



Projekt "Höhenprofil Zillertal"

Analyse der vertikalen Temperatur- und
Windstruktur und ihr Einfluß auf die
Immissionskonzentrationen

A. KAISER

FDK:111.24:111.5:181.45:(436.7)

BUNDESMINISTERIUM FÜR



LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT

Das Lebensministerium

ISSN 0374-9037

Copyright 1994 by
Forstliche Bundesversuchsanstalt

Für den Inhalt verantwortlich :
Direktor HR Dipl. Ing. Friedrich Ruhm
Redaktion: Dipl.-Ing. F. Herman & Dr. St. Smidt

Herstellung und Druck :
Forstliche Bundesversuchsanstalt
Waldforschungszentrum
Seckendorff-Gudent-Weg 8
A-1131 Wien

Anschrift für Tauschverkehr :
Forstliche Bundesversuchsanstalt
Bibliothek
Seckendorff-Gudent-Weg 8
A-1131 Wien

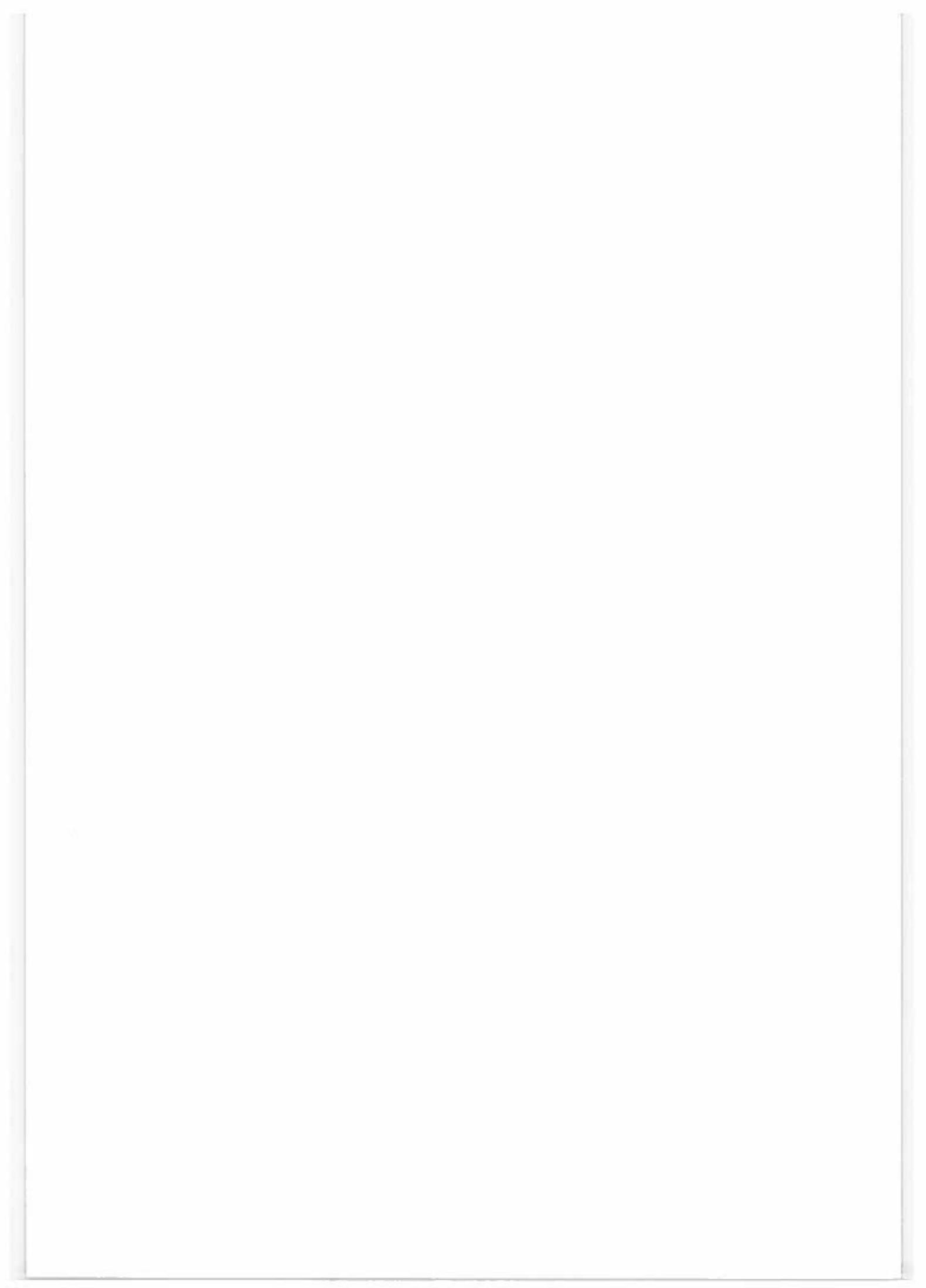
Tel. + 43-1- 878 38 216
Fax. + 43-1- 877 59 07

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet

INHALT

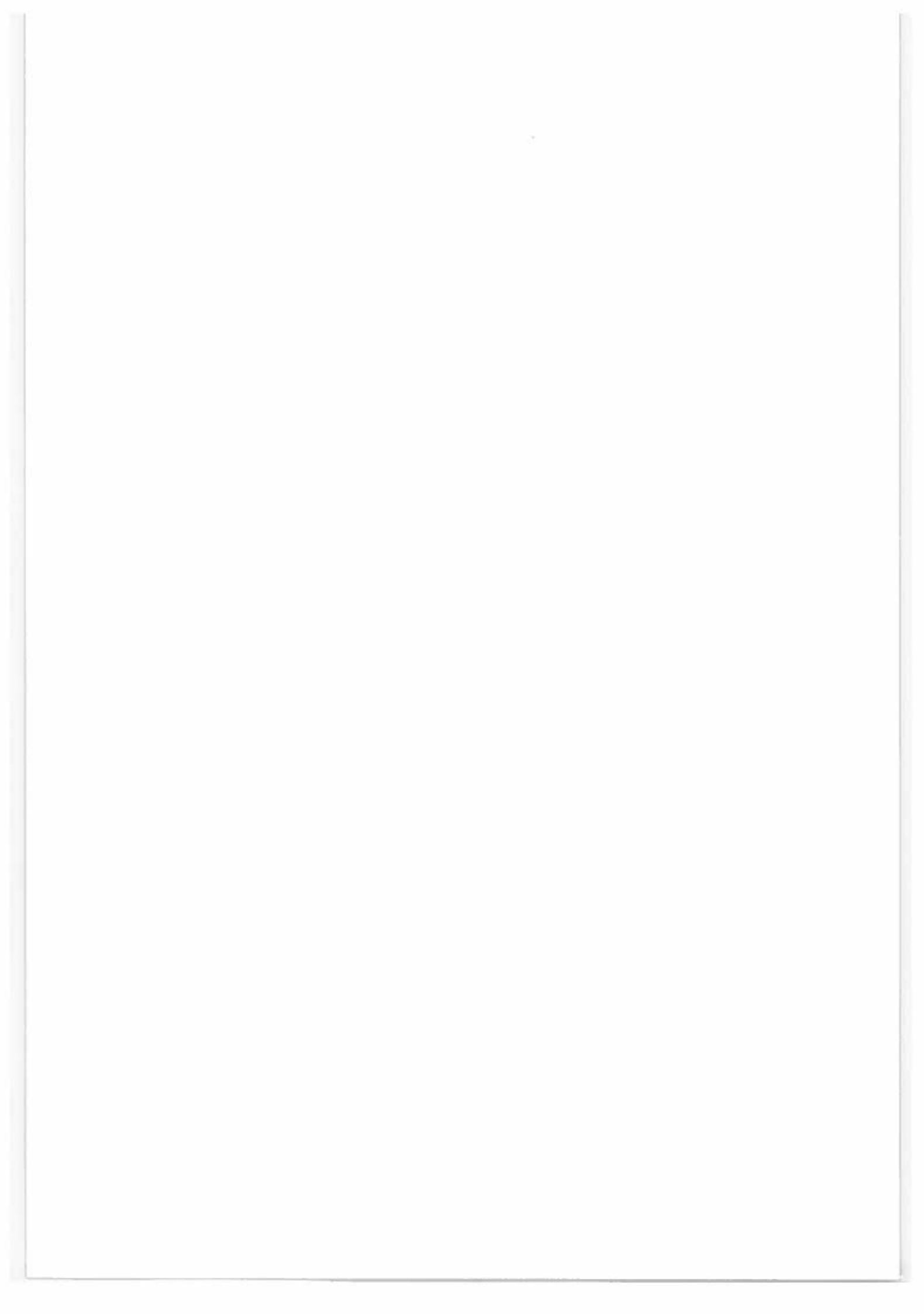
Vorwort

1	Einleitung	9
2	Methodik	9
3	Meßsysteme.....	10
4	Meteorologische Verhältnisse im Zillertal	10
4.1	Vertikale Temperaturverteilung und die Struktur der Turbulenz der Talatmosphäre.....	10
4.1.1	Jahresgang der vertikalen Temperaturstruktur	11
4.1.2	Abhängigkeit der vertikalen Temperaturstruktur von der Wetterlage.....	12
4.1.3	Abhängigkeit der vom Sodar gemessenen Streuung der Vertikalkomponente des Windes von der vertikalen Temperaturstruktur und von der Windgeschwindigkeit	13
4.1.4	Tagesgang der vertikalen Temperaturverteilung und der Struktur der Turbulenz der Talatmosphäre.....	13
4.2	Windverhältnisse und ihre Vertikalstruktur	15
4.2.1	Jahresgang und jahreszeitliche Unterschiede im Tagesgang.....	15
4.2.2	Abhängigkeit der Windverhältnisse von der Wetterlage	16
4.2.3	Windverhältnisse im Tagesgang.....	16
5	Immissionskonzentrationen von Ozon und Stickstoffoxiden im Zillertal	19
5.1	Jahresgang der Immissionskonzentrationen	19
5.2	Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von der Wetterlage.....	20
5.2.1	Ozonkonzentrationen	20
5.2.2	Stickstoffoxidkonzentrationen.....	21
5.3	Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von der Vertikalstruktur der Atmosphäre (Streuung des Vertikalwindes)	22
5.4	Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von den Windverhältnissen	23
5.5	Tagesgang der Immissionskonzentrationen	24
5.5.1	Einfluß der Emission auf den Tagesgang der Immissionskonzentrationen	24
5.5.2	Einfluß der meteorologischen Verhältnisse auf den Tagesgang der Immissionskonzentrationen	25
6	Ausgewählte Wetterlagen.....	26
6.1	Herbstliches Hochdruckwetter	26
6.2	Föhn	29
	Literatur	31
	Bildanhang	35



Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist ein Teilprojekt des Projektes „Höhenprofil Zillertal“, welches gemäß Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft (GZ: 56.810/02-VA2/90 vom 20. 9. 1990, Projektausführung: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Zl.: 415/90) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Meteorologie und Geophysik unter der Leitung von Dr. August KAISER und der Mitarbeit von Mag. Gabriele Rau, Kathrin Baumann, Brigitta Po-spisil und Eugen Sares (Grafik) erstellt wurde.



A.KAISER

Kurzfassung

Analyse der vertikalen Temperatur- und Windstruktur und ihr Einfluß auf die Immissionskonzentrationen

Die vorliegende Arbeit enthält eine umfassende Analyse der meteorologischen Verhältnisse und ihrer Auswirkungen auf die Immissionsbelastung im Zillertal, gemessen am Talboden (ca. 600m NN) bis über 2000m NN. Es zeigt sich, daß das Zillertal ein ausgeprägtes "Eigenleben" mit dem typischen Wechsel von Talein- und Talauswind und - vor allem nachts - stabiler Schichtung besitzt. Da infolge des vorgelagerten Inntals ein direkter Luftaustausch mit der Ebene verwehrt ist, kommt der Talauswind während der zweiten Nachhälfte zum Erliegen, sobald das Inntal mit Kaltluft "aufgefüllt" ist. Ein Einfluß der großräumigen Wetterlage ist im Tal kaum erkennbar; schwache Störungen und insbesondere Föhn bewirken meist nur, daß die autochthone Luftsicht auf einen geringeren Höhenreich über Talgrund beschränkt bleibt.

Die Ozonkonzentration ist an den Bergstationen im wesentlichen synoptisch beeinflußt mit relativ hohen Werten an der Rückseite und relativ niedrigen an der Vorderseite von Hochdruckgebieten. Inwieweit das Ozon den Talboden erreichen kann, ist bestimmt durch die Durchmischung der "freien" Talatmosphäre: Je labiler die Schichtung, desto höher die Ozonkonzentration am Talboden. Im Tagesgang treten die höchsten Werte folglich nachmittags auf. An den Bergstationen wird bei guter Durchmischung hingegen ozonarme Luft aus dem Tal herangeführt, weshalb dort tagsüber die Ozonkonzentration niedriger ist als nachts, also ein (schwach ausgeprägter) inverser Tagesgang vorherrscht.

Infolge der Nähe zu den Immissionsquellen ist die Immissionskonzentration durch Stickstoffoxide am Talboden am größten. Hohe Werte treten hier bei stabiler Schichtung auf, insbesondere bei seichten Inversionen, also häufig bei Südlagen (Föhn). Relativ niedrige Werte werden bei guter Durchmischung gemessen. Tagsüber ist zudem ein Antransport NOx-reicher Luft aus talabwärts gelegenen Bereichen (Inntal), nachts einer NOx-armen Luft aus talaufwärts und von den Hängen her erkennbar. Hohe Werte der NOx-Konzentration morgens und abends sind auf die dann noch bzw. schon wieder stabile Schichtung, aber auch auf Emissionen während der Verkehrsspitze zurückzuführen. Diese Emissionen bewirken während der Morgenstunden sogar einen vorübergehenden Abbau der Ozonkonzentration. Die NOx-Messungen an den Hängen zeigen den Einfluß der Hangwindzirkulation, nämlich relativ hohe Konzentrationen bei Hangaufwind. Aufgrund des ausgeprägten "Eigenlebens" des Tals können eventuelle überregionale Schadstofftransporte anhand der Messungen im Tal selbst nicht nachgewiesen werden.

Stichwörter: Höhenprofil, Temperaturstruktur, Windstruktur

Summary

Analysis of the vertical temperature- and wind structure and its influence on the air pollutant concentrations:

The study under consideration consists of an extensive analysis of the meteorological conditions and their effects on the concentration of ozone and nitrogen oxides in the Ziller-Valley in Tyrol/Austria. Measurements were taken at the valley floor (600m a.s.l.) and the slopes (up to 2000m a.s.l.). Additional measurements were carried out by acoustic radar (sonar) and by tethered balloon. Meteorological conditions are strongly dominated by local effects, such as valley- and slope-wind systems and - especially during nighttime - stable stratification of the valley atmosphere. The Ziller-Valley is excluded from the direct air exchange with the prealpine region by the Inn-Valley. Therefore, down-valley winds cease during the second half of the night, when the Inn-Valley is filled up with cold air. Large scale meteorological conditions scarcely can be identified in the valley itself. Compared to the average, passages of weak fronts or Foehn usually just cause a more shallow layer of autochthonous air (shallow but strong inversions) in the valley.

Ozone concentrations on the mountain stations are dominated by large scale synoptic meteorological conditions: High values occur at the back side, low ones at the front side of anticyclones. Ozone at the valley floor is determined by the stratification of the "free" valley atmosphere: The less stable the stratification, the higher are the ozone values. Therefore the daily maximum concentration is measured in the afternoon. At the mountain stations, good mixing of the valley atmosphere during daytime leads to advection of relatively ozone-poor air, so that concentrations are higher during nighttime than during daytime (however, daily variations are small).

Because of the little distance to emission sources, concentrations of nitrogen oxides are highest at the valley floor. High values are measured when the stratification is stable, especially when the inversion is shallow and strong, preferably with synoptic currents from the South or there is Foehn. Low values occur, when the valley atmosphere is well mixed. During daytime, measurements indicate advection of air with relatively high nitrogen oxide concentrations from the down-valley-regions (Inn Valley). At night, advection of low concentrations from up-valley regions and from the slopes takes place. High values of nitrogen oxides during morning and evening hours are caused by stable stratification, but also by traffic during rush-hours. In the morning, these emissions even cause a small decrease of ozone concentration at the valley floor. Nitrogen oxide measurements at the slopes show the effects of the slope wind system: Relatively high values occur in connection with up-slope winds. Because of the prevailing local effects, large scale advection of pollutants cannot be identified by measurements in the valley itself.

Key words: altitude profile, temperature structure, wind structure

1 Einleitung

Im Rahmen des interdisziplinären Projekts "Höhenprofil Zillertal" wurden biotische und abiotische Ursachen der "neuartigen" Waldschäden untersucht. Als Ursache derartiger Waldschäden wird ein Zusammenwirken mehrerer Schadfaktoren, sogenannter Stressoren, angenommen ("streßphysiologische Betrachtungsweise", siehe BOLHAR-NORDENKAMPF 1989). Grundsätzlich kann jeder physiologisch oder ökosystemar wirksame Faktor, sei er natürlich oder anthropogen, zu einem Stressor werden. Ein Teil des folglich recht umfangreichen Forschungsprogramms waren daher seit 1985 auch Messungen meteorologischer Größen und der Immissionskonzentrationen vom Talboden bis in Höhen von mehr als 2000m. Ergänzend zu diesen "Hangmessungen" wurden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Zusammenarbeit mit dem Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien Sondierungen in der freien Talatmosphäre anhand einer Akustikradaranlage (Sodar) und mittels Fesselballonsonde vorgenommen.

Erste Analysen der Immissionskonzentrationen (SMIDT & LEITNER 1992) zeigten im Untersuchungsgebiet Überschreitungen wirkungsbezogener Grenzwerte von Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid am Talboden und Ozon-Grenzwertüberschreitungen vor allem an den höhergelegenen Stationen (vgl. AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG 1993); letztere wurden auch aufgrund von Messungen an anderen alpinen Bergstationen gefunden. Es konnten anhand zahlreicher pflanzenphysiologischer Untersuchungen Immissionseinwirkungen nachgewiesen werden: Erhöhte Schwefelgehalte in Nadelproben bis ca 400m über Talgrund (HERMAN 1992), charakteristische Veränderungen physiologischer Nadelparameter (Thiol-, Ascorbinsäure-, Pignentgehalte und Peroxidaseaktivität; BERMADINGER et al. 1989, BERMADINGER-STABENTHEINER et al. 1992), sowie Schadsformenausbildung und Artenverarmung der Flechtenflora (HOFMANN 1992) zeigten den Einfluß von Luftschatdstoffen, vor allem von Schwefeldioxid nahe dem Talboden. Für höhere Lagen konnte anhand der physiologischen Parameter der Nadeln (BERMADINGER-STABENTHEINER et al., 1992), anhand von Veränderungen der Grundfluoreszenz (LECHNER et al., 1989, BOLHAR-NORDENKAMPF et al. 1992) und aufgrund veränderter Fettsäuremuster (PUCHINGER 1989) der Einfluß von Ozon nachgewiesen werden.

Es erschien somit geboten, die Immissionskonzentrationen im Untersuchungsgebiet näher zu studieren. Diese kann vor Ort gemessen werden. Man erhält damit Kenntnis über die Höhe der Immissionskonzentrationen, nicht aber über jene Mechanismen und Ursachen, die zu der gemessenen Konzentration führen. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist daher die Analyse der meteorologischen Verhältnisse im Zillertal sowie die meteorologische Interpretation der gemessenen Immissionskonzentrationen. Die kausale Kette von Emission (Freisetzung der Schadstoffe) über Transmission (alle Vorgänge während des Transports der Schadstoffe) zur Immission (Schadstoffkonzentration

vor Ort) kann nur geschlossen werden, wenn Emission (sowohl aus lokalen Quellen in der näheren Umgebung, als auch aus relevanten Quellen in größeren Entfernung), meteorologische Verhältnisse und An- und Abreicherungsprozesse (etwa chemische Umwandlungsprozesse, Deposition etc.) bekannt sind bzw. berechnet werden. Eine derart umfangreiche Untersuchung ist im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich. Betrachtet man hingegen die Immissionskonzentrationen in einem bestimmten Gebiet als "gegeben", so gibt die Analyse der meteorologischen Verhältnisse Aufschluß über deren Auswirkung auf die Immissionskonzentrationen vor Ort. Zudem können zum Teil grobe Hinweise über den lokalen bzw. advektiven Anteil der Immissionskonzentrationen gegeben werden.

2 Methodik

Die Auswertungen wurden auf das Jahr 1988 beschränkt, da für dieses Jahr die umfangreichsten meteorologischen Messungen (Sodar- und Fesselballonsondenmessungen neben Messungen an Hangstationen) vorlagen.

Im wesentlichen gliedert sich der vorliegende Bericht in eine Überblicksartige Darstellung der Jahresgänge (für das Jahr 1988) der an den Hangstationen erfaßten Meßgrößen (genauere Analysen der Jahresgänge sind anderweitig publiziert). Ob Schadstoffe advektiert werden, wird einerseits anhand der Windmessungen vor Ort, andererseits anhand der nach großräumigen Strömungen definierten Wetterlagenklassifikation nach STEINACKER untersucht. Es ist daher erforderlich, jene meteorologischen Größen, die die Verteilung der Schadstoffe im Tal selbst beeinflussen, ebenfalls in Abhängigkeit der genannten Wetterlagen zu untersuchen.

Die Analysen der Tagesgänge beziehen sich übersichtsartig auf das Gesamtjahr und im Detail auf die Periode der Sodarmessungen. Ergänzende Kenntnisse der täglichen Änderungen vermitteln zudem die Ergebnisse der Fesselballonmessungen.

Zuletzt werden die meteorologischen Verhältnisse und die Immissionskonzentrationen für ausgewählte Wetterlagen diskutiert: Einerseits die Periode der Fesselballonmessungen als Beispiel einer herbstlichen Schönwetterperiode, wo sich die örtlichen Gegebenheiten im allgemeinen am schönsten ausbilden können, andererseits eine mehrtägige Föhnperiode.

Da die vorliegende Arbeit auch dem nicht meteorologisch vorgebildeten Leser zugänglich sein soll, werden jeweils am Anfang der Kapitel 4.1 und 4.2 relevante meteorologische Begriffe und Zusammenhänge kurz erläutert.

3 Meßsysteme

Eine detaillierte Beschreibung der Meßstellen und der verwendeten Meßverfahren für die meteorologischen Größen findet sich bei KAISER (1989 & 1992a), die verwendeten Meßgeräte wurden von PLATTNER et. al. (1992) beschrieben. An dieser Stelle wird daher nur ein kurzer zusammenfassender Überblick gegeben.

Das Hangmeßnetz bestand aus insgesamt 7 Stationen (Ramsau: 600m, Bair: 850m, Talwiese: 1000m, Stockaste: 1560m, Sportalm: 1720 m, Ahorn: 1950m und Arbiskopf: 2133m) an meist nach Osten oder Süden hin orientierten Hängen (Ausnahme: Ahorn: Nordwesthang). An allen angeführten Stationen wurden Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck gemessen, an den Stationen Ramsau, Talwiese, Stockaste und Arbiskopf zudem Windrichtung und -geschwindigkeit. Die Immissionskonzentrationen wurden an den Stationen Ramsau, Talwiese, Stockaste und Ahorn gemessen. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die an den Hangstationen gemessenen Größen und die Zeiträume, für die die einzelnen Meßreihen vorliegen.

Meßprinzip des Sodars ist die Emission von Schallimpulsen, die an Dichteinhomogenitäten der Luft teilweise zurückgestreut werden (eine detaillierte Beschreibung der Arbeitsweise des Sodars und der Interpretation der vom Sodar gemessenen Daten findet sich in PIRINGER 1988). Gemessen werden die Intensität und die infolge des Dopplereffekts an bewegten Luftpaketen auftretende Frequenzverschiebung des rückgestreuten Signals. Die Zeitdifferenz zwischen ausgesandtem und empfangenem Signal gibt Aufschluß über die Höhe, aus der das Signal kommt. Aus der Frequenzverschiebung lassen sich dreidimensionale Windvektoren bestimmen. Die Echointensität und die Streuung der Vertikalkomponente des Windes geben qualitative Hinweise auf die Turbulenz der Atmosphäre. Dichteinhomogenitäten in der Atmosphäre hängen von der vertikalen Temperatur- und Windstruktur (letztere beeinflußt die Dichtegradienten) ab. Die Reichweite des Sodars ist daher wesentlich von diesen atmosphärischen Größen bestimmt. Die Häufigkeit, mit der gültige Signale empfangen werden, ist in Abhängigkeit von der Höhe über Grund in Abbildung 2 dargestellt. Die Häufigkeitsangaben beziehen sich auf den gesamten Meßzeitraum des Sodars. Grundsätzlich ist die Datendichte für die Echointensität besser als für die aus dem Dopplereffekt abgeleiteten Größen (also alles, was mit dem Wind zusammenhängt). Am Boden liegen für rund 80% aller Fälle gültige Messungen der Echointensität und für rund 60% Windvektoren vor. Mit zunehmender Höhe nimmt die Zahl der gültigen Messungen zunächst nur langsam, dann aber deutlich ab. 50% gültige Meßwerte der Echointensität liegen in einer Höhe von rund 650m, der Windvektoren in rund 550m über Grund vor.

