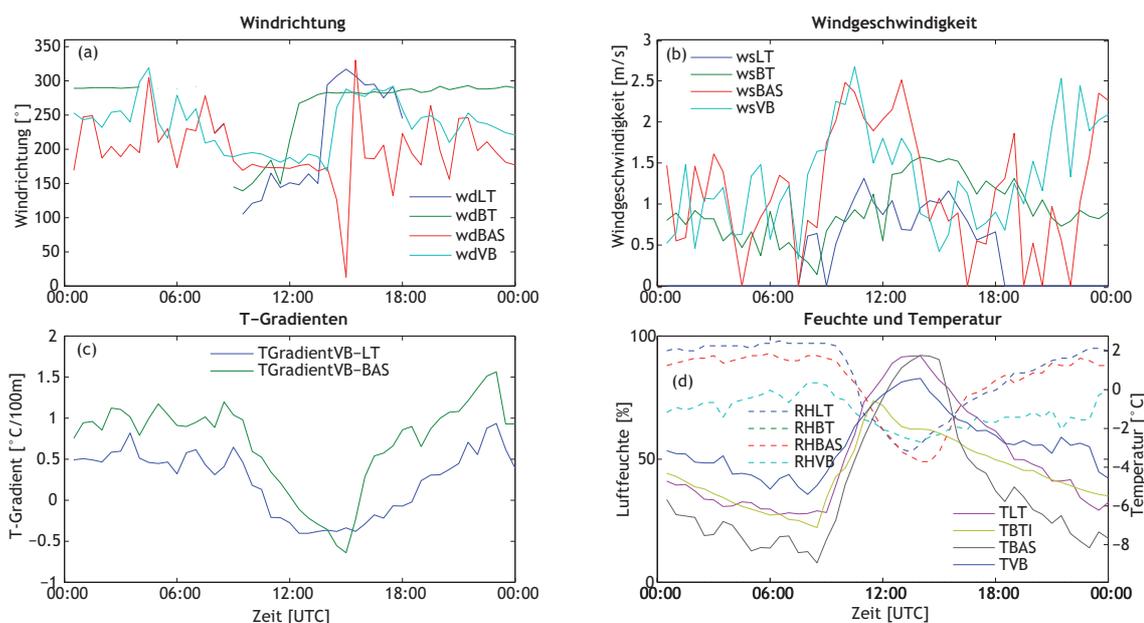


Abbildung 4.29: 27.12.07: (a) Windrichtung und (b) Windgeschwindigkeit an den Stationen BAS (Talsohle), LT (A12, 20m AGL), BT(Hanglage, 100m AGL) und VB (Vomperberg, rund 300m AGL). (c) Temperaturgradienten zwischen VB-LT und VB-BAS. (d) Luftfeuchte und Temperatur.

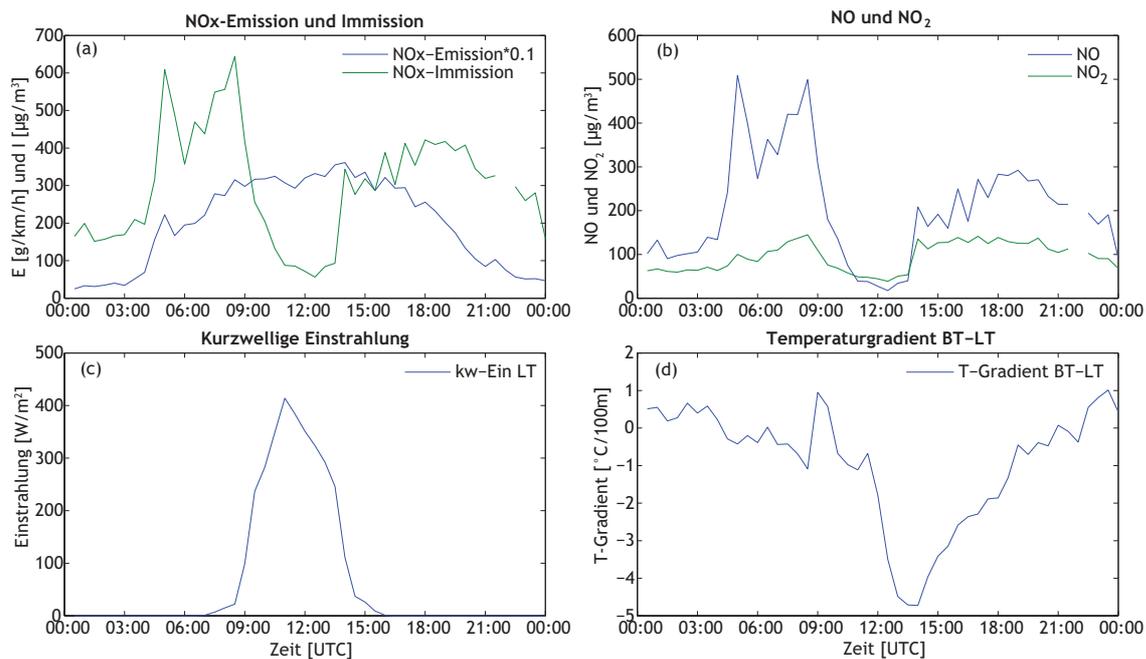


Abbildung 4.30: 27.12.07: (a) NO_x-Emission und Immission (b) NO und NO₂ (c) und kurzweilige Einstrahlung an der Station LT. (d) Temperaturgradient BT-LT

In Abb.4.30 ist schließlich der schlagartige Anstieg der Immission am frühen Nachmittag bemerkbar, der zeitgleich mit der Winddrehung auf Nordwest auftritt. Genauso zeigt sich, dass der maximal negative Temperaturgradient VB-BAS (Abb. 4.29 (c)) dem Immissionsminimum „nachläuft“.

Die Winddaten, die von zwei mechanischen Sensoren zwischen Bachtal und A12 gemessen wurden, finden sich in Abb. A.8 im Anhang.

4.3.4.2 Detailuntersuchung Föhnfälle

03.01.08:

Aus meteorologischer Sicht begann der 03.01.08 mit Temperaturen unter -10°C verhältnismäßig kalt. Ab 06:00 Uhr UTC stiegen die Temperaturen langsam an. Kurz nach 9:00 Uhr UTC setzte ein schlagartiger Temperaturanstieg (rund 10° in 3h) ein, der bei gleichzeitigem, starkem Rückgang der Luftfeuchte den Föhndurchbruch signalisiert. Obwohl vor dem Föhndurchbruch die Kaltluft in der Talatmosphäre nach Osten abtransportiert worden sein muss (Erwärmung der Luft vom Boden spielt im Winter vor 9:00 Uhr UTC im untersten Talbereich wegen fehlender Sonneneinstrahlung keine Rolle), um das Vordringen der viel wärmeren Luftmassen (trockenadiabatisch von Patscherkofel auf 500m AMSL gerechnet rund $+4^{\circ}\text{C}$ im Gegensatz zu gemessenen -5°C an der Station LT) bis zum Talboden zu ermöglichen, zeigt Abb. 4.31 nur an der Station BAS Talauswind vor dem Föhndurchbruch.

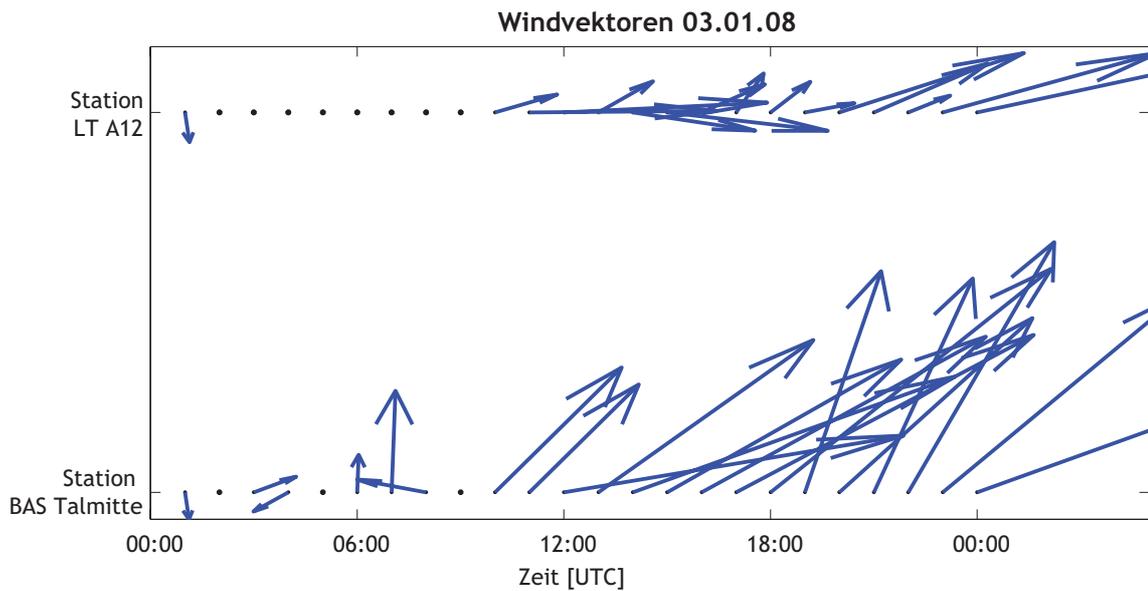


Abbildung 4.31: Stündliche Windvektoren an der Station BAS und LT für den 03.01.08.

Die Abbildung zeigt weiter, dass erstens an der Talsohle höhere Windgeschwindigkeiten als an der Autobahn gemessen, zweitens an beiden Stationen sehr unregelmäßige Winde registriert wurden (in der Überlagerung der Vektoren ersichtlich) und dass drittens sich der Tagesgang des Windes an beiden Stationen wie zu erwarten deutlich vom Mittel ohne Föhn (siehe Abb. 4.8) unterscheidet.

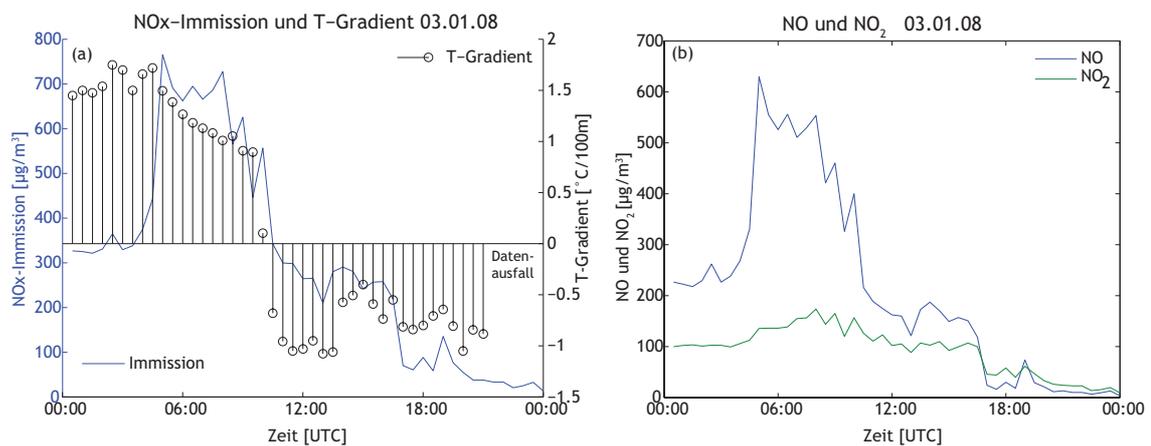


Abbildung 4.32: (a) Vergleich von NO_x-Immission und Temperaturgradient A12 (Station LT) - Vomperberg (Station VB) am 03.01.08. (b) Tagesgang von NO und NO₂ an der Station LT am 03.01.08.

Über den Tagesgang der Immissionen soll Abb. 4.32 Auskunft geben. Grafik (a) zeigt, dass die NO_x-Immission in der Früh zwar den typischen Peak erreicht, anschließend aber trotz der fehlenden Winddrehung auf südliche Richtungen (\Rightarrow Autobahnemission liegt bei westlicher Anströmung nicht stromabwärts!) stark abfällt. Das typische sekundäre

Abendmaximum fällt komplett aus. Der Temperaturgradient zeigt ein ziemlich ähnliches Bild. Sein Maximum, das mit einer sehr stabilen Schichtung einhergeht, erreicht er in den frühen Morgenstunden. Kurz nach Föhndurchbruch erreicht der Gradient sein Minimum und nähert sich anschließend immer wieder dem Wert -1 an.

Somit liegt meist die für Föhnluft laut Definition notwendige trockenadiabatische Durchmischung mit der Höhe vor, die in Verbindung mit dem Wind für eine deutlich Verbesserung der Ausbreitungsbedingungen der Luftschadstoffe sorgt. Sehr interessant ist jedoch, dass die NO_2 im Gegensatz zur NO Konzentration auch nach dem Föhndurchbruch relativ konstant bleibt und erst um 17:00 Uhr UTC gemeinsam mit NO deutlich zurückgeht³⁹, wobei anschließend sogar NO_2/NO Verhältnisse um 1 auftreten.

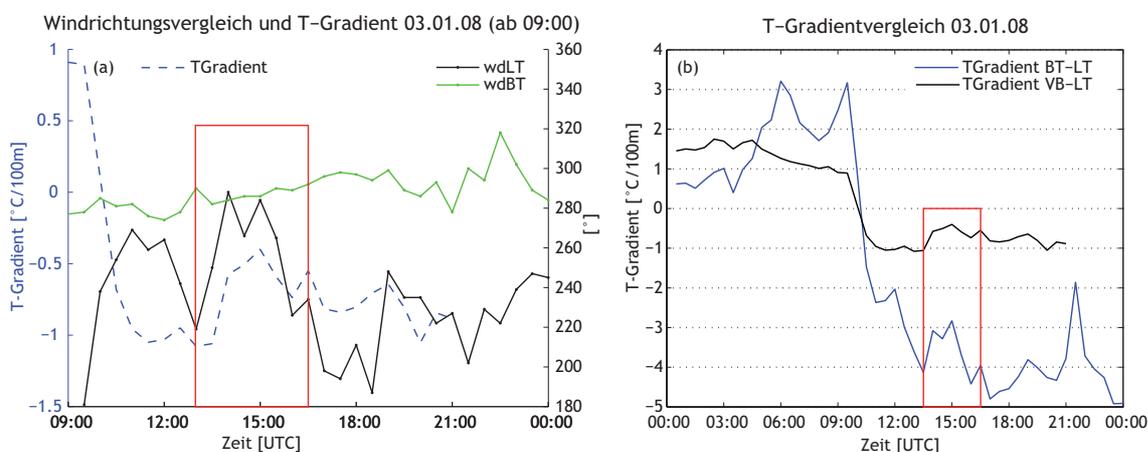


Abbildung 4.33: (a) Temperaturgradient zwischen Station LT und Station VB und Vergleich der Windrichtungen Station LT mit Station BT. (b) Vergleich der Temperaturgradienten A12 (Station LT) - Vomperberg (Station VB) mit A12 (LT) - Bachtal (BT). Unterschiedliche Zeitskala beachten! Berechnungen mit Vomperbergdaten enden wegen eines Datenausfalls um 21:00 Uhr UTC. Die roten Rechtecke umrahmen den besonders interessanten Zeitraum. Erklärungen siehe Text.

