

Analysen der Luftbelastungen im Inntal im meteorologischen Kontext

Eine Vergleichsstudie von zwei unterschiedlichen
Winterperioden im Raum Schwaz

DIPLOMARBEIT

eingereicht am

INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND GEOPHYSIK,
UNIVERSITÄT INNSBRUCK

zur Erlangung des akademischen Grades

MAGISTER DER NATURWISSENSCHAFTEN

von

FLORIAN BILGERI

INNSBRUCK, SEPTEMBER 2009

Abstract

Alpine valleys are frequently prone to enhanced air pollution inducing serious impairments of human health and of sustainable development in those regions. This is mainly due to particular topographic and meteorological effects, which are investigated within this study. The work is based on comparison of consistent data collected during two winters with strikingly different characteristics.

The measurements were performed in context of specific campaigns covering a cross section in the lower Inn valley (Schwaz, Austria) during the full winter periods 2005/06 and 2007/08. Notably, the concentrations of air pollutants and meteorological parameters were measured at the same places and almost identical instrumentation have been employed during both periods.

Meteorological analysis was mainly based on data from routine synoptic stations and automatic weather stations located at different elevations in a cross section of the valley. This was supported by mixing-height data derived from a ceilometer, which was operated at the valley bottom. Air pollution analysis considered NO, NO₂ and PM₁₀ measured by routine monitoring stations, a passive sampler network (only NO₂) and a differential optical absorption spectrometer (DOAS). Partly these measurements were strongly influenced by a nearby motorway.

The analysis showed that the calculated emissions of the motorway-traffic were very similar during both winter periods and the overall frequency distribution of weather types was quite similar as well. But distinct differences regarding the timing of significant weather patterns were obvious on the other hand. However, the measured NO and NO₂ concentrations close to the motorway were strongly different between the winters 2005/06 and 2007/08.

Further analysis revealed two factors being responsible for the observed differences in air pollutant concentrations. Firstly there was a significant difference regarding the relative timing of high pressure events and periods with high and low emission rates, respectively. During winter 2005/06, strong emissions often occurred during high pressure periods. In winter 2007/08 on the other hand, high pressure events fell into periods of reduced emission associated to holidays and correspondingly less traffic. Consequently higher air

pollution was recorded in winter 2005/06, which also traced in correspondingly frequent threshold exceedances.

A second factor is related to significant differences in snow cover. Thus, there was an almost continuous snow cover during winter 2005/06, while the second winter was virtually free of snow. This resulted in correspondingly different amounts of energy being available at the surface. In consequence the mean mixing-layer height was higher in 2007/08 than in 2005/06. Hence there was more air volume available to distribute the air pollution in 2007/08 and the measured concentrations were lower.

Moreover, cross-valley asymmetries in the air pollution could be verified as well. This is due to different atmospheric stability along the sun-exposed south facing slopes and the shaded north-facing slopes, respectively. Different slope wind regimes develop which promote asymmetric patterns in air pollutant concentrations across the valley. Slope winds also trace in small scale effects observed in the vicinity of a motorway.

Finally, air pollutant concentration near the motorway was simulated using a box model approach. The model is driven by calculated emission rates and mixing-layer height (derived from ceilometer measurements and pseudo-vertical temperature profiles) considering volume-height distribution in the valley cross section, too. The simulations proved to reproduce the gross evolution during the two winters, while indicating deficiencies regarding parameterisation of mixing effects as well.

Zusammenfassung

Das Ziel der in dieser Arbeit zusammengefassten Untersuchungen war es, zwei unterschiedliche Winterperioden in einem Alpental miteinander zu vergleichen. Dabei standen Messungen von Schadstoffkonzentrationen und Aufzeichnungen der meteorologischen Verhältnisse im Raum von Schwaz/Vomp in den Wintern 2005/06 und 2007/08 zur Verfügung.

Die Analysen konzentrierten sich auf die kombinierten Betrachtungen von Emission und Immission von Stickoxiden (NO , NO_2) und Feinstaub (PM_{10}) bzw. auf die meteorologischen Größen Stabilität, Wind, Strahlungshaushalt und Niederschlag. Darüber hinaus erfolgten punktuelle Untersuchungen der NO_2 -Belastung, sowohl im Talquerschnitt als auch nahe der Autobahn. Außerdem wurde versucht, mittels eines einfachen Box-Modells die Schadstoffbelastung über längere Zeiträume zu modellieren.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Häufigkeiten des Auftretens der unterschiedlichen synoptischen Strömungsmuster in beiden Winterperioden annähernd ähnlich waren. Die berechneten Emissionsraten des Autobahnverkehrs waren in beiden Zeiträumen sowohl zeitlich als auch quantitativ beinahe deckungsgleich. Die an einer repräsentativen Messstation registrierten Immissionsbelastungen waren jedoch gänzlich unterschiedlich - im Winter 2005/06 wurden viel höhere Werte gemessen.

Es haben sich bei den Analysen zwei Faktoren herauskristallisiert, die die Schadstoffsituation beeinflussten. Der erste entscheidende Faktor war die zeitliche Kombination der stabilen Hochdruckphasen mit den Emissionsraten des Verkehrs. Besonders nachteilig für die Luftbelastung war das zeitliche Zusammenfallen von Hochdruck mit hohen Emissionsraten im Jänner 2006. Im Winter 2007/08 herrschte Hochdruckeinfluss überwiegend während der Weihnachtsfeiertage und damit verbundenen niederen Emissionsraten. Die Luftbelastung fiel in diesem Winter vergleichsweise gering aus.

Der zweite wichtige Punkt war die Bodenbeschaffenheit im Untersuchungsgebiet. Der Winter 2005/06 war gekennzeichnet durch eine beinahe permanente Schneebedeckung, wohingegen die Untersuchungsperiode 2007/08 nur vereinzelte Tage mit einer Schneedecke aufwies. Die dadurch unterschiedliche Albedo hatte zur Folge, dass die kurzweilige Strahlungsbilanz im Winter 2007/08 um einiges höher war als im ersten Winter. Aus

diesem Grund konnte auch die Mischungsschicht in der Untersuchungsperiode 2007/08 tendenziell höhere vertikale Ausdehnungen erreichen und zu einer besseren Durchmischung der untersten Atmosphärenschichten beitragen.

Darüber hinaus konnte das Vorkommen von Asymmetrien der Schadstoffbelastung im Talquerschnitt bestätigt werden. Aufgrund von unterschiedlichen vertikalen Stabilitäten an der Sonnen- und Schattenseite bzw. aufgrund von lokalen Hangwinden war der sonnenbeschienene Hang höheren Luftbelastungen ausgesetzt. Auch am Standort der Luftgütemessstation des Landes Tirol konnten je nach Anströmrichtung unterschiedliche Werte während einer Luv- bzw. Leesituation gezeigt werden.

Abschließend konnten mittels Anwendung eines einfachen Box-Modells die beobachteten Schadstoffkonzentrationen an der Autobahn A12 über eine stabilitätsabhängige Parametrisierung der Mischungsschichthöhe gut simuliert werden.

Abkürzungen

Abw.	Abweichung
AGL	Höhe über Grund (above ground level)
ALPNAP	Projekt: "Monitoring and Minimisation of Traffic-Induced Noise and Air Pollution Along Major Alpine Transport Routes"
ASL	Meereshöhe (above sea level)
AWS	Automatische Wetterstation
A12	Autobahn Nr. 12 (Kufstein-Landeck)
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DOAS	Differentielles optisches Absorptionsspektrometer (Differential Optical Absorption Spectrometer)
e	Dampfdruck Luft
e _s	Sättigungsdampfdruck Luft
H	Höhe über Meer
HGT	Heizgradtage
HMW	Halbstundenmittelwert
i.d.g.F.	in der geltenden Fassung
IG-L	Immissionsschutzgesetz-Luft
IMGI	Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich
IMK-IFU	Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Bereich Atmosphärische Umweltforschung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland
INNAP	Projekt: "Boundary Layer Structure in the Inn Valley during high Air Pollution"
INNOX	Projekt: "NO _x -structure in the Inn Valley during High Air Pollution"
K	Kelvin, eine Maßeinheit der Temperatur
kw _a	kurzwellige Strahlung ausgehend
kw _e	kurzwellige Strahlung eingehend
lw _a	langwellige Strahlung ausgehend
lw _e	langwellige Strahlung eingehend
M	Stoßpartner bei chemischen Reaktionen
MEZ	Mitteleuropäische Zeit (Normalzeit)

MLH	Mischungsschichthöhe (Mixing Layer Height)
MW3	Dreistundenmittelwert
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Summe aus Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid
O ₂	Sauerstoff
O ₃	Ozon
ÖAW	Österreichische Akademie der Wissenschaften
Q	Strahlungsbilanz
p	Luftdruck (pressure)
PM ₁₀	Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von kleiner als 10 μm
rH	relative Luftfeuchte (relative Humidity)
rr	Niederschlagssumme
so	Besonnungssumme
SO ₂	Schwefeldioxid
T	Lufttemperatur (2m)
Td	Taupunkt (dewpoint Temperature)
TMW	Tagesmittelwert
UTC	Koordinierte Normalzeit (Universal Time Coordinated)
VDI	Verein deutscher Ingenieure
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Österreich

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Zusammenfassung	iii
Abkürzungen	v
Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Literaturüberblick	3
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	6
1.4 Vorbemerkungen zu den Analysen	7
2 Meteorologie, Luftschadstoffe und gesetzliche Vorgaben	9
2.1 Meteorologie	9
2.1.1 Atmosphärische Grenzschicht	9
2.1.2 Windsysteme in einem Tal	11
2.2 Luftschadstoffe	13
2.2.1 Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO ₂)	13
2.2.2 Feinstaub (PM ₁₀)	15
2.2.3 Maßeinheiten und Umrechnungen	16
2.3 Gesetzliche Vorgaben	17
3 Untersuchungen im Winter 2005/06 und 2007/08	21
3.1 Lage und umgebende Topographie	21
3.2 Räumliche Anordnung der Messgeräte	23
3.2.1 Automatische Wetterstationen, Ceilometer, Sodar, DOAS, Luftgüteüberwachungsstation des Landes Tirol	23
3.2.2 NO ₂ -Passivsammler	25
3.2.3 Temperaturprofil Kellerjoch	26
3.3 Beschreibung der Messgeräte	27
3.3.1 Automatische Wetterstationen	27
3.3.2 Vergleichsmessungen der Wetterstationen am Standort Schwaz	28

3.3.3	Pseudovertikales Temperaturprofil am Kellerjochhang	31
3.3.4	Ceilmeter	32
3.3.5	Sodar	32
3.3.6	Differentielles optisches Absorptionsspektrometer (DOAS)	33
3.3.7	NO ₂ -Passivsammler	34
3.4	Danksagung Untersuchungen 2007/08	34
4	Klimatologie, Grenzwertüberschreitungen und Wetterlagen	35
4.1	Klimatologischer Überblick	35
4.2	Grenzwertüberschreitungen	37
4.3	Wetterlagen	38
5	Konzentrationsanalysen der Luftschadstoffe NO, NO₂ und Feinstaub	41
5.1	Emissionen von Luftschadstoffen	41
5.1.1	NO _x -Emissionen an der Autobahn A12	41
5.1.2	Heizgradtagmethode zur Quantifizierung der Feinstaub-Emission	45
5.2	Immissionen von Luftschadstoffen	47
5.2.1	NO _x , NO und NO ₂ -Immission an der Autobahn A12	47
5.2.2	Feinstaub-Immission (PM ₁₀) an der Autobahn A12	51
6	Meteorologische Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet	53
6.1	Untersuchung der meteorologischen Daten	53
6.1.1	Wind, Niederschlag und Sonnenschein (Patscherkofel und Jenbach)	53
6.1.2	Wind und Temperaturen (Schwaz und Vomperberg)	56
6.1.3	Analyse des Temperaturprofils Kellerjochhang	60
6.2	Schnee, Strahlung und Albedo (Station Schwaz)	64
6.3	Untersuchung der Mischungsschichthöhe während ausgewählter Perioden	68
7	Räumliche Unterschiede im Talquerschnitt	73
7.1	Datenqualität NO ₂ -Passivsammler	73
7.2	Räumliche Verteilung von NO ₂	75
7.3	Temperaturgradienten an Schatten- und Sonnenhang	78
8	Detailstudien und Analysen von bestimmten Wetterlagen	81
8.1	Korrelationsanalysen DOAS	81
8.2	Analysen von bestimmten Wetterlagen	87
8.2.1	Vergleich von Hochdruckphasen	88
8.2.2	Analyse von Perioden mit variablen Wetterlagen	93
8.3	Das NO ₂ zu NO _x Verhältnis	98
8.4	Tagesmittelwerte der Emission, Immission und der meteorologischen Parameter	100
9	Anwendung eines einfachen Box-Modells	103
9.1	Modellbeschreibung	103

9.2	Datensatz und Initialisierung	105
9.3	Ergebnisse Modellierung Mischungsschichthöhe	107
9.4	Ergebnisse Modellierung Schadstoffkonzentrationen	109
9.5	Schlussfolgerungen Modellanwendung	111
10	Schlussfolgerungen und Ausblick	113
10.1	Schlussfolgerungen	113
10.2	Ausblick	116
A	Zusatzinformationen	117
A.1	Posterzusammenfassung EGU 2009	117
	Literatur	119
	Danksagung	125
	Lebenslauf	127

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Luftschadstoffe und Meteorologie sind Begriffe, die besonders im Alpenraum seit geraumer Zeit selbst in der Öffentlichkeit miteinander verknüpft werden. Ganz besonders entlang des Inntals und des Wipptals in Tirol rückte die Problematik der hohen Luftbelastungen schon vor längerer Zeit in den Mittelpunkt von gesellschaftlichen und politischen Debatten. Die entsprechenden Ursachendiskussionen haben bereits einen hohen wissenschaftlichen Kenntnisstand mit sich gebracht. Viele Details sind aber noch unzureichend bekannt. Aus diesem Grund werden immer wieder Messungen getätigt und verschiedene Modellansätze versucht.

In primärer Hinsicht hängt die Konzentration der Luftschadstoffe von den Emissionen aus Verkehr, Industrie und Hausbrand ab. Jedoch in sensiblen Gebieten mit begrenztem Luftvolumen und eingeschränkten Austauschprozessen haben die äußeren meteorologischen Bedingungen besonders starken Einfluss auf die Schadstoffbelastungen in den unteren Schichten der Atmosphäre. Insbesondere während den Winterperioden kommt es aufgrund des geringeren Energieeintrags in die bodennahe Luftschicht zu mächtigen Temperaturinversionen und damit zu stabilen Verhältnissen in der Atmosphäre. Diese wirken der atmosphärischen Durchmischung entgegen und führen zu höheren Schadstoffkonzentrationen mit damit häufig verbundenen Grenzwertüberschreitungen.

Aus diesen Gründen ist das Inntal in Tirol schon seit längerer Zeit Gegenstand von Untersuchungen der Schadstoffkonzentrationen. Neben den Emissionen aus Industrie und Hausbrand spielen in diesem Tal auch die Emissionen aus dem grenzüberschreitenden Verkehr auf der europäischen Fernverkehrsstraße München-Verona eine große Rolle.

Bereits in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts stellten Dreiseitl und Stöhr (1992) einen ersten umfassenden Bericht zu Emission und Meteorologie zusammen. Danach folgten weitere Untersuchungen und Studien, dabei ist vor allem das von der Europäischen Union unterstützte Projekt ALPNAP (Heimann et al. 2007) zu erwähnen. In Rahmen dessen

wurden unter anderem aufwändige Untersuchungen im Raum Schwaz und Vomp im Tiroler Unterinntal durchgeführt. Dabei stellte sich im Laufe der Auswertungen heraus, dass der untersuchte Winter eindeutig vom langjährigen Durchschnitt abwich. Die herrschenden Temperaturen waren, verglichen mit den 30-jährigen klimatologischen Mittelwerten, um $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ kühler und darüber hinaus waren die Tallagen von November bis Februar durchwegs mit einer geschlossenen Schneedecke bedeckt. Im Allgemeinen war das Schadstoffkonzentrationsniveau hoch, jedoch besonders während lang andauernden Hochdruckperioden konnten sehr hohe Schadstoffkonzentration registriert werden.

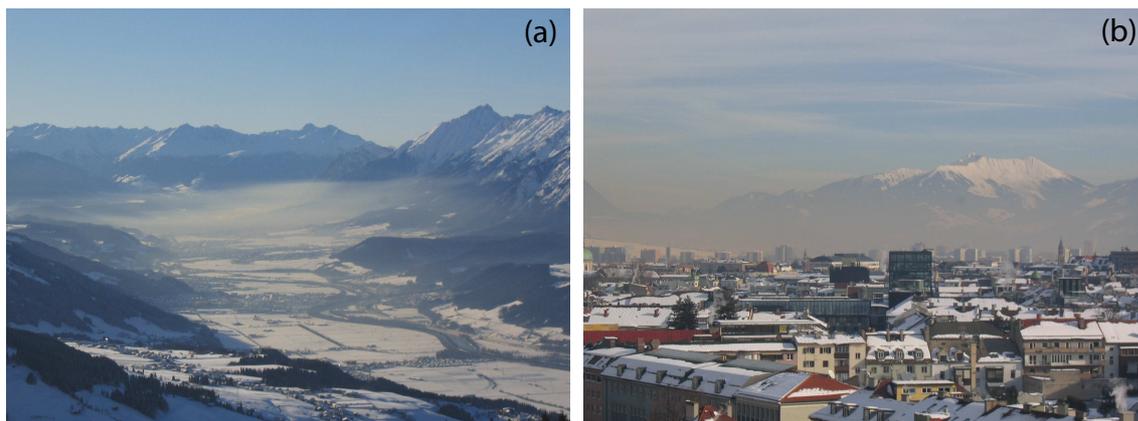


Abbildung 1.1: Symbolbilder eines stark mit Luftschadstoffen belasteten Alpentales am Beispiel des Unterinntales im Winter. Bild (a) zeigt den Blick über Schwaz/Vomp in Richtung Innsbruck, Foto (b) wurde gegen Osten über den Dächern von Innsbruck aufgenommen (im Hintergrund ist das Kellerjoch sichtbar).

Damit stellte sich natürlich die wissenschaftliche Frage, wie sich die Situation während einem anderen Winter darstellt. Aus dieser Motivation heraus fanden zwei Jahre später, im Winter 2007/08, abermals Messungen im gleichen Gebiet mit ähnlichen Messgeräten statt. Da ich selber aktiv an den Planungen und den Messungen im Winter 2007/08 beteiligt gewesen war, war es nahe liegend, aus diesem Themenkomplex meine Diplomarbeit zu verfassen.

Der Hauptinhalt meiner Arbeit ist es daher, die Winterperioden 2005/06 und 2007/08 im Hinblick auf Meteorologie und Schadstoffe in der bodennahen Schicht der Talatmosphäre zu vergleichen, insbesondere Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten herauszuarbeiten. Außerdem soll neben dem zeitlichen auch der räumliche Horizont der Analysen Eingang in die Arbeit finden.

Einige substantiellen Teile dieser Diplomarbeit wurden bereits im April 2009 auf der Generalversammlung der Europäischen Geowissenschaftlichen Union (EGU) im Rahmen einer Posterpräsentation (Abstract Nr. 11348) einem fachübergreifendem Publikum präsentiert. Außerdem fanden im November 2008 und im Juni 2009 Vorstellungen der Arbeit beim Amt der Tiroler Landesregierung statt. Als weitere Informationsquelle empfehlen sich die Arbeiten von Gurgiser (2009) und Karner (2009), die dasselbe Themengebiet tangieren.

1.2 Literaturüberblick

Wie schon in der Motivation angesprochen, gibt es über das Zusammenspiel der meteorologischen Gegebenheiten und der Schadstoffkonzentrationen ein großes Reservoir an aktueller Literatur. Ich möchte hier vor allem auf jene Veröffentlichungen und Arbeiten eingehen, die Relevanz für ein Alpental, insbesondere das Inntal, haben.

Bereits vor mehr als 30 Jahren analysierten Vergeiner et al. (1978) verschiedene Winter mittels langjähriger Klimadaten von Innsbruck und von der Zugspitze (Bergstation, 2962 m). Sie gingen dabei der Frage nach, ob eine hohe SO₂-Belastung im Winter 1975/76 im Raum von Innsbruck auf eine ungewöhnliche und besonders nachteilige Wetterlage zurückzuführen war, oder ob mit solchen Witterungen öfters gerechnet werden muss. Es zeigte sich, dass der pseudovertikale Temperaturgradient zwischen Innsbruck und der Zugspitze als Indikator für austauscharme und stabile Wetterlagen sehr gut zu gebrauchen war. Die Autoren kamen außerdem zum Schluss, dass die Inversionsperiode während des Dezembers 1976 durchaus im klimatologischen Mittel lag und es in den Folgejahren ohne weiteres wieder zu solchen, für die Luftqualität ungünstigen, Witterungsbedingungen kommen könne.

Durch erfolgreiche politische Maßnahmen in den Folgejahren verschwand die SO₂-Problematik europaweit in den Hintergrund. Jedoch mit dem vermehrt aufkommenden Transport von Gütern rückte die aus dem Verkehr induzierte Luftbelastung, vor allem durch NO, NO₂ und PM₁₀, in den Blickwinkel der Öffentlichkeit. Die erste umfangreiche Arbeit dazu veröffentlichten im Auftrag der Tiroler Landesregierung Dreiseitl und Stöhr (1992). Darin beschrieben die Autoren, dass es keinen einfachen Zusammenhang zwischen den gemessenen Immissionen und den berechneten Emissionen gibt. Als Gründe für die Unterschiede wurden die chemischen Reaktionen auf dem Weg von Schadstoffemittent zu Messgerät, als auch die meteorologischen Einflüsse genannt. Es wurde gezeigt, dass besonders die Temperaturschichtungen im Tal und die vorherrschenden Großwetterlagen die Schadstoffkonzentrationen am Talboden sehr beeinflussten.

Explizit dabei erwähnt wurde die Strömungslagenklassifikation nach Steinacker (1991), die sich als gutes Hilfsmittel zur Charakterisierung der meteorologischen Einflussgrößen auf die Schadstoffbelastung herausstellte. Besonders die gradientschwachen Wetterlagen wiesen aufgrund der damit meist verbunden stabilen Schichtung der Atmosphäre und den windschwachen Bedingungen schlechte Ausbreitungsbedingungen für Luftschadstoffe auf. Ausdrücklich erwähnten die Autoren weiters den vertikalen Temperaturgradient in der talnahen Atmosphäre als entscheidende Größe. Darüber hinaus hielten die Autoren fest, dass starke nächtliche Inversionen, die durch kalte Hangabwinde induziert wurden, in Alpentälern durchaus den gesamten Tag anhalten können.

Wotawa et al. (2000) untersuchten den Zusammenhang zwischen den Stickoxidemissionen

der Autobahn und den gemessenen Stickoxidwerten an den Messstellen Hall in Tirol und Gärberbach. Dabei konnte bestätigt werden, dass die Korrelation zwischen Emissionen und Immissionen sehr gering ausfällt. Die Autoren merkten weiters an, dass die Akkumulation und die Rezirkulation der Schadstoffe von großer Bedeutung sind, besonders in einem Alpental. Zudem konnte der negative Effekt des kleineren Verdünnungspotentials einer Talatmosphäre im Vergleich zu einer Flachlandstation bestätigt werden.

Mit einer quantitativen Simulation des NO_x -Verlaufs während einer Belastungsperiode im Winter beschäftigte sich Griesser (2003). Dabei mussten nur geringe Skalierungen der Eingangsparameter vorgenommen werden. Ein chemisches/photochemisches 3-Komponentenmodell lieferte hingegen keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Schnitzhofer (2005) untersuchte den zeitlichen Verlauf der Schadstoffkonzentrationen an der Autobahn A12. Dabei kam er u.a. zum Schluss, dass der Schwerverkehr hauptsächlich für die NO_x -Emissionen verantwortlich war. Darüber hinaus bestätigte er, dass sich die Immissionssituation während den Sommermonaten, wegen des raschen Abtransports der Schadstoffe, gänzlich anders darstellt als im Winter mit geringer Turbulenz in der Atmosphäre.

Die aktuellsten und umfangreichsten Untersuchungen zu diesem Themengebiet fanden 2005/06 im Rahmen von ALPNAP (*"Monitoring and Minimisation of Traffic-Induced Noise and Air Pollution Along Major Alpine Transport Routes"*) statt. ALPNAP war ein von der Europäischen Union unterstütztes Projekt, in dem die grenzüberschreitenden Auswirkungen des Verkehrs untersucht worden waren. Zielgebiet intensiver Untersuchungen war dabei das Unterinntal bei Schwaz/Vomp. Dort wurden während des Messzeitraums aufwändige Messungen der Luftqualität, der meteorologischen Gegebenheiten und der Lärmsituation getätigt. Der daraus resultierende Projektbericht (Heimann et al. 2007) gibt einen umfangreichen Einblick in die Thematik des Verkehrs in Alpentälern und dessen Auswirkungen auf die Gesundheit. Außerdem wurde darin einer ausführlichen Abhandlung der meteorologischen Einflussgrößen viel Platz eingeräumt. Der vollständige Projektabschlussbericht ist unter www.alpnep.org zu finden.

Aus diesem Projekt und den parallel laufenden Untersuchungen INNAP (*"Boundary Layer Structure in the Inn Valley During High Air Pollution"*) und INNOX (*" NO_x -structure in the Inn Valley during High Air Pollution"*) entstanden einige Veröffentlichungen. Schäfer et al. (2008) beschrieben den meteorologischen Einfluss auf die Schadstoffbelastung im Inntal. Darin wird darauf eingegangen, dass besonders bei winterlichen Hochdruckwetterlagen eine Akkumulation der Schadstoffe in den untersten Schichten der Atmosphäre stattfindet, wohingegen nur Frontdurchgänge und Föhnfälle die Durchmischung unterstützen. Den eindeutigen Einfluss des Verkehrsvolumens auf die Schadstoffkonzentrationen nahe an der Autobahn und deren zeitliche Variabilität (10-mal höher während den Morgenstunden als in der Nacht) zeigten Schäfer et al. (2006).

Gohm et al. (2006), Harnisch (2007) und Harnisch et al. (2009) beschäftigten sich mit der Struktur der Mischungsschicht und der Verteilung von Aerosolen bei hoher Schadstoffbelastung, abgeleitet aus Flugzeugmessungen. Es zeigte sich dabei eine gewisse Asymmetrie der Schadstoffkonzentration im Talquerschnitt. Entlang des sonnenbeschienenen Hanges konnte belastete Luft durch thermisch angetriebene Hangwinde in höhere Schichten der Talatmosphäre gelangen als auf der gegenüberliegenden Schattenseite.

Auch eine Reihe von Diplomarbeiten wurde im Rahmen der erwähnten Projekte erstellt. Wittig (2007) ging in ihrer Arbeit vor allem auf die herrschenden Wetterlagen und die dabei gemessenen Belastungen ein, die räumliche Verteilung von PM_{10} wurde von Staszewski (2008) analysiert. Es stellte sich im Rahmen dieser Arbeit heraus, dass Inversionen während einer Hochdruckphase tendenziell entlang des Hanges höher lagen als in der Talmitte.

Eine Untersuchung von verschiedenen Methoden zur Bestimmung von Mischungsschichthöhen ist die Arbeit von Kollmann (2008). Daraus geht hervor, dass die Analyse des vertikalen Temperaturgradienten, kombiniert mit Untersuchungen der potentiellen Temperatur und der vertikalen Verteilung von PM_{10} , die beste Bestimmungsmethode war. Außerdem merkte er an, dass das "Richardson-Kriterium" zur Bestimmung der Mischungsschichthöhe kein zufriedenstellendes Ergebnis lieferte. Lehner (2008) näherte sich dem Thema von der theoretischen Seite und modellierte die Ausbreitung von Schadstoffen in alpiner Umgebung mittels idealisierter Modelltopographie in einem zwei-dimensionalen Raum.

Eine Unterscheidung der Transporte von Luftschadstoffen in drei Mechanismen wurde in Gohm et al. (2009) getroffen. Diese Transporte unterteilen sich demnach in eine Dichteströmung, in Talwinde und in Hangwinde. Die unterschiedliche Bestrahlung der Hänge führt zu einer asymmetrischen Erwärmung der Talatmosphäre und zu Hangaufwinden, die auch im Winter stark genug sein können um Schadstoffe zu transportieren. Aus diesem Grund können auch weit von den Emissionsquellen entfernt liegende Hanglagen von Luftschadstoffen beeinträchtigt werden. Darüber hinaus ist es möglich, dass selbst bei einer sehr stabil geschichteten Talatmosphäre starke horizontale Gradienten der Luftbelastung auftreten. Dies führt dazu, dass die Repräsentativität von Punktmessungen für ein größeres Untersuchungsgebiet nicht mehr gegeben ist. Daher empfehlen die Autoren flugzeuggetragene Messungen als Ergänzung zu Punktmessungen am Talboden.

Eine erste Gegenüberstellung derselben beiden Winterperioden, die auch in dieser Arbeit betrachtet werden, ist in Grundzügen in der Arbeit von Schäfer et al. (2008) zu finden. Darin werden vor allem die sehr unterschiedlichen Werte der Immission im Laufe der zwei Winterperioden und die verschiedenen Wintercharakteristiken erwähnt.

1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die beiden Winterperioden 2005/06 und 2007/08 mit geeigneten Methoden bezüglich Schadstoffe und Meteorologie zu vergleichen. Dabei soll aus den verfügbaren Daten eine umfangreiche meteorologische Abhandlung der herrschenden Situationen erstellt werden. Unter anderem fließen dabei die Wetterlagen, Windverhältnisse, Stabilitäten der Talatmosphäre und die vorkommenden Niederschlagsereignisse ein. Hinzu kommt die Analyse der Schadstoffkonzentrationen von NO, NO₂ und Feinstaub PM₁₀.

Ganz besonders soll auf die Wirkung der Meteorologie auf die Schadstoffbelastungen sowohl in zeitlicher als auch in räumlicher Auflösung eingegangen werden. Darüber hinaus sollen lokale Unterschiede von Luftbelastungen an autobahnnahen Standorten behandelt werden. Außerdem sind die Unterschiede, aber auch die Gemeinsamkeiten, beider Winter herauszuarbeiten. Als Schlusspunkt soll anhand eines einfachen Modells die Schadstoffbelastung an einem ausgewählten Punkt im Talquerschnitt modelliert werden.

Das **Kapitel 2** dient dazu, einen Überblick über die maßgebende Meteorologie, das Grundlegende in punkto Schadstoffe und die gesetzlichen Vorgaben zu erhalten. **Kapitel 3** gibt eine kurze Zusammenfassung über die Messprojekte, das Messgebiet, die Messgeräte und einen Überblick über die gewonnenen und verwendeten Daten. Eine klimatologische Einordnung, eine Zusammenstellung von Tagen mit Grenzwertüberschreitungen und eine Strömungslagenklassifikation sind in **Kapitel 4** zu finden.

Die folgenden Kapitel wurden thematisch zum Zwecke der Übersicht gruppiert. Zuerst wird der wichtige Eingangsparameter der Emission behandelt werden, anschließend die gemessenen Immissionen. Die Verbindung zwischen den beiden Parametern sollte dann anschließend anhand der meteorologischen Analysen entwickelt werden.

Das erste **Hauptkapitel 5** ist daher den Schadstoffen gewidmet. Dabei wird auf die Emissionen und auf die Immissionen von Stickoxiden und Feinstaub im Untersuchungsgebiet eingegangen. Der meteorologische Hauptteil befindet sich im folgenden **Hauptkapitel 6**, im Mittelpunkt stehen Wind- und Stabilitätsanalysen sowie Niederschlags- und Strahlungsuntersuchungen. Abgeschlossen wird dieser Abschnitt mit einer Analyse der Mischungsschichthöhen. Das **Hauptkapitel 7** beschäftigt sich mit den räumlichen Unterschieden in der Schadstoffbelastung und den dazugehörigen meteorologischen Hintergründen.

Spezialuntersuchungen von DOAS-Messungen und nähere Betrachtungen von Hochdruckphasen und Zeiträumen mit variablen Wetterlagen bilden den Kern des **Kapitels 8**, schematische Analysen der Zusammenhänge von Tagesmittelwerten runden diesen Abschnitt ab. Schließlich wird ein einfaches Box-Modell zur Bestimmung von Schadstoffkonzentrationen

nen an einem definierten Punkt im Talquerschnitt in **Kapitel 9** vorgestellt und angewendet. Einer Zusammenfassung der Arbeit inklusive Ausblick ist das abschließende **Kapitel 10** gewidmet.

1.4 Vorbemerkungen zu den Analysen

Das Jahr 2008 war ein Schaltjahr, deswegen gilt es bei allen Analysen zu beachten, dass zum Zwecke der Vergleichbarkeit mit dem Normaljahr 2006 der Schalttag 29.02.08 generell nicht beachtet wurde. Der Untersuchungszeitraum ist jeweils analog zur meteorologischen Definition des Winters mit den Monaten Dezember, Jänner und Februar fix festgelegt. Um die Zusammenhänge leichter verständlich zu machen, wurde außerdem versucht ein klares Farbschema zu verwenden. Daher sind beinahe alle den Winter 2005/06 betreffenden Ergebnisse graphisch in blau gehalten, die Farbe rot wurde für den Winter 2007/08 verwendet.

Darüber hinaus ist der Winter 2005/06 zum Zwecke der Übersichtlichkeit in den Graphiken meist mit "2006" beschrieben, der Winter 2007/08 mit "2008". Generell gilt, dass die angegebenen Zeiten, sofern nicht anders angegeben, in UTC dargestellt sind.

Bezüglich der Konzentration von NO_x aus der Summe von NO und NO_2 wurde die Summationsformel nach den geltenden österreichischen Bestimmungen verwendet, sofern nicht anders angegeben. Dabei muss der Anteil des NO massenmäßig wie NO_2 behandelt werden. Nähere Angaben zur genauen Umrechnung sind in Kapitel 2 zu finden.

Kapitel 2

Meteorologie, Luftschadstoffe und gesetzliche Vorgaben

Bevor auf die einzelnen Themengebiete eingegangen werden kann, müssen einige Begriffe näher erläutert und definiert werden. Der Lebenszyklus der Luftschadstoffe beginnt mit der Freisetzung von Gasen bzw. Partikeln in die Atmosphäre, der Emission (Emeis 2000). Es folgt die Transmission, die durch Diffusion und Advektion bzw. chemische Umwandlung beeinflusst wird. Diese Prozesse hängen wiederum von den meteorologischen Bedingungen ab (Mayer 2000). Der lokal auftretende bzw. gemessene Eintrag von Spurenstoffen in ein Gebiet heißt Immission. Besonders viele Grenzwerte sind danach ausgerichtet worden, meist wird die Immissionskonzentration durch lokale Messstationen ermittelt. Schlussendlich können die Schadstoffe durch feuchte oder trockene Deposition (Ausregnen, Auswaschung bzw. Ablagerungen) wieder aus der Atmosphäre entfernt werden.

Das folgende Kapitel dient zur Beschreibung der wichtigsten meteorologischen Parameter, die auf die Schadstoffbelastung einen Einfluss ausüben. Das Spektrum der beeinflussenden Faktoren reicht von der Großwetterlage bis zur lokalen Grenzschicht und den Windsystemen in einem Gebirgstal. Weiters besteht dieser Abschnitt aus einem kurzen Abriss über die grundlegenden chemischen Zusammenhänge in der Atmosphäre. Im letzten Teil finden sich eine Zusammenstellung der gesetzlichen Rahmenbedingungen des österreichischen bzw. europäischen Gesetzgebers und eine Zusammenfassung der Veränderungen der Gesetzeslage zwischen den beiden Messperioden.

2.1 Meteorologie

2.1.1 Atmosphärische Grenzschicht

Die Atmosphäre der Erde kann in verschiedene Schichten eingeteilt werden, wobei die untersten ca. 11 *km* mit dem Begriff Troposphäre benannt werden. Jedoch wird auch diese Schicht differenziert. Jene Zone, bei der die Oberflächeneffekte mit abnehmender Höhe

immer größeren Einfluss erlangen, heißt atmosphärische Grenzschicht. Deren Höhe liegt im Mittel über Land bei 2 km , diese kann jedoch bei extrem stabiler Schichtung auf bis zu 10 m abnehmen (Foken 2006). Nach oben hin ist sie durch eine Temperaturinversion abgegrenzt. Die Abbildung 2.1 aus Stull (2000) zeigt ergänzend eine schematische Darstellung der untersten Atmosphärenschichten. Stull (2000) beschreibt die atmosphärische Grenzschicht damit, dass diese tägliche Variationen der Temperatur, der Feuchte, des Windes und der Verschmutzung aufweist.

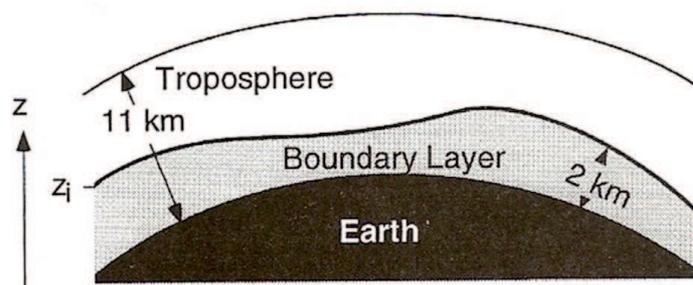


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der untersten Atmosphärenschichten der Erde (Earth) nach Stull (2000), der englische Begriff "Boundary Layer" beschreibt die atmosphärische Grenzschicht (bis zu 2 km Höhe). Diese ist zudem Teil der Troposphäre (Troposphere), die durchschnittlich bis in eine Höhe von 11 km reicht.

Neben der Reibung wirkt auch die Erwärmung von der Erdoberfläche in die Grenzschicht ein. Die Intensität der Erwärmung hängt maßgeblich von der Art der Bodenbeschaffenheit ab. Bei einer sauberen, schneebedeckten Unterlage liegt die Albedo bei 0.75 bis 0.98 (Werte aus Geiger et al. 1995). Das bedeutet, dass bis zu 98 % der kurzwelligigen Sonnenstrahlung wieder reflektiert werden und damit nicht zur Erwärmung der Bodenoberfläche beitragen können.

Bei Gras liegt der Albedowert weit niedriger bei 0.18-0.20, damit absorbiert eine Grasoberfläche weit mehr Strahlung und kann damit die Grenzschicht viel intensiver erwärmen. Aus den daraus resultierenden Unterschieden in der Energiebilanz und den unterschiedlichen Einstrahlungsintensität während des Jahres ist die winterliche Grenzschicht im Mittel um einiges niedriger als in den Sommermonaten.

Idealerweise zeigt die Grenzschicht einen definierten Tagesgang. Nach Sonnenaufgang erwärmen sich die untersten Luftschichten durch Wärmetransporte von der Oberfläche, dabei kann sich die aus der Nacht vorhandene Bodeninversion meist auflösen. Die während des Tages entstehende, gut durchmischte Schicht, wird konvektive Grenzschicht oder Mischungsschicht genannt (Emeis 2000). Schon kurz bevor die Sonne untergeht bildet sich am Boden bereits wieder die Bodeninversion (stabile Grenzschicht) aus (Foken 2006). Die darüber liegende, aus der Mischungsschicht entstandene Zone, wird als Residual-Schicht bezeichnet, Abbildung 2.2 (Stull 2000) illustriert diesen Tagesgang anschaulich.

Jedoch sollte auch berücksichtigt werden, dass in topographisch komplexem Gelände durch lokale Effekte, wie z.B. Abschattung, die Realität von der Idealvorstellung mehr oder weniger abweicht. Besonders synoptisch induzierte Vorgänge stören dieses Schema beträchtlich. Im Speziellen führen Frontdurchgänge, stärkere Niederschläge und Windergebnisse zu einer Durchmischung der Talatmosphäre und damit auch zu einer plötzlichen Änderung des zur Verfügung stehenden Mischungsvolumens. Niederschläge waschen außerdem Schadstoffe aus der Luft aus, wobei Unterschiede im Auswaschungspotential zwischen Regen und Schnee (geringeres Auswaschungsvermögen) bestehen.

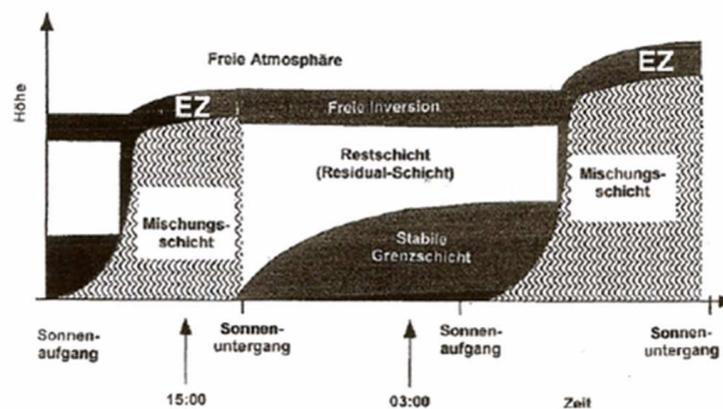


Abbildung 2.2: Illustration eines idealisierten Tagesganges einer Grenzschicht, veröffentlicht von Stull (2000), verändert von Foken (2006). Angetrieben wird dieser Zyklus vor allem durch die einfallende Strahlung der Sonne.

Zusammengefasst ist demnach für die Schadstoffkonzentrationen vor allem die Höhe der Mischungsschicht entscheidend. Je niedriger diese liegt, umso weniger Luftvolumen steht für die Verdünnung der Schadstoffe zur Verfügung. Verstärkt wird dieser Effekt besonders in einem Tal (Volumseffekt).

2.1.2 Windsysteme in einem Tal

Eine offensichtlich wichtige Einflussgröße ist der Wind. Zu dieser Thematik gibt es ebenfalls ein großes Potential an Literatur. Obwohl diese Arbeit nicht primär die Windeinflüsse auf die Schadstoffbelastung zum Inhalt hat, wird trotzdem kurz auf die grundlegenden Mechanismen eingegangen. Die Erklärung von Feinheiten bzw. speziellen Effekten treten demnach in diesem Rahmen in den Hintergrund.

Schon Defant (1949) untersuchte in seiner Arbeit die verschiedenen Windsysteme in einem Tal. Das begrenzte Luftvolumen in einem Gebirgstal und die nahen Hänge als Heizquelle haben zur Folge, dass Luftmassen im Tal viel effektiver erwärmt werden können als die entsprechenden Atmosphärenschichten im Gebirgsvorland. Dabei entstehen horizontale Gradienten der Temperatur und des Drucks. Außerdem steigt die wärmere Luft in Folge der Erwärmung entlang der Hänge auf und muss durch Luftmassen aus dem

Alpenvorland zum Zweck des Massenausgleichs ersetzt werden. Aus diesen Effekten resultiert schlussendlich eine ins Tal hineingerichtete Strömung, der Taleinwind.

Während den Nachtstunden fehlt hingegen die atmosphärische Heizung, die Luftmassen kühlen sich ab. Jedoch erfolgt eine schnellere Abkühlung im Talinneren als im Flachland - der Druckgradient dreht sich um. Als Folge dessen kommt es auch zu einer Umdrehung des Taleinwindes auf einen Talauswind.

Talwinde hängen damit mit Windsystemen im Tal zusammen. Die sich während der Nacht abkühlenden oberflächennahen Luftmassen fließen entlang der Hänge ab, sinken ins Tal hinab und tragen somit zum Talauswind bei. Während des Tages passiert genau das Gegenteil. Nachdem die Sonne über den Horizont gestiegen ist, erwärmt sich die Luft über exponierten Hängen und steigt auf. Entsprechend verstärkt der Hangaufwind den Taleinwind, da die von den Hangaufwinden abtransportierte Luft ersetzt werden muss.

Die Mächtigkeit solcher Hangwindssysteme hängt entscheidend von der Einstrahlung, der spezifischen Topographie, der Absorption der Bodenoberfläche und der Intensität der Bodeninversion ab. So kann es durchaus vorkommen, dass sommerliche Hangwinde bis in Gipfelregionen vordringen können (solange keine topographische Hindernisse vorliegen), wohingegen winterliche Hangaufwinde im Normalfall geringere Intensität haben.

Die Tal- und Hangwinde haben dementsprechend auch großen Einfluss auf die Schadstoffbelastungen in einem Tal. Die Dispersion von Schadstoffen hängt, wie vorher erwähnt, laut Stull (2000) maßgeblich von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung, der thermischen Schichtung und der atmosphärischen Turbulenz ab. Jedoch ist die Schichtung während der Wintermonate oft stabiler als in den Sommermonaten, damit ist auch die Intensität der Hangwinde während des Winters schwächer als im Sommer. Daher können diese im Winter nur eingeschränkt einen Austausch der Schadstoffe unterstützen.

Oftmals werden Talwinde durch größerskalige synoptische Strömungen überlagert oder unterdrückt, die jedoch im Mittel höhere Windgeschwindigkeiten aufweisen als die Talwinde. Daher können diese besser zu einem effektiven Austausch von belasteten Luftmassen beitragen. Besonders bis ins Tal durchgreifende Föhnwinde führen zu einer Durchmischung bis in große Höhen. Vereinfacht gesagt sind Föhnwinde Luftmassen, die bei entsprechender Anströmung eines Hindernisses aus größeren Höhen in Täler vordringen können. Jene bodennahen Luftmassen, die auf der Luvseite lagern, sind hingegen nicht betroffen. Außerdem kondensieren die Luftmassen, die auf der Luvseite zum Aufsteigen gezwungen werden, unter Umständen in einer bestimmten Höhe aus. In der Folge führt dies auf der Leeseite zu einer trockenadiabatischen Erwärmung der Temperatur und damit im Vergleich zur Luvseite zu höheren Temperaturen beim Absteigen der Luft.

Eine zweite Art des Föhns tritt bei gradientschwachen Lagen auf und ist durch thermische Unterschiede auf beiden Seiten des Gebirgshauptkamms verursacht. Dabei liegen kältere Luftmassen mit höherem Druck auf der südlichen Seite des Alpenhauptkamms und im Vergleich dazu wärmere auf der gegenüberliegenden Seite. Schlussendlich fließt die im Süden lagernde Luft aus höheren Schichten entlang des Wipptals nach Norden (in diesem Fall). Im Gegensatz zum dynamischen Föhn hat dieser seichte Föhn nur eine maximale Vertikalausdehnung von 3 km. Weitere grundlegende, umfangreiche Informationen zum Thema Föhn sind unter anderem in Kuhn (1989) und Zängl (1999) zu finden.

Dem Föhn entgegen wirkt eine stabile Schichtung der Atmosphäre auf der Leeseite. Es ist den Luftmassen demnach nicht immer möglich bis ins Tal durchzudringen. Besonders im Winter ist es plausibel, dass in Mittelgebirgslagen Föhnströmungen vorherrschen, jedoch am Talboden die windstille Kaltluft lagert. Dringt der Föhn bis ins Tal durch, wird dies als Föhndurchbruch bezeichnet. Besonders bei Betrachtung der vertikalen Temperaturgradienten sollten die Föhneffekte demnach beachtet werden. Föhnströmungen führen im Allgemeinen zu einer sehr guten Durchmischung der Talatmosphäre und damit auch zu einer Verringerung der Luftbelastung mit Schadstoffen.

Das Untersuchungsgebiet bei Schwaz/Vomp liegt im Unterinntal und ist daher nicht mehr direkt von absteigenden Luftmassen aus südlicher Richtung betroffen. Jedoch fließt die Föhnluft aus dem Raum Innsbruck kommend das Unterinntal hinab und tangiert deshalb das Untersuchungsgebiet als Wind aus westlicher Richtung. Es kann allerdings vorkommen, dass die Föhnluft nicht bis ins Inntal vordringen kann und daher in höheren Schichten der Talatmosphäre ausfließt. Es entsteht dabei die Situation, dass sich zum Beispiel die Station Vomperberg in Föhnluft befindet, die Station Schwaz aber nicht.

2.2 Luftschadstoffe

In dieser Arbeit werden aufgrund der Datenlage während beider Winter vor allem Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂) und Feinstaub (PM₁₀) näher betrachtet. Aus diesem Grund folgen eine kurze Beschreibung dieser Schadstoffkomponenten und eine chemische Zusammenfassung über Bildung und Abbau derselben.

2.2.1 Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂)

Die Verbrennung von fossilen Brennstoffen ist, global gesehen, die größte Quelle der Luftschadstoffe CO, CO₂, NO_x und SO₂ (Hobbs 2000), wobei der Begriff NO_x die Summe aus NO und NO₂ beschreibt. Werden handelsübliche Treibstoffe verbrannt, entsteht unter anderem das geruchslose, aber giftige Gas NO. Aufgrund der hohen Temperaturen bei der Verbrennung oxidiert dabei molekularer Stickstoff (N₂) zu NO. Die chemische Bildung von NO aus den Ausgangsstoffen O₂ und N₂ wird bei einer Temperatur von unter 4500 K laut Gleichungen 2.1 bis 2.3 beschrieben (Hobbs 2000).



Diese Bildung von thermischem NO ist sehr temperaturabhängig, das Maximum der NO-Produktion liegt während Gleichgewichtsbedingungen bei einer Temperatur von $\geq 3500 \text{ K}$. Da sich die Temperatur der Gase schnell an die Umgebungsluft angleicht, ist die Intensität der inversen Reaktion weit geringer. Daher bleibt die hohe NO-Konzentration beim temperaturinduzierten hohen Wert erhalten.

Eine weitere Möglichkeit der NO-Bildung während der Verbrennung ist die Oxidation von stickstoffhaltigen Treibstoffkomponenten (Hobbs 2000). Die größten antropogenen Emittenten von NO_x sind die Industrie, der Betrieb von Kraftwerken und der Autoverkehr. Jedoch gibt es auch einige natürliche Quellen von Stickoxiden, wie die NO-Bildung bei Blitzentladungen, die Oxidation von biogen erzeugtem Ammoniak durch OH sowie weiters das Ausgasen von NO und NO_2 aus bestimmten Bodentypen und aus dem Ozean (Fabian 1992), die aber im Rahmen dieser Arbeit keine Rolle spielen.

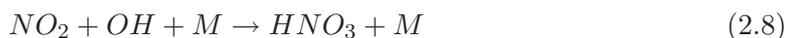
Stickstoffmonoxid kann sich sehr schnell mittels Ozon zum rotbräunlich gefärbten, stechend riechenden und giftigen NO_2 umwandeln. Der begrenzende Faktor dabei ist das Vorhandensein von Sonnenlicht und Katalysatoren. Die chemischen Gleichungen 2.4 bis 2.6 beschreiben die Photolyse von NO_2 , die Bildung von Ozon und die anschließende Reaktion von NO mit O_3 wieder zu NO_2 (Hobbs 2000).



Aufgrund den vorher angesprochenen limitierenden Faktoren, weisen die Gase NO, NO_2 und O_3 einen Zusammenhang auf, der tageszeitlich schwankt. Die Abbildung 2.3 aus Hobbs (2000) zeigt jenes Zusammenwirken beim Photochemischen Smog in Los Angeles.

Die zweite im Verkehr begründete Quelle von NO_2 ist die direkte Emission aus dem Auspuff von Kraftfahrzeugen. Besonders der vermehrte Einsatz von Dieselfahrzeugen mit einem Oxidationskatalysator sowie die chemischen Vorgänge in den Partikelfiltern lassen den Anteil von NO_2 an den NO_x -Emissionen eines Fahrzeuges steigen (Carslaw 2005).

Eine wichtige Senke für NO bzw. NO₂ ist die Überführung der Gase in die farblose Salpetersäure (HNO₃). Zuerst findet dabei die schon oben erwähnte Umwandlung von NO zu NO₂ statt, anschließend folgt die Reaktion mit einem OH-Radikal zu HNO₃ (Gleichung 2.7 und 2.8). Diese wird mit dem Niederschlag aus der Atmosphäre ausgewaschen (Fabian 1992) bzw. kann die Salpetersäure in der Luft auch zu NH₄NO₃ reagieren und sich dann an Feinstaubpartikel anlagern.



Zusammengefasst ist der Abbau von NO₂ daher einerseits durch Photolyse bestimmt, andererseits auch durch Oxidation von NO₂ zu Salpetersäure. Für den Tagesverlauf bedeutet dies, dass die NO₂-Konzentration in den Morgenstunden aufgrund der fehlenden Sonneneinstrahlung bzw. niederen Ozonkonzentrationen sehr hoch ist, jedoch sich mit dem Beginn des Eintrages von kurzwelliger Strahlung durch Photolyse und Oxidation im Tagesverlauf verringert. In den Abendstunden kommt meist, wiederum aufgrund der fehlenden Sonneneinstrahlung, ein weiteres Maximum vor.

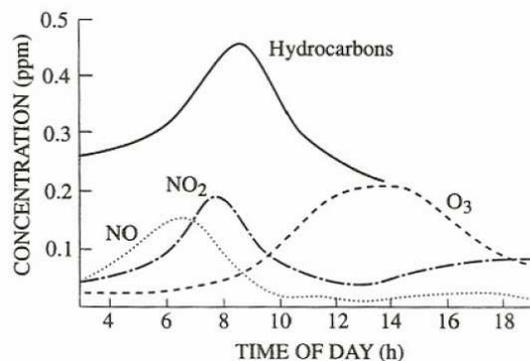


Abbildung 2.3: Photochemischer Smog in Los Angeles nach Hobbs (2000). Der tageszeitliche Zusammenhang von NO, NO₂ und O₃ ist deutlich zu erkennen - die Maxima der Stickoxide liegen in den Morgenstunden, das Maximum von Ozon findet sich nach der Mittagszeit - einhergehend mit einem Minimum von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid.

2.2.2 Feinstaub (PM₁₀)

Als Feinstaub wird im allgemeinen Gebrauch PM₁₀ (particulate matter) gemeint. Unter diese Klassifikation fallen Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 μm (genaue Definition in der EU-Richtlinie 1999). Unterschieden wird in primäre Partikel, diese werden an den Schadstoffquellen direkt ausgestoßen, und sich erst in der Atmosphäre bildende Sekundärpartikel. Feinstaub hat große Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, besonders die Atemwege sind davon betroffen. Nach neuen Untersuchungen hat Feinstaub auch Wirkung auf das Herz-Kreislaufsystem (Spangl et al. 2008).