Das Sodar war vom 27. 6. bis 24. 10. 1988 in Kaltenbach (etwa 10 km nördlich, also talabwärts vom Hangmeßnetz) im Einsatz.

Die Fesselballonsonde ermöglicht eine Direktmessung der vertikalen Temperatur-, Feuchte- und Windstruktur

der Talatmosphäre, je nach meteorologischen Verhältnissen bis in Höhen von einigen 100m bis maximal 1000m über Grund. Meßort war der Sodarstandplatz (Kaltenbach), Meßzeitraum eine herbstliche Schönwetterperiode vom 19. bis 23. 9. 1988.

4 Meteorologische Verhältnisse im Zillertal

4.1 Vertikale Temperaturverteilung und die Struktur der Turbulenz der Talatmosphäre

Einführende Bemerkungen zur Turbulenz der bodennahen Atmosphäre.

Aufwärts und abwärts gerichtete Luftbewegungen (Turbulenzen) bewirken einen Vertikaltransport und somit - bei bodennah emittierten Schadstoffen - eine "Verdünnung" von Schadstoffen. Vertikale Luftbewegungen bestimmen folglich sehr wesentlich die Verteilung von Luftschatdstoffen mit der Höhe und ihre Konzentration an einem gegebenen Ort.

Vertikale Luftbewegungen werden wesentlich von der Änderung der Lufttemperatur mit der Höhe bestimmt und wirken wiederum auf diese zurück: Wird z.B. Luft gehoben, so nimmt infolge ihrer Expansion (der Luftdruck nimmt mit zunehmender Höhe ab) ihre Temperatur ab, und zwar um 1°C pro 100m Höhenzunahme, solange keine Kondensation auftritt, bzw. um rund $0,5^{\circ}\text{C}$ pro 100m, sobald Wasserdampf kondensiert. Diese Temperaturabnahme nennt man den "trockenadiabatischen" bzw. den "feuchtadiabatischen Temperaturgradienten". (Umgekehrt verhält es sich beim Absinken: Infolge von Kompression wird die Luft dann im selben Maß erwärmt.)

Nimmt in der Atmosphäre die Temperatur um genau diesen Betrag mit der Höhe ab, so setzt die Luft Vertikalbewegungen keinen Widerstand entgegen, man spricht von "neutraler Schichtung".

Nimmt die Temperatur in der Atmosphäre um einen geringeren Betrag mit der Höhe ab, so setzt die Atmosphäre eventuellen Vertikalbewegungen einen Widerstand entgegen, da sich z.B. aufsteigende Luft stärker abkühlt als die Temperatur in der ruhenden Umgebungsluft abnimmt. Die gehobene Luft wird daher rasch kälter und somit dichter als die Umgebungsluft, sie sinkt sofort wieder auf ein Gleichgewichtsniveau; man spricht von "stabilen Schichtung".

"Inversionen" sind Luftsichten, in denen die Temperatur mit der Höhe zu- statt abnimmt. Sie sind ein Sonderfall von stabiler Schichtung und behindern vertikale Luftbewegungen besonders wirksam.

Nimmt hingegen die Temperatur mit der Höhe um mehr als $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (bzw. bei Kondensation um mehr als

0,5°C/100 m) ab, so liegt relativ dichtere über relativ weniger dichter Luft. Als Folge kommt es zu starken Vertikalbewegungen ("thermische Turbulenz"), man spricht von "labiler Schichtung".

Starke Vertikalbewegungen (z.B. hervorgerufen durch Wirbelbildung an Hindernissen bei starkem Wind, "dynamische Turbulenz", oder durch Erhitzung der bodennahen Luft infolge starker Einstrahlung, "thermische Turbulenz") führen umgekehrt immer rasch zu neutraler Schichtung: Im Fall von ursprünglich stabiler Schichtung durch Erwärmung in den unteren und durch Abkühlung in den höheren Luftsichten; im Fall von ursprünglich labiler Schichtung durch Abkühlung unten und Erwärmung oben.

Zusammenfassend sind starke Vertikalbewegungen, bzw. starke Turbulenz immer mit relativ großer Temperaturabnahme mit der Höhe und mit "guter Durchmischung" der Atmosphäre verbunden ("labile Schichtung"). Umgekehrt verhält sich "stabile Schichtung": geringe Temperaturabnahme bzw. im Fall von Inversionen Temperaturzunahme mit der Höhe, geringe Vertikalbewegungen und folglich "schlechte Durchmischung" der Atmosphäre.

Die vertikale Temperaturstruktur bzw. damit zusammenhängend auch die Struktur der Turbulenz der Talatmosphäre können anhand der Temperaturmessungen am Hang, der Sodar- und der Fesselballonmessungen studiert werden. Unsicherheiten und Vorzüge der verschiedenen Meßsysteme werden von KAISER (1989 & 1992a) eingehend diskutiert: Infolge von Meßgenauigkeiten und infolge des Einflusses der Umgebung auf die bodennahen Luftsichten ist der Schluß von Hangmessungen auf die Verhältnisse der freien Talatmosphäre mit großen Unsicherheiten verbunden. Immerhin entscheidet sich an einer zu diesen Ungenauigkeiten vergleichsweise relativ kleinen Temperaturänderung mit der Höhe, ob die Atmosphäre labil oder stabil geschichtet ist (aus physikalischen Gründen kann die Temperatur (mit Ausnahme der bodennächsten Schicht) mit zunehmender Höhe um höchstens 1°C pro 100 m, dem sogenannten adiabatischen Temperaturgradienten, abnehmen). Die Interpretation der Echointensität bzw. der Streuung des Vertikalwinds aus den Sodarmessungen ist nicht immer eindeutig (beide Größen geben Aufschluß über die Turbulenz in der Atmosphäre). Der Fesselballon wiederum kann nicht über längere Zeiträume eingesetzt werden und erfaßt zudem nur einen im Vergleich zur Talgeometrie relativ kleinen Höhenbereich.

Die Temperaturen an den Hangstationen zeigen deutlich den Einfluß der Strahlungsverhältnisse: Die Stationen Bair und Talwiese (Osthang) weisen vormittags bzw. tagsüber, die Station Sportalm nachmittags bis zum Sonnenuntergang im Vergleich zur freien Talatmosphäre zu hohe Temperaturen auf. Die an einem Nordwesthang befindliche Station Ahorn misst tagsüber vergleichsweise zu niedrige Temperaturen. Generell erfassen die Hangstationen die vertikale Temperaturstruktur nachts besser als tagsüber. Immerhin aber ist das Hangprofil in der Lage, die vertika-

le Temperaturstruktur als grobes qualitatives Maß richtig wiederzugeben (KAISER 1992a). Die Temperaturdaten an den Stationen Bair, Talwiese und Sportalm tagsüber sowie Ahorn generell sind aber mit besonderer Vorsicht zu interpretieren. Insbesondere bei der Berechnung von Temperaturgradienten, wo sich solche Ungenauigkeiten besonders störend bemerkbar machen, werden die genannten Stationen daher nicht verwendet. Ansonsten erlauben die berechneten Temperaturgradienten durchaus eine qualitative Beschreibung der vertikalen Temperaturstruktur insbesondere durch den Vergleich von Durchschnittswerten für verschiedene Monate oder Wetterlagen.

4.1.1 Jahresgang der vertikalen Temperaturstruktur

Der Jahresgang der vertikalen Temperaturstruktur sowie die Abhängigkeit des Tagesgangs von der Jahreszeit sind in KAISER (1989) für die Jahre 1986 und 1987 eingehend diskutiert. An dieser Stelle soll anhand der monatsweise gemittelten Temperaturgradienten (siehe Tabelle 1) ein kurzer Überblick auf die Verhältnisse von 1988 gegeben werden. Die Gradienten sind berechnet aus den Daten der Ramsau und der Stockaste (für den unteren Höhenbereich des Tals), der Stockaste und dem Arbiskopf (für den oberen Höhenbereich) und der Ramsau und dem Arbiskopf (für den gesamten Höhenbereich des Tals). Wie von KAISER (1992a) ausgeführt, werden an den Meßstellen Bair und Talwiese besonders tagsüber unrealistische Gradienten gemessen. Die genannten Stationen werden daher für die Berechnung der Temperaturgradienten nicht verwendet.

Tabelle 1: Monatsmittelwerte der Temperaturgradienten Ramsau-Stockaste (G_{RS}), Ramsau-Arbiskopf (G_{RA}) und Stockaste-Arbiskopf (G_{SA}) (°C/100 m) mit Angabe der Zahl der Fälle (N).

Monat	G_{RS}	N	G_{RA}	N	G_{SA}	N
Jan	-0,1	744	-0,2	539	-0,3	539
Feb	-0,3	696	-0,4	409	-0,6	409
Mrz	-0,5	647	-0,5	104	-0,7	104
Apr	-0,6	720	-0,7	637	-0,9	637
Mai	-0,6	614	-0,6	637	-0,7	721
Jun	-0,6	543	-0,6	710	-0,6	553
Jul	-0,5	585	-0,5	585	-0,6	744
Aug	-0,4	733	-0,5	582	-0,6	593
Sep	-0,4	682	-0,4	708	-0,5	694
Okt	-0,2	741	-0,3	744	-0,4	741
Nov	-0,1	720	-0,1	393	-0,3	393
Dez	-0,1	724	-	-	-	-

Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, nimmt 1988 (im Gegensatz zu den Vorjahren) im Monatsmittel die Temperatur immer mit der Höhe ab (ein negatives Vorzeichen bedeutet Temperaturabnahme, ein positives Vorzeichen Temperaturzunahme mit der Höhe). Das heißt freilich nicht, daß sich keine Inversionen im Tal befinden: Die an-

geföhrten Gradienten sind infolge des großen Höhenunterschieds der verwendeten Meßstellen und der oben diskutierten Unsicherheiten ein nur sehr grobes Maß für die vertikale Temperaturschichtung. Zudem wird hier keine Unterscheidung für verschiedene Tageszeiten vorgenommen (die Tageszeit hat einen deutlichen Einfluß auf die vertikale Temperaturstruktur).

Zwischen den Stationen Ramsau und Stockaste ist die Temperaturabnahme meist geringer als im gesamten Höhenbereich des Tals (zwischen Ramsau und Arbiskopf), was den bisherigen Untersuchungen entspricht, wonach stabile Schichtung, vor allem Inversionen meist auf den Höhenbereich unterhalb der Stockaste beschränkt sind. Die für den oberen Höhenbereich des Tals, zwischen Stockaste und Arbiskopf berechneten Temperaturgradienten sind immer labiler als im tieferliegenden Bereich. Die stärkste Temperaturabnahme tritt im April auf, wo zwischen Stockaste und Arbiskopf beinahe der adiabatische Gradient (= 1 °C/100m) erreicht wird. Während der Monate Jänner, November und Dezember herrscht im unteren Höhenbereich des Tals hingegen im Monatsmittel beinahe Isothermie.

4.1.2 Abhängigkeit der vertikalen Temperaturstruktur von der Wetterlage

Die Abhängigkeit des Temperaturgradienten von der Wetterlage wird ebenfalls anhand der Hangmessungen für das gesamte Jahr 1988 untersucht. Die Periode der Sodarmessungen ist für gesicherte Aussagen zu kurz und zudem nur auf die warme Jahreszeit beschränkt.

Einen Überblick über die für die verschiedenen Wetterlagen berechneten mittleren Temperaturgradienten gibt Tabelle 2. Verwendet wurde die strömungsorientierte Klassifikation von STEINACKER. Die genannte Klassifikation unterscheidet zwischen gradientschwachen Lagen (G), an denen nur geringe Luftdruckgegensätze und somit geringe Luftströmungen herrschen, variablen Lagen (V), denen keine bestimmte Strömungsrichtung zugeordnet werden kann (z.B. Tage mit Frontpassagen) und den Strömungslagen (NE, E, SE usw. bezeichnet die Richtung, aus der die Strömung erfolgt. Eine kurze Definition der Wetterlagenklassen nach STEINACKER ist in VERGEINER (1983) enthalten.

Grundsätzlich nimmt auch im Mittel über alle Wetterlagen die Temperatur mit der Höhe ab (infolge der räumlichen - große Höhendifferenz der Stationen - und zeitlichen Mittelbildung, ebenso werden verschiedene Tageszeiten hier nicht unterschieden).

Bezogen auf den gesamten Höhenbereich des Tals (Gradient Ramsau-Arbiskopf) ist die Temperaturabnahme mit der Höhe bei Nord- und Nordostlagen am größten. Der Grund dürfte darin liegen, daß bei derartigen Wetterlagen häufig relativ labil geschichtete Kaltluft antransportiert wird und zudem häufig Nordstau auftritt, wobei die Bevölkerung die nächtliche Inversionsbildung verhindert. Die relativ starke Temperaturabnahme mit der Höhe bei Strömungen mit östlichen Richtungskomponenten steht in Übereinstimmung mit Untersuchungen aus dem Inntal

(VERGEINER et. al. 1978). VERGEINER führt die starke Temperaturabnahme mit der Höhe bei Strömungen aus Nordost auf Nordföhneffekte im Inntal zurück. Bei Ostlagen fällt auf, daß hier die Temperaturabnahme mit der Höhe im unteren Höhenbereich des Tals ebenfalls recht groß, im oberen Bereich jedoch deutlich geringer ist. Dieser Umstand mag daraus erklärbar sein, daß Ostlagen häufig mit stabilen Hochdrucklagen verbunden sind und meist bei zunehmendem Hochdruckeinfluß auftreten (bei weiterer Entwicklung der Hochdrucklage dreht im allgemeinen die Strömung sehr rasch auf südliche Richtungskomponenten). Beginnender Hochdruckeinfluß ist mit Absinkinversionen noch in größeren Höhen verbunden, was im Mittel die Temperaturabnahme mit der Höhe in den oberen Höhenbereichen des Tals vermindern mag. Während der kalten Jahreszeit sind Ostströmungen zudem mit Advektion kontinentaler Kaltluft verbunden, die häufig in mittleren Höhen von einer Inversion begrenzt ist.

Am geringsten ist die Temperaturabnahme mit der Höhe bei Süd-, Südwest und Westlagen, vor allem im unteren Höhenbereich des Tals. Strömungen mit südlichen Richtungskomponenten sind verbunden mit zu Ende gehendem Hochdruckeinfluß, wobei im Alpenraum in der Regel stabile Schichtung auftritt (FICKER 1910; Ausnahme: wenn Föhn bis ins Tal durchgreift). Zudem ist die Bewölkung dann meist gering, was die nächtliche Inversionsbildung fördert. Bemerkenswert ist, daß auch bei Westlagen die Temperaturabnahme mit der Höhe besonders in den unteren Talbereichen sehr klein ist: In inneralpinen Tälern wird hier noch kein Staueffekt (Bewölkung) wirksam, so daß sich durch nächtliche Ausstrahlung Inversionen bilden können. Je nach Jahreszeit können bei Westlagen recht milde Luftmassen antransportiert werden, die - vor allem im Winter - über die im Tal befindliche, noch kalte Luft geführt werden könnten. Bemerkenswert ist weiters, daß besonders bei Strömungen aus Südost und Süd, weniger markant auch bei Strömungen aus Südwest und West, im oberen Höhenbereich des Tals die Temperatur deutlich mit der Höhe abnimmt; das bedeutet, daß bei den genannten Wetterlagen vor allem seichte, aber relativ starke Inversionen auftreten. Schon FICKER (1910) berichtet, daß Strömungen aus Süd (vor Föhnausbruch) durch langsames Abfließen von Kaltluft vom Gebirge weg gekennzeichnet sind, wodurch die Inversionsschicht in den Tälern immer dünner wird.

Gradientschwache Wetterlagen zeigen in den unteren Höhenbereichen des Tals überraschenderweise eher eine durchschnittliche Temperaturabnahme mit der Höhe, während im oberen Höhenbereich des Tals die Temperaturabnahme relativ gering ist: Nächtliche Inversionen, die sich bei gradientschwachen Wetterlagen bilden, erreichen offenbar recht große Höhen, zeigen aber, wie das für ein Alpental (im Gegensatz zur Ebene) typisch ist, nur eine relativ geringe Temperaturzunahme mit der Höhe.

Tabelle 2: Mittelwerte der Temperaturgradienten Ramsau-Stockaste ($G_{R,S}$), Ramsau-Arbiskopf ($G_{R,A}$) und Stockaste-Arbiskopf ($G_{S,A}$) ($^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$) in Abhängigkeit von der Wetterlage (nach STEINACKER)

Wetterlage	$G_{R,S}$	N	$G_{R,A}$	N	$G_{S,A}$	N
G	-0,4	1937	-0,4	1513	-0,4	1645
V	-0,4	2946	-0,5	2310	-0,6	2364
NE	-0,7	288	-0,7	336	-0,7	216
E	-0,7	72	-0,5	72	-0,3	72
SE	-0,4	177	-0,6	168	-0,8	153
S	-0,1	360	-0,3	331	-0,8	331
SW	-0,1	576	-0,3	563	-0,6	563
W	-0,2	725	-0,4	371	-0,6	412
NW	-0,5	924	-0,6	312	-0,6	300
N	-0,7	144	-0,7	72	-0,7	72

4.1.3 Abhängigkeit der vom Sodar gemessenen Streuung der Vertikalkomponente des Windes von der vertikalen Temperaturstruktur und von der Windgeschwindigkeit

Die Streuung der Vertikalkomponente des Windes ist ein Maß für die turbulente Durchmischung der Atmosphäre. Auch die Echointensität hängt von Dichteunterschieden in der Atmosphäre ab und ist deshalb eine Größe, die Rückschlüsse auf das turbulente Verhalten der Atmosphäre erlaubt: So sind infolge von Konvektion - also starker Überhitzung der bodennahen Luftschicht tagsüber - die Dichteunterschiede und somit die Echointensität groß. Jedoch treten auch bei Inversionen große Dichtegradienten - und somit hohe Werte der Echointensität - auf, sodaß die Zuordnung hoher Werte der Echointensität nicht eindeutig ist. Da hier zunächst statistische Zusammenhänge von Interesse sind, eine Interpretation der Echointensität aber nur mit zusätzlichen Informationen möglich ist, wird die Untersuchung in diesem Abschnitt auf die Streuung des Vertikalwinds beschränkt.

Die Turbulenz in der Atmosphäre und somit die Streuung des Vertikalwinds als ihr Maß lassen sich in einen thermischen und einen dynamischen (mechanischen) Anteil unterteilen: Thermische Turbulenz tritt im wesentlichen tagsüber auf als Folge von starker Temperaturabnahme mit der Höhe (wenn infolge starker Einstrahlung die bodennahe Luftschicht überhitzt ist, also die Temperatur um mehr als $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ abnimmt). Zudem wirken Windscherung oder Wirbelbildung an Strömungshindernissen turbulenzbildend (dynamische Turbulenz; nachts, bei fehlender Einstrahlung, tritt im wesentlichen nur dynamische Turbulenz auf). Vertikalbewegungen wiederum wirken auf den Temperaturgradienten zurück: Durch Kompression bei Absinkbewegungen bzw. Expansion beim Aufsteigen ändert ein Luftpaket seine Temperatur um $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, dem so genannten adiabatischen Temperaturgradienten.

Vor der Interpretation der Sodarmessungen war es erforderlich, den Zusammenhang zwischen der Streuung des Vertikalwinds σ_w (als Maß für die Turbulenz insgesamt) und dem Temperaturgradienten sowie der Windgeschwin-

digkeit (als Maß für die dynamische Turbulenz) zu untersuchen (KAISER, 1992b): Es zeigte sich, daß die Turbulenz- und somit die Durchmischung der bodennahen Atmosphäre - bei Werten von σ_w zwischen 10 bis höchstens 20 recht gering ist. Im allgemeinen ist dann mit einer Inversion im Tal zu rechnen. Nachts, bei schwachem Wind und folglich kleiner dynamischer Turbulenz, sind die σ_w -Werte im Mittel immer - also auch, wenn die Temperatur mit der Höhe abnimmt - sehr klein (Werte um 10).

4.1.4 Tagesgang der vertikalen Temperaturverteilung und der Struktur der Turbulenz der Talatmosphäre

Der Tagesgang der vertikalen Temperaturstruktur, wie er sich aus den Hangmessungen ergibt, ist aus den Abbildungen 3a (für das gesamte Jahr 1988) und 3b (für die Periode der Sodarmessungen) ersichtlich. Dargestellt sind stündliche Profile der vertikalen Temperaturstruktur. Sie zeigen den bereits von KAISER (1992a) nachgewiesenen Einfluß der Strahlungsverhältnisse auf die Meßwerte: Nach Sonnenaufgang steigt die Temperatur am besonnten Osthang (Stationen Bair und Talwiese) zunächst rascher als in der Ramsau, sodaß die Temperatur vom Talboden zu den genannten Stationen nach Sonnenaufgang stärker zunimmt als noch um 6 Uhr. Nun steigt die Temperatur der Talatmosphäre nach Sonnenaufgang (wenn man von advektiven Vorgängen absieht) im wesentlichen durch Energiezufuhr vom Talboden und von den besonnten Hängen, aber auch durch adiabatische Erwärmung infolge der das Hangwindsystem teilweise kompensierenden Absinkbewegungen in Talmitte (WHITEMAN 1980 & 1990). Die Erwärmung vom Talboden her kommt im wesentlichen den bodennahen Luftschichten, die adiabatische Erwärmung hingegen in erster Näherung gleichmäßig der gesamten absinkenden Luftschicht zugute. Zum mindesten in einigen 100m über Grund sollte aber die Inversion vom Boden her aufgelöst werden durch Aufbau einer konvektiven (labil geschichteten) Luftschicht, d.h. die Schichtung sollte vom Boden her labiler und nicht - wie es das Hangprofil vermittelt - stabiler werden. Während sich die Temperaturzunahme an der Station Bair in weiterer Folge wieder verlangsamt, bleibt die durch Hochwald geschützte Meßstelle Talwiese, solange sie besonnt wird, zu warm.

Im Jahresmittel ist die Talwiese jedoch auch während der Abendstunden wärmer als Bair (Abbildung 3a: 16 bis 19 Uhr). Zu dieser Zeit ist der Osthang bereits beschattet und sollte daher kälter sein als die freie Talatmosphäre, was auch aus den Windverhältnissen ersichtlich ist: Der Hangabwind (abfließende relativ kalte Luft) ist an der Talwiese in den Abendstunden am besten ausgeprägt (siehe Abschnitt 4.2.3). Während der hauptsächlich in der wärmeren Jahreszeit gelegenen Periode der Sodarmessungen (Abbildung 3b) verschwindet die Temperaturzunahme zwischen Bair und Talwiese während der Abendstunden. Dennoch reicht das mittlere Temperaturmaximum in Ramsau nicht für eine adiabatische Schichtung (also eine Temperaturabnahme von $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) zwischen Talboden und Arbiskopf:

Geht man davon aus, daß die Hangmessungen um 6 Uhr am ehesten die Verhältnisse der freien Talatmosphäre erfassen (der Hangwind kommt zu diesem Zeitpunkt zum Erliegen, die Temperaturunterschiede zwischen Hang und freier Talatmosphäre können daher nur gering sein; siehe Abschnitt 4.2.3), müßte die Temperatur in Ramsau bis auf 21,13 °C steigen, damit die Temperatur um 1 °C/100m bis zum Arbiskopf abnimmt (unveränderte Temperatur am Arbiskopf vorausgesetzt). Da jedoch auch am Arbiskopf die Temperatur tagsüber steigt (von 5,8 °C um 6 Uhr auf 8,7 °C um 15 Uhr, dem Zeitpunkt des Temperaturmaximums; dieser Wert mag aber durch lokale Effekte beeinflußt sein), müßten in Ramsau sogar 24,03 °C erreicht werden. Tatsächlich wird aber nur ein mittleres Temperaturmaximum von 20,1 °C gemessen. (Dieser Abschätzung liegt die Annahme zugrunde, daß im Höhenbereich zwischen Talboden und Arbiskopf keine Kondensationsprozesse stattfinden, vertikale Durchmischung also durch den trockenadiabatischen Temperaturgradienten beschrieben werden kann; da hier die Zeit des Temperaturmaximums von Interesse ist, sich der Arbiskopf zudem doch noch deutlich unter dem Kammlinie der umliegenden Berge befindet, dürfte diese Annahme im allgemeinen gerechtfertigt sein).