Zum Abschluss der Untersuchungen soll ein fast zu übersehendes Detail in Abb. 4.33 diskutiert werden: Und zwar gibt es am Nachmittag des 03.01.08 mehrere Zeichen für ein kurzzeitiges Abheben des Föhns (Winddrehung auf nördlichere Windrichtung, verringerter T-Gradient, unterbrochene Abnahme der Immission). Warum entsteht das vorübergehende Abheben?

Nachdem an der tiefer gelegenen Station BAS der Föhn am Nachmittag nicht unterbrochen wurde, kann ein Unterwandern durch kühlere Taleinwinde (ganz abgesehen davon, ob im Unterinntal und Alpenvorland überhaupt noch Kaltluft vorhanden gewesen wäre) ausgeschlossen werden. Dies würde auch nicht zu den Richtungsvektoren in Abb. 4.31 passen. Im Bereich der A12 weist dieser um 14:00 und 15:00 Uhr UTC aus Westnordwest und somit vom Hang zur Station.

³⁹Auf die Gründe für den unregelmäßigen Rückgang (vor allem bei NO ersichtlich) wird im Anschluss eingegangen

Die Ursache zeigt Abb. 4.33 (a): Im Zeitfenster, das vom roten Rechteck umrahmt wird, erkennt man, dass nach 13:00 Uhr UTC die Windrichtung an der Station LT von Südsüdwest auf Westnordwest dreht und sich somit jener im Bachtal angleicht. Gleichzeitig verringert sich die Temperaturabnahme mit der Höhe um einen halben Grad, sodass (trotz fehlendem Niederschlag) keine trockenadiabatische Durchmischung zwischen A12 und Vomperberg mehr vorliegt. Die Verringerung des negativen Temperaturgradienten VB-LT resultiert dadurch, dass vom Bachtal kühlere Luft zur Station LT vordringen konnte. Das Vordringen selbst war dadurch möglich, dass sich im abgeschirmten Bachtal Kaltluft sammelte oder bildete und der Temperaturgradient BT-LT mit -4°C um ca. 13:30 Uhr UTC ein erstes Minimum erreichte, wie Abb. 4.33 (b) zeigt. Natürlich dürfte auch die Intensität des Föhns (trotz Ausbleibens nennenswerter Variationen an der Station selbst) eine wichtige Rolle spielen, da diese die Stärke der mechanischen Durchmischung zwischen Föhnluft und hangnaher Kaltluft steuert.

Besonderheiten bei weiteren Föhnfällen:

Auch während der Föhnfälle am 11.01.08 und am 01.02.08 zeigt sich, dass am späten Nachmittag kurzzeitig Hangabwinde aus dem Bachtal zur Station LT vordringen konnten und somit ähnliche Phänomene wie am ausführlich diskutierten 03.01.08 auftraten.

Der Föhndurchbruch am 03.02.08 stellt eine weitere Besonderheit dar: Wie Abb. 4.34 (c) und (d) zeigen, ist der Föhn an der Station LT am mittleren Nachmittag durchgebrochen (Gradient LT-VB ca. $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, starker Rückgang der anschließend gleich bleibenden Feuchte, starker Anstieg der Temperatur). Das erstaunliche dabei ist, dass an der nur rund 20m tiefer gelegenen Station BAS zwar höhere Windgeschwindigkeiten registriert wurden, die Feuchte ebenfalls stark zurück ging, aber der Temperaturgradient VB-BAS am Nachmittag sein Vorzeichen wechselt, also bei weitem keine trockenadiabatische Durchmischung mit dem Vomperbergniveau vorliegt. Die Temperaturdifferenz zwischen A12 und Talsohle erreicht in dieser Zeit ihr Maximum mit rund 4°C .

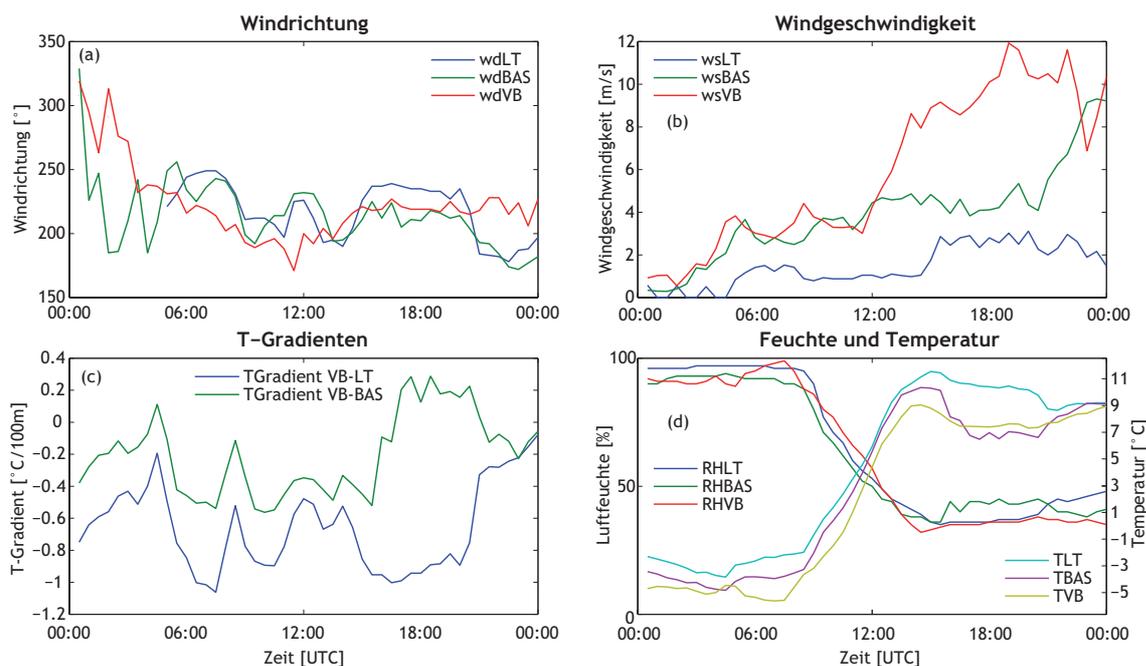


Abbildung 4.34: 03.02.08: (a) Windrichtung und (b) Windgeschwindigkeit an den Stationen BAS (Talsohle), LT (A12, 20m AGL) und VB (Vomperberg, rund 300m AGL). (c) Temperaturgradienten zwischen LT/BAS und VB. (d) Luftfeuchte und Temperatur.

Die Sondersituation setzt sich dadurch fort, dass mit drastisch ansteigender Windgeschwindigkeit an der Talsohle (siehe Abb. 4.34 (b)) zwar der Temperaturgradient VB-BAS leicht negativ wird, jedoch trotz fehlendem Niederschlag den Wert -1 bei weitem nicht erreicht. Obwohl Windimpuls von der Höhe den Talauswind in der Talsohle antreiben muss, weil die Intensität phasenweise mit knapp 10 m/s wesentlich höher als üblich ist (siehe Abb. 4.5), hebt der Föhn in der ersten Nachthälfte auch an der Station LT diesmal ohne Bachtaleinfluss ab (siehe fehlende Winddrehung der Station LT auf 300°Werte in Abb. 4.34 (a)).

Das abschließende Kuriosum stellt der Temperaturanstieg an der Talsohle (ohne direkten Föhneinfluss) in der ersten Nachthälfte dar. Der Blick in die Daten deutet an, dass dieser Temperaturanstieg ohne Einfluss von kurzweiliger Strahlung mit dem leichten Anstieg (ca. 10 W/m^2) der langwelligen Gegenstrahlung (durch Bewölkung oder Temperaturanstieg in Föhnströmung) ab 18:00 Uhr UTC auf 240 W/m^2 um Mitternacht zu tun hat. Dass es im Bereich der Autobahn gleichzeitig zu einem Temperaturrückgang kommt, ist hierzu kein Widerspruch, da es dort zu einem schrittweisen Luftmassenwechsel von Föhnluft zu „Talauswindluft“ (Kaltluft) gekommen ist.

Dass sich eine derart atypische Situation u.a. aus Kontinuitätsgründen (kontinuierlicher Kaltluftnachschiebung für derart intensiven Talauswind nicht gegeben) nicht lange halten kann, zeigen bereits die frühen Morgenstunden des 04.02.08, während denen der Föhn neuerlich zur Station LT und diesmal auch zur Talsohle durchbricht (siehe Abb.4.35).

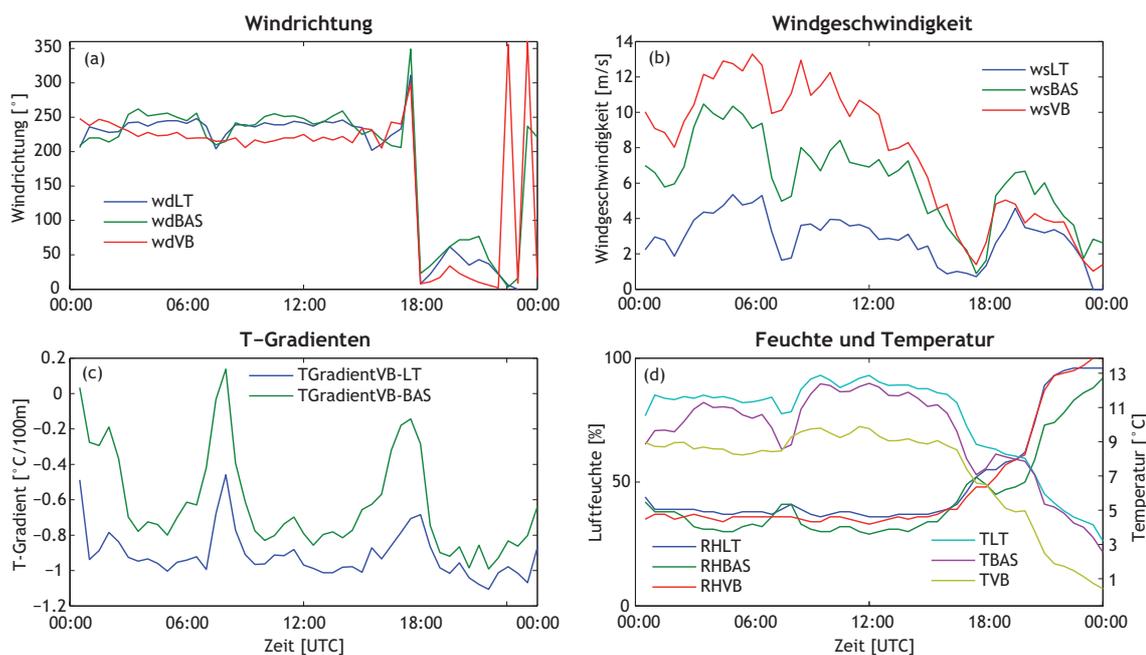


Abbildung 4.35: 04.02.08: (a) Windrichtung und (b) Windgeschwindigkeit an den Stationen BAS (Talsohle), LT (A12, 20m AGL) und VB (Vomperberg, rund 300m AGL). (c) Temperaturgradienten zwischen VB-LT und VB-BAS. (d) Luftfeuchte und Temperatur. Achtung, unterschiedliche y-Achsen im Vergleich zu Abb. 4.34 beachten!

Doch nicht nur die Information über die „Auflösung“ der komplexen Lage rechtfertigt Abb. 4.35. Äußerst interessant stellt sich nämlich auch die Windumkehr ausgelöst durch den (laut Bodenkarten des DWD nur mehr sehr schwachen) Kaltfrontdurchgang am Abend dar. Die erste Besonderheit ist in Abb. 4.35 (c) zu ersehen:

Die auffallendsten Eigenschaften der beiden Kurven sind die zwei Peaks in der Früh und am Abend:

- Ersterer (ca. 08:00 Uhr UTC) deutet ein nochmaliges kurzes Unterwandern der Föhnluft durch sehr flache Kaltluftabflüsse (unterhalb des rund 300 m AGL gelegenen Vomperbergniveaus) aus windgeschützten Tälern inntalauswärts an. Dieses Phänomen ist mit einer leichten Drehung der Windrichtung hin zur tiefsten Stelle⁴⁰ und einem Rückgang der Windgeschwindigkeit verbunden (siehe Abb.4.35(a) und (b)).
- Zweiterer (ca. 17:00 bis 18:00 Uhr UTC) zeigt an, dass unmittelbar vor der Winddrehung die Stabilität kurzzeitig steigt. Außerdem ist trotz Mittelung aller Werte über jeweils 30 Minuten zu erkennen ist, dass ein erster Kaltluftschwall zuerst die Föhnluft an der Talsohle ablöst (siehe Temperaturknick an der Station

⁴⁰Kaltluftflüsse talauswärts folgen stromaufwärts von Schwaz sehr wahrscheinlich dem Innverlauf, wogegen starke Föhnwinde den wenige Dekameter höher gelegenen Schwemmkegel des Vomperbaches nicht um, sondern direkt überströmen und somit eine etwas westlicherer Anströmungsrichtung aufweisen

BAS in Abb. 4.35 (d) kurz vor 18:00 Uhr UTC). Außergewöhnlich geht es weiter: Der folgende, nochmalige Temperaturanstieg an der Talsohle (Station BAS) deutet an, dass es nun zu Durchmischung unterschiedlich temperierter Luftmassen kam, ehe die Advektion neutral geschichteter Kaltluft ab ca. 19:00 Uhr UTC endgültig einsetzte.

Abschließend sei aus meteorologischer Sicht zu diesem Tag erwähnt, dass er ein eindrucksvolles Beispiel für den Wechsel zwischen zwei völlig unterschiedlichen Windsystemen darstellt: Zum einen die milde Föhnströmung, deren Geschwindigkeit in der Talatmosphäre mit der Höhe zunimmt, zum anderen das Kaltlufteinfließen, das seine größte Intensität nicht am Vomperberg, sondern an der Talsohle erreicht (siehe Abb.4.35 (b)). Gemeinsam ist beiden das Fehlen einer stabilen Schichtung oder gar Inversion (siehe Abb.4.35 (c)).

Wie sich ein derartiger Regimewechsel auf die Schadstoffbelastung der Luft auswirkt, zeigt Abb. 4.36. Deutlich ist zu erkennen, wie durch das vorübergehende Absinken der Windgeschwindigkeit vor der Drehung (siehe 4.35 (a) und (b)) bei gleichzeitig hoher Emission die Immission sprunghaft ansteigt und anschließend mit den auflebenden Winden wieder abfällt. Dass in der ersten Nachthälfte trotz geringerer Windgeschwindigkeiten als am Nachmittag noch kleinere Immissionen gemessen werden, hängt mit der verringerten Emission zusammen.

Wie der Abfall der Immission kurz vor der Drehung und das Überschießen nach unten nach der Drehung zu erklären sind, ist unklar. Möglicherweise zeichnen sich diese Übergangsphasen zwischen zwei Windregimen durch besonders intensive Turbulenz (\Rightarrow überdurchschnittlicher Vertikalaustausch) aus.