Feinstäube entstehen entweder bei Verbrennungsprozessen, durch mechanischen Abrieb, aufgrund von Aufwirbelungen und durch luftchemische Prozesse in der Atmosphäre. Jedoch auch Pollen und Pilzsporen bzw. mineralische Stäube tragen zur Feinstaubbelastung bei. Für die Hauptemissionen sind Feuerungsanlagen und der Verkehr, besonders Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter, verantwortlich. Für das Inntal existiert bereits eine Untersuchung von Baumann et al. (2004), darin wird der Anteil des Straßenverkehrs an der PM_{10} -Gesamtemission an einem Wintertag mit 35 % festgelegt, der Beitrag des Mineralstoffabbaus mit 16 % beziffert. Untersuchungen der Technischen Universität Graz klassifizieren den Anteil des Straßenverkehrs mit 40 % (Heimann et al. 2007).

2.2.3 Maßeinheiten und Umrechnungen

Grundsätzlich gibt es zwei gängige Maßeinheiten zur Klassifizierung der Schadstoffbelastung. Zum einen kann die Konzentration als Masse pro Volumen Luft [$\mu g m^{-3}$] angegeben werden, zum anderen als Mischungsverhältnis von Schadstoffmolekülen pro Anzahl der Gesamtmoleküle der Luft [ppb - parts per billion, Teilchen pro 10^9 Teilchen bzw. ppm - parts per million, Teilchen pro 10^6 Teilchen]. Sehr viele Schadstoffgrenzwerte werden aber in der Einheit [$\mu g m^{-3}$] definiert, obwohl die meisten Messgeräte in Volumen pro Volumen messen [$ppbV$]. Aus diesem Grund sind öfters Umrechnungen nötig, die Standards dazu legte die Europäische Kommission u.a. in der EU-Richtlinie (1999) fest. Als Referenzbedingungen gelten ein Druck von 1013.2 hPa (p) und eine Temperatur von 293.0 K (T). Über die Dichteformel und das Gasgesetz kann die Umrechnungsgleichung von [ppb] in [$\mu g m^{-3}$] berechnet werden (Gleichung 2.9), dabei gilt $T_0 = 298.15$ K, $p_0 = 1013.25$ hPa, $V_{mol} = 24.4$ dm³ mol⁻¹ (Molvolumen) und M_{Gas} = Molmasse des Gases.

$$1 [ppb] = \frac{T_0 \cdot M_{Gas} \cdot p}{V_{mol} \cdot p_0 \cdot T} [\mu g m^{-3}] \quad (2.9)$$

Die Umrechnungsfaktoren von NO und NO₂ bei 293.0 K und 1013.2 hPa sind aufgrund obiger Ausführung die folgenden:

- NO [$\mu g m^{-3}$] = NO [ppb] · 1.24715
- NO₂ [$\mu g m^{-3}$] = NO₂ [ppb] · 1.9123
- NO_x [ppb] = NO₂[ppb] + NO [ppb]

Bei NO_x muss beachtet werden, dass nach EU-Richtlinien die Molekularmasse von NO auf NO₂ bezogen wird, bei fast allen Berechnungen von NO_x in dieser Arbeit wird demnach die folgende Umrechnung verwendet:

- NO_x [$\mu g m^{-3}$] = NO₂ [$\mu g m^{-3}$] + NO [$\mu g m^{-3}$] / 1.24715 · 1.9123
- NO_x [$\mu g m^{-3}$] = NO_x [ppb] · 1.9123

Sollte die Dichte von NO_x als die direkte Summe der Dichten von NO und NO₂ verwendet werden, ist dies explizit im Text angeführt.

2.3 Gesetzliche Vorgaben

Gegen Ende des Jahres 1996 beschloss der Europäische Rat eine Richtlinie, die die Grundlage für eine gemeinsame Strategie im Bereich der Luftqualität bilden soll (EU-Richtlinie 1996). In Exekution dieser Richtlinie folgte drei Jahre später ein weiterer Beschluss des Rates (EU-Richtlinie 1999), mit diesem wurden Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und sonstige Stickstoffoxide, Feinstaub und Blei sowie Alarmschwellen für die Konzentrationen von Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid in der Luft festgesetzt.

Österreich schaffte mit dem Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) im Jahre 1997 gesetzliche Grundlagen im Bereich der Luftreinhaltung (Bundesgesetzblatt 1997). Darin ist der dauerhafte Schutz vor schädlichen und unzumutbar belästigenden Luftschadstoffen und die Reduzierung der Immission von Luftschadstoffen als Ziel verankert. Ebenfalls wird darin den Richtlinien der Europäischen Union Rechnung getragen.

Da in den folgenden Jahren Grenzwertüberschreitungen vorkamen, setzte die Tiroler Landesregierung Maßnahmen zur Eindämmung der Luftbelastungen (www.tirol.gv.at 2009) um. Bereits 2004 wurde das bestehende Nachtfahrverbot auf der A12 im Unterinntal für Lastkraftwagen oder Sattelkraftfahrzeuge mit einer höchsten zulässigen Gesamtmasse von mehr als 7.5 t für die Wintermonate auf die Zeit von 20 Uhr bis 05 Uhr MEZ (Werktag) bzw. 23 Uhr bis 05 Uhr MEZ (Sonn- und Feiertag) ausgedehnt (Landesgesetzblatt 2004). In der gleichen Verordnung wurden abgasarme Lastkraftwagen der Klassen EURO-4 und EURO-5 vom Nachtfahrverbot ausgenommen.

Zusätzlich gilt schon seit dem Jahre 1961 auf österreichischen Straßen ein Wochenendfahrverbot für Lastkraftwagen mit einer zulässigen Nutzlast über 3.5 t und LKW mit Anhänger (Bundesgesetzblatt 1960). Aktuell wird das Fahrverbot am Samstag von 15 Uhr MEZ bis 24 Uhr MEZ und an Sonn- und Feiertagen von 0 MEZ bis 22 Uhr MEZ festgesetzt. Seit 1989 ist eine Höchstgeschwindigkeit auf der Inntalautobahn zwischen 22 Uhr MEZ und 5 Uhr MEZ gesetzlich verankert, diese liegt für Omnibusse bei 90 kmh^{-1} , für Lastkraftfahrzeuge mit einem höchsten zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 7.5 t bei 60 kmh^{-1} und für die übrigen Kraftfahrzeuge bei 110 kmh^{-1} (Bundesgesetzblatt 1989).

In einer weiteren Verordnung vom 23.10.2006 (Landesgesetzblatt 2006a) verordnete der Landeshauptmann von Tirol eine generelle Geschwindigkeitsbeschränkung von 100 kmh^{-1} auf der Inntalautobahn zwischen der Staatsgrenze zu Deutschland und Zirl. Im darauffolgenden Jänner folgte ein Fahrverbot besonders schadstoffreicher Schwerfahrzeuge (Landesgesetzblatt 2006b).

Mit 8. November 2007 trat eine neue Verordnung in Kraft, mit der auf der A12 Inntal Autobahn zwischen den Gemeinden Unterperfluss und Ebbs eine immissionsabhängige Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit eingeführt wurde (Landesgesetzblatt

2007). Sobald der errechnete Immissionsbeitrag der PKW einen definierten Schwellwert oder die gesamte Immissionsbelastung den Warnwert überschreitet, wird die generell zulässige Höchstgeschwindigkeit mittels Verkehrsbeeinflussungsanlage mit 100 kmh^{-1} festgesetzt. Für das Gebiet Vomp wurde der Schwellwert mit $39 \mu\text{gm}^{-3}$ definiert, der Warnwert mit $150 \mu\text{gm}^{-3}$ festgesetzt. Alle diese Werte basieren auf Halbstundenwerten.

Für weitergehende Information zur Funktionsweise und Aufbau des telematischen Systems der Asfinag wird auf das Landesgesetzblatt (2007) und auf einen Artikel von Thudium et al. (2009) verwiesen. Außerdem wurde das angesprochene Gesetz am 10. Februar 2009 durch eine veränderte Version (Landesgesetzblatt 2009) ersetzt.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen zwischen den beiden Untersuchungsperioden teilweise geändert haben. Im Winter 2005/06 gab es auf der Inntalautobahn im Bereich Vomp während des Tages keine permanent vorgeschriebene Geschwindigkeitsbegrenzung unterhalb der gesetzlich festgelegten Höchstgeschwindigkeit von 130 kmh^{-1} , im zweiten Winter aber ein variables Tempolimit je nach Belastung mit NO_2 . Außerdem waren besonders schadstoffintensive Sattelkraftfahrzeuge ($> 7.5 \text{ t}$ höchst zulässige Gesamtmasse) der Klassen EURO-0 und EURO-1 ab 01.01.2007 mit einem Fahrverbot belegt.

In Tabelle 2.1 findet man eine Zusammenstellung der verschiedenen Grenz-, Alarm- und Zielwerte von NO_2 und PM_{10} nach dem Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L, für weitere Informationen siehe Bundesgesetzblatt (1997)), in Tabelle 2.2 die Empfehlungen der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW). Darin wird jeweils übereinstimmend der Grenzwert von NO_2 zum Schutz der menschlichen Gesundheit mit $200 \mu\text{gm}^{-3}$ (Halbstundenmittelwert) beschrieben. Das Immissionsschutzgesetz-Luft setzt zudem den Grenz- und Zielwert für PM_{10} bei einem Tagesmittelwert von $50 \mu\text{gm}^{-3}$ fest. Als Zielwert für NO_2 wird ein Tagesmittelwert von $80 \mu\text{gm}^{-3}$ genannt.

	Halbstunden-Mittelw.	Dreistunden-Mittelw.	Tages-Mittelwert
Grenzwert NO_2	$200 \mu\text{gm}^{-3}$	-	-
Alarmwert NO_2	-	$400 \mu\text{gm}^{-3}$	-
Zielwert NO_2	-	-	$80 \mu\text{gm}^{-3}$
Grenzwert PM_{10} ¹⁾	-	-	$50 \mu\text{gm}^{-3}$
Zielwert PM_{10}	-	-	$50 \mu\text{gm}^{-3}$

Tabelle 2.1: Grenz-, Alarm- und Zielwerte nach Immissionsschutzgesetz-Luft i.d.g.F. für NO_2 und PM_{10} zum Schutz der menschlichen Gesundheit. ¹⁾ Für PM_{10} sind zwischen 2005 und 2009 pro Kalenderjahr 30 Überschreitungen zulässig.

Neben den Grenzwerten für die menschliche Gesundheit veröffentlichte die Österreichische Akademie der Wissenschaften auch Grenzwerte für die Vegetation und das Ökosystem. Die Werte für den Schutz der Vegetation sind ident mit jenen zum Schutz des Menschen,

jedoch die Zielvorstellung für NO_2 zum Schutz des Ökosystems liegt bei nur $80 \mu\text{g m}^{-3}$ (Halbstundenmittelwert) bzw. bei $10 \mu\text{g m}^{-3}$ (Jahresmittelwert).

	Halbstundenmittelwert	Tagesmittelwert	Jahresmittelwert
Schutz des Menschen	$200 \mu\text{g m}^{-3}$	$80 \mu\text{g m}^{-3}$	$30 \mu\text{g m}^{-3}$
Schutz der Vegetation	$200 \mu\text{g m}^{-3}$	$80 \mu\text{g m}^{-3}$	$30 \mu\text{g m}^{-3}$
Schutz der Ökosysteme (Ziel)	$80 \mu\text{g m}^{-3}$	$40 \mu\text{g m}^{-3}$	$10 \mu\text{g m}^{-3}$

Tabelle 2.2: Empfehlungen der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Kommission für die Reinhaltung der Luft, von November 1998. Dies sind Grenzwerte zum Schutz der Menschen, der Vegetation und des Ökosystems bezüglich NO_2 .

Der Verein deutscher Ingenieure (VDI) veröffentlichte zusätzlich Grenzwerte für NO, der maximale Tagesmittelwert liegt bei $500 \mu\text{g m}^{-3}$, der Halbstundenmittelwert wurde mit $1000 \mu\text{g m}^{-3}$ festgesetzt (Angaben aus Weber 2008).

Kapitel 3

Untersuchungen im Winter 2005/06 und 2007/08

Wie schon in der Einleitung angesprochen, fanden im Gebiet Schwaz und Vomp Messungen der meteorologischen Größen und der Schadstoffkonzentrationen in den Wintermonaten 2005/06 im Zuge des Projekts ALPNAP (Heimann et al. 2007) statt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine sehr ähnliche Messanordnung, ebenfalls von November bis Februar, im Jahre 2007/08 installiert. Während beider Perioden waren das Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck (IMGI), und das Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Bereich Atmosphärische Umweltforschung, Garmisch-Partenkirchen (IMK-IFU), an den Messungen beteiligt.

Als Unterstützer konnte in beiden Fällen das Amt der Tiroler Landesregierung gewonnen werden. Im folgenden Kapitel wird nun genauer auf das Untersuchungsgebiet mit seinen erwähnenswerten Besonderheiten und auf die verschiedenen Messgeräte und deren räumliche Anordnung eingegangen.

3.1 Lage und umgebende Topographie

Die beiden im Untersuchungsgebiet liegenden Orte Schwaz (ca. $11^{\circ}42'48''\text{N}$ und $47^{\circ}20'52''\text{E}$, 545 *m* ASL) und Vomp (ca. $11^{\circ}40'49''\text{N}$ und $47^{\circ}20'36''\text{E}$, 566 *m* ASL) befinden sich im Tiroler Unterinntal, dem Hauptsiedlungsgebiet Nordtirols. Schwaz bzw. Vomp liegen etwa 35 *km* von der Tiroler Landeshauptstadt Innsbruck in östlicher Richtung entfernt. Die nächsten größeren Orte talauswärts sind Jenbach (ca. 8 *km* entfernt) und Wörgl (30 *km* von Schwaz), gegen Westen ist Hall in Tirol der nächste, bedeutende Ort (20 *km*). Eine Übersichtskarte des Bundeslandes Tirol mit in oranger Farbe eingezeichnetem Messgebiet ist in Abbildung 3.1 zu finden, wobei alle Kartengrundlagen aus dem Geoinformationssystem des Landes Tirol (tiris.tirol.gv.at 2009) stammen.

Die Marktgemeinde Vomp mit ca. 4600 Einwohnern besteht vor allem aus Wohngebäuden, einigen Gewerbeanlagen und wenigen Bauernhöfen (Allinger et al. 1998).

Vomps Nachbarort ist die Stadtgemeinde Schwaz. Aktuell leben 12800 Einwohner in der ehemaligen Bergbaustadt, die neben Wohngebäuden auch einige Gewerbebetriebe und Industrieanlagen beherbergt (Alexander et al. 1999).

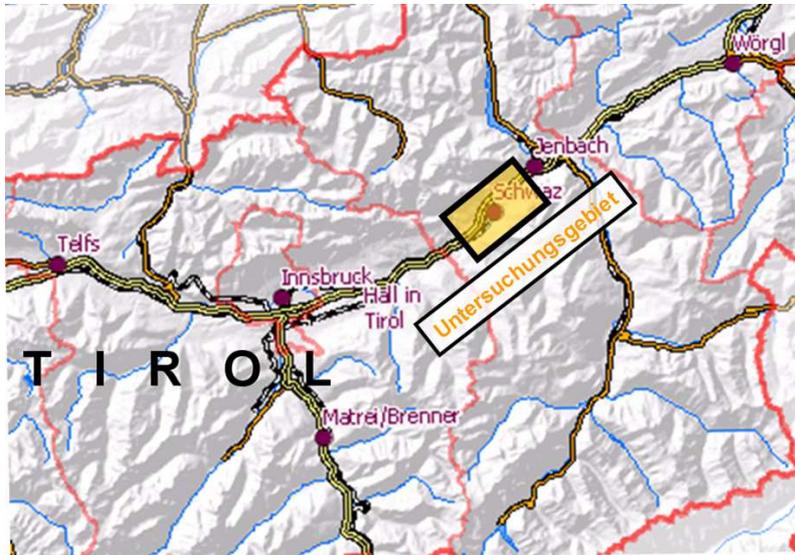


Abbildung 3.1: Kartenausschnitt des österreichischen Bundeslandes Tirol mit den eingezeichneten Städten Innsbruck, Hall in Tirol, Schwaz, Jenbach und Wörgl im Tiroler Inntal. Autobahnen sind mit gelber Farbe, Bundesstraßen mit oranger Farbe abgebildet. Die Bahnlinie ist schwarz/weiß skizziert. Das Untersuchungsgebiet bei Schwaz/Vomp ist mit einem orangenen Rechteck gekennzeichnet. (Kartenquelle: tiris.tirol.gv.at 2009)

Das Unterinntal, dessen Talachse bei Schwaz von Südwest nach Nordost verläuft, ist an dieser Stelle durch zwei mächtige Gebirgsmassive begrenzt. In südöstlicher Richtung steigen die Tuxer Alpen vom Talboden, der auf ca. 540 m ASL liegt, stark an und erreichen mit dem Kellerjoch (2344 m ASL) die erste große Erhebung. An dessen Talfuß befindet sich die Stadtgemeinde Schwaz.

Auf der gegenüberliegenden Seite erhebt sich über der Gemeinde Vomp das Massiv der Nordtiroler Kalkalpen. Jedoch befindet sich ca. 250 m - 350 m über der Talsohle das besiedelte Plateau Vomperberg, das den Talquerschnitt des Inntals an dieser Stelle stark beeinflusst. Über dem Vomperberg ragt der Hochnissl mit 2547 m ASL (ein Panoramafoto ist in Abbildung 3.2 zu finden, inklusive Blick auf den Vomperberg).

Westlich des Plateaus mündet das Seitental Vomperloch in das Inntal, auf östlicher Plateauseite ein viel kleineres Seitental mit dem Namen Bachtal. Die Täler auf der südlichen Talseite beeinflussen das Messgebiet nicht unmittelbar.

Durchzogen wird das Inntal von der wichtigen österreichischen Autobahn A12, einer Hauptdurchzugsroute für den alpenquerenden Verkehr von München nach Verona bzw. des Binnenverkehrs in Tirol. Daneben schlängelt sich entlang der südlichen Talseite die

Bundesstraße B171 (Tiroler Straße), auf der gegenüberliegenden Seite die L222 (Vomper Landesstraße). In der Talmitte befinden sich die Gleise der viel befahrenen, zweigleisig ausgebauten, Unterinntalbahnen. Diese wichtige Bahnstrecke verbindet die Großräume München/Wien, Bregenz/Zürich und Verona/Mailand miteinander.



Abbildung 3.2: Das Inntal bei Schwaz/Vomp am 15.01.2006 (a) und am 30.01.2008 (b), Blickrichtung Nordwest. In (b) ist im Vordergrund die Stadt Schwaz, im Hintergrund die Marktgemeinde Vomp mit dem Plateau Vomperberg und dem Hochnissl (2547 m) ersichtlich. In Abbildung (a) ist zudem das "Vomperloch", ein Seitental des Inntals, zu sehen. Diese beiden Bilder skizzieren sehr gut die charakteristischen Unterschiede der beiden Messperioden in punkto Schneebedeckung.

3.2 Räumliche Anordnung der Messgeräte

3.2.1 Automatische Wetterstationen, Ceilometer, Sodar, DOAS, Luftgüteüberwachungsstation des Landes Tirol

Um einen möglichst genauen Vergleich beider Winterperioden zu ermöglichen, war die Messanordnung während der Winterperiode 2007/08 so gewählt, dass sie zu jener des Jahres 2005/06 sehr ähnlich war. In meine Arbeit gehen vor allem die Daten von zwei automatischen Wetterstationen, die die verschiedenen meteorologischen Parameter aufgezeichnet haben, ein. Wie aus Tabelle 3.1 und Abbildung 3.3 ersichtlich, war jeweils eine automatische Wetterstation (AWS) am Talboden (westlich von Schwaz) und eine AWS direkt am Plateau Vomperberg installiert. Die Position der Tal-Wetterstation während 2007/08 war beinahe ident zum Standort der Periode 2005/06. Die Lage der AWS am Vomperberg wurde im Jahre 2008 im Vergleich zu 2006 nach Osten verschoben.

Die Position des Ceilometers, ein Gerät mit dessen Hilfe eine Bestimmung der Mischungsschichthöhe möglich ist, wurde von der Frundsbergkaserne bei Schwaz zum Standort der permanenten Luftgüteüberwachungsstation des Landes Tirol an die A12 verlegt (ABV in Abbildung 3.3). Dort befand sich ebenfalls das Schadstoffmessgerät DOAS, während beider Winterperioden mit unveränderter Position. Zudem war am Standort Kaserne ein Sodar, ebenfalls zur Detektion der Mischungsschichthöhe, installiert.

Zur Vervollständigung der meteorologischen Messungen werden in dieser Arbeit auch die Daten der ZAMG-Wetterstationen von Innsbruck-Flughafen, Jenbach und von der Bergstation Patscherkofel bei Innsbruck verwendet. Das Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Waldschutz, stellte freundlicherweise die Daten der Schadstoffmessungen und die ermittelten meteorologischen Komponenten der Luftgüteüberwachungsstation Vomp/Raststätte zur Verfügung.

Standort	Jahr	Name	H (ASL)	geogr. Koord. (WGS84)	Messgeräte
Schwaz	2005/06	SZ06	539 m	11°41'51"O 47°20'34"N	AWS
Schwaz	2007/08	SZ08	539 m	11°41'45"O 47°20'27"N	AWS
Vomperberg	2005/06	VB06	834 m	11°39'30"O 47°20'43"N	AWS
Vomperberg	2007/08	VB08	867 m	11°40'19"O 47°21'00"N	AWS
Vomp, Raststätte	beide Jahre	ABV	561 m	11°41'30"O 47°20'57"N	DOAS
Vomp, Raststätte	2007/08	ABV	561 m	11°41'30"O 47°20'57"N	Ceilometer
Schwaz, Kaserne	2005/06	KAS	540 m	11°41'56"O 47°20'07"N	Ceilometer/Sodar
Vomp, Raststätte	beide Jahre	ABV	555 m	11°41'30"O 47°20'57"N	Luftgüte Tirol
Innsbruck	beide Jahre	IBK	579 m	11°21'26"O 47°15'54"N	AWS ZAMG
Jenbach	beide Jahre	JEN	530 m	11°45'49"O 47°23'51"N	AWS ZAMG
Patscherkofel	beide Jahre	PAK	2246 m	11°27'39"O 47°12'53"N	AWS ZAMG

Tabelle 3.1: Tabellarische Zusammenstellung der Standorte der automatischen Wetterstationen, des DOAS, des Ceilometers und des Sodars während beider Jahre. Zusätzlich verzeichnet ist der Standort der permanenten Luftgütemessstelle des Landes Tirol. Ebenfalls permanent messen die Wetterstationen der ZAMG, deren Daten zur Verfügung gestellt wurden.

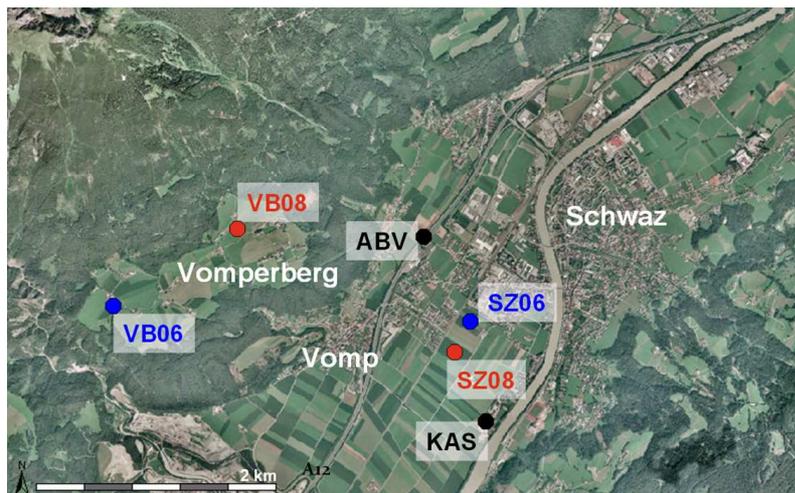


Abbildung 3.3: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes mit den eingezeichneten Messorten der automatischen Wetterstationen und der Ceilometer entsprechend vorhergehender Tabelle, weiters ist der Standort der Luftgütemessstelle des Landes Tirol und der Messpunkt des DOAS gekennzeichnet. (Kartenquelle: tiris.tirol.gv.at 2009)

3.2.2 NO₂-Passivsammler

Neben der zeitlichen Entwicklung der Schadstoffbelastung ist auch deren räumliche Verteilung von großem Interesse. Dabei sind Passivsammler ein guter Kompromiss zwischen Interesse und finanziellem Aufwand. Aus diesen Gründen wurden während beider Untersuchungszeiträumen in der Umgebung von Schwaz und Vomp Passivsammler installiert, die die NO₂-Belastung 14-tägig gemittelt wiedergeben.

Besonders die Unterschiede in differenzierten Höhenzonen, als auch die abweichenden Situationen an Schatten- und Sonnenhang, sollten möglichst gut aufgelöst werden. Darum waren die Standorte schon im Winter 2005/06 so gewählt, dass beide Interessensgebiete berücksichtigt werden konnten.

Während der zweiten Messperiode wurde das Messprofil an beiden Seiten nach oben hin verlängert und so platziert, dass die jeweils drei obersten Messpunkte auf beiden Seiten in ähnlicher Höhe lagen. Um eine Vergleichsmöglichkeit sicherzustellen sind vier Standorte während beider Perioden ident. Diese sind in Tabelle 3.2 mit A, B, C und D gekennzeichnet, weiters ist von jedem Standort die ungefähre Distanz zur Autobahn verzeichnet. Die Abbildung 3.4 dient zum räumlichen Überblick der NO₂-Passivsammlerstandorte.

Nr.	Standort	Jahr	H (ASL)	Abstand A12	Vergleich	
1/06	AWS Vomperberg 2006 (VB06)	2005/2006	835 m	-1350 m		
2/06	Vomp Nord		676 m	-800 m		
3/06	Vomp West		580 m	-280 m		A
4/06	A12 bei km 51.6		572 m	-10 m		
5/06	Raststätte A12 bei Vomp (ABV)		570 m	10 m		B
6/06	Felder südlich A12		540 m	350 m		
7/06	AWS Schwaz 2006 (SZ06)		540 m	677 m		C
8/06	Schwaz Kaserne (KAS)		545 m	1100 m		
9/06	Südseite Tal		613 m	1600 m		D
10/06	Arzberg		720 m	1800 m		
1/08	Nordseite Berg	2007/2008	1080 m	-2240 m		
2/08	AWS Vomperberg 2008 (VB08)		867 m	-1660 m		
3/08	Bachtal		623 m	-630 m		
4/08	Vomp West		580 m	-280 m		A
5/08	Raststätte A12 bei Vomp (ABV)		570 m	10 m		B
6/08	Vomp Ost		550 m	194 m		
7/08	AWS Schwaz 2008 (SZ08)		540 m	677 m		C
8/08	Schwaz bei Kaserne		535 m	1000 m		
9/08	Südseite Tal		613 m	1600 m		D
10/08	Südseite Arzberg		900 m	2300 m		
11/08	Südseite Berg		1120 m	3000 m		

Tabelle 3.2: Auflistung aller NO₂-Passivsammler mit Meereshöhe und ungefährem Abstand zur Autobahn A12. Jene Standorte, die mit A, B, C und D gekennzeichnet sind, entsprechen identer Messstandorte während beider Untersuchungsperioden.

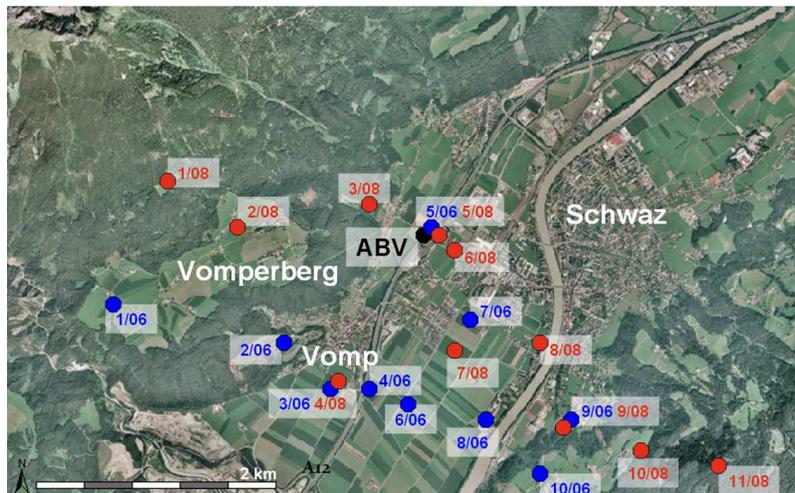


Abbildung 3.4: Blick auf das Untersuchungsgebiet mit eingezeichneten NO_2 -Passivsammlerstandorten. In der Farbe blau sind die Standorte 2005/06 gekennzeichnet, rot jene des Jahres 2007/08. Identische Standorte beider Perioden sind mittels gemeinsamem Hintergrund kenntlich gemacht. (Kartenquelle: tiris.tirol.gv.at 2009)

3.2.3 Temperaturprofil Kellerjoch

Um die punktuelle und räumliche Belastung mit Schadstoffen einordnen zu können, ist das Wissen über die vertikale Temperaturschichtung unerlässlich. Auf der Sonnenseite dient dazu die AWS am Vomperberg in Verbindung mit der Station Schwaz. Jedoch sind die Verhältnisse am Schattenhang wesentlich andere. Darum gehen in diese Arbeit auch jene Temperatursensoren ein, die entlang des Kellerjochs an den Stützen der Bergbahn befestigt waren (genaue Höhenverteilung siehe Tabelle 3.3).

Es handelt sich bei den Geräten um Sensoren der Marke Hobo, die in einen Strahlungsschutz eingebaut waren. Die Energieversorgung für die vorhandene Ventilation erfolgte mittels Solarpaneel (für eine genauere Beschreibung siehe Kapitel 3.3).

Nr.	H (ASL)	Standortbeschreibung
KJ1	540 m	am Gelände der Kaserne Schwaz (KAS)
KJ2	556 m	an Stütze der Kellerjochbahn, an Straße nach Arzberg
KJ3	584 m	an Stütze der Kellerjochbahn, bewaldeter Standort
KJ4	652 m	an Stütze der Kellerjochbahn, bewaldeter Standort
KJ5	710 m	an Stütze der Kellerjochbahn, bewaldeter Standort
KJ6	767 m	an Stütze der Kellerjochbahn, Wiese
KJ7	849 m	an Stütze der Kellerjochbahn, Wiese, bei Bergstation der Sektion I
KJ8	1341 m	bei Bergstation Sektion II

Tabelle 3.3: Standorte der Hobo-Sensoren entlang des Kellerjochhanges mit Angabe der Seehöhe und einer Standortbeschreibung. Die Daten wurde zur Verfügung gestellt vom Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Waldschutz.

Der unterste Temperatursensor befand sich auf dem Gelände der Frundsbergkaserne des österreichischen Bundesheeres in Vomp, die weiteren sechs Sensoren verteilten sich beinahe regelmäßig auf eine Höhendifferenz von 300 *m* zwischen der Tal- und Bergstation der Sektion I. Der oberste Fühler war auf 1341 *m* ASL bei der Bergstation der Sektion II montiert (Abbildung 3.5). Zur Verfügung gestellt wurde der gesamte Datensatz vom Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Waldschutz.

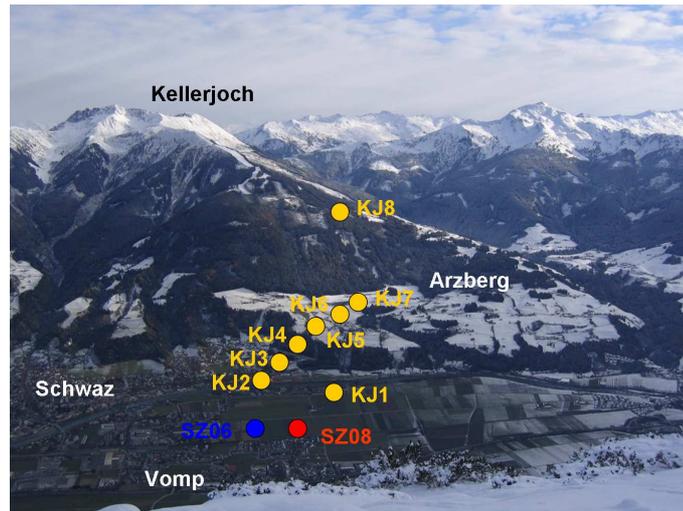


Abbildung 3.5: Blick nach Süden auf das Inntal und das Kellerjoch (2344 *m*) von Anfang Dezember 2005. Eingezeichnet sind die Standorte der AWS Schwaz und die der Hobo-Sensoren des Kellerjoch-Temperaturprofils. Die Sensoren sind auf den Liftstützen der Kellerjochbahn dauerhaft montiert. In leichter Plateaulage liegt der Ortsteil Arzberg

3.3 Beschreibung der Messgeräte

3.3.1 Automatische Wetterstationen

Eine genaue Auflistung der gemessenen meteorologischen Komponenten an den verschiedenen Standorten ist die Tabelle 3.4. Auch die zusätzlich verwendeten Messparameter der Stationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) sind darin inkludiert. Außerdem betreibt das Amt der Tiroler Landesregierung am Standort der Luftgütemessstelle Vomp/Raststätte ergänzend eine meteorologische Messstation, auch deren Daten gehen in späteren Abschnitten in die Arbeit ein.

Die meteorologischen Basisinformationen wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windrichtung und Windgeschwindigkeit wurden an jedem Standort ermittelt, die Komponenten der Strahlungsbilanz nur jeweils an der Station Schwaz. Die Apparate der ZAMG (Stationen Jenbach, Innsbruck Flughafen und Patscherkofel) verzeichneten zusätzlich noch die Besonnungs- und Niederschlagssummen. Als Messhöhe für die Temperatur (*T*) und Luftfeuchte (*rH*) ist jeweils die Höhe von ca. 2 *m* über Grund vorgegeben.

Einige Stationen geben die Luftfeuchtigkeit nicht direkt als relativen Wert (rH) aus, sondern als Taupunkt (Td). Dieser wurde anschließend mittels Formeln 3.1 bis 3.3 in die relative Feuchteinheit umgerechnet.

$$e = 10^{\frac{8.233 \cdot Td + 184.2}{234.67 + Td}} \quad (3.1)$$

$$e_s = 6.1365 \cdot e^{\frac{17.502 \cdot T}{240.97 + T}} \quad (3.2)$$

$$rH = \frac{e}{e_s} \quad (3.3)$$

Messgerät	Jahr	Standort	verwendete Komponenten
AWS Schwaz	2005/06	SZ06	T, Td, WR, WG, lw _e , lw _a , kw _e , kw _a
AWS Schwaz	2007/08	SZ08	T, rH, WR, WG, lw _e , lw _a , kw _e , kw _a
AWS Vomperberg	2005/06	VB06	T, Td, WR, WG
AWS Vomperberg	2007/08	VB08	T, Td, WR, WG, kw _e , kw _a
AWS Innsbruck (ZAMG)	beide Jahre	IBK	T, rH, WR, WG, p, rr, so, kw _e
AWS Jenbach (ZAMG)	beide Jahre	JEN	T, rH, WR, WG, p, rr, so, kw _e
AWS Patscherkofel (ZAMG)	beide Jahre	PAK	T, rH, WR, WG, p, rr, so, kw _e
AWS Luftgütemessstelle	beide Jahre	ABV	T, rH, WR, WG, kw _e

Tabelle 3.4: In dieser Arbeit verwendete meteorologische Komponenten der automatischen Wetterstationen Schwaz/Vomperberg und der Zusatzstationen der ZAMG bzw. des Landes Tirol (Luftgütemessstelle). Bis auf jene meteorologischen Messwerte der Luftgütestation wurden alle Komponenten in einer Höhe von ca. 2 m gemessen. Die Bedeutungen der einzelnen Abkürzungen sind dem Abkürzungsverzeichnis zu entnehmen.

3.3.2 Vergleichsmessungen der Wetterstationen am Standort Schwaz

Gegen Ende der Messperiode im Jahre 2007/08 wurden vom 04.03.08 bis zum 18.03.08 Vergleichsmessungen aller während des Messprojekts verwendeten temporären automatischen Wetterstationen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die Wetterstationen während dieser zweiwöchigen Periode am Standort Schwaz zusammengezogen. Die Messanordnung ist in Abbildung 3.6 ersichtlich. Die Witterung war während der Vergleichsmessungen meist bewölkt, teilweise auch mit Niederschlag verbunden. Der Untergrund war nicht schneebedeckt und es gab keinen von Wolken unbeeinflussten Strahlungstag. Allerdings konnten zwei Tage mit föhnigen Eigenschaften registriert werden.

Als Referenzinstrument für die Vergleichsmessungen wurden aufgrund deren Qualität und Beschaffenheit die Sensoren der AWS Schwaz bestimmt. Analog zur Hauptmessphase wurde ein einminütiges Mittelungsintervall (aus 10 Sekunden Abtastung) gewählt. Aufgrund der Tatsache, dass in dieser Arbeit nur die beiden Wetterstationen Schwaz und Vomperberg verwendet werden, beschränkt sich die Analyse auf diese beiden Instrumente.

Die Regressionsanalyse erfolgte jeweils mittels linearer Kurven, höhergradige Polynomfunktionen waren aufgrund der Datenlage nicht nötig. Für die langwelligen Komponenten der Strahlungsbilanz konnten keine Vergleiche gezogen werden, da diese nur an der Station Schwaz gemessen wurden.



Abbildung 3.6: Messaufbau während der Vergleichsmessungen im März 2008 am Standort Schwaz in der Talmitte (a). Die Station an der linken Bildseite befand sich am Vomperberg, die zweite Station von links ist die automatische Wetterstation des Standortes Schwaz. Im rechten Abbildungsteil (b) ist ein Hobo-Temperatursensor (KJ03) des Temperaturprofils Kellerjoch abgebildet.

Die Abbildung 3.7 dient als Vergleich der Temperatur- und Feuchtwerte der beiden Wetterstationen. Es zeigt sich bei den Temperaturwerten der Station Vomperberg eine kleine systematische Abweichung, in der Regel waren die gemessenen Werte um $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ höher als jene der Station Schwaz. Jedoch ergibt sich ein hoher Korrelationskoeffizient von 0.999. Eine ähnlich gute Korrelation ergibt die Analyse der relativen Feuchte. Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0.997 und die systematische Abweichung bei nur 0.36 %

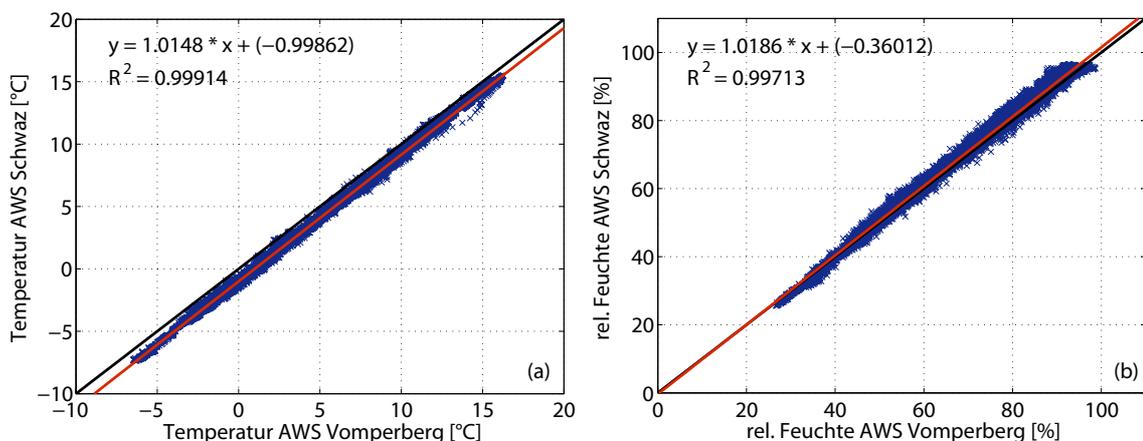


Abbildung 3.7: Vergleich der Temperatur- (a) und Feuchtemessungen (b) der AWS Vomperberg mit den Messungen der AWS Schwaz (Referenz). Darstellung der Regressionsgeraden (rot) im Vergleich zur 1:1-Geraden (schwarz). Eichpolynome und Korrelationskoeffizienten sind ebenfalls angegeben.

Ergänzend gilt es zu erwähnen, dass unterschiedliche Strahlungsschutze verwendet wurden. Die Station Schwaz war mit einer Rotronic-Belüftung bzw. Strahlungsschutz ausgestattet, die Station Vomperberg mit einem Gerät von Kroneis. Daraus ergeben sich dementsprechend auch kleinere Unsicherheiten zwischen den Stationen. Im Hinblick auf diese Tatsache sind die Ergebnisse durchaus zufriedenstellend.

Aufgrund der unterschiedlichen Windgeschwindigkeitsmessverfahren an den beiden Stationen ($1/2$ Umdrehungen min^{-1} bzw. ms^{-1}) ist eine Umrechnung nötig. Dabei gibt es prinzipiell zwei mögliche Verfahren. Einerseits ist es hier aufgrund der Vergleichsmessungen möglich die Umrechnungsfaktoren der beiden Größen direkt mithilfe der Windgeschwindigkeitsmessung der Station Schwaz zu bestimmen, jedoch kann auch die Information des Sensordatenblattes Nr. 2740 von Aanderaa (www.aanderaa.com 2009) benützt werden, um die Zählwerte direkt in Windgeschwindigkeiten umzurechnen ($\text{Windweg} = 1.194 \cdot \text{Zählimpulse}$). Natürlich sollten die Ergebnisse der beiden Verfahren annähernd ident sein. Als Zusatzinformation sind Abbildungen für beide Eichverfahren dargestellt (Abbildung 3.8).

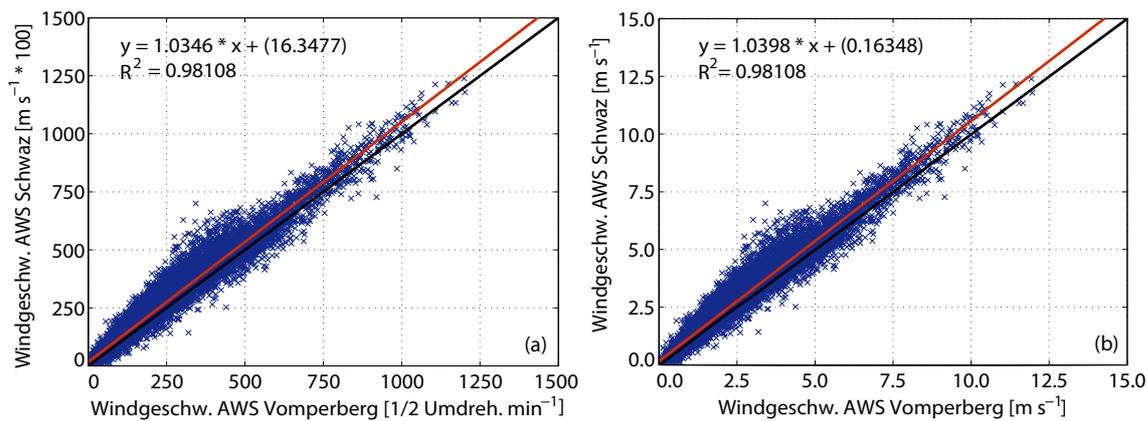


Abbildung 3.8: Regressionsanalyse der Windgeschwindigkeitsmessungen der AWS Vomperberg [$\frac{1}{2}$ Umdrehungen min^{-1}] und der AWS Schwaz [ms^{-1}] (a). In Bild (b) wurde der Windgeschwindigkeit Schwaz die durch den Eichfaktor des Sensors berechnete Windgeschwindigkeit der Station Vomperberg gegenübergestellt.

Die Analysen der Strahlungsmessungen (Abbildung 3.9) ergeben ein etwas gestreueres Bild als die vorherigen Temperatur- und Feuchtevergleiche. Sehr hoch ist jedoch die Korrelation der Messungen der eingehenden, kurzwelligen Strahlung ($R^2=0.997$).

Die gemessenen Werte der ausgehenden, kurzwelligen Strahlung weisen einen ähnlichen Korrelationskoeffizienten von 0.996 auf, jedoch bei höheren Strahlungswerten (ab ca. 100 Wm^{-2}) misst der kw_a -Sensor der AWS Vomperberg tendenziell zu hoch. Allerdings sind die Absolutabweichungen der beiden Sensoren (-7.6 Wm^{-2} bzw. -6.7 Wm^{-2}) in vertretbaren Größenordnungen angesiedelt. Eine vollständige Auflistung der verwendeten Eichgeraden und Korrelationskoeffizienten ist in Tabelle 3.5 zu finden.

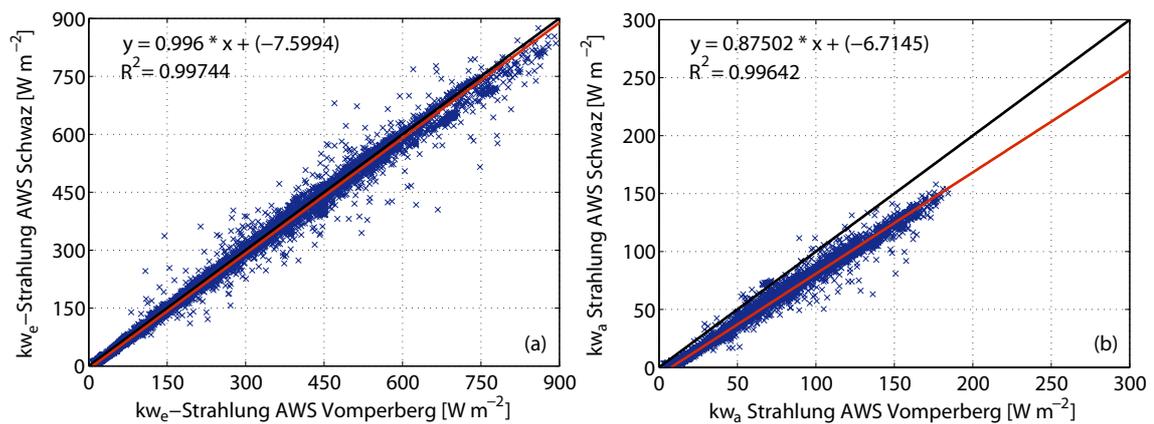


Abbildung 3.9: Regressionsanalyse der Strahlungsmessungen (kurzwellig-eingehend (kw_e) - Abbildung (a)) und kurzwellig ausgehend (kw_a - (b)) der AWS Vomperberg und AWS Schwaz. Die Regressionsgerade ist wiederum in rot dargestellt, in schwarz die 1:1-Gerade.

Für jene Messwerte, die während des Winters 2005/06 gesammelt wurden, waren keine neuen Eichungen bzw. Umrechnungen nötig. Die automatischen Wetterstationen wurden schon im Rahmen des ALPNAP-Projekts Vergleichsmessungen unterzogen. Anschließend hat eine entsprechende Korrektur der Daten stattgefunden.

Die Werte konnten dementsprechend ohne eigenständige Berichtigungen übernommen werden. Eine Ausnahme stellten die Werte der NO_2 -Passivsammler dar (Kapitel 7).

Komponente	lineares Eichpolynom	Korrelationskoeff. R^2
Trockentemperatur	$1.015 \cdot x - 0.999$	0.999
relative Feuchte	$1.019 \cdot x - 0.360$	0.997
Windgeschwindigkeit (Verfahren a)	$1.035 \cdot x + 0.163$	0.981
Windgeschwindigkeit (Verfahren b)	$1.040 \cdot x + 0.163$	0.981
kurzw. Strahlung eingehend	$0.996 \cdot x - 7.599$	0.997
kurzw. Strahlung ausgehend	$0.875 \cdot x - 6.715$	0.996

Tabelle 3.5: Zusammenstellung der linearen Eichgeraden und der Regressionskoeffizienten der automatischen Wetterstation Vomperberg im Vergleich zur AWS Schwaz.

3.3.3 Pseudovertikales Temperaturprofil am Kellerjochhang

Das Temperaturprofil entlang des Kellerjochhanges wird mit Hobo-Temperatursensoren der Firma Onset betrieben. Die Sensoren sind ausgelegt für das Messintervall von $-30\text{ }^\circ\text{C}$ bis $+50\text{ }^\circ\text{C}$ und zeichnen alle 15 Minuten einen Messwert auf (HoboProTemp-Datenblatt 2003). Der Fühler ist in einem nach unten geöffneten Strahlungsschutz eingebaut. Die Energie für die Belüftung wird durch eine Solarzelle gewonnen.

Als Befestigungsorte dienen fast ausschließlich die Stützen der Kellerjochbahn, dabei ergeben sich jeweils etwas unterschiedliche Messhöhen (Abbildung 3.7). Das differenzierte

Gelände bringt mit sich, dass die unteren Standorte durch Wald abgeschattet werden, die oberen teilweise ungehindert der Strahlung ausgesetzt sind.

Dies führt unweigerlich zur Frage nach der Datenqualität. Vergeiner et al. (2007) analysierten daher bereits vor einiger Zeit die Qualität der Messungen mittels Plausibilitätskontrollen der mittleren vertikalen Stabilitäten. Dabei kam er zum Ergebnis, dass die verschiedensten Einflüsse auf die Sensoren wirkten. Unter anderem ist demnach der Sensor 2 durch einen positiven Temperaturoffset geprägt und Sensor 6 ist wohl starken Strahlungseinflüssen ausgesetzt. Die Autoren schlagen demnach vor, Stabilitäten nur über größere Höhenzonen und unter Ausschluss der erwähnten Sensoren zu berechnen.

Weitere Analysen im Rahmen des Meteorologischen Seminars zeigten zudem, dass der Sensor 5 ebenfalls stark durch Strahlung beeinflusst ist. Diese Aussage basiert auf einem Vergleich zwischen dem betreffenden Sensor und einer automatischen Wetterstation, die ganz in der Nähe während des Winters 2005/06 stationiert war. Als Konsequenz aus den Untersuchungen wird in dieser Arbeit daher primär der Temperaturgradient über die maximale Höhenstufe zwischen Sensor 1 bzw. AWS Schwaz und Sensor 8 verwendet.

3.3.4 Ceilometer

Während beider Winter war ein Ceilometer LD40 der Firma Vaisala im Gebiet Schwaz/Vomp installiert. Das rund 1 m hohe Gerät wurde zur Detektion von Wolkenuntergrenzen entwickelt (www.vaisala.com 2009 sowie LD40-Datenblatt 2008). Dabei sendet es einen vertikalen Lichtimpuls mit einer Wellenlänge von 855 nm in die Atmosphäre aus, ein Teil dieses Lichts wird von Aerosolen zurückgestreut.

Anhand der Laufzeiten der Signale kann auf die jeweilige Struktur der Atmosphäre geschlossen werden. Aufgrund dieses Effekts und der Eigenschaft, dass sich am Oberrand der Mischungsschicht ein Sprung der Aerosolkonzentration ergibt, lässt sich mit diesem Gerät auch die Mischungsschichthöhe bestimmen.

3.3.5 Sodar

Ein Sodar dient ebenfalls zur Detektion der Mischungsschichthöhe. Es ist ein Gerät, das Schallimpulse aussendet und die reflektierten Teile wieder empfängt. Die Rückstreuung von akustischen Brechungsindexschwankungen in der Luft ermöglicht Berechnungen des Windvektors entlang des Strahles, des Turbulenzgrades der Atmosphäre und der Höhe der atmosphärischen Grenzschicht.

Zur Berechnung der Mischungsschichthöhe wird der vertikale Gradient der Amplitude des rückgestreuten Signals herangezogen, da die Turbulenz oberhalb der Mischungsschicht um einiges geringer ist als darunter (Emeis 2000).

3.3.6 Differentielles optisches Absorptionsspektrometer (DOAS)

Das Wort DOAS ist die Abkürzung für "Differentielles optisches Absorptionsspektrometer". Mit diesem Gerät lassen sich unter anderem NO und NO₂ Konzentrationen über eine gewisse Messstrecke ermitteln. Dabei bedient man sich der Absorptionseigenschaft von Gasen in bestimmten Wellenlängenbereichen.

Bei der vorhandenen monostatischen Messkonfiguration wurde ein Gerät der Firma OPSIS mit Emitter/Empfängereinheit (ER130) und einem Analysator (AR 500) eingesetzt. Das von einer Xenon-Hochdruck-Kurzbogenlampe emittierte optische Signal wurde am Ende der Messstrecke durch einen Retroreflektor jeweils reflektiert und zu einem im Gerät sitzenden Spektrographen umgelenkt. Dabei bestimmt die Messeinrichtung einen Mittelwert über die Messlänge und integriert über die eingestellte Messzeit.

Vom gemessenen Spektrum wird ein mittleres Spektrum ohne Absorptionslinien subtrahiert, das so gewonnene Differenzspektrum wird anschließend mit schon gespeicherten Spektren von Luftschadstoffen verglichen. Dabei wird die störende Absorption an Aerosolen weitestgehend eliminiert (Emeis 2000).

Während beiden Untersuchungen waren drei verschiedene Messtrassen eingestellt, deren Pfadlänge jeweils ca. 200 m umfasste. Der Pfad Nr. 1 führte über die Autobahn, Pfad 2 längs dazu und der dritte Pfad diente der Abseitsmessung (Abbildung 3.10). Die Messzeit betrug jeweils ca. drei Minuten pro Komponente und Pfad.

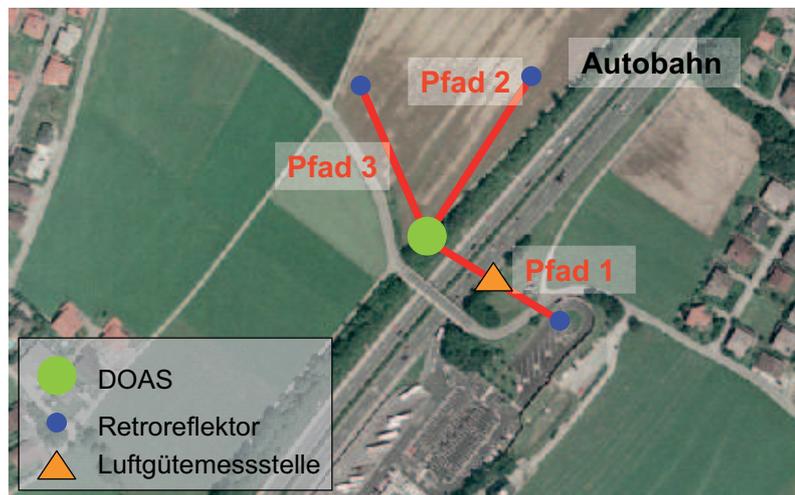


Abbildung 3.10: Standort des Messgeräts DOAS mit den eingezeichneten Messpfaden 1 bis 3 am Standort ABV. Pfad 1 führt über die Autobahn, Pfad 2 längs dazu nach Osten. Entgegengesetzt zur Autobahn verläuft die Trasse des Pfades 3. (Kartenquelle: tiris.tirol.gv.at)

3.3.7 NO₂-Passivsammler

Die NO₂-Messungen sind mit sog. Palmes-Röhrchen durchgeführt worden, die einen Arbeitsbereich zwischen 1 und 200 $\mu\text{g m}^{-3}$ aufweisen. Die Röhrchen waren immer 14 Tage, umgeben durch einen Wind- und Regenschutz, am jeweiligen Standort exponiert. Anschließend wurden sie eingeholt und nach der Methode von Saltzmann im Labor ausgewertet. Die erweiterte Messunsicherheit wird vom Hersteller mit 25.3 % angegeben (Passivsammler-Datenblatt 2008). Die Auswertungen geben dann ein gutes Bild über die jeweiligen relativen Belastungen im Talquerschnitt wieder.