Es dürfte offensichtlich häufig auch tagsüber ein Rest der Inversion bzw. eine stabile Schicht im Zillertal zurückbleiben, besonders während der kalten Jahreszeit. Dies mag erstens auf Advektion stabil geschichteter Luft aus dem Inntal (besonders im Winter) zurückzuführen sein: Immerhin zeigen Untersuchungen aus dem Inntal (VERGIERER, 1978), daß dort in rund einem Drittel aller Tage (bezogen auf das Jahr) "stark stabile" Schichtung herrscht. Während 30 untersuchter Winterhalbjahre (1947/48 bis 1976/77) dauerte die Inversion in rund 60% aller Inversionsperioden länger als zumindest 1 Tag, in rund 6% sogar länger als 10 Tage ununterbrochen an. Die längste ununterbrochene Andauer der Inversion im Inntal während dieser 30-jährigen Beobachtungsperiode wurde von 8. November bis 6. Dezember 1953 (29 Tage) gefunden. Zweitens mag die adiabatische Erwärmung der Luft im Tal infolge der tagsüber gut ausgeprägten Absinkbewegungen (siehe Abschnitt 4.2.3) der Inversionsauflösung entgegenwirken (das Absinken einer stabil geschichteten Luftsicht wirkt sogar inversionsbildend). Genaue Aussagen über den Höhenbereich, in der dieser "Inversionsrest" im Zillertal häufig zurückbleibt, seine Vertikalerstreckung und Intensität sind infolge der Unsicherheiten bei den Hangmessungen jedoch nicht möglich.

Ein derartiger, häufig im Tal verbleibender Inversionsrest mag aber die meteorologische Bedingung für eine relative "Anreicherung" von Vorläufersubstanzen sein, welche bei Wirkserwerben photochemischer Prozesse zu erhöhten Ozonkonzentrationen in mittleren Höhenlagen führen könnten (siehe dazu SMIDT et al. 1990, SMIDT et al. 1992 und PUXBAUM et al. 1990).

Die über die gesamte Meßperiode des Sodars gemittelten Profile der Echointensität und der Streuung der Vertikal-

komponente des Windes sind in Abbildung 4 in Abhängigkeit von der Tageszeit dargestellt. Es ist zu beachten, daß diese Abbildungen einen systematischen Fehler beinhalten: Wie in Abbildung 2 gezeigt, nimmt die Datendichte der Sodarmessungen mit zunehmender Höhe über Grund ab. Die Abnahme ist unter anderem von den Dichteunterschieden in der Atmosphäre und der Windgeschwindigkeit bestimmt. Werden alle vorliegenden Meßprofile gemittelt, erhält man für die höheren Schichten eine systematische Auswahl solcher Wetterlagen, wo die Windgeschwindigkeit in tieferen Schichten gering und die Echointensität in größeren Höhen relativ groß ist. Die Alternative wäre, nur jene Profile, die eine bestimmte vorgegebene Mindesthöhe über Grund erreichen, für die Mittelbildung heranzuziehen. Dann aber erhält man umgekehrt auch wieder eine systematische Datenauswahl, weil Fälle mit größerer Windgeschwindigkeit und niedriger Echointensität in höheren Schichten ausgeschieden werden. Um die Information in bodennahen Schichten möglichst umfassend zu belassen, wurden alle Daten verwendet und gemittelt.

Deutlich ist in Abbildung 4 die nach Sonnenaufgang einsetzende Konvektion am starken Anstieg der Echointensität erkennbar. Die höchsten Werte der Echointensität werden um 10 Uhr erreicht. Die Streuung des Vertikalwinds hat hingegen bis ca. 11 Uhr noch sehr kleine Werte. Dies liegt offensichtlich daran, daß nach einsetzender Sonneneinstrahlung die bodennächsten Schichten sehr rasch erhitzt werden, es setzt Konvektion ein. Infolge der darüber aber noch im Tal befindlichen Inversion ist diese konvektive Schicht auf ein zu kleines Luftvolumen begrenzt, als daß sich großräumigere Turbulenzen ausbilden können. Erst nach 11 Uhr hat die konvektive Schicht eine solche Mächtigkeit erreicht, daß die Turbulenz rasch einen größeren (vertikalen) Scale erreicht. Als Folge davon werden die Dichteinhomogenitäten wieder etwas ausgeglichen, sodaß die Echointensität zunächst geringfügig, nach etwa 14 Uhr, wenn die vertikale Durchmischung am stärksten ist, deutlich abnimmt. Generell sind die höchsten Werte der Echointensität auf einen Höhenbereich von maximal 180m über Grund beschränkt. Darüber nimmt die Echointensität mit zunehmender Höhe zunächst ab, dann aber wieder zu (das Minimum der Echointensität ist in der Abbildung durch die strichlierte Isolinie hervorgehoben). Die Höhe, in der die Echointensität wieder zunimmt, liegt um 10 Uhr bei rund 450m und steigt bis 14 Uhr bis gegen 700m über Grund an. Auch die Streuung des Vertikalwinds zeigt tagsüber eine Abnahme in Höhen zwischen rund 300m und 500m über Grund. Die Meßwerte aus diesen Höhen sind jedoch mit großer Vorsicht zu interpretieren. Immerhin könnte beides ein Hinweis auf eine häufig in diesen Höhen verbleibende stabile Schicht sein.

Schon nach 16 Uhr ist an der neuerlichen Zunahme der Echointensität der beginnende Inversionsaufbau erkennbar. Die Streuung des Vertikalwinds ist zu dieser Zeit noch recht groß. Der beginnende Inversionsaufbau ist zunächst offensichtlich mit deutlicher Turbulenz verbunden. Mit

weiterem Anwachsen der Inversion nehmen die Vertikalbewegungen dann aber rasch auf sehr geringe Werte ab.

Die Abnahme der Echointensität während der Nacht, besonders in der zweiten Nachhälfte zwischen 2 und etwa 5 Uhr, steht in Zusammenhang mit der Abnahme der Windgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 4.2.3 und KAISER 1992a).

4.2 Windverhältnisse und ihre Vertikalstruktur

Einführende Bemerkungen zur Thermik und Dynamik der bodennahen Atmosphäre in Gebirgstälern - "Berg-Talwindsystem" und "Hangwindsystem"

Die Geometrie eines Bergtals bewirkt, daß der gleichen bestrahlten Fläche im Bergtal ein deutlich kleineres Luftvolumen entspricht als in der Ebene. Die Talatmosphäre erwärmt sich daher tagsüber stärker bzw. kühlt sich nachts stärker ab als die Luft über der Ebene. Diese Temperaturunterschiede zwischen Bergtal und Ebene sind die Ursache eines tagesperiodischen Windsystems: Tagsüber strömt Luft von der Ebene ins Tal und das Tal aufwärts, man spricht von "Talwind" oder "Taleinwind". Nachts erfolgt die Strömung vom Tal in die Ebene bzw. das Tal hinab - "Bergwind" bzw. "Talauswind". Talaus- und Taleinwind wehen parallel zur Talrichtung und werden als "Berg/Talwind-", "Talaus/Taleinwind-" oder kurz "Talwindsystem" bezeichnet.

Diesem - relativ großräumigen - Windsystem ist ein weiteres, kleinräumigeres Windsystem "überlagert": Infolge der Erwärmung der Hänge tagsüber bzw. ihrer Abkühlung nachts strömt - in einer meist relativ seichten, dh. nur bodennahen Schicht - tagsüber warme Luft die Hänge nach oben ("Hangaufwind") bzw. nachts relativ kalte Luft nach unten ("Hangabwind"), man spricht vom "Hangwindsystem". Hangwinde wehen in Richtung der Falllinien eines Hangs, also in erster Näherung meist quer zur Richtung des Haupttals. Sie können in Rinnen oder Seitentälern "kanalisiert" werden und dort so in ein Berg-/Talwindsystem des Seitentals übergehen.

Das Zusammenwirken beider Windsysteme und ihre Entwicklung im Lauf eines Tages sind in Abbildung 13a in idealisierter Form dargestellt. Beide Windsysteme werden hervorgerufen durch die Geometrie eines Tals und des daraus resultierenden thermischen Verhaltens und werden daher als "autochthon" bezeichnet.

4.2.1 Jahresgang und jahreszeitliche Unterschiede im Tagesgang

Die Abbildungen 5a bis d enthalten grafische Darstellungen der Häufigkeitsverteilungen von Windrichtung und -geschwindigkeit, wie sie für die Hangstationen für das Sommer- (April bis September) und Winterhalbjahr (Oktober bis März) berechnet wurden.

Die Ramsau (Abbildung 5a) zeigt zwei Häufigkeitsmaxima der Windrichtungsverteilung: Eines für Südwind (Talauswind), eines für Nordost- bis Ostwind. (Letzteres ent-

spricht aber nicht der Talrichtung: das Zillertal ist im Bereich der Ramsau näherungsweise Nord-Süd gerichtet, der Taleinwind sollte daher aus Norden wehen. Gerade diese Windrichtung wird aber nur sehr selten gemessen.) Wie schon von KAISER (1992a) angedeutet, dürften die Strömungsverhältnisse an der Station Ramsau bei Taleinwind (besonders bei höheren Windgeschwindigkeiten) durch vorgelagerte Gebäude stark beeinträchtigt werden. Bei schwachem bzw. talabwärts gerichtetem Wind hingegen dürften die Messungen repräsentativ sein.

Die am Hang gelegenen Stationen weisen Maxima der Windrichtungsverteilung in Hangab- (W und NW auf der Talwiese, Abbildung 5b, bzw. NE auf der Stockaste, Abbildung 5c) und Hangaufrichtung (östliche Richtung auf der Talwiese bzw. SW und S auf der Stockaste) auf.

Im Winterhalbjahr sind Talauswind bzw. Hangabwinde häufiger als im Sommerhalbjahr, Talein- bzw. Hangaufwind verhalten sich komplementär.

Einen Sonderfall bildet die Bergstation Arbiskopf (Abbildung 5d): Hier überwiegen zu beiden Halbjahreszeiten Winde aus Süd. Geringe jahreszeitliche Unterschiede treten auf bei Winden aus Nordwest (im Winterhalbjahr häufiger als im Sommerhalbjahr) und aus östlichen Richtungen (im Winterhalbjahr seltener als im Sommer; Abbildung 5d).

Die Windgeschwindigkeiten sind besonders im unteren Höhenbereich des Tals sehr klein: In der überwiegenden Zahl der Fälle messen die Stationen Ramsau und Talwiese Windstille oder Windgeschwindigkeiten von 1m/s. An beiden Stationen ist Windstille im Sommer weniger häufig als im Winter (zugunsten der höheren Windgeschwindigkeiten). An den höher gelegenen Stationen treten größere Windgeschwindigkeiten häufiger auf, Calmen (Windstille) sind nur mehr selten. Während die Stockaste im jahreszeitlichen Vergleich noch das für den Talbereich typische Verhalten zeigt (im Sommer sind die niedrigen Windgeschwindigkeiten weniger häufig, die höheren Windgeschwindigkeiten häufiger als im Winter), zeigt der Arbiskopf den Einfluß der überregionalen Zirkulationsverhältnisse: Hohe Windgeschwindigkeiten sind hier im Winterhalbjahr häufiger.

Die tageszeitlichen Unterschiede (Überwiegen von Talauswind bzw. Hangabwind nachts bzw. Taleinwind und Hangaufwind tagsüber) sind im Sommerhalbjahr deutlicher ausgeprägt als im Winterhalbjahr. Am Arbiskopf treten Winde aus Süd tagsüber häufiger auf als nachts. Dieses Phänomen ist ebenfalls im Sommerhalbjahr deutlicher ausgeprägt als im Winterhalbjahr (Abbildungen 6a - d).

Die tageszeitlichen Unterschiede der Windgeschwindigkeit (tagsüber sind höhere Windgeschwindigkeiten häufiger, Calmen seltener als nachts) sind ebenfalls im Sommerhalbjahr deutlicher ausgeprägt. Auch die tageszeitlichen Unterschiede der Windgeschwindigkeit nehmen mit zunehmender Seehöhe ab, am Arbiskopf sind tageszeitliche Unterschiede kaum mehr erkennbar (Abbildung 6a - d).

4.2.2 Abhängigkeit der Windverhältnisse von der Wetterlage

Die Abhängigkeit der Windrichtung von der Wetterlage (gemäß der Klassifikation von STEINACKER) wird für den Bereich des Tals und für den Arbiskop untersucht. Es soll gezeigt werden, inwieweit die Messungen vor Ort die großräumigen Strömungsverhältnisse erkennen lassen, oder ob lokale Effekte überwiegen.

Da die Windgeschwindigkeit im gesamten Untersuchungsgebiet im allgemeinen sehr klein ist und wenig Variationsbreite aufweist, wird die Untersuchung auf die Windrichtung beschränkt.

Da die Windmessungen in der Ramsau für Taleinwind problematisch sind, werden die Verhältnisse im Bereich des Tals anhand der Sodarmessungen beschrieben, obwohl hier kein volles Meßahr vorliegt. Verwendet werden die Meßwerte aus der 10. Schicht, die einer Höhe von rund 420m über Grund entspricht. Zu beachten ist, daß die Talrichtung im Bereich des 10km entfernten Sodarstandorts gegenüber der Ramsau um etwa 40° nach Westen hin gedreht ist: Der Taleinwind erfolgt daher aus Nordwest bis Nordnordwest, Talauswind etwa aus Südost.

Infolge der kurzen Sodarmeßperiode liegen manche Wetterlagen nur in Einzelfällen vor (z.B. Südostlage nur in zwei Fällen - für Südostlagen ist daher keine Aussage für den Talbereich möglich). Die Zahl der Fälle ist in den Abbildungen in Klammer angeführt.

Recht ähnlich sind die Häufigkeitsverteilungen der Windrichtung im Tal (Abbildung 7) bei gradientschwachen und variablen Wetterlagen, sowie bei Strömung aus West: Die Strömung im Tal ist im wesentlichen streng talparallel gerichtet, Talein- und Talauswind sind annähernd gleich häufig.

Bei Süd-, Südwest-, interessanterweise aber auch bei Nordströmung sind talauswärts gerichtete Winde - also Winde aus dem Südostsektor - deutlich häufiger als taleinwärts gerichtete. Wie die Analyse der Strömungsverhältnisse bei Föhn (Abschnitt 6.2) zeigt, ist die große Häufigkeit von Winden aus Südost bei Süd- und Südwestlagen in den seltensten Fällen Folge eines Durchgreifens der Höhenströmung, sondern vielmehr auf einen häufig im Tal verbleibenden seichten Kaltluftsee zurückzuführen, der - auch tagsüber - langsam talauswärts fließt (vgl. FICKER 1910). Das häufige Auftreten solcher seichter Kaltluftseen bei den genannten Wetterlagen ist auch aus den Statistiken der vertikalen Temperaturgradienten (Abschnitt 4.1.2) deutlich ersichtlich.

Das häufige Auftreten von Winden aus dem Südostsektor bei Nordlagen - also gegen die großräumige Strömung - mag aus Nordstaueffekten erklärbar sein: Infolge meist starker Bewölkung und daher fehlender Sonneneinstrahlung ist der Antrieb für den Taleinwind relativ gering. Zudem mag sich infolge der großräumigen Strömungsrichtung im Talbereich eine stagnierende Kaltluftschicht ausbilden, die ebenfalls häufig langsam talauswärts fließen könnte.

Bei Nordwest-, Nordost- und Ostlagen ist Talauswind relativ selten. Bei Nordost- und Ostlagen fällt in den Häufigkeitsverteilungen der Windrichtung im Tal zudem ein tertäres Häufigkeitsmaximum bei Winden aus Nordost auf, da bei derartigen Wetterlagen die vertikale Temperaturabnahme im Tal am stärksten ist (siehe Abschnitt 4.1.2), die Atmosphäre also relativ labil geschichtet ist, könnten die Winde aus Nordost auf ein Durchgreifen der Höhenströmung zurückzuführen sein.

Die Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen am Arbiskop (ebenfalls bezogen auf die Periode der Sodarmessungen; Abbildung 8) zeigen im allgemeinen das gewohnte Häufigkeitsmaximum bei Winden aus Süd, besonders bei Süd-, Südwest- und Südostlagen. Bei den genannten Wetterlagen ist dieses Häufigkeitsmaximum offensichtlich auch synoptisch bedingt. Bei Nord- und Nordostlagen ist das Maximum von Winden aus Süd nur mehr angedeutet.

Die übrigen Windrichtungen kommen am Arbiskop bei gradientschwachen und variablen Wetterlagen, sowie bei Strömungslagen aus südlicher Richtung jeweils etwa gleich selten vor. Bei West- und Nordwestlagen sind Winde aus westlichen und nordwestlichen Richtungen, bei Nord- und Nordostlagen solche aus nördlichen Richtungen relativ häufig.

Aus den Statistiken der vertikalen Temperaturgradienten und der Windrichtungsverteilung ergibt sich folgendes zusammenfassendes Bild: Mit Ausnahme von Nordost- und Ostlagen führt die Talatmosphäre im Zillertal immer ein recht ausgeprägtes "Eigenleben". Dieses ist gekennzeichnet durch den bekannten Wechsel zwischen talein- und talauswärts gerichteten Winden. Bei großräumigen Strömungen aus südlichen Richtungen hält sich häufig ein flacher Kaltluftsee mit talauswärts gerichteten Windkomponenten. Bei Nordlagen bildet sich Taleinwind relativ selten, es überwiegen ebenfalls talauswärts gerichtete Winde. Ein Durchgreifen der großräumigen Strömung dürfte sehr selten sein, am ehesten bei Strömungen aus Nordost und Ost, eventuell auch bei Nordwestströmung.

Selbst am Arbiskop sind die Windverhältnisse grundsätzlich bei allen Wetterlagen noch durch lokale Verhältnisse, die zu Winden aus Süd führen, beeinflußt. Die großräumigen Strömungsverhältnisse dominieren lediglich bei Nord- und Nordostlagen; bei Südost-, Süd- und Südwestlagen ist anhand der Windrichtung allein eine Trennung von lokalen und großräumigen Phänomenen nicht möglich. West-, Nordwest und Ostlagen lassen die großräumigen Verhältnisse erkennen, es überwiegen jedoch lokale Effekte.

4.2.3 Windverhältnisse im Tagesgang

Eine vereinfachte Darstellung der tageszeitlichen Änderungen der Windsysteme wird in den Abbildungen 9 (häufigste Windrichtung) und 10 (mittlere Windgeschwindigkeit des Horizontalwinds) gegeben. Abbildung 11 zeigt den mittleren Tagesgang des Vertikalwinds. Gekennzeichnet sind aufsteigende und absinkende Bewegungen. Die Angaben der Windgeschwindigkeit in den Abbildung 10 und

11 erfolgen in cm/s. Wesentlich detailliertere Informationen geben Häufigkeitsverteilungen von Stundenmittelwerten der Windrichtungen an den einzelnen Meßstationen bzw. in ausgewählten Höhenbereichen aus den Sodarmessungen. Diese werden von KAISER (1992b) ausführlicher behandelt.

Die Meßwerte des Sodars und jene an der Ramsau (nur nachts) ermöglichen das Studium der Berg-Talwindzirkulation. Tagsüber, bei taleinwärts gerichteter Strömung, sind die Meßwerte an der Ramsau infolge von Störungen durch vorgelagerte Gebäude verfälscht. Bis etwa 7 Uhr zeigen Sodar und Ramsau überwiegend talauswärts gerichtete Winde, in Ramsau tritt sehr häufig Windstille auf (in rund 50% der Fälle). Zwischen 8 und 11 Uhr erfolgt im Mittel die Umstellung von Talaus- auf Taleinwind, zunächst am Talboden, dann auch in den höheren Bereichen. Die Messungen an der Ramsau zeigen das Aufhören des Talauswinds etwa eine Stunde vor den Sodarmessungen. Ab 11 Uhr überwiegt im gesamten vom Sodar erfaßten Höhenbereich Taleinwind. Zwischen 19 und 22 Uhr erfolgt dann die Umstellung von Talein- zu Talauswind, wieder zunächst an der Ramsau und in bodennahen Schichten, erst später auch in höheren Schichten. Die jeweilige Umstellung des Berg-Talwindsystems scheint gemäß Abbildung 9 recht abrupt vor sich zu gehen, weil hier nur die häufigste Windrichtung dargestellt ist, Änderungen in den Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen, die mit der sich vollziehenden Umstellung einhergehen, jedoch nicht ersichtlich sind. Tatsächlich sind die Umstellungsphasen nahe dem Talboden mit charakteristischen Winddrehungen verbunden (KAISER 1992b): Morgens werden an der Ramsau und an den untersten Meßniveaus des Sodars (besonders in 60m über Grund) häufig Winde aus östlichen Richtungen, abends am Sodarstandort solche aus westlichen Richtungen gemessen (erfaßt vom Fesselballon und - weniger deutlich - von den untersten Meßniveaus des Sodars, siehe dazu Abschnitt 6.1): Solange morgens der nach Westen orientierte Hang beschattet ist, strömt häufig relativ kalte Luft in bodennahen Schichten quer zum Tal in Richtung Westen (Ostwind an der Ramsau), während in höheren Schichten noch Talauswind weht. Generell aber ist die Windgeschwindigkeit morgens sehr niedrig - offensichtlich zu niedrig, als daß diese morgendliche Winddrehung vom Fesselballon erfaßt werden konnte (Abschnitt 6.1). Umgekehrt verhält es sich abends: Dann wird der nach Osten hin orientierte Hang beschattet und es strömt die relativ kalte Luft quer zum Tal nach Osten (Westwind am Sodarstandort, siehe auch Abschnitt 6.1). In höheren Schichten weht dann noch Taleinwind. Die Auswertungen der Sodarmessungen lassen vermuten, daß neben dem bodennahen Abfluß von kalter Luft vom jeweils beschatteten Hang zudem in den unteren Höhenbereichen die Luft regelrecht zum besonnenen Hang hin "gesaugt" wird (dieses Phänomen ist abends deutlicher ausgeprägt als morgens; insbesondere die Fesselballonmessungen zeigen morgens vielfach Windstille oder nur schwache Winde aus uneinheitlichen Richtungen, siehe Abschnitt 6.1).

Die morgendliche und abendliche Umstellung des Hangwindsystems (gemessen an den Stationen Talwiese und Stockaste, Abbildung 9) erfolgt deutlich früher (besonders abends an der Talwiese, die schon sehr früh beschattet wird) und rascher als jene des Berg-Talwindsystems. Die stündlichen Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen (KAISER 1992b) zeigen während der Umstellungsphasen lediglich einen kurzen Anstieg der Calmenhäufigkeit. Der Hangaufwind hält an beiden Meßstellen den ganzen Tag über solange an, wie sie sonnig werden. Schon ab 17 Uhr an der Talwiese (Osthang), ab 20 Uhr dann an der Stockaste (Südhang) ist der Hangabwind voll ausgeprägt. Während der Hangabwind an der Stockaste dann die ganze Nacht hindurch anhält, nimmt an der Talwiese die Calmenhäufigkeit nach 20 Uhr rasch auf Werte um 70%, während der zweiten Nachhälfte sogar auf rund 80% zu.

Gemäß Abbildung 10 ist die Windgeschwindigkeit in den Morgenstunden im gesamten, vom Sodar erfaßten Höhenbereich sehr klein (meist weniger als 1 m/s), auch die Vertikalbewegungen sind gering (Abbildung 11). Mit Einsetzen des Hangaufwinds (zunächst am Osthang, Talwiese) setzen sofort Absinkbewegungen im gesamten vom Sodar erfaßten Höhenbereich ein, es herrscht aber noch Talauswind. Die Absinkbewegungen kompensieren den Massenverlust durch die Hangaufwinde (Divergenz quer zur Talrichtung). Zudem mag auch Divergenz in Talrichtung auftreten, wenn im Haupttal noch Talabwind, in den thermisch rascher reagierenden Seitentälern aber schon Talauwind weht. Auch bei dann später voll ausgeprägtem Taleinwind im Haupttal kann Divergenz in Talrichtung auftreten, wenn ins Tal weniger Luft einfließt als durch den Talauwind abtransportiert wird (siehe VERGEINER 1983). In diesem Zusammenhang mögen die Verhältnisse talawärts, im unteren Inntal von Interesse sein: Untersuchungen liegen hier aus dem Raum Wörgl vor (ÖSTERREICHISCHE INSTITUT FÜR RAUMLANPLUNG 1986). An der Meßstelle Wörgl-Pumpenhaus erfolgt die Drehung von Talaus- auf Taleinwind im Jahr im Mittel erst um 12 Uhr (Winterhalbjahr: 14 Uhr, Sommerhalbjahr: 11 Uhr). Eine quantitative Umlegung dieser Zeitangaben auf die Meßperiode des Sodars ist nicht direkt möglich, jedenfalls erfolgt die Winddrehung im unteren Inntal deutlich später als im Zillertal, wodurch - je nach den Windgeschwindigkeiten in den betrachteten Tälern - Divergenz im Übergangsbereich vom Inn- zum Zillertal auftreten kann. Die deutlichen Absinkbewegungen, wie sie aus Abbildung 11 tagsüber erkennbar sind, kompensieren diese Divergenz.