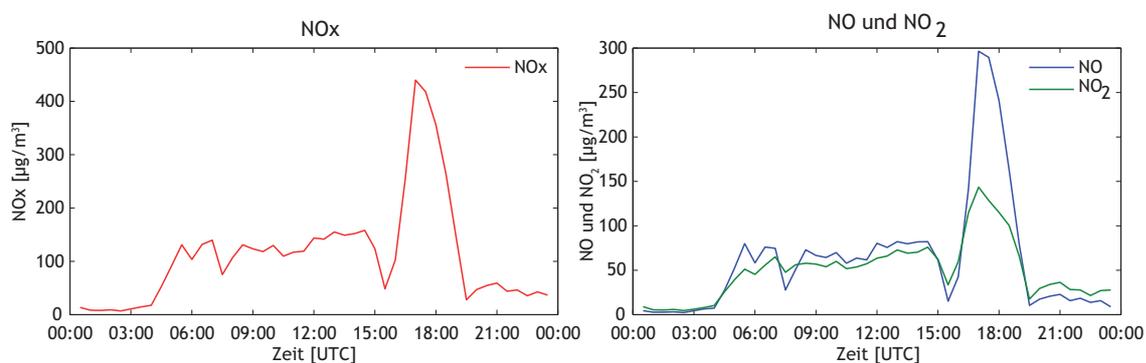


Abbildung 4.36: 04.02.08 Station LT: (a) NO_x-Immission Station LT und (b) Aufspaltung in NO und NO₂

Allgemeine Schlussfolgerungen aus Föhnfallstudien:

Die Detailuntersuchungen von Zeiträumen mit Föhndurchbrüchen im Inntal im Raum

Schwaz haben gezeigt, dass auch an Föhntagen bereits von kleinen, aber windabgeschirmten Seitentälern (im konkreten Fall des Bachtals) Einflüsse vorliegen.

Diese Seitentäler stehen als Kaltluftlieferanten auch in direktem Zusammenhang mit größeren Kaltluftströmen entlang der Talsohle des Inntales, welche hauptsächlich Nachts in der Lage sind, die Föhnluft im gesamten Talquerschnitt vom Boden abzuheben.

Die dadurch in der unteren Talatmosphäre entstehenden, kleinskalig sehr komplexen meteorologischen Situationen führen in Kombination mit der bereits diskutierten Atmosphärenchemie zwar nicht dazu, dass die übliche Assoziation von Föhn und „sauberer“ Luft im Winter⁴¹ zu verwerfen ist, dass jedoch während kurzer Zeiträume an bestimmten Orten durchaus überdurchschnittlich hohe Schadstoffkonzentrationen (speziell hinsichtlich NO_2) gemessen werden können.

⁴¹Im Sommer kam es in der Vergangenheit zu Advektion von ozonbelasteten Luftmassen aus Süden (Seibert et al. 2000)

4.3.4.3 Detailuntersuchung Kaltfrontdurchgang 22.01.08

Der mittägliche Peak der NO_x -Immission in Abb. 4.37 (a) zeigt nochmals, wieso der 22.01.08 im Rahmen einer Fallstudie detailliert diskutiert wird. Meteorologisch gesehen kam es um die Mittagszeit zu einem Kaltfrontdurchgang aus Nordwesten (mit nachfolgenden Schauern), der eine relativ milde, gradientschwache Wetterlage beendete.

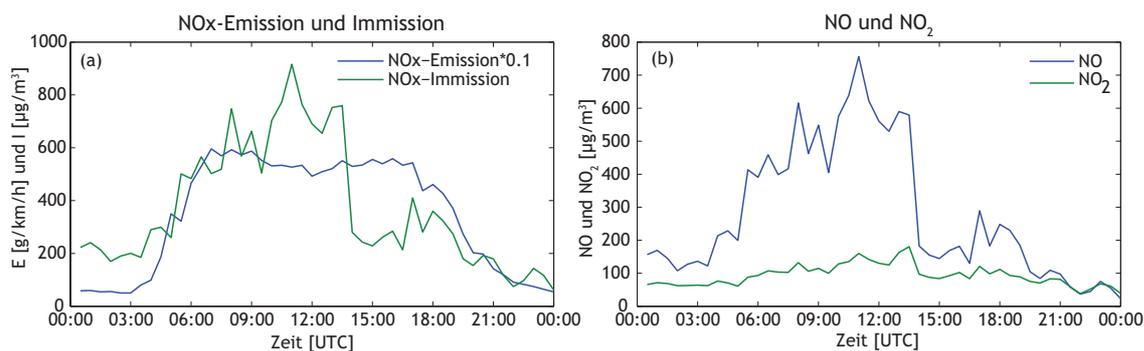


Abbildung 4.37: 22.01.08 Station LT: (a) NO_x -Emission mit Faktor 0.1 multipliziert und NO_x -Immission und (b) Aufspaltung in NO und NO_2

Abb.4.38 gibt einen Überblick über die Entwicklung wichtiger Atmosphärengrößen an diesem Tag. Dabei ist in (a) zu erkennen, dass die Kaltfront den Raum Schwaz um ca. 14:00 Uhr UTC erreicht und der Wind von Ausfließen auf Einfließen gedreht hat. Gleichzeitig setzt an den tiefen Stationen (BAS und LT) ein kontinuierlicher Temperaturrückgang ein. Am Vomperberg (VB) hat dieser bereits früher begonnen, weil typische präfrontale Föhneffekte zu verzeichnen waren, worauf der abrupte Temperaturanstieg ab 06:00 Uhr UTC und die im Vergleich zum Tal reduzierte Luftfeuchte hinweisen. Kurz vor dem Kaltfrontdurchgang um ca. 11:00 Uhr UTC hob der Föhn scheinbar ab oder schief ein und führte zu einem ersten Absinken der Temperatur um rund 2°C . Mit diesem Temperaturrückgang in der Höhe wechselte auch der Temperaturgradient in Abb.4.38 (c) sein Vorzeichen und die bodennahe Inversion löste sich auf.

Unmittelbar nach der Winddrehung wurde eine annähernd trockenadiabatische Temperaturabnahme registriert, die sich erst im Laufe der Nacht sehr langsam der Feuchtadiabate ($-0.5^\circ\text{C}/100\text{m}$) annäherte.

Weiter sehr interessant sind die überdurchschnittlich hohen Windgeschwindigkeiten zwischen 14:00 und 17:00 Uhr UTC, die dazu führten, dass an allen Stationen sehr ähnliche Windrichtungen aufgezeichnet wurden (siehe Abb.4.38 (a) und (b)). Der anschließende Rückgang der Intensität führte zu einem Einsetzen von ausgeprägten kleinräumigen Ablenkungs- und Beeinflussungseffekten an allen Stationen.

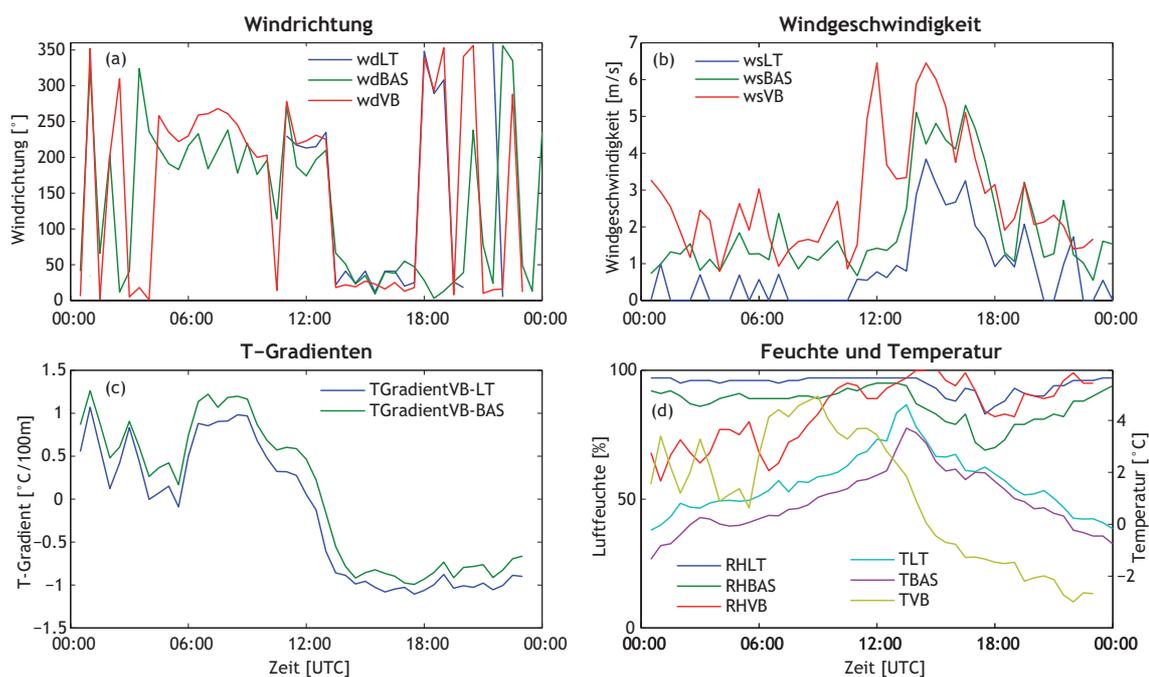


Abbildung 4.38: 04.02.08: (a) Windrichtung und (b) Windgeschwindigkeit an den Stationen BAS (Talsole), LT (A12, 20m AGL) und VB (Vomperberg, rund 300m AGL). (c) Temperaturgradienten zwischen VB-LT und VB-BAS. (d) Luftfeuchte und Temperatur.

Alle bisher aufgezählten Phänomene liefern aber noch keinen Anhaltspunkt, warum kurz vor Mittag die höchsten Schadstoffimmissionen gemessen wurden. Bei sehr genauer Betrachtung der Kurven in Abb. 4.37 (a) und 4.38 (b) ist zu erkennen, dass der NO_x -Immissionspeak zeitgleich mit der Beendigung einer längeren Calme an der Station LT auftrat.

Typischer Weise führt im Gegensatz dazu ein Aufleben des Windes am Vormittag an der Station LT zu einem deutlichen Rückgang der Immission. In diesem Fall wird jedoch nicht die typische südliche Windrichtung gemessen (siehe Abb. 4.38 (a)), sondern eine westliche Anströmung, bei der die Autobahnemission als Linienquelle fungiert. Vermutlich werden durch das Einsetzen der schwachen Winde stark NO angereicherte Luftpakete zur Station advehiert, die zum sprunghaften Anstieg der Konzentration ohne nennenswerte Änderung der Emission führen.

Auf den Punkt gebracht ist die während der Messphase höchst außergewöhnliche Tageszeit eines Immissionspeaks also Resultat einer höchst außergewöhnlichen Windkombination (Talauswindphase folgt Calme). Diese Windkombination wiederum ist deshalb so außergewöhnlich, weil sie zwar lokal erzeugt wird (Abschirmung der synoptischen Winde durch Gebirge, von der freien Atmosphäre entkoppelte Luftmasseneigenschaften in der Talatmosphäre), ihre Eigenschaften jedoch vom überlagerten, aktiven und individuellen synoptischen Geschehen (Wiederholungswahrscheinlichkeit extrem gering) und nicht aus typischen, häufig wiederkehrenden Antriebsmechanismen des Berg-, Tal- und Hangwindregimes bestimmt werden.

Kapitel 5

Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel wird unter Einbeziehung früherer Arbeiten versucht, heraus zu arbeiten, welche Erkenntnisse im Rahmen dieser Arbeit Bekanntes bestätigen oder neu sind. Ein kurzer Ausblick auf mögliche zukünftige Messungen bzw. Modellierungen zur Beantwortung offener Fragen wird ebenso gegeben.

5.1 Bekannte und neue Erkenntnisse

Windsysteme im Raum Schwaz

Im Zuge der klimatologischen Messdatenanalyse konnte gezeigt werden, dass der Winter 2007/2008 im Messzeitraum von 01.12.07 bis 29.02.08 überdurchschnittlich mild und trocken verlief. Zudem gab es weniger als 10 Tage mit Schneebedeckung. Es ist zu erwarten, dass der „Charakter“ des Winters (mild/kalt, trocken/feucht, schneearm/-reich) die weiteren Auswertungsergebnisse deutlich beeinflusst.

Hinsichtlich der auftretenden Winde konnte im Raum Schwaz gezeigt werden, dass an allen Messpunkten nicht nur regelmäßige Windzirkulationen entlang der Talachse existieren, sondern auch Windbewegungen entlang des Talquerschnittes. Je näher die Messstation an der Talflanke liegt, desto häufiger sind Querwindeinflüsse. Es ist zu erwarten, dass Querzirkulationen an den Stationen zu bestimmten Zeiten zusammenhängen (siehe Abb. 4.14) und somit einen Scale in der Größenordnung des Talquerschnitts erreichen. Im Bereich der Talmitte sind die Querzirkulationen am seltensten zu beobachten, weil dort Talwinde für Überlagerung sorgen. Hier werden Hangwinde in leichten Ablenkungen der talparallelen Windrichtung erkennbar.

Talwinde überlagern Hangwinde aber nicht immer, da bspw. Hangabwinde kältere und somit schwere Luft als Taleinwinde transportieren und so bodennah die Talwindzirkulation unterwandern können (siehe z.B. Abb. 4.9). Selbst während Föhnfällen konnten vorübergehende Kaltluftvorstöße aus einem sehr kleinen Seitental (Bachtal) zur im Inntal gelegenen Station LT beobachtet werden (vgl. Abb. 4.33).

In der Folge zeigte sich, dass an dieser Station zu gewissen Tageszeiten (13:00 Uhr UTC; 16:00 Uhr UTC) die Querwinde mindestens gleich häufig wie Talwinde sind (vgl. Abb. 4.7).

Bezüglich der Windgeschwindigkeit konnte prinzipiell bestätigt werden, dass Winde mit der Höhe an Intensität gewinnen (vgl. Tabelle 4.5). Neu ist jedoch, dass es im Raum Schwaz im Bereich der Talsohle große horizontale Gradienten in der mittleren Windgeschwindigkeit gibt. So wurde während rund 35% des Messzeitraums (91 Tage) an der Station LT Windstille¹ beobachtet. Dies ist deutlich mehr als Thudium and Kocsis (2000), S.21 für den Winter 1997/98 (in diesem Falle inklusive November) berechnet haben. Der Grund liegt hierbei nach Rücksprache mit den Autoren in unterschiedlich definierten Calmen.

Außerdem zeigte sich, dass sämtliche beobachtete Windarten (ohne Calmen) im Mittel an der 25m höher gelegenen Station LT mit geringerer Intensität als an der Station BAS in Talmitte auftreten. Winde aus westlichen Richtungen sind sogar deutlich schwächer. Die vorgelagerte Autobahnüberführung kann dafür nicht allein verantwortlich sein. Vielmehr stellte sich heraus, dass erstens das in Talmitte vorgelagerte und stromaufwärts gelegene Vomperbergplateau diese Winde zum Teil abschirmt und dass zweitens die leichte Kurve in der Talachse des Inntals im Messgebiet dazu führt, dass die Intensität von westlichen Winden in Richtung der südlichen Talflanke (Prallhang) zunimmt.