3.4 Danksagung Untersuchungen 2007/08

Ohne Unterstützung von diversen Institutionen wäre ein solches Projekt, das gemeinsam vom Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, und dem Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe, organisiert wurde, nicht durchführbar. Deshalb bedankt sich das Projektteam für die finanzielle Unterstützung bei der Stadtgemeinde Schwaz, bei der Marktgemeinde Vomp, beim Alpenverein und beim Transitforum Austria-Tirol.

Für das Bereitstellen von Daten und infrastrukturellen Einrichtungen im Untersuchungsgebiet gilt unser Dank dem Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Waldschutz, und dem Österreichischen Bundesheer, Kaserne Frundsberg. Diverse Grundeigentümer haben uns dankenswerterweise auf deren Flächen eine Aufstellung von Messgeräten erlaubt.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Projektbetreuern Prof. Klaus Schäfer (IMK-IFU) und Dr. Friedrich Obleitner (IMGI) sowie bei Maria Hoffmann (IMK-IFU), Carsten Jahn (IMK-IFU) und bei meinen Kollegen Wolfgang Gurgiser (IMGI bzw. IMK-IFU) und Florian Karner (IMGI) bedanken. Unterstützt wurden wir zeitweise auch von Baptiste Ruille, auch ihm ein herzliches Dankeschön!

Kapitel 4

Klimatologie, Grenzwertüberschreitungen und Wetterlagen

Das Kapitel 4 dient dazu, eine erste Einschätzung der beiden Perioden im Bereich der Klimatologie, der Schadstoffkonzentration und der Wetterlagen zu treffen. Hinsichtlich der Klimatologie eignet sich die Analyse der mittleren Temperaturen und der gemessenen Niederschlagsmengen. Die Anzahl der klimatologischen Kenntage (Frost-, Eis- und Schneetage) gibt ebenfalls Informationen bezüglich Schneedecke und Temperaturniveau während bestimmter Zeitspannen preis.

Die Anzahl der Tage, an denen Grenzwertüberschreitungen von Schadstoffen festgestellt wurden, lassen eine erste Beurteilung der Schadstoffkonzentration während der Winter zu. Das Schema der ostalpinen Strömungslagenklassifikation nach Steinacker (1991) wurde letztendlich angewendet, um die jeweils vorherrschenden Wetterlagen zu eruieren.

4.1 Klimatologischer Überblick

Zur Einordnung der während den Untersuchungsperioden existenten meteorologischen Gegebenheiten dient ein Vergleich mit langjährigen Klimareihen. Die direkt im Untersuchungsgebiet stationierten automatischen Wetterstationen waren nur während der Winterperioden in Betrieb, deshalb bietet sich eine Gegenüberstellung von Monatsmittelwerten der 30 km weiter westlich gelegenen Wetterstation Innsbruck-Flughafen (ZAMG) mit klimatologischen Daten der selben Station an.

Die klimatologischen Werte in Tabelle 4.1 stammen aus der Klimadatenbank der ZAMG (ZAMG 2009b) und beziehen sich jeweils auf die Periode von 1971 bis 2000. Als Frosttage werden jene Tage klassifiziert, deren Minimum-Temperatur unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Demzufolge kommt während eines solchen Tages Frost vor. Steigt die Maximum-Temperatur während des betreffenden Tages nicht über den Gefrierpunkt, wird jener Tag als Eistag gewertet

(ganztägiger Frost). Als Schneetage gelten jene Tage, an denen mindestens eine Schneedecke von 1 *cm* vorhanden war.

	Dezember	Abw.	Jänner	Abw.	Februar	Abw.
Temperatur (1971-2000)	-1.0 °C		-1.7 °C		+0.4 °C	
Temperatur (2005/2006)	-1.7 °C	-0.7	-4.6 °C	-2.9	-0.6 °C	-1.0
Temperatur (2007/2008)	-1.1 °C	-0.1	+1.4 °C	+3.1	+2.6 °C	+2.2
Frosttage (1971-2000)	24.9		26.4		22.0	
Frosttage (2005/2006)	28.0	+2.1	31.0	+4.6	23.0	+1.0
Frosttage (2007/2008)	24.0	-0.9	24.0	-2.4	22.0	+1.0
Eistage (1971-2000)	4.8		5.6		2.2	
Eistage (2005/2006)	11.0	+7.2	13.0	+9.4	5.0	+2.8
Eistage (2007/2008)	5.0	+0.2	1.0	-4.6	0.0	-2.2
Niederschlag (1971-2000)	53.1 mm		43.9 mm		41.4 mm	
Niederschlag (2005/2006)	65.0 mm	+11.9	42.0 mm	-1.9	37.0 mm	-4.4
Niederschlag (2007/2008)	27.0 mm	-26.1	37.0 mm	-6.9	17.0 mm	-24.4
Schneetage (1971-2000)	16.5		20.3		14.8	
Schneetage (2005/2006)	29	+12.5	31	+10.7	28	+13.2
Schneetage (2007/2008)	2	-14.5	6	-14.3	0	-14.8

Tabelle 4.1: Wichtige meteorologische Parameter im Vergleich zum klimatologischen Mittel von 1971 bis 2000. Alle angeführten Daten beziehen sich auf die Wetterstation Innsbruck-Flughafen (ZAMG). Jene Spalten, die mit Abw. gekennzeichnet sind, beinhalten die jeweilige Differenz zum langjährigen Mittel. Die klimatologischen Werte stammen aus der Klimadatenbank der ZAMG (2009).

Bei Betrachtung der Tabelle 4.1 sticht sofort heraus, dass während des Winters 2005/06 eine durchgehende Schneedecke gegeben war. Im langjährigen Durchschnitt gibt es in den Monaten Dezember, Jänner und Februar in Innsbruck 51.6 Tage mit einer Schneedecke von mehr als 1 *cm*. Der erste Winter übertraf diese Zahl deutlich und schöpfte mit 88 Schneetagen das Maximum von 90 Tagen beinahe aus. Der zweite Winter war hinsichtlich der Schneedecke total konträr zum ersten, während der Wintermonate 2007/08 wurden in Innsbruck insgesamt nur 8 Schneetage aufgezeichnet.

In diesem Zusammenhang ist es auch wichtig, die Niederschlagssummen zu betrachten. Der Niederschlag während des Winters 2005/06 lag im Bereich der Klimatologie (+5.6 *mm*), jedoch waren die Wintermonate 2007/08 viel zu trocken (-57.4 *mm*). Deshalb lässt sich zusammenfassend sagen, dass in punkto Schneedecke und Niederschlag zwei völlig verschiedene Untersuchungsperioden vorliegen.

Auch die Monatsmittelwerte der Temperatur unterscheiden sich deutlich von der Klimatologie und auch die beiden Winter insgesamt weisen unterschiedliche Werte auf. Die Mittelung über alle drei Monate ergab das Resultat, dass die Wintermonate 2005/06 um 1.5 °C zu kalt waren, wohingegen der Winter 2007/08 um 1.8 °C zu warme Temperaturen

aufwies. Besonders der Jänner 2006 ($-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) und der Februar 2008 ($+2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) wichen stark vom langjährigen Mittel in die jeweils entgegengesetzte Richtung ab.

Die Anzahl der Frosttage bewegte sich während beider Perioden annähernd im Bereich des klimatologischen Mittels. Jedoch die Summe der Eistage (klimatologisches Mittel: 12.6 Tage) divergiert stark. Während des Winters 2006/07 wurden 32 Eistage registriert, im zweiten Winter wurden hingegen nur mehr sechs Tage gezählt, die eine Maximumtemperatur unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufwiesen. Daraus lässt sich schließen, dass der Winter 2007/08 in der Charakteristik milder war als der erste untersuchte Winter.

4.2 Grenzwertüberschreitungen

Die Tiroler Landesregierung unterhält in Tirol ein ausgebautes Netz an Luftgütemessstationen in unterschiedlicher Lage. Jeden Monat veröffentlicht daher das Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Waldschutz, Berichte über die Luftgüte in Tirol (Weber 2008). Darin sind unter anderem die gemessenen Konzentrationen von NO , NO_2 und PM_{10} verzeichnet. Ebenfalls darin zu finden ist die Anzahl an Tagen, an denen bestimmte Grenzwerte überschritten worden sind. In den Tabellen 2.1 und 2.2 sind die unterschiedlichen Grenzwerte zu den verschiedenen Luftschadstoffen nachzulesen. Die Tabelle 4.2 zeigt die Grenzwertüberschreitungen der Station Vomp-Raststätte (Standort ABV) während den Untersuchungsperioden.

Art des Grenzwertes	Dez. 05	Jän. 06	Feb. 06	Dez. 07	Jän. 08	Feb. 08
IG-L: Alarmwert NO_2	0	0	0	0	0	0
IG-L: Grenzwert NO_2	0	18	6	1	0	1
IG-L: Zielwert NO_2	21	28	24	15	15	18
ÖAW: Schutz Ökosysteme NO_2 (Ziel)	31	31	28	31	31	28
ÖAW: Schutz Mensch NO_2 (Richtw.)	21	28	24	15	15	18
VDI: Grenzwert NO	0	8	5	0	0	0
IG-L: Grenzwert PM_{10}	10	23	13	6	0	0

Tabelle 4.2: Anzahl der Tage, an denen Alarm-, Grenz-, und Zielwerte von verschiedenen Schadstoffen überschritten wurden. Der Messort ist die Luftgütestation des Landes Tirol in Vomp (Raststätte).

Es fällt sofort auf, dass der Grenzwert (IG-L) von NO_2 während der Wintermonate 2005/06 an 24 Tagen überschritten wurde. Besonders der Jänner 2006 mit 18 Grenzwertüberschreitungstagen sticht dabei heraus. Hingegen weist der Winter 2007/08 nur zwei Tage auf (jeweils einen im Dezember und Februar), an denen der Grenzwert übertroffen wurde. Auch die Zielvorstellung der NO_2 -Belastung wurde während beider Perioden oftmals überschritten. Von Dezember 2005 bis Februar 2006 waren die gemessenen Werte an 80 % der Tagen über den Zielvorstellungen von NO_2 nach IG-L, während des

Winters 2007/08 an ca. 50 % der Tage. Der Zielwert der Österreichischen Akademie der Wissenschaften zum Schutz der Ökosysteme wurde an beinahe jedem Tag (außer am 03.02.08) innerhalb der Untersuchungsperioden überboten.

Bei NO zeigt sich das gleiche Bild, im Jänner und Februar im Jahr 2006 sind zusammen 13 Tage mit einer Belastung über dem Grenzwert (VDI) gemessen worden. Während der anderen Monate gab es keine Überschreitungen. Auch die Analyse der PM₁₀-Belastungen zeigt ein beinahe identes Ergebnis zu NO und NO₂, während des ersten Winters gab es an 46 von 90 Tagen eine Überschreitung des Grenzwertes nach IG-L, im Winter 2007/08 nur an sechs Tagen (alle im Dezember 2007).

Als Fazit bleibt demnach, dass die Grenzwerte von NO, NO₂ und PM₁₀ an der Luftgütemessstation in Vomp (Raststätte) im Winter 2005/06 viel öfter überschritten wurden als während der Periode 2007/08.

4.3 Wetterlagen

Steinacker (1991) entwickelte eine alpine Strömungslagenklassifikation, die für die Ostalpen Gültigkeit besitzt. Die Idee dahinter war, dass bei ähnlichen Strömungsmustern sowohl ähnliche Advektionsverhältnisse und Vertikalbewegungen als auch ähnliche Bewölkungs- und Niederschlagsverhältnisse auftreten. Die Analyse erfolgt mittels den 850 *hPa* Karten um 12 Uhr UTC. Daneben können zusätzlich die jeweiligen Bodenanalysen (Fronten), ebenfalls um 12 UTC, herangezogen werden.

Bei diesem Schema werden die vorherrschenden Strömungen in die vier Haupt- und die vier Nebenwindrichtungen eingeteilt (Klassen 3 bis 10). Zusätzlich gibt es die Klasse der gradientschwachen Lage, typischerweise fallen in diese Hochdruckperioden, jedoch darf dabei die Windgeschwindigkeit in 850 *hPa* den Wert von 15 Knoten nicht übersteigen. Ändert sich die Strömungsrichtung während des Tages in größerem Ausmaß, wird der betreffende Tag als variabel klassifiziert (Zuordnung siehe Tabelle 4.3).

Nummer	Beschreibung der Strömungslage	Nummer	Beschreibung der Strömungslage
1	gradientschwache Lage (Hochdruck)	6	Südostanströmung
2	variable Lage, Frontdurchgang	7	Südanströmung
3	Nordanströmung	8	Südwestanströmung
4	Nordostanströmung	9	Westanströmung
5	Ostanströmung	10	Nordwestanströmung

Tabelle 4.3: Zuordnung der vier Haupt- und der vier Nebenströmungslagen zu den Zahlen von 3 bis 10. Zusätzlich werden gradientschwache Lagen (Hochdrucklagen) mit der Zahl 1 und variable Situationen (Fronten) mit 2 codiert.

Den Verlauf der Strömungsparameter während beider Winter, jeweils von Anfang Dezember bis Ende Februar, zeigt Abbildung 4.1. Der Dezember 2005 war bestimmt durch sich oft ändernde Anströmrichtungen. Besonders häufig trat die variable Lage auf, jedoch gab es keine direkte Südanströmung und damit auch keinen Föhndurchbruch im Inntal. Geprägt durch gradientenschwache Lagen mit damit verbundenem Einströmen von trockener kontinentaler Kaltluft war der Jänner 2006.

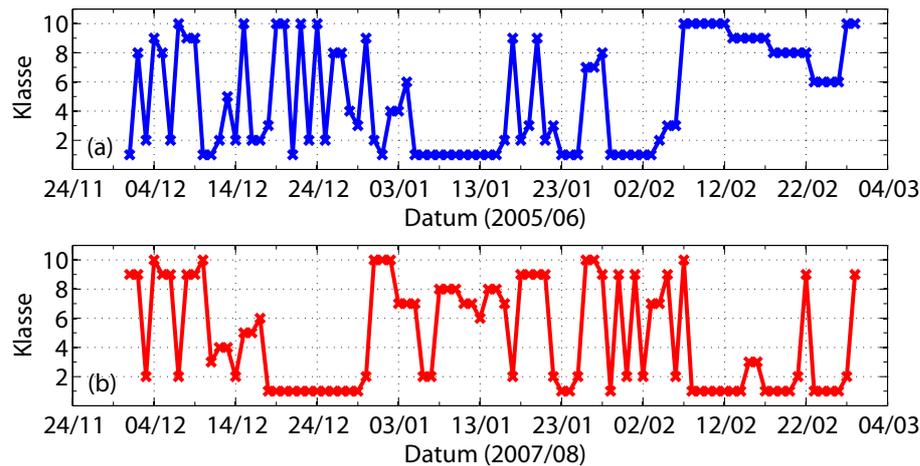


Abbildung 4.1: Strömungslagenklassifikation nach Steinacker (1991). In (a) ist der Verlauf der Wetterlagen während des Winters 2005/06 eingezeichnet, Graphik (b) zeigt den Verlauf während des Winters 2007/08.

Die erste Hochdruckperiode herrschte von 05.01.06 bis zum 15.01.06 vor, darauf folgten Frontdurchgänge mit daraus resultierenden Schneefällen. Jedoch gegen Ende des Jänners und zu Beginn des Februars 2006 lässt sich die Wetterlage wieder mit einer gradientenschwachen Lage klassifizieren. Den restlichen Februar über kamen Nordwest-, West- und Südwestlagen vor.

In zwei Hälften lässt sich der Dezember 2007 unterscheiden. Während der ersten Hälfte war das Wettergeschehen durch unterschiedliche Anströmungen aus Südwest bis Nordwest und variable Lagen bestimmt, die zweite Dezemberhälfte wies jedoch eine lang andauernde Hochdrucklage von 18.12.07 bis 29.12.07 auf. Im Gegensatz zum Jänner 2006 dominierten im Jänner 2008 die Anströmungen aus südlichen und westlichen Richtungen, demzufolge konnte Innsbruck einige Föhntage registrieren.

Zudem kam Tirol am 27.01.08 in den Einflussbereich eines Orkantiefs. Die Hälfte der Tage im Februar 2008, vor allem während der zweiten Monatshälfte, können als gradientenschwache Tage eingeordnet werden. Der Beginn des Monats war hingegen von unterschiedlichen Lagen bestimmt.

Betrachtet man die insgesamten Häufigkeiten der jeweiligen Strömungslagen in Abbil-

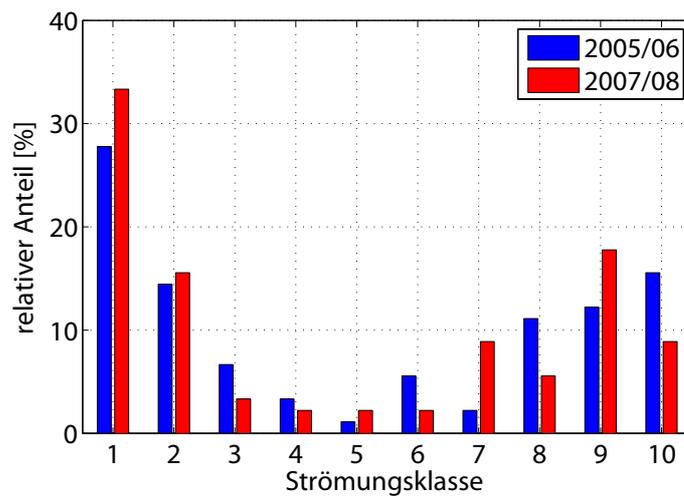


Abbildung 4.2: Relativer Anteil der Strömungsklassen während den Monaten Dezember, Jänner und Februar in den Wintern 2005/06 (blauer Balken) und 2007/08 (roter Balken).

Abbildung 4.2 ergeben sich nur kleine Unterschiede zwischen den beiden Wintern. Geringfügig mehr Hochdrucklagen gab es während des Winters 2007/08, in dem auch die Zahl der direkten Südanströmungen höher war als während des ersten Winters. Interessant zu erwähnen ist noch der Punkt, dass die variablen Lagen bzw. Tage mit Frontdurchgängen während beider Winter ähnlich oft vorkamen.

Kapitel 5

Konzentrationsanalysen der Luftschadstoffe NO, NO₂ und Feinstaub

Das Kapitel 5 beinhaltet Analysen der Luftschadstoffe Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) bzw. die gesamten Stickoxide (NO_x) in den Bereichen der Emission und der Immission im Untersuchungsgebiet. Zusätzlich erfolgt eine Analyse der gemessenen Tagesmittelwerte der Feinstaubkonzentrationen.

Es folgt in Unterkapitel 5.1 eine Beschreibung der Emissionssituation von NO, NO₂ und PM₁₀, Abschnitt 5.2 behandelt dieselben Parameter auf der Seite der Immission. Das Datenmaterial wurde dankenswerterweise vom Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Waldschutz bzw. von der Abteilung Verkehr zur Verfügung gestellt.

5.1 Emissionen von Luftschadstoffen

5.1.1 NO_x-Emissionen an der Autobahn A12

In Nähe der Immissionsmessstelle des Landes Tirol in Vomp werden ebenfalls die Verkehrszahlen der Autobahn A12 registriert. Die Messanordnung unterscheidet die Fahrzeuge in verschiedene Klassen, damit kann man mit geeigneten Emissionsfaktoren eine Gesamtemission berechnen.

Zwischen den beiden untersuchten Perioden änderte sich die Art der Datenerfassung, darüber hinaus wurden einige Fahrzeugklassifikationen leicht verändert (Landesregierung 2008). Jedoch sollten Unterschiede der beiden Methoden gering sein und einen Vergleich zulassen. Das Amt der Tiroler Landesregierung stellte die Daten schon in berechneter Weise zur Verfügung. Es erfolgten daher keine eigenen Emissionsberechnungen.

Weiters liegen die Daten nur in der Gesamtkonzentration an NO_x und nicht getrennt in

NO und NO₂ vor. Die Einheit der Emissionsrate ist in $[gkm^{-1}h^{-1}]$ vorgegeben, es lassen sich daher die Daten auf stündlicher Basis sehr gut analysieren. Zu erwähnen gilt es zudem, dass diese Emissionsberechnungen nur anhand der Verkehrszahlen der Autobahn ermittelt wurden, der Verkehr auf den Bundesstraßen und den Gemeindewegen wurde nicht berücksichtigt.

Bei Betrachtung der statistischen Größen der Emission (basierend auf Halbstundenwerten) zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Winterperioden (Tabelle 5.1). Der Mittelwert der Emission lag im Winter 2005/06 zwar ein wenig höher als 2007/08, jedoch kann dies nicht als entscheidender Faktor angesehen werden.

	Mittelwert	Stand.abw.	Maximum	Minimum
Winter 2005/06	2979 $gkm^{-1}h^{-1}$	2085 $gkm^{-1}h^{-1}$	8140 $gkm^{-1}h^{-1}$	97 $gkm^{-1}h^{-1}$
Winter 2007/08	2892 $gkm^{-1}h^{-1}$	2106 $gkm^{-1}h^{-1}$	8246 $gkm^{-1}h^{-1}$	57 $gkm^{-1}h^{-1}$

Tabelle 5.1: Statistische Zusammenfassung der mittels Verkehrszahlen berechneten Emissionswerte von NO_x für die Winterperioden 2005/06 und 2007/08.

Die Werte der jeweiligen Maxima liegen ebenfalls in ähnlichen Bereichen. Die beinahe identen, aber sehr hohen Werte der Standardabweichung haben die Ursache vor allem in den charakteristischen Tagesgängen der Emission mit einer großen Spanne zwischen Maximalwert und Minimum, die im Folgenden noch näher erklärt werden. Die Zahlen der minimalen Belastungen können in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden, da diese im Vergleich zu den maximalen und mittleren Emissionsraten nicht unmittelbare Auswirkungen haben.

Zur ersten groben Orientierung in zeitlicher Hinsicht dient die Abbildung 5.1. Darin ist der zeitliche Verlauf der NO_x-Emission während beider Winterperioden dargestellt. Es zeigt sich beide Male ein regelmäßiger, wöchentlicher Rhythmus, der nur durch die Weihnachtsperiode unterbrochen wurde.

Dies basiert einerseits auf den wöchentlichen Arbeitszyklen als auch auf den gesetzlichen Rahmenbedingungen, die in Abschnitt 2.3 diskutiert wurden. Während der Arbeitstage (Montag bis Samstag) erreichen die Spitzen der Emission im Durchschnitt den Wert von $6000 gkm^{-1}h^{-1}$, an Sonntagen und Feiertagen entfallen diese Spitzenwerte der Emission.

Weiters ist ersichtlich, dass während der Adventszeit des Jahres 2005 die berechneten Werte der Emission um einiges höher waren als jene zur gleichen Zeit im Dezember 2007. Weiters gab es während den Weihnachtsfeiertagen 2005 höhere Emissionswerte als zu Weihnachten 2007. Es gab also ein minimal höheres Emissionsvolumen bzw. Verkehrsaufkommen während des Dezembers 2005, verglichen mit Dezember 2007.

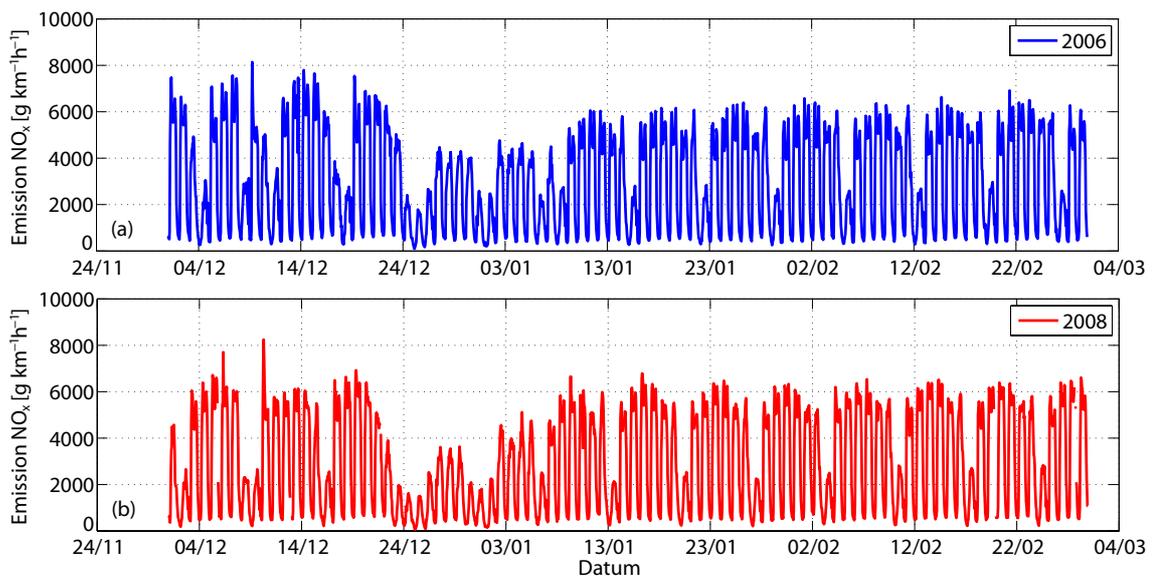


Abbildung 5.1: Zeitlicher Verlauf der NO_x-Emissionen während der Winter 2005/06 (a) und 2007/08 (b) aus dem Verkehr der A12 bei Schwaz/Vomp. Gut ersichtlich ist die viel geringere Emissionsmenge während den Weihnachtstagen und an den Sonntagen.

Der weitere Verlauf der Emissionskurve im Jänner und Februar ist während beider Untersuchungsperioden beinahe ident. Die über die gesamten Perioden berechneten Mittelwerte ergeben für das Jahr 2005/06 einen Wert von $2979 \text{ g km}^{-1} \text{ h}^{-1}$ und für 2007/08 von $2892 \text{ g km}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Zusammengefasst lässt sich demnach sagen, dass die Emissionssituation der Autobahn während der Wintermonate 2005/06 nur geringfügig höher war als während 2007/08, die Emission an NO_x kann demnach im Großen und Ganzen als eine Konstante angenommen werden.

Neben der zeitlichen Analyse lohnt es sich aber auch die tägliche Struktur in kleinerem Maßstab näher zu betrachten (Abbildung 5.2 für 2005/06 und Abbildung 5.3 für 2007/08). Die Abbildungen zeigen für alle betrachteten Tage eindeutig eine scharfe Grenze der Emissionswerte um 05 Uhr UTC. Dies hängt unmittelbar mit dem Ende des Nachtfahrverbots für Lastkraftwagen $> 7.5 \text{ t}$ auf der A12 um 04 Uhr UTC und dem langsamen Aufkommen des Berufsfrühverkehrs zusammen.

Des weiteren sind die Weihnachtsperioden und die Sonntage eindeutig durch verringerte Emissionswerte erkennbar. Außerdem heben sich in den Abbildungen der österreichische Feiertag am 08.12. (Maria Empfängnis) und der Beginn des Wochenendfahrverbots für LKW $> 7.5 \text{ t}$ am Samstag um 14 Uhr UTC eindeutig ab.

Während den Abendstunden ist keine so scharfe Grenze wie in den Morgenstunden ersichtlich, jedoch bildet sich auch hier der Beginn des LKW-Fahrverbots um 19 Uhr UTC ab. Für Information über die maßgebenden Gesetze des europäischen und österreichischen Gesetzgebers sowie für Erläuterungen zu Verordnungen des Landeshauptmannes von

Tirol wird auf Abschnitt 2.3 verwiesen.

Im Vergleich der beiden Perioden zeigen sich auch bei näherer Betrachtung der täglichen Strukturen keine gravierenden Unterschiede, die vorher schon erwähnte leicht höhere Emissionssituation während Dezember 2005 kann aber auch hier wahrgenommen werden.

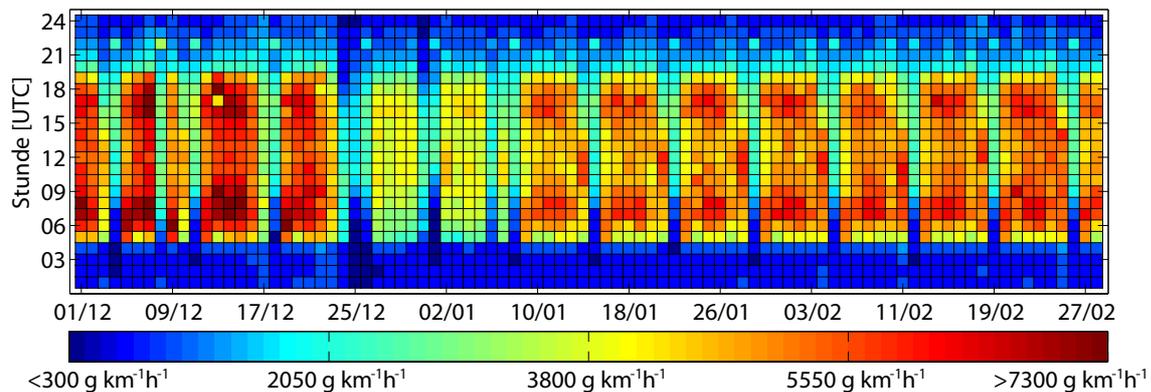


Abbildung 5.2: Darstellung der NO_x-Emissionswerte des Autobahnverkehrs auf einem Tag-Stundenraster in stündlicher Auflösung für den Winter 2005/06. Die Höhe der Emissionswerte ist farblich codiert.

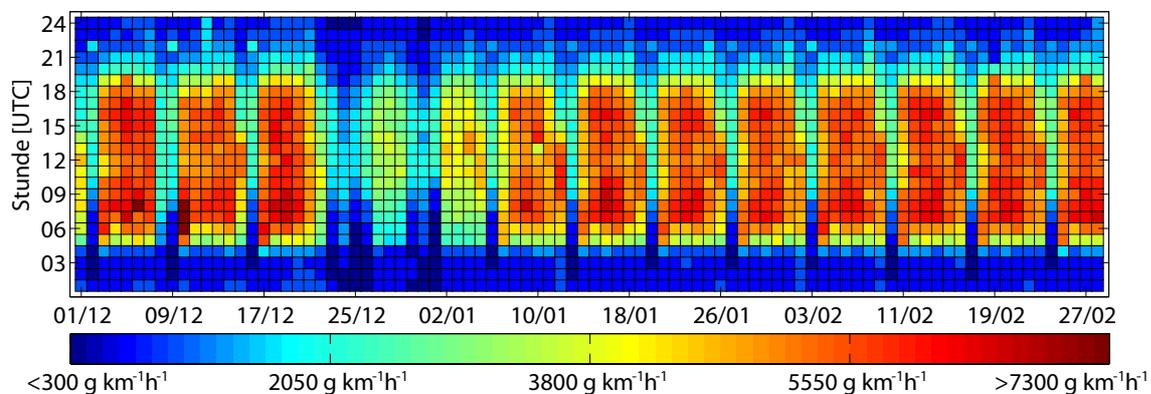


Abbildung 5.3: Analoge Darstellung zur Abbildung 5.2 für die Untersuchungsperiode 2007/08 mit farblich dargestellter und stündlich aufgelöster Emissionsstruktur (NO_x des Autobahnverkehrs).

Zur abschließenden Analyse der Emissionen sind mittlere Tagesgänge gut geeignet (Abbildung 5.4). Dominiert wird diese Graphik vom raschen Anstieg der NO_x-Emissionen am Morgen und dem schnellen Abfall in den Abendstunden.

Während der Periode 2005/06 sind zusätzlich zwei kleine Maxima im Tagesverlauf zu erkennen, die in dieser Ausprägung 2007/08 nicht sichtbar sind. Dies könnte einerseits auf eine geringfügige Veränderung der Verkehrsstruktur als auch auf die Einführung des variablen, immissionsgesteuerten Tempolimits im November 2007 zurückzuführen sein, möglicherweise auch auf eine Kombination daraus. Durch eine Geschwindigkeitsreduktion

ist die Zahl der potentiell möglichen Fahrten kleiner als bei einer Höchstgeschwindigkeit von 130 kmh^{-1} , damit würde die Maßnahme womöglich zu einer Glättung der Morgen- und Abendspitzen beitragen.

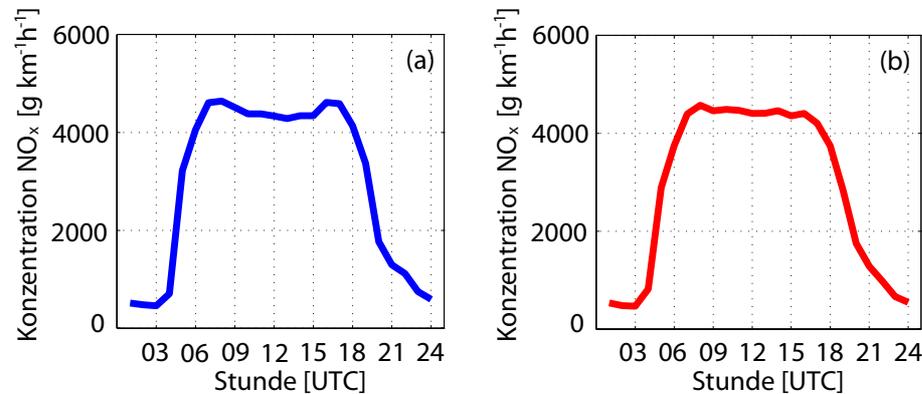


Abbildung 5.4: Mittlere Tagesgänge der NO_x -Emission (Verkehr) während der Wintermonate (Anfang Dezember bis Ende Februar) 2005/06 (a) und 2007/08 (b).

5.1.2 Heizgradtagmethode zur Quantifizierung der Feinstaub-Emission

Wie bereits erwähnt, basieren die Emissionswerte von NO_x in Abschnitt 5.1 ausschließlich auf den Verkehrszahlen der Autobahn. Die weiteren Emissionsquellen betreffen die Industrie und die privaten Haushalte. Berechnungen und Simulationen der Technischen Universität Graz ergaben jedoch, dass der weit größte Anteil von 67 % an den gesamten NO_x -Emissionen im Unterinntal aus dem Verkehr stammen, weitere 23 % aus der Industrie und der Rest aus dem Hausbrand (Heimann et al. 2007). Demzufolge ist bereits eine große Quelle durch die vorherigen Analysen abgedeckt.

Weitere Berechnungen fanden von gleicher Stelle für PM_{10} statt. Von den insgesamt 259 ta^{-1} im Unterinntal freigesetzten Mengen an PM_{10} stammen bis zu 111 ta^{-1} aus der Industrie. Weitere 105 ta^{-1} begründen sich im Verkehr und der Rest von 43 ta^{-1} wird von Hausfeuerungsstätten verursacht (Heimann et al. 2007). Jedoch merken die Autoren an, dass die Unsicherheiten in den Berechnungen relativ groß sind, da detaillierte Informationen bezüglich des Verkehrs auf untergeordneten Straßen und im Stadtgebiet fehlten. Außerdem lag kein PM_{10} -Inventar vor.

Die Emission der Industrie ist generell aufgrund der schlechten Datenlage nur schwer zu quantifizieren, diese sollte sich aber aufgrund der sich nicht stark veränderten Wirtschaftsstruktur zwischen den Untersuchungsperioden nicht allzu viel unterschieden haben.

Zur Bestimmung der Beiträge des Hausbrandes ist die Heizgradtagmethode ein passables Instrument. Diese Methode berücksichtigt nur die gemessenen Lufttemperaturen und setzt diese in einen Zusammenhang zu einer definierten Heizgrenze und zu den gewohnten Raumtemperaturen. Analog zu den Vorgaben der ZAMG wird in dieser Arbeit die

Heizgrenze bei +12 °C und die Wohnraumtemperatur mit +20 °C festgesetzt. Liegt die mittlere Tagesaußentemperatur unter der Heizgrenze, geht man davon aus, dass eine Wohnraumheizung nötig ist. Daher wird an solchen Tagen die Differenz der Wohnraumtemperatur mit der mittleren Tagesaußentemperatur gebildet.

Diese täglichen Differenzen werden summiert und ergeben die Heizgradtagssumme. Vergleicht man diese mit langjährigen Daten, lässt sich die Menge des Schadstoffausstoßes aus privaten Haushalten grob abschätzen. Während der beiden betrachteten Zeiträume lag die mittlere Tagesaußentemperatur an jedem Tag unter der Heizgrenze, d.h. alle Tage fließen in die Heizgradtagssumme ein.

Fehlende Daten wurden zum Zwecke der Vergleichbarkeit korrigiert, für jeden fehlenden Tag wurde jeweils der tägliche Mittelwert über die gesamte Periode addiert. Auf diese Weise musste im Winter 2005/06 eine Korrektur für sieben Tage, im Winter 2007/08 für zwei Tage, durchgeführt werden. Die Tabelle 5.2 beinhaltet die berechneten Werte beider Perioden der Station Schwaz und als Vergleich 10-jährige Mittelwerte (1993-2003) der ZAMG-Station Jenbach (aus Wittig 2007).

	10-jähr. Mittel	Schwaz 06	Abweichung	Schwaz 08	Abweichung
Dezember	607 °C	703 °C	+15.8 %	651 °C	+7.3 %
Jänner	628 °C	813 °C	+29.4 %	562 °C	-10.5 %
Februar	507 °C	624 °C	+23.0 %	485 °C	-4.4 %

Tabelle 5.2: Monatsweiser Vergleich der Heizgradtagssummen an der Station Schwaz während beider Winterperioden. Als Vergleich das 10-jährige Mittel der Station Jenbach (ZAMG).

Zusammengefasst ergibt sich die Aussage, dass zwischen den beiden Perioden große Unterschiede bei den Heizgradtagssummen bestehen. Die Zahl der Heizgradtage über alle drei Monate war im Jahr 2007/08 um 442 °C bzw. 20 % geringer als während der Winterperiode 2005/06. Im klimatologischen Vergleich zeigt sich, dass der Winter 2007/08 näher am klimatologischen Mittelwert in punkto Heizgradtagssummen lag als der Winter 2005/06. Der Winter 2005/06 wich außergewöhnlich stark vom langjährigen Mittelwert ab, über die gesamte Winterperiode 2005/06 lagen die Werte der Heizgradtagssummen im Durchschnitt um 23 % höher.

Betrachtet man die Heizgradtagssummen in der Darstellung von täglichen Werten, ergeben sich interessante Unterschiede. Die höchsten Werte während 2007/08 wurden um die Weihnachtszeit (Hochdruckperiode) berechnet, jedoch waren diese um einiges niedriger als die Höchstwerte während 2005/06. Besonders die kalten Perioden im Jänner 2005/06 verursachten Heizgradtagssummen von über 30 °C. Der Mittelwert über die jeweiligen Perioden lag während 2005/06 bei 23.9 °C, zwei Winter später zeigen die Berechnungen 18.9 °C als Mittel.

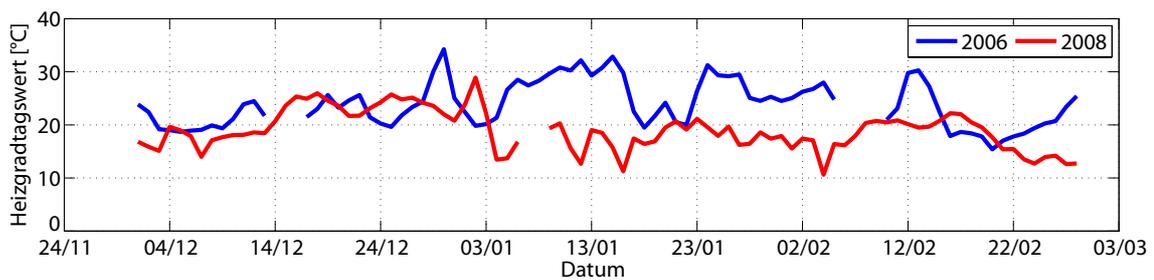


Abbildung 5.5: Zeitlicher Ablauf der täglich summierten, aus den Temperaturwerten der Station Schwaz berechneten Heizgradtagwerte für die Wintermonate 2005/06 (blau) und 2007/08 (rot).

Der Anteil an Feinstaub-Emission von privaten Feuerungsstätten ist hoch, wohingegen deren NO_x Emission eine untergeordnete Rolle spielt. Aus diesem Grund kann die Heizgradtagmethode besonders im Zusammenhang mit PM_{10} betrachtet werden. Als Ergänzung zu den vorher erwähnten Untersuchungen der TU-Graz (Heimann et al. 2007), klassifizierte das Bayerische Emissionskataster 2000 (Pregger et al. 2005) den Anteil des Hausbrandes an den gesamten Feinstaubemissionen mit 27 %, den Beitrag des Verkehrs mit 38 % und den Einfluss der Industrie mit 19 %.

Demzufolge kann annähernd ein Viertel der Feinstaubemission durch die Heizgradtagmethode annähernd begründet werden. Aufgrund der schon erwähnten Tatsache, dass sich die Verkehrs- und Industriestruktur zwischen den beiden Perioden nicht gravierend verändert hat, können niedrigere Feinstaub-Immissionen während der Periode 2007/08 als während 2005/06 erwartet werden.

5.2 Immissionen von Luftschadstoffen

5.2.1 NO_x , NO und NO_2 -Immission an der Autobahn A12

Die Analyse der Emissionen ist ein wichtiger Baustein in der Betrachtung der Schadstoffkonzentrationen in der Talatmosphäre. Bezüglich deren Auswirkungen sind jedoch die Immissionen in ein definiertes Gebiet von entscheidender Bedeutung. Der Eintrag von Luftschadstoffen in ein System ist daher ein maßgeblicher Parameter in der Beurteilung der Luftqualität. Allerdings ist es nicht trivial, die Immission flächendeckend zu bestimmen, da von den Messgeräten immer nur Punktmessungen wiedergegeben werden können. Im folgenden Kapitel werden zur Quantifizierung der Immission die gemessenen Daten (NO, NO_2 und Feinstaub) der Luftgütemessstelle des Landes Tirol am Standort Vomp/Raststätte verwendet.

Die Luftgütemessstelle befindet sich an der rechten Seite der Richtungsfahrbahn Kufstein im Gemeindegebiet von Vomp. Aufgrund der sehr nahen Position zur Autobahn A12 ist sie vom dort fließenden Verkehr stark beeinflusst. Infolgedessen können aber auch

gute Aussagen über die Immission des Autobahnverkehrs getroffen werden. Durch eine abgeschirmte Lage in Richtung Westen sind jedoch die Austauschverhältnisse ein wenig beeinflusst.

Schon die Dreimonatsstatistik der NO_x-Immission (Halbstundenwerte - Summation nach Vorschrift des IG-L) zeigt interessante Punkte auf (Tabelle 5.3). Der berechnete Mittelwert lag für die Wintermonate 2007/08 um $167 \mu\text{gm}^{-3}$ niedriger als in der Vergleichsperiode 2005/06. Besonders hoch war die Abweichung bei den Maximalwerten ($2147 \mu\text{gm}^{-3}$ bzw. $1556 \mu\text{gm}^{-3}$), der erste Winter 2005/06 war demnach eindeutig von sehr hohen Maximalbelastungen geprägt. Außerdem lassen die Werte der Standardabweichung darauf schließen, dass die Konzentrationen von NO_x im Winter 2005/06 im Gesamtverlauf um einiges variabler waren als im zweiten untersuchten Winter 2007/08 ($368 \mu\text{gm}^{-3}$ zu $263 \mu\text{gm}^{-3}$).

	Mittelwert	Stand.abw.	Maximum	Minimum
Winter 2005/06	$510 \mu\text{gm}^{-3}$	$368 \mu\text{gm}^{-3}$	$2147 \mu\text{gm}^{-3}$	$25 \mu\text{gm}^{-3}$
Winter 2007/08	$343 \mu\text{gm}^{-3}$	$263 \mu\text{gm}^{-3}$	$1556 \mu\text{gm}^{-3}$	$10 \mu\text{gm}^{-3}$

Tabelle 5.3: Statistische Zusammenfassung der Immission von NO_x, gemessen von der Luftgütemessstelle Vomp/Raststätte an der A12 (Summation nach IG-L-Vorschriften) für die Winterperioden 2005/06 und 2007/08.

Generell zeigt sich dieser Unterschied auch bei den zeitlichen Analysen der differenzierten NO und NO₂-Konzentrationen zwischen den beiden Winterperioden (Abbildung 5.6). Die NO-Werte waren bis Anfang Jänner während beider Perioden noch ungefähr auf dem gleichen Niveau, aber während der Jännermonate divergieren die Kurven erheblich. Die Werte aus Jänner 2006 waren um einiges höher als die Werte aus 2008. Die erhöhten Werte waren zeitlich deckungsgleich zu den beiden Hochdruckwetterphasen während des Jänners 2006.

Die NO₂-Messungen induzieren das gleiche Bild, bis auf die angesprochenen Jännerperioden waren die Messungen während beider Jahre auf ähnlichem Niveau. Die Maximalwerte der NO₂-Messungen während der Periode 2005/06 lagen bei über $250 \mu\text{gm}^{-3}$ und damit weit über dem gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwert von $200 \mu\text{gm}^{-3}$ (siehe Abschnitt 2.3).

Diese hohen Werte pausten sich auch auf eine höhere Anzahl an Grenzwertüberschreitungstage während 2005/06 durch, die in Abschnitt 4.2 behandelt wurden. Zu beachten gilt es allerdings auch den Umstand, dass sich während 2007/08 ebenfalls Hochdruckperioden eingestellt hatten (Ende Dezember und Ende Februar), diese führten aber demzufolge nicht zu gravierend höheren Immissionen bzw. Grenzwertüberschreitungen.

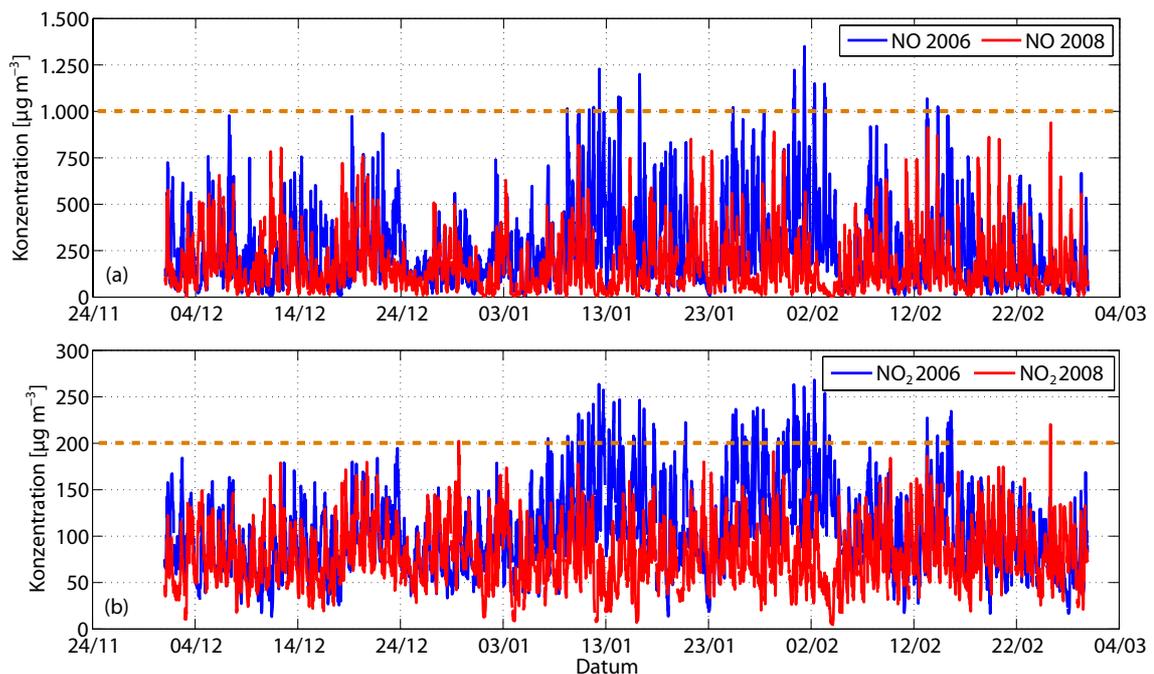


Abbildung 5.6: Zeitlicher Verlauf der NO- (Graphik (a)) und NO₂-Immissionen (b) während der Winter 2005/06 (rot) und 2007/08 (blau) am Standort Vomp/Raststätte. In oranger Farbe eingezeichnet sind der Grenzwert des VDI (für NO: HMW > 1000 $\mu\text{g m}^{-3}$) und der gesetzlich in IG-Luft festgeschriebene Grenzwert für NO₂ (HMW > 200 $\mu\text{g m}^{-3}$).

Eine Ursache für die niederen Immissionsmessungen während der stabilen Wetterlage im Dezember 2007 im Vergleich zum Jänner 2006 ist sicherlich die verringerte Emission während der Weihnachtsperiode 2007. Die weiteren Erklärungen müssen auf der meteorologischen Seite zu finden sein (Kapitel 6).

Darüber hinaus zeigt sich während beider Winter besonders bei der NO-Immission das Minimum während der Weihnachtsperiode. Dies hängt unmittelbar mit den geringeren Verkehrsraten zusammen. Da NO primär emittiert wird, schlägt sich ein dementsprechend geringeres Verkehrsvolumen sofort auf die Immission nieder.

Ähnlich zu den Emissionsanalysen bietet sich auch bei der Betrachtung der Immission eine stündlich aufgelöste Analyse an. Zur Wahrung der Vergleichbarkeit mit den Abbildungen 5.2 und 5.3 (NO_x-Emissionen) erfolgt in den Immissions-Abbildungen 5.7 und 5.8 keine Trennung in NO und NO₂, sondern es sind ebenfalls die Werte der NO_x-Konzentration visualisiert. Dabei gilt es zu beachten, dass die NO_x-Werte mittels einer Gewichtung aus NO und NO₂ summiert wurden (siehe Abschnitt Maßeinheiten 2.2.3). Es zeigt sich jedoch kein so klar gegliedertes Muster wie bei den NO_x-Emissionen, jedoch lassen sich auch hier charakteristische Zusammenhänge erkennen.

Abbildung 5.7 für die Winterzeit 2005/06 zeigt ausgeprägte Maxima der NO_x-Immission während des Jäners 2006. Diese sind in den Morgenstunden klar mit dem Ende des

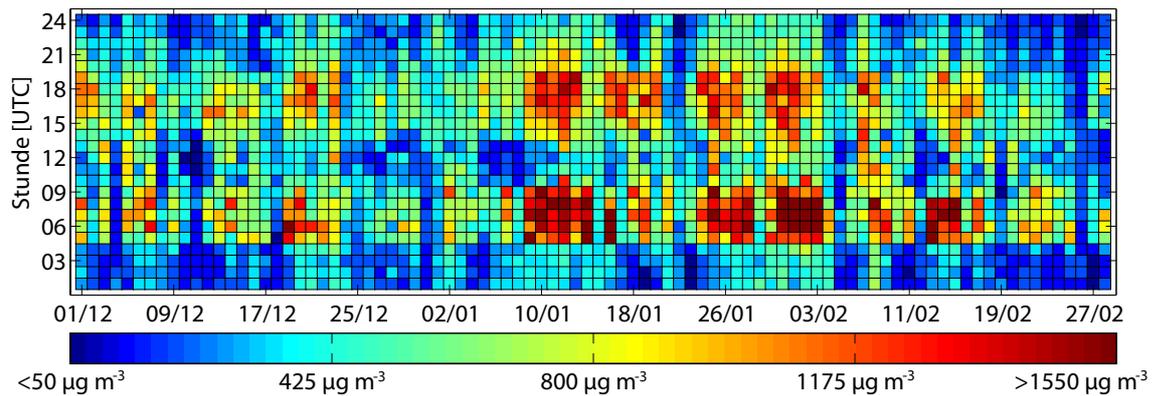


Abbildung 5.7: Stündliche Analyse der NO_x-Immissionen an der A12-Vomp/Raststätte für den Winter 2005/06. Die gewichtete Summation des NO_x erfolgte nach den Vorschriften des IG-L.

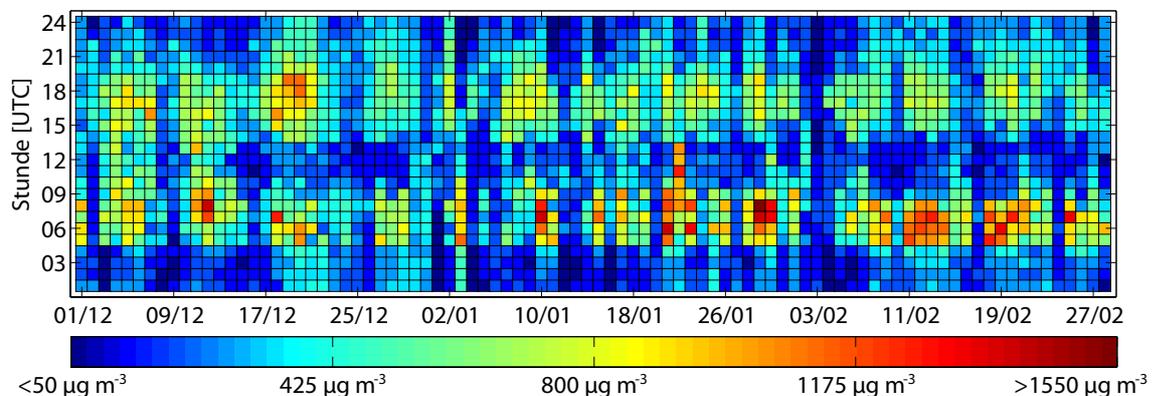


Abbildung 5.8: Analyse der NO_x-Immissionen an der A12-Vomp/Raststätte für den Winter 2007/08. Die gewichtete Summation des NO_x erfolgte nach den Vorschriften des IG-L.