Der Taleinwind im Zillertal ist zunächst nur mit einer geringfügigen Zunahme der Windgeschwindigkeit verbunden. Erst ab den Mittagsstunden nehmen die Geschwindigkeit des Horizontalwinds, besonders aber die Absinkbewegungen deutlich zu. Die höchste Windgeschwindigkeit (Werte zwischen 3 und mehr als 4 m/s) tritt im Mittel zwischen 15 und 20 Uhr auf, zu einer Zeit, wo am beschatteten Osthang bereits Hangabwind einsetzt. Der einsetzende Hangabwind ist mit schlagartigem Aufhören der Absink-

bewegungen verbunden. Noch vor Umstellung von Talein- zu Talauswind, aber bei bereits voll ausgeprägtem Hangabwind setzen im gesamten Höhenbereich deutliche Aufsteigbewegungen ein (infolge von Konvergenz quer zum Tal wegen der Hangwinde und - bei ausgeprägtem Talauswind - infolge von Konvergenz in Talrichtung, wenn mehr Luft in obere Talbereiche einfließt als aus dem Tal ausfließen kann). Auch hier ist ein Vergleich mit dem unteren Inntal von Interesse: Gemäß der oben zitierten Studie des ÖSTERREICHISCHEN INSTITUTES FÜR RAUMLANPLUNUNG (1986) erfolgt im Jahresmittel in Wörgl die Umstellung von Talein- auf Talauswind erst um 23 Uhr (Sommerhalbjahr: 1 Uhr, Winterhalbjahr: 20 Uhr). Im Zillertal erfolgt die Winddrehung im Mittel hingegen schon um 21 Uhr.

Nach 20 Uhr nimmt vom Boden her die Windgeschwindigkeit rasch ab, das Aufsteigen lässt nach und die Windrichtung dreht auf Talausrichtung. Während der zweiten Nachhälfte sind Windgeschwindigkeit und Vertikalbewegungen im Mittel sehr klein. Zeigen die stündlichen Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen (KAISER 1992b) noch vor Mitternacht ein deutliches Überwiegen von talauswärts gerichteten Winden, so treten danach auch andere Windrichtungen relativ häufig auf. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang auch die Calmenhäufigkeit an der Ramsau: Sie liegt tagsüber meist bei rund 10%. Abends, während der Umstellungsphase von Talein- zu Talauswind, nimmt sie zunächst auf 49,6% zu (19 Uhr), mit einsetzendem Talauswind dann wieder auf 39,5% ab (23 Uhr). Um 2 Uhr erreicht sie mit 55,3% ein Maximum; danach nimmt sie bis zur Umstellungsphase von Talaus- zu Taleinwind wieder geringfügig ab. Dieses nächtliche Maximum der Calmenhäufigkeit ist atypisch: Üblicherweise ist in Bergtälern die Calmenhäufigkeit jeweils während der Umstellungsphasen des Berg-/Talwindsystems, nicht aber während der Nacht am größten: Eigentlich sollte in der zweiten Nachhälfte der Talauswind am deutlichsten ausgeprägt sein, vgl. das Schema von DEFANT (1949) in Abbildung 13a. Der Talauswind im Zillertal ist hingegen vor Mitternacht am deutlichsten ausgeprägt und "schläft" während der zweiten Nachhälfte wieder ein.

Ein Vergleich mit dem Inntal bei Wörgl (ÖSTERREICHISCHES INSTITUT FÜR RAUMLANPLUNUNG 1986) zeigt, daß an der Meßstelle Wörgl-Pumpenhaus der Talauswind im Jahresmittel erst ab 23 Uhr einsetzt, in der zweiten Nachhälfte voll ausgeprägt ist und in den Morgenstunden zwischen 6 und 7 Uhr am häufigsten auftritt. Der Talauswind kommt im unteren Bereich des Inntals also erst richtig "in Schwung", wenn im Zillertal der Talauswind wieder "einzuschlafen" beginnt, die Temperaturunterschiede zwischen Ziller- und Inntal also nur mehr klein sein können. Die Windgeschwindigkeiten sind im Inntal am Talboden nachts ebenfalls klein (in 96% aller Fälle kleiner gleich 3m/s). Auskunft über die Vertikalstruktur des Berg-Talwindsystems im Inntal (Raum Innsbruck) geben die von VERGEINER (1983) veröffentlichten Ergebnisse von Pilotballonaufstiegen. Sie zeigen an "ungestörten Talwindtagen" während der Morgenstunden Talauswind mit Ge-

schwindigkeiten bis rund 8 m/s, maximal nahe 10m/s. In Abbildung 12 sind die Talquerschnitte von Zillertal (bei Ramsau und Kaltenbach) und Inntal (bei Wörgl) gegenübergestellt: Bis zu einer Höhe von rund 700m über Grund unterscheiden sich die Talquerschnitte nur geringfügig. Schätzt man das Verhältnis der Talquerschnitte zueinander (vom jeweiligen Talboden bis 700m über Talgrund), so ergibt sich, daß das Inntal einen nur rund 1,3 mal größeren Talquerschnitt hat als das Zillertal. Es mündet aber nicht nur das Zillertal in das Inntal, sondern talaufwärts vom Zillertal sechs weitere Täler mit zumindest einem annähernd großem Einzugsgebiet wie das Zillertal: das Sill- und Stubaital (Brenner), das Ötztal, das Pitztal, das Kauertal, das Patznauntal und das Stanzertal, sowie talabwärts vom Zillertal das Brixental. Weiters erzeugt das Inntal selbst seinen eigenen Talauswind. Nimmt man als grobe Näherung an, daß die Beiträge der einzelnen in das Inntal mündenden Seitentäler und der Beitrag des Inntals selbst zum "Gesamttalauswind" bei Wörgl etwa gleiche Größenordnung haben und, daß - auf der Basis von Pilotballonaufstiegen - der Talauswind bei Wörgl über Talgrund ebenfalls eine Geschwindigkeit von höchstens 10m/s erreicht, so ist leicht ersichtlich, daß aus Kontinuitätsgründen der Talauswind im Zillertal in den unteren rund 700m über Grund großenordnungsmäßig nur mehr rund 1/9 der Geschwindigkeit bei Wörgl, also nur mehr sehr kleine Werte erreichen kann. Das "Einschlafen" des Talabwinds im Zillertal dürfte im Zusammenhang mit dem begrenzten Massenfluß durch das Inntal stehen. Das Inntal ist in der zweiten Nachhälfte mit Kaltluft "aufgefüllt", ein weiteres Abfließen von Luft aus dem Zillertal ist - zumindest in den unteren Höhenbereichen - nur mehr begrenzt möglich. (Vorausgesetzt ist, daß Vertikalbewegungen während der Nachtstunden gering sind, was durch die Sodarmessungen jedenfalls für das Zillertal bestätigt wird. Weiters ist vorausgesetzt, daß die Pilotballonaufstiege bei Innsbruck jedenfalls für die hier durchgeführte grobe Abschätzung auf die Verhältnisse am Talausgang [Wörgl] übertragbar sind.) Immerhin aber erreicht ein voll ausgeprägter Talauswind an ungestörten Tagen erfahrungsgemäß kaum Geschwindigkeiten von mehr als 10m/s. Nun beinhalten die in den Abbildung 9 und 10 dargestellten Statistiken für das Zillertal nicht bloß Fälle mit gut ausgeprägtem Talauswind, d.h. man könnte annehmen, daß an Tagen mit gut ausgeprägtem Talauswind dessen Geschwindigkeit größer ist als im Mittel über alle Tage. Wie in Abschnitt 6.1 gezeigt wird, haben die hier angestellten Überlegungen jedoch auch für typische "Schönwettertage" mit gut ausgeprägtem Berg-Talwindsystem Gültigkeit, d.h. der Talauswind "schläft" auch an solchen Tagen - z.T. noch viel markanter - ein.

Oberhalb von rund 700m über Grund treten im Zillertal nachts hingegen auch höhere Windgeschwindigkeiten und Absinkbewegungen auf (Abbildung 10 und 11). Diese Werte sind infolge der geringen Zahl gültiger Meßdaten mit äußerster Vorsicht zu betrachten. Immerhin stimmen die Absinkbewegungen mit Beobachtungen von WHITEMAN (1990) überein, der diese aus der Divergenz in Tal-

richtung erklärt (d.h. in diesen Höhen würde mehr Luft aus dem Zillertal ausfließen als von talaufwärts ersetzt würde).

Die Winde aus Süd am Arbiskopf zeigen ebenfalls einen ausgeprägten Tagesgang (angedeutet in Abbildung 9, detailliert bei KAISER 1992b beschrieben): Sie sind am häufigsten zwischen 10 und 18 Uhr, besonders zwischen 14 und 17 Uhr. Das häufige Auftreten von Südwind zu dieser Zeit mag auf das Übergreifen von Hangaufwind vom Südhang zur Meßstelle zurückzuführen sein. Ob daran auch Strömungen, die den Taleinwind kompensieren ("Antiwind"), beteiligt sind, kann nicht schlüssig nachgewiesen werden. (Es würde aber gut zu Ergebnissen von Pilotballonmessungen von VERGEINER [1983] im Inntal passen, die knapp oberhalb der Kammhöhe ebenfalls ein Windpaket mit leichter bis mäßiger Südkomponente zeigen, welches als Antiwind zum Taleinwind interpretiert werden kann.) Am seltensten sind Winde aus Süd zwischen 6 und 7 Uhr und zwischen 20 und 21 Uhr. Ob besonders zwischen 2 und 3 Uhr, wenn die Häufigkeit von Südwind neuerlich zunimmt, der Talauswind bis in die Höhe des Arbiskopf hinaufreicht oder ob es sich hier um eine Art "Ausgleichswind" zwischen Alpen und vorgelagerter Ebene handelt, kann ebenfalls nicht schlüssig nachgewiesen werden.

Die hier vorgelegten Untersuchungsergebnisse ergeben ein von den Vorstellungen von DEFANT (1949) doch deutlich abweichendes Bild, welches in Abbildung 13b nochmals zusammenfassend dem Schema von DEFANT (1949; Abbildung 13a) gegenübergestellt ist. Der Grund für diese Abweichungen dürfte einerseits in der Orientierung des Zillertals in Nord-Süd-Richtung zu suchen sein, die morgens und abends zu deutlichen Unterschieden zwischen sonnitem und beschattetem Hang führt; andererseits ist dem Zillertal durch das vorgelagerte Inntal ein direkter Austausch mit der Ebene verwehrt.

5 Immissionskonzentrationen von Ozon und Stickstoffoxiden im Zillertal

Messungen der Immissionskonzentrationen von Ozon (O_3), Stickstoffoxiden (NO_2 und NO) und Schwefeldioxid (SO_2) liegen für die Stationen Ramsau, Talwiese, Stockaste und Ahorn (nur Ozon) vor. Zu bemerken ist, daß die Stickstoffoxidmessungen im Jahr 1988 an den Stationen Talwiese und Stockaste alternierend durchgeführt wurden (Stockaste: Jänner bis Juni, Talwiese: Juli bis Dezember). Für die anderen Stationen liegen jeweils komplett Meßjahre vor.

Wegen der insbesondere im Sommerhalbjahr (also im wesentlichen während der Periode der Sodarmessungen) sehr niedrigen SO_2 -Konzentrationen wird von einer meteorologischen Interpretation derselben im folgenden abgesehen (die Monatsmittelwerte der SO_2 -Konzentrationen sind generell gering und liegen meist unter oder um

$0,01 \text{ mg/m}^3$, lediglich an der Meßstelle Ramsau werden im Winter Monatsmittelwerte um $0,02 \text{ mg/m}^3$ erreicht). Für das Verständnis des Einflusses der meteorologischen Verhältnisse auf die Immissionskonzentrationen im Zillertal ist zudem das Studium der übrigen Schadstoffe ausreichend.

Teilweise werden auch die Immissionskonzentrationen von lokalen Verhältnissen in der Umgebung der Stationen beeinflußt. Insbesondere von Ozon ist aus Messungen der Technischen Universität Wien (GOMISCEK et al. 1990, GREGORI 1992) bekannt, daß im Bereich von Wäldern in Bodennähe deutlich niedrigere Konzentrationen auftreten können als außerhalb der Bestände. Für die im folgenden vorgenommene Interpretation der Immissionskonzentrationen interessieren daher generell weniger die Absolutwerte (diese sind zudem ausführlich in den Berichten der Forstlichen Bundesversuchsanstalt publiziert), sondern vielmehr qualitative Unterschiede.

Vorab ist zu bemerken, daß Stickstoffoxide und Ozon je nach Intensität der Sonnenstrahlung in regem chemischem Austausch stehen: Stark vereinfacht baut NO ab, indem es zu NO_2 und O , reagiert. Dadurch vermindert sich die Konzentration von O , und NO , und es erhöht sich die Konzentration von NO_2 . Unter Einwirkung von Sonnenstrahlung kann NO_2 zu NO und einem O-Atom zerlegt werden, welches mit O_2 wieder O, bilden kann (also Produktion von NO und O_3). Infolge der Rückreaktion des NO mit O , stellt sich sehr rasch ein sogenanntes photostationäres Gleichgewicht unter den genannten Verbindungen ein. Peroxidradikale, die auf vielfältige Weise bei der Oxidation von Kohlenwasserstoffen entstehen, verschieben das photostationäre Gleichgewicht zugunsten von NO_2 und Ozon. Die Ozonkonzentration wird somit wesentlich vom Verhältnis NO/NO_2 bestimmt: Stark vereinfacht bewirken hohe NO -Konzentrationen einen Ozonabbau. Je größer aber die Konzentration von NO_2 gegenüber jener von NO ist, desto eher wird Ozon produziert. (Zum Chemismus siehe z.B. MASCHER 1987; diese Arbeit enthält zudem eine der vorliegenden Studie ähnliche Analyse der meteorologischen Verhältnisse im Inntal unter besonderer Beachtung der luftchemischen Prozesse).

5.1 Der Jahresgang der Immissionskonzentrationen

Monatsmittelwerte der gemessenen Immissionskonzentrationen von SO_2 , O_3 und Stickstoffoxiden (NO und NO_2) wurden von SMIDT et al. (1990) für das Meßjahr 1988 publiziert. Generell zeigen die Jahresgänge der Immissionskonzentrationen den bekannten Verlauf: Die höchsten NO - und NO_2 -Konzentrationen treten während der Wintermonate, die höchsten Ozonkonzentrationen im Frühjahr und Sommer auf. Die Stickstoffoxidkonzentrationen nehmen stark mit zunehmender Höhe ab, jene von Ozon zu.

5.2 Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von der Wetterlage

Die für die Wetterlagenklassen nach STEINACKER berechneten Mittelwerte der Immissionskonzentrationen, die an den Stationen des Hangprofils gemessen wird, sind in den Abbildungen 14 bis 17 zusammengestellt. Die Statistiken sind auf das Jahr 1988 bezogen.

5.2.1 Ozonkonzentrationen

Aus den Abbildungen 14 bis 17 ist deutlich die rasche Zunahme der Ozonkonzentration im unteren Höhenbereich des Tals (vom Talboden [Ramsau] zu den Hängen [insbesondere Talwiese]) ersichtlich. In höheren Lagen (Stockaste und Ahorn) unterscheiden sich die Mittelwerte der Ozonkonzentrationen hingegen kaum mehr.

In hohen Lagen (Stockaste und Ahorn, Abbildung 16 und 17) sind die Ozonkonzentrationen bei gradientschwachen Wetterlagen sowie bei Strömungen aus südlicher Richtung relativ hoch. Es sind dies Wetterlagen, bei denen im Untersuchungsgebiet im allgemeinen ungehinderte Sonneneinstrahlung herrscht, welche die Ozonproduktion fördert. Gradientschwache Lagen sind zudem mit geringem Wind verbunden. Überraschend sind die hohen Ozonkonzentrationen bei variablen Wetterlagen. Variable Wetterlagen beinhalten Frontdurchgänge, bei denen die Ozonkonzentration eigentlich relativ niedrig sein sollte (KOLB et al. 1990). Nun ist bekannt (STEINACKER 1987), daß Fronten oft recht lange brauchen, bis sie ins Alpeninnere vordringen. Möglicherweise befindet sich der Alpenhauptkamm an Tagen mit Frontpassagen häufig noch an der Vorderseite der Front, ev. verbunden mit Föhneinfluß, was die im Mittel hohe Ozonkonzentrationen an Tagen mit variablen Wetterlagen erklären könnte. Arbeiten von GEYER (1991) und PRUGGER (1991) zeigen zudem, daß die Ozonkonzentration unmittelbar vor Frontdurchgang häufig noch Spitzenwerte erreichen kann.

Die Ozonkonzentrationen sind in hohen Lagen bei Strömungen aus Ost, Nordost und Nord niedrig. Bei Nordost und Nordlagen tritt im Untersuchungsgebiet häufig Nordstau (also Bewölkung und Niederschlag) auf, was die Ozonproduktion verhindert bzw. Ozon abbaut. Relativ niedrige Ozonkonzentrationen in hohen Lagen bei Ostströmung wurden auch von GEYER (1991) und PRUGGER (1991) in anderen Teilen Tirols gefunden. Beide Autoren führen die niedrigen Konzentrationen auf den Antransport stickstoffoxidreicher Luft aus Osteuropa zurück, die - ihrer Meinung nach - ozonabbauend wirken sollte. Es könnten derartige Luftmassen aber auch ozonbildend wirken (während der doch recht langen Zeit des Antransports könnte eine weitgehende Umwandlung von NO zu NO₂ stattgefunden haben). Eine Klärung dieser Frage ist ohne luftchemische Modelle jedoch nicht möglich.

Grundsätzlich steht die hier vorgefundene Abhängigkeit der Ozonkonzentrationen von der Wetterlage mit Ergebnissen von VUKOVICH et al. (1977) in Einklang, der in östlichen Bereichen der USA die höchsten Ozonkonzentrationen an der Rückseite von Hochdruckgebieten, die niedrigsten an deren Vorderseite gefunden hat. An der Vorderseite von Hochdruckgebieten treten Strömungen aus

nördlichen, eventuell auch aus östlichen, an der Rückseite solche aus südlichen Richtungen auf. Ein derartiger Effekt war in den westlichen Bereichen der USA nicht zu finden. VUKOVICH et al. (1977) erklärten das unterschiedliche Verhalten der Ozonkonzentration in den westlichen und östlichen Bereichen der USA mit der Emission von Ozon-Vorläufersubstanzen aus Industriegebieten und der dadurch bedingten Ozonproduktion. Da die Ozonkonzentration in den hohen Lagen des Zillertals ein ähnlichen Verhalten zeigt wie jene im Osten der USA würde das bedeuten, daß auch hier deutliche anthropogene Einflüsse vorliegen. Die Ozonkonzentrationen hängen weiters von der Verweilzeit der Luft im Hochdruckgebiet ab, was eine Erklärung für die relativ hohen Konzentrationen bei gradientschwachen Lagen (mit niedrigen Windgeschwindigkeiten) sein kann.

Grundsätzlich zeigt die mittlere Ozonkonzentration an den höchstgelegenen Meßstellen deutlich synoptische - also großräumige - Einflüsse. Inwieweit dabei Advektion von Luft mit unterschiedlichem Ozongehalt beteiligt ist, insbesondere eine Differenzierung zwischen advektivem und vor Ort gebildetem Anteil, kann ohne Modellrechnung nicht gegeben werden. (Wie in Abschnitt 4.2 nachgewiesen wurde, führt das Tal ein ausgeprägtes "Eigenleben". Eine überregionale Advektion von Schadstoffen könnte daher - wenn überhaupt - nur an einer möglichst hoch über dem Tal gelegenen Station [ev. Ahorn] nachgewiesen werden.)

Ein völlig gegensätzliches Bild vermittelt der Talboden (Ramsau, Abbildung 14): Hier treten die höchsten Ozonkonzentrationen bei Strömung aus Ost, gefolgt von Nord auf. Es sind dies jene Wetterlagen mit dem labilsten Temperaturgradienten im unteren Höhenbereich des Tals. Die Atmosphäre ist gut durchmischt, das Ozon wird in das Tal heruntergemischt. Interessant ist, daß Untersuchungen aus dem Inntal (MASCHER 1987) gerade für Ostlagen auffallend niedrige Ozonkonzentrationen ergeben: Hier mag die Talrichtung eine wesentliche Rolle spielen: Im West-Ost-orientierten Inntal überlagern sich im Fall von Ostlagen Gradientwind und Talwindsystem, MASCHER (1987) vermutet Antransport "verschmutzter" Luft aus Osten (eventuell auch eine verstärkte Überlagerung der im Inntal befindlichen Emissionen), die das Ozon im Inntal abbaut. Eine derartige ozonabbauende Schadstoffanreicherung ist im Nord-Süd-orientierten Zillertal offensichtlich nicht der Fall. Zudem mögen sich Ostlagen im Inntal anders auf die thermische Struktur auswirken als im Zillertal.

Bei Westlagen sind die Ozonkonzentrationen am Talboden im Mittel am niedrigsten; im Vergleich zur großen Belastung in Höhenlagen sind jedoch auch bei Strömungen aus südlichen Richtungen und bei gradientschwachen Lagen die Ozonkonzentrationen am Talboden relativ klein, was auf die schlechte Durchmischung infolge von stabiler Schichtung zurückzuführen ist.

An der Talwiese (Abbildung 15) ist der Übergang zwischen den gegensätzlichen Verhältnissen am Talboden und an den Höhenlagen ersichtlich: Hier tritt die niedrigste Ozonkonzentration bei Ostlagen auf. Im höhergelegenen Bereich des Tals ist dann zwar auch generell relativ wenig

Ozon vorhanden. Zudem dürfte sich hier aber die gute Durchmischung der Talatmosphäre durch Advektion der relativ ozonarmen Luft vom Talboden her bemerkbar machen (man beachte die Größenordnungen der Ozonkonzentrationen am Talboden und an den höher gelegenen Stationen). Die höchsten Ozonkonzentrationen treten bei Südlagen auf. Wie in Abschnitt 4.1.2 gezeigt wurde, sind die Inversionen bei Südlagen meist sehr seicht. Hier wird also ozonreiche Luft von den Höhenlagen bis zur Talwiese hinuntergemischt. Sie kann infolge der seichten Inversion den Talboden aber meist nicht mehr erreichen, weshalb die Konzentrationen an der Ramsau vergleichsweise niedrig sind. Ähnlich, aber nicht mehr so extrem, dürften die Verhältnisse bei gradientschwachen Lagen und bei Westlagen sein, d.h. hier kann das Ozon aus den hohen Lagen meist noch die Talwiese, häufig aber nicht mehr den Talboden erreichen. Die relativ hohen Ozonkonzentrationen bei gradientschwachen Lagen, bei Strömungen aus südlicher und westlicher Richtung an der Talwiese verbunden mit den gleichzeitig auftretenden vergleichsweise niedrigen Ozonwerten am Talboden können ein Indiz für häufig in diesem Höhenbereich vorhandene Inversionen sein.

Zusammenfassend lassen sich die wetterlagenbedingten Unterschiede der Ozonkonzentrationen im Tal im wesentlichen aus der vertikalen Durchmischung der Talatmosphäre erklären: Bei guter vertikaler Durchmischung wird ozonreiche Luft von größeren Höhen ins Tal heruntergemischt. Schlechte vertikale Durchmischung verhindert diesen Transport und die mittlere Konzentration am Talboden ist gering (siehe dazu auch Abschnitt 5.3). Der oben erläuterte Chemismus, und die Wechselwirkungen der einzelnen Schadstoffe untereinander spielen hier offensichtlich nur indirekt eine Rolle: Er ist in den Mittelwerten der Konzentrationen bereits enthalten, ist also ein Grund, warum die Ozonkonzentration mit der Höhe zunimmt. Wie weit das in größeren Höhen vorhandene Ozon den Talboden erreicht, ist von der Durchmischung der Talatmosphäre abhängig.

5.2.2 Stickstoffoxidkonzentrationen

Im Gegensatz zu Ozon, welches im allgemeinen von größeren Höhen ins Tal hinuntergemischt wird, werden die Stickstoffoxide großteils in Bodennähe emittiert. Dies ist auch an der deutlichen Abnahme der Immissionskonzentrationen mit der Höhe - insbesondere für NO - ersichtlich (Abbildung 14 bis 16). Die Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von der Wetterlage sollte sich daher deutlich von jener der Ozonkonzentrationen unterscheiden. Besonders deutlich sollten diese Unterschiede an der Immissionskonzentrationen von NO ersichtlich sein, da hohe NO-Konzentrationen im wesentlichen nur im Nahbereich von Emissionsquellen zu erwarten sind: Je nach Höhe der Ozonkonzentrationen und Einwirkung von Sonnenstrahlung wird NO rasch in NO_2 umgewandelt. Auch dies ist aus den Abbildungen 14 bis 16 ersichtlich: Die NO-Konzentrationen erreichen an der Stockaste im Mittel nur knapp 1/10 des Wertes vom Talboden (Ramsau), jene von

NO_2 ist immerhin an der Stockaste noch etwa halb so groß wie in der Ramsau. Auch hier kommt der Chemismus in den Mittelwerten der Konzentrationen zum Ausdruck und erklärt im Falle des NO die rasche, im Falle des NO_2 die vergleichsweise langsame Abnahme der Immissionskonzentration mit zunehmender Höhe.

Infolge der guten vertikalen Durchmischung bei Strömungen aus östlichen Richtungen und aus Nord ist die mittlere NO-Belastung am Talboden (Ramsau, Abbildung 14) dann am kleinsten. Zudem wirken die dann relativ hohen Ozonkonzentrationen NO-abbauend. Wetterlagen mit häufig stabiler Schichtung in bodennahen Schichten (Strömungen aus südlichen und westlichen Richtungen) weisen hingegen die höchsten NO-Konzentrationen auf. Besonders deutlich kommt dies bei Südlagen, bei denen gleichzeitig die Ozonkonzentrationen (NO-abbauend) durchschnittlich ist, zum Ausdruck, während bei Westlagen infolge der dann geringen Ozonkonzentrationen zudem auch die Umwandlung von NO in NO_2 relativ gering ist. Gradientschwache Lagen, bei denen die Inversion im Mittel zwar große Höhen erreicht aber in Bodennähe nicht so intensiv ist, zeigen etwa mittelhohe NO-Konzentrationen.