In einer Detailanalyse konnte die Theorie von Vergeiner (1983), S.59, dass es durch die Labilisierung der Luftmassen in der Talatmosphäre am Vormittag zu einer Intensivierung der Talauswinde komme, weil Windimpuls aus höheren Schichten nach unten gemischt wird, bestätigt werden (vgl. Abb. 4.8).

Ebenso konnte bestätigt werden, dass typische Temperatur- und Drucktageswellen die regionalskaligen Talwinde antreiben, kleinräumige Temperaturunterschiede die Talquer- und Hangwindzirkulationen (siehe z.B. Abb. 4.20).

Kleinskalige Winde und Schadstoffkonzentration Bereich A12 Vomp

Hinsichtlich Immission konnten die Ergebnisse früherer Arbeiten, dass die typische Spitze am Morgen ihre Ursache in hoher Emission bei gleichzeitig niedriger Windgeschwindigkeit habe, bestätigt werden (Thudium and Kocsis 2000; Schnitzhofer 2005).

Die Berechnung des tageszeitlichen Auftretens von Windarten an der Station LT (siehe 4.7, rechts oben) und die nachfolgenden Untersuchungen liefern bekannte und neue Erkenntnisse. Ein Vergleich mit der Arbeit von Thudium and Kocsis (2000), S.21, Abb.4.3 links, Winter ergibt eindeutige Parallelen. So traten auch im Winter 1997/98 im Tagesverlauf ähnliche Häufigkeitsmuster auf. Im Gegensatz dazu treten zu den Ergebnissen von Thudium et al. (2001), S.18, Abb.3.3 links, Winter Unterschiede bei Talein- und nördlichen Querwinden auf. Der Grund ist hier in der unterschiedlichen Klassifizierung zu sehen. So würden nach der Klassifizierung von Thudium et al. (2001) im Winter 2007/08 fast alle Taleinwindfälle im Talquernordwest-Sektor (280° bis 40°) stecken (vgl. auch Abb.

¹definitionsgemäß $v < 0.5\text{m/s}$

4.6). Dem Sektor der südlichen Querwinde (100° bis 220°) würde ein beachtlicher Teil der Talauswinde zugerechnet. Dies erklärt vermutlich den Umstand, warum im Gegensatz in dieser Arbeit in der Nacht keine nennenswerte Häufigkeit südlicher Querwinde auftritt. Dabei stehen diese Querwinde nicht mit dem Vomperloch, sondern mit dem sehr viel kleineren, aber in direkter Falllinie zur Station gelegenen Bachtal in Verbindung (siehe bspw. Abb. 4.20). Außerdem ist im Untersuchungszeitraum die einzige plausible Erklärung für die südlichen Querwinde in der Erwärmung der hangnahen Luft im Bereich und oberhalb der Station LT zu finden (Ansaugwirkung Bachtal). Dass großräumige Südströmungen am Vormittag an der Station LT als Südwind gemessen werden könnten, kann ausgeschlossen werden (Begründung siehe Punkt 4.2.4.2).

Abgesehen von Antrieb und Häufigkeit der Querwinde im Bereich der Station LT stellte sich im Rahmen der Untersuchungen heraus, dass diese Einfluss auf den Verlauf der NOx Immission an der Station haben (siehe Punkt 4.3.3.5). Nicht genau bekannt ist, welchen Anteil dabei die Veränderungen in der Position Quelle (Emission A12) - Messung (Station LT) bzw. Veränderungen der Ausbreitungsbedingungen für die Emission (vor allem von A12) haben. Der Haupteffekt dürfte aber durch zweiten Prozess verursacht werden. Sehr wahrscheinlich ist, dass für den Immissionsverlauf unter Tags im Bereich der Station LT an strahlungsreichen Wintertagen der horizontale Temperaturgradient Hang-Talmitte (\Rightarrow Hangwinde) wichtig ist (siehe u.a. Abb. 4.25).

Allgemein kann der Schluss gezogen werden, dass die Station LT im Winter häufig in einem komplexen Windfeld liegt, wie es in Alpentälern aufgrund der komplexen Topographie typisch ist.

Wegen des variierenden Windfeldes und der damit verbundenen unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen bietet sich in Vomp eine statistische Auswertung verschiedenster Parameter je Windart an. Allgemein ist bei allen Interpretationen Vorsicht geboten und von aufwendigen Untersuchungen der Schadstoffthematik ohne Einbeziehung jeglicher Meteorologie abzuraten.

Festgehalten werden kann weiter, dass die Station im Bereich Vomp lokal auf jener Seite der Autobahn steht, auf der im Mittel höhere Immissionen zu erwarten sind und an die die größten Siedlungsräume angrenzen.

Abschließend gibt eine einfache Skizze einen Überblick, warum und wann die Querwinde typischer Weise entstehen und sich auf die Verbreitung der Emission durch den Wind auswirken. Natürlich ist die Abbildung stark vereinfacht. Man darf keinesfalls annehmen, dass sich die Emission der Autobahn in der Realität nur auf einer Seite ausbreitet. Komplexe Zirkulationen unterhalb der Mischungsschicht sorgen für Verteilungen im gesamten Talquerschnitt (weitere Informationen siehe Gohm et al. 2009).

Jedenfalls erstaunlich ist, welchen großen Einfluss ein nur sehr kleines Seitental wie das Bachtal auf die angrenzenden Gebiete im Inntal ausüben kann!

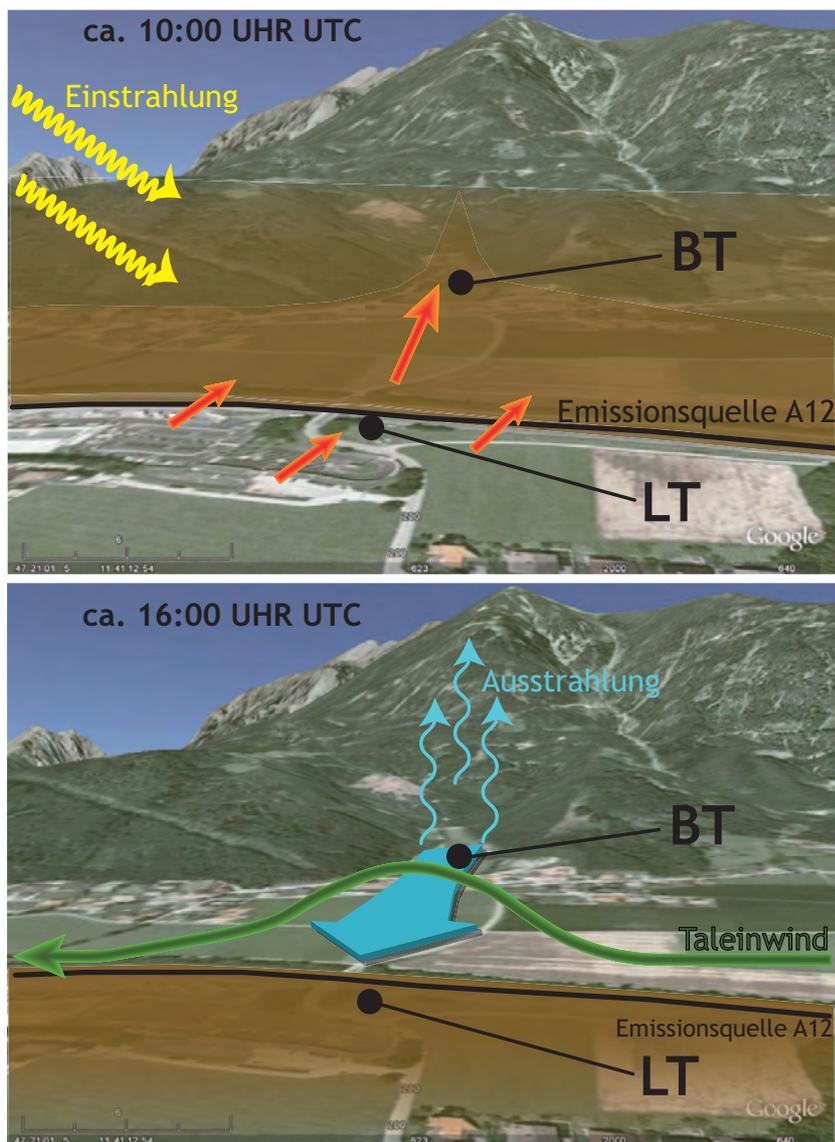


Abbildung 5.1: Vereinfachte Skizze der Winde und der stark vereinfachten Ausbreitung der Emission wie sie im Umfeld der Station LT im Winter 2007/08 an strahlungsreichen Tagen typisch waren.

5.2 Ausblick

Zukünftige Intensivmessphasen und/oder Modellierung

Messungen

Im Zuge der Auswertungen hat sich gezeigt, dass Hangwindzirkulationen zumindest in einem schneearmen Winter tagsüber bei entsprechend „strahlungsintensiver“ Witterung einen stärkeren Einfluss auf die Immissionsmessung an der A12 in Vomp haben als regional erzeugte Talwinde. Mit dem verfügbaren Datenmaterial ist es nicht uneingeschränkt möglich, abzuklären, ob Hangwinde die Immissionsmessung rein durch unterschiedlich starke mechanische und thermische Turbulenz (\Rightarrow unterschiedliche Ausbreitungsbedin-

gungen für Luftschadstoffe), beeinflussen.

Ebenso ist unklar, welcher Anteil der bergwärts transportierten Emissionen von Hangabwinden wieder ins Tal befördert wird. Um diese beiden Fragen abzuklären, müsste eine hochaufgelöste Messung der Stickoxidkonzentration durchgeführt werden, weil eine alleinige Feinstaubmessung wegen der viel stärkeren Abhängigkeit von lokalen Quellen trotz der eindeutigen Ergebnisse in dieser Arbeit nicht ausreicht. Außerdem sind es gerade die Stickoxide, die hinsichtlich Luftgüte in Vomp seit Jahren Probleme darstellen (Weber et al. 2009, S.25ff.).

Trotz der guten Eignung des Messpunktes Kapelle und der bereits vorhandenen Messung im Bereich Vomp An der Leiten hat die Überlegung, eine zweite vorübergehende hochaufgelöste NO_x-Messung inklusive Wetterstation in den Feldern direkt unterhalb der Raststätte zu installieren, ihre Berechtigung, da man mit dem Messtrio Bachtal-A12-Schützenweg in direkter Falllinie des Hanges eine Messung bei, nördlich und südlich der Hauptemissionsquelle hätte. Die Relevanz der daraus möglichen Untersuchungen ergibt sich dadurch, dass die Gemeinde Vomp von der Autobahn durchschnitten wird und folglich Informationen erhoben werden könnten, wann welche Siedlungsbereiche typischer Weise besonders stark belastet sind (z.B. Orte nördlich der Autobahn bei Sonnenschein am Vormittag, Orte südlich der Autobahn während wolkenarmer Tage am Nachmittag und Abend,...).

Trotz der durch die Klimaänderung zu erwartenden Abnahme von Tagen mit Schneebedeckung im Inntal wäre es natürlich interessant, das Hangwindregime inklusive der damit verbundenen Transporte auch in einem schneereicheren Winter zu messen, um feststellen zu können, wie stark schneebedeckte Hänge (und Wälder) die in diesem Winter typischen Prozesse abwandeln können. Erkenntnisse hierzu liefern bereits Modellergebnisse (Schneebedeckung \Rightarrow hohe Albedo \Rightarrow ausbleibende Hangaufwinde) von Lehner (2008), die evaluiert werden könnten.

Ein weiterer Aspekt, der wenn möglich in zukünftigen Untersuchungen unbedingt berücksichtigt werden sollte, ist die Erhebung von vertikalen Temperaturprofilen im Bereich der Talmitte. Messungen entlang der Hänge reichen nämlich nur bedingt aus, um Aussagen über die Stabilität zu treffen und gar nicht, um die Antriebsmechanismen von Hangabwinden zu zeigen, weil letztere von den unterschiedlichen Temperaturen zwischen Hang und Talmitte in gleicher Höhe „leben“. Wünschenswert wären mindestens zwei Vertikalsondierungen pro Tag, die erste um ca. 10:00 Uhr UTC, die zweite um ca. 16:00 Uhr UTC.

Modellierungen

Wie sich im Rahmen dieser Arbeit gezeigt hat (u.a. Punkt 4.2.2 oder Punkt 4.2.4.3), variieren meteorologische Parameter (Temperatur, Wind, Strahlung,...) in der Umgebung der A12 in Vomp sehr stark. Deshalb scheint es selbst mit einer sehr aufwendigen (zeitlich

wie finanziell) Einrichtung von zusätzlichen Messstandorten nicht möglich zu sein, räumlich hochaufgelöste Informationen über die Verteilung und Ausbreitung der Emission im Tagesverlauf zu erhalten. Hierzu scheint die bessere Lösung die Verwendung eines geeigneten diagnostischen Schadstoffausbreitungsmodells zu sein, das mit kleinräumigen, an wichtigen Punkten gemessenen meteorologischen Daten (vor allem Wind; Bereich Station LT, Station BT, Station KAP, Bereich Kloster Fiecht, Bereich Schützenweg unterhalb der Raststation A12 Vomp,...) betrieben wird und mit schadstoffbezogenen Punktmessungen an den selben Standorten überprüft werden könnte.

Die Notwendigkeit einer hochaufgelösten räumlichen Information über die Schadstoffverteilung ist wieder mit den beidseits der A12 eng angrenzenden Siedlungen zu begründen. Es wäre also zur Erhebung möglicher Gesundheitsrisiken für die betroffene Bevölkerung sehr wichtig zu wissen, wann Luftschadstoffe von der Autobahn in die Wohngebiete transportiert werden und wie hoch die Konzentrationen ausfallen.

Schwierigkeiten bei der Modellierung könnten dann entstehen, wenn nur die Station LT zur Evaluierung herangezogen wird, da es in einem Modell, dessen Domain sich über den unmittelbaren Standort der Station hinaus erstreckt, unmöglich ist, das extrem komplexe Windfeld (wegen umgebender Objekte, Topographie und Verkehr) im Umkreis von 10m um die Station LT aufzulösen. Dieses turbulente Windfeld bewirkt aber in Kombination mit der unmittelbaren Nähe zur Emissionsquelle starke Schwankungen in der Immissionsmessung, die sich zwar im Mittel ausgleichen, aber einen Vergleich Modell-Messung zu bestimmten Zeitpunkten schwierig machen könnten.

Erweiterung des permanenten Messnetzes

Im Zuge der Spezialuntersuchungen der Schadstoffsituation im Bereich der Station LT hat sich der Umfang des vorhandene Datenmaterials als sehr hilfreich erwiesen.

Eine interessante Ergänzung der NO_x-Messungen wäre jedoch die Installation von Zusatzmesspunkten an der Brücke oberhalb der Autobahn und auf der der Station gegenüberliegenden Seite. Ob diese Maßnahmen mit vernünftigen Aufwand realisiert werden könnten, müsste abgeklärt werden. Jedenfalls hätte man ganzjährig völlig neue und einzigartige Möglichkeiten zur Untersuchung der Ausbreitung der Autobahnemissionen und könnte zwischen Einflüssen, die aus der Anströmrichtung resultieren und jenen, die veränderte Ausbreitungsbedingungen für Luftschadstoffen anzeigen, genauer unterscheiden.