Nachtfahrverbots für LKW $> 7.5 t$ um 4 Uhr UTC und dem Beginn des morgendlichen Berufsverkehrs begrenzt - kongruent zu den Emissionswerten.

Besonders interessant ist Sonntag, der 15. Jänner 2006. An diesem Tag wurden während des ganzen Tages geringe Immissionswerte gemessen, obwohl der vorherige und der folgende Kalendertag sehr hohe Werte aufwies. Spätere Analysen zeigen, dass dieser Tag weder von Niederschlag noch von starkem Wind beeinflusst war - meteorologische Einflüsse, die das Schadstoffniveau durch Verdünnung bzw. Auswaschung stark minimieren können, sind daher auszuschließen.

Die geringeren Emissionen während dieses Sonntages haben sich demnach direkt und unmittelbar auf die NO_x-Belastung ausgewirkt. Besonders der reduzierte Ausstoß von NO konnte die Gesamtbelastung verringern. Als Folge des geringen Angebots an NO konnte natürlich auch weniger NO₂ gebildet werden. Jedoch sobald die NO-Belastung in den Morgenstunden des folgenden Montags zu steigen begann, erhöhte sich auch die Gesamtbelastung wieder.

Im Vergleich zum Winter 2005/06 (Abbildung 5.7) lassen sich in Abbildung 5.8 (Winter 2007/08) eindeutige Unterschiede sehen. Insgesamt sind schwächere Maxima zu erkennen, insbesondere in den Nachmittagsstunden sind die Unterschiede zwischen den Winterperioden augenscheinlich. Auch die morgendliche, scharfe Abgrenzung zu den Nachtwerten ist nicht so gut ausgeprägt wie in Abbildung 5.7. Zudem entfallen die Maxima während der Hochdruckperiode im Dezember 2007 und Februar 2008. Wie schon die Abbildung des zeitlichen Verlaufs von NO und NO₂ (Abbildung 5.6), lassen auch diese Graphiken einen unterschiedlich starken meteorologischen Einfluss sichtbar werden.

Andererseits illustrieren die tageszeitlichen Schwankungen der NO_x-Konzentrationen partielle Ähnlichkeiten der beiden analysierten Perioden. Während beider Jahre dominieren zwei Maxima den mittleren Tagesgang (Abbildung 5.9). Das erste Maximum entstand in den Morgenstunden und wurde gefolgt von einem Minimum zu Mittag. Gegen den späteren Nachmittag bzw. Abend folgte ein kleineres Maximum, das sich in den Nachtstunden minimierte.

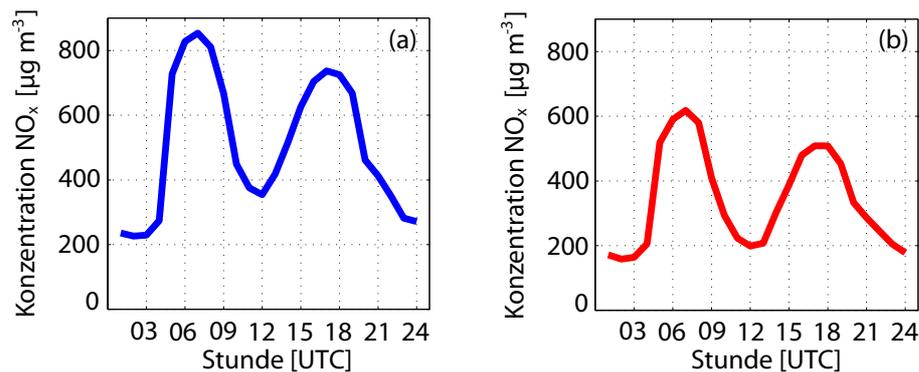


Abbildung 5.9: Mittlerer Tagesgang der NO_x-Immissionen während der Winter 2005/06 (a) und 2007/08 (b), gemessen am Standort Vomp/Raststätte. Gut ersichtlich sind das morgendliche und abendliche Maximum und das jeweilige Minimum zu den Mittags- und Abendstunden.

Die Höhen der Maxima demonstrieren die insgesamt unterschiedliche Ausprägung der Belastung, während des Winters 2005/06 übertrafen die Höchstwerte jene Werte aus 2007/08 um bis zu 250 µg m⁻³. Die ausgeprägten Minima zu den Mittags- und Nachtstunden sind einerseits auf die Vergrößerung des Luftvolumens während des Tages und die Abläufe der Photochemie bzw. auf die geringeren Emissionsraten in der Nacht zurückzuführen (Vgl. Emissionscharakteristik in Abbildung 5.3 und 5.4).

5.2.2 Feinstaub-Immission (PM₁₀) an der Autobahn A12

Im Gegensatz zu NO und NO₂ stehen für die Analysen bezüglich Feinstaub (PM₁₀) nur Daten in täglicher Auflösung zur Verfügung. Die Gewinnung der Messdaten erfolgte mittels gravimetrischer Methode. Die jeweiligen Tagesmittelwerte der Messstation des

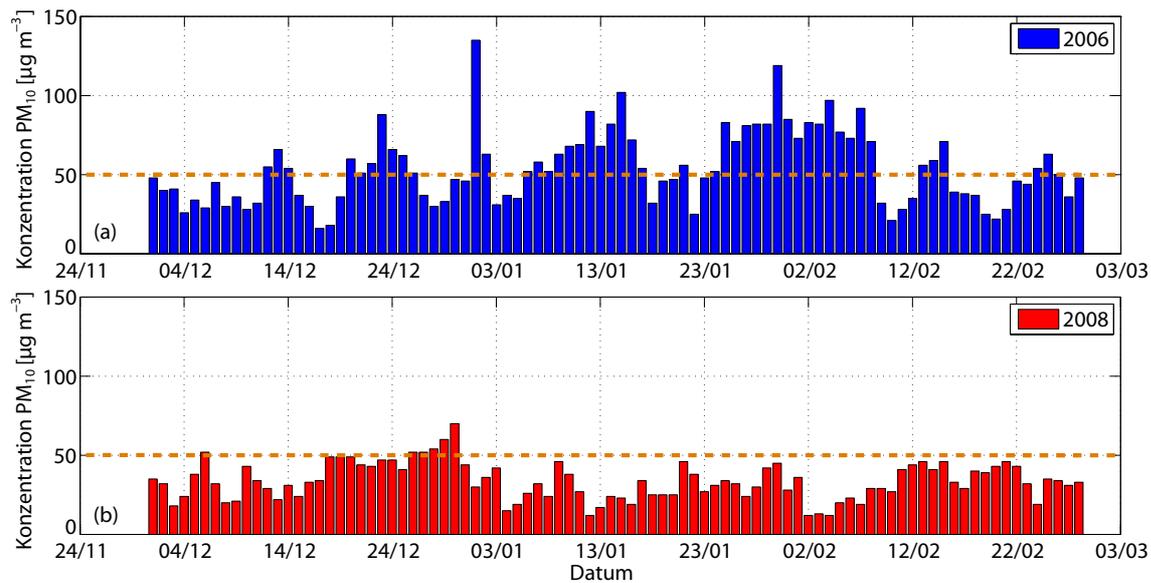


Abbildung 5.10: Tagesmittelwerte für Feinstaub (PM_{10}) während der Winter 2005/06 (a) und 2007/08 (b), gemessen von der Luftgüteüberwachungsstation des Landes Tirol. In oranger, strichlierter Farbe ist der Grenzwert von $50 \mu\text{g m}^{-3}$ (Tagesmittelwert) nach IG-L dargestellt.

Landes Tirol an der A12 sind in Abbildung 5.10 dargestellt. Besonders augenfällig ist das Maximum am 01. Jänner 2006, das unmittelbar mit den Silvesteraktivitäten und der damit verbundenen großen Freisetzung von Feinstaub zusammenhängt. Aufgrund von Niederschlägen in der Silvesternacht 2007/08 fehlte dieses Maximum hingegen im Winter 2007/08.

Während im Winter 2005/06 die PM_{10} -Werte teilweise weit und oft über dem Grenzwert lagen, wurden im Winter 2007/08 nur im Dezember (besonders während den Weihnachtsfeiertagen) Grenzwertüberschreitungen festgestellt. Analog zu den Werten der NO_x -Immission bilden sich auch hier die Hochdruckperioden im Jänner 2006 mittels teilweise sehr hohen Werten ab. Jedoch auch die Hochdruckperiode im Dezember 2007 verursachte bei der Komponente PM_{10} , im Gegensatz zu NO_x , erhöhte Werte.

Dies hängt unmittelbar mit den Feinstaub-Emissionen aus den privaten Heizanlagen, die aus den Heizgradtagen abgeschätzt wurden, zusammen. Außerdem zeigt sich während den Weihnachtfeiertagen eine gewisse Akkumulation von PM_{10} , bis zum Ende der Hochdruckperiode stiegen die Werte beinahe täglich an.

Generell ist bei der Betrachtung der Graphiken ersichtlich, dass die Feinstaubbelastung meist unterhalb des Grenzwertes lag, jedoch bei entsprechendem, nachteiligem meteorologischen Einfluss kommen Grenzwertüberschreitungen vor. Besonders im Winter 2005/06 war dies der Fall. Die Meteorologie ist demzufolge auch bei der Feinstaubbetrachtung von entscheidender Bedeutung.

Kapitel 6

Meteorologische Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet

Die Analysen der Emissions- und Immissionsituation an der Schadstoffmessstation Vomp/Raststätte (A12) lassen noch einige Fragen offen, die im folgenden Kapitel 6, mit Schwerpunkt auf den meteorologischen Gegebenheiten, betrachtet werden. Die Untersuchungen basieren auf den gemessenen meteorologischen Parametern der temporären automatischen Wetterstationen Schwaz und Vomperberg, auf den Daten der ZAMG-Stationen Patscherkofel (Bergstation) und Jenbach sowie auf Temperaturmesswerten von Hobo-Sensoren entlang des Kellerjochhanges. Hinzu kommen zur Bestimmung von Mischungsschichthöhen Datensätze des Ceilometers.

Dargestellt werden die fundamentalen meteorologischen Faktoren Temperatur, Wind, Strahlung und Niederschlag. Ergänzt werden diese durch graphische Analysen von Sonnenscheinregistrierungen, Schneedeckenhöhen und Bodentemperaturen. Besonders eingegangen wird zudem auf die Stabilität der Talatmosphäre.

Die Analysen beginnen mit den Daten jener Stationen, die sich nicht unmittelbar im Messgebiet befanden. Anschließend wird immer weiter ins Untersuchungsgebiet hineingezoomt - schlussendlich enden die Analysen bei den Untersuchungen der Mischungsschichthöhen.

6.1 Untersuchung der meteorologischen Daten

6.1.1 Wind, Niederschlag und Sonnenschein (Patscherkofel und Jenbach)

Die Auswertungen der Windregistrierungen der Bergstation Patscherkofel lassen die interessante Tatsache erkennen, dass während der Wintermonate 2007/08 erheblich mehr Südanströmungen stattgefunden haben müssen als im Winter 2005/06. Zudem waren sie teilweise stärker und hatten ihr Maximum bei 40 m s^{-1} (10-Minuten Mittelwert).

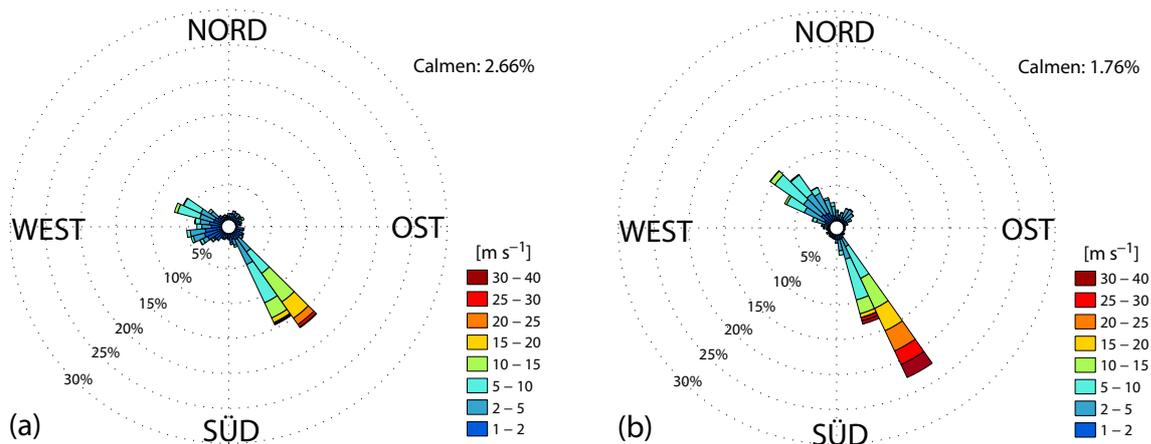


Abbildung 6.1: Windrosen der Bergstation Innsbruck-Patscherkofel (2246 m), jeweils für 01.12. bis 28.02. in den Jahren 2005/06 (a) und 2007/08 (b). Farblich dargestellt ist die Windgeschwindigkeit.

Diese Tatsache deckt sich auch mit der Analyse der Strömungslagen nach Steinacker (1991), die vermehrte Südanströmungen in 2007/08 gezeigt hatte (Abschnitt 4.3). Aufgrund dieser Ergebnisse sind Analysen bezüglich Föhnlagen im Inntal bei Schwaz nicht zu vernachlässigen, da Föhn zu einer Durchmischung der Talatmosphäre führen kann und damit auch zu einer Verdünnung der Schadstoffkonzentrationen (für nähere Informationen: siehe Kapitel 2.1.2).

Genau zu dieser Fragestellung gibt es schon einige Arbeiten, daher zitiere ich im Folgenden die darin befindlichen Aussagen zur Thematik Föhn. Wittig (2007) klassifizierte in ihrer Arbeit zwischen 01.12.2005 und 28.02.2006 keinen einzigen typischen Föhntag, wohingegen Gurgiser (2009) für den Winter 2007/08 an der Messstelle Schwaz an 13 Tagen starken Föhn und an 5 Tagen kurze Föhnleinbrüche definiert hat.

Er merkte auch an, dass die registrierten Föhnstunden am Vomperberg ein wenig höher waren als jene am Talboden (Station Schwaz). Dies deckt sich mit den Aussagen in Abschnitt 2.1.2, dass Föhnwinde nicht immer bis zum Talboden durchbrechen können, aber in einiger Höhe über dem Talboden durchaus wehen. Die im Tal lagernde Kaltluft bleibt somit inklusive etwaiger Schadstoffe statisch liegen, nur die darüber liegende Luftschicht erfährt eine gute Durchmischung.

Gurgiser (2009) nannte speziell folgende starke Föhntage am Standort Schwaz: 03.-06., 11.-12., 15.-16. im Jänner 2008 und 01.-02., 04.-06. im Februar 2008. Bei genauer Kenntnis dieser Föhntage lässt sich deren erniedrigende Auswirkung auf die Schadstoffbelastung auch auf Abbildung 5.8 erkennen.

Da im Untersuchungsgebiet direkte Messungen der Sonnenstunden und Niederschlagssummen nicht vorhanden waren, musste auf die Aufzeichnungen der automatischen

Wetterstation Jenbach (8 km in östlicher Richtung von Schwaz entfernt) zurückgegriffen werden. Dort gab es im Winter 2005/06 um 62 Stunden bzw. 17 % weniger Sonnenschein als im Winter 2007/08. Diese Unterschiede, die insbesondere auf den Februar in beiden Wintern basierten, sind auch in der Abbildung 6.2 zu erkennen. Ansonsten zeigen sich auch hier klarerweise die Hochdruckphasen im Jänner 2006, Dezember 2007 und Februar 2008 in scharfer Abgrenzung.

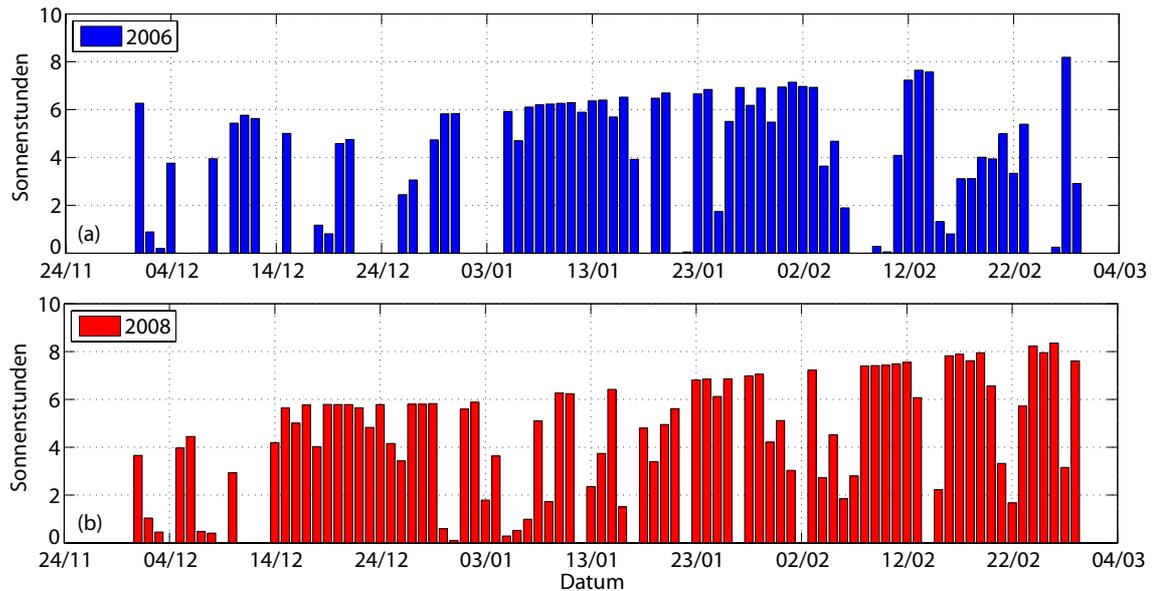


Abbildung 6.2: Täglich summierte Sonnenstunden [h] für Jenbach (Inntal), Winter 2005/06 (a) und Winter 2007/08 (b).

Besonders erwähnens- und beachtenswert sind die gemessenen Niederschlagssummen während beider Perioden. Diese zeigen eine charakteristisch total unterschiedliche zeitliche Niederschlagsverteilung. Während in Summe zwischen Dezember 2005 und Ende Februar 2006 eine Niederschlagssumme von 233 mm gemessen wurde, konnte innerhalb derselben Periode 2007/08 nur ungefähr die Hälfte davon aufgezeichnet werden (125 mm). Darüber hinaus verteilten sich diese Niederschläge auch gänzlich unterschiedlich. Der Winter 2005/06 war gekennzeichnet von zwei markanten Niederschlagsereignissen Mitte Dezember 2005 und Mitte Jänner 2006 mit bis zu 40 mm Tagessummen.

Besonders das zweite Niederschlagsereignis ist dabei interessant, da dieses zwischen den beiden hochbelasteten Hochdruckperioden im Jahre 2005/06 stattgefunden hat. Jedoch konnte dieses Ereignis nur kurzfristig die Schadstoffsituation verbessern. Dies basierte unter anderem darauf, dass der Niederschlag damals in Form von Schnee, der keine so guten Auswaschfähigkeiten besitzt wie Regen, gefallen war.

Außerdem lassen die Analysen der Schneedeckenhöhe am Standort Schwaz vermuten, dass dieses Ereignis im Raum von Schwaz mit weit geringerer Intensität vonstatten ging

als in der Umgebung der Routinestation im weiter entfernt liegenden Jenbach.

Die Monate Dezember, Jänner und Februar im Winter 2007/08 waren geprägt von mehreren kleineren Niederschlagsereignissen, die sich über die gesamte Periode verteilten. Der Maximalwert lag nur bei knapp 14 *mm* Tagessumme am 22. Jänner. Nur die Hochdruckperioden waren gänzlich niederschlagsfrei. Die Niederschlagsform war meist Regen, nur die Ereignisse zu Beginn des Dezembers und zum Jahreswechsel waren mit Schneefällen am Talboden verbunden.

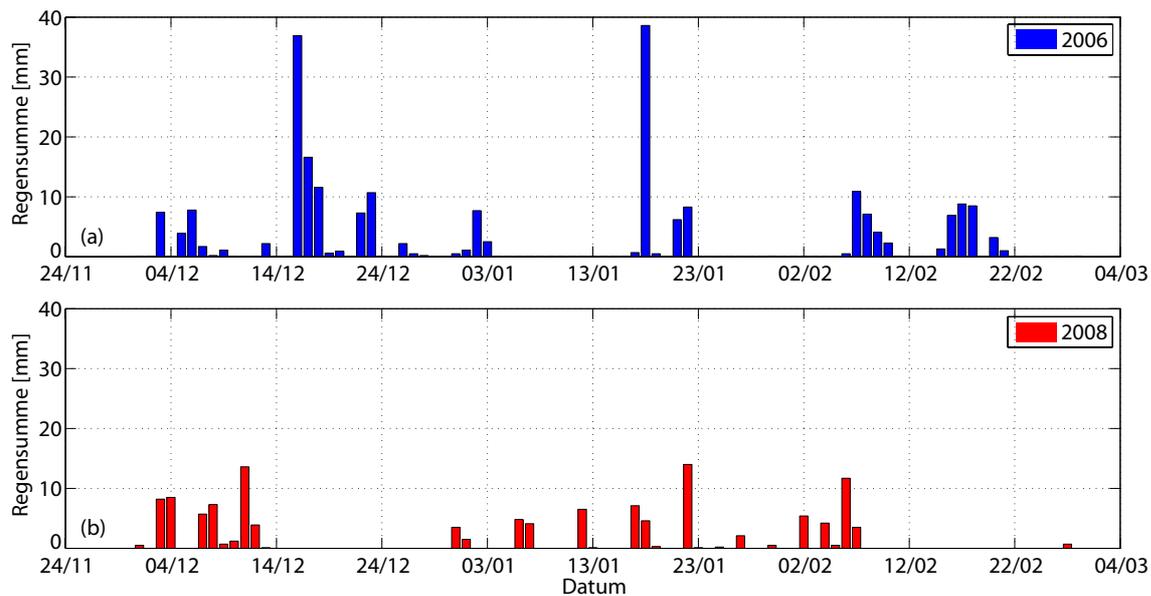


Abbildung 6.3: Täglich summierte Niederschlagsmengen [*mm*] für Jenbach im Inntal. Graphik (a) zeigt den Winter 2005/06, in Abbildung (b) ist der Winter 2007/08 in rot dargestellt.

6.1.2 Wind und Temperaturen (Schwaz und Vomperberg)

Die weiteren Analysen beschäftigen sich nun mit meteorologischen Parametern, die direkt im Untersuchungsgebiet gewonnen wurden. In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse der temporären, automatischen Wetterstationen Schwaz und Vomperberg näher beleuchtet. Es gilt zu wissen, dass sich die Station Schwaz am Talboden befand und die Station Vomperberg in Plateaulage aufgestellt wurde (siehe Abbildung 3.3). Beide Stationen wurden Vergleichsmessungen unterzogen (Abschnitt 3.3.2).

Ganz eindeutige Unterschiede zeigen sich bei der Betrachtung der Windrosen in Abbildung 6.4 (Schwaz) und 6.5 (Vomperberg). Am Talboden wurden während 2007/08 teilweise höhere Windgeschwindigkeiten gemessen als zwei Jahre zuvor. Diese Intensitätsunterschiede beruhen vermutlich zu einem guten Teil auf Föhnwinde während Jänner und Februar 2008.

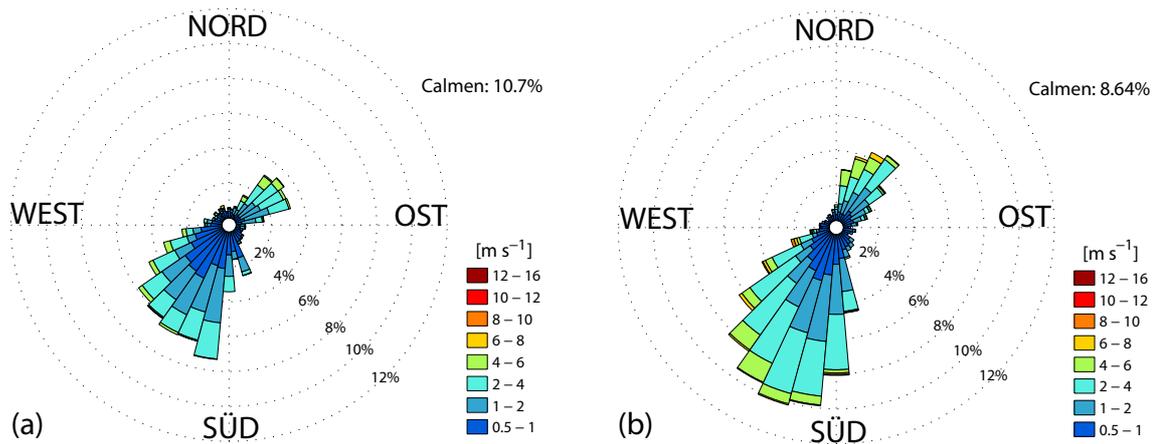


Abbildung 6.4: Windrosen für die Station Schwaz (Talboden) für 2005/06 (a) und 2007/08 (b) - die Intensitäten und Häufigkeiten der Windgeschwindigkeit sind erkennbar unterschiedlich.

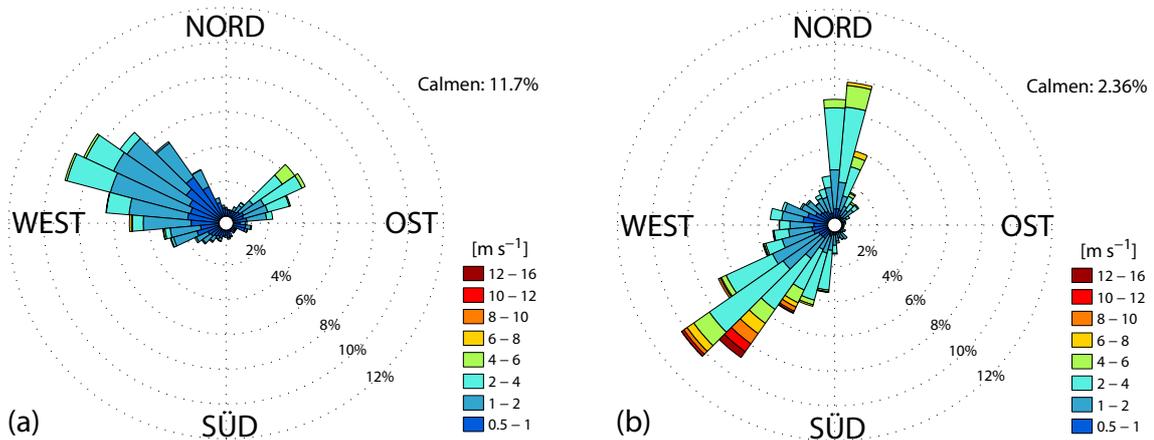


Abbildung 6.5: Windrosen für die Station Vomperberg (Plateaulage) für 2005/06 (a) und 2007/08 (b). Während des Winters 2007/08 kamen tendenziell höhere Windgeschwindigkeiten vor. Die Stationen waren während der beiden Messperioden an unterschiedlichen Standorten aufgebaut, für genauere Erklärung bitte Text beachten.

Die hohen Windgeschwindigkeiten am Standort Vomperberg im Winter 2007/08 im Vergleich zum Standort Schwaz des gleichen Jahres haben ihre Ursache einerseits in der sehr exponierten Lage der AWS Vomperberg, als auch im Effekt der nicht bis ins Tal vordringenden Föhnwinde.

Beiden Standorten ist jedoch gemeinsam, dass die Südwestwinde (Talauswinde) gegenüber den Nordostwinden (Taleinwinden) überwogen. Dies steht unmittelbar in Zusammenhang mit den in Mitteleuropa dominanten Westwetterlagen (siehe auch Abbildung 6.1 als Beispiel für die Strömungsrichtung in beinahe freier Atmosphäre), wohingegen direkte, synoptisch induzierte, Ostanströmungen selten vorkamen. Weitere Beiträge stammen außerdem aus den eigentlichen Tal- und Hangwinden bzw. Kanalisierungseffekten.

Bei Betrachtung der Windregime am Vomperberg (Abbildung 6.5) muss beachtet werden, dass der Standort 2005/06 nicht ident ist mit dem des Jahres 2007/08. Während der ersten Periode stand die Station etwa 33 m tiefer und etwas weiter westlich als zwei Jahre später. Außerdem war der Standort 2007/08 etwas exponierter. Daher machten sich lokale Einflüsse, besonders während 2005/06, bemerkbar (siehe auch Abbildung 3.2).

Jenes Maximum aus Nordwest basiert wahrscheinlich auf Ablenkungseffekten in der Umgebung und auf Beiträgen des dort in das Inntal mündenden Seitentals "Vomperloch". Jedoch kann die Aussage getroffen werden, dass, übereinstimmend mit Schwaz, höhere Windgeschwindigkeiten innerhalb der Periode 2007/08 vorgeherrscht haben. Sehr auffällig ist auch der Prozentsatz der Calmen (Windgeschwindigkeit $< 0.5 \text{ ms}^{-1}$), der von Dezember bis Februar 2005/06 bei 11.7 % lag, wohingegen zwei Jahre später nur bei 2.4 % der Fälle Windstille festgestellt wurde. Teilweise ist dieser Unterschied auf die veränderten Messstandorte, aber auch auf die unterschiedlichen Messgeräte zurückzuführen.

Ergänzend zu den Windrosen illustriert die Abbildung 6.6 die Tagesmittel der gemessenen Windgeschwindigkeiten in Schwaz. Im Mittel lag die Windgeschwindigkeit während 2005/06 bei 1.7 ms^{-1} , der Winter 2007/08 weist hingegen über 2 ms^{-1} als Mittel auf. Besonders Ereignisse mit stärkeren Winden kamen 2007/08 öfter vor als 2005/06.

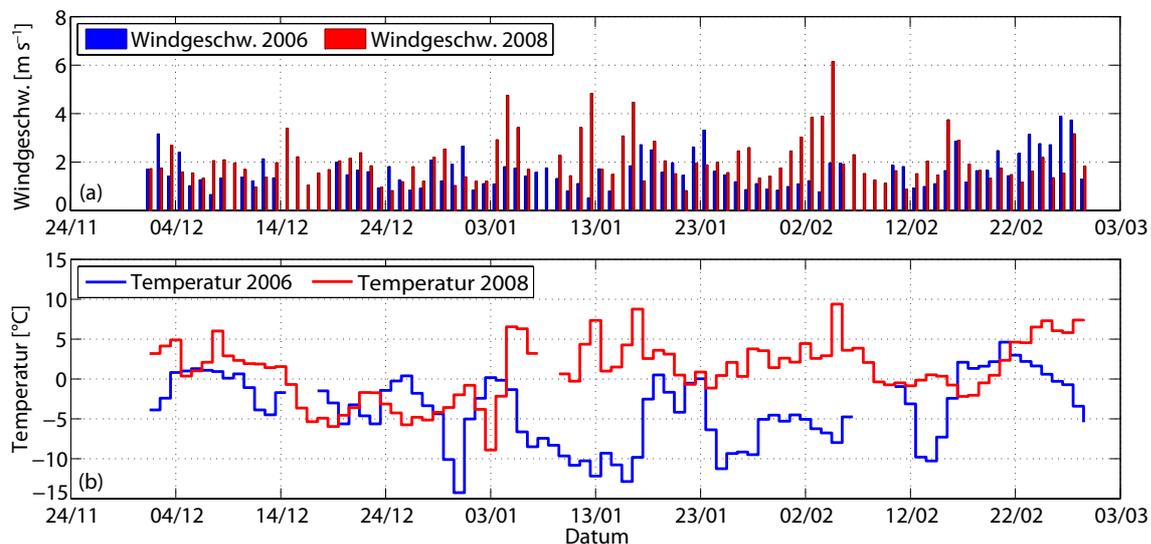


Abbildung 6.6: Windgeschwindigkeits- (a) und Temperaturtagesmittel (b) der automatischen Wetterstation Schwaz. Wie in den meisten Abbildungen ist der Winter 2005/06 jeweils blau und der Winter 2007/08 in der Farbe rot dargestellt.

Betrachtet man diese Abbildung in Kombination mit den mittleren Tagestemperaturen, sind einige Zusammenhänge zu finden. Viele sprunghafte Anstiege der Temperaturen 2007/08 sind kongruent mit starken Windereignissen. Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich dabei um Föhnereignisse in Schwaz handelt. Die vorher bereits erwähnte Windregimeanalyse nach Gurgiser (2009) bestätigt diese These.

Deckungsgleich zu den klimatologischen Analysen von Innsbruck liefern die statistischen Betrachtungen des Temperaturverlaufs in Schwaz (Halbstundenwerte) dieselben Ergebnisse (Tabelle 6.1). Der Winter 2005/06 war mit einer 2 *m*-Mitteltemperatur von $-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ um einiges kühler als der Winter 2007/08 ($+1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ganz besonders unterschieden sich die Winter auch in den Extremwerten, das Minimum der Winterperiode 2005/06 war um über $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ niedriger als jenes im Dezember, Jänner und Februar 2007/08. Das sehr hohe Maximum im zweiten Winter ist ebenfalls erwähnenswert.

Die Standardabweichung war während beider Messzeiträume beinahe auf identischem Niveau. Daraus lässt sich ableiten, dass die beiden Winter ein unterschiedliches Temperaturniveau hatten, jedoch die mittleren Schwankungen um diesen Mittelwert einen ähnlich großen Bereich abdeckten.

	Mittelwert	Stand.abw.	Maximum	Minimum
Winter 2005/06	$-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$
Winter 2007/08	$+1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+20.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-13.3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabelle 6.1: Statistische Kenngrößen für den Temperaturverlauf in Schwaz für die Winterperioden 2005/06 und 2007/08.

In der graphischen Darstellung der Temperaturtagesmittel laufen die Temperaturkurven ab Anfang Jänner weit auseinander (Abbildung 6.6). Während im Jänner 2006 zwei sehr kalte Perioden stattgefunden haben, sank die Tagesmitteltemperatur im Winter 2007/08 nur an einem Tag unter $-6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Extremwerte der Tagesmittel lagen bei $-14.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2005/06) bzw. bei $-8.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ für 2007/08.

Maßgebend für die sehr tiefen Temperaturen während des Hochwinters 2005/06 waren abermals die stabilen Wetterlagen (Jänner 2006). Jedoch stellt sich die Frage, warum sich während den synoptisch ähnlichen Hochdruckperioden 2007/08 nicht annähernd so niedere mittlere Temperaturwerte eingestellt haben. Einen ersten Beitrag zur Erklärung könnte eine unterschiedliche Luftmassencharakteristik sein.

Dazu bietet sich die Analyse der Temperaturwerte des Patscherkofels an, der sich in annähernd freier Atmosphäre befindet. Der gemessene Mittelwert für die Dauer der ersten Hochdruckperiode im Jänner 2006 lag bei $-6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, jener für die Hochdruckphase Ende Dezember 2007 bei $-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Diese Differenz im Temperaturmittel kann aber nicht die gesamten Abweichungen erklären. Eine weitere Erklärungsmöglichkeit liegt in der Bodenoberfläche, die in späteren Kapiteln Analysen unterzogen wird (Abschnitt 6.2).

Zusammengefasst waren beide Winter bis Ende des Dezembers bezüglich Temperatur und Wind annähernd gleich. Erst mit dem Beginn der Hochdruckperioden im Jänner 2006 bzw. mit der Ausprägung von sich schnell verändernden Wetterlagen im Jänner 2008 unterscheiden sich die Kurven stark.

6.1.3 Analyse des Temperaturprofils Kellerjochhang

Ein fundamentaler Parameter zur Klassifizierung der Talatmosphäre ist die Stabilität. Diese wird im Allgemeinen aus vertikalen Temperaturgradienten abgeleitet. Jedoch ist es kaum möglich, mit vertretbarem Aufwand permanent ein vertikales Temperaturprofil in der Talmitte zu ermitteln. Daher behilft man sich mit Hangprofilen, die zwar nicht die Situation in der Talmitte wiedergeben, aber trotzdem eine gewisse Beurteilung der Stabilität zulassen.

Zu diesem Zweck sind entlang des Kellerjochhanges in verschiedenen Höhen Temperatursensoren angebracht. Aufgrund von früheren Untersuchungen zur Datenqualität (siehe Abschnitt 3.3.3), wird in diesem Abschnitt der Temperaturgradient zwischen den beiden Kellerjochsensoren 1 und 8 berechnet. Der pseudovertikale Temperaturgradient für 100 m^{-1} berechnet sich mathematisch nach Gleichung 6.1.

$$\frac{dT}{dz} [\text{°C } 100 \text{ m}^{-1}] = \frac{T_{Berg} [\text{°C}] - T_{Tal} [\text{°C}]}{\Delta H [\text{m}]} \cdot 100 [\text{m}] \quad (6.1)$$

Ausgehend von den berechneten Temperaturgradienten lässt sich die Atmosphäre in Stabilitätsklassen einteilen. Generell gilt, dass Temperaturgradienten $> -1 \text{ °C}$ eine trocken-stabile Schichtung der Talatmosphäre beschreiben (ein Teilchen würde bei einer Auslenkung nach oben oder unten einen Impuls zurück zur Ausgangsposition erhalten), wohingegen labile Schichtungen mit Temperaturgradienten $< -1 \text{ °C}$ einhergehen (Teilchen erfährt keinen Impuls zurück zur Ausgangsposition, sondern entfernt sich weiter).

Ist der Temperaturgradient genau -1 °C (trockenadiabatischer Temperaturgradient), liegt eine neutrale Schichtung vor. Bei einer solchen Lage würde ein Teilchen weder eine Beschleunigung nach oben, noch nach unten erfahren - es würde bei fehlendem Impuls von außen stationär an einer beliebigen neuen Stelle verharren.

Eine besonders stabile Schichtung wird als Inversion bezeichnet - dabei nimmt die Temperatur mit der Höhe zu. Eine Klassifikation kann natürlich auch über die potentielle Temperatur erfolgen, jedoch ist dies aufgrund von fehlenden Druckmessungen nicht direkt anwendbar.

Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurden die Abbildungen 6.7 und 6.8 mit dem Temperaturgradienten entlang des Kellerjochs in identer Schematik erzeugt, wie jene für die Emissionen und die Immissionen. Auf den ersten Blick stehen in Abbildung 6.7 (Winter 2005/06) die ausgeprägten roten Bereiche heraus, die die Tatsache der sehr stabilen Talatmosphäre im Jänner 2006 verdeutlichen.

Darüber hinaus gab es zwar jeweils während der Mittagsstunden eine Abschwächung der Inversionen, jedoch blieben die Gradienten weiterhin im Bezug zur Stabilität im positiven Bereich. Unterbrochen wurde diese Periode mit einer knapp einwöchigen Phase, während

der die Schichtung nicht so stark stabil geschichtet war wie davor und danach. Ansonsten existierten zwar noch einige Tage mit Inversionen, jedoch langten diese nicht an die Inversionsstärken des Jänners 2006 heran.

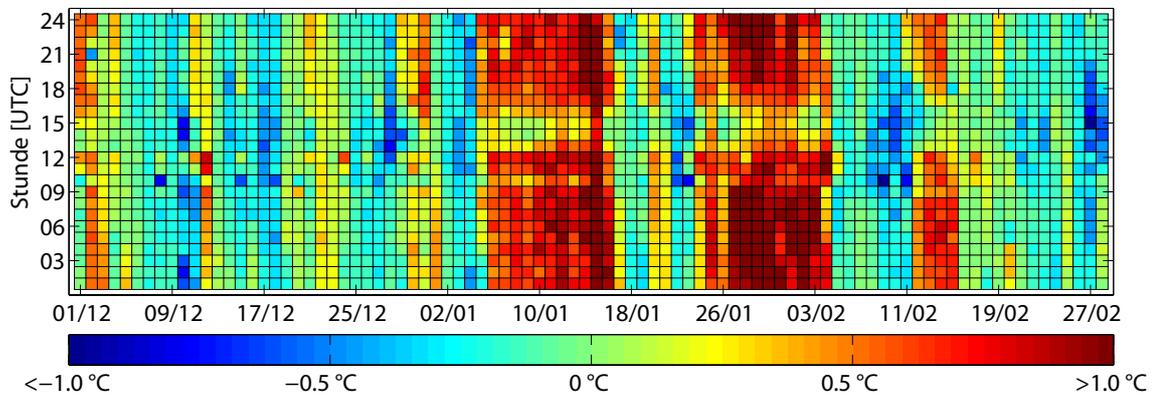


Abbildung 6.7: Stündliche Darstellung des pseudovertikalen Temperaturgradienten pro 100 m entlang des Kellerjochs (südliche Talseite) für den Winter 2005/06.

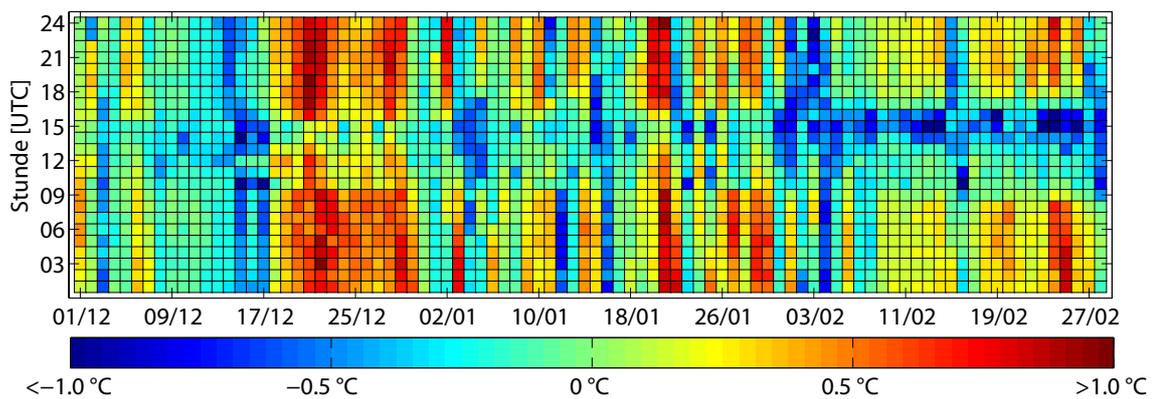


Abbildung 6.8: Pseudovertikaler Temperaturgradient für Dez./Jän./Feb. 2007/08 entlang des Kellerjochhanges (stündliche Auflösung, pro 100 m).

Während der Wintermonate 2007/08 war die Schichtung der Atmosphäre ein wenig anders als 2005/06. Ebenfalls ist hier die Inversions-Schichtung während der Hochdruckphase über die Weihnachtszeit dominant. Im Vergleich zu 2005/06 konnten die Inversionen während den Mittagsstunden jedoch häufig aufbrechen. Aufgrund dieser Abnahme der Stabilität konnten sich dementsprechend die Austauschverhältnisse verbessern.

Auch die zweite Hochdruckphase Ende Februar 2008 führte zu einer stabilen Atmosphärenschichtung, jedoch zu einer klar schwächeren als während den anderen gradientschwachen Wetterlagen. Zudem sind diese Inversionen spätestens während der Nachmittagsstunden aufgebrochen.

Außerdem sind Föhneffekte gut sichtbar, denn vor einem Föhndurchbruch im Tal kommt es zur Erwärmung in höheren Schichten. Diese Erwärmung verursachte während des Winters 2007/08 Situationen, an denen plötzlich zu Mittag stabile Schichtungen auftraten bzw. nachts labile Verhältnisse vorlagen (z.B. 2., 3. und 4. Februar 08).

Die schwächeren Inversionen während des Winters 2007/08 verursachten klarerweise auch große Unterschiede bei den mittleren Tagesgängen (Abbildung 6.9). Das typische Minimum der Kurven um die Nachmittagszeit divergiert zwischen den beiden Perioden um ca. $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, wobei die Werte des Winters 2007/08 niedriger waren.

Im Rückschluss bedeutet dies, dass insbesondere während der Nachmittagsstunden die Talatmosphäre im Winter 2007/08 um einiges weniger stabil geschichtet war als zwei Jahre zuvor. Darüber hinaus zeigt die Graphik auch die leichten Unterschiede während der Nacht, die rote Linie für 2007/08 zeigt zu keinem Zeitpunkt eine inverse Schichtung, wohingegen die blaue für 2005/06 zu den Nachtstunden auf vermehrte Inversionen hindeutet.

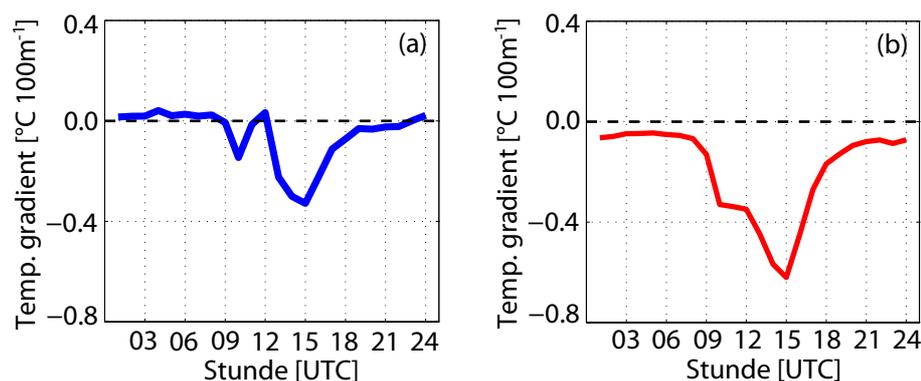


Abbildung 6.9: Mittlerer Tagesgang des pseudovertikalen Temperaturgradienten ($^{\circ}\text{C } 100\text{ m}^{-1}$) entlang des Kellerjochhanges. Die Graphik (a) steht für 2005/06, (b) für 2007/08.

Ein weiteres Maß zur Charakterisierung der Stabilität der Talatmosphäre sind die Inversionsstärken bzw. Inversionsintensitäten. Bei den folgenden Berechnungen wurden die Inversionsstärken (IS, Temperaturgradient $> 0\text{ }^{\circ}\text{C } 100\text{ m}^{-1}$) mit der jeweiligen Dauer multipliziert. Mathematisch lässt sich dies nach Gleichung 6.2 beschreiben.

$$IS\text{ [}^{\circ}\text{C } 100\text{ m}^{-1}\text{ min]} = \frac{dT}{dz}\text{ [}^{\circ}\text{C } 100\text{ m}^{-1}] \cdot t\text{ [min]} \quad \text{wenn } \frac{dT}{dz}\text{ [}^{\circ}\text{C } 100\text{ m}^{-1}] > 0 \quad (6.2)$$

Auch in dieser Darstellung stechen sofort die jeweiligen Hochdruckperioden heraus, jedoch mit einigen Unterschieden in der Intensität. Während die Hochdruckperioden im Winter 2005/06 Werte um $1500\text{ }^{\circ}\text{C } 100\text{ m}^{-1}\text{ min}$ erreichen, liegen die Maximalwerte während 2007/08 nur bei ungefähr $1000\text{ }^{\circ}\text{C } 100\text{ m}^{-1}\text{ min}$.

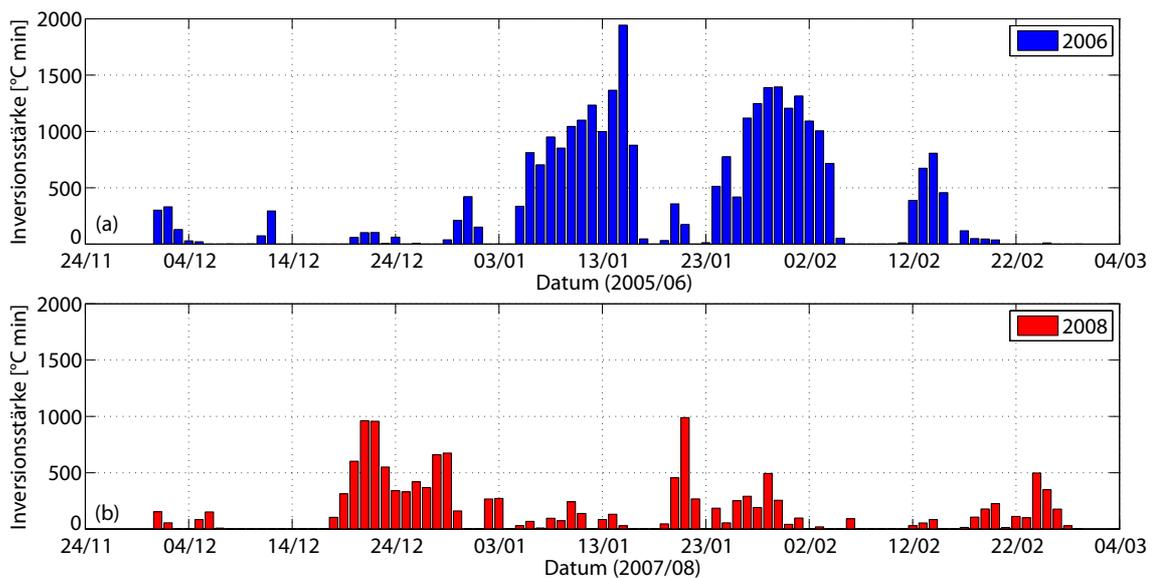


Abbildung 6.10: Inversionsstärken in $[\text{°C } 100 \text{ m}^{-1} \text{ min}]$ entlang des südlichen Hanges (Kellerjoch) für beide Dreimonatsperioden, (a) für 2005/06, (b) für 2007/08. Die Art und Weise der genauen Berechnung ist im Text ersichtlich. Jedenfalls stechen die unterschiedliche zeitliche Lage und Intensität der Hochdruckperioden eindeutig ins Auge.

Weiters zeigt die Summation über die gesamte Periode 2005/06 einen Wert von $52260 \text{ °C } 100 \text{ m}^{-1} \text{ min}$, wohingegen für den Winter 2007/08 $46230 \text{ °C } 100 \text{ m}^{-1} \text{ min}$ aus den Berechnungen resultieren.

Die Ergebnisse der vorherigen Analysen lassen unter anderem die meteorologische Frage offen, aus welchem Grund jene gradientschwachen Lagen zu Weihnachten 2007 und Ende Februar 2008 eine schwächere stabile Schichtung aufwiesen als jene im Jänner 2006.

Die Luftmassencharakteristik war, wie vorher schon erwähnt, während der Hochdruckperioden im Jänner 2006 im Vergleich zu Dezember 2007 nur gering unterschiedlich. Die Abweichung des Temperaturmittels des Patscherkofels, als Indikator für die freie Atmosphäre, war während den betroffenen Zeiträumen nur 3 °C .

Eine weitere Ursache könnte in unterschiedlichen Bestrahlungsstärken liegen. Der Mittelwert der kurzwelligen, einfallenden Strahlung für die erste Hochdruckperiode im Jänner 2006 lag bei 69 Wm^{-2} , jener für die Hochdruckphase zu Weihnachten 2008 bei 51 Wm^{-2} . Es gab damit Unterschiede, jedoch war die einfallende, kurzwellige Strahlung während der definierten Periode im Jänner 2006, aufgrund der astronomischen Randbedingungen, sogar höher als zu Weihnachten 2008.

Damit fallen sowohl unterschiedliche Luftmassencharakteristiken, als auch abweichende Einstrahlungen als alleinige Erklärungen aus. Daher muss die Ursache in der Art der Bodenbeschaffenheit und in der damit verbundenen Strahlungsbilanz liegen (Kap. 6.2).

6.2 Schnee, Strahlung und Albedo (Station Schwaz)

Die Bilanzen der kurzwelligigen Strahlung sind fundamental beeinflusst durch die jeweils vorhandene Albedo des Bodens. Typische Werte der Albedo liegen zwischen 0.20 für Grasboden und bis zu 0.98 für schneebedeckten Boden (Geiger et al. 1995). Definiert ist die Albedo laut Gleichung 6.3 mit der sich von der Bodenoberfläche entfernenden kurzwelligigen Strahlung als kw_a , bzw. mit kw_e für die einfallende, kurzwellige Strahlung.

$$\alpha [] = \frac{kw_a [W m^{-2}]}{kw_e [W m^{-2}]} \quad (6.3)$$

Daher ist es nahe liegend, die Bedeckung des Bodens und die damit verbundene Albedo näher zu untersuchen. In Abbildung 6.11 sind die jeweiligen Schneehöhen nach Karner (2009) dargestellt. Dieser modellierte für beide Winterperioden mit einem Boden-Vegetations-Atmosphäre-Transfer Modell die Schneehöhen im Raum Schwaz und verifizierte diese mit Punktmessungen.

Augenscheinlich ist der schneereiche Winter 2005/06 und der schneearme Winter 2007/08. Während der Periode von 01.12.05 bis 28.02.06 war der Boden täglich mit Schnee bedeckt, teilweise bis zu 40 cm hoch. Außerdem gab es einige Neuschneefälle, die Einfluss auf die Albedo hatten.

Im Gegensatz dazu war eine Schneedecke während 2007/08 nur während zwei isolierter Perioden vorhanden, zu Beginn des Dezembers 2007 und zu Silvester 2007/08 - und dann auch nur in geringen Höhen. Zu allen anderen Zeitpunkten war es aper, daher war die für die Albedo maßgebliche Bodenbeschaffenheit braunes Gras.

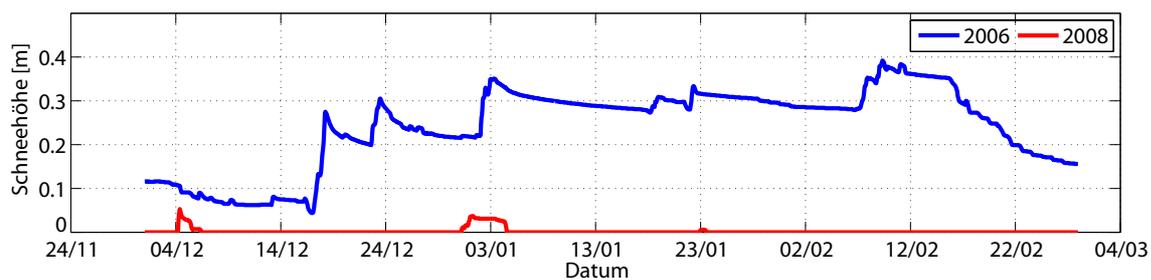


Abbildung 6.11: Modellierte und an tatsächliche Messungen angepasste Schneehöhen während der Winter 2005/06 (blau) und 2007/08 (rot) für den Talboden bei Schwaz - nach Karner (2009).