Die Statistiken für die Hangstationen sind mit Vorsicht zu interpretieren, da die Stickstoffoxidmessungen an den Meßstellen Talwiese und Stockaste alternierend vorgenommen wurden (also jeweils nur ein Halbjahr vorliegt). Infolge von Transport NO-reicher Luft vom Talboden her ist die NO-Belastung an der Talwiese (Abbildung 15) bei Nord- und Ostlagen im Mittel hoch. Dies beweist, daß die niedrige NO-Belastung bei diesen Wetterlagen an der Ramsau nicht nur durch NO-Abbau durch Ozon, sondern auch durch vertikale Durchmischung verursacht ist. Am höchsten sind die NO-Konzentrationen an der Talwiese bei gradientschwachen Lagen. Auch bei Strömungen aus südlichen Richtungen sind die NO-Konzentrationen an der Talwiese relativ hoch. Dies ist umso bemerkenswerter, als dann gleichzeitig die Ozonkonzentrationen (NO-abbauend) am höchsten ist. Hier zeigt sich recht deutlich die Wirksamkeit des Hangwindsystems: Am Talboden ist die NO-Konzentration wegen der häufigen bodennahen Inversionen, die die vertikale Durchmischung der freien Talatmosphäre behindern, sehr hoch. Durch das Hangwind-system wird diese stark NO-belastete Luft bis zur Talwiese geführt. Dieser Transport findet offensichtlich durch die häufig vorhandene bodennahe Inversion hindurch statt: Die gleichzeitig auftretende hohen Ozonkonzentrationen sind nämlich ein Indiz dafür, daß die Durchmischung oberhalb der Talwiese im allgemeinen gut ist. Die Inversion muß sich also häufig unterhalb der Talwiese befinden.

Bei Südostlagen sind die NO-Konzentrationen auffallend niedrig. Ob hier einige Föhnlagen mit Durchgreifen des Föhns bis zur Talwiese - was niedrige NO-Konzentrationen zur Folge haben würde - als Südostlagen klassifiziert wurden, kann nicht geklärt werden. Die NO-Konzentrationen am Talboden sind gleichzeitig eher durchschnittlich, jene des Ozons an der Talwiese aber eher über-

durchschnittlich, was zu verstärktem NO-Abbau führen könnte.

An der Stockaste (Abbildung 16) macht sich die gute Durchmischung der Talatmosphäre bei Ostlagen durch niedrige mittlere NO-Konzentrationen bemerkbar: Das im wesentlichen auf den Bereich des Talbodens beschränkte NO ist schon weitgehend verdünnt oder in NO₂ umgewandelt, bis es die Stockaste erreichen kann. Oberhalb der Stockaste ist bei Ostlagen die Talatmosphäre hingegen relativ stabil geschichtet. Wenn eine derartige stabile Schichtung bis in Höhen unterhalb der Stockaste hinunterreicht, kann zudem der Transport von NO zur Stockaste behindert werden. Relativ niedrig sind die NO-Konzentrationen auch bei Westlagen, die häufig mit stabiler Schichtung besonders im unteren Talbereich verbunden sind. Im Falle des Durchgreifens der Westströmung bis zur Stockaste würde zudem die belastete Talluft von der Meßstelle weggeführt. Gradientschwache Lagen zeigen ebenfalls relativ geringe mittlere NO-Konzentrationen: sowohl infolge der dann schon stabilen Schichtung im Tal (die dann auch bis in relativ große Höhen reicht), als auch auf Grund der dann höchsten Ozonkonzentrationen. Unerwartet hohe NO-Belastung tritt bei Strömungen aus südlichen Richtungen auf. Möglicherweise bedingen die hohen NO-Konzentrationen bei Südlagen sogar das dann an der Stockaste auftretende relative Minimum der Ozonkonzentrationen. Eine Erklärung für die hohen NO-Konzentrationen bei Südlagen ist sehr schwierig. Vorstellbar wäre ein Transport der sehr NO-reichen Luft vom Talboden (Zillertal) über Taleinwind ins Sidanbachtal und über Hangaufwind zur Stockaste. Dem widersprechen aber die gleichzeitig hohen Ozonkonzentrationen, die auf der doch relativ langen Wegstrecke NO abbauen müßte. Der auch im Vergleich zu den eher unterdurchschnittlichen NO₂-Werten relativ hohe NO-Anteil lässt eher den Einfluß lokaler Quellen vermuten. Weshalb dieser aber bei Strömungen aus südlicher Richtung so deutlich sein sollte, bleibt unklar.

An den NO-Konzentrationen zeigt sich der Einfluß der vertikalen Temperaturstruktur der Talatmosphäre, insbesondere am Talboden, d.h. relativ hohe Konzentrationen bei schlechter, relativ niedrige bei guter Durchmischung der Atmosphäre. Infolge der raschen chemischen Umwandlung des NO zu NO₂ sind hohe NO-Konzentrationen im allgemeinen auf den Nahbereich von Emittenten beschränkt. An den vom Talboden schon etwas entfernten Bereichen sind daher relativ hohe Konzentrationen zu erwarten, wenn der Transport auf möglichst direktem Weg stattfindet. Ein solcher Transport wird auch durch das Hangwindsystem bewerkstelligt, welches bei stabiler Schichtung auf ein relativ kleines Luftvolumen beschränkt ist, was eine Verdünnung verhindert (siehe Abschnitt 5.4).

Für die NO₂-Konzentrationen können neben lokalen Quellen und chemischer Umwandlung des im Tal emittierten NO zu NO₂ auch Advektion von NO₂ aus entfernten Gebieten (eventuell aus dem Inntal) eine Rolle spielen. Immerhin ist infolge des Chemismus das Tal mit NO₂ weit gleichmäßiger "aufgefüllt" als mit NO (die Stockaste

erreichten im Mittel noch rund die Hälfte der Immissionskonzentrationen des Talbodens).

Am Talboden (Ramsau, Abbildung 14) zeigt sich wieder der Einfluß der Vertikalstruktur der Talatmosphäre mit relativ hohen Konzentrationen bei Strömungen aus südlicher und westlicher Richtung und relativ niedrigen Konzentrationen bei solchen aus östlicher Richtung. Im Vergleich zu NO ist die Abhängigkeit des NO₂ von der Wetterlage aber relativ gering.

Die Hangstationen (Talwiese und Stockaste, Abbildung 15 und 16) zeigen ebenfalls den Einfluß der Vertikalstruktur der Atmosphäre: Hohe Konzentrationen bei Nordostlagen an beiden Stationen sowie bei Nordlagen an der Stockaste, also bei Wetterlagen, bei denen die Durchmischung im Mittel am besten ist. Auch würde bei Durchgreifen der Strömung ins Tal die NO₂-reiche Talluft (auch vom Inntal) in Richtung der Meßstellen geführt. Bemerkenswert ist, daß bei den genannten Wetterlagen die NO-Konzentrationen an der Stockaste auffallend niedrig sind: NO₂ "füllt" das Tal viel gleichmäßiger auf. Bei guter Durchmischung wird der Stockaste folglich die NO₂-reiche Talluft zugeführt. Zudem könnte Advektion NO₂-reicher Luft aus dem Inntal bei Ost- und Nordlagen gerade an der Stockaste als relativ hoch gelegener Station eine Rolle spielen. Ansonsten sind die NO₂-Konzentrationen ziemlich unabhängig von der Wetterlage.

5.3 Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von der Vertikalstruktur der Atmosphäre (Streuung des Vertikalwindes)

Die vertikale Durchmischung im Tal sollte am besten durch die Streuung der Vertikalkomponente des Windes charakterisierbar sein, da diese einerseits mit der vertikalen Temperaturverteilung (thermischen Turbulenz), andererseits mit der Windgeschwindigkeit (dynamischen Turbulenz) zusammenhängt. Die hier diskutierten Statistiken beziehen sich auf die Periode der Sodarmessungen. Dies ist insofern von Bedeutung, als die Stickstoffoxidmessungen an der Stockaste Ende Juni eingestellt wurden, für einen Vergleich mit den Sodardaten also nur wenige Tage zur Verfügung stehen. Einige Charakteristika sind in den Untersuchungen der NOx-Belastung an der Stockaste dennoch ersichtlich, weshalb sie hier trotz der kurzen Auswerteperiode Erwähnung finden.

In den Abbildungen 18 bis 21 sind die mittleren Konzentrationen in Abhängigkeit von der Streuung des Vertikalwinds (ausgewählt wurde das Niveau von 420m über Talgrund) dargestellt. Sie zeigen für den Talboden (Ramsau, Abbildung 18) eine deutliche Abhängigkeit der Ozonkonzentrationen von der Streuung des Vertikalwinds: Je stärker die vertikale Durchmischung, umso höher die Ozonkonzentrationen. Mit zunehmender Höhe (Talwiese, Abbildung 19 und Stockaste, Abbildung 20) nimmt diese Abhängigkeit ab, an der Meßstelle Ahorn ist die Ozonkonzentration nicht mehr von der Durchmischung im Tal abhängig (Abbildung 21).

Bei NO ist die Abhängigkeit umgekehrt: Relativ hohe Konzentrationen am Talboden (Abbildung 18) bei schlechter Durchmischung, relativ niedrige bei guter Durchmischung; die Talwiese zeigt relativ hohe Konzentrationen bei schlechter, aber auch bei sehr guter Durchmischung, die Abhängigkeit der NO-Belastung von der vertikalen Durchmischung ist hier aber wesentlich schwächer als am Talboden (Abbildung 19). An der Stockaste (Abbildung 20) ist eine systematische Abhängigkeit kaum mehr erkennbar.

Für NO_x ist die Abhängigkeit von der Durchmischung der Talatmosphäre nur mehr sehr schwach: Am Talboden zeigt die NO_x-Belastung bei schwacher bis mäßiger Durchmischung (Werte der Streuung des Vertikalwinds bis 30) im Mittel keine Abhängigkeit von der Durchmischung (Abbildung 18). Erst, wenn die Durchmischung eine bestimmte Größenordnung erreicht, nimmt die Belastung im Mittel mit weiter zunehmender Durchmischung ab. Der Grund dafür dürfte in der relativ langsamen Abnahme der NO_x-Konzentration mit zunehmender Höhe zu suchen sein. Die Stockaste hingegen zeigt bei zunehmender Durchmischung höhere Werte der NO_x-Belastung (Abbildung 20).

Grundsätzlich belegen die Abbildungen 18 bis 21 die schon oben festgestellte Abhängigkeit der Ozonkonzentrationen von der vertikalen Durchmischung der "freien" Talatmosphäre. Bei NO ist in den unteren Hangbereichen (Talwiese) zudem deutlich der direkte Transport über das Hangwindsystem - erkennbar an der relativ hohen Belastung bei schlechter vertikaler Durchmischung - ersichtlich. Bei NO_x "verwischen" chemische Umwandlung (also die Bildung von NO_x aus NO) und Advektion den Einfluß der meteorologischen Verhältnisse im Tal, die Abhängigkeit von der Vertikalstruktur der Talatmosphäre ist nur mehr geringfügig.

5.4 Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von den Windverhältnissen

Die Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von den Windverhältnissen wird anhand der vom Sodar in 300m über Grund gemessenen Daten (repräsentativ für das Berg-Talwindsystem) und der an den Hangstationen gemessenen Winde (die das Hangwindsystem beschreiben) untersucht. Eine Berücksichtigung der Winddaten vom Arbis-kopf ist hier nicht sinnvoll, da der Arbis-kopf auch noch stark lokalen Effekten unterliegt (vgl. Abschnitt 4.2), eine Charakterisierung der überregionalen Strömungsverhältnisse also nicht erlaubt.

Auch hier gilt, daß die Statistiken der Stickstoffoxidkonzentrationen an der Stockaste nicht repräsentativ sind und nur deshalb hier angeführt werden, weil sie trotz der kurzen Auswerteperiode einige Charakteristika erkennen lassen.

Zu beachten ist, daß infolge der am 10km entfernten Sodarstandort etwas geänderten Talrichtung auch das Berg-Talwindsystem gegenüber der Ramsau gedreht ist: Der Talauswind weht am Sodarstandort aus Südost (im Vergleich

zu Süd an der Ramsau), der Taleinwind aus Nordwest (hier ist infolge der Störungen an der Ramsau kein Vergleich möglich).

Die Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von der Windrichtung im Tal (Berg-Talwindsystem) ist in den Abbildungen 22 bis 25 zusammengestellt.

Mit Ausnahme des Talbodens (Ramsau, Abbildung 22) ist eine Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von der Windrichtung im Tal im allgemeinen kaum zu erkennen. Dies überrascht nicht sonderlich, da das Zillertal ein ausgeprägtes "Eigenleben" führt. Eine eventuelle großräumige Advektion mag dem Tal durchaus, aber wenn, dann über die lokalen Zirkulationen vermittelt werden. Umgekehrt ist daher aus Windmessungen im Tal kaum Aufschluß über großräumige Schadstoffadvektion zu erwarten, da großräumige Strömungen im Tal selbst nicht mehr zu identifizieren sind.

Die Ozonkonzentrationswindrose für die Ramsau (Abbildung 22, weitaus schwächer auch an der Talwiese, Abbildung 23) zeigt relativ hohe Konzentrationen bei Taleinwind (Nordwestwind). Dies überrascht weiter nicht, ist dann doch die Atmosphäre im allgemeinen am besten durchmischt und es wird Ozon ins Tal hinuntergemischt (siehe Abschnitt 5.3), d.h. die relativ hohen Ozonkonzentrationen sind wohl eher auf den Tagesgang der vertikalen Durchmischung als auf advektive Vorgänge zurückzuführen. (Umso mehr, als die übrigen Stationen eine Abhängigkeit der Ozonkonzentrationen vom Wind im Tal kaum erkennen lassen).

Eine - geringfügige - systematische Abhängigkeit der Ozonkonzentration von der Windrichtung im Tal ist auch an der Station Ahorn (Abbildung 25) erkennbar: Hier ist die Ozonkonzentration bei Taleinwind (Nordwest) geringfügig niedriger als bei Talauswind (Südost). Dies mag aus Advektion ozonärmer Talauswind bei Taleinwind tagsüber erkläbar sein, während nachts, wenn im Tal Talauswind weht, wahrscheinlich ozonreiche Luft durch Hangabwind antransportiert wird (die Station befindet sich über der Waldgrenze, was die trockene Deposition von Ozon deutlich vermindert, vgl. GOMISCEK et al. 1991).

Die NO-Konzentration ist an der Ramsau (Abbildung 22) relativ hoch bei talauswärts gerichtetem Wind (Südostwind), also bei stabiler Schichtung, besonders aber bei Winden aus östlicher Richtung: Derartige Windrichtungen treten häufig bei der morgendlichen Umstellung von Talaus- auf Taleinwind auf: Es ist dies jene Zeit, in der einerseits die Schichtung der Talatmosphäre noch sehr stabil ist. Zudem hat auch die Emission von NO infolge der morgendlichen Verkehrsspitze ein Maximum, wie in Abschnitt 5.5.1 gezeigt wird. Das Maximum der NO-Konzentration bei Ostwind geht mit einem Minimum der Ozonkonzentrationen einher; einerseits, weil die Ozonkonzentration morgens generell noch niedrig ist; andererseits sollte die dann relativ hohe NO-Belastung Ozon abbauen. An den Hangstationen ist kaum ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Belastung und der Windrichtung im Tal erkennbar (Abbildungen 23 und 24).

Die NO₂-Konzentrationswindrosen zeigen erhöhte Konzentrationen bei Taleinwind (Nordwestwind) an den Stationen Ramsau (Abbildung 22) und - mit Vorsicht - Stockaste (Abbildung 24). Dies ist umso bemerkenswerter, als Taleinwind im allgemeinen mit relativ labiler Schichtung verbunden ist und gute vertikale Durchmischung am Talboden (Ramsau) eher zu relativ niedrigen NO₂-Konzentrationen führen sollte (vgl. auch Abschnitt 5.3). Die relativ hohen NO₂-Werte können durch Umwandlung des NO zu NO₂, oder durch Advektion NO₂-reicher Luft aus unteren Talbereichen (Inntal) bedingt sein.

Einen Überblick über den Einfluß der kleinräumigen Zirkulation (Hangwindsysteme) gibt die für die an der jeweiligen Meßstelle gemessene Windrichtung gemittelte Immissionskonzentration. Infolge der Ungenauigkeiten der Windmessungen an der Ramsau ist eine derartige Untersuchung für die Ramsau nicht möglich. Die Windverhältnisse an der Ramsau können aber ohnedies gut anhand der Sodarmessungen beschrieben werden. Die Konzentrationswindrosen sind für die Stationen Talwiese und Stockaste in den Abbildungen 26 und 27 zusammengestellt (für die Meßstelle Ahorn stehen keine Winddaten zur Verfügung). Sie zeigen für O, an der Talwiese im Mittel etwas höhere Konzentrationen bei Hangabwind (aus West bis Nordwest) und niedrigere Werte bei Hangaufwind (Ost bis Südost; Abbildung 26). Dazu ist zu bemerken, daß an der Talwiese (Osthang) das Hangwindsystem jeweils am frühesten reagiert: Hangaufwind setzt hier im Mittel schon um etwa 7 Uhr ein und hört um 14 Uhr auf. Wie in Abschnitt 5.5.2 gezeigt wird, wird durch Hangaufwind vormittags relativ O₃-arme Luft aus dem Bereich des Talbodens zur Talwiese geführt. Hangabwind beginnt schon ab 15 Uhr und ist im allgemeinen von 17 bis 20 Uhr am besten ausgeprägt, also zu einer Zeit, zu der die Ozonkonzentration im unteren Talbereich zunächst noch relativ hoch ist. Die Unterschiede der Ozonkonzentrationen bei Hangauf- und Hangabwind an der Talwiese dürften sich daher erklären aus Advektion ozonärmer Luft aus dem Bereich des Talbodens bei Hangaufwind und zunächst noch hoher Ozonkonzentration der Talluft insgesamt beim vor allem abends ausgeprägten Hangabwind. Gemäß den Ergebnissen von GOMISCEK et al. (1991) dürfte aber die Advektion ozonreicher Luft aus größeren Höhen durch den Hangabwind unterhalb der Baumgrenze eine untergeordnete Rolle spielen (die Deposition von Ozon sollte sehr wirksam sein, wenn Hangabwind den Wald "durchkämmt"). Dies wird durch die Konzentrationswindrose für die Stockaste bestätigt, die praktisch keine Abhängigkeit der Ozonkonzentrationen vom Hangwindsystem erkennen läßt (Abbildung 27).

Für NO und NO₂ zeigen die Konzentrationswindrosen an der Talwiese und sogar die wenigen ausgewerteten Tage an der Stockaste (Abbildungen 26 und 27) relativ hohe Konzentrationsmittelwerte bei Hangaufwind (Ost- bis Südostwind an der Talwiese bzw. Süd- bis Südwestwind an der Stockaste), relativ niedrige Werte bei Hangabwind (West- bis Nordwestwind an der Talwiese bzw. Nordost-

wind an der Stockaste), besonders deutlich an der Talwiese für NO. An der Talwiese treten zudem erhöhte NO und NO₂-Werte bei Windrichtungen aus Nordost und - nur bei NO - Nord, offensichtlich bei durchgreifendem Taleinwind, auf. Auch an der Stockaste treten erhöhte Konzentrationswerte auf bei Winden aus Ost bis Südost, wenn der Taleinwind des Sidanbachtals die Meßstelle erreicht. Der hohe NO-Wert bei Nordwind ist wohl zufallsbedingt.

5.5 Tagesgang der Immissionskonzentrationen

5.5.1 Einfluß der Emission auf den Tagesgang der Immissionskonzentrationen

In den Abbildungen 28a und 28b sind die mittleren Tagesgänge der untersuchten Schadstoffe für die einzelnen Meßstellen bezogen auf das volle Jahr 1988 (Abbildung 28a) bzw. auf die Periode der Sodarmessungen zusammengefaßt (Abbildung 28b). Auch hier gilt, daß, bezogen auf die Periode der Sodarmessungen (Abbildung 28b), die NO-Konzentrationen an der Stockaste nur auf den Messungen weniger Tage beruhen.

Zunächst fällt auf, daß die NO-Konzentrationen an der Ramsau im Tagesverlauf zwei deutliche Maxima aufweisen: Eines in den frühen Morgenstunden, das zweite abends. Die Vermutung liegt nahe, daß diese beiden Maxima nicht rein meteorologisch bedingt sind, sondern auch einen Tagesgang der Emission beinhalten. Die Abbildungen 29a - c enthalten für die Ramsau eine Aufgliederung der Tagesgänge der Komponenten NO, NO₂ und O₃ für Werkstage, Sonn- und Feiertage und Samstage (bezogen auf das volle Jahr 1988). Deutlich ist ersichtlich, daß das morgendliche NO-Maximum an Werktagen weitaus am stärksten ausgeprägt ist. Die NO-Konzentration ist dann sogar höher als am Abend (Abbildung 29a). Hier überlagert sich offensichtlich die morgendliche Verkehrsspitze mit der dann meist noch recht stabilen Schichtung und führt zu derart hohen Konzentrationswerten. Unmittelbar mit dem morgendlichen Anstieg der NO-Konzentration geht die des Ozons zurück (Abbildung 29b), das emittierte NO reagiert mit dem Ozon und baut dieses ab. Die Ozonkonzentration erreicht ihr Minimum etwa um 6 Uhr, wenn die NO-Konzentration noch zunimmt. Gleichzeitig mit der Zunahme von NO und dem Abbau von Ozon nimmt die Belastung durch NO₂ (Abbildung 29c) zu: Einerseits, weil auch NO₂ emittiert wird, andererseits, weil NO mit Ozon zu NO₂ und O₃ reagiert, also NO₂ produziert wird. Schon kurz nach 6 Uhr, wenn die Schichtung der Talatmosphäre im allgemeinen noch recht stabil ist (siehe dazu Abschnitt 5.5.2) und die Konzentrationen von NO und NO₂ noch weiter zunehmen, nehmen auch jene des Ozons wieder zu (zur weiteren Analyse des Tagesgangs siehe Abschnitt 5.5.2).

An Sonn- und Feiertagen ist das morgendliche NO-Maximum deutlich schwächer ausgeprägt (Abbildung 29a). Folglich ist auch das morgendliche Minimum der Ozonkonzentration kaum mehr erkennbar (Abbildung 29b), ebenso ist die NO₂-Konzentration morgens deutlich geringer (Abbildung 29c). Die NO₂-Konzentrationen bleiben

dann sogar den ganzen Tag hindurch deutlich niedriger als an Werktagen. Samstage nehmen eine Zwischenstellung ein. Das abendliche NO-Maximum hängt hingegen kaum vom Wochentag ab.

Zusammenfassend ist das morgendliche Maximum der NO-Konzentration an der Ramsau wesentlich auf Emissionen aus dem Verkehr zurückzuführen (morgendliche Verkehrsspitze infolge des Berufsverkehrs) und hängt folglich vom Wochentag ab. Über chemische Reaktionen werden dann auch die Ozon- und NO₂-Konzentrationen beeinflußt.

5.5.2 Einfluß der meteorologischen Verhältnisse auf den Tagesgang der Immissionskonzentrationen

Der Einfluß der meteorologischen Verhältnisse auf den Tagesgang der Immissionskonzentrationen wird für die Periode der Sodarmessungen untersucht (Abbildung 28b), für die die genauesten meteorologischen Daten vorliegen. Ein Vergleich der Statistiken für das volle Jahr 1988 mit jenen für die Periode der Sodarmessungen zeigt, daß im vollen Jahr an der Ramsau die Immissionskonzentrationen von NO und NO₂ höher, jene durch Ozon niedriger sind als während der Periode der Sodarmessungen. Auch sind einige Maxima und Minima in den Verläufen geringfügig zeitlich verschoben. Grundsätzlich zeigen aber die Statistiken für die Sodarperiode alle Merkmale, die in den Jahresstatistiken enthalten sind (dies gilt insbesondere auch für die auf nur wenigen Tagen beruhenden Daten der NO- und NO₂-Belastung an der Stockaste; eine Diskussion dieser Werte erscheint daher sinnvoll).

Zur Zeit der morgendlichen Verkehrsspitze (nach etwa 5 Uhr) steigt an der Ramsau die NO-Konzentration rasch an. Durch die Reaktion des NO mit Ozon wird letzteres abgebaut, sodaß die Ozonkonzentration zurückgeht, und es wird NO₂ produziert. Zusammen mit ebenfalls vermehrter Emission steigt daher auch die NO₂-Konzentration (Abbildung 28b). Das Minimum der Ozonkonzentration tritt schon um etwa 6 Uhr, also vor den Maxima der NO- (knapp vor 8 Uhr) und NO₂-Konzentration (knapp nach 8 Uhr), auf. Ein Vergleich mit Abbildung 4 (mittlere Echoprofile und mittlere Profile der Streuung des Vertikalwinds) zeigt, daß zu diesem Zeitpunkt zwar in Bodennähe bereits Konvektion einsetzt, die Atmosphäre aber noch stabil geschichtet sein muß, da die Streuung des Vertikalwinds noch sehr klein ist (ebenso ist der Vertikalwind selbst noch sehr klein). An der Talwiese nimmt folglich auch die NO-Konzentration noch bis 6 Uhr ab. Die hohen NO-Konzentrationen am Talboden sind Folge der vermehrten Emission und der noch stabilen Schichtung.