Hinsichtlich der meteorologischen Messungen an der Station würde sich die Installation eines Drucksensors anbieten, da diese mit geringem Aufwand zur realisierende Maßnahme die Untersuchung zweier Standardgrößen (p , Θ) ermöglichen würde, die zum Verstehen von Prozessen nötig sind (z.B. Wechselwirkung Stabilität und Hangwinde).

Anhang A

Ergänzende Informationen, Abbildungen und Tabellen

A.1 Erfahrungen und Probleme mit Messstandorten

Überblick für alle Standorte

Nach Durchsicht und intensiver Bearbeitung der Messwerte, die an den verschiedenen Standorten gemessen wurden, können nun Aussagen über deren Eignung in Kombination mit dem gewählten Messgerät getroffen werden, damit für mögliche zukünftige Messkampagnen in der Region eine brauchbare Entscheidungshilfe für den Geräteaufbau vorliegt. Natürlich ist zu beachten, dass über AWS Standorte mehr ausgesagt werden kann als über alleinige Hobomesspunkte. Zudem ist zu berücksichtigen, dass vor allem die im Rahmen dieser Arbeit schwerpunktmäßig untersuchten Daten (Wind, Temperatur, Schadstoffe) als Grundlage für die Aussagen herangezogen werden.

Die folgende Beschreibung orientiert sich an den in Tabelle 3.1 aufgelisteten Orten:

Arzberg2: Dieser Standort ist für Hobomessungen ideal, da im Winter keine direkte Sonneneinstrahlung auftritt, die Durchlüftung jedoch gleichzeitig gegeben ist und zusätzlich keine intensiven lokalen Kaltluftflüsse aufgrund von Bewaldung oberhalb der Station auftreten können.

Arzberg1: Dieser Standort ist für Hobomessung an kurzweilig strahlungsreichen Tagen problematisch, da ab Januar an den Nachmittagen zunehmend flache Sonnenstrahlung eintrifft, die mglw. in den Strahlungsschutz eindringen kann. Es wäre sinnvoll, die Messung einige Meter nach Osten an den Waldrand zu verlegen und den Sensor an die Nordseite eines Baumes zu montieren, um einen übergeordneten Strahlungsschutz zu schaffen. Keine Probleme durch Vandalismus.

Pirchanger: Keine erkennbaren Probleme bei der Messung. Möglicherweise liegt der

Standort in einer kleinräumig topographisch bedingten „Kältezone“. Mehrmals Probleme durch Vandalismus.

Innhöfe: Keine Probleme durch Vandalismus. Weitere Aussagen aufgrund eines technischen Defektes des Hobosensors nicht möglich.

Schwaz West: Der Standort scheint ideal zur Erfassung der Schichtung in den ersten Metern oberhalb der Talsohle. Die auftretenden südlichen Querwinde stören dabei nicht, weil diese keine kleinräumige Besonderheit darstellen, sondern im Bereich Schwaz aufgrund der Enge des Tales selbst in Talmitte zeitweise mit Einflüssen der Hangwindzirkulationen zu rechnen ist. Probleme mit Vandalismus traten nicht auf.

Schützenweg: Bezüglich der Messungen traten keine Probleme auf. Aufgrund der geringen Unterschiede von Temperatur und Luftfeuchte zur Messung im Bereich der Station LT stellt sich aber die Frage der Notwendigkeit der Messung an diesem Punkt. Diese könnte sofort mit Ja beantwortet werden, wenn sie um eine Windmessung ergänzt würde, da dann direkt am Hangfuß weitere Informationen über die vor allem für Schadstofffragen entscheidenden Quercirkulationen relativ zur Autobahn ermittelt werden könnten.

Raststätte A12 Vomp: Zunächst ist nochmals zu erwähnen, dass dieser Messstandort bereits im Jahr 1997 eingerichtet wurde. Hinsichtlich der Schadstoffmessungen ergeben sich aufgrund der unmittelbaren Nähe zur Autobahn in Kombination mit den unter Auflagen verfügbaren, berechneten Emissionen sehr interessante und vielfältige Untersuchungsmöglichkeiten. Bezüglich Meteorologie ist der Standort hinsichtlich Wind mit Vorsicht zu bearbeiten, da die nur wenige Meter westlich gelegene Autobahnüberführung Westwinde beeinflussen kann. Ebenso müssen Nordwinde sowohl einen Baumstreifen als auch die Autobahn inklusive Lärmschutzwand in Fahrbahnmitte überqueren und könnten dabei geschwächt werden. Vermutlich ist der Einfluss in Zeiten mit vollem Blattbestand noch intensiver. Die restlichen zwei Windrichtungen können unbeeinflusst von lokalen Störungen zur Station vordringen. Probleme mit Vandalismus traten nicht bei der Station selbst, aber beim unmittelbar oberhalb der Autobahn situierten DOAS auf.

Vomp West: Über diesen Standort kann keine spezifische Aussage getroffen werden, da der Hobosensor im Zuge eines Vandalenaktes zerstört wurde. Allgemein könnte die intensive Besonnung des Standortes die Messung mit Hobosensoren erschweren. Eine Einrichtung einer AWS erscheint jedoch interessant, da auf den umgebenden Feldern Winde nicht lokal gestört werden und aufgrund der etwas erhöhten Lage am Schuttkegel des Vomperbaches interessante Vergleiche mit der Talsohle möglich wären.

Bachtal: Das Bachtal ist, wie sich herausgestellt hat, ein idealer Standort zur Erfassung

der Hangwinde allgemein und im speziellen jener, die (wie im Zuge der Auswertungen bestätigt werden konnte) die Station LT beeinflussen. In weiterer Folge ist auch die Untersuchung von Schadstofftransporten durch die Winde mit hochauflösenden Messgeräten empfehlenswert, was durch die gute lokale Infrastruktur (Straßenanschluss, Strom) erleichtert wird. Probleme mit Vandalismus blieben aus.

Kapelle: Indizien, die aus unsicheren Messungen (Gerätefehler) gewonnen wurden, deuten an, dass an diesem Standort starke Variationen in der Schadstoffbelastung auftreten und es sich somit um einen idealen Messort handelt. Allerdings ist unbedingt zu beachten, die Windmessung nicht zu nahe an die Kapelle zu legen, da die Messungen sonst (wie im nächsten Unterpunkt gezeigt) aufgrund ausgeprägter lokaler Wirbel vor allem bei höheren Windgeschwindigkeiten unbrauchbar sind.

Vomberberg: Der Messstandort Vomperberg eignet sich aufgrund seiner sehr freien Lage auf einem Hügel am Plateau sehr gut zur Erfassung von Wind und Temperatur rund 300m über Grund. Einzig auf Ablenkungseffekte bei Nordostanströmungen muss geachtet werden. Hinsichtlich Strahlungsmessung ist der Einfluss eines nahen Baumes zu beachten. Probleme mit Vandalismus traten nicht auf.

Vomperberg2: VB2 hat sich als idealer Hobostandort erwiesen, weil den Hobomessungen trotz Lage am Sonnenhang aufgrund von lokaler, übergeordneter Abschattung durch eine Baumgruppe, zu vertrauen ist.

An der Leiten: Dieser Standort ist aufgrund seiner Lage mitten in besiedeltem Gebiet interessant. Leider gibt es jedoch nur Schadstoffmessungen ohne Informationen über die kleinräumige Meteorologie für Detailuntersuchungen.

Ein Messstandort östlich von Schwaz wurde im Rahmen der Arbeit bisher nicht erwähnt, weil innerhalb der ersten 2 Wochen beide installierten Messgeräte (Hobosensor, Passivsammler) entwendet wurden und die Messungen daher eingestellt werden mussten. Am Ostrand von Schwaz sollte daher bei zukünftigen Messungen darauf geachtet werden, dass die Nähe zu viel begangenen Spazierwegen gemieden wird.

Windmessproblem Kapelle

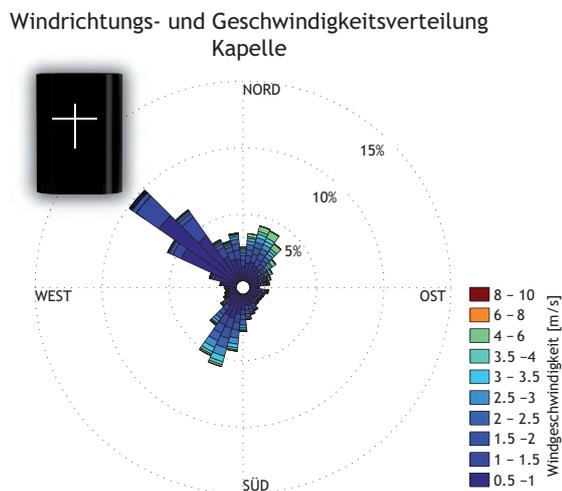


Abbildung A.1: Windrichtungs- und Geschwindigkeitsverteilung am Messpunkt KAP (Symbol im Nordwestsektor).

Abb. A.1 zeigt, dass die Windmessung am Standort KAP fehlerbehaftet sein muss. Mit auf das Fachgebiet Meteorologie beschränkten Untersuchungsmethoden kann nämlich nicht davon ausgegangen werden, dass während des Untersuchungszeitraumes am häufigsten der heilige Geist durch die verschlossene Kapellentür geweht hätte (entspreche der nordwestlichen Anströmrichtung).

Vielmehr konnte bei Lokalaugenschein vor Ort während der gesamten Messperiode (Beginn Kapelle erst am 03.01.08) immer wieder ein rotierender Windrichtungsgeber beobachtet werden¹. Nach überblicksmäßigen Untersuchungen kann weder davon ausgegangen werden, dass der Rotationseffekt nur bei wenigen Anströmrichtungen auftritt noch nur bei hohen Windgeschwindigkeiten. In der Realität treten also zumindest innerhalb weniger als 10m Abstand zur Kapelle häufige Einflüsse durch Wirbelbildung durch das relativ hohe Objekt (eventuell auch durch die umgebende Topographie) auf. Diese können bereits in den Rohdaten durch willkürlich springende Windrichtungen innerhalb von Minutenintervallen beobachtet werden und erscheinen nicht korrigierbar, ohne einen großen Datenverlust in Kauf zu nehmen, der wiederum eine Einschätzung der typischen Windrichtungen am Standort unmöglich machen würde.

Im Rahmen von zukünftigen Untersuchungen an diesem Standort empfiehlt sich folglich ein größerer Abstand zum Gebäude.

¹Eine nachträgliche Versetzung der Wetterstation war aus mehreren Gründen nicht mehr möglich. Das größte Problem stellte hierbei der steil abfallende Hang in südöstliche Richtung dar, der spezielle Konstruktionen erfordert hätte.

A.2 Konzeptvorschlag für ein zukünftiges Projekt

Als Ergänzung zu den in Punkt 5.2 beschriebenen Ideen, soll hier ein konkretes Konzept/Projekt zur Beantwortung ebenso dargestellter Fragen Platz finden. Gleich vorweg ist zu vermerken, dass dabei eine Kombination aus Messung und Modellierung angedacht wird.

Offenen Fragen

- Wie effizient wird die Emission mit zunehmenden Abstand zur Quelle auf größere Luftvolumina verteilt?
- Wie hoch sind die nördlich und südlich angrenzenden Wohngebiete im Mittel über einen Winter belastet?
- Wie sieht ein typischer Tagesgang der NO_x-Immission in den verschiedenen Ortsteilen aus bzw. wann treten Maxima und Minima an nicht direkt im Bereich der Quelle gelegenen Zonen auf?

Projekt zur Beantwortung der Fragen

Die Beantwortung der Fragen soll im Wesentlichen durch die Ergebnisse eines diagnostischen Schadstoffausbreitungsmodells ermöglicht werden. Welches Modell sich dafür eignen würde, müsste von Experten beurteilt werden. Interessante Informationen in der Literatur findet man zunächst in der Arbeit von Feller (1994), obwohl das darin diskutierte Modell nur die Verteilung inerter Gase berechnen kann, also keine Atmosphärenchemie enthalten ist. Gerade die Berücksichtigung atmosphärenchemischer Prozesse scheint zwar schwierig, aber dennoch sehr wichtig zu sein, wenn man bspw. an Abb. 4.26 denkt. Weitere, ausführliche Informationen über verschiedene Modelle und deren Vor- und Nachteile sind in Heimann et al. (2007), S.44ff und S.71ff zu finden .

Darüber hinaus werden zahlreiche, teils sehr benutzerfreundliche Schadstoffausbreitungsmodelle verschiedenster weiterer Hersteller (z.B. Scientific Software Group, Utah) angepriesen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein Modell egal welcher Art mit den komplexen topographischen Bedingungen zu Rande kommen muss und idealer Weise chemische Reaktionen eventuell unter Einbeziehung kurzweiliger Strahlungsmessungen berücksichtigt.

Der meteorologische Input an den Modellrändern könnte jedenfalls aus einem Windmodell, dem wiederum Daten aus 4 Wetterstationen als Input dienen, die nördlich, östlich, südlich und westlich der Station LT in ungefähr gleichem räumlichen Abstand (ca. 500m) positioniert werden sollten (Von Nord beginnend: Bereich Schießplatz Bachtal, Bereich Kloster Fiecht, Bereich Feldweg Vomp zwischen Eisenbahn und Gemeindestraße, Bereich

Schnittlauchgasse).

Vor Modellen, die aus einer Punktmessung ein räumlich ausgedehntes Windfeld berechnen, das dann als Input für Schadstoffausbreitungsmodelle dient, ist in Anbetracht des komplexen Untersuchungsgebiets und der Erfahrungen aus den Datenauswertungen im Winter 2007/08 dringend abzuraten!

Als Emissionsinput können die hochaufgelösten Emissionsdaten, die im Auftrag des Amtes der Tiroler Landesregierung, Abteilung Verkehrsplanung, gerechnet werden, verwendet werden. Die hohe Qualität dieser Daten (halbstündliche Berechnung aus automatischer Zählstelle im Bereich A12 Vomp) ist jedenfalls ein idealer Ausgangspunkt für jegliche Modellsimulationen.

Zur Modellevaluierung wären an den 4 AWS Standorten zumindest niedrig auflösende NO_x-Passivsammler, besser zumindest teilweise hochaufgelöste NO_x-Messungen nötig, wobei für den östlichen Messpunkt die Daten der permanent eingerichteten Station AL (Vomp an der Leiten) herangezogen werden könnten. Eine zusätzliche Bestückung verschiedener Punkte im Modellanwendungsgebiet mit den erwähnten NO_x-Passivsammlern wäre eine empfehlenswerte Ergänzung zur Überprüfung der Ergebnisse.