Dementsprechende Auswirkungen hat die unterschiedliche Bodenbeschaffenheit auf die gemessene Albedo. Wie vorher schon vermutet, lag die Albedo während 2007/08 immer unter den Werten des Winters 2005/06 (Abbildung 6.12). Die Abbildung besteht jeweils aus den 12 Uhr UTC Momentanwerten der Albedo und einem 5-tägigen gleitenden Mittel. Der 12 Uhr UTC Zeitpunkt wurde gewählt, da zu diesen mittäglichen Stunden die Albedo am störungsfreiesten berechnet werden konnte und weil der Energieeintrag in

die Atmosphäre zu Mittag entscheidend für die Mischungsschichthöhe ist.

Für den Winter 2005/06 wurden im Durchschnitt Albedowerte von 0.72 berechnet, die durchaus bei Schneebedeckung zu erwarten sind. Bei Neuschneefällen erhöhte sich die Albedo aufgrund der sauberen Schneeoberfläche kurzzeitig auf Werte über 0.80. Eindeutig abgegrenzt sind die Neuschneefälle während des zweiten Winters, bei Schneebedeckung erhöhte sich die Albedo schlagartig auf mehr als das Doppelte. Zu allen anderen Zeitpunkten ergaben sich die für Gras typischen Werte von ca. 0.20.

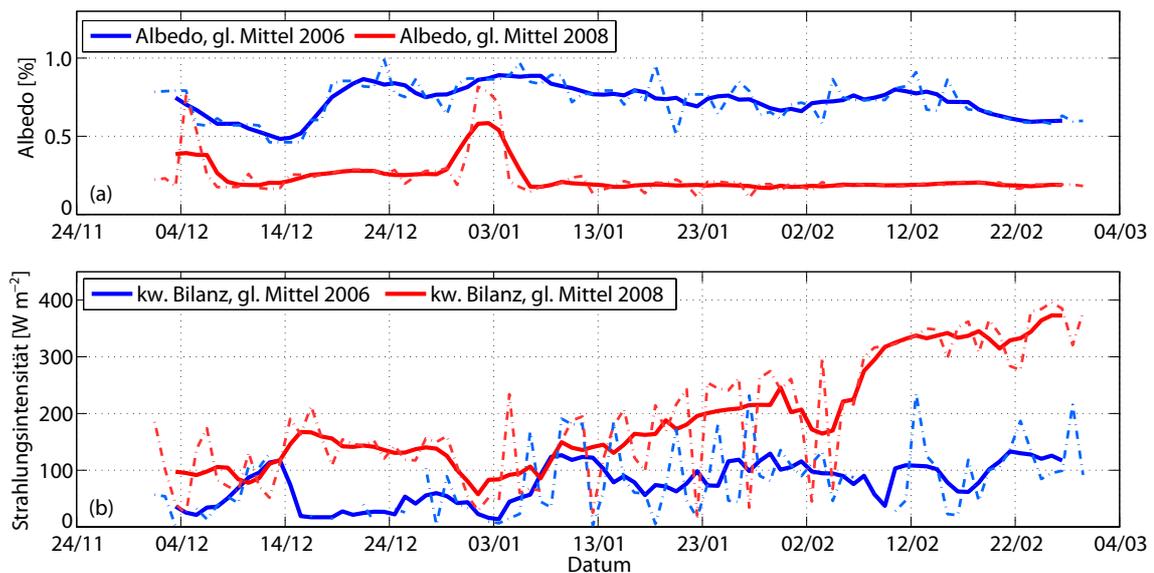


Abbildung 6.12: Zeitliche Darstellung der Albedo (a) und der kurzwelligen Strahlungsbilanz (b) aus den Messungen der AWS Schwaz. Die strichlierten Linien kennzeichnen jeweils den 12 Uhr UTC Momentanwert, die durchgezogenen Linien das 5-tägige gleitende Mittel. Gemäß Konvention ist der Winter 2005/06 in blau und 2007/08 in rot gehalten.

Die unterschiedlichen Albedowerte machten sich natürlich auch bei der kurzwelligen Strahlungsbilanz bemerkbar (Abbildung 6.12). In Summe blieb während des Winters 2007/08 beinahe täglich mehr Energie an der Bodenoberfläche zurück als im Winter 2005/06. Gegen Ende des Februars wurden die Unterschiede besonders groß.

Berechnete Mittelwerte zum 12 Uhr UTC Zeitpunkt ergaben ein Verhältnis von $80 W m^{-2}$ zu $190 W m^{-2}$. Folglich stand in den Mittagsstunden dem Boden-Atmosphäre System während des gesamten Winters 2007/08 mehr als die doppelte Energie des Winters 2005/06 zur Verfügung.

Diese These bestätigt ebenfalls die Abbildung 6.13, darin werden die Bodentemperaturen zum Zeitpunkt 12 UTC aus den langwelligen Strahlungsmessungen des nach unten gerichteten Sensors mit dem umgeformten Stefan-Boltzmann Gesetz berechnet (Gleichung 6.4).

$$T_{Boden} = \sqrt[4]{\frac{E}{\epsilon \cdot \sigma}} \quad (6.4)$$

Ganz eindeutig ist der Einfluss der Schneedecke im Winter 2005/06 zu erkennen, die berechnete Bodenoberflächentemperatur erreichte praktisch nie einen positiven Temperaturwert, wohingegen im zweiten Winter die Bodenoberflächentemperatur Werte bis zu 15 °C aufwies. Die jeweiligen Mittelwerte ergaben für die Dreimonatsperiode 2005/06 eine Bodentemperatur von -4.2 °C , für 2007/08 von $+4.8\text{ °C}$. Dementsprechend konnte auch die Talatmosphäre im Winter 2007/08 viel effektiver erwärmt werden als im Vergleichswinter.

Dies führt zur Vermutung, dass aufgrund der unterschiedlichen Heizraten die Mischungsschicht 2007/08 um einiges mächtiger war als während 2005/06. Aus diesen Gründen ist dieser Thematik das Kapitel 6.3 gewidmet.

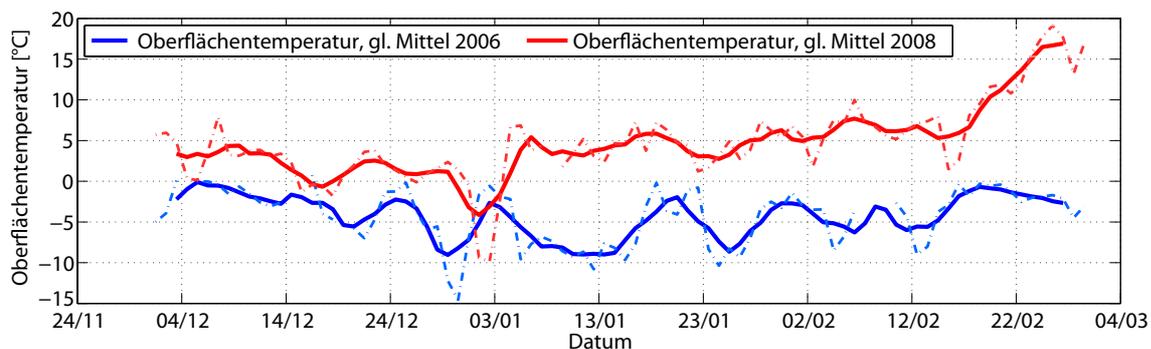


Abbildung 6.13: Bodentemperaturen am Standort Schwaz, berechnet aus den jeweiligen Werten der langwelligen Strahlungsmessung des nach unten gerichteten Sensors. Die Winterperiode 2005/06 ist wiederum in blau gehalten, der Vergleichszeitraum 2007/08 in rot.

Die bisherigen Analysen verlangen danach, sich zudem die gesamte Strahlungsbilanz inklusive ihrer einzelnen Komponenten zu betrachten. Die Gesamtstrahlungsbilanz wird nach Kraus (2004) mittels Gleichung 6.5 beschrieben, darin werden von den einfallenden kurzwelligen und langwelligen Strahlungsflüssen die von der Oberfläche ausgehenden abgezogen. Die Bilanz Q beschreibt daher jenen Teil der Strahlung, der an der Bodenoberfläche zurückbleibt.

$$Q = kw_e - kw_a + lw_e - lw_a \quad (6.5)$$

In Abbildung 6.14 sind die Komponenten graphisch anhand eines mittleren Tagesganges über die jeweiligen drei Monate dargestellt. Der einfallende Teil der kurzwelligen Strahlung ist beinahe deckungsgleich während beider Perioden, große Unterschiede zeigen sich jedoch hinsichtlich der ausgehenden Komponente. Daher kann die Aussage gefestigt werden, dass jene Unterschiede in der kurzwelligen Bilanz, die in Abbildung 6.12 festgestellt wurden, nicht auf die eingehende Komponente bzw. Bewölkung zurückzuführen sind, sondern vor

allem auf der ausgehenden kurzwelligen Komponente basieren.

Auch bei den langwelligen Komponenten der Strahlungsbilanz sind Unterschiede zu erkennen, so ist z.B. der ausgehende Anteil im Winter 2005/06 niedriger als 2007/08 (abhängig von den höheren Bodenoberflächentemperaturen im zweiten Winter). Die, vor allem auf den Lufttemperaturen in den unteren Atmosphärenschichten basierende, einfallende langwellige Strahlung war während beider Perioden beinahe auf demselben Niveau. Dies deckt sich mit den ähnlichen mittleren Temperaturen des Patscherkofels. Jedoch spielen diese erwähnten Unterschiede im langwelligen Beitrag im Vergleich zur unterschiedlichen kurzwelligen Bilanz eine untergeordnete Rolle.

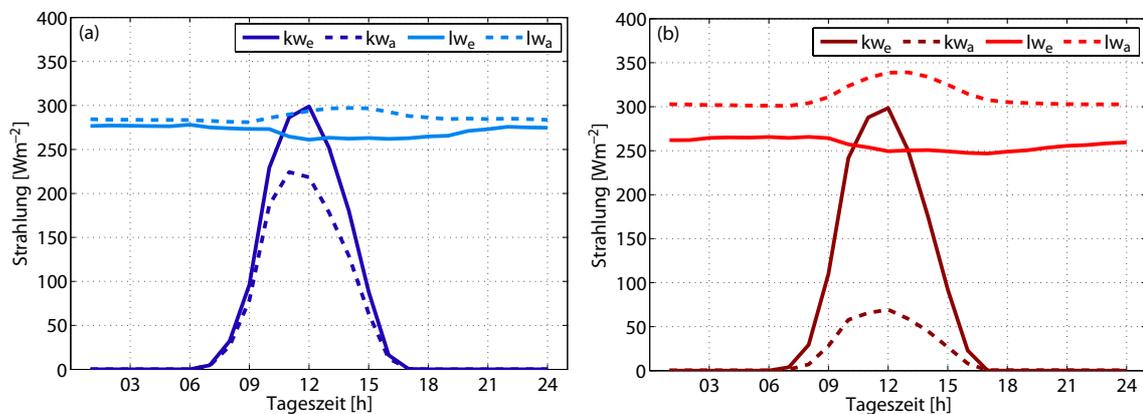


Abbildung 6.14: Mittlere Tagesgänge der Strahlungskomponenten der langwelligen und kurzwelligen Strahlung für den Winter 2005/06 (a) und 2007/08 (b) am Standort Schwaz.

Die vorher erläuterten Tatsachen pausten sich natürlich auf die Gesamtstrahlungsbilanz durch (Abbildung 6.15). Im schneereichen Winter 2005/06 ist beinahe kein Tagesgang in der Strahlungsbilanz zu erkennen, sehr wohl jedoch während der Winterperiode 2007/08. Hier spielt eindeutig die kurzwellige Bilanz eine entscheidende Rolle, in kleineren Teilen trägt jedoch auch die langwellige Komponente dazu bei. In Konsequenz der erwähnten Punkte und in Hinblick auf die aufgeworfenen Fragen nach der Mischungsschichthöhe ist es nun erforderlich, diese einer näheren Betrachtung zu unterziehen (Kapitel 6.3).

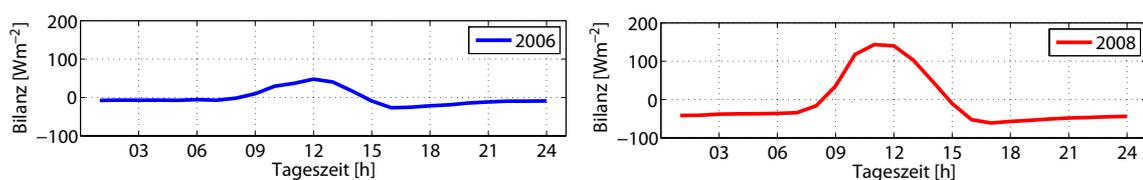


Abbildung 6.15: Mittlerer Tagesgang der Gesamtstrahlungsbilanz für beide Winterperioden (2005/06 in (a), 2007/08 in (b)) für den Standort Schwaz.

6.3 Untersuchung der Mischungsschichthöhe während ausgewählter Perioden

Wie in Abschnitt 2.1 definiert, beschreibt die Mischungsschicht den Bereich von der Bodenoberfläche bis zur Oberkante jener Schicht, in der sich z.B. Schadstoffe verteilen bzw. verdünnen können. Nach oben begrenzt ist diese meist mit einer Temperaturinversion, die die Durchmischung mit höher gelegenen Schichten verhindert. Entsprechend dieser Vorstellung gibt es demnach an der Oberkante der Mischungsschicht eine Sprungzone der Aerosolkonzentration, darunter stark kontaminierte Luft, darüber die im Normalfall um einiges reinere Zone.

Die Höhe der Mischungsschicht kann mit Ceilometern detektiert werden. Deren Messprinzip beruht auf schichtweiser Erfassung der Rückstreuintensitäten zufolge unterschiedlichem Aerosolgehalt (siehe auch Abschnitt 3.3). Jedoch eignet sich dieses Verfahren nur dann, wenn eine Atmosphäre ohne tiefe Wolken und ohne Niederschlag vorliegt. Demzufolge kann nur während Hochdruckperioden eine Auswertung der Mischungsschicht anhand dieser Methode stattfinden.

Die Bilder der Rückstredichten wurden dankenswerterweise von Dr. Stefan Emeis (Forschungszentrum Karlsruhe, IMK-IFU, Garmisch Partenkirchen) zur Verfügung gestellt. In Abbildung 6.16 ist eine solche Graphik als Beispielbild wiedergegeben. Damit konnten anhand von visuellen Auswertungen die Sprungschichten (im Optimalfall Übergang von dunkelrot zu blau) gefunden werden. Mittels rosa gestrichelten Linien ist diese in Abbildung 6.16 eingezeichnet.

Es zeigt sich an diesem Beispiel, dass die Mischungsschicht während der Nacht und in den Morgenstunden sehr tief liegt, mit dem Energieeintrag in die Atmosphäre verschwindet diese klassische Sprungschicht jedoch zu Mittag und ist erst wieder am späten Nachmittag detektierbar. Zu den Nachmittagsstunden befindet sich die Mischungsschicht im Normalfall in höheren Niveaus als am Vormittag und baut sich im Laufe des Abends wieder ab.

Diese Abbildung zeigt aber auch gleichzeitig die methodischen Grenzen auf. Während den Mittagsstunden ist die Mischungsschicht oft zu mächtig um diese noch genau detektieren zu können. Im Gegensatz dazu ist diese in den Nachtstunden unter Umständen so flach, dass es nicht mehr möglich ist diese zu erkennen. Oftmals kann die Sprungschicht nicht eindeutig festgestellt werden, es besteht dann die Qual der Wahl aus mehreren Schichten auswählen zu müssen. Außerdem prägen sich besonders bei niedriger Partikelkonzentration in der Atmosphäre (beispielsweise während den Weihnachtstagen 2007) die Sprungschichten nicht klar auf die Werte der Rückstreuintensitäten durch (zu geringes signal/noise-Verhältnis).

Allerdings kann man damit sehr wohl zeitlich größer gemittelte Aussagen zur Mischungsschicht

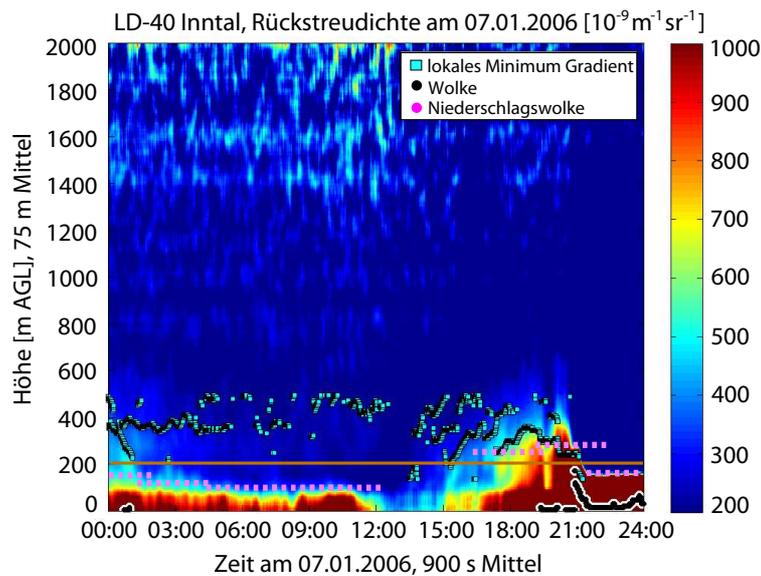


Abbildung 6.16: Beispielbild einer Rückstreugraphik für den 07.01.2006 des Ceilometers. In strichlierter Farbe eingezeichnet sind die visuell klassifizierte Mischungsschichthöhen und in oranger Farbe die 200 m AGL-Höhe zur Orientierung. Abbildung zur Verfügung gestellt von S. Emeis (IMK-IFU).

schicht treffen. Es muss auch in Betracht gezogen werden, dass es im Talquerschnitt mehrere Obergrenzen von Mischungsschichten gibt, die alle in sich selber wieder unterschiedliche Schadstoffkonzentrationen aufweisen. Besonders während kalten, schneebedeckten Nächten kann es zur Ausbildung von mehreren übereinander liegenden Schichten kommen. Einen solchen Fall analysierten Emeis et al. (2007) im Winter 2005/06, wobei auch das Wechselspiel zwischen den typischen Tal- und Hangwinden thematisiert wurde.

Unter Berücksichtigung obiger Einschränkungen wurden jeweils 12 Tage einer Hochdruckwetterlage anhand von dreistündigen Momentanwerten einer näheren Betrachtung unterzogen. Es ergaben sich demnach die Untersuchungsperioden von 05.01.06 bis 16.01.06 bzw. von 18.12.07 bis 29.12.07. Die Abbildung 6.17 illustriert die Ergebnisse.

Bei der Analyse der Daten aus dem Zeitraum 2007/08 entstanden teilweise die oben genannten Schwierigkeiten eine genaue Sprungschicht zu gewissen Zeitpunkten zu erkennen. Jedoch ist während beider Perioden sichtbar, dass die Mischungsschicht einen typischen Tagesgang aufwies, ähnlich wie im Beispielbild beschrieben. Sie lag während der Nacht in tiefen Niveaus, stieg während des Tages an und baute sich anschließend nach Sonnenuntergang wieder ab.

Im Vergleich der beiden Winter ergaben sich aber interessante Unterschiede. Tendenziell lag die Mischungsschicht während der Hochdruckphase zu Weihnachten im Schnitt um 100 m höher als während der gradientschwachen Lage im Jänner 2006. Zudem

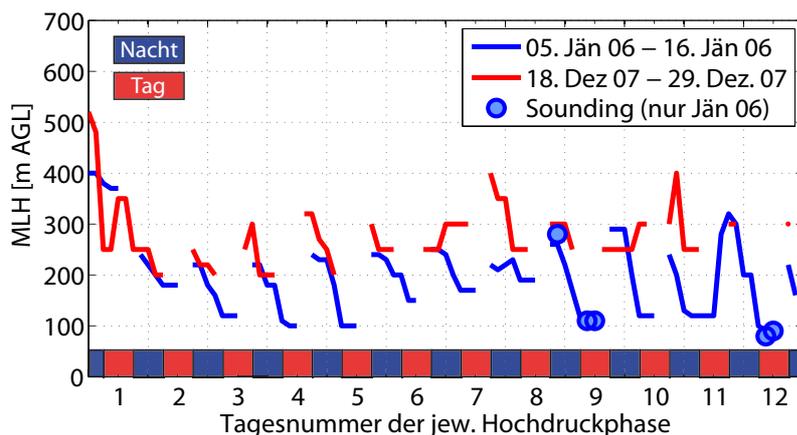


Abbildung 6.17: Zeitlicher Verlauf der Mischungsschichthöhe, abgeleitet aus den Daten der Ceilometer. Analysiert wurden jeweils definierte Hochdruckwetterlagen von 05.01.06 bis 16.01.06 (blau) und von 18.12.07 bis 29.12.07 (rot). Als Verifikation dienen Vertikalsondierungen von Feinstaub (PM_{10}) während ausgewählter Tage im Jänner 2006, siehe auch Kollmann (2008).

galt dies für die Nachtstunden sowie für den Tag gleichermaßen. Es kann daher die Schlussfolgerung getätigt werden, dass der höhere Energieeintrag in die Atmosphäre, besonders aus der kurzwelligen Strahlungsbilanz während des Winters 2007/08 (Kapitel 6.2), zu einer mächtigeren Mischungsschicht führte als im schneebedeckten Jänner 2006.

Für die Bestimmung von Mischungsschichthöhen wären natürlich Vertikalsondierungen der Atmosphäre ein ideales Arbeitsmittel. Jedoch sind diese nur mit großem personellen und finanziellen Aufwand zeitlich und räumlich hochaufgelöst durchzuführen. Die vorher schon erwähnte Arbeit von Kollmann (2008) behandelte unter anderem verschiedene Methoden der Klassifizierung der Mischungsschichthöhen. Darin kam er zum Ergebnis, dass eine kombinierte Temperatur- und PM_{10} -Sondierung die besten Ergebnisse lieferte.

Leider standen jedoch solche Messungen im Winter 2005/06 nur begrenzt zur Verfügung, es konnten jedoch vier Messungen als Vergleichsmöglichkeit herangezogen werden (Abbildung 6.17). Zumindest für diese Zeitpunkte konnte eine gute Übereinstimmung der Vertikalsondierung mit den Messungen des Ceilometers gefunden werden.

In diesem Zusammenhang liegt natürlich nahe, die Daten der Radiosondenaufstiege als Vergleich heranzuziehen. Jedoch ergibt sich hier das Problem, dass diese meist nur zu einem Zeitpunkt des Tages (meist in der Nacht bzw. in den frühen Morgenstunden) vorliegen. Zudem sind die einzigen in Frage kommenden Aufstiege jene des Flughafens von Innsbruck. Aufgrund der Distanz zum Untersuchungsgebiet ergeben sich unausweichlich einige Schwierigkeiten.

Nach näherer Betrachtung der Daten von Innsbruck zeigte sich, dass die Radiosondendaten von lokalen Einflüssen abhängen. Unter anderem macht sich der Einfluss des

Wipptales aufgrund des nächtlichen Ausfließens bemerkbar, darüber hinaus gab es nur einen täglichen Aufstieg um 3 Uhr UTC. Aus diesen Gründen ergaben sich bei der Datenauswertung keine zufriedenstellenden Ergebnisse und es wurde darauf verzichtet, diese in die Arbeit einzubauen.

Es wäre daher wünschenswert, dass bei möglichen folgenden Untersuchungen Zeit und Geld in Vertikalsondierungen der Talatmosphäre investiert werden, da die Mischungsschichthöhe ein entscheidender Faktor beim Zustandekommen der Schadstoffkonzentrationen am Talboden ist. Abschließend zu dieser Thematik sei noch erwähnt, dass dem Thema Mischungsschichthöhe auch im Kapitel 9 großer Raum eingeräumt wird. Näher mit den atmosphärischen Verhältnissen in und über Innsbruck in Abhängigkeit von den verschiedenen Wetterlagen beschäftigte sich auch Nicoladoni (2008).

Kapitel 7

Räumliche Unterschiede im Talquerschnitt

Bisher waren die Betrachtungen der Schadstoffsituation beschränkt auf eine Punktmessung an der Autobahn A12. Jedoch ist es nicht unerheblich, wie die Schadstoffe in einem Talquerschnitt verteilt sind. Es ist nicht ausgeschlossen, dass weit von den Schadstoffquellen entfernt liegende Siedlungsgebiete ähnlich stark belastet sind wie nahe an der Quelle liegende Standorte.

Besonders die Veröffentlichungen von Harnisch (2007), Harnisch et al. (2009) und Gohm et al. (2006) deuten auf eine klare Asymmetrie in der Schadstoffkonzentration im Talquerschnitt hin, zumindest an speziellen Tagen. Das im Rahmen dieser Diplomarbeit betrachtete Datenmaterial ermöglicht eine weitere Analyse der räumlichen Unterschiede der NO₂-Belastung und der ausschlaggebenden meteorologischen Parameter.

7.1 Datenqualität NO₂-Passivsammler

Aufgrund der Tatsache, dass Messgeräte, die zeitlich hochaufgelöste Daten liefern, sehr teuer sind, behilft man sich mit einfacheren und kostengünstigeren Messsystemen. Ein solches sind Passivsammler, die während definierter Zeiträume an den jeweiligen Messstellen exponiert werden. Chemische Analysen liefern schlussendlich einen Mittelwert der Schadstoffkonzentration über die Expositionszeit.

Während des dieser Arbeit zugrunde liegenden Projekts wurden NO₂-Passivsammler der Marke Palmes verwendet, die einen Arbeitsbereich von 1-200 $\mu\text{g m}^{-3}$ aufweisen. Jedoch ist deren erweiterte Messunsicherheit von 25.3 % relativ hoch (Passivsammler-Datenblatt 2008). Darum empfiehlt es sich, Vergleichsmessungen mit einer Referenzstation durchzuführen. In diesem Fall war die Referenz die Station des Landes Tirol in Vomp.

Zum Vergleich war während beider Perioden durchgehend in unmittelbarer Nähe zur

Referenzstation auch ein Passivsammler stationiert. Dieser wurde im selben Rhythmus ausgetauscht wie die restlichen Sammler. Das Ergebnis des Vergleichs ist in Abbildung 7.1 graphisch dargestellt. Darin sind den Mittelwerten der Referenzstation (inklusive der Standardabweichungen) die gemessenen Konzentrationen der Passivsammler (mit max. Fehlerangabe) gegenübergestellt.

Für die Winterperiode 2007/08 ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung, die maximale Abweichung betrug nur $-3.4 \mu\text{gm}^{-3}$, die mittlere Differenz lag bei $+0.6 \mu\text{gm}^{-3}$. Ein gänzlich anderes Bild zeigte die Analyse des Winters 2005/06. Die Abweichungen waren zum Teil erheblich, jedoch befanden sich alle Werte noch innerhalb der angegebenen Fehlergrenzen. Die durchschnittliche Differenz lag bei $+26.5 \mu\text{gm}^{-3}$, die maximale bei sogar $+42.7 \mu\text{gm}^{-3}$. Es stellt sich daher die Frage, worin die Unterschiede begründet sein könnten.

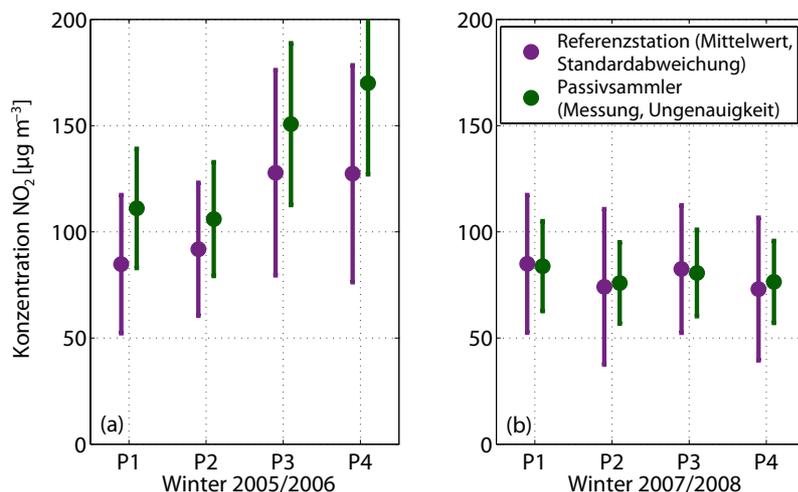


Abbildung 7.1: Gegenüberstellung von NO_2 -Passivsammler-Messungen des Standortes 5/06 bzw. 5/08, inklusive angegebener Fehlerbandbreite von 25.3 % (Passivsammler-Datenblatt 2008), mit Mittelwerten (samt Standardabweichungen) der Referenzstation des Landes Tirol in Vomp. In (a) sind die Werte des Winters 2005/06 analysiert, in (b) die des Winters 2007/08.

Schon in einigen vorliegenden Studien wurde auf Vergleiche von Passivsammlern mit Referenzstationen eingegangen (u.a. in Spangl et al. 2006, NUA 2005). Darin wird angemerkt, dass bei Vergleichsmessungen in Innsbruck Unterschiede bis zu $14 \mu\text{gm}^{-3}$ vorkamen. Es ist weiters bemerkenswert, dass sogar bei Vergleichen zwischen zwei Sammlern an gleicher Messposition Abweichungen von über 40 % registriert wurden (Spangl et al. 2006). Bei Messungen in Gärberbach wurde festgestellt, dass die Schadstoffkonzentrationen von den Passivsammlern überschätzt wurden (NUA 2005).

Der Unterschied während der Messungen im Inntal 2005/06 könnte an den außergewöhnlichen meteorologischen Einflüssen liegen. Möglicherweise hatten die tiefen Temperaturen während des Winters 2005/06 einen starken Einfluss auf die Messqualität. Die üblichen

temperaturabhängigen Korrekturen reichen allerdings nicht aus um die gefundenen Unterschiede zu erklären.

Die hohen Werte der Standardabweichung deuten auch daraufhin, dass die Variabilität der Schadstoffkonzentration im Winter 2007/08 sehr hoch war. Es könnte daher sein, dass die Passivsammler Schwierigkeiten mit schnell wechselnden Konzentrationsniveaus hatten.

Außerdem sind die Gradienten der Schadstoffkonzentration nahe an der Autobahn sehr groß und variabel - geringe Abweichungen in der Aufstellung sind vielleicht auch eine Ursache für die Unterschiede zwischen den beiden Wintern. Produktionsfehler bzw. eine Änderung der Produktionsmethode können natürlich ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Die verwendete Analyseverfahren war jedoch für beiden Perioden die gleiche.

Genaue, ursachengemäße Korrekturen sind daher nicht bzw. nur schwer möglich. Um einen allgemeinen Vergleich der während der beiden Winter im Talquerschnitt gemessenen Konzentrationen zu ermöglichen, erfolgte eine pauschale Korrektur der gemessenen Passivsammlerwerte aus 2005/06 um jeweils -20 %.

7.2 Räumliche Verteilung von NO₂

Die Auswertungen der Messungen der NO₂-Passivsammler ergaben interessante Unterschiede in der räumlichen Verteilung von NO₂. Besonders groß war die Differenz bei jenen Sammlern, die nahe an der Autobahn A12 platziert waren (Abbildung 7.2). Während des Winters 2005/06 wurden direkt an der Autobahn korrigierte Werte von bis zu 120 $\mu\text{g m}^{-3}$ gemessen, wohingegen die Messungen im übernächsten Winter sehr viel geringere Konzentrationen an ähnlicher Stelle zeigten.

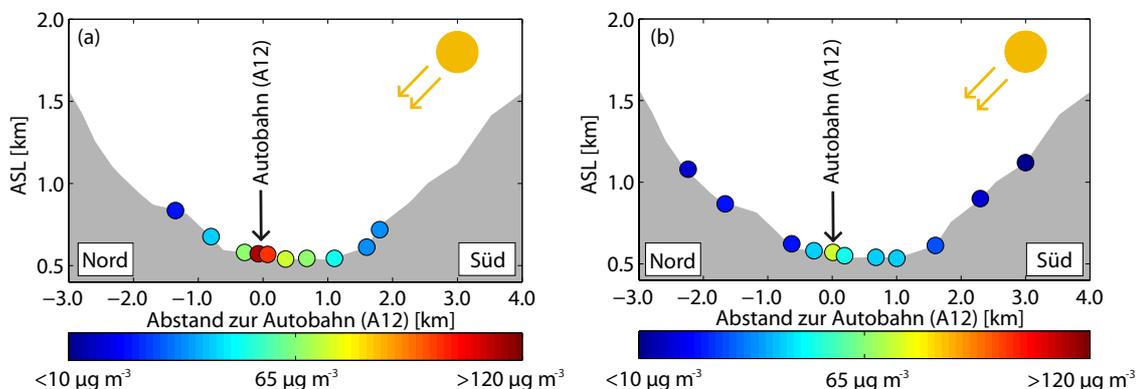


Abbildung 7.2: Graphisch dargestellte NO₂-Konzentrationen der Passivsammler im Talquerschnitt. Die Mittelungsperiode beträgt jeweils 6 Wochen (20.12.05 bis 31.01.06 in (a) und 19.12.07 - 30.01.08 in (b)) während des kalendarischen Hochwinters. Die Messergebnisse geben einen Anhaltspunkt für die mittlere Belastung mit NO₂ an den verschiedenen Positionen im Talquerschnitt.

Ein weiterer Effekt, der sich während beider Perioden zeigte, ist die starke Abnahme der Schadstoffkonzentration mit der Höhe. Bereits 0.3 km über dem Talboden wurden oft nur mehr Werte von unter $30 \mu\text{g m}^{-3}$ registriert (Vomperberg 2005/06). Dementsprechend würde dies im Winter 2005/06 einem vertikalen Gradienten von bis zu $-40 \mu\text{g m}^{-3}$ pro 100 m entsprechen.

Jeweils vier Passivsammlerstandorte wurden gezielt so gewählt, dass eine unmittelbare Vergleichbarkeit der beiden Winterperioden ermöglicht werden kann. Diese sind in Abschnitt 3.2.2 mit den Buchstaben A, B, C und D gekennzeichnet, insbesondere mit Hilfe von Tabelle 3.2 und Abbildung 3.4 können diese im Talquerschnitt eingeordnet werden.

Es handelt sich dabei um eine Position westlich von Vomp (A), die Messstelle Raststätte an der A12 (B), den Standort der automatischen Wetterstation Schwaz (C) und um eine Position am südlichen Talfuß bei Arzberg (D). In Abbildung 7.3 sind die Ergebnisse, jeweils für 3 x 2-wöchige Mittelungsperioden, gegenübergestellt. Für den Messpunkt D gibt es leider nur eine Vergleichsmöglichkeit, da die Passivsammler des Winters 2007/08 an diesem Standort häufig entwendet wurden.

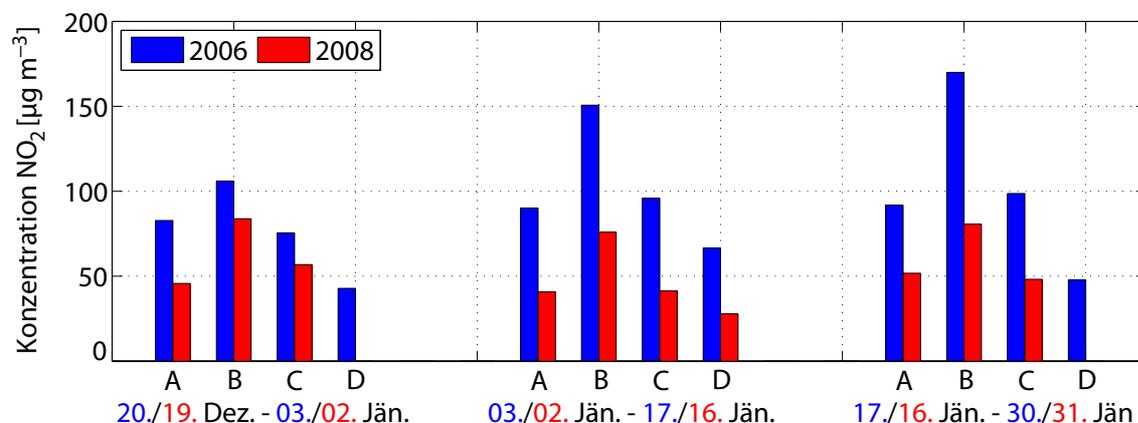


Abbildung 7.3: Vergleich von Passivsammlermessungen, die an identen Stellen während beider Zeiträume aufgestellt waren. Gekennzeichnet sind diese mit den Buchstaben A, B, C, D in Tabelle 3.4.

Generell konnte jedoch an keinem dieser Messpunkte die Konzentration des Winters 2007/08 an jene aus dem Winter 2005/06 heranreichen. Besonders groß ist die Differenz für jene Standorte, die sehr nahe an der Autobahn lagen. Jedoch erkennt man auch, dass die Periode 1 (Ende Dezember) noch die größten Gemeinsamkeiten aufweisen kann. Die großen Unterschiede sind demnach auf die beiden Hochdruckwetterlagen im Jänner 2005/06 zurückzuführen, dabei kamen Unterschiede von beinahe $100 \mu\text{g m}^{-3}$ vor (Standort B, Messzeitraum 3).

Aufgrund der vorher beschriebenen Unsicherheiten ist es schwierig aus Absolutwerten Einheiten herauszuarbeiten. Deshalb bietet sich eine Normierung auf den Maximalwert der jeweiligen Periode an. Die betrachtete Periode ist wieder die 6-wöchige Periode von Mitte Dezember bis Ende Jänner.

Methodisch werden dabei für jeden Winter die gemessenen Werte durch die maximal beobachtete Belastung des jeweiligen Winters dividiert. Der Höchstwert muss demnach genau den Wert 1 ausmachen, der Minimalwert > 0 sein. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abbildung 7.4 zu finden.

Die Autobahn als Emissionsquelle sticht eindeutig heraus, die normierten Werte hatten jeweils dort ihr Maximum. Im Bereich des Talbodens wiesen die Messpunkte ähnliche Werte auf (grüne Farbe), in weiterer Entfernung sanken die Konzentrationen jedoch bereits sehr stark ab.

Es kann daher abgeleitet werden, dass sich die Schadstoffe, relativ zum Maximum bzw. der Quelle am Talboden, während beider Perioden in näherer Umgebung zur Autobahn ähnlich verteilt haben. Weiters zeigten sich an den nördlichen bzw. südlichen Talhängen starke Ähnlichkeiten, im Verhältnis zum Maximum befinden sich die Werte zwischen 0.30 und 0.40.

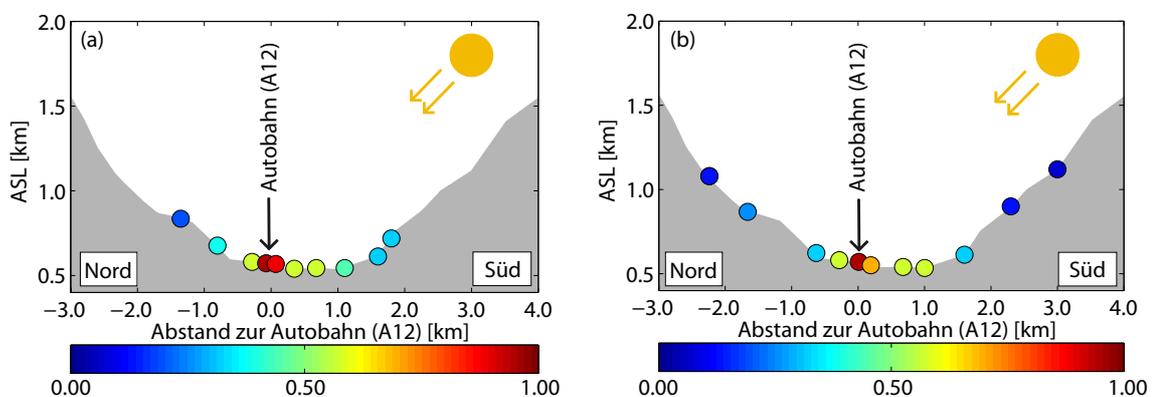


Abbildung 7.4: In obiger Graphik sind die mit dem jeweiligen maximal gemessenen Wert normierten Konzentrationen der NO₂-Passivsammler dargestellt. Die Mittelungsperiode ist wieder 20.12.05 bis 31.01.06 (a) bzw. 19.12.07 - 30.01.08 (b).

In der Kombination der Abbildungen 7.3 und 7.4 sind leichte Unterschiede zwischen Sonnen- und Schattengang erkennbar. Zur besseren Verdeutlichung sind die Werte von beiden Talseiten in Abbildung 7.5 getrennt dargestellt. Allerdings muss auf jeden Fall beachtet werden, dass die Autobahn nicht direkt in der Talmitte verläuft, sondern etwas gegen den Sonnenhang verschoben ist. Jedoch als Grenze zwischen Schatten- und Sonnenhang wurde aufgrund der Topographie der Standort AWS Schwaz gewählt.

Es fällt sofort auf, dass die größte Quelle von Stickstoffdioxid der Verkehr der Autobahn A12 ist. Während beiden Winterperioden hat die Kurve des Sonnenhanges am Standort der Luftgütemessstelle ihr Maximum, wohingegen auf der Schattenseite eine kontinuierliche Abnahme mit der Höhe geschieht.

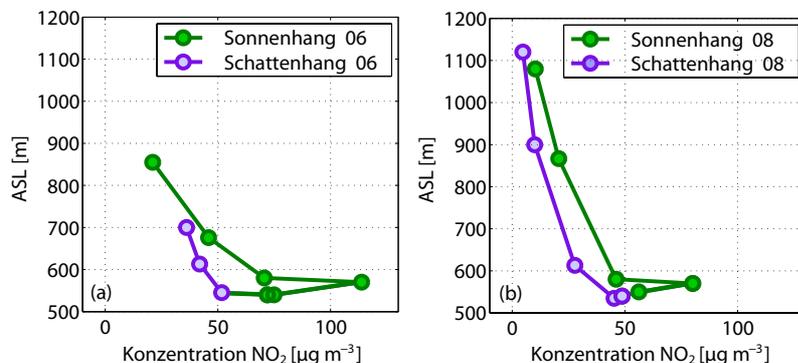


Abbildung 7.5: Verlauf der Passivsammlerwerte (NO_2) in einem Höhenprofil entlang des Schattenhanges (violett) und des Sonnenhanges (grün). Mittelungszeit: 20.12.05 bis 31.01.06 in (a) und 19.12.07 - 30.01.08 in (b).

Jedoch lagen tendenziell die beiden Kurven für Schatten- und Sonnenhang etwas auseinander, die Messungen entlang der Sonnenseite waren immer etwas höher als an der gegenüberliegenden Seite. Dies kann einerseits auf die stärkere Besonnung des nördlichen Hanges und der damit verbundenen besseren Durchmischung begründet sein, als auch teilweise an der angesprochenen Lage der Emissionsquelle liegen.

7.3 Temperaturgradienten an Schatten- und Sonnenhang

Stabilitätsbetrachtungen können sehr hilfreich bei der Beurteilung der im vorherigen Kapitel beschriebenen Asymmetrien im Talquerschnitt sein. Aufgrund der Instrumentenverteilung können Temperaturgradienten entlang beider Hangseiten berechnet werden, zudem stehen die Daten für beide Untersuchungszeiträume zur Verfügung.

Die Analyse in Abbildung 7.6 beschränkt sich in Übereinstimmung mit den untersuchten Zeiträumen der Passivsammler auf Mitte Dezember bis Ende Jänner. Als Bezugsinstrumente wurden auf der südlichen Seite jeweils die gemessenen Temperaturwerte der Station Vomperberg herangezogen, auf der gegenüberliegenden Seite zum Zwecke der Vergleichbarkeit die Werte des auf gleicher Höhe liegenden Sensors 7 am Kellerjochhang. Als Referenzinstrument am Talboden diente die automatische Wetterstation Schwaz.

Der große Unterschied liegt generell im Vorzeichen des Temperaturgradienten. Während die Werte 2005/06 tendenziell positiv waren (Inversionen), wurde 2007/08 ein differenziertes Bild der Temperaturgradienten mit Unterschieden zwischen den Hängen verzeichnet.

Es ist anzunehmen, dass sich aufgrund dessen die Schadstoffe im Winter 2007/08 viel besser ausbreiten konnten als zwei Winter zuvor. Ganz besonders hohe Temperaturgradienten/Stabilitäten herrschten während den Hochdruckperioden im Jänner 2006 - unterbrochen durch eine ca. einwöchige Phase mit negativen Gradienten.

Außerdem sind die Temperaturgradienten während beider Winterperioden entlang des Sonnenhanges beinahe täglich um einiges geringer als entlang des Kellerjochs auf der Schattenseite des Tales. In der Stabilitätsbetrachtung der Talatmosphäre bedeutet dies, dass an der Sonnenseite der Schadstoffaustausch generell viel leichter zu Stande kommen konnte als auf der stabiler geschichteten Schattenseite. Demzufolge hatte die Stabilität auch Auswirkungen auf die höheren Werte der NO_2 -Passivsammlermessungen auf der Nordseite des Inntals.

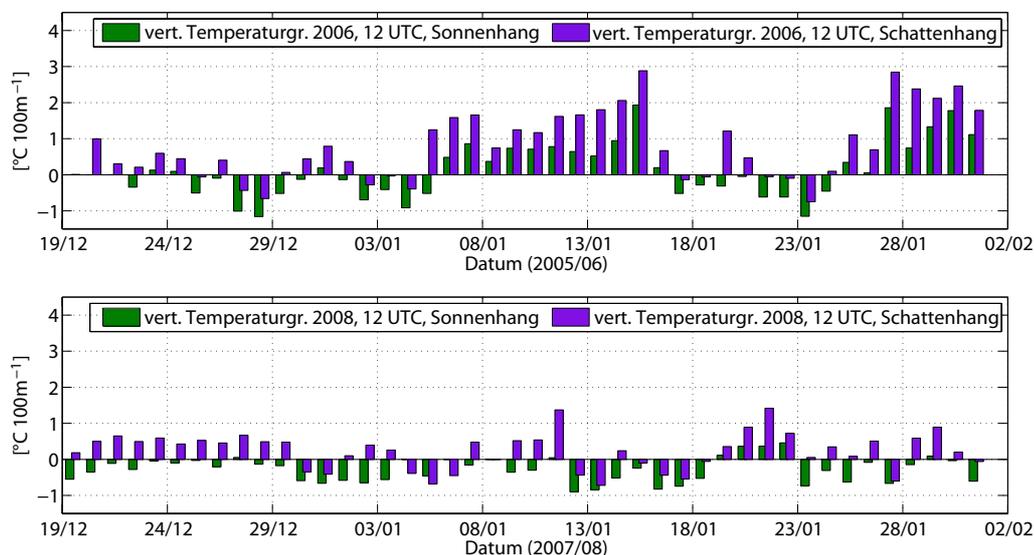


Abbildung 7.6: Temperaturgradienten zum Zeitpunkt 12 UTC an der Sonnen- und Schattenseite des Inntales für den Zeitraum von Mitte Dezember bis Ende Jänner 2005/06 (a) und 2007/08 (b).

Zusammengefasst konnte ein weiteres Mal gezeigt werden, dass es aufgrund ungleicher Einstrahlungsintensitäten in einem Tal zu Unterschieden in der Schadstoffausbreitung kommt. Erstens wirkt die vermehrte Einstrahlung am Sonnenhang der Stabilität entgegen, zweitens kann der dadurch verursachte Hangaufwind Schadstoffe den Hang entlang hinauftransportieren.

Kapitel 8

Detailstudien und Analysen von bestimmten Wetterlagen

Das Kapitel 8 handelt zu Beginn von Spezialuntersuchungen bezüglich den Messwerten eines "Differenziellen optischen Absorptionsspektrometers" (DOAS). Insbesondere geht es um einen Vergleich der damit gemessenen NO_2 -Konzentrationen an der Autobahn bei Vomp mit den Messungen der Luftgüteüberwachungsstation des Landes Tirol. Zudem werden die meteorologischen Parameter Wind und Strahlung in die Analysen eingeflochten. Ergänzt werden jene Vergleichsstudien mit Abschätzungen der meteorologischen Einflüsse auf die Schadstoffbelastung im Inntal während definierter Hochdruckperioden bzw. Abschnitten mit Niederschlägen.

Darüber hinaus folgt in diesem Kapitel außerdem eine Gegenüberstellung von Tagesmittelwerten der Emission, Immission und der meteorologischen Parameter Wind, Niederschlag und vertikaler Temperaturgradient. Damit soll ein Bogen zwischen Emission und Immission gezogen werden, der von den verschiedenen meteorologischen Einflüssen definiert wird. Anhand dessen soll das Zusammenspiel dieser einzelnen Größen noch näher erklärt werden.

8.1 Korrelationsanalysen DOAS

Die Immissionsstrukturen entlang von großen Schadstoffquellen sind sehr variabel. Insbesondere entstehen dabei starke Gradienten, die mit einem einzigen Messpunkt nur eingeschränkt aufgelöst werden können. Außerdem besteht das Interesse, die Hintergrundbelastungen quantifizieren zu können. Schlussendlich möchte man auch einen detaillierten Eindruck über die kleinräumige Verteilung von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) erhalten.

Aus diesen Gründen war während beider Untersuchungsperioden in der Nähe des Standortes der Messstelle des Landes Tirol ein so genanntes "DOAS" installiert. Dieses misst auf drei verschiedene Trassen (über die Autobahn, längs zur Autobahn und abseits der A12 in freies Gelände) räumlich und zeitlich gemittelte Schadstoffkonzentrationen.

Nähere Informationen zum Messprinzip eines DOAS sind in Abschnitt 3.3.6 zu finden, darin inkludiert ist auch ein Lageplan des Messareals mit eingezeichneten Messpfaden zur räumlichen Übersicht (Abbildung 3.10). Ebenfalls darin verzeichnet ist die Lage der Luftgütemessstation des Landes Tirol. Die Position des Gerätes wurde im Winter 2007/08 im Vergleich zu 2005/06 nicht verändert, auch wurden die Trassen im Winter 2007/08 exakt in Position und Länge wie im Vergleichswinter aufgebaut. So gesehen sind also direkte Vergleiche möglich.

Aufgrund von messtechnischen Schwierigkeiten mussten jedoch die Messergebnisse des DOAS, die während des Winters 2007/08 gesammelt wurden, korrigiert werden. Dabei erfolgte eine Anhebung des Gesamtniveaus der Messwerte des DOAS um einen Absolutbetrag auf das Niveau jener der Luftgütestation. Man bediente sich dabei auch Ähnlichkeitsvergleichen zwischen DOAS und Luftgütestation im Winter 2005/06. Außerdem sind nur die gemessenen NO_2 -Werte zu verwenden.

Weiterhin ist bei Vergleichen von Absolutwerten des DOAS mit den Daten der Messstation des Landes Tirol zu berücksichtigen, dass die DOAS-Messung eine längengemittelte und die Stationsmessung eine Punktmessung ist. Aus diesen Gründen ist es nicht zulässig, die Absolutwerte direkt miteinander zu vergleichen. Jedoch Analysen der Konzentrationen relativ zueinander sollten mit Einschränkungen möglich sein.

In den folgenden Abbildungen wurden jeweils die Werte der Pfade 1 (über die Autobahn) und 2 (längs zur Autobahn) den Messergebnissen der Luftgütestation des Landes Tirol gegenübergestellt. Die wichtigen, einflussreichen meteorologischen Parameter, die Auswirkungen auf die kleinräumige Schadstoffbelastung haben können (Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung), sind farblich codiert eingearbeitet.

Bei der Analyse der Werte unter Einbeziehung der kurzwelligen, einfallenden Strahlung, ergibt sich ein interessantes Bild. Tendenziell ist zu erkennen, dass bei höheren Strahlungswerten die Messungen des DOAS höhere NO_2 -Werte liefern als die permanente Station. Zudem ist dieser Effekt auf Pfad 2 stärker als auf Pfad 1. Zusätzlich zeigt sich, dass dies in stärkerem Maße im Winter 2007/08 als im Winter 2005/06 zum Ausdruck kam. In Verbindung zu bringen ist dies mit der Umwandlung von NO in NO_2 . Dafür notwendig ist O_3 , das wiederum mit Sonnenlicht gebildet wird.

Generell fällt auch auf, dass die Werte des Pfades 1 generell besser mit den Daten der Luftgüteüberwachungsstation übereinstimmen als beim Vergleich des Pfades 2 mit der Routinestation des Landes Tirol. Dies hat die unmittelbare Ursache in der Lage der Pfade. Der Messpfad 1 läuft direkt über die Autobahn und über das Dach der Luftgütestation, wohingegen Messpfad 2 in einiger Entfernung zur Routinestation an der Autobahn entlang läuft. Somit geschieht in der kurzen Weglänge zwischen Pfad 1 und Pfad 2 schon eine gewisse Durchmischung bzw. Verdünnung der Luftschadstoffe.

Es kann daher daraus geschlossen werden, dass bei höheren Strahlungswerten tendenziell mehr Ozon zur Verfügung stand, das die Bildung von NO_2 förderte (siehe auch Bildung von NO_2 in Abschnitt 2.2). Aufgrund der Tatsache, dass Pfad 2 weiter von der Autobahn entfernt war, konnte auf der Wegstrecke dorthin mehr NO_2 gebildet werden.

Es sollte aber erwähnt werden, dass auch der Abbau (Photolyse) von NO_2 in NO durch die kurzweilige Strahlung ausgelöst wird - diese Reaktion muss jedoch zu jenen Zeitpunkten geringer gewesen sein als die NO_2 -Produktion. Eine Überprüfung dieser These konnte jedoch nicht verifiziert werden, da Ozonmessungen am Standort Vomp/Raststätte fehlten.