Knapp vor 6 Uhr setzt am Osthang (Talwiese) im Mittel Hangaufwind ein (Abbildung 9). Sofort beginnen am Talboden die Ozonkonzentrationen wieder zu steigen, teilweise infolge der einsetzenden bodennahen Konvektion (Abbildung 4), wohl wesentlich aber infolge der allmählich einsetzenden Absinkbewegungen (Abbildung 11). Die Talatmosphäre als ganzes ist aber nach wie vor stabil geschichtet. (Da die hohen NO-Konzentrationen ozonab-

bauend wirken sollten und die Einstrahlung zu dieser Zeit noch gering ist, sollte photochemische Ozonproduktion dann noch eine eher untergeordnete Rolle spielen; vgl. WEGE et al. 1991.) Die zeitliche Verzögerung, mit der das NO₂-Maximum im Vergleich zu jenem von NO erreicht wird, ist ein Hinweis für das Wirken chemischer Prozesse: Wäre die Konzentration beider Schadstoffe allein auf die im wesentlichen parallel verlaufende Emission zurückzuführen, so müßten die Immissionsmaxima auch gleichzeitig eintreten. Aus dem knapp vor 8 Uhr reichlich vorhandenen NO wird offensichtlich durch Reaktion mit Ozon NO₂ gebildet, was eine Erklärung für das "Nachhinken" der NO₂-Konzentration sein könnte.

Mit einsetzendem Hangaufwind nehmen an den Hängen die NO-Konzentrationen zu: Sehr deutlich an der Talwiese, weniger deutlich an der Stockaste. Der Antransport von NO zu den Hängen ist verbunden mit einem Rückgang der Ozonkonzentration, besonders deutlich an der Stockaste: Einerseits infolge der Reaktion von NO mit Ozon, wodurch letzteres abgebaut wird, andererseits durch Advektion ozonärmerer Luft aus dem unteren Bereich des Tals. Reaktion des NO und Ozon zu NO₂, sowie Advektion NO₂-reicherer Luft, erhöhen zudem die NO₂-Konzentrationen an den Hängen.

Im weiteren wird allmählich die Schichtung der Talatmosphäre labiler, die bodennahe Überhitzung (Dichteunterschiede) erreicht im Mittel um 10 Uhr ihr Maximum, die Streuung des Vertikalwinds nimmt zu, Taleinwind setzt ein und Absinkbewegungen werden stärker. Diese Entwicklung ist verbunden mit einem weiteren Anstieg der Ozonkonzentration am Talboden, NO nimmt deutlich, NO₂ aber nur geringfügig ab (letzteres wird - zusätzlich zur Emission - durch Reaktion des NO mit dem nun reichlich vorhandenen Ozon weiterhin produziert). An den Hängen (Talwiese und Stockaste) nimmt die Ozonkonzentration auch wieder zu (ab etwa 8 Uhr an der Talwiese, etwas später auch an der Stockaste), die Stickstoffoxidkonzentrationen nehmen besonders an der Talwiese ab rund 10 Uhr wieder ab. All dies deutet auf verstärkte vertikale Durchmischung der Talatmosphäre, die Zunahme des Ozons zudem auf photochemische Prozesse hin (besonders an den höhergelegenen Stationen, wo die gute Durchmischung mit vermehrtem Antransport von Luft aus tiefergelegenen Schichten - die eigentlich relativ ozonarm sein müßte - verbunden ist).

Schon um 14 Uhr erreicht die Ozonkonzentration an allen Stationen (mit Ausnahme der Meßstelle Ahorn) ihr Maximum, das mit jenem der photochemischen Ozonbildung zusammenfallen könnte. Am Talboden ist die vertikale Durchmischung aber erst zwischen 14 und 16 Uhr am besten ausgeprägt, weshalb zumindest dort das Maximum der Ozonkonzentration erst später zu erwarten wäre. An der Ramsau nimmt gleichzeitig wieder die NO-Konzentration zu, was zumindest an dieser Station den Rückgang der Ozonkonzentration mitverursachen kann. An den Hangstationen hingegen bleibt die NO-Konzentration unverändert niedrig. Es fällt auf, daß bis zur Mittagszeit

der Taleinwind noch relativ schwach ist. Ab 14 Uhr nimmt seine Geschwindigkeit im Mittel deutlich zu, gleichzeitig steigt an allen Stationen, besonders am Talboden die NO_x-Konzentration. Möglicherweise erreicht hier relativ NO_x-reiche, aber ozonarme Luft aus unteren Talbereichen (bzw. eventuell aus dem Inntal) das Meßprofil. Ob sich die NO_x-Zunahme der Ramsau nach 14 Uhr zunächst ebenfalls mit der der Advektion NO-reicher Luft erklärt, oder ob bereits die nachmittägliche Verkehrsspitze einsetzt, bleibt unklärkt.

Nach 16 Uhr setzen zuerst an beschatteten Hängen, dann allgemein Hangabwinde ein. Das Absinken geht in Aufsteigen über und die Streuung des Vertikalwinds nimmt rasch ab, Stabilisierung setzt ein. Ab etwa 21 Uhr dreht im allgemeinen auch der Wind im Tal auf Talausrichtung. Gleichzeitig erreichen - jetzt infolge der abendlichen Verkehrsspitze und wegen der verminderten vertikalen Durchmischung - die NO- und NO_x-Konzentratinen am Talboden wieder recht hohe Werte. An den Hängen bleibt die NO-Belastung unverändert niedrig, die NO_x-Werte steigen nachmittags vorübergehend geringfügig. Infolge der hohen NO-Konzentration, des Aufhörens der Photochemie und der verminderten vertikalen Durchmischung sinkt - besonders deutlich am Talboden erkennbar - die Ozonkonzentration.

Im Verlauf der Nacht bleibt die Ozonkonzentration am Talboden etwa konstant niedrig, an den Hangstationen (Ausnahme: Ahorn) nimmt sie kontinuierlich langsam ab. Nach Beruhigung des Verkehrs sinken die NO- und NO_x-Konzentrationen am Talboden wieder deutlich. Zudem mag infolge von Hangab- und Talabwind stickstoffoxidärmer Luft herantransportiert werden (vgl. Abschnitt 6.1, Meßnacht von 21. auf 22. 9. 1988, als infolge von Hochnebel der Talauswind und die Hangabwinde nur sehr schwach ausgeprägt sind und insbesondere die NO_x-Konzentration die ganze Nacht hindurch hoch bleibt). An den Hängen bleibt die NO-Konzentration im wesentlichen unverändert niedrig. Die NO_x-Konzentration nimmt an der Stockaste im Lauf der Nacht langsam ab. Eine Sonderstellung nimmt hingegen die Talwiese ein: Hier steigt die NO_x-Konzentration die ganze Nacht hindurch langsam an. Möglicherweise handelt es sich hier um jenes NO, welches bis in diese Höhe hinausdiffundieren kann und durch das dort vorhandene Ozon zu NO_x reagiert (immerhin nimmt an der Talwiese die Ozonkonzentration während der Nacht deutlich ab). Zudem mag im Bereich der nächtlichen Inversion eine Anreicherung von Stickstoffoxidemissionen stattfinden, die sich im chemisch stabileren NO_x manifestiert.

Für die Meßstelle Ahorn liegen lediglich Ozondaten, nicht aber Stickstoffoxiddaten vor. Zudem ist aus KAISER (1992) bekannt, daß sich die Meßstelle infolge der Lage am Nordwesthang deutlich vom übrigen Hangprofil unterscheidet. Aus diesen Gründen wird auf den Tagesgang der Ozonkonztrationen an der Station Ahorn nur kurz eingegangen: Hangauf- und Taleinwind, sowie zunehmende Durchmischung der Talatmosphäre tagsüber machen

sich hier offensichtlich durch Advektion ozonarmer Luft aus dem Talbereich bemerkbar, weshalb die Ozonkonzentration - zunächst analog zu den übrigen Hangstationen - ab den Morgenstunden zurückgeht. Erst am Nachmittag steigt im Mittel die Ozonkonzentration wieder an, eventuell infolge von photochemischer Produktion oder es setzt dann am Nordwesthang wieder Hangabwind ein. (Da sich die Meßstelle oberhalb der Waldgrenze befindet, die trockene Deposition daher deutlich geringer sein sollte als im Bereich von Wald, sollte Hangabwind hier mit Advektion ozonreicher Luft verbunden sein; vgl. GOMISCEK et al. 1991.) Im Gegensatz zu den übrigen Stationen des Höhenprofils bewirken diese Mechanismen eine Umkehr des Tagesgangs der Ozonkonzentration mit einem Minimum vormittags und einem Maximum nachts. (Die übrigen Stationen des Hangprofils zeigen zwar ebenfalls mit einsetzendem Hangauf- bzw. Taleinwind im Mittel ein Minimum der Ozonkonzentration, danach aber wird dennoch das Maximum am Nachmittag erreicht). Eine analoge Wirkung des alpinen Berg-Talwindsystems auf die Ozonkonzentration hochgelegener Stationen (inverser Tagesgang) wurde auch von WEGE et al. (1991) am Hohenpeißenberg gefunden.

Insgesamt zeigt sich in der Analyse des Tagesgangs der untersuchten Schadstoffe recht eindrucksvoll das Zusammenspiel der Vertikalstruktur der Turbulenz der Talatmosphäre, der Advektion durch das Berg-Talwindsystem, besonders aber infolge der Hangwinde, sowie der chemischen und photochemischen Prozesse. Eine quantitative Beurteilung der einzelnen Mechanismen ist ohne luftchemische Modelle aber nicht möglich.

6 Ausgewählte Wetterlagen

6.1 Herbstliches Hochdruckwetter (Periode der Fesselballonmessungen)

Das Studium einer herbstlichen Schönwetterlage erfolgt aus zwei Gründen: Erstens können sich lokale Phänomene bei einer solchen Wetterlage erfahrungsgemäß am deutlichsten ausbilden; zweitens liegen für diesen Zeitraum die Ergebnisse der Fesselballonmessungen vor, die wichtige ergänzende Kenntnisse liefern.

Die Fesselballonmessungen wurden vom 19. bis 23. September 1988 am Sodarstandort in Kaltenbach, rund 10km nördlich (talauswärts) vom Hangprofil, durchgeführt. Nach einer mehrtägigen Schlechtwetterphase, zuletzt gekennzeichnet durch die Zufuhr feuchtkühler Luft aus Nordwest, nimmt am 19. 9. von Westen her der Hochdruckeinfluß zu. Das gradientschwache Hochdruckgebiet bestimmt das Wetter im Alpenraum bis zum 23. 9. Im Laufe des 23. 9. greift eine Kaltfront, ausgehend von einem über dem Nordatlantik gelegenen Tief, auf den Alpenraum über.

Im Zillertal ist es am 19. 9. morgens noch bewölkt; vormittags nimmt die Bewölkung ab und es beginnt eine

herbstliche Schönwetterphase, welche lediglich während der Nacht vom 20. auf den 21. 9. durch Hochnebel beeinträchtigt ist. Der Hochnebel (Untergrenze tagsüber bei 1500m, Obergrenze bei 1800 m) hält am 21. 9. bis in den späten Nachmittag (ca 18 Uhr) an. Am 23. 9. nimmt morgens die Bewölkung bei Annäherung der Kaltfront rasch zu, gegen 11 Uhr setzt leichter Regen ein, sodaß die Fesselballonmessungen abgebrochen werden.

Die während des Zeitraums der Fesselballonmessungen von den verschiedenen Meßsystemen erfaßten meteorologischen Daten - insbesondere die vertikale Temperaturstruktur - wurden von KAISER (1992a und b) eingehend diskutiert. Sie werden hier daher nur insoweit besprochen, als dies für die in den Abschnitten 4 und 5 diskutierten Analysen und für die Interpretation der Immissionskonzentrationen von Bedeutung ist.

Die Struktur der Turbulenz der Talatmosphäre ist ersichtlich aus den Abbildungen 30 (zeitlicher Verlauf der potentiellen Temperatur in Abhängigkeit von der Höhe über Grund, ermittelt aus den Fesselballonmessungen) und 31 (Streuung des Vertikalwinds und Echointensität). Die potentielle Temperatur ist eine theoretisch berechnete Temperatur, die ein gegebenes Luftpaket einnimmt, wenn es einem Luftdruck von 1000hPa ausgesetzt wird (unter der Voraussetzung, daß keine Wärme zu- oder abgeführt wird, also ein adiabatischer Prozeß vorliegt). Die potentielle Temperatur beinhaltet also die adiabatische Temperaturänderung durch Aufsteigen (Expansion, Abkühlung) oder Absinken (Kompression, Erwärmung) und ist daher ein vorzügliches Maß zur Beschreibung der Stabilität der Atmosphäre: Bei neutraler Schichtung (Temperaturabnahme um $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) ist sie mit der Höhe konstant (die Isolinien in Abbildung 30 verlaufen dann genau senkrecht), bei stabiler Schichtung (Temperaturabnahme um weniger als $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ oder Temperaturzunahme mit der Höhe) nimmt die potentielle Temperatur mit der Höhe zu; bei labiler Schichtung (Temperaturabnahme um mehr als $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) nimmt sie mit der Höhe ab.

Abbildung 32 enthält eine graphische Darstellung der Windverhältnisse, wie sie vom Fesselballon erfaßt wird, Abbildung 33 die Sodarwinddaten. Die an den Hangstationen gemessenen Winde sind in Abbildung 34 zusammengestellt.

Aus Abbildung 30 ist die morgendliche stabile Schichtung an der Zunahme der potentiellen Temperatur mit der Höhe erkennbar und dann die rasche Erwärmung der Atmosphäre vom Boden her (ab 10 Uhr nimmt in Bodennähe die potentielle Temperatur mit der Höhe ab, d.h. die Schichtung ist in diesem Bereich überadiabatisch, also sehr labil geschichtet); gleichzeitig nehmen Streuung des Vertikalwinds und Echointensität zu (Abbildung 31): Am 19. 9. (Restbewölkung) und am 21. 9. (Hochnebel) war die Inversion nur schwach ausgebildet (Abbildung 30), Echointensität und Streuung des Vertikalwinds nehmen daher etwa zur gleichen Zeit zu. An Tagen mit gut ausgebildeter nächtlicher Inversion (20. und 21. 9.) erfolgt die Zunahme der Streuung des Vertikalwinds wie im Mittel

über alle Tage (Abschnitt 4.1.4) deutlich später als jene der Echointensität, da die noch im Tal befindliche Inversion trotz einsetzender Konvektion noch Vertikalbewegungen unterdrücken kann.

Der Wind ist morgens generell sehr schwach, die Ramsau zeigt häufig Ostwind (also Wind quer zur Talrichtung vom beschatteten Hang weg, besonders deutlich am 19. und 20. 9., jeweils zwischen 8 und ca 11 Uhr, weniger deutlich am 22. 9.); am 21. 9., als Hochnebel herrschte, zeigte die Ramsau schwachen Talauswind (Abbildung 34). Die Fesselballonmessungen zeigen Windstille oder Wind aus wechselnden Richtungen, wobei in höheren Schichten vielfach noch Reste von Talauswind erkennbar sind (Abbildung 32). Meist ab 10 Uhr setzt Taleinwind ein; aus den Sodarmessungen ist das Einsetzen des Taleinwind vom Boden her gut erkennbar (Abbildung 33, besonders deutlich am 19. 9.). An der Ramsau treten dann infolge der Störung der Strömungsverhältnisse durch die talabwärts gelegenen Gebäude Winde mit stark schwankenden Richtungen auf. Noch vor Drehung des Talwindsystems zeigen die Hangstationen den einsetzenden Hangaufwind (die Talwiese auch am 21. 9. trotz Hochnebels, die Stockaste ist zu dieser Zeit jedenfalls teilweise oberhalb des Nebels).

Ab Mittag ist die Talatmosphäre im gesamten Höhenbereich, der dem Fesselballon zugänglich war, adiabatisch - also neutral - geschichtet, die potentielle Temperatur zeigt oberhalb der bodennahen überadiabatischen (labilen) Schicht keine Abhängigkeit von der Höhe mehr. Dennoch ist am 21. (Hochnebeltag) und am 22. 9. (Schönwettertag) am späteren Nachmittag oberhalb von 200m bzw. 100m über Grund noch ein Rest einer stabilen Schicht erkennbar. Stabile Schichten wirken auch auf den Fesselballon als Sperrsicht (siehe dazu KAISER 1987), sodaß der Ballon oft an der Untergrenze von Inversionen "hängt" bleibt, ohne daß die Sonde den Temperaturanstieg noch erfassen kann. Hierbei fällt auf, daß die Steighöhen des Ballons tagsüber unerwartet niedrig waren. Ob dieser Effekt auf die in Talmitte üblichen Absinkbewegungen oder zusätzlich auch auf einen Inversionsrest zurückzuführen ist, kann aus den Messungen wegen der zu geringen Steighöhen selbst nicht geklärt werden.

Schon sehr früh, meist noch vor 16 Uhr, setzt in Bodennähe Stabilisierung ein (besonders deutlich am 19. und am 22. 9.). Ein Blick auf die Windverhältnisse (Abbildung 32, Fesselballonmessungen) zeigt, daß zu dieser Zeit in Bodennähe Westwind - also Wind quer zur Talrichtung - auftritt: Offensichtlich relativ kalte Luft, die vom bereits beschatteten Osthang quer zum Tal abfließt, sogar bis zur Talmitte vordringen kann und dort zu Temperaturrückgang führt, obwohl der Talboden zu dieser Zeit noch voll besonnt wird (besonders deutlich am 19., 20. und 22. 9.; am 21. 9. greift zwischendurch auch wieder Taleinwind durch. Am 20. 9. zeigt die Darstellung der potentiellen Temperatur zu dieser Zeit zwar keine Zunahme mit der Höhe - also keine Abkühlung am Boden-, aber deutliche Fluktuationen).

Auch für größere Höhen zeigen die Fesselballonmessungen nachmittags eine Winddrehung zum besonnenen Hang hin, der Taleinwind wird von Nord (= Richtung 8 in Abbildung 32) auf Nordwest (= Richtung 7 in der Abbildung) gedreht, besonders deutlich am 19. und 20. 9.

Die nachmittägliche Drehung des Taleinwinds zum besonnenen Westhang dürfte sich folglich aus dem "Ansauen" des Taleinwinds zum besonnenen Westhang einerseits und dem Abfließen kalter Luft vom beschatteten Osthang andererseits zusammensetzen. Das Abfließen des Hangabwinds ins Tal erklärt auch den turbulenten Charakter des beginnenden Inversionsaufbaus, wie er aus den Sodarprofilen hervorgeht (Abschnitt 4.1.4 und Profile der Streuung des Vertikalwinds in Abbildung 31, besonders am 19. und 20. 9.). Die Sodarmessungen können den bodennahen Westwind nicht erfassen (vgl. die vereinfachte Darstellung in Abbildung 33), zudem ist die unterste Meßhöhe des Sodar in 60m über Grund für die Erfassung dieses Phänomens meist zu hoch. Ein Vergleich mit den Meßwerten der Hangstationen (Abbildung 34) zeigt, daß der Beginn des Hangabwinds um rund 16 Uhr durch die Daten der Talwiese gut dokumentiert ist.

Nachts ist die Schichtung stabil, folglich sind die Werte der Streuung des Vertikalwinds klein, jene der Echointensität zunächst hoch. Die Sodarmessungen zeigen zunächst den Aufbau des Talauswinds, der seine größte Geschwindigkeit meist oberhalb von 100 bis 300m über Grund unmittelbar nach Mitternacht erreicht (Werte knapp über 3 m/s). Wie im Mittel über alle Tage schläft der Taleinwind meist schon vor 2 Uhr rasch wieder ein (besonders eindrucksvoll am 20. 9., aber auch am 22. und 23. 9.). Infolge der dann geringen Windscherung nimmt dann auch die Echointensität ab.

Etwas abweichend verhalten sich die Nächte vom 20. auf 21. und von 22. auf 23. 9.: Vom 20. auf 21. 9. fällt Hochnebel ein, der Talauswind ist daher überhaupt nur in höheren Schichten und dort nur schwach ausgebildet, und noch vor Mitternacht löst sich die Inversion vom Boden her auf. Während der Nacht von 22. auf 23. 9. kündigt der zunehmende Südwind am Arbiskopf bereits die sich annähernde Störungsfront an.

Die Zeitreihen der an den einzelnen Stationen gemessenen Immissionskonzentrationen sind in Abbildung 35 zusammengestellt. Sie zeigen zunächst das typische Verhalten, wie es bereits bei der Analyse der durchschnittlichen Tagesgänge beschrieben wurde (Abschnitt 5.5): Am Talboden hohe Ozonkonzentration bei guter Durchmischung der Atmosphäre, also tagsüber; hohe NO-Konzentrationen morgens und abends. Das morgendliche NO₂-Maximum tritt etwas später auf als jenes von NO. Deutlich früher als bei NO ist das nachmittägliche NO₂-Maximum. Die Hangstationen zeigen sehr deutlich das Wirken des Hangaufwinds: Vormittägliche NO-Spitze, gleichzeitig ein Ozonminimum (ersteres kann nur für die Talwiese gezeigt werden, da zu dieser Zeit für die Stockaste keine Stickstoffoxidmessungen vorliegen). Teilweise ist auch die Umrkehr des Tagesgangs von Ozon am Ahorn ersichtlich (angedeu-

tet am 19. und 20., recht schön am 22. und 23. 9.). All dies belegt das ausgeprägte "Eigenleben" des Zillertals, weil die hier an Schönwettertagen ersichtlichen Einzelheiten sehr klar auch im Mittel über alle Tage erkennbar sind.

Besonderheiten treten auf am 19. 9., als morgens noch Restbewölkung im Tal ist: Die Schichtung ist nachts nur schwach stabil (Abbildung 30). An der Ramsau steigt die Belastung durch NO morgens etwas weniger markant an wie an den anderen Tagen. Umgerechnet ist die Atmosphäre tagsüber dann offensichtlich auch besser durchmischt als an Tagen mit gut ausgeprägter nächtlicher Inversion, weshalb die Ozonkonzentration am Talboden höher steigt als an den anderen Tagen. Am Ahorn hingegen ist die Ozonkonzentration am 19. 9. synoptisch bedingt niedriger als an den anderen Tagen (Vorderseite des Hochs).

In der Nacht von 20. auf 21. 9. fällt Nebel ein, der in Form von Hochnebel am 20. noch bis zum späten Nachmittag anhält. Mit dem Nebeleinfall löst sich die Inversion vom Boden her auf, verstärkt sich aber im Bereich der Nebelobergrenze. Im Bereich des Nebels herrscht nur sehr schwacher Wind bzw. weitgehend Windstille: Während sich am Talboden (Ramsau) die NO-Konzentration annähernd "normal" verhält, steigt jene des NO₂ nach Aufhören des Taleinwinds nochmals an und bleibt die ganze Nacht hindurch auffallend hoch. Man hat den Eindruck, als würde durch das Ausbleiben des Talauswinds bzw. der Hangwindzirkulation die NO₂-reiche Luft im Tal liegenbleiben (der Rückgang des NO könnte trotzdem mit Hilfe des Ozons erfolgen, weshalb die NO-Konzentrationen "normal" erscheinen). Morgens steigt die NO-Konzentration wieder auf den üblichen Spitzenwert. Obwohl sich die Inversion nachts aufgelöst hatte, könnte man aus den Verläufen der Immissionskonzentrationen auf eine Bodeninversion schließen, die die vertikale Durchmischung verhindert. Die durch die Nebeldecke veränderten Strahlungsverhältnisse reichen offensichtlich aus, die ursprünglich vorhandene Temperaturzunahme mit der Höhe (Inversion) in eine Temperaturabnahme mit der Höhe umzuwandeln. Die Änderung der vertikalen Temperaturstruktur reicht aber nicht aus, um thermische Turbulenz zu erzeugen. Aufgrund der geringen Windgeschwindigkeit ist auch die dynamische Turbulenz gering, die Luft "ruht", die Atmosphäre ist nicht besser durchmischt als bei Vorhandensein einer Inversion. Sehr deutlich zeigt sich hier, wie gut sich die Streuung des Vertikalwinds als Maß für die turbulente Struktur der Atmosphäre eignet (die Werte unterscheiden sich in dieser Nacht nicht von jenen an den anderen Nächten).

Die ozonarme nebelige Talluft dürfte in dieser Nacht bald die Talwiese erreicht haben, weshalb die Ozonkonzentration dort rasch sehr kleine Werte erreicht. Auch tagsüber bleibt diese relativ niedrig. Obwohl tagsüber die Talwiese unterhalb der Nebeldecke gelegen ist (weshalb sich das Hangwindsystem vergleichsweise nur sehr schwach entwickeln kann), findet ein NO-Transport zur Talwiese statt.