A.3 Ergänzungen zu Punkt 4.2.4, Antriebe

Ortsübersicht



Abbildung A.2: Darstellung des Inntals mit Alpenvorland und drei Orten: BLAU=Innsbruck, ROT=Schwaz, GRÜN=Mühldorf am Inn

Barometrische Mitteltemperatur nach Vergeiner

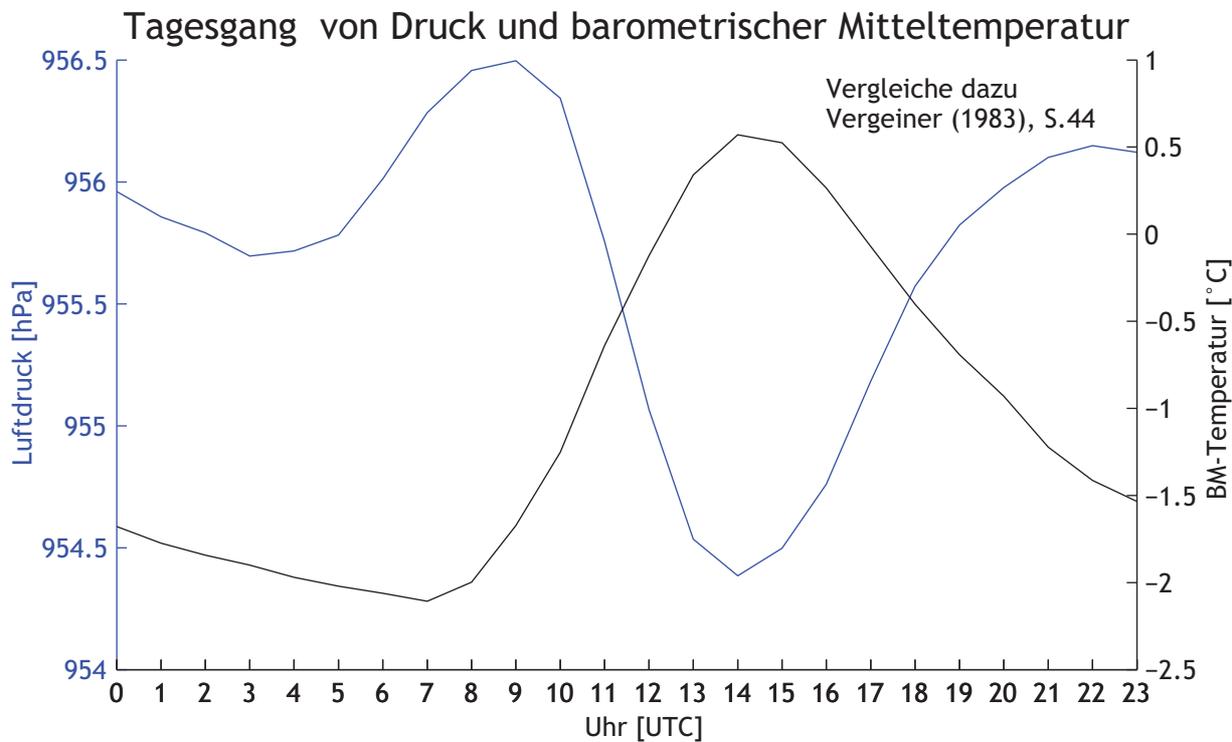


Abbildung A.3: Mittlerer Tagesgang von Druck (blau) und barometrischer Mitteltemperatur (schwarz) in Innsbruck.

A.4 Ergänzende Übersicht zu Punkt 4.3, Meteorologie-Luftschadstoffe

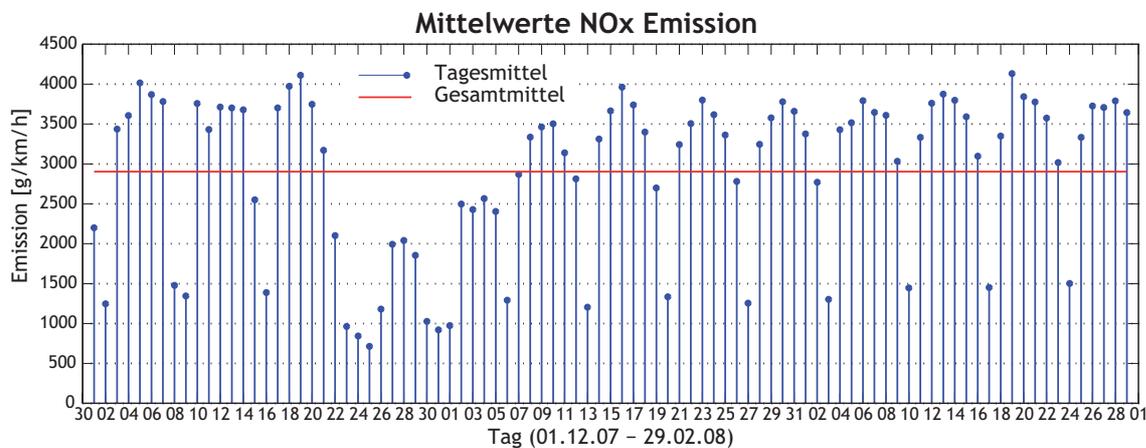


Abbildung A.4: Tagesmittel der berechneten NO_x Emission im Bereich A12 Vomp sowie Gesamtmittel über 3 Monate (rote Linie)

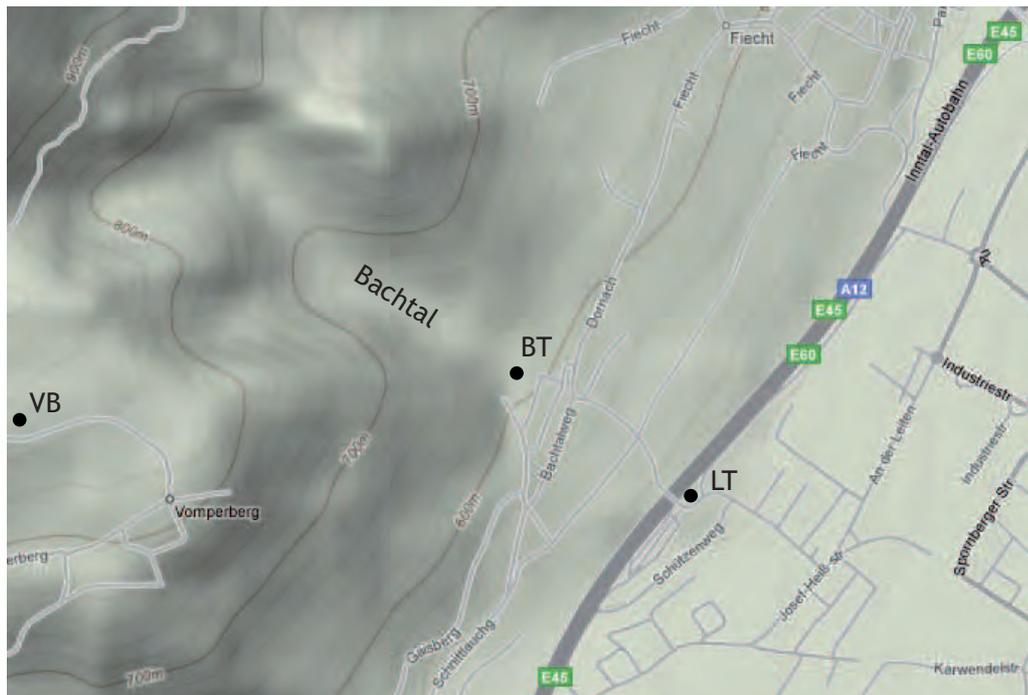


Abbildung A.5: Geländekarte im Bereich der Station LT. Quelle: Google Maps.

Meteorologische Parameter je Windart Station LT

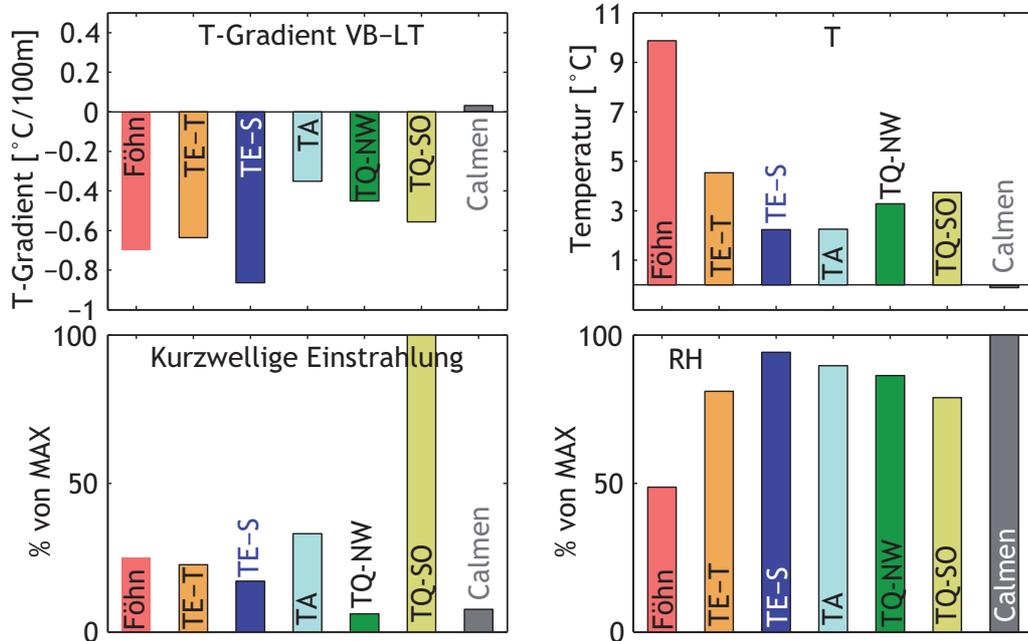


Abbildung A.6: Absolutwerte oder Prozentanteil vom Maximalwert (der bei einer Windart erreicht wird) von verschiedenen gemittelten meteorologischen Parametern je Windart. Als Datengrundlage dienen die Werte in Tabelle 4.7. TE-T=TalEin-Thermisch induziert, TE-S=TalEin-Synoptisch induziert, TA=Talaus, TQ=Talquer NordWest/SüdOst, kw-Ein=Kurzwellige Einstrahlung.

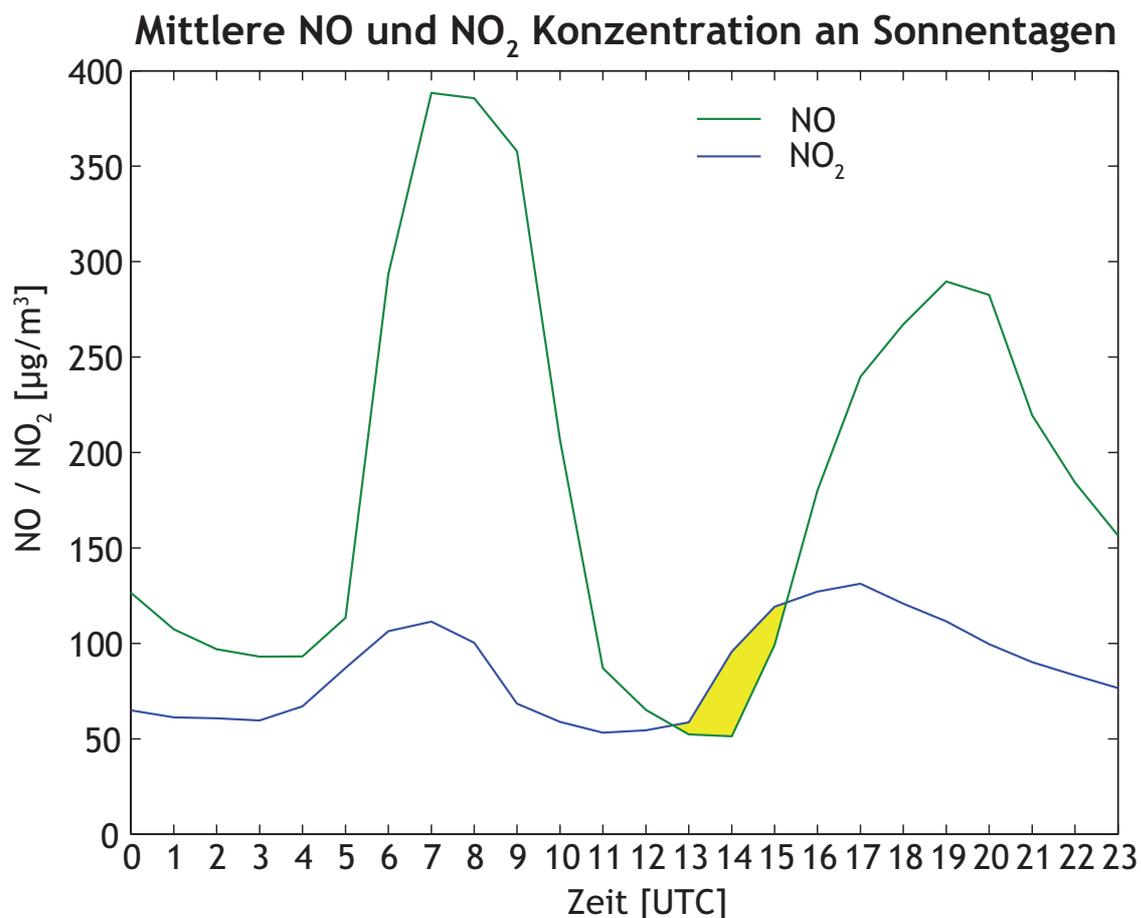


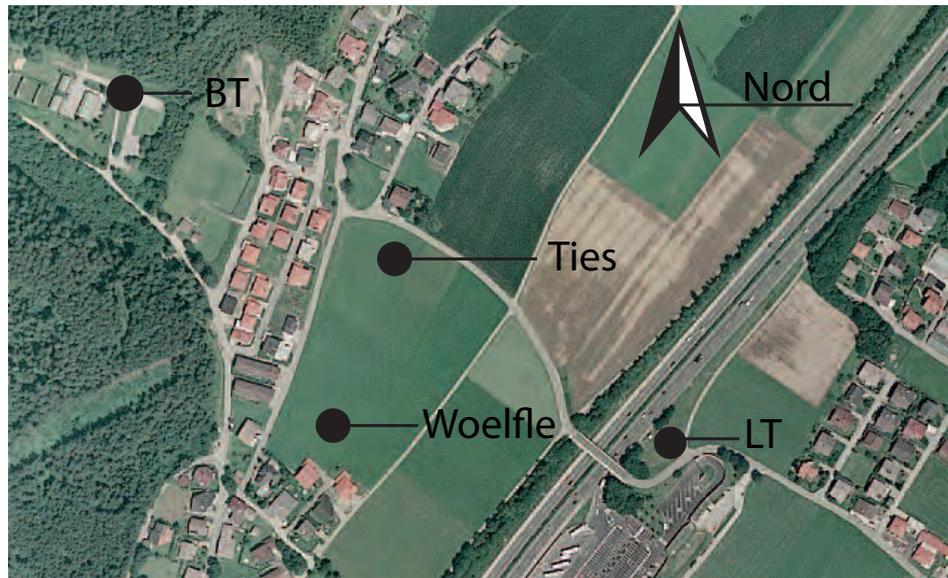
Abbildung A.7: Mittlerer Tagesgang der *NO* und *NO₂* Konzentration an Sonnentagen. Gelb markiert ist der besonders interessante Zeitraum, während dem Hangabwinde typischer Weise einsetzen und während dem im Mittel mehr *NO₂* als *NO* Moleküle in der Luft sind.

Mechanische Windsensoren an einem strahlungsreichen Mustertag

Abb. A.8 zeigt den Tagesgang der Windrichtung an einem strahlungsintensiven Tag Ende Dezember. Es ist zu erkennen, dass Talwinde im Gegensatz zu Quer- bzw. Hangwindzirkulationen keine Rolle spielen.