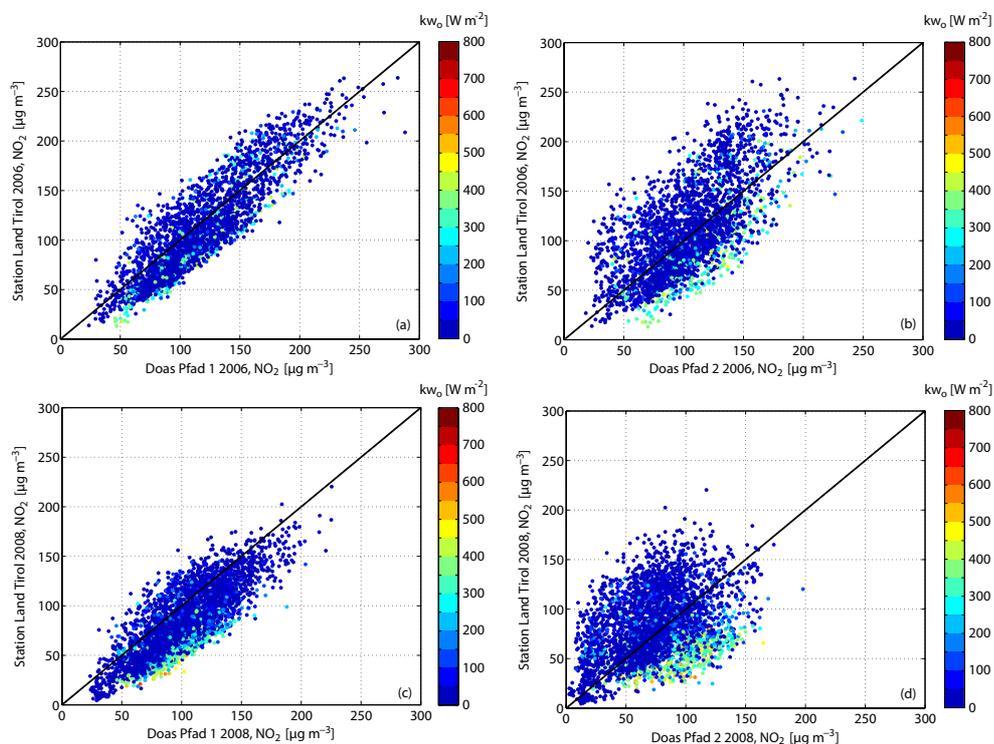


Abbildung 8.1: Korrelationen der NO_2 -Messungen der Luftgütestation Vomp/Raststätte mit den Messungen des Pfades 1 (über die A12) und des Pfades 2 (längs zur Autobahn) des DOAS. Den Messungen der Luftgütestation wird in (a) Pfad 1 und in (b) Pfad 2 des Winters 2005/06 bzw. in (c) Pfad 1 und in (d) Pfad 2 der Winterperiode 2007/08 gegenübergestellt. Farblich ist der Wert der kurzweiligen Strahlung, gemessen am Standort der Luftgütestation, eingearbeitet.

Ein weiterer Parameter, der die Konzentration von NO_2 beeinflusst, ist die Windgeschwindigkeit. Höhere Windgeschwindigkeiten führen im Allgemeinen zu einer besseren Durchmischung der Talatmosphäre. Diesen Effekt erkennt man in Abbildung 8.2 darin, dass höhere Windgeschwindigkeiten zumeist mit niederen Absolutwerten der NO_2 -Belastung zusammenfallen. Ansatzweise ist auch sichtbar, dass bei höheren Windgeschwindigkeiten das DOAS weniger misst als die permanente Station. Jedoch traten nur geringe Windgeschwindigkeiten auf, daher begrenzen sich diese Ergebnisse auf wenige Einzelwerte.

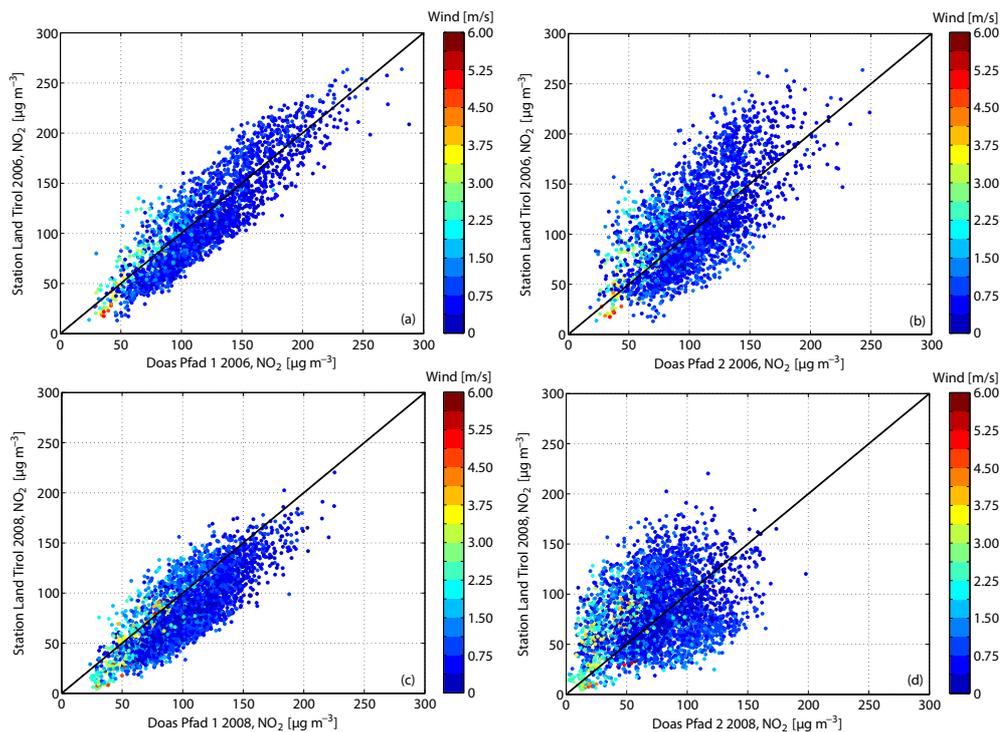


Abbildung 8.2: Vergleich der NO_2 -Konzentrationen des DOAS mit jenen der Luftgütestation, die Farbcodierung beinhaltet die Windgeschwindigkeit (gemessen am Standort der Luftgütemessstelle). Für die Erklärung der Beschriftung: siehe Abbildung 8.1.

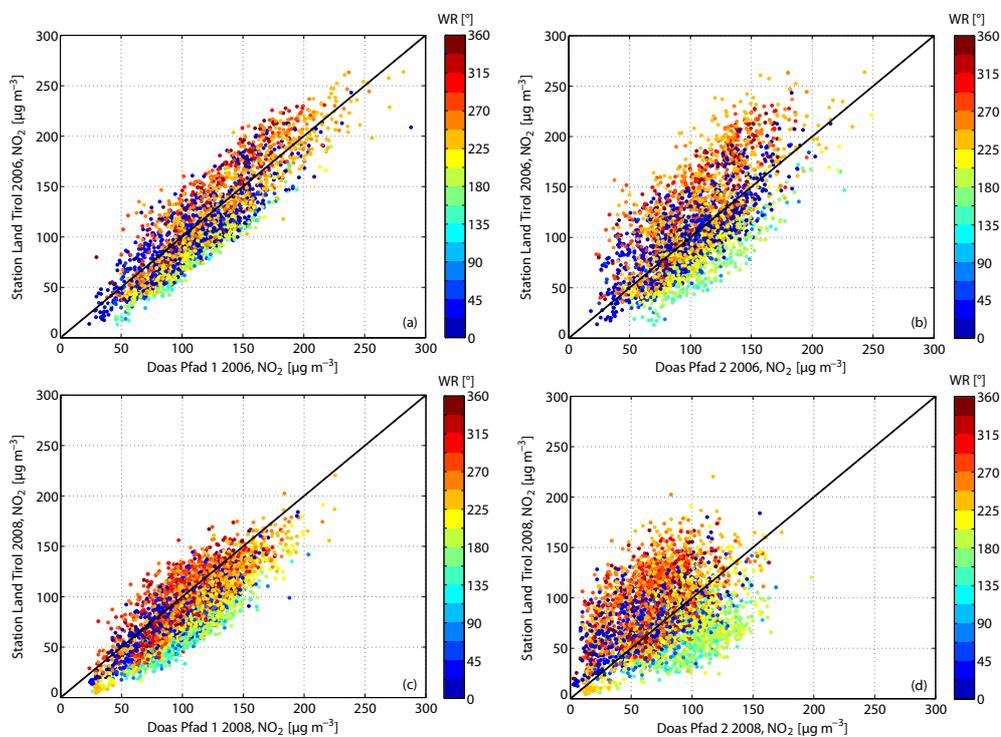


Abbildung 8.3: Mit den Werten der Windrichtung (ermittelt von der Luftgütemessstelle) eingefärbte Vergleichsstudien zwischen DOAS (Pfad 1 und 2) und der permanenten Station (NO_2). Erklärung der Beschriftung von (a) bis (d): siehe Abbildung 8.1.

Sehr viel aussagekräftigere Information als die Analyse der Globalstrahlung und der Windgeschwindigkeit liefert die Betrachtung der Windrichtung. Die Korrelationsanalyse lässt darauf schließen, dass es einen großen Unterschied macht, aus welcher Richtung der Wind an der Luftgütestation Vomp/Raststätte weht. Windrichtungen zwischen 100° und 200° (Ost bis Südsüdwest) verursachen höhere Konzentrationen an NO_2 an den Trassen des DOAS, wohingegen westliche und nördliche Windrichtungen zu höheren Messergebnissen an der Station des Landes Tirol führten (Abbildung 8.3).

In diesem Zusammenhang sollte in Erinnerung gerufen werden, dass das Inntal an dieser Stelle von Nordost nach Südwest verläuft. Außerdem befindet sich die permanente Station des Landes an der südlichen Seite der Autobahn, der Pfad 2 des DOAS an der nördlichen Talseite. Daher kommt es bei südlichen Winden zur Situation, dass sich das DOAS direkt in den abgewehten Schadstoffen der Autobahn befindet, wohingegen die Luftgütestation weniger belastete Luft aus dem Luv der Autobahn misst. Bei westlichen bis nördlichen Winden dreht sich dieser Effekt praktisch um, das DOAS befindet sich nun in weniger stark belasteten Luftmassen, die Luftgütestation dagegen direkt in den abgewehten Schadstoffen der Autobahn.

Als eine weitere mögliche Ursache können die tageszeitlich wechselnden Hangwinde genannt werden. Während des Tages kommt es aufgrund der Bestrahlung des Erdbodens zu einer Erwärmung der darüber liegenden Luftschicht. Diese steigt auf und bildet an den bestrahlten Hängen eine dünne Hangaufwindschicht. Während der Abend- und Nachtstunden kühlt sich hingegen die Luft über den Hängen ab und fließt ins Tal ab (Hangabwind). Aufgrund der Tatsache, dass die Autobahn bei Vomp nahe am nördlichen Hang liegt, könnte demnach das Hangwindssystem durchaus eine Auswirkung auf die Schadstoffmessungen auf beiden Seiten der Autobahn haben (ähnliche Ergebnisse erzielte auch Gurgiser 2009).

Um diese These zu unterstützen, wurde in den Abbildungen 8.4 und 8.5 eine Unterscheidung zwischen Zeitpunkten mit einer Globalstrahlung $> 50 \text{ Wm}^{-2}$ bzw. von $< 5 \text{ Wm}^{-2}$ getroffen. In die zweite Kategorie fallen besonders die Nachtstunden, während denen besonders Hangabwinde erwartet werden können.

Mittels Abbildung 8.4 kann die aufgestellte Theorie teilweise bestätigt werden, es dominierten während der Nacht Winde aus West bis Nord (Hangabwinde), nur selten sind zu diesen Zeitpunkten Südrichtungen verzeichnet worden. Tendenziell führen diese Strömungen, im Vergleich mit Pfad 2 des DOAS, zu höheren NO_2 -Messungen an der permanenten Station. Es kommen zwar auch gegenteilige Verhältnisse vor, jedoch sind diese eindeutig in der Unterzahl. Bei Windrichtungen entlang der Talachse (damit auch längs der Autobahn) können keine eindeutigen Effekte zugeordnet werden - die beiden Messgeräte werden von annähernd ähnlichen Luftmassen angeströmt.

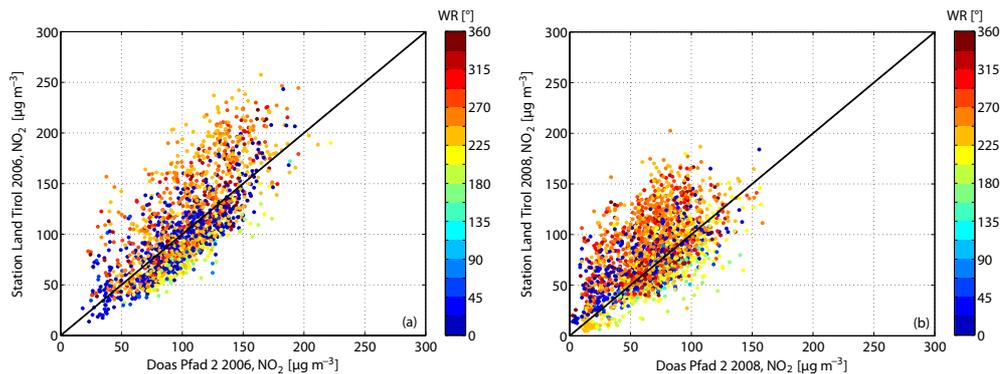


Abbildung 8.4: Korrelationen zwischen DOAS (Pfad 2) und der permanenten Station bei Globalstrahlungswerten von unter 5 Wm^{-2} für die Winter 2005/06 (a) und 2007/08 (b). Die Windrichtung ist wieder in Farbe codiert.

Die vorherigen Ergebnisse lassen vermuten, dass bei Zeitpunkten mit einer Globalstrahlung $> 50 \text{ Wm}^{-2}$ genau die entgegengesetzten Effekte eintreten. Dies kann mittels Abbildung 8.5 auch bestätigt werden. Zu jenen Zeitpunkten, an denen entlang des Pfades 2 (DOAS) höhere Werte gemessen wurden als an der Vergleichsstation, sind südliche Winde dominant (grün-blaue Datenpunkte), wohingegen Hangabwinde (westliche bis nördliche Winde) vergleichsweise höhere Werte an der Luftgütestation verursachen. Winde aus östlichen Richtungen verursachen keinerlei Tendenzen in den Messwerten.

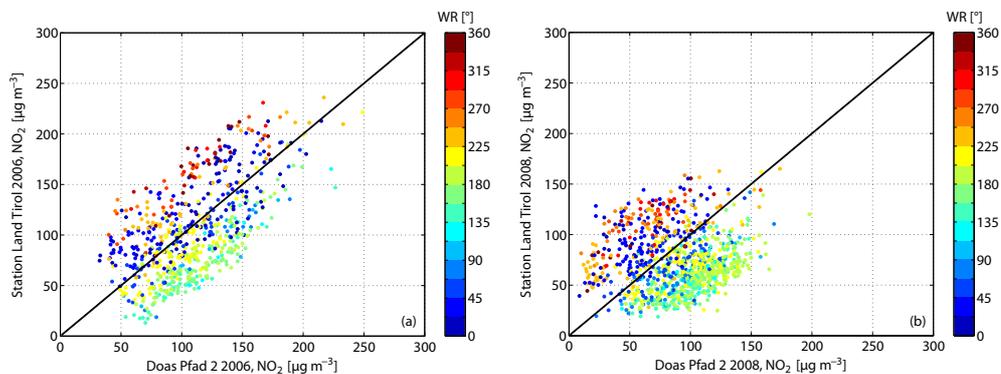


Abbildung 8.5: Korrelationen zwischen Pfad 2 des DOAS und der permanenten Station bei Globalstrahlungswerten von über 50 Wm^{-2} . In (a) sind die Werte des Winters 2005/06 und in (b) jene des Winters 2007/08 dargestellt. Farblich codiert ist die Windrichtung.

Zusammengefasst liegen Indizien vor, die eine Beeinflussung des Messstandortes Vomp/A12 durch Hangwinde vermuten lassen. Bei Hangabwinden traten tendenziell höhere Werte an der Luftgütestation auf, bei Hangaufwinden eher geringere Konzentrationen als bei den DOAS-Messungen. Eine genaue Analyse bezüglich Windsysteme im Talquerschnitt von Schwaz im Winter 2007/08 beinhaltet auch die Arbeit von Gurgiser (2009).

8.2 Analysen von bestimmten Wetterlagen

In den vorderen Kapiteln hat sich herauskristallisiert, dass Hochdruckphasen nicht immer dieselben Auswirkungen auf die Luftbelastung haben. Dies ist Grund genug, die jeweiligen Perioden mit gradientschwacher Wetterlage genauer unter die Lupe zu nehmen. Als jeweilige Analysezeiträume wurden aufgrund der Strömungslagenklassifikation in Abschnitt 4.3 für den Winter 2005/06 die Tage von 05.01.2006 bis zum 17.01.2006 bzw. im Winter 2007/08 die 12 Tage von 18.12.2007 bis 30.12.2007 ausgewählt.

Darüber hinaus sind nicht nur Hochdruckereignisse von Interesse, sondern auch die Auswirkungen von variablen Wetterlagen sollten untersucht werden. Aufgrund von Niederschlagsereignissen und zahlreichen Wechseln der Strömungslagen ist für diese Analyse der Zeitraum von 15.01 bis 27.01 beider Winter bestimmt worden.

Um einen besseren Überblick über die jeweilige Großwetterlage zu erhalten, folgt zuerst jeweils eine ausführliche Analyse der synoptischen Karten. Die Abbildungen zeigen jeweils die Höhe des Geopotentials in 300 *hPa* und die äquivalentpotentielle Temperatur in 850 *hPa*. Die unterschiedlichen Höhen sind deshalb so ausgewählt worden, damit zumindest in zwei unterschiedlichen Niveaus das Wettergeschehen graphisch dargestellt werden kann, außerdem stellen diese beiden Parameter eine optimale Ergänzung zueinander dar. Darüber hinaus werden auch die Aufzeichnungen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) verwendet (ZAMG 2009a).

Die Analyse des Geopotentials ermöglicht einen Einblick in die großräumige Strömungsstruktur, die Kennzeichnung von Hoch- und Tiefdruckgebieten und es kann daraus die Lage des Jets mit entsprechend hohen Windgeschwindigkeiten abgeleitet werden. Die äquivalentpotentielle Temperatur (Gleichung 8.1) ist eine Verknüpfung von potentieller und äquivalenter Temperatur, daher beschreibt diese den gesamten Wärmeinhalt eines auf 1000 *hPa* gebrachten Luftpakets (Emeis 2000).

$$\theta_e = T \cdot \left(\frac{1000}{p}\right)^{\frac{R}{cp}} + \frac{L \cdot m}{cp} \quad (8.1)$$

In Gleichung 8.1 steht T für die Lufttemperatur, p für den Luftdruck, R ist die Gaskonstante für trockene Luft ($287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), cp ist die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck, L ist die Kondensationswärme und m das Mischungsverhältnis von Wasserdampf zu trockener Luft.

Besonders gut eignet sich dieser Parameter zur Lokalisierung von Luftmassengrenzen bzw. Fronten und zur Abschätzung der Schneefallgrenze (bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$ schneit es auf Meeresniveau, bei $24 \text{ }^\circ\text{C}$ bis auf 1000 m ASL). Zeitlich sind die Karten aufgrund Platzproblemen so ausgewählt, dass jeden vierten Tag eine Analyse bildlich vorliegt.

8.2.1 Vergleich von Hochdruckphasen

Die Abbildung 8.6 zeigt die Analysen für die Hochdruckperiode von 05.01.2006 bis zum 17.01.2006. Zu Beginn des Jänners 2006 war das Wetter über Mitteleuropa noch bestimmt durch ein ausgeprägtes Tiefdruckgebiet über Oberitalien. Dieses beeinflusste vor allem den östlichen Raum Österreichs, die westlichen Bundesländer waren hingegen schon von einigen Sonnenstunden geprägt. Diese gründeten sich vor allem auf einen schwachen Hochdruckeinfluss, der sich in Westeuropa bemerkbar machte.

Die Luftmasse über Österreich war kalt und trocken, daher fielen die Temperaturen auf sehr tiefe Werte ab. In den darauf folgenden Tagen bildete sich über Europa eine stabile Hoch-über-Tief Wetterlage mit dem Tiefzentrum über dem westlichen Mittelmeer aus. Diese synoptische Konfiguration prägte die kommenden Tage sehr stark.

Am 9. Jänner breitete sich das stabile Hochdruckgebiet über Zentraleuropa aus, damit wurden bedeutsame Fronten von Österreich und den umliegenden Nachbarländern abgehalten. Jenes Frontensystem, das am 9. Jänner über Westeuropa lag, konnte z.B. aufgrund der blockierenden Lage nicht nach Mitteleuropa vordringen und blieb daher beinahe stationär über dem westlichen Atlantik liegen. Dies brachte mit sich, dass die Nächte in Österreich klar waren und die Temperaturen sehr tief fielen. Außerdem konnten sich, wie im Kapitel 6 gezeigt, sehr intensive nächtliche Inversionen ausbilden, die sich zum Teil trotz Einstrahlung auch während des Tages nicht auflösten.

In weiterer Folge verlagerte sich jedoch das Hochdruckgebiet in östliche Richtung. Die stabile Hoch-über-Tief Lage konnte sich aus diesem Grund langsam auflösen, die erste synoptische Störung konnte daher Westösterreich am 17. Jänner 2006 erreichen. Die dazugehörige Warmfront brachte außerdem sehr feuchte Luft in den Alpenraum. Es folgten schließlich am 18. Jänner aus der inzwischen entstandenen Okklusion starke Niederschläge, die das Ende der Hochdruckphase markierten.

Als Äquivalent zu dieser Hochdruckwetterlage im Jänner 2006 wurde im Winter 2007/08 der Zeitraum von 18.12.2007 bis 30.12.2007 ausgewählt (Abbildung 8.7). Der Beginn des Dezembers 2007 war stark von sich sehr schnell veränderlichen, niederschlagsreichen Wetterlagen geprägt. Am 15. Dezember 2007 machte sich jedoch bereits schwacher Hochdruckeinfluss in Westösterreich bemerkbar, ein mächtiges Hochdruckgebiet hatte sich über Großbritannien und den westlichen skandinavischen Ländern festgesetzt. Die weitere Entwicklung ähnelte sehr jener der Vergleichsperiode im Jänner 2006.

Das mächtige Hoch verlagerte sein Zentrum weiter nach Osten, außerdem wanderte ein Tiefdruckgebiet im Mittelmeerraum von Ost nach West. Dies bedingte wiederum eine stabile Hoch-über-Tief Lage mit einer östlichen Anströmung nach Österreich. Die Auswirkungen auf Mitteleuropa waren deshalb ähnlich zu denen im Jänner 2006. Aller-

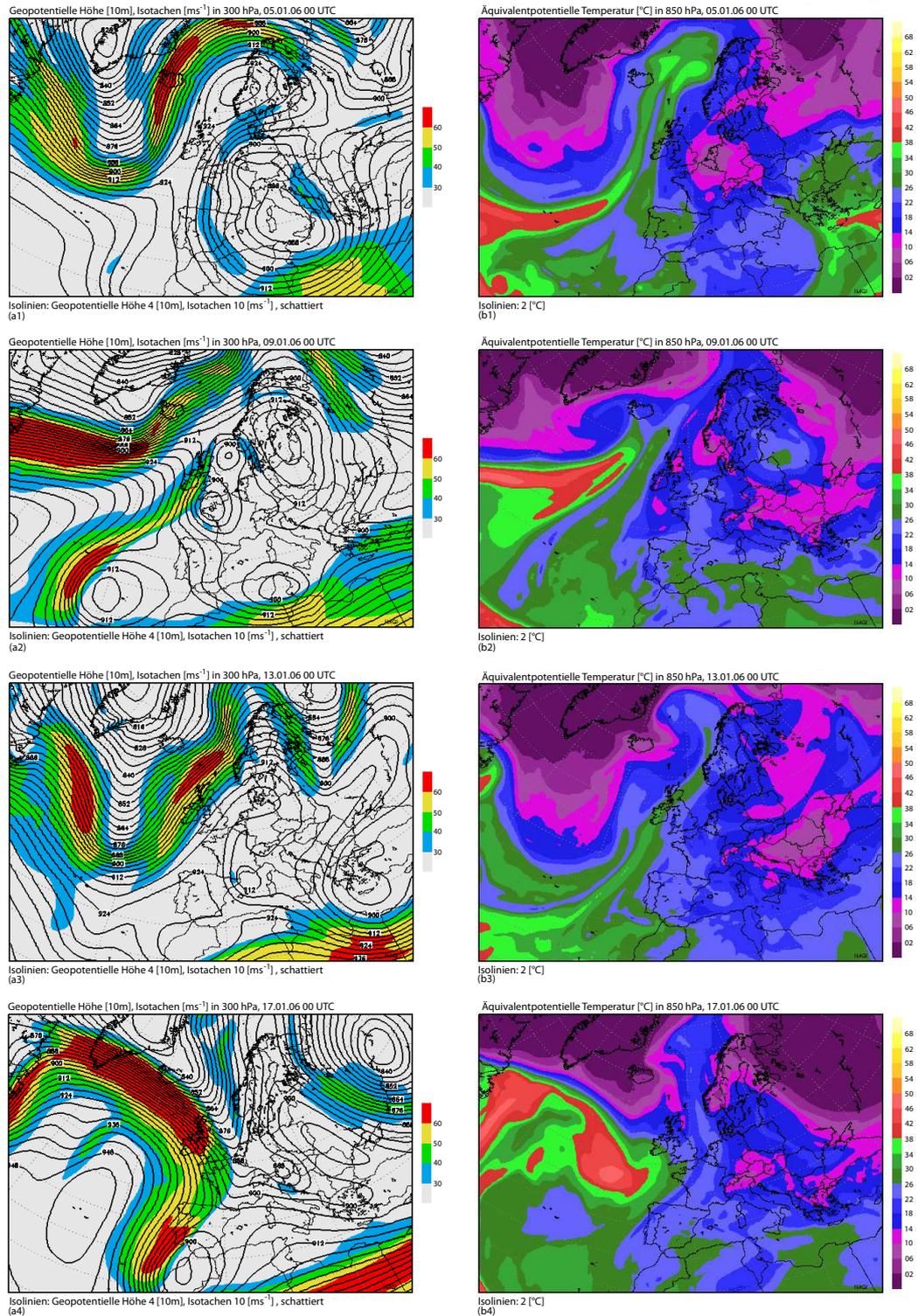


Abbildung 8.6: Synoptische Analyse einer Hochdruckperiode im Winter 2005/06 von 05.01.2006 bis 17.01.2006. Die Karten zeigen die Höhe des 300 hPa-Geopotentials [(a1) bis (a4)], die Abbildungen (b1) bis (b4) jene der äquivalentpot. Temperatur in 850 hPa für den 05. Jän. [(a1),(b1)], 09. Jän. [(a2),(b2)], 13. Jän. [(a3),(b3)] und 17. Jän. 2006 [(a4),(b4)]. Analyse: ECMWF, 00 UTC.

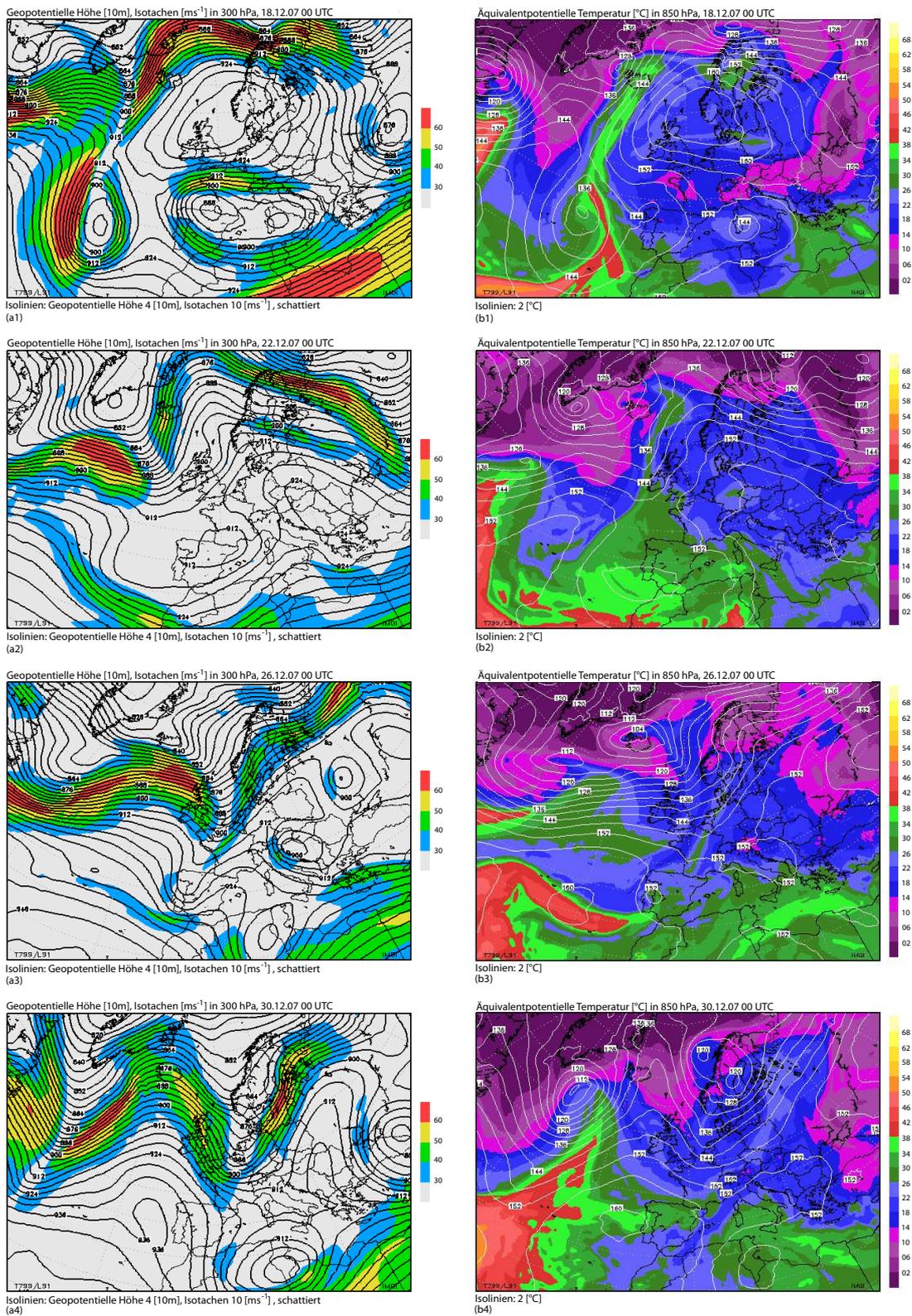


Abbildung 8.7: Darstellung der 300 hPa-geopot. Höhe in (a1) bis (a4) und der äquivalentpot. Temperatur (850 hPa) in (b1) bis (b4) während der Hochdruckphase im Winter 2007/08 von 18.12.2007 bis 30.12.2007. Die Abbildungen zeigen die synoptische Lage am 18. Dez. [(a1),(b1)], 22. Dez. [(a2),(b2)], 26. Dez. [(a3),(b3)] und 30. Dez. 2007 [(a4),(b4)]. Analyse: ECMWF, 00 UTC.

dings zeigte die äquivalentpotentielle Temperatur an, dass die über Österreich lagernden Luftmassen geringfügig wärmer waren als im Jänner 2006.

In der weiteren Folge wanderte das Hochdruckgebiet immer weiter nach Süden und beeinflusste den Alpenraum stark, es herrschte verbreitet, von Fronten unbeeinflusstes, ruhiges Winterwetter. Jedoch hielt diese Wetterlage nicht so ungestört an wie im Jänner 2006. Bereits ab 25. Dezember 2007 wurde das Wetter in Österreich von einem kleinen, sehr schnell wandernden, Tiefdruckgebiet leicht beeinflusst. Diese Störung war jedoch sehr schwach und zeitliche eng begrenzt und hatte in Tirol wenige Auswirkungen.

Danach setzte sich jedoch wieder Keileinfluss im Alpenraum durch, der vom 27. bis 29. Dezember die Fortsetzung der Hochdruckperiode verursachte. Das endgültige Ende dieser Hochdruckperiode ging jedoch mit einem Kaltfront- bzw. Trogachsendurchgang am 30.12.2007 einher, die Niederschläge im Alpenraum mit sich brachten. Darauf folgend strömten feuchte Luftmassen in den Ostalpenraum.

In den folgenden Zeilen und Abbildungen werden nun die synoptischen Infos mit jenen der Schadstoffkonzentration verbunden. Die Graphiken in Abbildung 8.8 beinhalten daher die wichtigsten Parameter zum Thema der Schadstoffbelastung und der Meteorologie im Inntal. Explizit sind darin die Werte der Emission, der Immission, des pseudovertikalen Temperaturgradienten und der kurzweiligen Strahlungsbilanz aufgetragen.

Besonders die Immissionswerte unterscheiden sich zwischen den beiden ausgewählten Zeiträumen erheblich. Zu Beginn der jeweiligen Hochdruckphase lagen die Werte noch etwa in derselben Größenordnung, jedoch ab dem 09.01.2006 bzw. 22.12.2007 divergieren die Kurven erheblich. Im Durchschnitt liegt die Kurve während der zweiten Jännerwoche 2007 um drei bis vier Mal höher als im Vergleichszeitraum des Winters 2007/08.

Der erste Hauptgrund ist vor allem bei den freigesetzten Emissionen zu suchen. Durch die Weihnachtszeit 2007 fielen die ausgestoßenen Konzentrationen an NO_x mit dem Beginn der Feiertage am 23. Dezember drastisch ab, wohingegen die Hochdrucklage 2005/06 genau zwischen zwei Wochenenden mit hohen Emissionswerten lag. Im Jänner 2006 waren nur wenige Tage mit niederen Emissionsraten gekennzeichnet - es waren dies der 6. Jänner (Feiertag, Hl. Dreikönig) und der 8. Jänner bzw. 15. Jänner (Sonntage). Alle anderen Tage wiesen in der betreffenden Periode 2006 jedoch sehr viel höhere Werte auf.

Der zweite Hauptgrund ist ein meteorologischer, ab dem 10.01.2006 bzw. 23.12.2007 laufen die Kurven des pseudovertikalen Temperaturgradienten einigermaßen auseinander. Die Tage vor diesen Zeitpunkten sind bei den Stabilitätsbetrachtungen noch ähnlich, interessanterweise sind während diesem Zeitpunkt auch die Immissionen auf gleichem Niveau - ein Indiz dafür, dass die Immissionen sowohl von den Emissionen als auch stark von der vertikalen Stabilität bestimmt waren.

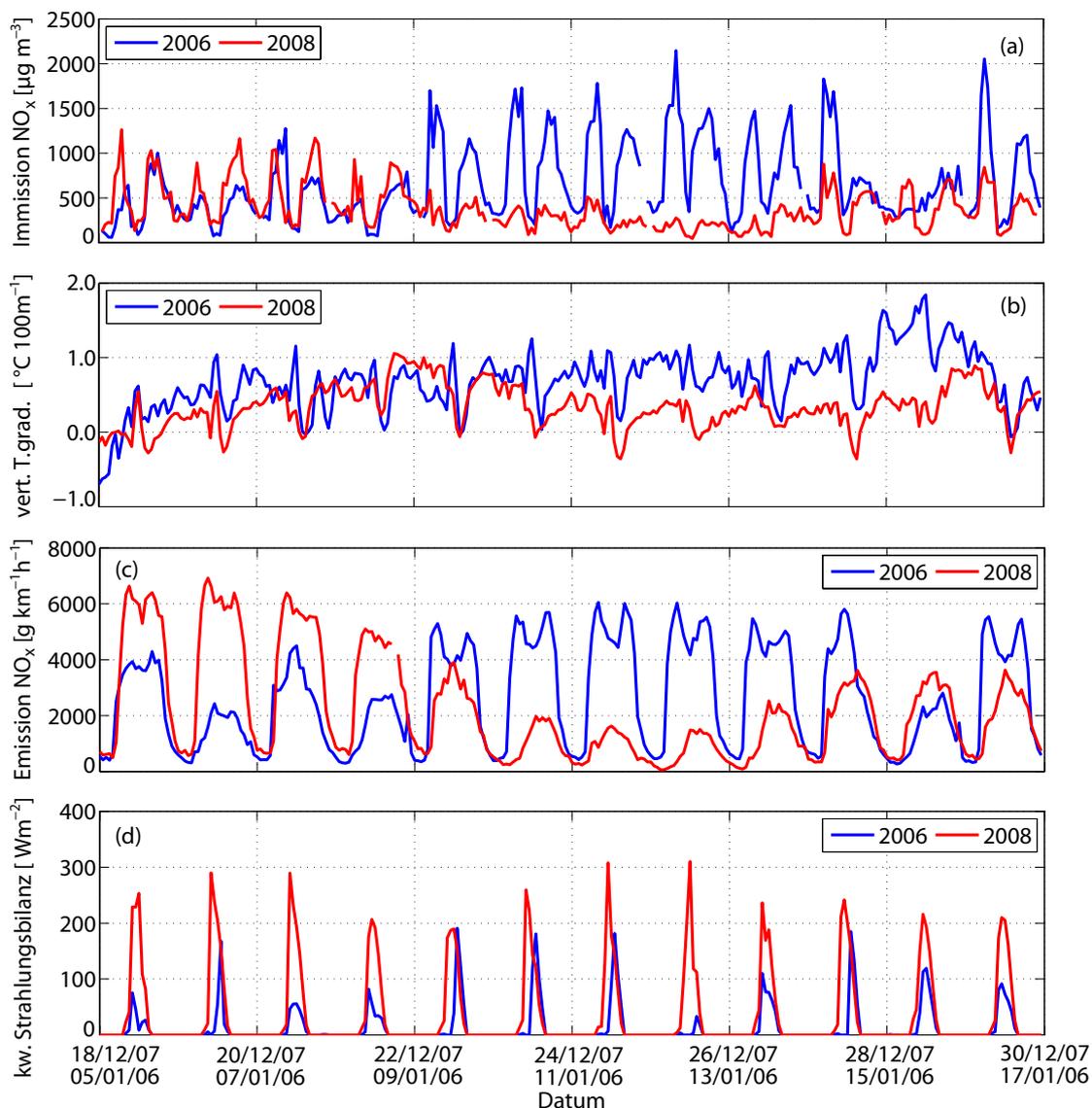


Abbildung 8.8: Darstellung der gemessenen bzw. berechneten Daten der Immission (a), des pseudovertikalen Temperaturgradienten entlang des Kellerjochhanges (b), der Emission (c) und der kurzwelligen Strahlungsbilanz (d) während 12 Tagen mit Hochdruckeinfluss.

Höhere Stabilitäten und damit verringerte Austauschprozesse kamen besonders zwischen 11.01.2006 und 16.01.2006 vor. Diese Tatsache pauste sich direkt in Kombination mit den unterschiedlichen Emissionsmengen auf die Immissionssituation durch.

Um einiges interessanter ist der Beginn der jeweiligen Hochdruckperiode. Wie vorher schon erwähnt, lagen die Immissionskurven für beide Perioden sehr nahe beieinander - jedoch die Emissionen waren sehr unterschiedlich. Der verstärkte Verkehr vor den Weihnachtstagen 2007 verursachte sehr hohe Emissionswerte, der Beginn der Hochdruckperiode im Jänner 2006 war hingegen durch relativ niedere Emissionswerte charakterisiert.

Die hohen Emissionsraten hatten demnach keinen so starken Einfluss auf die vorweihnachtliche Belastung im Dezember 2007, möglicherweise beeinflusst durch den etwas geringeren vertikalen Temperaturgradienten im Vergleich zur Kernhochdruckphase im Jänner 2006.

Außerdem lagen die Werte der kurzwelligen Strahlungsbilanz um einiges auseinander - es stand der Atmosphäre zu Weihnachten 2007/08 um mehr als das doppelte an Energie zur Verfügung um die Talatmosphäre zu durchmischen. Diese Thematik wird auch in Kapitel 6 ausführlich behandelt.

Kurz gefasst sind die unterschiedlichen Auswirkungen von Hochdruckperioden ein Zusammenspiel von Emission, Stabilität und Strahlungsbilanz. Im Jänner 2005/06 addierten sich diese Parameter besonders nachteilig im Bezug auf die Schadstoffbelastung 2006. Hohe Emissionsraten fielen mit starken Stabilitäten der Atmosphäre zusammen.

Der fehlende Schnee zu Weihnachten 2007 wirkte sich hingegen vorteilhafter aus, die Stabilität der Talatmosphäre war geringer und zudem gab es einen niederen Eintrag von Schadstoffen ins System. Es kann daher der Schluss gezogen werden, dass Hochdruckperioden nicht von vornherein zu hohen Schadstoffbelastungen führen - es ist immer ein Zusammenspiel von mehreren Faktoren.

8.2.2 Analyse von Perioden mit variablen Wetterlagen

In diese Periode, die in beiden Jahren den Zeitraum von 15.01. bis 27.01. abdeckt, fallen das Ende der ersten, mächtigen Hochdruckperiode im Jänner 2006, mehrere Frontdurchgänge in beiden Wintern und weitere, jedoch kurze, Hochdruckphasen. Analog zu den Hochdruckanalysen sind auch die Beschreibungen der variablen Wetterlagen in Abbildung 8.9 und 8.10 in eine Analyse des Geopotentials in 300 *hPa* und der äquivalentpotentiellen Temperatur in 850 *hPa* eingeteilt.

Das Ende der Hochdruckperiode im Jänner 2006 erfolgte durch Warm- bzw. Kaltfrontdurchgänge am 17. Jänner 2006, am 18. Jänner folgten schließlich teilweise starke Niederschläge, die aufgrund der Temperaturen in Form von Schnee niedergingen. Am Abend des 18. Jänners kam Westösterreich immer mehr in den Einfluss des Polarjets mit einhergehenden stärkeren Windgeschwindigkeiten, auch Niederschläge sind aufgrund der Nordstaulage noch registriert worden.

Im Laufe des 19. Jänners schob sich ein Keil nach Westeuropa, der zu einem leichten Zwischenhocheinfluss führte. Des Weiteren wurden ab dem 20. Jänner, ausgelöst durch ein Tief über der Nordsee, etwas mildere Luftmassen nach Österreich gebracht (siehe äquivalentpotentielle Temperatur).

Das Tiefdruckgebiet zog ab dem 22. Jänner weiter nach Skandinavien, damit stieß an seiner Rückseite kalte Luft in den Alpenraum vor. Die Anströmung drehte stark auf Nord und führte dabei zu Stauniederschlägen am Alpennordrand. Ab dem 23. Jänner setzte sich jedoch wieder Keileinfluss durch, verbunden mit der schon vorhanden trockenen kontinentalen Kaltluft sanken die Temperaturen stark ab.

Gestört wird die Hochdrucklage durch ein Tief über Deutschland am 26. und 27. Jänner bzw. am 28. und 29. Jänner durch ein Mittelmeertief. Besonders am 27. Jänner machten sich aufgrund der südlichen Anströmung föhnige Tendenzen an der Alpennordseite bemerkbar.

Im Winter 2007/08 wurden, wie vorher schon erwähnt, exakt dieselben Kalendertage wie im Winter 2005/06 zur Analyse ausgewählt. Die Untersuchung beinhaltet daher die Tage vom 15. Jänner bis 27. Jänner 2008. In der Zeit vor dem 13. Jänner 2008 war Zentraleuropa geprägt durch ein Genuatief, das Niederschläge im Alpenraum brachte. Die synoptische Lage am 15. Jänner war bestimmt durch einen Trog über Westeuropa und einem Tief über dem Atlantik.

Am 16. Jänner überquerte schließlich eine schwache Kaltfront Österreich, einen Tag später verursachte ein weiteres Frontensystem Niederschläge im Ostalpenraum. Anschließend drehte die Strömung auf West bis Nordwest und es gelangte mildere Luft nach Mitteleuropa (siehe (b2) in Abbildung 8.10).

Ein im Norden vorbeiziehendes Tief führte am 22. Jänner Kaltluft aus Norden nach Österreich. Die resultierende Nordströmung verursachte in den Staugebieten der Alpen Niederschläge. Auch im Untersuchungsgebiet fiel Niederschlag, jedoch größtenteils in Form von Regen. Ab dem 23. Jänner kamen die Alpen in den Einfluss eines Keiles über Westeuropa, damit setzte sich kurzzeitig sonniges Wetter durch.

Am 25. und 26. Jänner erreichte zuerst eine Kaltfront den Ostalpenraum, gefolgt wird diese durch neuerlichen, kurzzeitigen Hochdruckeinfluss. Schlussendlich dominierte ab dem 27. Jänner eine Westströmung mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten. In der Folge überquerte bzw. streifte ein Orkantief Österreich.

Im Gegensatz zur vorherigen Graphik 8.8, sind bei der Analyse von variablen Wetterlagen in Abbildung 8.11 andere Parameter gewählt worden als zuvor. Zusätzlich zu den Immissionen und zum pseudovertikalen Temperaturgradienten sind die Niederschlagssummen und Windverhältnisse dargestellt.

Die Immissionsstruktur unterschied sich im Vergleich der beiden Zeiträume beträchtlich. Das Gesamtniveau der NO_x -Immission war in der betrachteten Periode des Winters 2005/06 um einiges höher als im Vergleichszeitraum des Winters 2007/08 (Abbildung

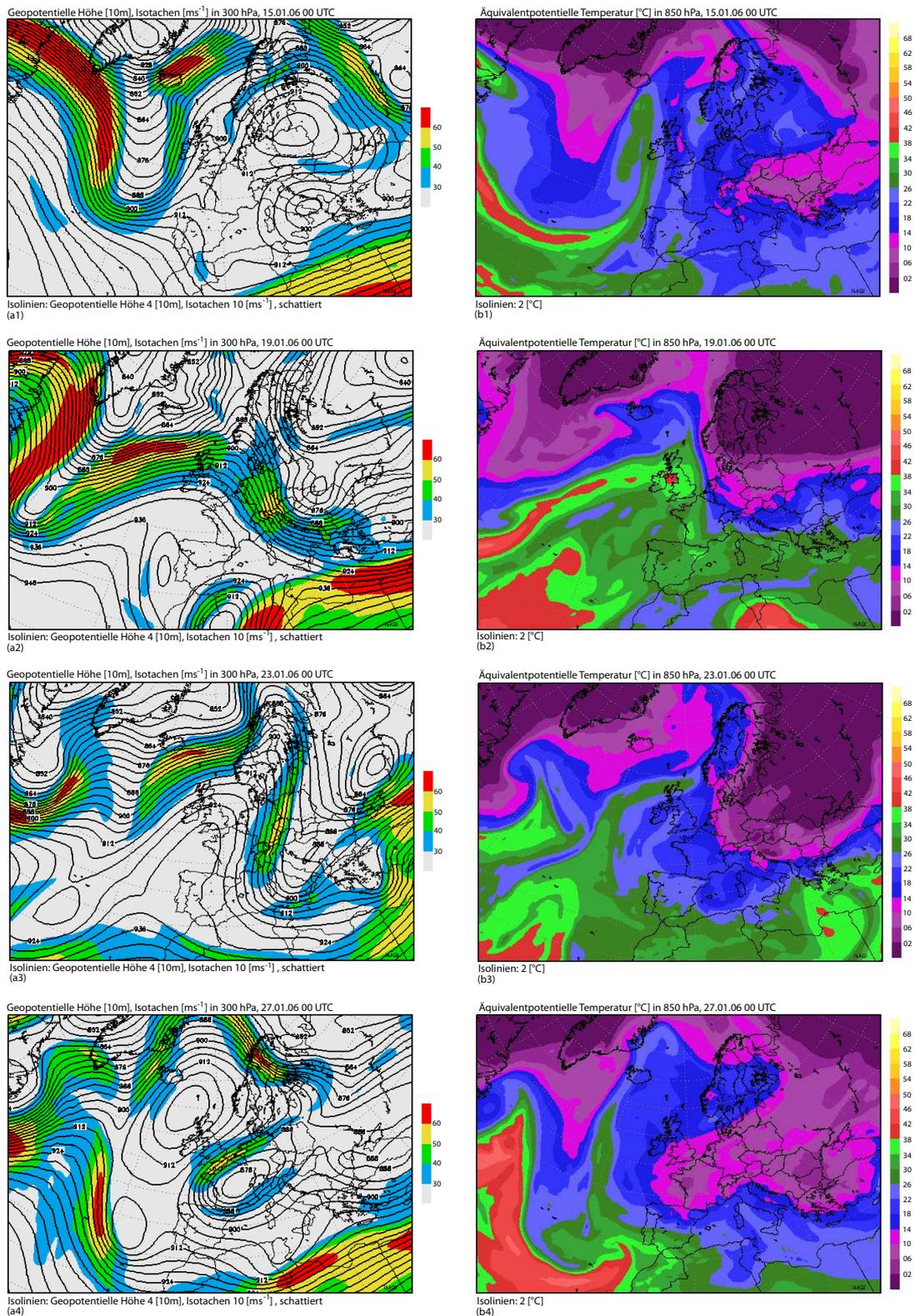


Abbildung 8.9: Analyse einer Periode mit variablen Wetterlagen im Winter 2005/06 (15.01.2006 bis 27.01.2006). Die Karten zeigen die geop. Höhe in 300 hPa [(a1) bis (a4)], die Abbildungen (b1) bis (b4) jene der äquivalentpot. Temperatur in 850 hPa für den 15. Jän. [(a1),(b1)], 19. Jän. [(a2),(b2)], 23. Jän. [(a3),(b3)] und 27. Jän. 2006 [(a4),(b4)]. Analyse: ECMWF, 00 Uhr UTC.

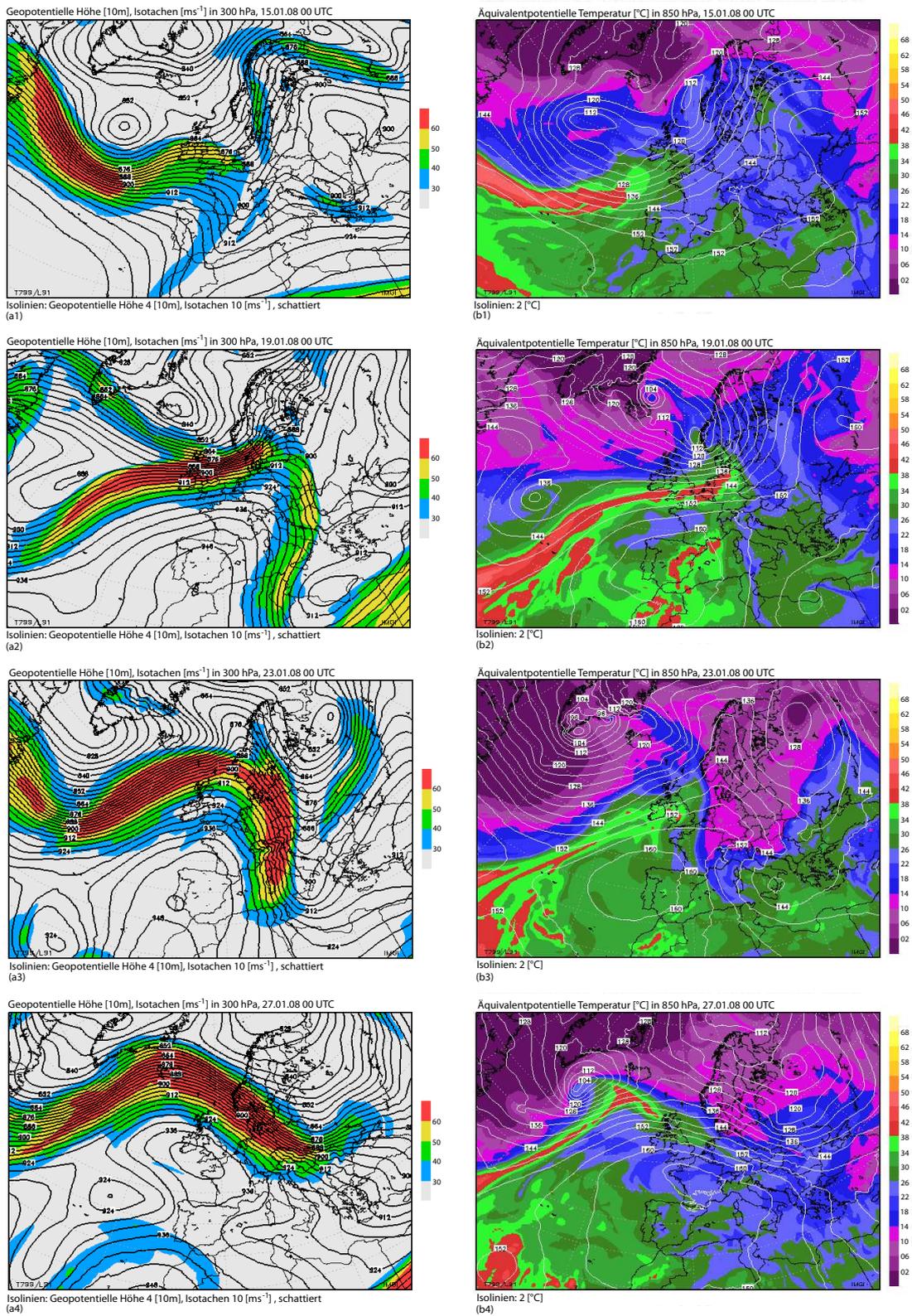


Abbildung 8.10: Winter 2007/08: Analyse einer Periode mit variablen Wetterlagen von 15.01.2008 bis 27.01.2008. Die Karten zeigen die geop. Höhe in 300 hPa [(a1) bis (a4)], die Abbildungen (b1) bis (b4) jene der äquivalentpot. Temperatur (850 hPa) für den 15. Jän. [(a1),(b1)], 19. Jän. [(a2),(b2)], 23. Jän. [(a3),(b3)] und 27. Jän. 2008 [(a4),(b4)]. Analyse: ECMWF, 00 Uhr UTC.

8.11). Ab dem 22. Jänner 2006 fiel jedoch die Kurve stark ab, die Stauniederschläge wuschen einige Schadstoffe aus.

Außerdem verhinderte die bessere Durchmischung der Atmosphäre aufgrund von stärkeren Windgeschwindigkeiten einen neuerlichen sofortigen Anstieg der Schadstoffkonzentrationen. Außerdem war der 22. Jänner 2006 ein Sonntag mit verringerten Emissionen des Autobahnverkehrs (A12).