Die nebelige Talluft erreicht auch die Stockaste, weshalb die Ozonkonzentration während der Nacht deutlich absinkt. Sie steigt tagsüber zuerst nur langsam, am späteren Nachmittag, als der Hochnebel auflockert, nochmals an.

Die Station Ahorn liegt die ganze Nacht und den darauf folgenden Tag hindurch oberhalb der Nebeldecke. Der tagsüber sehr schwache Taleinwind kann die Meßstelle offensichtlich nicht mehr erreichen bzw. führt nicht wie sonst die ozonarme Talluft zur Meßstelle. Der Nebel und die an seiner Obergrenze vorhandene Inversion wirken wie ein "Deckel". Die Station Ahorn befindet sich oberhalb dieses "Deckels" und ist von der darunterliegenden Talluft abgeschlossen. Folglich zeigt der Tagesgang der Ozonkonzentration auch den üblichen Einfluß der Photochemie mit einem Maximum am Nachmittag, also tritt kein inverser Tagesgang auf.

Gegen Ende der Schönwetterperiode hat die Meßstelle Ahorn eine deutlich höhere Ozonkonzentration als am Beginn. Die schwache Kaltfront zeigt nur einen vorübergehenden Einfluß auf die Ozonkonzentration (markanter Rückgang am 23. 9. mittags an den Stationen Ahorn und Stockaste).

6.2 Föhn

Das Studium einer Föhnperiode erscheint aus zwei Gründen interessant: Erstens sollte beim Durchgreifen des Föhns das "Eigenleben des Tals" zerstört werden; zweitens zeigen die Statistiken der Ozonkonzentrationen für die hochgelegenen Stationen, besonders aber an den Hängen (Talwiese), recht hohe Werte bei Südströmung (siehe Abschnitt 5.2.1). Es erhebt sich also die Frage, ob und wenn, wie diese ozonbelastete Luft das Tal erreichen kann.

Es wurde daher eine 12-tägige Föhnperiode (vom 8. bis 19. Oktober 1988) untersucht (KAI SER 1992b). An dieser Stelle werden die wichtigsten Ergebnisse aus dieser Periode anhand von vier ausgewählten Tagen dargestellt: Jene zwei Tage (die einzigen der gesamten 12-tägigen Föhnperiode), an denen der Föhn bis zum Tal durchgreift, nämlich der 11. und der 12. 10. 1988. Der 14. und der 18. 10. hingegen sind Beispiele für jene Tage, an denen am Arbiskopf Föhnsturm bläst, das Tal hingegen weiter sein "Eigenleben" führt.

Da das Sodar während der Föhnperiode teilweise defekt war und die Meßwerte von Temperatur und relativer Feuchte an der Stockaste teilweise nicht korrekt sind, muß für diese Periode auf die Daten beider Systeme verzichtet werden.

Die bei Föhn primär interessierenden Windverhältnisse sind in Abbildung 36 für die vier ausgewählten Tage zusammengestellt. Am Arbiskopf weht an allen Tagen kräftiger Föhn. Lediglich am 11. 10. bis etwa 6 Uhr ist der Föhn noch relativ schwach (am Vortag hatte eine in die Föhnströmung eingelagerte Kaltfront das Untersuchungsgebiet überquert und zu vorübergehendem Föhnzusammenbruch geführt; auch am 18. 10. läßt der Föhn am Arbiskopf tagsüber etwas nach).

Schon die Stockaste zeigt im allgemeinen den üblichen Wechsel von hangauf- und hangabwärts gerichteten Winden, besonders markant am 11. und am 12. 10., obwohl gleichzeitig am Arbiskopf Föhnsturm weht. Die Hangaufrichtung fällt hier aber mit der Richtung der Föhnströmung (beide aus Süd) zusammen, sodaß eine Unterscheidung, ob Hangaufwind oder Föhn herrscht, nicht immer eindeutig ist. Die niedrigen Windgeschwindigkeiten am 11., 12. und 14. 10. tagsüber legen aber nahe, daß hier Hangaufwind weht. Lediglich am 11. (kurzzeitig mittags) und am 18. 10. könnte die etwas höhere Windgeschwindigkeit ein Hinweis für ein Durchgreifen des Föhns sein. Umgekehrt fällt an einigen Nächten auf, daß die Windgeschwindigkeit für Hangabwind relativ hoch ist (am 11. 10. zwischen 2 und 5 Uhr und zwischen 20 und 22 Uhr und kurzzeitig am 12. 10. nahe 22 Uhr). Dieser relativ starke Nordostwind könnte auf ein Umlenken der Föhnströmung den Hang entlang nach unten (also über Nordost) zur Stockaste zurückzuführen sein (vgl. dazu EKHART [1949], der im Inntal am luvseitigen Hang Neigung zu Wirbelbildung mit horizontaler Achse und teilweiser Ortsbeständigkeit findet - d.h. Windrichtungen hangauwärts oberhalb, aber hangabwärts unterhalb der Rotationsachse: "Es macht dann den Eindruck, als ob die eigentliche Föhnströmung längs des Nordkettenhangs auf diesen kleinen Luftwalzen wie auf einem Kugellager aufwärts gleite"). Ähnlich wie der Hang der Nordkette könnte auch der nach Süden orientierte Hang, auf dem die Meßstelle Stockaste gelegen ist, einen derartigen "Prallhang" für die Föhnströmung darstellen.

Die tiefergelegenen Stationen Talwiese und Ramsau zeigen im allgemeinen nur schwachen Wind (bevorzugt hangabwärts gerichtet an der Talwiese bzw. talauswärts gerichtet an der Ramsau) oder Windstille. Am 11. 10. tagsüber ist das Durchgreifen des Föhns bis zum Talgrund gut ersichtlich aus den Winden aus südlicher Richtung mit relativ hoher Geschwindigkeit an den Meßstellen Stockaste (hier nur ganz kurzzeitig), Talwiese (hier nicht sehr deutlich, was eventuell auf die durch Hochwald geschützte Lage der Meßstelle zurückzuführen ist) und - besonders deutlich - an der Ramsau. Am 12. 10. greift der Föhn tagsüber ebenfalls bis zur Ramsau durch, die Meßstelle mißt kräftigen Südwind. Die Talwiese zeigt nur kurzzeitig und etwas früher als die Ramsau eine nur geringfügig erhöhte Windgeschwindigkeit, die Stockaste mißt überhaupt nur schachen Wind. Möglicherweise greift hier der Föhn nur in das nord-süd (also strömungsparallel) gerichtete Zillertal, nicht aber in das west-ost gerichtete Sidanbachthal durch. An beiden Tagen läßt an der Ramsau schon am späteren Nachmittag der Wind wieder rasch nach, es herrscht wieder Windstille oder schwacher talauswärts gerichteter Wind.

Abgesehen vom starken Wind sollte Föhndurchbruch mit einem sprunghaften Anstieg der Temperatur und einem sprunghaften Rückgang der relativen Luftfeuchtigkeit verbunden sein. Die Verläufe der relativen Feuchte sind in Abbildung 37, jene der Temperatur in Abbildung 38 zusammengestellt. Beide Meßgrößen sehen am Talboden

(Ramsau) auf ersten Blick aus wie an Schönwettertagen. Die Werte der relativen Feuchte sind an der Ramsau für Föhn generell unerwartet hoch, nachts nahe der Sättigung, tagsüber meist deutlich über 50%.

Am 11. 10. ist der Föhndurchbruch ins Tal aus der raschen Abnahme der relativen Feuchte an der Talwiese und an der Ramsau gut ersichtlich. An der Talwiese erfolgt die Abnahme der relativen Feuchte einige Stunden vor der Ramsau, d.h. der Föhn hat die Talwiese deutlich früher erreicht als die Ramsau, was auch durch die Windmessungen gut dokumentiert ist (vgl. Abbildung 36). Gleichzeitig - und mit der analogen zeitlichen Verschiebung - steigt die Temperatur an beiden Stationen sprunghaft (Abbildung 38). Anders verhält es sich am 12. 10.: Während an der Talwiese vormittags noch ein relativ rascher Abfall der relativen Feuchte erkennbar ist, nimmt die relative Feuchte an der Ramsau recht kontinuierlich ab (Abbildung 37). Die Temperatur nimmt sogar an beiden Meßstellen nur recht langsam zu. In Teilen des Zillertals wurden am 12. 10. Regenschauer beobachtet. Möglicherweise ist der starke Südwind an der Ramsau kein klassischer Föhn, sondern wird durch Böen dieser Schauer hervorgerufen, oder es haben die Regenschauer die Luft in Bodennähe befeuchtet und abgekühlt. An beiden Tagen nimmt an der Ramsau nachmittags nach dem Nachlassen des Windes entsprechend des üblichen Tagesgangs die Temperatur wieder ab und die relative Luftfeuchte wieder zu. Am 11. 10. bleibt an der Talwiese die relative Feuchte bis Mitternacht niedrig und die Temperatur hoch. Das ist in etwa auch jener Zeitraum, in dem die Talwiese noch etwas erhöhte Windschwindigkeiten mißt.

An den beiden anderen Tagen, an denen der Föhn nicht bis ins Tal durchgreift, zeigen die Meßstellen Bair und Talwiese grundsätzlich deutlich höhere Temperaturen als die Ramsau (Ausnahme: frühe Nachmittagsstunden am 18. 10.), besonders deutlich am 14. 10. Wie bereits mehrfach gezeigt wurde, sind die Stationen Bair und Talwiese tagsüber zu warm. Abbildung 38 darf daher nur mit großer Vorsicht interpretiert werden. Wie aber anhand der Meßreihen der Immissionskonzentrationen noch gezeigt wird, befindet sich an diesen Tagen tatsächlich eine niedrige, aber intensive Inversion im Tal. Es bleibt also bei Föhn (und auch bei Störungsdurchgängen, wie von KAISER [1992b] gezeigt wurde), häufig ein seichter Kaltluftsee im Tal zurück, der langsam talauswärts fließt (vgl. Abbildung 36, die vor allem am 14. 10. an der Ramsau ganztags schwachen talauswärts gerichteten Wind zeigt). An den Tagen mit Föhndurchbruch wird dieser Kaltluftsee kurzzeitig zerstört, regeneriert sich aber am späteren Nachmittag wieder rasch.

Föhn am Arbiskopf oder Durchzug schwacher Fronten sind also häufig mit einer im Tal verbleibenden seichten Kaltluftschicht verbunden, die langsam talauswärts fließt. Föhn dringt am ehesten (und während der von KAISER [1992] untersuchten 12-tägigen Periode) nur dann ins Tal vor, wenn die Schichtung entweder synoptisch bedingt (nach Durchzug von Störungsfronten) oder infolge des Tagesgangs der Temperatur mittags (wie am 11. und 12. 10.)

relativ labil ist (vergleiche dazu auch SEIBERT 1992). Schon im Laufe des Nachmittags regeneriert sich aber die Kaltluftschicht wieder. Die hier vorgefundene Verhältnisse entsprechen weitgehend Beobachtungen von FICKER (1910): Seichte Kaltluftschicht in den Tälern, die schon vor Föhnaustritt langsam vom Gebirge wegfließt. Interessant ist hier, daß sich diese Kaltluftschicht auch nach Durchgreifen des Föhns sehr rasch wieder regenerieren kann.

Infolge des eben diskutierten, auch bei Föhn zumindest in den unteren Höhenbereichen ausgeprägten Eigenlebens der Talatmosphäre überrascht weiter nicht, daß am Talboden (Ramsau) die Ozon-Tagesgänge (Abbildung 39) aussehen wie an Schönwettertagen - ein Phänomen, wie es auch schon von GÄBLER (1990) im Mittel über alle als Föhnstage klassifizierten Tage gefunden wurde. Das Durchgreifen des Föhns am 11. und 12. 10., jeweils mittags, fällt zeitlich mit dem üblichen Ozon-Maximum zusammen, weshalb der durch den Föhndurchbruch verursachte Anstieg der Ozonkonzentration am Talboden kaum vom normalen Ozon-Tagesgang unterscheidbar ist. Ansonsten macht sich Föhn am Talboden nur durch einzelne wenig markante Ozonspitzen während der Nacht bemerkbar (z.B. am 12. 10.). Die seichte, aber sehr intensive Inversion am 14. 10. ist am Talboden an der geringen Ozonkonzentration tagsüber erkennbar.

An den NO_x-Konzentrationen, besonders an jener des NO, ist an der Ramsau ebenfalls die Wirkung der seichten Inversionen ersichtlich: Die üblichen Konzentrationsspitzen sind sehr hoch, besonders deutlich am 14. und 18. 10.

Die Ozonkonzentrationen an den Bergstationen (Ahorn und Stockaste) zeigen den Einfluß der Synoptik: Niedrige Werte nach Störungsdurchgang in den ersten Stunden des 11. 10. an der Stockaste (bzw. an den anderen Tagen mit Frontdurchgängen auch an der Station Ahorn). Ansonsten ist die Ozonkonzentration am Ahorn nahezu konstant, es herrscht also kein inverser Tagesgang. Stattdessen weisen nun die Meßstellen Stockaste (am 18. 10.) und Talwiese (angedeutet am 12. und 14. 10., deutlich am 18. 10.) einen inversen Ozon-Tagesgang auf. Die untersuchte Periode zeichnet sich eben dadurch aus, daß das ganze autochthone System zwar immer noch sehr deutlich ausgeprägt, aber auf die unteren Höhenbereiche des Tals beschränkt ist. Jetzt treten Phänomene, die normalerweise erst in größeren Höhen (Ahorn) zu beobachten sind, schon an der Talwiese oder an der Stockaste auf: Tagsüber Advektion ozonarmer Luft aus dem Tal, während nachts ein solcher Transport unterbleibt.

Die beiden Tage mit Föhndurchbruch zeigen an den Hangstationen zum Teil einen markanten Anstieg der Ozonkonzentration (Stockaste am 11. 10. schon etwa um 6 Uhr, die Konzentration bleibt dann im weiteren hoch; sehr markant ist der Konzentrationsanstieg an der Talwiese am 11. 10. und - weniger deutlich - am 12. 10.). Am 14. 10. fällt auf, daß das sonst übliche (vor)mittägliche Ozonminimum an der Talwiese kaum zu erkennen ist: Die Inversion ist hier offensichtlich so seicht und intensiv, daß die sehr

ozonarme Luft des Talbodens (vgl. die Werte der Ramsau) die Talwiese nicht erreichen kann.

Die Stickstoffoxidmessungen an der Talwiese zeigen tagüber den Einfluß der Advektion von belasteter Talluft über Hangauf- bzw. Taleinwind. Am 11. 10., unmittelbar vor Föhndurchbruch ist am deutlichen Anstieg der NO-Konzentration die Wirkung des Hangaufwinds ersichtlich (vgl. Abbildung 36). Der Föhndurchbruch scheint also durch Labilisierung der Atmosphäre durch Einstrahlung begünstigt worden zu sein. Bei Föhndurchbruch sinkt die NOx-Konzentrationen an der Talwiese markant; dennoch ist am 12. 10. vormittags neuerlich ein Antransport stickstoffreicherer Luft erkennbar (deutlich beim NO₂, angedeutet beim NO), d.h. auch an der Talwiese herrscht zu dieser Zeit wieder das übliche "Eigenleben" des Tals. Ab 12. 10. vormittags liegen für die Talwiese keine NOx-Messungen mehr vor.

Zusammenfassend zeigt die Analyse der Föhnperiode, daß Föhn meist nur dann ins Tal durchgreift, wenn die Schichtung der Talatmosphäre an sich eher labil ist: Dies kann synoptisch bedingt sein, z.B. infolge des Durchgangs einer Kaltfront; oder, wie am 11. und 12. 10., wenn die Talatmosphäre infolge von Sonneneinstrahlung labiliert wird. Ansonsten führt auch bei Föhn das Tal sein übliches Eigenleben. Die autochthone Schicht ist aber auf einen niedrigen Höhenbereich beschränkt. Für die Immissionskonzentrationen bedeutet dies, daß am Talboden die Tagesgänge im wesentlichen denen von Schönwettertagen entsprechen; Modifikationen ergeben sich nur dadurch, daß die Inversion relativ seicht aber intensiv ist, d.h. die Spitzen der NO- und NO₂-Konzentration können überdurchschnittlich hohe Werte erreichen. Da sich nach Föhndurchbruch der flache Kaltluftsee rasch wieder regeneriert und die Phase des Föhndurchbruchs - jedenfalls während der untersuchten Periode - im wesentlichen auf die Mittags- und Nachmittagsstunden (also die übliche Zeit des Ozonmaximums) - beschränkt ist, unterscheidet sich der Tagesgang der O₃-Konzentration am Talboden auch an solchen Tagen nicht wesentlich von typischen Schönwettertagen.

Das autochthone System der Talatmosphäre an Föntagen ist aber auf einen niedrigeren Bereich beschränkt als sonst, es treten typische Phänomene, die normalerweise an den höchstgelegenen Stationen vorzufinden sind (inverser Tagesgang der O₃-Konzentration) dann schon an den tiefergelegenen Stationen Talwiese und - nur mehr sehr schwach - an der Stockaste auf.

LITERATUR

- AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG 1993: Zustand der Tiroler Wälder. Bericht an den Tiroler Landtag.
- BERMADINGER E., D. GRILL, H. GUTTENBERGER 1989: Thiole, Ascorbinsäure, Pigmente und Epikutikularwachse in Fichtennadeln aus dem Höhenprofil "Zillertal". *Phyton (Austria)* 29 (3), 163-186.
- BERMADINGER-STABENTHEINER E. & D. GRILL 1992: Pflanzenphysiologische Untersuchungen am Höhenprofil Zillertal. In: Ökosystemare Studien in einem inneralpinen Tal. FBVA-Berichte 67, 87-94.
- BOLHAR-NORDENKAMPF H. R. 1989: Streßphysiologisches Konzept einer kausalanalytischen Waldschadensforschung. *Phyton (Austria)*, 29 (3), 11-14.
- BOLHAR-NORDENKAMPF, H. R. & M. GOTZL 1992: Chlorophyllfluoreszenz als Indikator der mit der Höhenlage zunehmenden Streßbelastung von Fichtennadeln. FBVA-Berichte 67, 119-132.
- DEFANT F. 1949: Zur Theorie der Hangwinde nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg- und Talwinde. *Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser.A, Bd.1*, 421-450.
- EKHART E. 1949: Zum Innsbrucker Föhn. *Met. Rundschau* 2, 276-280. In: Föhnstudien, M. KUHN, (Hrsg.) Wiss. Buchges., 1989.
- FICKER H.v. 1910: Über die Entstehung der Föhnwinde auf der Nordseite der Alpen. *Met. Zeitschrift* 27, 439-451. In: Föhnstudien, M. KUHN (Hrsg.), Wiss. Buchges., 1989.
- GABLER K. 1990: Verhalten von Ozon in Alpentälern. Symposium "Bodennahes Ozon" 12./13. 11. 1990, Tagungsband, 149-167.
- GEYER B. 1991: Einflüsse meteorologischer Parameter auf die Ozonkonzentration im Raum Innsbruck. Diplomarbeit Univ. Innsbruck.
- GOMISCEK B. & H. PUXBAUM 1990: Untersuchung der vertikalen Verteilung von Ozon in Alpentälern mit besonderer Berücksichtigung des Nationalparks Hohe Tauern. TU Wien, Inst. f. Analyt. Chemie.
- GOMISCEK B. & H. PUXBAUM 1991: Untersuchung der vertikalen Verteilung von Ozon im Bereich des Hohen Sonnblicks und im Zillertal. TU Wien, Inst. f. Analyt. Chemie.
- GREGORI M. 1992: Persönliche Mitteilung.
- HERMAN F. 1992: Nähr- und Schadstoffgehalte der Nadelproben des Höhenprofiles Zillertal. FBVA-Berichte 67, 79-86.
- HOFMANN P. 1992: Immissionsbezogene Flechtenkartierung im Zillertal. FBVA-Berichte 67, 133-138.
- KAISER A. 1987: Thermisch-hygrische Vertikalprofile in einem südalpinen Becken. *Wetter u. Leben* 4, 219-234.
- KAISER A. 1989: Die vertikale Temperaturstruktur der Atmosphäre im Zillertal. *Phyton (Austria)*, 29 (3), 49-61.
- KAISER A. 1992a: Analyse der vertikalen Temperaturstruktur im Zillertal anhand von Fesselballon-, Sodar- und Hangmessungen. In: Ökosystemare Studien in einem inneralpinen Tal. FBVA-Berichte 67, 51-63.

- KAISER A. 1992b: Analyse der vertikalen Temperatur- und Windstruktur und ihr Einfluß auf die gemessene Immissionsbelastung im Bereich des Höhenprofils Zillertal. Forschungsprojekt gem. Auftrag d. BMFLF GZ.: 56.810/02-VA2/90.
- KOLB H. & G. RAU 1990: Meteorologische Einflüsse auf das bodennahe Ozon. Symposium Bodennahes Ozon, Salzburg. Hrsg.: Gesellschaft Österr. Chemiker.
- MASCHER G. 1987: Die witterungsbedingten Ozonkonzentrationen im Raum Innsbruck. Diplomarbeit, Innsbruck.
- ÖSTERREICHISCHES INSTITUT FÜR RAUMPLANUNG 1986: Umweltverträglichkeitsprüfung Heizkraftwerk Wörgl.
- PLATTNER J. & J. PAUSCH 1992: Aufbau und Betreuung von alpinen Luftmeßstationen. FBVA-Berichte 67, 13-20.
- PIRINGER M. 1988: The determination of mixing heights by sodar in an urban environment. Env. Met., 425-444.
- PRUGGER R. 1991: Meteorologische Aspekte der Ozonverteilung in den Höhenlagen Nordtirols. Diplomarbeit Univ. Innsbruck.
- PUCHINGER L. & STACHELBERGER H. 1989: Standortabhängigkeit der Lipiddynamik von Fichtennadeln. Phyton 29 (3), 233-253.
- PUXBAUM H., K. GABLER, ST. SMIDT & F. GLATTES 1991: A one-year record of ozone profiles in an Alpine Valley (Zillertal/Tyrol, Austria, 600-2000m a.s.l.). Atm. Env. 25A (9), 1759-1765.
- SEIBERT P. 1992: Der Föhn in den Alpen. Geograph. Rundschau, Heft 2. Im Druck.
- SMIDT S., K. GABLER & H. PUXBAUM 1990: Die zeitliche und vertikale Zunahme der Ozonkonzentrationen. Österr. Forstzeitung 7, FBVA Informationsdienst, 247. Folge.
- SMIDT S., F. HERMAN & J. LEITNER 1990: Höhenprofil Zillertal Meßbericht 1988. Bericht G3-1/1993, Institut für Immissionsforschung und Forstchemie, Forstliche Bundesversuchsanstalt, Wien.
- SMIDT S. & J. LEITNER 1992: Luftsadstoffmessungen am Höhenprofil Zillertal. FBVA-Berichte 67, 21-28.
- SMIDT S. & J. LEITNER 1992: Luftsadstoffmessungen im Bereich der Höhenprofile Achenkirch. FBVA-Berichte 70, 25-76.
- STEINACKER R. 1987: Orographie und Fronten. Wetter u. Leben 39, 65-70.
- STEINACKER R.: Eine ostalpine Strömungslagenklassifikation. Unveröffentlichtes Manuskript.
- VUKOVICH F.M., W. BACH, B. CRISSMAN & W. KING 1977: On the relationship between high ozone in the rural surface layer and high pressure systems. Atm. Env. 11, 967-983.
- VERGEINER I., E. DREISEITL, H. FEICHTER, & H. PUMPEL 1978: Inversionslagen in Innsbruck. Wetter u. Leben, Jg. 30, Heft 2, 69-86.
- VERGEINER I. 1983: Dynamik alpiner Windsysteme. Bericht zum Forschungsvorhaben "3556" des Fonds zur Förderung der wiss. Forschung, Wien.
- WEGE K., & W. VANDERSEE 1991: Ozonbeobachtungen am Nordrand der Alpen. Met. Rdsch. 44, 138-146.
- WHITEMAN C.D. 1980: Breakup of temperature inversions in Colorado Mountain valleys, Dept.of Atm. Sc., CO State Univ., Fort Collins. Atm. Sc. Paper No 328, Climatology Report No 82-2.
- WHITEMAN C.D. 1990: Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain. In: Atm. processes over complex terrain. American Met. Soc.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist die gekürzte Fassung einer Studie, die im Auftrag des Bundesministeriums für Land und Forstwirtschaft, (GZ: 56.810/02-VA2/90) durchgeführt wurde. Sie enthält eine umfassende Analyse der meteorologischen Verhältnisse und ihrer Auswirkungen auf die Immissionsbelastung im Zillertal/Tirol. Untersucht werden die Abhängigkeit der lokalen meteorologischen Gegebenheiten und der Immissionskonzentrationen von der großräumigen Wetterlage, sowie der Zusammenhang der Immissionskonzentrationen mit den meteorologischen Verhältnissen im Tal selbst. Die Untersuchungen beruhen auf Daten von insgesamt fünf Hangstationen, Messungen mittels Akustikradar (Sodar) und Fesselballonsonde.