Des Weiteren sind die Unterschiede zwischen Hangaufwind (turbulent \Rightarrow unregelmäßig) und Hangabwind (relativ laminar \Rightarrow gleichmäßig) hinsichtlich der Variabilität der Windrichtung gut zu erkennen. Bezüglich Unterschieden in der Windgeschwindigkeit können keine Aussagen getroffen werden, da die mechanische Geschwindigkeitsaufzeichnung keine ausreichende zeitliche Auflösung erzeugt.

Lage Ties und Woelfle



Windrichtung 27.12.07 zwischen Bachtal und A12

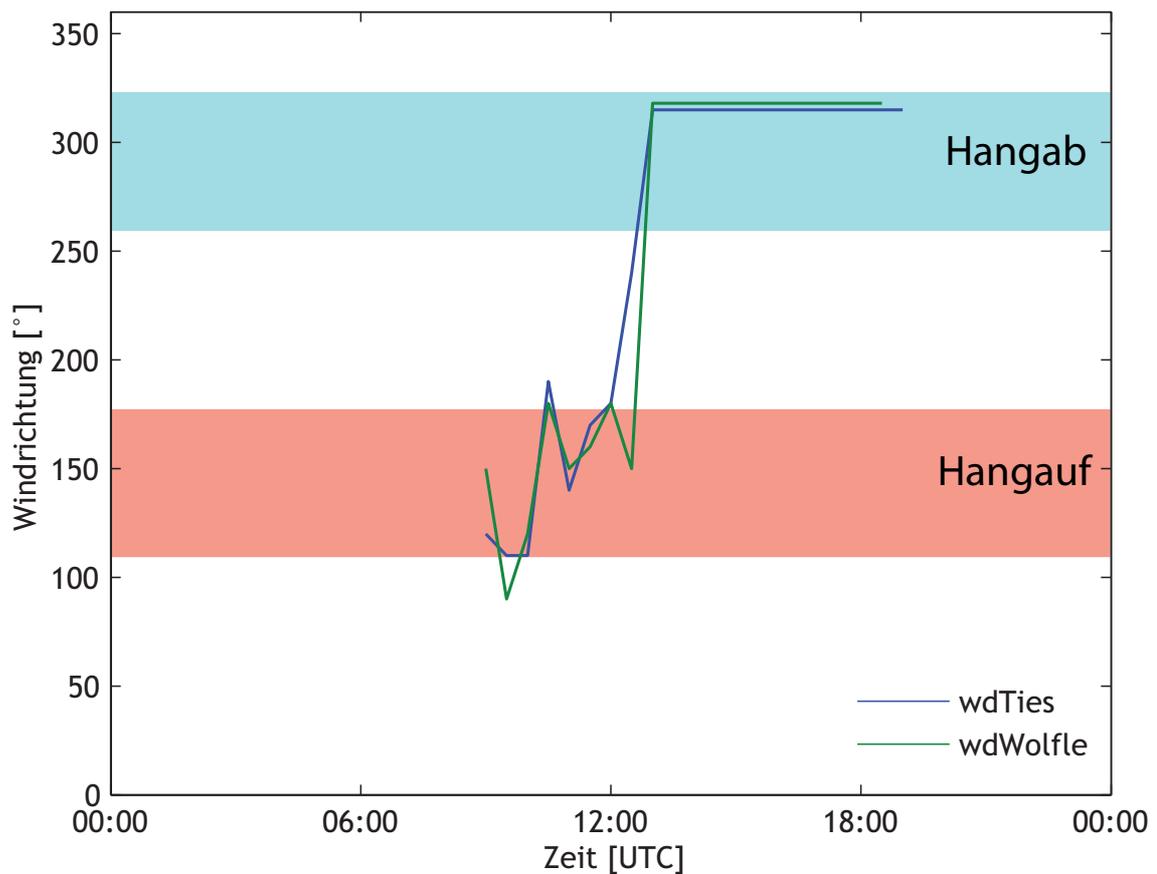


Abbildung A.8: Händisch digitalisierte Windrichtungsdaten zweier mechanischer Windsensoren mit Lagebeschreibung. Karte stellt den Hang zwischen Bachtal und A12 dar. Fehlende Linien bedeuten Calmen.

A.5 Betrachtung Häufigkeiten je Windart

Thudium et al. (2009) bezeichnen die vertikale Stabilität und die damit verbundenen Ausbreitungsbedingungen als wesentlichen Faktor hinsichtlich der Immission. Die Ergebnisse in Abb. A.9 (b) bestätigen diese Aussage.

In der Folge scheint es auch interessant, ähnliche statistische Untersuchungen wie in Abb. A.9 (b) hinsichtlich verschiedener Windrichtungen und Intensitäten für die Station LT in Vomp zu erstellen.

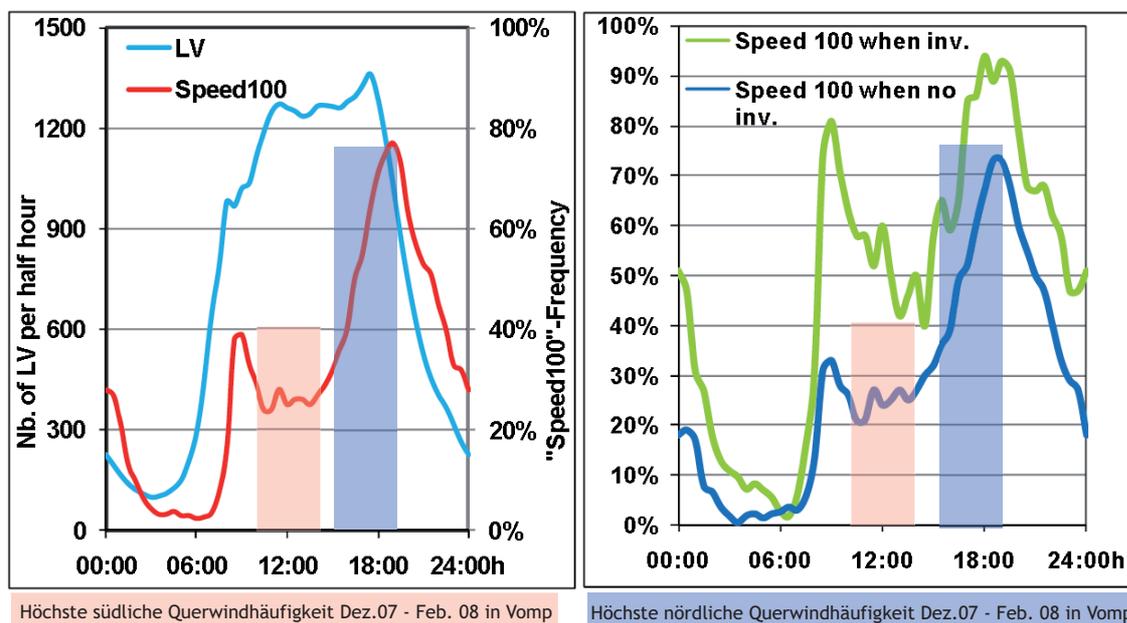
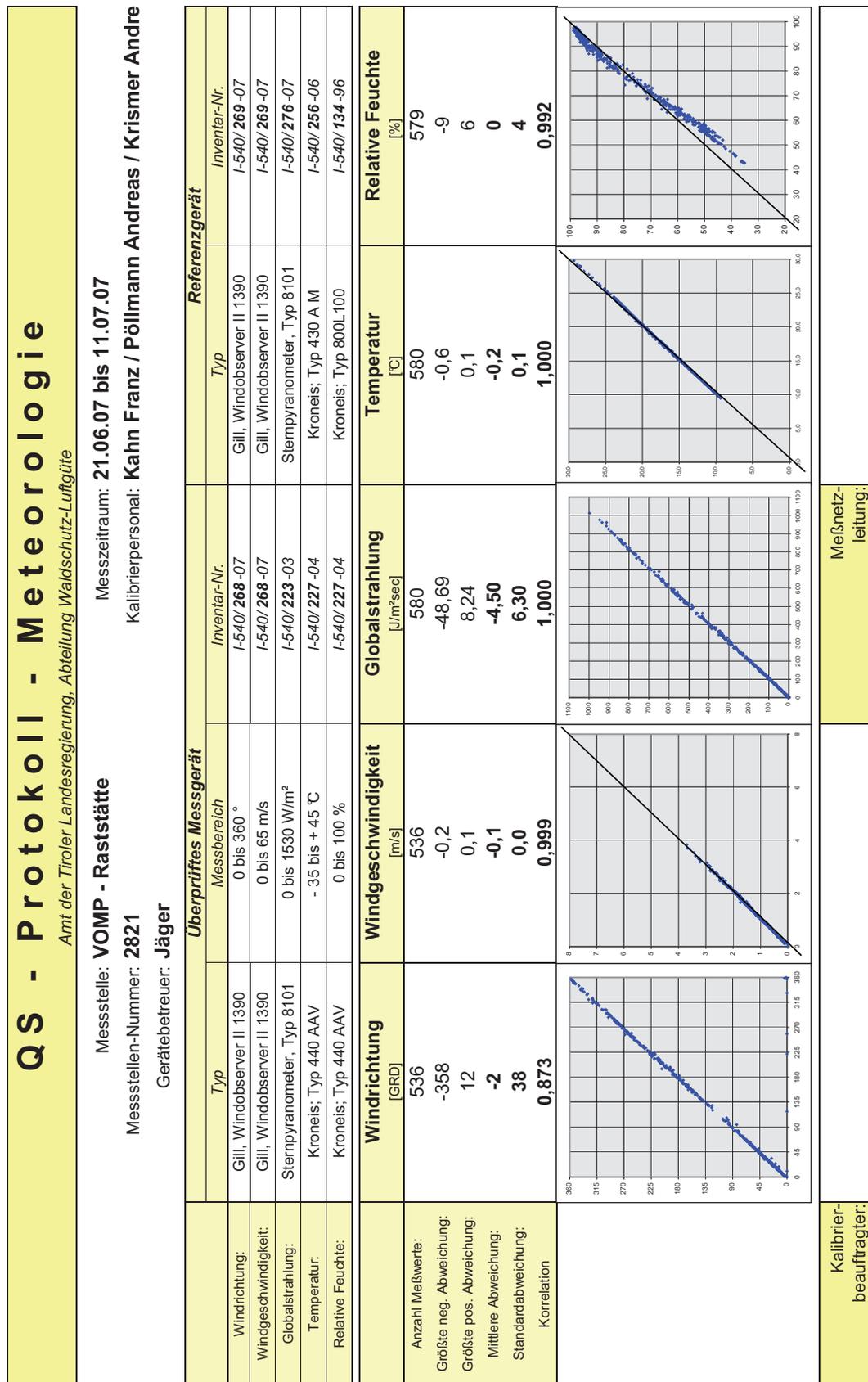


Abbildung A.9: (a) Mittlere tageszeitliche Variation von Tempo 100 und der Anzahl an PKW-Fahrten nach Thudium et al. (2009), S.8 für den Zeitraum Nov. 07 - Okt.08 in Kundl (!) ergänzt durch Informationen über Windrichtungshäufigkeiten je Tageszeit im Winter in Vomp nach Abb. 4.7 . (b) Mittlere tageszeitliche Variation von Tempo 100 an Tagen mit und ohne Inversion in Kundl nach Thudium et al. (2009), S.8 mit den selben Ergänzungen wie in (a).

Achtung: Bei beiden Abbildungen werden Daten der Station Kundl, die ca. 30km östlich von Vomp liegt, verwenden. Die Umgebungen der beiden Stationen unterscheiden sich deutlich!

A.6 Qualitätssicherung Station LT 2007

Meteorologie



29.04.2009

download.php

Ing.A.Pöllmann

Abbildung A.10: Ergebnisse der Vergleichsmessungen zur Überprüfung der meteorologischen Instrumente der LT Station in Vomp.

A.7 Messeindrücke



Abbildung A.12

Literatur

- Bilgeri, F., 2009: Luftschadstoffe in einem Alpental - Vergleich der Winterperioden 2005/06 und 2007/08 im Raum Schwaz/Vomp. In Bearbeitung. Abweichender Titel möglich!
- Brem, M., B. Hennemuth, A. Böhringer, and C. Freytag, 1985: Atmosphärische Grenzschicht in Alpentälern während der Experimente HAWEL, DISKUS und MERKUR. Freytag, Carl. Universität München, Meteorologisches Institut, Wissenschaftliche Mitteilung Nr.52.
- Defant, A., 1910: Zur Theorie der Berg- und Talwinde. *Meteorologische Zeitschrift*, **4**.
- Defant, A., 1949: Zur Theorie der Hangwinde, nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg- und Talwinde. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie A*, **1**, 421–450.
- Dünnebeil, F., U. Lambrecht, H. Helms, and A. Brückner, 2009: Impact of traffic-related measures on NO_2 concentrations in the Inn Valley. In: *Proceedings of the 3rd conference Environment and Transport and of the 17th conference Transport and Air Pollution (ETTAP)*, Volume 122, France. Institut National de Recherche Sur les Transports et leur Securite: Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg.
- Dreiseitl, E., 1991: Immissions-klimatologische Besonderheiten des Inntals. *Teilbericht Luft/Vegetation/Boden an den Tiroler Landtag*, 29–31.
- Dreiseitl, E., H. Feichter, H. Pichler, R. Steinacker, and V. Ignaz, 1980: Windregime an der Gabelung zweier Alpentäler. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, **28**, 257–275.
- Dreiseitl, E., and D. Stöhr, 1992: Emission - Meteorologie - Immission. Transitstudie. IMGI, Landesforstdirektion.
- Emeis, S., C. Jahn, C. Münkler, C. Münsterer, and K. Schäfer, 2007: Multiple atmospheric layering and mixing-layer height in the Inn valley observed by remote sensing. *Meteorologische Zeitschrift*, **6**, 415–424.
- Etling, D., 2002: *Theoretische Meteorologie: eine Einführung*. (2. Auflage ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Feller, W., 1994: *Ein Regionales Ausbreitungsmodell für Inerte Luftfremdstoffe basierend auf typischen Windfeldern*. Ph. D. thesis, Eidgenössische technische Hochschule Zürich.
- Gohm, A., 2003: *Contributions to the dynamics of south foehn*. Ph. D. thesis, IMGI.
- Gohm, A., F. Harnisch, J. Vergeiner, F. Obleitner, R. Schnitzhofer, A. Hansel, A. Fix, B. Neining, S. Emeis, and K. Schaefer, 2009: Air Pollution Transport in an Alpine Valley: Results from Airborne and Ground-Based Observations. *Boundary-Layer-Meteorology*.
- Grießer, E., 2003: Quantitative Simulation des NO_x -Konzentrationsverlaufes während der Belastungsperiode im Nov./Dez. 1999. Master's thesis, IMGI.
- Haiden, T., 2005: Skript-Gebirgsmeteorologie SS2005, IMGI.
- Hann, J., 1879: Zur Theorie der Berg- und Talwinde. *Meteorologische Zeitschrift*, **14**, 444–448.