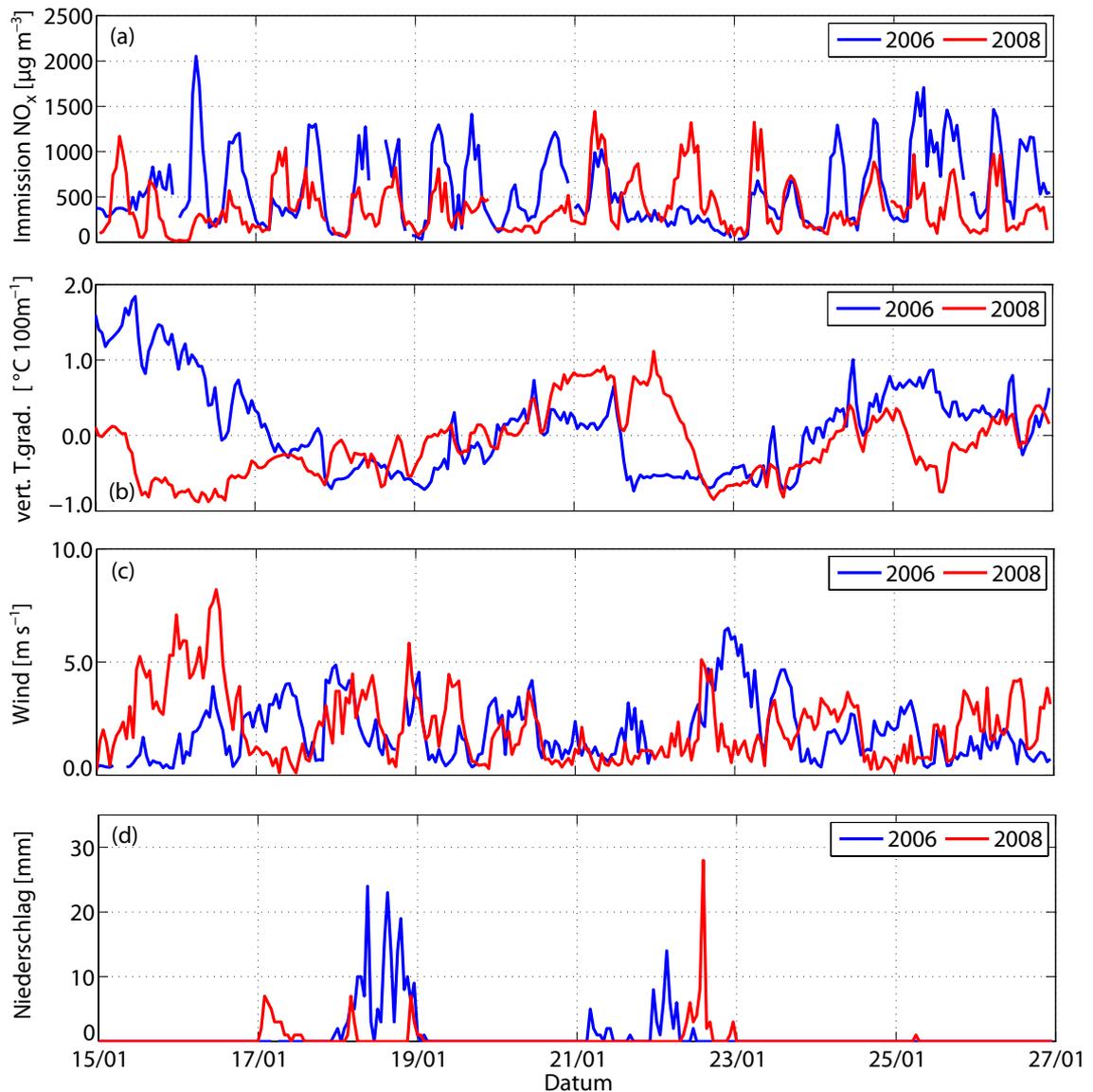


Abbildung 8.11: Daten der Immission (a), des pseudoverticalen Temperaturgradienten (b), der Emission (c) und des Niederschlags (d). Der Zeitraum liegt in beiden Wintern zwischen 15.01. und 26.01., dies entspricht genau 12 Tagen.

Es gab aber bereits am 18. Jänner 2006 ein kräftiges Niederschlagsereignis, das jedoch nicht zu einer verringerten Immission führte. Der Grund liegt möglicherweise darin, dass die Messdaten des Niederschlags von der Station Jenbach gemessen wurden. In Schwaz lassen Analysen der Schneehöhen vermuten, dass dieses Niederschlagsereignis im Untersuchungsgebiet weit geringer ausgefallen war. Demzufolge konnten keine so hohen Auswaschraten erreicht werden, außerdem war der 18. Jänner 2006 ein normaler Werktag mit unveränderter Emissionsstruktur.

Ein sehr markantes Ereignis weist die Untersuchungsperiode im Winter 2007/08 auf. Am 22. Jänner brachte die Nordstaulage einiges an Niederschlag, dieser wirkte sich jedoch nicht sofort auf die Immission aus. Allerdings die Talatmosphäre durchmischte sich aufgrund des Niederschlags. Erst mit einem Tag Verzug verringerten sich die Immissionswerte, beeinflusst durch die weiterhin weniger stabile Atmosphäre.

In der Zusammenfassung ergeben sich beinahe dieselben Schlussfolgerungen wie bei der Analyse der Hochdruckperioden. Besonders stark ist die Immission durch die Emission beeinflusst, außerdem von Windereignissen, die bis in die Tallagen vordringen können. Jedoch Niederschlagsereignisse konnten nicht exakt in deren Auswirkungen charakterisiert werden, auch aufgrund der fehlenden Niederschlagsmessungen direkt im Untersuchungsgebiet.

Es lässt sich aber die Aussage tätigen, dass ein über mehrere Stunden andauerndes Niederschlagsereignis besser die Schadstoffe auswäscht als ein sehr kurzes, aber kräftiges. Weiters sei noch erwähnt, dass auch bei Betrachtung der variablen Wetterlagen der pseudovertikale Temperaturgradient gut mit den gemessenen Immissionswerten übereinstimmt.

8.3 Das NO_2 zu NO_x Verhältnis

Wie in den Einleitungskapitel schon erwähnt, wird NO_2 einerseits mittels Ozon aus NO gebildet, andererseits auch direkt von Verbrennungsmotoren emittiert. Daher liegt der Wunsch nahe, die Beiträge dieser beiden Prozesse getrennt zu betrachten. Jedoch ist dies anhand der Datenlage nur sehr schwer erreichbar. Allerdings ist es möglich, die Summe beider Prozesse in Relation zu NO_x zu betrachten. Als Hilfsmittel dient dazu das NO_2 zu NO_x Verhältnis.

Kleine Zahlenwerte dieses Verhältnisses kommen dann vor, wenn wenig NO_2 im Vergleich zu NO_x vorliegt. Dies kommt vor allem dann vor, wenn wenig NO_2 gebildet wird (bei wenig Ozon bzw. anderen Reaktionspartner in der Luft) bzw. wenn wenig NO_2 emittiert wird. Dementsprechend lässt ein sehr hohes Verhältnis auf viele Reaktionspartner in der Atmosphäre schließen bzw. viel Ausstoß von NO_2 in die Luft. Aber auch eine lange Verweildauer in der Atmosphäre führt zu einem hohen NO_2 zu NO_x Verhältnis.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse gilt es zu beachten, dass in diesem Abschnitt ausnahmsweise NO_x als direkte Summe aus NO und NO_2 berechnet wird, es erfolgte keine Gewichtung nach IG-L (siehe auch Abschnitt 2.2).

Gurgiser (2009) schenkte diesem Themengebiet bereits großen Raum. Er konzentrierte sich dabei vor allem auf die Tagesgänge bei unterschiedlichen Strahlungssituationen. Dabei zeigte sich, dass das Verhältnis von NO_2 zu NO_x besonders in den Mittags- und Nachtstunden hoch war, wohingegen die Vormittags- und Nachmittagsstunden vor allem von niederen Verhältnissen geprägt waren. Das mittägliche Maximum führte er vor allem auf die besseren Durchmischungsbedingungen und auf die typischen Windverhältnisse während den betreffenden Zeitpunkten zurück, das nächtliche Maximum auf eine veränderte Emissionscharakteristik.

In dieser Arbeit soll daher nicht auf die Tagesgänge eingegangen werden, sondern auf die jeweiligen Tagesmittel im Verlauf der beiden Winter. Daher sind in Abbildung 8.12 die jeweiligen Tagesmittel des NO_2 zu NO_x Verhältnisses abgebildet. Zusätzlich sind jene Tage, an denen das Verhältnis den Wert von 0.30 überschreitet, mit Farbkästchen markiert. Der Wert 0.30 wurde gewählt, da die jeweiligen Mittelwerte der Winterperioden bei 0.30 (2005/06) bzw. 0.33 (2007/08) lagen.

Anhand Abbildung kann man erkennen, dass ein hohes Verhältnis von NO_2 zu NO_x besonders an den Wochenenden vorkam, teilweise wies schon der Freitag ein hohes Verhältnis auf. Ausgezeichnet sieht man diesen wöchentlichen Rhythmus im Winter 2005/06, aber auch im zweiten Winter waren die Wochenenden meist mit einem hohen Verhältnis gekennzeichnet. Zudem ist beiden Zeiträumen gemeinsam, dass die Weihnachtsperioden durch hohe Werte von NO_2 im Vergleich zu NO_x auffallen.

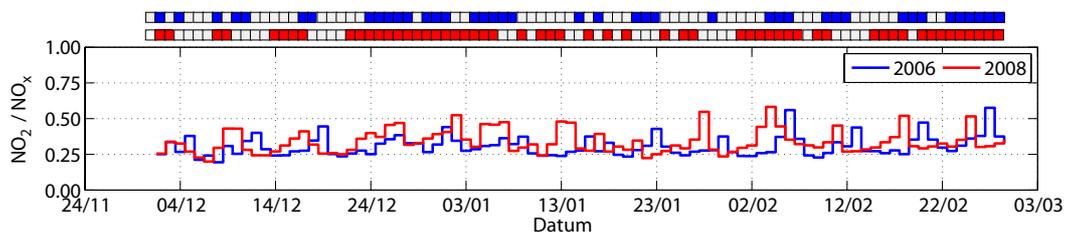


Abbildung 8.12: Das NO_2 zu NO_x Verhältnis in Tagesmittelwerten für beide Winterperioden. Die farbigen Leisten skizzieren jene Tage, an denen das Verhältnis über 0.30 war.

Weitere, sehr interessante Punkte zeigen sich bei Betrachtung des Februar 2008, der von besonders hohen NO_2 zu NO_x Verhältnissen geprägt war. Zu Beginn des Monats herrschte eine starke Föhnwetterlage, bei der der Föhn bis nach Schwaz durchdringen konnte. Da die Föhnluftmassen aus höheren Atmosphärenschichten stammen, befanden sich darin eine erhöhte Anzahl von Ozonmolekülen, die zu einer verstärkten Bildung von NO_2 beitrugen. Außerdem führt Föhn im Allgemeinen zu einer besseren Durchmischung.

Föhnevents können demnach zu einem höheren Verhältnis von NO_2 zu NO_x beitragen. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den Ergebnissen von Gurgiser (2009).

Die restlichen Tage des Februar 2008 waren jedoch nicht von Föhn geprägt. Es herrschten primär Hochdruckwetterlagen vor (siehe Strömungslagenklassifikation in Abschnitt 4.3), während denen der vermehrte Strahlungseinfall zu einer verstärkten NO_2 Produktion führte. Auch während der Hochdruckphasen des Jänners 2006 kamen hohe Verhältnisse vor, jedoch nicht in dem Ausmaß wie im Februar 2008. Aus diesem Grund muss auch die Durchmischung der Atmosphäre für die Bildung von NO_2 eine Rolle spielen. Wie in den vorherigen Abschnitten bereits ausführlich dargestellt, waren die Austauschverhältnisse im Jänner 2006 im Vergleich zum Februar 2008 sehr schlecht.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich drei wichtige Folgerungen. Zum Ersten ist das NO_2 zu NO_x Verhältnis besonders geprägt von der Zusammensetzung des Verkehrs. Weiters hängt es stark von besonderen Ereignissen wie z.B. Föhn und erhöhten Strahlungswerten während Hochdruckwetterlagen ab. Außerdem spielt auch die Durchmischung der Talatmosphäre eine Rolle. Schlussendlich ist daher das Verhältnis von NO_2 zu NO_x ein Zusammenspiel dieser drei Faktoren.

8.4 Tagesmittelwerte der Emission, Immission und der meteorologischen Parameter

Eine weitere interessante Analysemöglichkeit ist die Betrachtung von Tagesmittelwerten der abhängigen Größen. Dabei werden die Kästchen in Abbildung 8.13 bei einer Überschreitung eines gewissen Grenzwertes bunt eingefärbt. Anhand dieser Darstellung können dann Untersuchungen der Zusammenhänge stattfinden.

Die Charakteristik der Emissionen war, wie in der Arbeit schon erwähnt, während beider Winter auch bei dieser Betrachtungsweise ähnlich. Die Weihnachtstage stechen jeweils als Emissionsminima heraus. Als zweiter Punkt sollten die Kästchen der Immissionen angeschaut werden - hier zeigen sich eindeutige Unterschiede. Während des Winters 2005/06 sind 41 Tage mit roter Farbe eingefärbt, im zweiten Winter nur 11 Tage. Diese Unterschiede müssen nun mit den meteorologischen Faktoren erklärt werden können.

Dabei fällt auf, dass bei einem rot eingefärbten Kästchen (hohe Immission) entweder ein hoher Emissionswert (braun) oder ein hoher pseudovertikaler Temperaturgradient (gelb) bzw. beides vorhanden war. Niedere Emissionswerte pausten sich außerdem sofort auf niedere Immissionswerte durch, trotz weiterhin hohen Werten der Temperaturgradienten (z.B. an den Sonntagen im Jänner 2006). Dies induziert vor allem einen starken Zusammenhang zwischen Emission/Immission und der Schichtung der Talatmosphäre. Höhere

Niederschlagssummen wirken logischerweise erniedrigend auf den vertikalen Temperaturgradienten ein und verringern damit indirekt die Belastung mit Schadstoffen in der Luft.

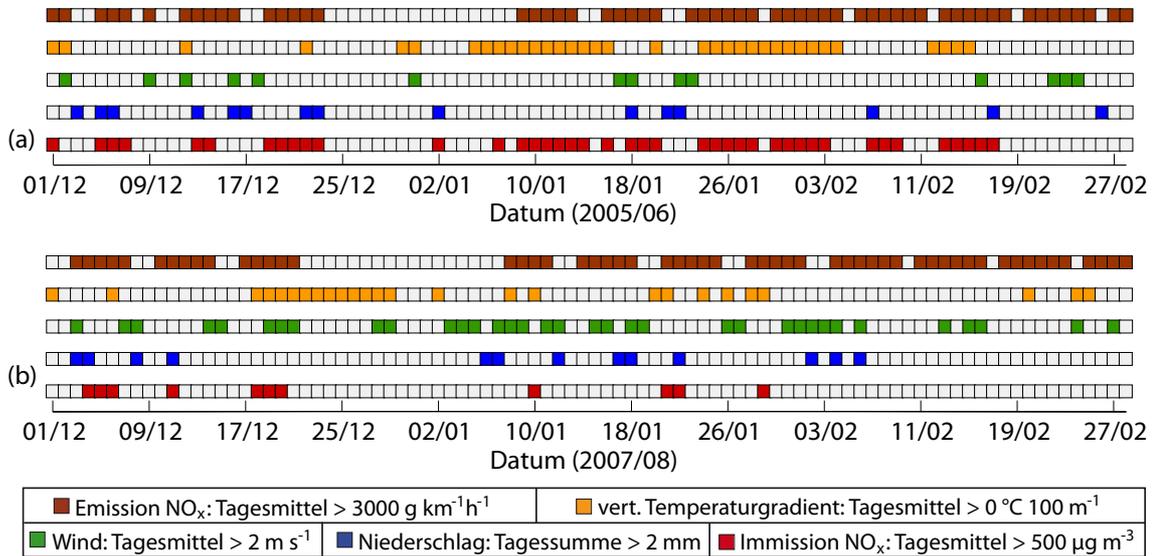


Abbildung 8.13: Farbliche Darstellung von Schwellwertüberschreitungen der Tagesmittel von Emission, Immission, Windgeschwindigkeit und des pseudovertikalen Temperaturgradienten entlang des Kellerjochhanges pro 100 m. Die Niederschlagsraten der Station Jenbach sind als Tagessumme dargestellt. Teil (a) der Graphik visualisiert die Daten des Winters 2005/06 und (b) die Messwerte der Monate Dezember bis Februar 2007/08.

Die Kästchen mit höheren Windgeschwindigkeiten sind verhältnismäßig ungleich zwischen den Wintermonaten 2005/06 und 2007/08 aufgeteilt. Es gab während der Untersuchungsperiode 2007/08 um einige Tage mehr, an denen höhere Windgeschwindigkeiten als Tagesmittel aufgetreten sind. Jedoch hatten diese nicht immer unmittelbar Einfluss auf die Schadstoffbelastung. Nur bei starken Einzelereignissen, wie bei Föhndurchbrüchen oder Frontdurchgängen, zeigten sich sofort erniedrigendere Effekte auf die Immissionskonzentrationen.

Kapitel 9

Anwendung eines einfachen Box-Modells

Ein Ziel von wissenschaftlichen Forschungen ist es, die von der Natur gegebene Realität möglichst genau mittels Modellen, die verschiedenste Ansätze gebrauchen, zu beschreiben. Unter anderem ist auch der Zusammenhang zwischen den meteorologischen Gegebenheiten und der Schadstoffbelastung Gegenstand von vielen Modellanwendungen. Die Palette reicht von diagnostischen/prognostischen, 3-D oder 2-D Analysen bis hin zu Modellen, die komplexe chemische Prozesse berücksichtigen. Die Anwendung von umfassenden Modellen würde jedoch den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen. Aus diesem Grund beschränkt sich die folgende Modellanwendung auf ein einfaches Box-Modell, das im folgenden Kapitel 9 näher erläutert wird und dessen Ergebnisse präsentiert werden. Die Modellansätze stammen aus der Veröffentlichung von Heimann et al. (2009).

9.1 Modellbeschreibung

Heimann et al. (2009) beschäftigten sich in ihrer Studie mit einem Box-Modell, das in den Talquerschnitt bei Schwaz/Vomp gelegt wurde. Dabei wurde als Vereinfachung angenommen, dass sich die Problemstellung mittels zweidimensionalen Analysen darstellen lässt. Die wichtigsten Eingangsparameter in die Modellberechnungen sind die Emissionsraten und die Mischungsschichthöhen. Die Funktionsweise basiert außerdem darauf, dass die aus den Verkehrszahlen berechneten Emissionen sofort in jene Schicht eingemischt werden, die unterhalb der Mischungsschichthöhe liegt. Ist die Mischungsschicht im Steigen begriffen, wird angenommen, dass relativ saubere Luft (Hintergrundkonzentration) aus der freien Atmosphäre in die belastete Mischungsschicht eingemischt wird (Entrainment).

Im angesprochenen Artikel wurde das Modell anhand von Schadstoffmessungen, die am Talboden bei Schwaz stattgefunden haben, verifiziert. Außerdem wurden die Untersuchungen auf NO_x beschränkt, es folgte keine Differenzierung in die Komponenten NO und NO_2 . Die Gründe dieser Einschränkung liegen darin, dass die Emissionen in NO_x berechnet waren und auf den Einbau von photochemischen Prozessen verzichtet wurde.

Die maßgeblichen mathematischen Beschreibungen werden daher mittels Gleichungen 9.1 bis 9.5 beschrieben. Der erste grundlegende Zusammenhang ist anhand von Gleichung 9.1 ersichtlich. In den folgenden Absätzen folgt nun eine genauere Beschreibung dieser Modellgleichungen, durch die die Schadstoffkonzentration an einem definierten Punkt modelliert werden kann.

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{S_v}{Q_a} + E \quad (9.1)$$

Die Variable c_s beschreibt in Gleichung 9.1 dabei die zeitliche Änderung von NO_x an der Messstelle Schwaz am Talboden. Die Eingangsparameter sind einerseits die NO_x -Emission (S_v), berechnet aus den Verkehrszahlen, und die durch die Mischungsschichthöhe definierte Querschnittsfläche des Tales (Q_a) zwischen Kellerjoch und Hochnissl. Die Variable E ist die Einmischrate von weniger belasteter Luft aus dem Bereich oberhalb der Mischungsschicht.

Der Beitrag der Einmischrate ist daher ein variabler Parameter, der von der Veränderung der Mischungsschichthöhe abhängt. Damit eine Einmischung stattfinden kann, muss die Mischungsschicht steigen, die Ableitung derer nach der Zeit ist positiv (Gleichung 9.2). Die zeitliche Ableitung der Schadstoffkonzentration ist daher in der Modellbeschreibung ausschließlich abhängig von der Entwicklung der Mischungsschichthöhe und von den Emissionsraten an der A12.

$$\frac{\partial Q_a}{\partial t} > 0 \quad (9.2)$$

Ist die Bedingung in Gleichung 9.2 erfüllt, geht die Einmischrate E mittels Gleichung 9.3 in die Gleichung 9.1 ein. Da aufgrund von fehlenden Messungen die Konzentration von NO_x oberhalb der Mischungsschicht nur grob abgeschätzt werden kann, wurde die dafür stehende Variable c_b (Hintergrundkonzentration) mit $5 \mu\text{gm}^{-3}$ festgelegt. Mit dieser Annahme konnten in der betreffenden Arbeit sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

$$E = \frac{c_b - c_s}{Q_a} \cdot \frac{\partial Q_a}{\partial t} \quad (9.3)$$

Bleibt die Höhe der Mischungsschicht gleich oder sinkt diese sogar, wird der Parameter der Einmischung auf den Wert 0 gesetzt (Gleichung 9.4 und 9.5). Es erfolgt in diesem Fall keine Einmischung von vergleichsweise gering belasteter Luft aus höheren Schichten, es entfällt folgend in Gleichung 9.1 der Parameter E gänzlich.

$$\frac{\partial Q_a}{\partial t} \leq 0 \quad (9.4)$$

$$E = 0 \quad (9.5)$$

Die Berechnungen erfolgten mit Daten, die während einer intensiven Messperiode von 19.01.06 bis 26.01.06 gewonnen wurden. Primär gingen in die Analysen die Mischungsschichthöhen ein, die mittels eines Sodars, das am Talboden platziert war, gemessen wurden (näheres zum Funktionsprinzip eines Sodars sind in Abschnitt 3.3.5 zu finden).

Außerdem wurden im Artikel von Heimann et al. (2009) zwei alternative Methoden getestet. Die erste bestand darin, die gemessenen Mischungsschichthöhen anhand von pseudovertikalen Temperaturgradienten zwischen Schwaz und Arzberg mittels linearer Regressionen anzupassen (im Artikel als "Fitting A" bezeichnet). Das zweite Anpassungsverfahren basierte auf einer multiplen Regression mit den Windgeschwindigkeiten und ebenfalls den Temperaturgradienten zwischen Schwaz und Arzberg ("Fitting B"). Bei Anwendung dieser Verfahren zeigte sich, dass die beiden Anpassungsverfahren jeweils zu einer Reduktion der Variabilität der Mischungsschichthöhe führten.

Jede Modellbeschreibung sollte zudem zur Überprüfung der modellierten Ergebnisse mit gemessenen Daten verifiziert werden. Zu diesem Zweck wurden die durch die verschiedenen Methoden berechneten Werte von NO_x mit den gemessenen Daten am Standort Schwaz verglichen. Bei Benützung der gemessenen Mischungsschichthöhen des Sodars zeigte sich ein linearer Korrelationskoeffizient von 0.48. Durch die Einführung der beiden Anpassungsmethoden verbesserte sich dieser Koeffizient auf Werte von 0.62 (Fitting A) und 0.72 (Fitting B). Generell stellte sich auch heraus, dass sich die Qualität der Berechnungen bei größeren Betrachtungszeiträumen verbesserte.

In der Zusammenfassung wird jedoch erwähnt, dass die sehr kurze untersuchte 7-Tage Periode nicht die gesamten klimatologischen Schwankungen abdecken kann. Jedoch gab es innerhalb dieser Periode durchaus Variabilitäten in den Windgeschwindigkeiten, der Stabilität und der Mischungsschichthöhe. Außerdem wird abschließend angemerkt, dass die Mischungsschichthöhe stark korreliert ist mit dem pseudovertikalen Temperaturgradienten zwischen 540 m und 720 m.

9.2 Datensatz und Initialisierung

Einige Spezialmessungen, die im Winter 2005/06 im Talquerschnitt stattgefunden haben, konnten im Winter 2007/08 nicht in dem Ausmaß durchgeführt werden. Daher musste die Modellanwendung im Vergleich zum Artikel von Heimann et al. (2009) angepasst werden. Unter anderem fanden im Winter 2007/08 im Untersuchungsgebiet von Schwaz keine Messungen von Schadstoffkonzentrationen am Standort Schwaz statt, außerdem wurden keine meteorologischen Daten in Arzberg ermittelt. Darüber hinaus fehlten Messungen eines Sodars im Winter 2007/08. Daher musste die Konfiguration der Modells im Vergleich zu den Untersuchungen von Heimann et al. (2009) abgeändert werden.

Als Ersatz für die Schadstoffmessungen am Standort Schwaz wurden die Daten der Luftgütestation an der Autobahn A12 verwendet, da nur diese für die gesamte Periode ohne Lücken vorhanden waren. Außerdem wurde auf die eigenständige Berechnung der Emissionswerte von NO_x an der Autobahn verzichtet, stattdessen sind die Berechnungen des Landes Tirol in die Analysen eingegangen.

Wie vorher schon erwähnt, kommen Heimann et al. (2009) zur Schlussfolgerung, dass der vertikale Temperaturgradient ein sehr gutes Maß zur Beurteilung der Austauschverhältnisse darstellt. Aus diesem Grund und den Erkenntnissen der vorherigen Analysen, wurde der pseudovertikale Temperaturgradient des Kellerjochhanges als meteorologischer Eingangsparameter ausgewählt.

Alle anderen Randbedingungen, insbesondere die mathematischen Zusammenhänge, wurden analog zu den Gleichungen 9.1 bis 9.5 ohne Abänderungen eingearbeitet. Jedoch ergibt sich durch den veränderten Standort der Vergleichsstation (Luftgütestation anstatt Standort Schwaz) die Konsequenz, dass aufgrund des autobahnnahe Standorts der Luftgütestation die Emissionswerte entsprechend skaliert werden mussten, um der Quellfunktion der Autobahn A12 Rechnung zu tragen. In unmittelbarer Nähe einer Straße sind natürlich die Konzentrationen meist höher als im Umland, deswegen musste auch die Modellanwendung, die für einen Referenzpunkt am Talboden erstellt worden war, entsprechend abgeändert werden.

Ein weiteres Ziel dieser Untersuchungen bestand auch darin, dass keine isolierten Perioden betrachtet wurden, sondern die gesamten beiden Dreimonatsperioden modelliert werden sollten. Damit besteht natürlich die Schwierigkeit, dass das mögliche Spektrum um einiges weitläufiger ist als bei Analysen von kurzen Perioden, die überschaubare Werte von Schadstoffen und meteorologischen Parametern beinhalten. In der Konsequenz mussten jedoch Kompromisse in der genauen zeitlichen Auflösung gemacht werden.

Neben der Emission geht wie beschrieben auch die aktuelle Mischungsschichthöhe ein. Jedoch waren keine durchgehenden Daten der Mischungsschichthöhe aus den Ceilometerdaten während beider Winterperioden vorhanden. Aus diesem Grund musste ein anderes Verfahren zur Bestimmung der Mischungsschichthöhe gefunden werden. Diverse Modellierungen der MLH mittels Schnittpunkten von Temperaturgradienten (wie in Wotawa et al. 2000 verwendet) führten jedoch aufgrund der winterlichen, meist stabilen Schichtung der Atmosphäre nicht zum Erfolg. Auch eine Klassifizierung der MLH über die Analyse der Radiosondendaten von Innsbruck Flughafen war nicht sehr brauchbar, da die Verhältnisse zwischen Schwaz und Innsbruck oftmals unterschiedlich sind.

Schlussendlich brachte ein anderes Verfahren ein vertretbares Ergebnis. Dabei stützen sich die Resultate ausschließlich auf die gemessenen Temperaturgradienten am Schattenhang und auf Messungen des Sodars während des Jänners 2006. Bei diesem Verfahren wurden die vollständigen Messungen der Mischungsschichthöhen im Jänner 2006 den gemessenen pseudovertikalen Temperaturgradienten zwischen Talboden und Kellerjochsensor Nr. 8 gegenübergestellt und in einem regressionsartigen Vergleichsbild dargestellt. Um keine Probleme mit negativen Vorzeichen zu bekommen, sind alle Temperaturwerte um $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht worden.

In diese graphische Verteilung wurde nun ein Polynom hineingelegt, mit dem die Mischungsschichthöhe und die pseudovertikalen Temperaturgradienten in einen empirischen Zusammenhang gebracht werden konnten. Niedere Temperaturgradienten gehen erwartungsgemäß mit höheren Mischungsschichthöhen überein, wohingegen sehr stabile Verhältnisse niedere Mischungsschichthöhen verursachen und somit die Austauschverhältnisse verschlechtern (Abbildung 9.1).

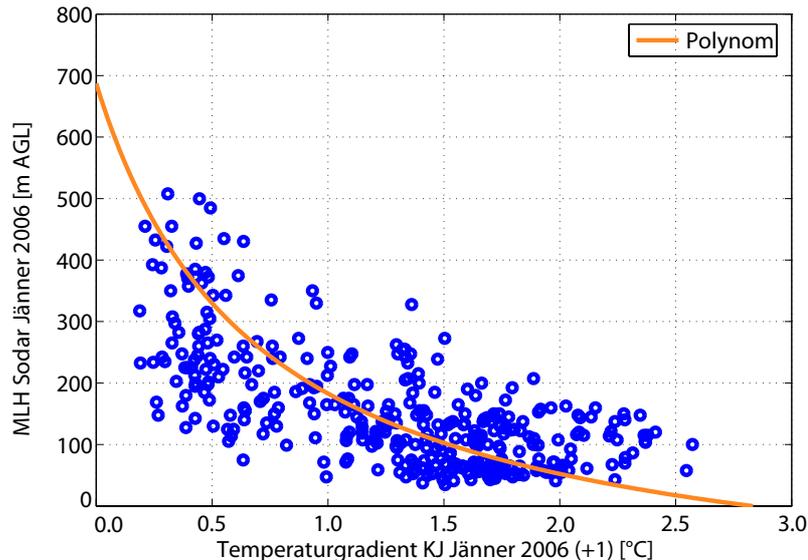


Abbildung 9.1: Gegenüberstellung von gemessenen Mischungsschichthöhen eines Sodars zu den gemessenen vertikalen Temperaturgradienten am Kellerjochhang während des gesamten Jänners 2006. Zur Vermeidung von mathematischen Schwierigkeiten wurden die Temperaturwerte um jeweils $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht. In diese Punktwolke ist ein berechnetes Polynom, das im Text beschrieben wird, hineingelegt worden.

Als Mittelungszeit wurden zwei Stunden gewählt, der Analyse standen demnach 744 Datenpunkte zur Verfügung, die durchaus einen breiten meteorologischen Bereich abdecken. Die Gleichung 9.6 beschreibt den mathematischen Zusammenhang zwischen Temperaturgradient und Mischungsschichthöhe.

$$MLH = 600 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^{-1} - 170 \quad (9.6)$$

Der Ausgangsparameter Mischungsschichthöhe muss nun mittels Plausibilitätsanalysen ausführlich überprüft werden. Diese Analysen sind im folgenden Ergebnisteil zu finden.

9.3 Ergebnisse Modellierung Mischungsschichthöhe

Der nun folgende Ergebnisteil beschäftigt sich mit den berechneten Mischungsschichthöhen und den daraus folgenden, modellierten Schadstoffkonzentrationen an NO_x . Außerdem wird auf die nötigen Korrekturen eingegangen werden.

Für die Modellierung der Mischungsschichthöhen für Jänner 2006 (Abbildung 9.1) wurden plausible Grenzwerte eingezogen. Die unterste Grenze wurde mit 50 m über Grund festgelegt, die obere mit 700 m. Die obere Grenze wurde jedoch nie überschritten, die untere hingegen wenige Male, jedoch meist nur in sehr geringem Ausmaß. Um starke Schwankungen und Variabilitäten der modellierten Mischungsschichthöhe zu verhindern, wurde außerdem über die Halbstundenwerte eine gleitende Mittelung von neun Werten gelegt.

Der graphische Verlauf der Mischungsschichthöhe für die Winterperiode 2005/06 (Abbildung 9.2 (a)) zeigt während des Dezembers sehr variable Werte. Zu Beginn des Monats war die MLH tendenziell in höheren Niveaus angesiedelt, es folgte ein kurzfristiges Absinken zur Mitte des Dezembers.

Anschließend pendelte sie sich auf relativ hohem Niveau wieder ein. Schließlich fiel die Mischungsschichthöhe Anfang Jänner 2006 aufgrund der ersten Hochdruckperiode 2005/06 stark ab. Mitte des Monats lag sie jedoch während einer kurze Periode in Folge von Fronten teilweise wieder bis zu 450 m über Grund.

Die mit 25. Jänner beginnende zweite Hochdruckperiode endete erst im Februar und zeigte dieselben Auswirkungen auf die Mischungsschichthöhe wie die erste Hochdruckphase. Ähnlich zum Dezember pendelte sich die durchmischte Schicht anschließend wieder auf höherem Niveau ein.

Der allgemeine Verlauf scheint sehr plausibel, die Werte stimmen mit den damals herrschenden atmosphärischen Rahmenbedingungen sehr gut überein. Ein ergänzender Vergleich der Mischungsschichthöhen während der ersten Hochdruckperiode mit den Analysen der Ceilometerauswertungen in Abschnitt 6.3 zeigen ebenfalls sehr gute Übereinstimmungen.

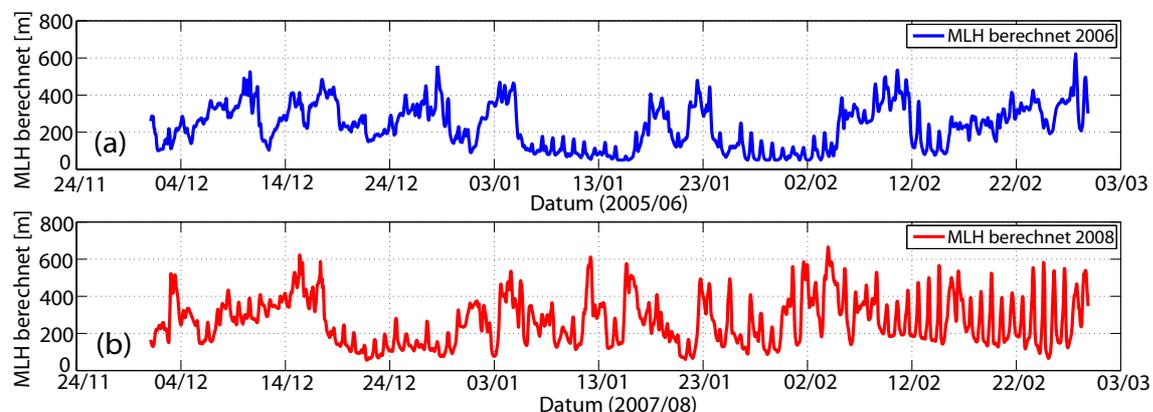


Abbildung 9.2: Modellierte Mischungsschichthöhen für die Winterperioden - 2005/06 in blau (a) und 2007/08 in der Farbe rot (b).

Der Winter 2007/08 hatte einen gänzlich anderen Charakter als sein Vergleichswinter 2005/06. Nach einer Periode mit ansteigenden Mischungsschichthöhen erfolgt ein starker Abfall Mitte Dezember 2007. Die folgende Hochdruckperiode verursachte abermals sehr niedere Mischungsschichthöhen, jedoch waren diese nicht so tief wie im Jänner 2006.

Außerdem gab es größere tägliche Schwankungsbreiten, die auch im Vergleich mit den aus den Ceilometerdaten abgeleiteten Werten sehr gut übereinstimmen. Aufgrund von vielen Frontereignissen im Jänner 2008 war eine sehr gute Durchmischung der Talatmosphäre mit teilweise sehr hohen Mischungsschichthöhen gegeben.

Ein interessanter Zeitraum beginnt jedoch Mitte Februar 2008, zu diesem Zeitpunkt begann die zweite Periode mit Hochdruckeinfluss im Winter 2007/08. Die Auswirkungen sind jedoch konträr zu den vergleichbaren Perioden. Es gab sehr große Tagesgänge mit Maxima in den Mittagsstunden. An diesem Beispiel ist sehr gut zu sehen, dass das Fehlen von Schnee erheblichen Einfluss auf die Mischungsschichthöhe ausübte.

Es kann damit die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die berechneten Mischungsschichthöhen durchaus plausible Werte lieferten, die im Einklang mit den äußeren Einflüssen stehen. Es ist daher zulässig, diese als Eingangsparameter in das Box-Modell zu verwenden.

9.4 Ergebnisse Modellierung Schadstoffkonzentrationen

Die berechneten Emissionsraten und Mischungsschichthöhen gingen nun in die Modellanwendung nach Heimann et al. (2009) als alleinige Eingangsparameter ein. Sowohl die Werte der modellierten NO_x -Konzentration als auch die gemessenen Daten sind auf Halbstundenbasis (dargestellt anhand eines neun Werte umfassenden gleitenden Mittels) in Abbildung 9.3 gezeichnet.

Es mussten nur zu drei abgegrenzten Zeiträumen Korrekturen vorgenommen werden. Diese betreffen vor allem Perioden mit Hochdruckeinfluss mit daraus folgenden sehr niederen Mischungsschichten. Das Modell überschätzte dabei die Schadstoffkonzentrationen, daher erfolgte eine Skalierung der NO_x -Werte nach unten. Alle Werte, die über $600 \mu\text{g m}^{-3}$ lagen, wurden zwischen -11 % und -13 % (je nach Konzentrationshöhe) korrigiert. Ansonsten war das Credo, keine weitere Beeinflussung des Modells durchzuführen.

Die Kurven der modellierten und gemessenen Schadstoffbelastungen für den Winter 2005/06 sind in Abbildung 9.3 zu finden. Es gibt eine gute Übereinstimmung der Werte, auch die Übergänge zu den hochbelasteten Hochdruckperioden, als auch deren Zusammenbrüche sind sehr gut durch das Modell erfasst.

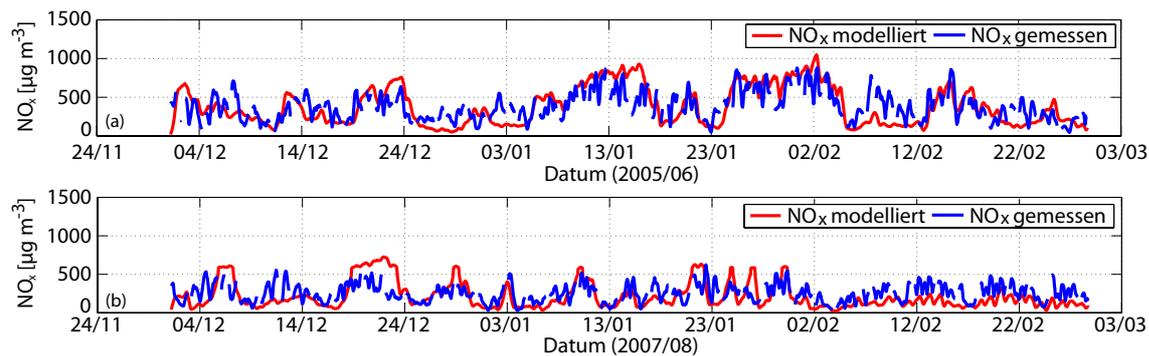


Abbildung 9.3: Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Konzentrationen von NO_x für den Standort Luftgütemessstelle Vomp/Raststätte. Abbildung (a) zeigt die Ergebnisse für 2005/06 und (b) für 2007/08.

Generell fällt auf, dass die modellierte Kurve durchaus den zur Verifikation herangezogenen Daten folgt. Eine besondere Problemstelle ist jedoch eine Zeitspanne ab 10.02.06 mit zu geringen modellierten Belastungen. Während dieser Zeit sind anhaltende Niederschläge in Form von Schnee registriert worden, die zu einer besseren Durchmischung der Talatmosphäre führten. In der Folge wurden geringe vertikale Temperaturgradienten gemessen und demzufolge die Mischungsschichthöhen zu diesem Zeitpunkt vermutlich überschätzt.

Auch für den Winter 2007/08 ist die Verifikation der modellierten Werte durchaus als gut zu bezeichnen. Auch die veränderte Emissionssituation ab den Weihnachtstagen ist gut aufgelöst worden. Jedoch kommt die Modellanwendung nicht sehr gut mit täglichen, sehr starken Variabilitäten der Mischungsschichthöhen zurecht. Dies zeigt sich während der zweiten Hochdruckphase im Februar 2008.

Den starken Variationen der Mischungsschichthöhe, verursacht durch den erhöhten Energieeintrag, konnte die Simulation nicht in dieser Schnelligkeit folgen. Daher unterschätzte das Modell die Schadstoffkonzentrationen, der Einfluss des Parameters des Entrainments von wenig belasteter Luft wurde zu dominant. Der angenommene Wert der Hintergrundbelastung von nur $5 \mu\text{g m}^{-3}$ hat sich damit bei hochreichenden, gut durchmischten Grenzschichten als zu gering herausgestellt.

Durch die erhöhte Turbulenz können in höher liegende Schichten viel mehr Schadstoffe antransportiert werden als bei stabilen, winterlichen und austauscharmen Verhältnissen. Demzufolge können in der Realität bei stärkeren konvektiven Situationen am nächsten Tag höher belastete Luftmassen in die Mischungsschicht eingemischt werden. Genau diesen Effekt kann das Modell aber aufgrund der Verwendung einer Konstanten als Hintergrundkonzentration (hier $5 \mu\text{g m}^{-3}$) nicht auflösen.

9.5 Schlussfolgerungen Modellanwendung

Das vorgestellte einfache Modell lieferte eine allgemein brauchbare Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Temperaturgradienten, Mischungsschichthöhe und Schadstoffbelastung. Jedoch ergeben sich bei erhöhten Stabilitäten bzw. sehr niederen Mischungsschichthöhen Überschätzungen der modellierten Schadstoffkonzentrationen.

Dies könnte möglicherweise durch den Eingang von Strömungslagenklassifikationen unterbunden werden. Ein weiteres Problem stellt die parametrisierte Hintergrundbelastung dar, die sich bei erhöhten konvektiven Einflüssen als zu gering erwiesen hat. Eine weitere Verbesserung könnte unter Umständen durch den Eingang der Stabilitäten auf der nördlichen Talseite, in Kombination mit der Schattenseite, erreicht werden.

Ideal wäre natürlich eine permanente Detektion der Mischungsschichthöhe, damit könnten ungenauere Parametrisierungen der MLH verhindert werden. Dies hätte sicher einen positiven Einfluss auf die Anwendung des Modells.

Außerdem könnten bei Vorhandensein einer weiteren Messstelle in einiger Entfernung zur Autobahn die Untersuchungen von Heimann et al. (2009) fortgeführt werden. Weiters wäre eine Berücksichtigung des Strahlungshaushaltes wünschenswert, damit könnten vermutlich besonders die Modellergebnisse bei strahlungsverursachten hohen Mischungsschichthöhen verbessert werden.

Kapitel 10

Schlussfolgerungen und Ausblick

Im folgenden, abschließenden Kapitel, werden die in den vorherigen Abschnitten ausführlich behandelten Themenkomplexe zusammengefasst und in einen übersichtlichen Zusammenhang gebracht. Darüber hinaus sind die unterschiedlichen Einflussgrößen (Emission, Immission und meteorologische Komponenten) so miteinander kombiniert, dass Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen dargelegt werden können. Außerdem folgt ein auf den Untersuchungsergebnissen basierender kurzer Ausblick.

10.1 Schlussfolgerungen

Grundlage dieser Arbeit sind Daten von Schadstoffmessungen und Aufzeichnungen von meteorologischen Parametern, die während zwei Untersuchungszeiträumen im Winter 2005/06 bzw. 2007/08 im Raum Schwaz/Vomp im Tiroler Unterinntal ermittelt wurden. Ergänzt wurden diese von Messungen des Landes Tirol und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.

Insgesamt gingen damit in die Arbeit Daten von fünf automatischen Wetterstationen, Informationen einer permanenten Luftgütemessstelle und ein Passivsammlernetzwerk ein. Darüber hinaus dienten ein Ceilometer und ein Sodar zur Detektierung der Mischungsschichthöhe und ein DOAS (Differentielles optisches Absorptionsspektrometer) zur Untersuchung von kleinräumigen Unterschieden der Schadstoffkonzentrationen. Ein permanent eingerichtetes pseudovertikales Temperaturprofil lieferte Informationen für Stabilitätsanalysen.

Ausgangspunkt der Arbeit war die Beobachtung von stark unterschiedlichen Schadstoffimmissionen während der beiden Winter. Der Winter 2005/06 wies sehr hohe Messwerte auf, wohingegen im Winter 2007/08 generell viel geringere Konzentrationen gemessen wurden. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich daher auf die Untersuchung der Einflussfaktoren, die hinter dieser Entwicklung stehen.

Die berechneten Emissionsraten waren während beider Winterperioden sowohl in zeitli-

cher als auch in quantitativer Hinsicht beinahe kongruent. Daher kann dieser Parameter als Konstante betrachtet werden und es müssen sich andere Einflussgrößen auf die unterschiedlichen Immissionsraten an der Luftgütemessstation Vomp/Raststätte-A12 ausgewirkt haben.

Erste Untersuchungen betrafen den synoptischen Charakter (Wetterlagen) während den beiden Winterperioden. Entsprechende Analysen haben gezeigt, dass die Häufigkeitsverteilungen der verschiedenen Strömungsklassen zwar sehr ähnlich waren, aber die zeitlichen Muster Unterschiede aufwiesen. Diese Unterschiede lagen vor allem darin, dass südliche Anströmungen an die Alpen, die potentiell Südföhn verursachen können, während 2007/08 häufiger waren. Außerdem unterschied sich die zeitliche Lage der Hochdruckperioden.

Der erste ausschlaggebende Faktor lag demnach in der Kombination der synoptischen Konfigurationen und der Emissionsraten. Fanden Hochdruckperioden und hohe Emissionsraten zum gleichen Zeitpunkt statt, folgten daraus hohe Immissionskonzentrationen. Eine solche Konstellation kam besonders häufig während des Winters 2005/06 vor, insbesondere im Jänner 2006, während dem zwei Hochdruckperioden mit hohen Emissionswerten zusammentrafen. Der gegensätzliche Effekt trat im Winter 2007/08 auf. Es gab zwar damals ebenfalls Hochdruckperioden, jedoch hatten diese gänzlich andere Auswirkungen.

Während der von Hochdruckeinfluss gekennzeichneten Weihnachtszeit 2007/08 waren die Emissionsraten im Vergleich zu normalen Wochen- bzw. Arbeitstagen in einem solchen Maße verringert, dass die Immissionen nicht so stark anstiegen wie im Jänner 2006. Die zweite im Winter 2007/08 vorgekommene Hochdruckphase (Februar 2008) war von durchschnittlichen Emissionsraten geprägt, allerdings waren die gemessenen Immissionen auch nicht wesentlich höher. Es muss daher noch ein weiterer Parameter Einfluss ausgeübt haben.

Dieser zweite entscheidende Faktor ist in der Bodenbeschaffenheit begründet. Der schneebedeckte Winter 2005/06 war von einer sehr geringen positiven kurzwelligen Strahlungsbilanz gekennzeichnet. Zurückzuführen ist dies auf die viel höhere Albedo aufgrund der durchgehend vorhandenen Schneeoberfläche. Es stand dem Boden-Atmosphäre-System wenig Energie zur Verfügung um die bodennahen Luftschichten zu erwärmen. Als Konsequenz daraus war auch jene Schicht, in der eine Verteilung von Luftschadstoffen möglich ist, stark in ihrer vertikalen Ausdehnung begrenzt. Diese tendenziell flache Mischungsschicht trug damit in Verbindung mit einer generell stabilen Atmosphäre im Winter 2005/06 zu einer höheren Belastung mit Luftschadstoffen bei.

Die schneearme Bodenoberfläche mit geringeren Albedowerten im Winter 2007/08 hatte genau entgegengesetzte Auswirkungen. Dem Boden-Atmosphäre-System stand beispielsweise in den Mittagsstunden während 2007/08 mehr als die doppelte Energiemenge als

im Winter 2005/06 zur Verfügung. Unter Berücksichtigung der Differenzierung in die turbulenten Flüsse und den Bodenwärmestrom (siehe Karner 2009) war das Energieangebot zum Aufbau der Mischungsschicht um einiges höher als im Winter 2005/06. Die Atmosphäre war weniger stabil geschichtet und die Mischungsschicht entsprechend mächtiger.

Somit stand während des schneearmen Winters viel mehr Luftvolumen zur Verdünnung der Schadstoffe in den untersten Schichten zur Verfügung. Außerdem muss auch angemerkt werden, dass aufgrund des Plateaus Vomperberg der Talquerschnitt bei hohen Mischungsschichthöhen überproportional wächst.

Niederschlagsereignisse haben ebenfalls differenzierte Auswirkungen. Länger anhaltende Niederschläge haben mitunter bessere Auswascheigenschaften als kurze, mengenmäßig aber ähnliche Niederschläge. Kommen solche Niederschläge noch in Kombination mit höheren Windgeschwindigkeiten vor, sind die erniedrigenden Auswirkungen auf die Schadstoffbelastungen noch besser. Ein starkes Schneefallereignis am 18.01.06 hatte hingegen keine großen Auswirkungen auf die Luftbelastung. Diese Ausnahmeerscheinung konnte jedoch auf Grund unzureichender Daten nicht näher untersucht werden.

In früheren Studien wurden Asymmetrien der Schadstoffbelastung im Talquerschnitt gefunden (Harnisch et al. 2009). Diese Untersuchungen waren jedoch auf einen Winter begrenzt. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass auch in einem konträren Winter der Sonnenhang meist mit höheren Schadstoffkonzentrationen belastet ist als der Schattengang. Analysen der Hangtemperaturprofile haben ergeben, dass an der Sonnenseite im Vergleich zum Schattengang geringere vertikale Stabilitäten auftreten und damit dort eine entsprechend stärkere Entwicklung von Hangwindssystemen stattfinden kann.

Auch hinsichtlich der kleinräumigen Verteilung von Schadstoffen in unmittelbarer Nähe zur Autobahn konnten Unterschiede zwischen beiden Wintern festgestellt werden. Die Belastung an den beiden Seiten der Autobahn ist generell stark beeinflusst von den dort herrschenden Windsystemen. So ist die nördliche Seite der Autobahn bei Hangaufwinden stärkeren Belastungen ausgesetzt als die gegenüberliegende Seite. Der genau gegenteilige Effekt tritt bei Hangabwinden während der Nacht auf, zu diesen Zeitpunkten ist die südliche Autobahnseite höher belastet. Gurgiser (2009) kommt in seiner Arbeit ebenfalls auf ähnliche Ergebnisse.

Der starke Einfluss der Mischungsschicht auf die Schadstoffbelastung ist auch bei Anwendung eines einfachen Box-Modells erkenntlich. Die erforderliche Mischungsschichthöhe konnte dabei mittels einer Regressionsanalyse mit pseudovertikalen Temperaturgradienten modelliert werden. Schlussendlich konnte der Konzentrationsverlauf von NO_x an der Luftgütemessstelle Vomp/Raststätte mittels des angesprochenen Modells gut wiedergegeben werden. Jedoch waren während Hochdruckperioden Korrekturen erforderlich.

10.2 Ausblick

Die Mischungsschichthöhe ist ein entscheidender Faktor in der Beurteilung der talnahen Atmosphärenschichten. Deshalb sollte bei möglichen weiterführenden Untersuchungen besonderes Augenmerk auf die Messung und Auswertung derer über längere Zeiträume gelegt werden. Dies würde neue Perspektiven in der Analyse der Schadstoffmissionen ermöglichen.

Auch im Hinblick auf einen zusätzlichen Informationsgewinn über die Talatmosphäre wäre es wünschenswert, die auf der Schattenseite (Kellerjoch) bereits eingerichteten Hangtemperaturmessungen auf die Sonnenseite auszudehnen. Allgemein wäre es in diesem Zusammenhang jedoch wichtig, auf Strahlungsschutz und Ventilation Wert zu legen. Zur Steigerung der Datenqualität sollte eine ideale Standortauswahl erfolgen bzw. Vergleichsmessungen stattfinden.

In Ergänzung zu den Temperatursensoren wäre ein einfach zu betreibendes Messnetz an Passivsammlern im Talquerschnitt ein Gewinn. Damit könnten die unterschiedlichen Luftbelastungen über längere Zeit und relativ kostengünstig charakterisiert werden. Zudem wäre es interessant ein solches auch versuchsweise im Sommer zu installieren, um die Unterschiede zu den Winterperioden analysieren zu können.

In dieser Arbeit mussten zur Niederschlagsanalyse Daten der Station Jenbach herangezogen werden. Deren Lage außerhalb des Untersuchungsgebiets bringt jedoch Unsicherheiten mit sich. Darum wäre es ideal, auch die Niederschlagssummen im Raum Schwaz zumindest täglich summiert zu ermitteln.

Es hat sich bei den Analysen herausgestellt, dass sich die Kombination von hoher Emission, Schneebedeckung und Hochdruck besonders nachteilig auf die Schadstoffbelastung auswirkt. Diese Kombination tritt aber meist zeitlich begrenzt und nicht in jedem Winter auf. Außerdem ist der Parameter der Emission die einzige Größe, die direkt von den Menschen beeinflusst werden kann. Bereits laufende Maßnahmen zielen in diese Richtung ab (Verkehrsbeschränkungen), wobei auch Stabilitätseffekte berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang regen die vorliegenden Ergebnisse an, die Verbesserungsmöglichkeit entsprechender Algorithmen durch Berücksichtigung von Oberflächeneffekten (Schneelage) näher zu untersuchen.

Anhang A

Zusatzinformationen

A.1 Posterzusammenfassung EGU 2009

Einige essentiellen Teile dieser Diplomarbeit wurden bereits mittels eines Posters zusammengefasst. Darin enthalten sind vor allem Graphiken zu den Emissionen, den Immissionen, der Stabilität und der Wetterlage. Außerdem sind auch die Abbildungen zu den räumlich differenzierten Analysen von NO_2 und den dazugehörigen Temperaturgradienten dort zu finden.

Präsentiert wurde dieses Poster auf der Generalversammlung der Europäischen Union für Geowissenschaften von 19.04. bis 24.04.08 in Wien (Abstract Nr. 11348). Die Beschreibungen sind außerdem in englischer Sprache gehalten, es dient daher auch als Informationsquelle für englischsprachige Interessenten. Die darin befindlichen Abbildungen sind in größerer Ausführung in den vorderen Kapiteln zu finden.