- Harnisch, F., 2007: Airborne Aerosol Measurements in the Inn Valley. Master's thesis, IMGI.
- Heimann, D., M. Franceschi, S. Emeis, P. Lercher, and P. Seibert, 2007: *Air Pollution, Traffic Noise and Related Health Effects in the Alpine Space*. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale.
- Hocking, M.B., 2005: *Handbook of Chemical Technology and Pollution Control* (3 ed.). Academic Press, 799 pp.
- Klötzer, W., 1986: *Feinstruktur des Luftdruckes im Inntal*. Ph. D. thesis, IMGI.
- Kollmann, J., 2008: Investigation of mixing height parametrisation in an alpine valley during winter 2005/06. Master's thesis, IMGI.
- Kraus, H., 2004: *Die Atmosphäre der Erde*. Springer-Verlag.
- Kuhn, M., 1989: *Föhnstudien*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Lehner, M., 2008: Idealized Sensitivity Study of Pollution Transport over Alpine Terrain. Master's thesis, IMGI.
- Mayr, G., 1987: Analytische Studien des seichten Föhns. Master's thesis, IMGI.
- Orgill, M., 1979: Terrain effects on atmospheric transport and dispersion: a status report. Conference: 5. international conference on wind engineering, Fort Collins, CO, USA, 8 Jul 1979.
- Pack, I., and D. Stöhr, 1995: Verkehr und Umwelt im Gebirgsland Tirol. Landesforstdirektion Tirol.
- Pichler, H., 1997: *Dynamik der Atmosphäre*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Rafelsberger, P., 2007: Phänologische / Klimatologische Untersuchungen einer Thermikwolke. Master's thesis, IMGI.
- Raffler, T., 2005: Das Problem der täglichen Sonnenscheindauer. Luitpold-Gymnasium.
- Schäfer, K., F. Obleitner, M. Hoffmann, J. Wittig, B. Ruille, S. Emeis, P. Suppan, W. Gurgiser, and F. Bilgeri, 2008: Comparative study of wintertime NO and NO_2 measured by DOAS near a motorway in the Inn valley. In: *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, 2007.
- Schäfer, K., J. Vergeiner, S. Emeis, J. Wittig, M. Hoffmann, F. Obleitner, and P. Suppan, 2008: Atmospheric influences and local variability of air pollution close to a motorway in an Alpine vall during winter. *Meteorologische Zeitschrift*, **17**, 297–309.
- Schlager, H., and J. Graf, 1993: Memosa. DLR.
- Schneider, J., 2006: Schwebestaub in Österreich. Umweltbundesamt.
- Schnitzhofer, R., 2005: Konzentrationsschwankungen verkehrsbedingter Luftschadstoffe in Verbindung mit täglichen und saisonalen Änderungen der meteorologischen Verhältnisse bei Vomp im Inntal. Master's thesis, IMGI.
- Seibert, P., H. Feldmann, B. Neininger, M. Bäumle, and T. Trickl, 2000: South foehn and ozone in the Eastern Alps – case study and climatological aspects. *Atmospheric Environment*, **34**, 1379–1394.
- Seinfeld, H.J., 1986: *Air Pollution*. JOHN WILEY & SONS.
- Spangl, W., 2004a: Fachgrundlagen für eine Staturerhebung zur NO_2 -Belastung an der Messstelle Wien-Hietzinger Kai. Umweltbundesamt.
- Spangl, W., 2004b: Fachgrundlagen für eine Staturerhebung zur PM_{10} -Belastung in Wien. Umweltbundesamt.

- Spangl, W., M. Anderl, and G. Lichtblau, 2006: Trends von NO_x-Emissionen und - Immissionen in Österreich, 1990–2004. Umweltbundesamt.
- Spangl, W., C. Nagl, and L. Moosmann, 2007: Jahresbericht der Luftgütemessungen in Österreich 2006. Umweltbundesamt.
- Spangl, W., C. Nagl, and L. Moosmann, 2008: Jahresbericht der Luftgütemessungen in Österreich 2007. Umweltbundesamt.
- Staszewski, M., 2008: Verteilung von Feinstaub und meteorologischen Parametern aus PKW-gestützten Messfahrten im Winter 2005/2006 im Raum Schwaz. Master's thesis, IMGI.
- Steinacker, R., 1984: Aera - Height Distribution of a Valley and its Relation to the Valley Wind. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, **57**, 64–71.
- Stull, R.B., 2000: *Meteorology for Scientists and Engineers. Second Edition*. Garland, Gary.
- Thermo Electron Corporation, 2005: *Bedienungsanleitung Chemilumineszenz NO-NO₂-NO_x Analysator, Modell 42i*. Waltham, USA: Thermo Electron Corporation.
- Thudium, J., 2002a: Einhaltung der Grenzwerte für das NO₂-Jahresmittel an der Messstelle Vomp: Szenarien der zukünftigen Entwicklung des Schweren Güterverkehrs 2002 - 2012. Oekoscience AG.
- Thudium, J., 2002b: Immissionsklimatische Analyse der Grenzwertüberschreitungen für NO₂ an der Messstelle Vomp im Dezember 1999 und Szenarien zu deren Vermeidung. Oekoscience AG.
- Thudium, J., C. Chelala, and T. Greiner, 2009: Air Pollution Abatement by flexible Speed Regulation on Austrian Highways - Pollution controlled Traffic Management. In: *Proceedings of the 3rd conference Environment and Transport and of the 17th conference Transport and Air Pollution (ETTAP)*, Volume 122, France. Institut National de Recherche Sur les Transports et leur Securite: Oekoscience, Suisse.
- Thudium, J., and O. Kocsis, 2000: Immissionsklimatisch abgestützte Lenkung der Verkehrsströme auf der Inntalautobahn. Oekoscience AG.
- Thudium, J., F. Siegrist, and P. Maly, 2001: Beiträge zu einer immissionsklimatisch abgestützten Lenkung der Verkehrsströme auf der Inntalautobahn. Oekoscience AG.
- TSI, 2004: *Model 8520 DUSTTRAK Aerosol Monitor*. MN 55126 U.S.A: TSI Incorporated.
- TSI, 2006: *DUSTTRAK Theory of Operation*. MN 55126 U.S.A: TSI Incorporated.
- Vergeiner, I., 1983: Dynamik alpiner Windsysteme. IMGI. Bericht zum Forschungsvorhaben 3556.
- Vergeiner, I., and E. Dreiseitl, 1982: Die Ausbreitung der Schadstoffe im unteren Gailtal. *Carinthia II, Sonderheft 39*, 17–27.
- Vergeiner, I., and E. Dreiseitl, 1987: Valley Winds and Slope Winds - Observations and Elementary Thoughts. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **36**, 264–286.
- Weber, A., 2005: Auswirkungen der Autobahnsperre vom 27. Mai 2005 mit Stickstoffoxid- und PM10-Immissionen. Landesforstdirektion.
- Weber, A., D. Schatzer, F. Schöler, A. Pöllmann, and K. Winter, 2008: Luftgüte in Tirol. Bericht über das Jahr 2007. Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Waldschutz, Fachbereich Luftgüte.
- Weber, A., D. Schatzer, F. Schöler, A. Pöllmann, and K. Winter, 2009: Luftgüte in Tirol. Bericht über das Jahr 2008. Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Waldschutz.

- Whiteman, C.D., and T.B. McKee, 1978: Air pollution implications of inversion descent in mountain valleys. *Atmospheric Environment*, **12**, 2151–2158.
- Whiteman, C.D., and T.B. McKee, 1980: Valley Wind Systems Under Temperature Inversion Conditions. In: *Proceedings of Symposium on Intermediate Range Atmospheric Transport Processes and Technology Assessment*, Tennessee, pp. 351–358.
- Whiteman, C.D., and S. Zhong, 2008a: Downslope flows on a low-angle slope and their interactions with valley inversions. part i. Observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 2023–2038.
- Whiteman, C.D., and S. Zhong, 2008b: Downslope flows on a low-angle slope and their interactions with valley inversions. part ii. Numerical Modeling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 2039–2057.
- WHO, 2003: Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. WHO.
- Wilh. Lambrecht KG, 1962: *MECHANICAL WIND RECORDER WOELFLE TYPE*. Göttingen: Wilh. Lambrecht KG.
- Wittig, J., 2007: Meteorological Influences on Air Pollution in the Inn Valley during Winter 2005/2006. Master's thesis, IMGI.
- Wotawa, G., P. Seibert et al., 2000: *Verkehrsbedingte Stickoxid-Belastung im Inntal: Einfluss meteorologischer und topographischer Faktoren*. Wien: BOKU.
- Zängl, G., 1999: Three-dimensional idealized simulations of the foehn in the region of Innsbruck. *Contributions to atmospheric physics*, **72**, 243–266.

Danksagung

Der erste Dank gilt meine Eltern, die durch Motivation und finanzielle Unterstützung mein Studium erst ermöglicht haben! In weiterer Folge gilt ein Dank all jenen Lehrkräften, die durch ihre Unterrichtsart aber auch durch persönliche Gesten das Meteorologiestudium in Innsbruck trotz der Herausforderungen zur für mich genau richtigen Wahl werden ließen.

Gegen Ende meines Studiums war es schließlich aufgrund der großzügigen finanziellen Unterstützung der Stadtgemeinde **Schwaz** und der Marktgemeinde **Vomp** sowie dem Österreichischen **Alpenverein** möglich, in Zusammenarbeit mit **Herrn Schäfer** (IMK-IFU) und **Herrn Obleitner** (IMGI) ein eigenes Messprojekt auf die Beine zu stellen. Hiermit sei sowohl den finanziellen Unterstützern als auch den Betreuern gedankt. Ebenso erwähnt werden muss im Zusammenhang mit unserem Messprojekt die Abteilung Waldschutz (Amt der Tiroler Landesregierung), Fachbereich Luftgüte, die uns völlig unkompliziert Unterstützung bei inhaltlichen und technischen Fragen sowie beim Beschaffen von Datenmaterial gewährte. **Herrn Weber**, **Herrn Krismer** und **Herrn Pöllmann** sei hier stellvertretend für das gesamte Team ein großer Dank ausgesprochen. Genauso gilt ein großer Dank **Herrn Moser** und dem Team der Abteilung Verkehrsplanung sowie **Herrn Thudium** von der Firma Oekoscience (www.oekoscience.ch), der ebenso unerwartet wie kurzfristig wesentlich zur Verbesserung dieser Arbeit beigetragen hat.

Auch der Umweltbeauftragte und der Umweltreferent der Stadtgemeinde Schwaz, **Herr Kaufmann** und **Herr Weratschnig** standen uns immer rasch bei Problemen zur Seite. Ebenso herzlich bedanken möchte ich mich bei **Herrn Gasteiger** (www.rosenheimwetter.de), der mir rasch und völlig kostenlos die Daten seiner privaten Wetterstation übermittelt hat, die ich leider aufgrund eines Problems an anderer Stelle nicht verwenden konnte.

Für die Unterstützung bei meiner aus dem Messprojekt hervorgegangenen Diplomarbeit möchte ich neben den genannten Personen und Institutionen nochmals besonders **Herrn Schäfer** (Initiator des Messprojektes und sehr angenehmer Betreuer und Unterstützer dieser Arbeit), **Herrn Obleitner** (Unerlässlicher Partner beim Messprojekt, kritischer Begutachter und hilfreicher Verbesserer dieser Arbeit; ...und auch wenn wir manchmal unter dem Aufwand stöhnten, ein humorvoller und sehr persönlicher/menschlicher Begleiter während dem gesamten Studium), **Florian Bilgeri** (Freund, Ordnungsgenie

und ebenso verlässlicher wie unermüdlicher Kämpfer gegen (Mess-)Probleme aller Art), **Herrn Dreiseitl** (ohne ihn hätte ich die literarischen Schätze am Institut wohl nie entdeckt sowie manch spannende meteorologische Geschichte aus früheren Zeiten verpasst), **Herrn Gohm** (der schnellste Helfer weit und breit), **Herrn Emeis** sowie **Florian Karner**, **Harald Poigner** und **Thomas Krismer** für die oft hoch amüsanten Stunden in unserem Zimmer als Ablenkung von Matlab- und Latexproblemen danken.

Des weiteren soll an dieser Stelle ein großer Dank an den Herrn, der uns zwar vorzeitig Richtung München verlassen hat, dessen Bekanntschaft ich jedoch glücklicherweise während meines Studiums machen durfte, Platz finden. Die Rede ist von unserem menschlich großartigen **Helge Tuschy**! Danke für die vielen heiteren Stunden an guten wie an schlechten Tagen, für sämtliche Vorlesungsunterlagen, Ratschläge,... und Abenteuer (...).

Ebenso herzlich bedanken möchte ich mich bei meinem langjährigen Freund und Wegbegleiter Matthias Claus Seidel für die kurzfristige Unterstützung bei der Aufspührung der hoffentlich meisten Text- und Formfehler.

Der abschließende Dank gilt meiner Freundin **Isabel**, die mich trotz Teilhabens an vielen Strapazen des Messprojektes nicht verstoßen hat, die mich trotz meiner permanenten Zeitknappheit (die ich immer fälschlich als momentan beschreibe) und meinem eingeschränkten Ordnungssinn tagtäglich in vielen Bereichen tatkräftig unterstützt und so erst manche meiner Tätigkeiten ermöglicht! Nicht zu vergessen sind jene Stunden, in denen wir gemeinsam alle Arbeit vergessen und die Wolken Wolken sein lassen oder Blitze bestaunen, ohne an die Theorie dahinter zu denken.

Curriculum Vitae

Von: Wolfgang Gurgiser
Geboren am: 30.12.1984
Geboren in: Hochrum, Tirol

Bildungsweg

1991-1995 Volksschule Vomp
1995-2003 AHS Paulinum Schwaz
2003-2004; Diplomstudium Meteorologie, Universität Innsbruck
2005-2009

Präsenzdienst

2004-2005 Zivildienst beim Roten Kreuz, Schwaz

Sommertätigkeiten

2002 Besucherzählung und Befragung Krimmler Achantal
2003 Marketing Silberbergwerk Schwaz
2005-2008 Österreichischer Alpenverein (Kartographische Arbeiten, Layoutarbeiten, Geländebegehungen, Geländeführungen, Nationalpark (HT) Patentreffen 2006 und 2008)

Studienbegleitende Tätigkeiten

seit 2005 TVB Silberregion Karwendel (Inszenierte Stadtführung Schwaz, Marketing, Gästewanderungen, Realisierung „NaturErlebnisweg“ und „KlimaEin&Ausblickweg“)

Forschungsprojekte

2007/2008 Feldkampagne Inntal November 2007 - Juni 2008 des Forschungszentrums Karlsruhe, Institut für Meteorologie und Klimaforschung (Konzipierung, Organisation, Sponsorensuche, Gerätebetreuung, Datenauswertung)

Unterrichtende Tätigkeiten

SS 2009 Tutor in „Modul 7. Alpen und Europa, Geländepraktikum“
seit 2008 Schülerführungen an der Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften

Ehrenamtliche Tätigkeiten

seit 2005 Rotes Kreuz Schwaz (Rettungssanitäter und Einsatzfahrer)
seit 2006 Schlossspiele Mitterhart (Bühnenbau und Verwaltungstätigkeiten)