Meteorology and air pollution in an alpine Valley during two strikingly different winter periods

Florian Bilgeri⁽¹⁾, Klaus Schäfer⁽²⁾, Friedrich Obleitner⁽¹⁾ and Stefan Emeis⁽²⁾

⁽¹⁾Institute of Meteorology and Geophysics, Innsbruck University, Austria *mail: florian.bilgeri@student.uibk.ac.at ⁽²⁾Institute for Meteorology and Climate Research, Forschungszentrum Karlsruhe, Garmisch-Partenkirchen, Germany



IMGI

Introduction

During winter essentially, Alpine valleys are frequently prone to enhanced air pollution inducing serious impairments of human health and of sustainable development in these regions. This is mainly due to particular topographic and meteorological effects. The measurements of meteorological parameters and air pollution components were performed during two campaigns covering the full winters 2005/06 and 2007/08. The instruments were placed in a cross section at the valley bottom and at different elevations in the lower Inn valley (Tyrol) at nearly the same places during both periods. Meteorological analysis was mainly based on data from routine synoptic stations, non-permanent automatic weather stations and slope-temperature sensors at various heights, which were supported by mixing-height data derived from ceilometer at the valley bottom. Air pollution analysis considered NO and NO₂ and is based on the data from a routine monitoring station of the Tyrolean government and a passive sampler network, distributed in a valley cross section.



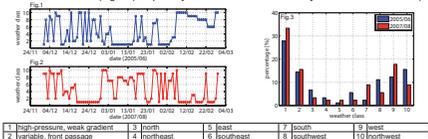
Climatology

The climatological analysis of the data from Innsbruck shows, that the two investigated periods were completely different regarding the meteorological parameters. Compared with the climatological long-term means (1971-2000), the winter 2005/06 (from December to the end of February) was 1.5°C colder, the number of days without a temperature > 0.0°C was higher (+16.4) and there was a long-lasting snow-cover. The sum of the precipitation slightly exceeded the mean value. In contrast, the winter 2007/08, with only 8 snowdays and 4 ice-days, was about 1.8°C warmer than the mean and it was too dry (-57.4 mm).

parameter	period	Dec.	Jan.	Feb.	mean/sum	difference
temperature	1971-2000	-1.0 °C	-1.7 °C	+0.4 °C	-0.8 °C	-
	2005/06	-2.5 °C	-3.2 °C	-1.6 °C	-2.1 °C	-1.3 °C
precipitation	1971-2000	11.1 mm	11.4 mm	11.8 mm	11.5 mm	+1.8 mm
	2005/06	83.0 mm	42.0 mm	37.0 mm	54.0 mm	+5.6 mm
days with >1 cm snowcover	1971-2000	16.9	20.3	14.8	17.3	+36.4
	2005/06	29	31	26	28	+53.4

Weather type classification

The investigation of the weather types after the scheme of Steinacker (1991) exhibits, that the relative distribution of the various weather types was nearly the same during both periods, except there were more westerly and southerly flows in 2007/08 (Fig. 3). Two long lasting high pressure periods in Jan.06 contrast one in Dec.07 and one in Feb.08 (Fig. 12). Especially Jan.08 was characterized by various flow directions (Fig. 2).

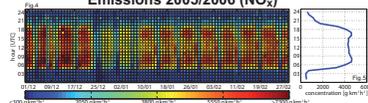


Days with threshold exceedances

There were more days with threshold exceedances of NO₂ (half hourly mean > 200 µg m⁻³) during the period 2005/06 (24 days) compared to 2007/08 (2 days). Also the number of days with a threshold exceedance of fine dust (daily mean > 50 µg m⁻³) was in winter 2005/06 much higher than in the 2007/08. The threshold of NO (daily mean > 500 µg m⁻³, half hourly mean > 1000 µg m⁻³) was only exceeded in winter 2005/06.

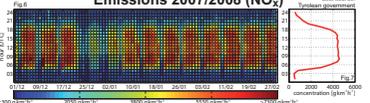
parameter	Dec.05	Jan.06	Feb.06	Dec.07	Jan.08	Feb.08
NO ₂ : threshold NO ₂	0	18	0	0	1	0
NO: threshold NO	0	6	0	0	0	0
PM ₁₀ : threshold PM ₁₀	10	23	13	0	0	0

Emissions 2005/2006 (NO_x)



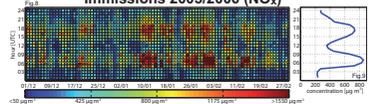
The emission data, which were calculated from permanent traffic counts, show a characteristic daily and weekly cycle (Fig. 4-7). The emission rates are high from Monday to Saturday afternoon with two small peaks at each day, one in the morning and one in the late afternoon. On weekends, holidays (especially during Christmas holidays) and during the early morning the emission rates are smaller because of less traffic and various driving bans for trucks. In summary, there is no big difference between the two investigated periods.

Emissions 2007/2008 (NO_x)

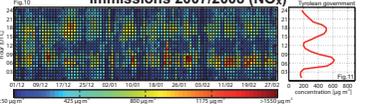


In contrast to the emission-analysis, the measured immissions of nitrogen oxide (NO_x) indicates a difference between the winters 2005/06 and 2007/08 (Fig. 8-11). Especially in Jan.06 high concentrations of NO_x appeared, which were associated to high pressure. In general, the measured immission rates are less in 2007/08 as compared to 2005/06. The daily variations, with one peak in the morning and one in the afternoon, reflect the course of the emission rates, chemical reactions and partly on transports of NO_x.

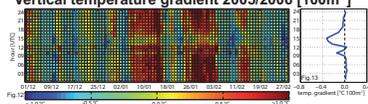
Immissions 2005/2006 (NO_x)



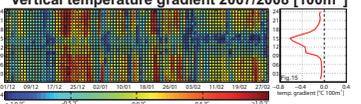
Immissions 2007/2008 (NO_x)



Vertical temperature gradient 2005/2006 [100m⁻¹]

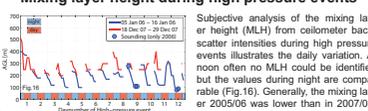


Vertical temperature gradient 2007/2008 [100m⁻¹]



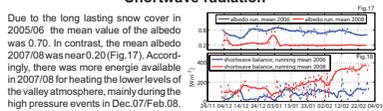
The link between the emissions and the immissions is may be described by the meteorological parameters, especially by the stability of the valley atmosphere. The pseudo-vertical temperature gradients at the southern slope (Fig. 12-15) show very stable periods in Jan.06, congruent with the high pressure events. The stable period in Dec.07 was weaker than in 2006, additionally there were only separated days with high stability in 2007/08. The mean daily variations show the more stable valley atmosphere in 2005/06 as well (Fig. 13/15).

Mixing layer height during high pressure events



Subjective analysis of the mixing layer height (MLH) from ceilometer backscatter intensities during high pressure events illustrates the daily variation. At noon often no MLH can be identified but the values during night are comparable (Fig. 16). Generally, the mixing layer 2005/06 was lower than in 2007/08.

Shortwave radiation



Due to the long lasting snow cover in 2005/06 the mean value of the albedo was 0.70. In contrast, the mean albedo 2007/08 was near 0.20 (Fig. 17). Accordingly, there was more energie available in 2007/08 for heating the lower levels of the valley atmosphere, mainly during the high pressure events in Dec.07/08.

Summary of daily means (2005/2006)

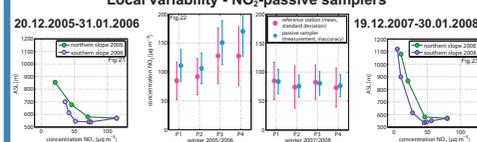
parameter	Dec.05	Jan.06	Feb.06	Dec.07	Jan.08	Feb.08
emission NO _x , daily mean > 200 µg m ⁻³	24	18	10	2	2	0
immission NO _x , daily mean > 200 µg m ⁻³	10	18	10	2	2	0
precipitation, daily mean > 50 µg m ⁻³	10	23	13	0	0	0

Summary of daily means (2007/2008)

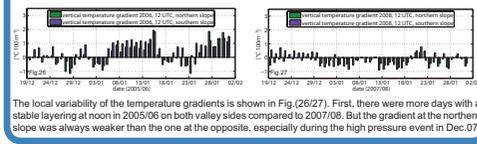
parameter	Dec.07	Jan.08	Feb.08	Dec.05	Jan.06	Feb.06
emission NO _x , daily mean > 200 µg m ⁻³	2	2	0	24	18	10
immission NO _x , daily mean > 200 µg m ⁻³	2	2	0	10	18	10
precipitation, daily mean > 50 µg m ⁻³	0	0	0	10	23	13

The Fig. 19 and Fig. 20 show the connection between the daily means of emission/immission, the temperature gradients, wind speed and precipitation. Higher immission values were almost based on high emission rates and a stable layering. Sometimes this was disturbed by precipitation or stronger winds (middle of Jan.06). In general, there were more days with high wind speeds in 2007/08 than two years before. Notice, that during Christmas 2007 immissions were low, despite of stable layering.

Local variability - NO₂-passive samplers



The comparison of one passive sampler with the reference station (Fig.22) demonstrated striking differences in their performances. The correspondingly corrected values of the samplers indicated a asymmetric of NO₂ in the valley cross section (Fig.21/23 and Fig.24/25). Higher concentrations were found at the sunny slope each period. This is mainly due to local slope winds and the proximity to motorway. Maximum values were measured at the valley bottom and near the motorway.



The local variability of the temperature gradients is shown in (Fig.26/27). First, there were more days with a stable layering at noon in 2005/06 on both valley sides compared to 2007/08. But the gradient at the northern slope was always weaker than the one at the opposite, especially during the high pressure event in Dec.07.

Summary and Conclusion

The weather-type analysis showed almost the same distribution of the larger scale atmospheric patterns during both periods. There were even more high pressure events in 2007/08, but in 2005/06 the values of air pollution were considerably higher than in winter 2007/08. This difference was based on the lower emission rates during the high pressure event in Dec.07 and on the long lasting snow cover 2005/06. This induced rather stable layering in the lower atmosphere during winter 2005/06, whereas due to the lower albedo values in 2007/08 the atmosphere could be heated and mixed more efficiently. To be added, there were more southerly flows in 2007/08, causing more days with foehn events than in 2005/06. However, during both periods we found higher values of NO₂ at the sunny slope than at the opposite side of the valley. This was a result of the different stability at the slopes, normally the shady side was more stable.

Acknowledgements

This work is partly based on data that have been collected within the ALPNAP project, which is funded by the EU-Interreg III B Alpine Space" programme, the Tyrolean government and Innsbruck University. In particular the immission and the calculated emission data are kindly allocated by the Tyrolean government. We also like to thank Wolfgang Gurgiser and Florian Karner (IMGI), members of the measurement group.

References

- Haimann, D., de Francesco, M., Emeis, S., Larcher, P. and Sabat, P. (Eds.), (2007) Air Pollution, Traffic Noise and Related Health Effects in the Alpine Space: A Guide for Authorities and Citizens. ALPNAP comprehensive report, Universität Augsburg & Torino, Department of Ingegneria Civile, Amsterdam, pp. 336.
- Steinacker, R. (1991) A weather type classification for the eastern alps. IMGI, Innsbruck, pp. 16.
- Weseli, A. (2005-2006) Monthly air quality reports Tyrol, Tyrolean government. © IMGI (2008). Climatological data from Austria, 1971-2000.

Literatur

- Alexander, H., E. Dialer, and J. Heiss, 1999: *Schwaz - die Knappenstadt*. Ed. Löwenzahn, pp. 17.
- Allinger, W., H. Andreatta, M. Faller, K. Geisler, F. Gröller, and A. Haidacher, 1998: *Vomp - Ein Tiroler Dorf auf dem Weg ins dritte Jahrtausend*. Berenkamp, pp. 547.
- Baumann, R., W. Spangl, C. Nagl, N. Sterrer, M. Fröhlich, G. Lorbeer, C. Trimbacher, H. Nainavie, K. Placer, R. Ortner, G. Lichtblau, S. Böhmer, U. Kutschera, B. Winter, and R. Kiss, 2004: Statuserhebung betreffend Überschreitungen der IG-L - Grenzwerte für PM10 und Schwebestaub, Blei und Cadmium im Staubbiederschlag im Inntal 2002. *Umweltbundesamt*, pp. 236.
- Bundesgesetzblatt, 115/1997: Immissionsschutzgesetz Luft (IG-L) i.d.g.F. *Rechtsinformationssystem der Republik Österreich (RIS)*, www.ris.bka.gv.at.
- Bundesgesetzblatt, 159/1960: Straßenverkehrsordnung 1960 — StVO 1960 i.d.g.F. *Rechtsinformationssystem der Republik Österreich (RIS)*, www.ris.bka.gv.at.
- Bundesgesetzblatt, 527/1989: Geschwindigkeitsbeschränkungen auf bestimmten Autobahnen zur Nachtzeit. *Rechtsinformationssystem der Republik Österreich (RIS)*, www.ris.bka.gv.at.
- Carslaw, D.C., 2005: Evidence of an increasing NO₂/NO_x emissions ratio from road traffic emissions. *Atmos. Environ.*, **39**, 4793–4802.
- Defant, F., 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 NO₂ concentrations in the Inn Valley. In: *Proceedings of the 3rd conference Environment and Transport and of the 17th conference Transport and Air Pollution (ETTAP 2009)*, Aurielle Charron (ed.), *Actes INRETS, Institut National de Recherche Sur les Transports et leur Securite, Bron cedex, France, Vol. 122, paper-069, conference CD*.
- Dreiseitl, E., and M. Stöhr, 1992: Emission – Meteorologie – Immission. Transitstudie (Abschlussbericht) Bericht des Institutes für Meteorologie der Universität Innsbruck im Auftrag der Tiroler Landesregierung, Landesforstdirektion. pp. 134.

- Emeis, S., 2000: *Meteorologie in Stichworten*. Gebrüder Bornträger Verlagsbuchhandlung, Berlin - Stuttgart, pp. 199.
- Emeis, S., C. Jahn, C. Munkel, C. Münsterer, and K. Schäfer, 2007: Multiple atmospheric layering and mixing-layer height in the Inn valley observed by remote sensing. *Meteorol. Zeitschrift*, **16**, 415–424.
- EU-Richtlinie, 1996: Richtlinie 1996/62/EG des Rates vom 27. September 1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität. *Zusammenfassung der europäischen Gesetzgebung*, www.europa.eu.
- EU-Richtlinie, 1999: Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. *Zusammenfassung der europäischen Gesetzgebung*, www.europa.eu.
- Fabian, P., 1992: *Atmosphäre und Umwelt*. Springer-Verlag, pp. 144.
- Foken, T., 2006: *Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden*. Verlag Springer Berlin - Heidelberg, pp. 318.
- Geiger, R., R. Aron, and P. Todhunter, 1995: *The climate near the ground*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsges.mmbH, Braunschweig, Wiesbaden. pp 626.
- Gohm, A., F. Harnisch, and A. Fix, 2006: Boundary layer structure in the Inn Valley during high air pollution (INNAP). In: *12th Conference on Mountain Meteorology, Santa Fe, New Mexico*.
- Gohm, A., F. Harnisch, J. Vergeiner, F. Obleitner, R. Schnitzhofer, A. Hansel, A. Fix, B. Neining, S. Emeis, and K. Schäfer, 2009: Air Pollution Transport in an Alpine Valley: Results from Airborne and Ground-Based Observations. *Boundary-Layer Meteorol.*, **131**, 441–463.
- Griesser, E., 2003: Quantitative Simulation des NO_x-Konzentrationsverlaufes während der Belastungsperiode im Nov./Dez. 1999. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Gurgiser, W., 2009: Windsysteme im Winter 07/08 im Raum Schwaz - Auswirkungen auf Luftschadstoffe im Bereich der Autobahn. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Harnisch, F., 2007: Airborne aerosol measurements in the Inn Valley: Spatial distribution of aerosols during wintertime. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Harnisch, F., A. Gohm, A. Fix, R. Schnitzhofer, A. Hansel, and B. Neining, 2009: Spatial distribution of aerosols in the Inn Valley atmosphere during wintertime. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **103**, 223–235.
- Heimann, D., M. de Franceschi, S. Emeis, P. Lercher, and P. Seibert (Eds.), 2007: Air Pollution, Traffic Noise and Related Health Effects in the Alpine Space - A Guide for Authorities and Consultants. ALPNAP comprehensive report. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, Italy. pp. 335.
- Heimann, D., K. Schäfer, S. Emeis, P. Suppan, F. Obleitner, and U. Uhrner, 2009: Combined evaluations of meteorological parameters, traffic noise and air pollution in an Alpine valley. *Meteorol. Zeitschrift*, *submitted*.

- Hobbs, P.V., 2000: *Introduction to atmospheric chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 262.
- HoboProTemp-Datenblatt, 2003: Homepage des Herstellers Onset, USA-Massachusetts. www.onsetcomp.com.
- Karner, F., 2009: Untersuchung des Einflusses von Schnee auf die Energiebilanz eines Bodens (Messung und Simulation), persönliche Mitteilungen. Diplomarbeit, eingereicht, Universität Innsbruck.
- Kollmann, J., 2008: Investigation of mixing height parametrisation in an Alpine valley during winter 2005/06. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Kraus, H., 2004: *Die Atmosphäre der Erde*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Kuhn, M., 1989: *Föhnstudien*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. pp. 504.
- Landesgesetzblatt, 10/2009: 19. Verordnung des Landeshauptmannes vom 06. Februar 2009, mit dem auf bestimmten Abschnitten der A12 Inntal Autobahn eine immissionsabhängige Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit eingeführt wird. *Archiv der Landesgesetzblätter für Tirol*, www.tirol.gv.at/themen/politik/landesgesetzblatt/.
- Landesgesetzblatt, 26/2004: 79. Verordnung des Landeshauptmannes vom 20. Oktober 2004, mit der in Tirol verkehrsbeschränkende Maßnahmen erlassen werden. *Archiv der Landesgesetzblätter für Tirol*, www.tirol.gv.at/themen/politik/landesgesetzblatt/.
- Landesgesetzblatt, 28/2007: 72. Verordnung des Landeshauptmannes von Tirol vom 6. November 2007, mit der auf der A 12 Inntal Autobahn zwischen der Gemeinde Unterperfuss und der Gemeinde Ebbs eine immissionsabhängige Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit eingeführt wird. *Archiv der Landesgesetzblätter für Tirol*, www.tirol.gv.at/themen/politik/landesgesetzblatt/.
- Landesgesetzblatt, 34/2006a: 86. Verordnung des Landeshauptmannes von Tirol vom 23. Oktober 2006, mit der auf der A 12 Inntalautobahn zwischen Zirl West und der Staatsgrenze mit der Bundesrepublik Deutschland eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 100 km/h festgesetzt wird. *Archiv der Landesgesetzblätter für Tirol*, www.tirol.gv.at/themen/politik/landesgesetzblatt/.
- Landesgesetzblatt, 36/2006b: 90. Verordnung des Landeshauptmannes von Tirol vom 24. November 2006, mit der auf der A 12 Inntalautobahn ein Fahrverbot für schadstoffreiche Schwerfahrzeuge erlassen wird. *Archiv der Landesgesetzblätter für Tirol*, www.tirol.gv.at/themen/politik/landesgesetzblatt/.
- Landesregierung, 2008: Amt der Tiroler Landesregierung. *persönliche Mitteilungen der Verkehrsabteilung*.
- LD40-Datenblatt, 2008: Homepage des Herstellers Vaisala, Finnland. www.vaisala.com.
- Lehner, M., 2008: Idealized Sensitivity Study of Pollution Transport over Alpine Terrain. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.

- Mayer, H., 2000: Umweltmeteorologie am Beginn eines neuen Jahrhunderts. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 60*, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co KG, Düsseldorf, **09**, 9–16.
- Nicoladoni, O., 2008: Alpine Wetterlagen und deren Manifestierung in meteorologischen Parametern in und über Innsbruck. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- NUA, 2005: Immissionsmessungen im Umfeld der Deponie Ahrental, Gemeinde Innsbruck (Stickstoffdioxid und Staubdeposition) im Zeitraum 16.3.2004 – 15.3.2005. *Niederösterreichische Umweltanalytik GmbH, Maria Enzersdorf*.
- Passivsammler-Datenblatt, 2008: Qualitätsdatenblatt zu den Stickstoffdioxid-Passivsammler nach Palmes. Angaben der vertreibenden Firma NUA - Niederösterreichische Umweltanalytik GmbH, Maria Enzersdorf.
- Pregger, T., D. Nicklass, P. Blank, J. Haigis, A. Vabitsch, J. Theloke, and R. Friedrich, 2005: Fortschreibung des Emissionskatasters Bayern für das Jahr 2000. *Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung. Im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz*, **1**, 81.
- Schäfer, K., M. Hoffmann, S. Emeis, J. Wittig, and J. Vergeiner, 2006: Highway emission study by DOAS within the Inn valley near Innsbruck. In: *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XI.*, Volume XI. pp. 12.
- 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 NO₂ measured by DOAS near a motorway in the Inn valley. In: *Remote Sensing of clouds and the Atmosphere XIII, SPIE-Conference Proceedings, Vol. 7107.*, Volume XI. pp. 12.
- Schäfer, K., J. Vergeiner, S. Emeis, J. Wittig, M. Hoffmann, F. Obleitner, and P. Suppan, 2008: Atmospheric influence and local variability of air pollution close to motorway in an Alpine valley during winter. *Meteorol. Zeitschrift*, **17**, 297–309.
- Schnitzhofer, R., 2005: Konzentrationsschwankungen verkehrsbedingter Luftschadstoffe in Verbindung mit täglichen und saisonalen Änderungen der meteorologischen Verhältnisse bei Vomp im Inntal. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Spangl, W., C. Nagl, and L. Moosmann, 2008: Jahresbericht der Luftgütemessungen in Österreich 2007. *Umweltbundesamt*, pp. 198.
- Spangl, W., C. Schütz, and A. Krismer, 2006: Räumliche Verteilung der Stickstoffdioxid-Konzentration an zwei Profilen in Tirol. *Umweltbundesamt*, pp. 37.
- Staszewski, M., 2008: Verteilung von Feinstaub und meteorologischen Parametern aus PKW- gestützten Messfahrten im Winter 2005/2006 im Raum Schwaz. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Steinacker, R., 1991: Eine ostalpine Strömungslagenklassifikation. *Mitteilungen des Instituts für Meteorologie und Geophysik, Innsbruck*, pp. 16.
- Stull, R.B., 2000: *Meteorology for Scientists and Engineers*. Brooks/Cole. pp. 490.

- 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 2009)*, Aurielle Charron (ed.), Actes INRETS, Institut National de Recherche Sur les Transports et leur Securite, Bron cedex, France, Vol. 122, paper-046, conference CD.
- tiris.tirol.gv.at, 2009: Amt der Tiroler Landesregierung. *Tiroler Rauminformationssystem*.
- Vergeiner, I., E. Dreiseitl, H. Feichter, and H. Pümpel, 1978: Inversionslagen in Innsbruck. *Wetter und Leben*, **30**, 69–86.
- Vergeiner, J., S. Emeis, E. Griesser, F. Obleitner, and J. Kollmann, 2007: Was sagen uns verschiedene Messsysteme über den vertikalen Luftaustausch in einem Alpen-tal im Winter. *METTOOLS VI, Fachtagung des Fachausschusses Umweltmeteorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, Garmisch-Partenkirchen, 24.-26. April 2007*, **VI**, pp. 3.
- Weber, A., 2005-2008: Monatsberichte Luftgüte. *Amt der Tiroler Landesregierung*.
- Wittig, J., 2007: Meteorological Influences on Air Pollution in the Inn Valley during Winter 2005/2006. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Wotawa, G., P. Seibert, H. Kromp-Kolb, and M. Hirschberg, 2000: Verkehrsbedingte Stickoxid-Belastung im Inntal: Einfluss meteorologischer und topographischer Faktoren. *Projekt Analyse der Schadstoffbelastung im Inntal, IMGW*, pp. 30.
- www.aanderaa.com, 2009: Homepage des Herstellers Aanderaa, Norwegen.
- www.mathworks.com, 2009: Matlab - Homepage des Herstellers Mathworks, USA-Massachusetts.
- www.tirol.gv.at, 2009: Homepage des Amtes der Tiroler Landesregierung, Österreich.
- www.vaisala.com, 2009: Homepage des Herstellers Vaisala, Finnland.
- ZAMG, 2009a: Homepage der ZAMG. *www.zamg.ac.at*.
- ZAMG, 2009b: Klimadaten von Österreich, 1971-2000. *www.zamg.ac.at*.
- Zängl, G., 1999: Three dimensional idealized simulations of the foehn in the region of Innsbruck. *Contributions to atmospheric physics*, **72**, 243–266.

Danksagung

Ein erster großer Dank gebührt meinen Eltern, die mir bis zum heutigen Tage ihre Unterstützung haben zukommen lassen. Natürlich danke ich auch meinen beiden Betreuern der Diplomarbeit, Prof. Klaus Schäfer (IMK-IFU) und Dr. Friedrich Obleitner (IMGI), für deren konstruktiven Hinweise und Ratschläge während des Entstehungsprozesses dieser Diplomarbeit.

Untersuchungen im Bereich der Meteorologie sind immens von den zur Verfügung stehenden Daten abhängig, deshalb danke ich umso mehr dem Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Waldschutz und Abt. Verkehr, für das Bereitstellen von wichtigem Datenmaterial. Ganz besonders zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang Dr. Andreas Weber und Mag. Andreas Krismer vom Bereich Luftgüte der Abteilung Waldschutz sowie DI Ewald Moser und DI Ludwig Schmutzhard von der Abteilung Verkehr.

Außerdem gilt mein Dank auch Dr. Jürg Thudium (Firma Ökoscience AG, Chur, Schweiz), Dr. Stefan Emeis (IMK-IFU) und Dr. Dietrich Heimann (DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen-Wessling, Deutschland) für deren wichtigen Anregungen. Für die Bereitstellung jener Daten, die während des Winters 2005/06 im Rahmen von ALPNAP ermittelt wurden, bedanke ich mich bei Dr. Johannes Vergeiner (IMGI). Weiterer Dank gebührt auch der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) für die zusätzlichen meteorologischen Messdaten.

Auf keinen Fall zu vergessen sind jene Freunde und Studienkollegen, mit denen das Bewältigen des Studienalltages und die Zeit während des Verfassens der Diplomarbeit um einiges abwechslungsreicher und lustiger war. Ganz besonders erwähne ich hier Florian Figwer, Wolfgang Gurgiser, Martin Juen, Florian Karner, Thomas Krismer, Gerhard Markstaler, Eva Nikolai, Andreas Ortner, Harald Poigner, Bernd Seiser, Georg Trebo, Helge Tuschy und Sebastian Weber.

Danke!

Lebenslauf

Florian Bilgeri

Kienzen 8, 6675 Tannheim

geboren am 04. März 1986 in Ehenbichl, Österreich

AUSBILDUNG:

- 10.2008 – 09.2009 Diplomarbeit unter der Betreuung von **Prof. Klaus Schäfer**, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe und **Dr. Friedrich Obleitner**, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck: *Analysen der Luftbelastungen im Inntal im meteorologischen Kontext - Eine Vergleichsstudie von zwei unterschiedlichen Winterperioden im Raum Schwaz.*
- 10.2004 – 10.2009 Diplomstudium Meteorologie und Geophysik, Leopold-Franzens Universität Innsbruck, Österreich.
- 09.2000 – 06.2004 Stiftsrealgymnasium Meinhardinum, Stams. *Matura.*

ZIVILDIENTST:

- ab 10.2009 Ableistung des ordentlichen Zivildienstes beim Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Zivil- und Katastrophenschutz - Landeswarnzentrale, Innsbruck, Österreich.

BETEILIGUNG AN FELDEXPERIMENTEN:

- Messungen von Schadstoffen und meteorologischen Parametern in Schwaz/Vomp 2007/08, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck und Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe, Garmisch-Partenkirchen. Tätigkeiten: Planung, Organisation, Gerätebetreuung und Datenauswertung.

TEILNAHME AN WISSENSCHAFTLICHEN TAGUNGEN:

- European Geosciences Union - General Assembly 2009, 19.04.2009 - 24.04.2009, Wien, Österreich.

POSTERPRÄSENTATIONEN:

- Bilgeri, F., K. Schäfer, F. Obleitner und S. Emeis (2009): Meteorology and air pollution in an alpine Valley during two strikingly different winter periods. EGU - General Assembly 2009, 21.04.2009, Wien, Österreich, Abstract Nr. 11348

VERÖFFENTLICHUNGEN:

- Schäfer, K., F. Obleitner, B. Ruille, S. Emeis, P. Suppan, W. Gurgiser, F. Bilgeri (2008): Comparative study of wintertime NO and NO₂ measured by DOAS near a motorway in the Inn valley. Remote Sensing of clouds and the Atmosphere XIII, SPIE-Conference Proceedings, Vol. 7107.

LEHRENDE UND SONSTIGE TÄTIGKEITEN WÄHREND DES STUDIUMS:

- Tutor 'Einführung in die Mathematik 1' (3 SWSt. im WS 2007 - Prof. N. Netzer)
- Tutor 'Einführung in die Mathematik 1' (3 SWSt. im WS 2008 - Prof. W. Förg-Rob)
- Tutor 'Meteor. Instrumentenpraktikum' (2 SWSt. im SS 2009 - Dr. F. Obleitner)
- Tutor 'Wetterbesprechung' (1 SWSt. im SS 2009 - Prof. G. Mayr)
- Durchführung von Wetterbeobachtungen (Klimastation Innsbruck)

FERIENTÄTIGKEITEN:

- Raiffeisenbank Tannheimertal, Tannheim (Sommer 2001)
- Gustav Lindner KG, Tannheim (Sommer 2002, 2003, 2004, 2005, 2006)
- Österreichische Post AG, Hall i. T., Schalterdienst (Sommer 2006, 2007, 2008, 2009 und Winter 2007)

Abbildungsverzeichnis

1.1	Symbolbilder eines stark mit Luftschadstoffen belasteten Alpentales am Beispiel des Unterinntales im Winter. Bild (a) zeigt den Blick über Schwaz/Vomp in Richtung Innsbruck, Foto (b) wurde gegen Osten über den Dächern von Innsbruck aufgenommen (im Hintergrund ist das Kellerjoch sichtbar).	2
2.1	Schematische Darstellung der untersten Atmosphärenschichten der Erde (Earth) nach Stull (2000), der englische Begriff "Boundary Layer" beschreibt die atmosphärische Grenzschicht (bis zu 2 km Höhe). Diese ist zudem Teil der Troposphäre (Troposphere), die durchschnittlich bis in eine Höhe von 11 km reicht.	10
2.2	Illustration eines idealisierten Tagesganges einer Grenzschicht, veröffentlicht von Stull (2000), verändert von Foken (2006). Angetrieben wird dieser Zyklus vor allem durch die einfallende Strahlung der Sonne.	11
2.3	Photochemischer Smog in Los Angeles nach Hobbs (2000). Der tageszeitliche Zusammenhang von NO, NO ₂ und O ₃ ist deutlich zu erkennen - die Maxima der Stickoxide liegen in den Morgenstunden, das Maximum von Ozon findet sich nach der Mittagszeit - einhergehend mit einem Minimum von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid.	15
3.1	Kartenausschnitt des österreichischen Bundeslandes Tirol mit den eingezeichneten Städten Innsbruck, Hall in Tirol, Schwaz, Jenbach und Wörgl im Tiroler Inntal. Autobahnen sind mit gelber Farbe, Bundesstraßen mit oranger Farbe abgebildet. Die Bahnlinie ist schwarz/weiß skizziert. Das Untersuchungsgebiet bei Schwaz/Vomp ist mit einem orangen Rechteck gekennzeichnet. (Kartenquelle: tiris.tirol.gv.at 2009)	22
3.2	Das Inntal bei Schwaz/Vomp am 15.01.2006 (a) und am 30.01.2008 (b), Blickrichtung Nordwest. In (b) ist im Vordergrund die Stadt Schwaz, im Hintergrund die Marktgemeinde Vomp mit dem Plateau Vomperberg und dem Hochnissl (2547 m) ersichtlich. In Abbildung (a) ist zudem das "Vomperloch", ein Seitental des Inntals, zu sehen. Diese beiden Bilder skizzieren sehr gut die charakteristischen Unterschiede der beiden Messperioden in punkto Schneebedeckung.	23

- 3.3 Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes mit den eingezeichneten Messorten der automatischen Wetterstationen und der Ceilometer entsprechend vorhergehender Tabelle, weiters ist der Standort der Luftgütemessstelle des Landes Tirol und der Messpunkt des DOAS gekennzeichnet. (Kartenquelle: tiris.tirol.gv.at 2009) 24
- 3.4 Blick auf das Untersuchungsgebiet mit eingezeichneten NO₂-Passivsammlerstandorten. In der Farbe blau sind die Standorte 2005/06 gekennzeichnet, rot jene des Jahres 2007/08. Identische Standorte beider Perioden sind mittels gemeinsamem Hintergrund kenntlich gemacht. (Kartenquelle: tiris.tirol.gv.at 2009) 26
- 3.5 Blick nach Süden auf das Inntal und das Kellerjoch (2344 m) von Anfang Dezember 2005. Eingezeichnet sind die Standorte der AWS Schwaz und die der Hobo-Sensoren des Kellerjoch-Temperaturprofils. Die Sensoren sind auf den Liftstützen der Kellerjochbahn dauerhaft montiert. In leichter Plateaulage liegt der Ortsteil Arzberg 27
- 3.6 Messaufbau während der Vergleichsmessungen im März 2008 am Standort Schwaz in der Talmitte (a). Die Station an der linken Bildseite befand sich am Vomperberg, die zweite Station von links ist die automatische Wetterstation des Standortes Schwaz. Im rechten Abbildungsteil (b) ist ein Hobo-Temperatursensor (KJ03) des Temperaturprofils Kellerjoch abgebildet. 29
- 3.7 Vergleich der Temperatur- (a) und Feuchtemessungen (b) der AWS Vomperberg mit den Messungen der AWS Schwaz (Referenz). Darstellung der Regressionsgeraden (rot) im Vergleich zur 1:1-Geraden (schwarz). Eichpolynome und Korrelationskoeffizienten sind ebenfalls angegeben. 29
- 3.8 Regressionsanalyse der Windgeschwindigkeitsmessungen der AWS Vomperberg [$\frac{1}{2}$ Umdrehungen min^{-1}] und der AWS Schwaz [ms^{-1}] (a). In Bild (b) wurde der Windgeschwindigkeit Schwaz die durch den Eichfaktor des Sensors berechnete Windgeschwindigkeit der Station Vomperberg gegenübergestellt. 30
- 3.9 Regressionsanalyse der Strahlungsmessungen (kurzwellig-eingehend (kw_e) - Abbildung (a)) und kurzwellig ausgehend (kw_a - (b)) der AWS Vomperberg und AWS Schwaz. Die Regressionsgerade ist wiederum in rot dargestellt, in schwarz die 1:1-Gerade. 31
- 3.10 Standort des Messgeräts DOAS mit den eingezeichneten Messpfaden 1 bis 3 am Standort ABV. Pfad 1 führt über die Autobahn, Pfad 2 längs dazu nach Osten. Entgegengesetzt zur Autobahn verläuft die Trasse des Pfades 3. (Kartenquelle: tiris.tirol.gv.at) 33
- 4.1 Strömungslagenklassifikation nach Steinacker (1991). In (a) ist der Verlauf der Wetterlagen während des Winters 2005/06 eingezeichnet, Graphik (b) zeigt den Verlauf während des Winters 2007/08. 39

4.2 Relativer Anteil der Strömungsklassen während den Monaten Dezember, Jänner und Februar in den Wintern 2005/06 (blauer Balken) und 2007/08 (roter Balken). 40

5.1 Zeitlicher Verlauf der NO_x-Emissionen während der Winter 2005/06 (a) und 2007/08 (b) aus dem Verkehr der A12 bei Schwaz/Vomp. Gut ersichtlich ist die viel geringere Emissionsmenge während den Weihnachtstagen und an den Sonntagen. 43

5.2 Darstellung der NO_x-Emissionswerte des Autobahnverkehrs auf einem Tag-Stundenraster in stündlicher Auflösung für den Winter 2005/06. Die Höhe der Emissionswerte ist farblich codiert. 44

5.3 Analoge Darstellung zur Abbildung 5.2 für die Untersuchungsperiode 2007/08 mit farblich dargestellter und stündlich aufgelöster Emissionsstruktur (NO_x des Autobahnverkehrs). 44

5.4 Mittlere Tagesgänge der NO_x-Emission (Verkehr) während der Wintermonate (Anfang Dezember bis Ende Februar) 2005/06 (a) und 2007/08 (b). 45

5.5 Zeitlicher Ablauf der täglich summierten, aus den Temperaturwerten der Station Schwaz berechneten Heizgradtagwerte für die Wintermonate 2005/06 (blau) und 2007/08 (rot). 47

5.6 Zeitlicher Verlauf der NO- (Graphik (a)) und NO₂-Immissionen (b) während der Winter 2005/06 (rot) und 2007/08 (blau) am Standort Vomp/Raststätte. In oranger Farbe eingezeichnet sind der Grenzwert des VDI (für NO: HMW > 1000 μgm⁻³) und der gesetzlich in IG-Luft festgeschriebene Grenzwert für NO₂ (HMW > 200 μgm⁻³). 49

5.7 Stündliche Analyse der NO_x-Immissionen an der A12-Vomp/Raststätte für den Winter 2005/06. Die gewichtete Summation des NO_x erfolgte nach den Vorschriften des IG-L. 50

5.8 Analyse der NO_x-Immissionen an der A12-Vomp/Raststätte für den Winter 2007/08. Die gewichtete Summation des NO_x erfolgte nach den Vorschriften des IG-L. 50

5.9 Mittlerer Tagesgang der NO_x-Immissionen während der Winter 2005/06 (a) und 2007/08 (b), gemessen am Standort Vomp/Raststätte. Gut ersichtlich sind das morgendliche und abendliche Maximum und das jeweilige Minimum zu den Mittags- und Abendstunden. 51

5.10 Tagesmittelwerte für Feinstaub (PM₁₀) während der Winter 2005/06 (a) und 2007/08 (b), gemessen von der Luftgüteüberwachungsstation des Landes Tirol. In oranger, strichlierter Farbe ist der Grenzwert von 50 μgm⁻³ (Tagesmittelwert) nach IG-L dargestellt. 52

6.1 Windrosen der Bergstation Innsbruck-Patscherkofel (2246 m), jeweils für 01.12. bis 28.02. in den Jahren 2005/06 (a) und 2007/08 (b). Farblich dargestellt ist die Windgeschwindigkeit. 54

- 6.2 Täglich summierte Sonnenstunden [h] für Jenbach (Inntal), Winter 2005/06 (a) und Winter 2007/08 (b). 55
- 6.3 Täglich summierte Niederschlagsmengen [mm] für Jenbach im Inntal. Graphik (a) zeigt den Winter 2005/06, in Abbildung (b) ist der Winter 2007/08 in rot dargestellt. 56
- 6.4 Windrosen für die Station Schwaz (Talboden) für 2005/06 (a) und 2007/08 (b) - die Intensitäten und Häufigkeiten der Windgeschwindigkeit sind erkennbar unterschiedlich. 57
- 6.5 Windrosen für die Station Vomperberg (Plateaulage) für 2005/06 (a) und 2007/08 (b). Während des Winters 2007/08 kamen tendenziell höhere Windgeschwindigkeiten vor. Die Stationen waren während der beiden Messperioden an unterschiedlichen Standorten aufgebaut, für genauere Erklärung bitte Text beachten. 57
- 6.6 Windgeschwindigkeits- (a) und Temperaturtagesmittel (b) der automatischen Wetterstation Schwaz. Wie in den meisten Abbildungen ist der Winter 2005/06 jeweils blau und der Winter 2007/08 in der Farbe rot dargestellt. 58
- 6.7 Stündliche Darstellung des pseudovertikalen Temperaturgradienten pro 100 m entlang des Kellerjochs (südliche Talseite) für den Winter 2005/06. . 61
- 6.8 Pseudovertikaler Temperaturgradient für Dez./Jän./Feb. 2007/08 entlang des Kellerjochhanges (stündliche Auflösung, pro 100 m). 61
- 6.9 Mittlerer Tagesgang des pseudovertikalen Temperaturgradienten ($^{\circ}C$ 100 m^{-1}) entlang des Kellerjochhanges. Die Graphik (a) steht für 2005/06, (b) für 2007/08. 62
- 6.10 Inversionsstärken in [$^{\circ}C$ 100 $m^{-1}min$] entlang des südlichen Hanges (Kellerjoch) für beide Dreimonatsperioden, (a) für 2005/06, (b) für 2007/08. Die Art und Weise der genauen Berechnung ist im Text ersichtlich. Jedenfalls stechen die unterschiedliche zeitliche Lage und Intensität der Hochdruckperioden eindeutig ins Auge. 63
- 6.11 Modellierte und an tatsächliche Messungen angepasste Schneehöhen während der Winter 2005/06 (blau) und 2007/08 (rot) für den Talboden bei Schwaz - nach Karner (2009). 64
- 6.12 Zeitliche Darstellung der Albedo (a) und der kurzwelligen Strahlungsbilanz (b) aus den Messungen der AWS Schwaz. Die strichlierten Linien kennzeichnen jeweils den 12 Uhr UTC Momentanwert, die durchgezogenen Linien das 5-tägige gleitende Mittel. Gemäß Konvention ist der Winter 2005/06 in blau und 2007/08 in rot gehalten. 65
- 6.13 Bodentemperaturen am Standort Schwaz, berechnet aus den jeweiligen Werten der langwelligen Strahlungsmessung des nach unten gerichteten Sensors. Die Winterperiode 2005/06 ist wiederum in blau gehalten, der Vergleichszeitraum 2007/08 in rot. 66

6.14 Mittlere Tagesgänge der Strahlungskomponenten der langwelligen und kurzwelligen Strahlung für den Winter 2005/06 (a) und 2007/08 (b) am Standort Schwaz. 67

6.15 Mittlerer Tagesgang der Gesamtstrahlungsbilanz für beide Winterperioden (2005/06 in (a), 2007/08 in (b)) für den Standort Schwaz. 67

6.16 Beispielbild einer Rückstreugraphik für den 07.01.2006 des Ceilometers. In strichlierter Farbe eingezeichnet sind die visuell klassifizierte Mischungsschichthöhen und in oranger Farbe die 200 m AGL-Höhe zur Orientierung. Abbildung zur Verfügung gestellt von S. Emeis (IMK-IFU). 69

6.17 Zeitlicher Verlauf der Mischungsschichthöhe, abgeleitet aus den Daten der Ceilometer. Analysiert wurden jeweils definierte Hochdruckwetterlagen von 05.01.06 bis 16.01.06 (blau) und von 18.12.07 bis 29.12.07 (rot). Als Verifikation dienen Vertikalsondierungen von Feinstaub (PM₁₀) während ausgewählter Tage im Jänner 2006, siehe auch Kollmann (2008). 70

7.1 Gegenüberstellung von NO₂-Passivsammler-Messungen des Standortes 5/06 bzw. 5/08, inklusive angegebener Fehlerbandbreite von 25.3 % (Passivsammler-Datenblatt 2008), mit Mittelwerten (samt Standardabweichungen) der Referenzstation des Landes Tirol in Vomp. In (a) sind die Werte des Winters 2005/06 analysiert, in (b) die des Winters 2007/08. . . . 74

7.2 Graphisch dargestellte NO₂-Konzentrationen der Passivsammler im Talquerschnitt. Die Mittelungsperiode beträgt jeweils 6 Wochen (20.12.05 bis 31.01.06 in (a) und 19.12.07 - 30.01.08 in (b)) während des kalendarischen Hochwinters. Die Messergebnisse geben einen Anhaltspunkt für die mittlere Belastung mit NO₂ an den verschiedenen Positionen im Talquerschnitt. . . . 75

7.3 Vergleich von Passivsammlermessungen, die an identen Stellen während beider Zeiträume aufgestellt waren. Gekennzeichnet sind diese mit den Buchstaben A, B, C, D in Tabelle 3.4. 76

7.4 In obiger Graphik sind die mit dem jeweiligen maximal gemessenen Wert normierten Konzentrationen der NO₂-Passivsammler dargestellt. Die Mittelungsperiode ist wieder 20.12.05 bis 31.01.06 (a) bzw. 19.12.07 - 30.01.08 (b). 77

7.5 Verlauf der Passivsammlerwerte (NO₂) in einem Höhenprofil entlang des Schattenhanges (violett) und des Sonnenhanges (grün). Mittelungszeit: 20.12.05 bis 31.01.06 in (a) und 19.12.07 - 30.01.08 in (b). 78

7.6 Temperaturgradienten zum Zeitpunkt 12 UTC an der Sonnen- und Schattenseite des Inntales für den Zeitraum von Mitte Dezember bis Ende Jänner 2005/06 (a) und 2007/08 (b). 79

8.1	Korrelationen der NO_2 -Messungen der Luftgütestation Vomp/Raststätte mit den Messungen des Pfades 1 (über die A12) und des Pfades 2 (längs zur Autobahn) des DOAS. Den Messungen der Luftgütestation wird in (a) Pfad 1 und in (b) Pfad 2 des Winters 2005/06 bzw. in (c) Pfad 1 und in (d) Pfad 2 der Winterperiode 2007/08 gegenübergestellt. Farblich ist der Wert der kurzwelligen Strahlung, gemessen am Standort der Luftgütestation, eingearbeitet.	83
8.2	Vergleich der NO_2 -Konzentrationen des DOAS mit jenen der Luftgütestation, die Farbcodierung beinhaltet die Windgeschwindigkeit (gemessen am Standort der Luftgütemessstelle). Für die Erklärung der Beschriftung: siehe Abbildung. 8.1.	84
8.3	Mit den Werten der Windrichtung (ermittelt von der Luftgütemessstelle) eingefärbte Vergleichsstudien zwischen DOAS (Pfad 1 und 2) und der permanenten Station (NO_2). Erklärung der Beschriftung von (a) bis (d): siehe Abbildung 8.1.	84
8.4	Korrelationen zwischen DOAS (Pfad 2) und der permanenten Station bei Globalstrahlungswerten von unter 5 Wm^{-2} für die Winter 2005/06 (a) und 2007/08 (b). Die Windrichtung ist wieder in Farbe codiert.	86
8.5	Korrelationen zwischen Pfad 2 des DOAS und der permanenten Station bei Globalstrahlungswerten von über 50 Wm^{-2} . In (a) sind die Werte des Winters 2005/06 und in (b) jene des Winters 2007/08 dargestellt. Farblich codiert ist die Windrichtung.	86
8.6	Synoptische Analyse einer Hochdruckperiode im Winter 2005/06 von 05.01.2006 bis 17.01.2006. Die Karten zeigen die Höhe des 300 hPa-Geopotentials [(a1) bis (a4)], die Abbildungen (b1) bis (b4) jene der äquivalentpot. Temperatur in 850 hPa für den 05.Jän. [(a1),(b1)], 09.Jän. [(a2),(b2)], 13.Jän. [(a3),(b3)] und 17.Jän. 2006 [(a4),(b4)]. Analyse: ECMWF, 00 UTC.	89
8.7	Darstellung der 300 hPa-geopot. Höhe in (a1) bis (a4) und der äquivalentpot. Temperatur (850 hPa) in (b1) bis (b4) während der Hochdruckphase im Winter 2007/08 von 18.12.2007 bis 30.12.2007. Die Abbildungen zeigen die synoptische Lage am 18.Dez. [(a1),(b1)], 22.Dez. [(a2),(b2)], 26.Dez. [(a3),(b3)] und 30.Dez. 2007 [(a4),(b4)]. Analyse: ECMWF, 00 UTC.	90
8.8	Darstellung der gemessenen bzw. berechneten Daten der Immission (a), des pseudovertikalen Temperaturgradienten entlang des Kellerjochhanges (b), der Emission (c) und der kurzwelligen Strahlungsbilanz (d) während 12 Tagen mit Hochdruckeinfluss.	92
8.9	Analyse einer Periode mit variablen Wetterlagen im Winter 2005/06 (15.01.2006 bis 27.01.2006). Die Karten zeigen die geop. Höhe in 300 hPa [(a1) bis (a4)], die Abbildungen (b1) bis (b4) jene der äquivalentpot. Temperatur in 850 hPa für den 15. Jän. [(a1),(b1)], 19. Jän. [(a2),(b2)], 23. Jän. [(a3),(b3)] und 27. Jän. 2006 [(a4),(b4)]. Analyse: ECMWF, 00 Uhr UTC.	95

8.10 Winter 2007/08: Analyse einer Periode mit variablen Wetterlagen von 15.01.2008 bis 27.01.2008. Die Karten zeigen die geop. Höhe in 300 hPa [(a1) bis (a4)], die Abbildungen (b1) bis (b4) jene der äquivalentpot. Temperatur (850 hPa) für den 15. Jän. [(a1),(b1)], 19. Jän. [(a2),(b2)], 23. Jän. [(a3),(b3)] und 27. Jän. 2008 [(a4),(b4)]. Analyse: ECMWF, 00 Uhr UTC. 96

8.11 Daten der Immission (a), des pseudovertikalen Temperaturgradienten (b), der Emission (c) und des Niederschlags (d). Der Zeitraum liegt in beiden Wintern zwischen 15.01. und 26.01., dies entspricht genau 12 Tagen. 97

8.12 Das NO₂ zu NO_x Verhältnis in Tagesmittelwerten für beide Winterperioden. Die farbigen Leisten skizzieren jene Tage, an denen das Verhältnis über 0.30 war. 99

8.13 Farbliche Darstellung von Schwellwertüberschreitungen der Tagesmittel von Emission, Immission, Windgeschwindigkeit und des pseudovertikalen Temperaturgradienten entlang des Kellerjochhanges pro 100 m. Die Niederschlagsraten der Station Jenbach sind als Tagessumme dargestellt. Teil (a) der Graphik visualisiert die Daten des Winters 2005/06 und (b) die Messwerte der Monate Dezember bis Februar 2007/08. 101

9.1 Gegenüberstellung von gemessenen Mischungsschichthöhen eines Sodars zu den gemessenen vertikalen Temperaturgradienten am Kellerjochhang während des gesamten Jänners 2006. Zur Vermeidung von mathematischen Schwierigkeiten wurden die Temperaturwerte um jeweils 1 °C erhöht. In diese Punktwolke ist ein berechnetes Polynom, das im Text beschrieben wird, hineingelegt worden. 107

9.2 Modellierte Mischungsschichthöhen für die Winterperioden - 2005/06 in blau (a) und 2007/08 in der Farbe rot (b). 108

9.3 Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Konzentrationen von NO_x für den Standort Luftgütemessstelle Vomp/Raststätte. Abbildung (a) zeigt die Ergebnisse für 2005/06 und (b) für 2007/08. 110

Tabellenverzeichnis

2.1	Grenz-, Alarm- und Zielwerte nach Immissionsschutzgesetz-Luft i.d.g.F. für NO ₂ und PM ₁₀ zum Schutz der menschlichen Gesundheit. ¹⁾ Für PM ₁₀ sind zwischen 2005 und 2009 pro Kalenderjahr 30 Überschreitungen zulässig.	18
2.2	Empfehlungen der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Kommission für die Reinhaltung der Luft, von November 1998. Dies sind Grenzwerte zum Schutz der Menschen, der Vegetation und des Ökosystems bezüglich NO ₂	19
3.1	Tabellarische Zusammenstellung der Standorte der automatischen Wetterstationen, des DOAS, des Ceilometers und des Sodars während beider Jahre. Zusätzlich verzeichnet ist der Standort der permanenten Luftgütemessstelle des Landes Tirol. Ebenfalls permanent messen die Wetterstationen der ZAMG, deren Daten zur Verfügung gestellt wurden.	24
3.2	Auffistung aller NO ₂ -Passivsammler mit Meereshöhe und ungefährem Abstand zur Autobahn A12. Jene Standorte, die mit A, B, C und D gekennzeichnet sind, entsprechen identer Messstandorte während beider Untersuchungsperioden.	25
3.3	Standorte der Hobo-Sensoren entlang des Kellerjochhanges mit Angabe der Seehöhe und einer Standortbeschreibung. Die Daten wurde zur Verfügung gestellt vom Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Waldschutz.	26
3.4	In dieser Arbeit verwendete meteorologische Komponenten der automatischen Wetterstationen Schwaz/Vomperberg und der Zusatzstationen der ZAMG bzw. des Landes Tirol (Luftgütemessstelle). Bis auf jene meteorologischen Messwerte der Luftgütestation wurden alle Komponenten in einer Höhe von ca. 2 m gemessen. Die Bedeutungen der einzelnen Abkürzungen sind dem Abkürzungsverzeichnis zu entnehmen.	28
3.5	Zusammenstellung der linearen Eichgeraden und der Regressionskoeffizienten der automatischen Wetterstation Vomperberg im Vergleich zur AWS Schwaz.	31

4.1	Wichtige meteorologische Parameter im Vergleich zum klimatologischen Mittel von 1971 bis 2000. Alle angeführten Daten beziehen sich auf die Wetterstation Innsbruck-Flughafen (ZAMG). Jene Spalten, die mit Abw. gekennzeichnet sind, beinhalten die jeweilige Differenz zum langjährigen Mittel. Die klimatologischen Werte stammen aus der Klimadatenbank der ZAMG (2009).	36
4.2	Anzahl der Tage, an denen Alarm-, Grenz-, und Zielwerte von verschiedenen Schadstoffen überschritten wurden. Der Messort ist die Luftgütestation des Landes Tirol in Vomp (Raststätte).	37
4.3	Zuordnung der vier Haupt- und der vier Nebenströmungslagen zu den Zahlen von 3 bis 10. Zusätzlich werden gradientschwache Lagen (Hochdrucklagen) mit der Zahl 1 und variable Situationen (Fronten) mit 2 codiert. . . .	38
5.1	Statistische Zusammenfassung der mittels Verkehrszahlen berechneten Emissionswerte von NO_x für die Winterperioden 2005/06 und 2007/08. . .	42
5.2	Monatsweiser Vergleich der Heizgradtagsummen an der Station Schwaz während beider Winterperioden. Als Vergleich das 10-jährige Mittel der Station Jenbach (ZAMG).	46
5.3	Statistische Zusammenfassung der Immission von NO_x , gemessen von der Luftgütemessstelle Vomp/Raststätte an der A12 (Summation nach IG-L-Vorschriften) für die Winterperioden 2005/06 und 2007/08.	48
6.1	Statistische Kenngrößen für den Temperaturverlauf in Schwaz für die Winterperioden 2005/06 und 2007/08.	59