Es zeigt sich, daß das Zillertal ein für Alpentäler typisches "Eigenleben" mit charakteristischen Wind- und Temperaturverhältnissen aufweist: Nachts Talab- und Hangabwinde und stabile Schichtung (Inversionen), tagsüber Taleinwind und Hangaufwinde und relativ gute vertikale Durchmischung der Atmosphäre, teilweise infolge labiler Schichtung, teilweise infolge von Absinkbewegungen in Talmitte. Aufgrund der speziellen Lage des Zillertales (es mündet in das Inntal, welches in den untersten rund 700m über Grund einen nur unwesentlich größeren Talquerschnitt hat als das Zillertal) "schläft" der Talauswind während der zweiten Nachhälfte ein": Das Inntal ist mit Kaltluft aufgefüllt, ein weiteres Abfließen kalter Luft aus dem Zillertal wird behindert. Weiters lassen einige Ergebnisse vermuten, daß häufig auch tagsüber ein Rest der nächtlichen Inversion bzw. einer stabilen Schicht im Tal verbleibt.

Ein Einfluß der großräumigen Wetterlage auf die meteorologischen Verhältnisse im Tal ist im allgemeinen kaum erkennbar. Lediglich bei großräumigen Strömungen aus nördlicher bis östlicher Richtung, die zu relativ labiler Schichtung im Tal führen, ist an den dann relativ häufig auftretenden Winden aus Nordost ein gewisser Einfluß der großräumigen Wetterlage im Tal ersichtlich. Bei Strömungen aus Süd und West treten häufig intensive, aber seichte Inversionen auf, das autochton System ist auf einen verhältnismäßig niedrigen Höhenbereich beschränkt. Dennoch ist sogar bei kräftigem Föhn ein Durchgreifen der großräumigen Strömung bis zum Talboden sehr selten und tritt meist nur dann auf, wenn es durch andere Faktoren (labile Schichtung infolge von Störungsdurchgängen oder infolge von Sonneneinstrahlung) begünstigt wird.

Die Immissionsbelastung durch Ozon ist an den Bergstationen Ahorn und Stockaste im wesentlichen synoptisch beeinflußt: Die niedrigsten Konzentrationen treten an der Vorderseite, die höchsten an der Rückseite von Hochdruckgebieten auf. Inwieweit das Ozon den Talboden erreichen kann, ist durch die Durchmischung der "freien" Talatmosphäre bestimmt. Je labiler die Schichtung, desto höher die Ozonkonzentrationen am Talboden; stabile Schichtung oder Inversionen verhindern den Ozontransport zum Talboden. Wegen des ausgeprägten Eigenlebens der Talatmosphäre wirken sich großräumige Wetterlagen

auf die Ozonkonzentrationen am Talboden im wesentlichen nur über ihre Wirkung auf die vertikale Durchmischung der Talatmosphäre aus.

Infolge der Nähe zu den Emissionsquellen sind die Stickstoffoxidkonzentrationen am Talboden am größten. Hohe Werte treten hier auf bei stabiler Schichtung, insbesondere bei seichten Inversionen, relativ niedrige Werte bei guter Durchmischung; tagsüber ist zudem ein Transport stickstoffoxidreicher Luft aus talauwärts gelegenen Bereichen bzw. aus dem Inntal, nachts ein solcher stickstoffoxidärmer Luft aus talaufwärts bzw. von den unbela steten Hängen her angedeutet. Besonders an den Hangstationen zeigt sich insbesondere an den Stickstoffmonoxidkonzentrationen neben dem Einfluß der Durchmischung der "freien" Talatmosphäre auch die Wirkung des Hangwindsystems (Advektion stickstoffoxidreicher Luft bei Hangaufwind). Der Einfluß der großräumigen Wetterlage auf die Stickstoffoxidkonzentrationen vermittelt sich ähnlich wie bei Ozon im wesentlichen lediglich über den Einfluß auf die vertikale Durchmischung der Talatmosphäre.

Sehr eindrucksvoll zeigt sich das Zusammenspiel der vertikalen Temperaturstruktur der Talatmosphäre, der Windsysteme (Berg-Talwind und Hangwindsystem), luftchemischer Prozesse und von charakteristischen Emissionsverhältnissen beim Studium der Tagesgänge der einzelnen Schadstoffkomponenten: Hohe Stickstoffoxidkonzentrationen am Talboden zum Zeitpunkt der Verkehrsspitzen morgens und abends, wenn gleichzeitig die Atmosphäre stabil geschichtet ist. Damit verbunden ist der Ozonabbau durch Reaktion mit Stickstoffmonoxid. Bei einsetzendem Hangaufwind morgens Anstieg der Stickstoffoxidkonzentration und Rückgang der Ozonbelastung an den Hängen; tagsüber bei zunehmender Durchmischung der Talatmosphäre Anstieg der Ozonkonzentration am Talboden und Rückgang der Stickstoffoxidkonzentration, besonders jener von Stickstoffmonoxid (letzterer ist zudem bedingt durch Abbau infolge des jetzt reichlich vorhandenen Ozons); gleichzeitig Abnahme der Stickstoffoxidkonzentration und wieder Zunahme der Ozonkonzentration (jetzt auch infolge von photochemischer Ozonproduktion) an den Hängen; abends infolge von Stabilisierung der Talatmosphäre, Aufhören der Photochemie und Abbau durch Reaktion mit Stickstoffmonoxid Rückgang der Ozonkonzentration vor allem am Talboden.

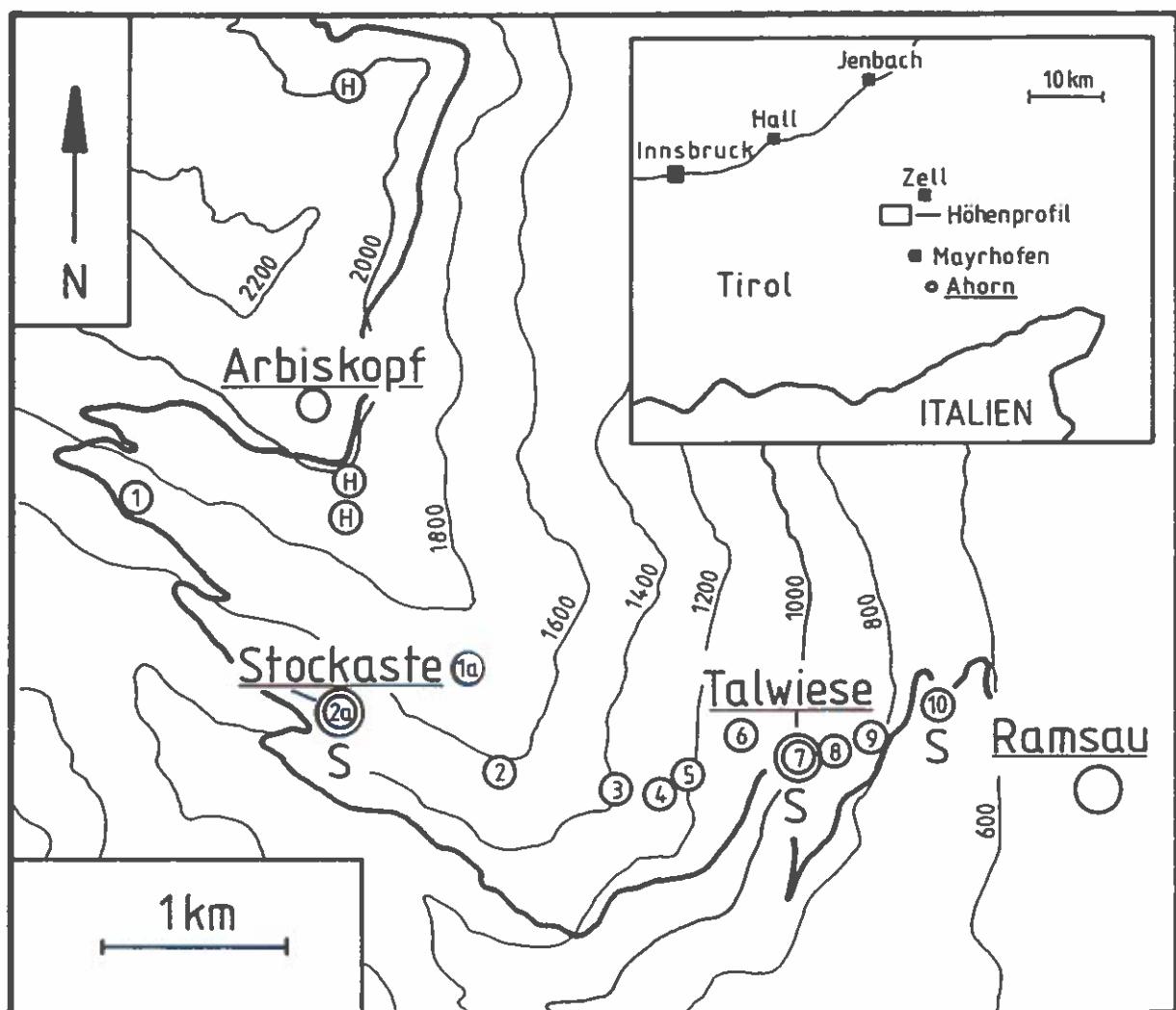
An der höchstgelegenen Station Ahorn macht sich die Advektion ozonärmer Talluft durch Talein- und Hangaufwind tagsüber in einer Umkehr des Tagesgangs der Ozonbelastung bemerkbar: Hier tritt im Mittel die höchste Konzentration nachts, die niedrigste vormittags oder mittags auf; lediglich, wenn der Transport vom Tal her unterbunden ist (wie dies bei Hochnebel der Fall war) und sonst keine störenden Einflüsse (z.B. starker Wind) vorliegen, tritt auch am Ahorn infolge von photochemischen Prozessen und infolge des Tagesgangs der vertikalen Durchmischung der übliche Tagesgang der Ozonkonzentration auf (Maximum tagsüber, Minimum nachts).

Das ausgeprägte Eigenleben der Talatmosphäre bewirkt, daß sich die über alle Tage gemittelte Immissionskonzentration kaum von jener unterscheidet, die an gradient-schwachen Wetterlagen, an denen sich die lokalen Verhältnisse im allgemeinen am besten ausprägen können, zu beobachten ist. Bei Durchgang schwacher Störungen, insbesondere aber bei Föhn ist die autochthone Luftschicht lediglich auf einen geringeren Höhenbereich im Tal beschränkt: Das hat zur Folge, daß auch bei Föhn am Talboden meist die üblichen Tagesgänge der meteorologischen Größen und der Immissionsbelastung vorzufinden sind. Typische Verhältnisse, die man gewöhnlich nur an der höchstgelegenen Station Ahorn findet (inverser Tagesgang der Ozonbelastung) treten dann aber schon an tiefer gelegenen Stationen (Talwiese) auf.

Aufgrund des ausgeprägten "Eigenlebens" der Talatmosphäre können überregionale Schadstofftransporte anhand der Messungen im Tal, ja nicht einmal anhand der Messungen am Arbiskopf (2133 m) nachgewiesen werden. Derartige Transporte mögen durchaus vor sich gehen, sie werden dem Tal jedoch über die lokalen Gegebenheiten vermittelt; Messungen im Tal aber ermöglichen keinen Schluß mehr auf die überregionalen Verhältnisse.

Bildanhang

Untersuchungsgebiet und Probeflächen



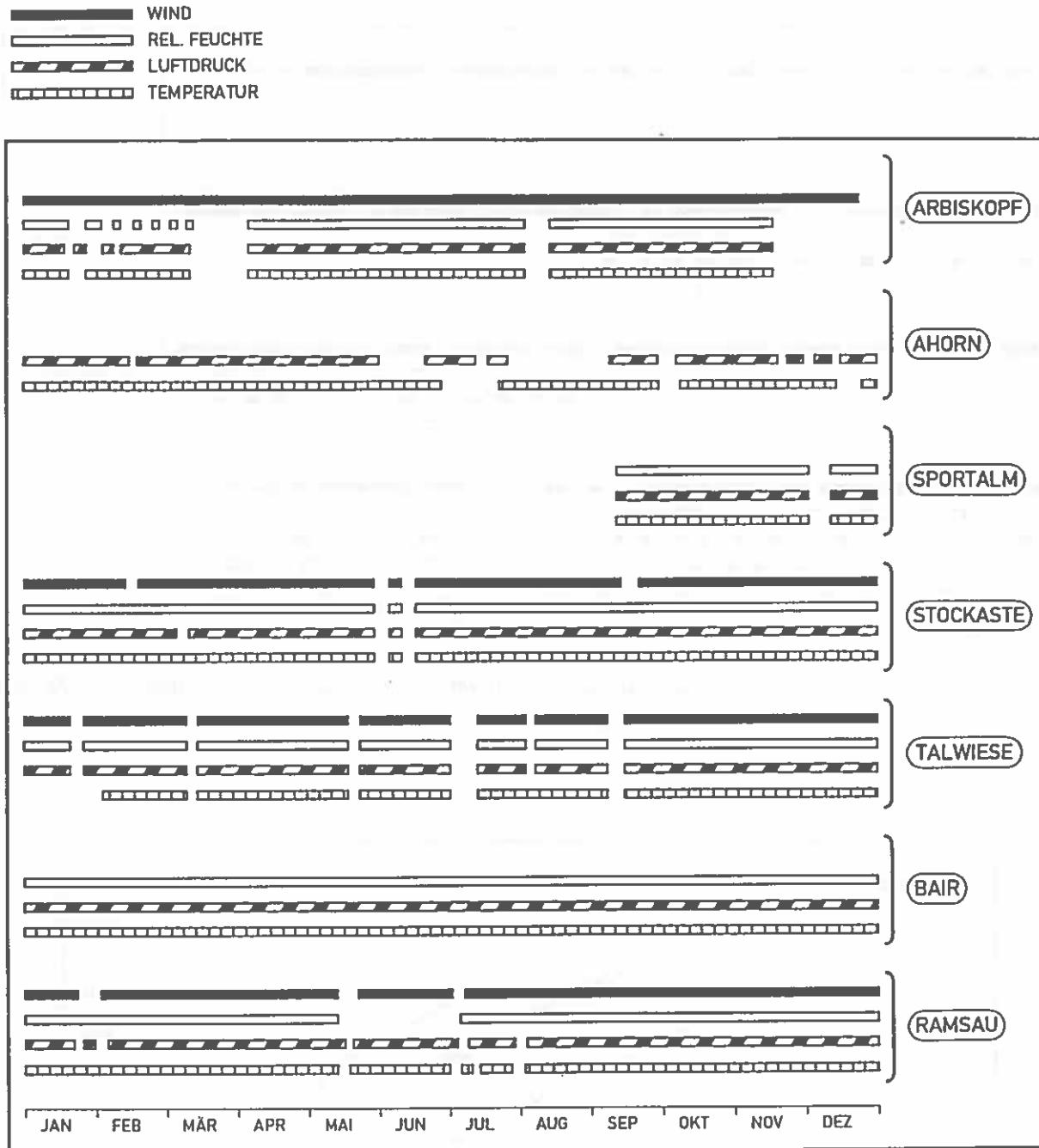


Abbildung 1: Meßgrößen und -zeiträume (Jahr 1988) für die Hangstationen des Höhenprofils Zillertal.

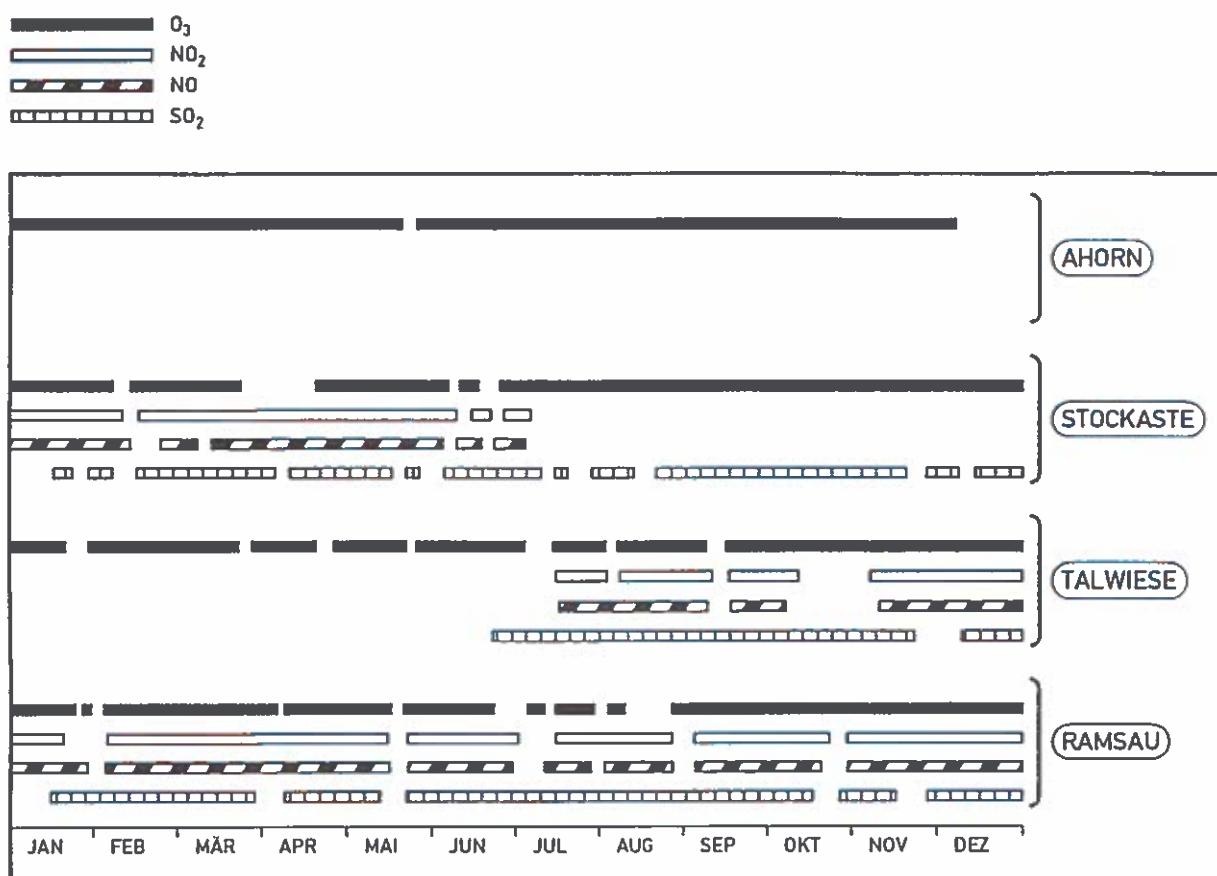


Abbildung 1 (Fortsetzung): Meßgrößen und -zeiträume (Jahr 1988) für die Hangstationen des Höhenprofils Zillertal.

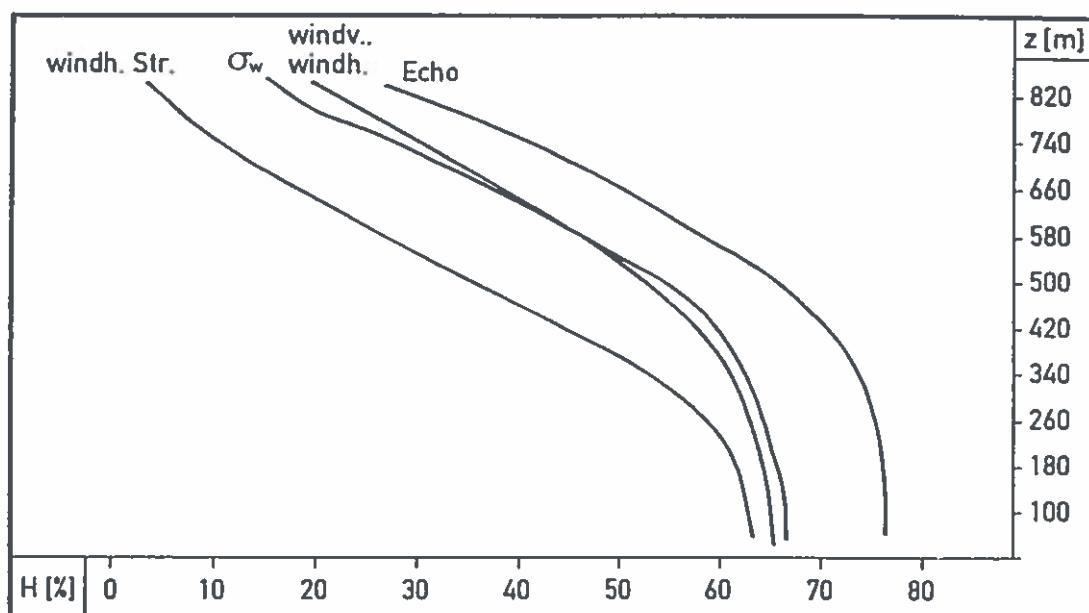


Abbildung 2: Relative Häufigkeit gültiger Sodardaten in Abhängigkeit von der Höhe über Grund.
(echo = Echointensität, windh = horizontale Windkomponenten (Richtung und Geschwindigkeit),
windv = Vertikalwind, s_w = Streuung des Vertikalwinds, windh Str = Streuung des Horizontalwinds).

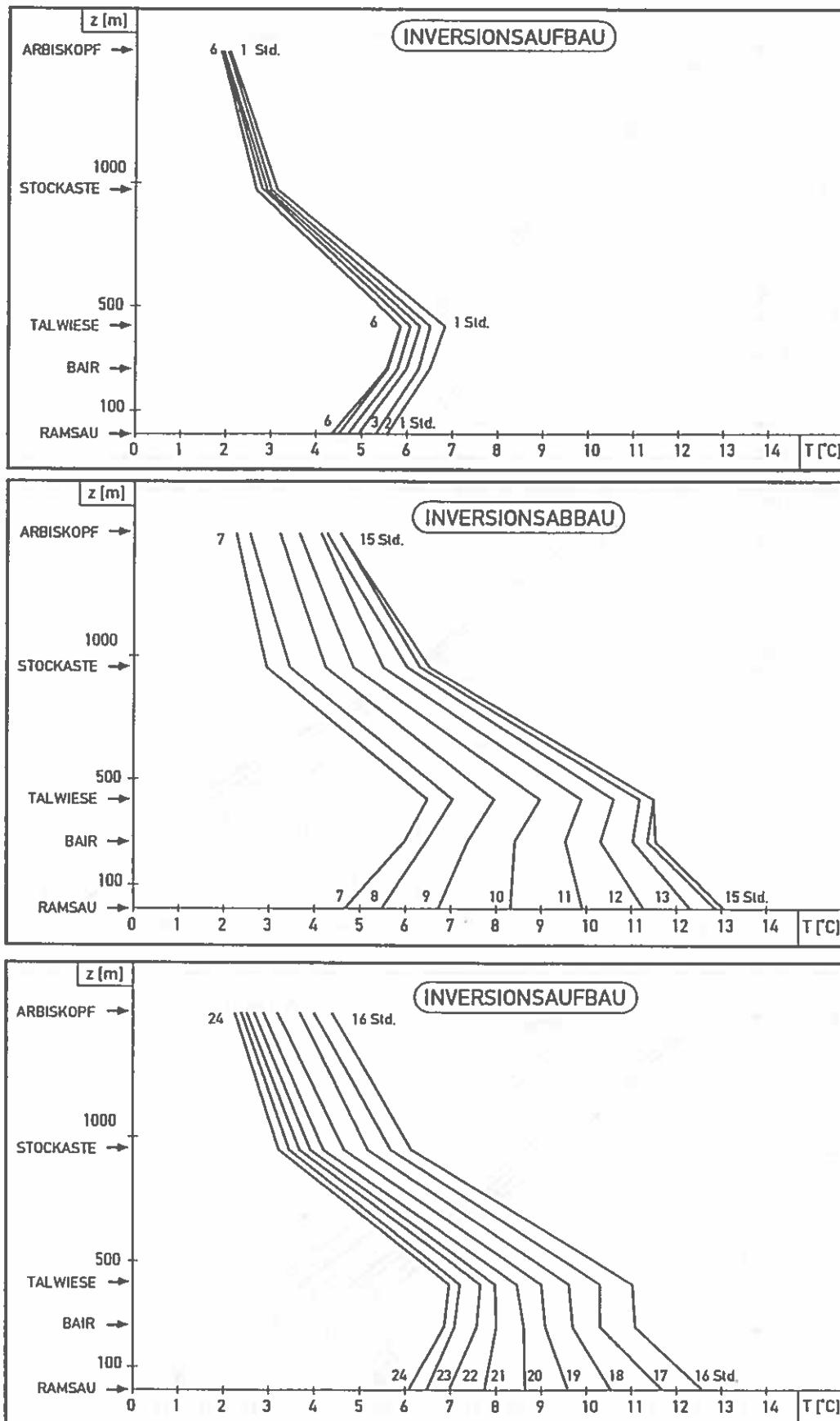


Abbildung 3a: Stundenweise gemittelte Temperaturen ($^{\circ}\text{C}$) an den Hangstationen in Abhängigkeit von ihrer Seehöhe (m NN); Jahr 1988.

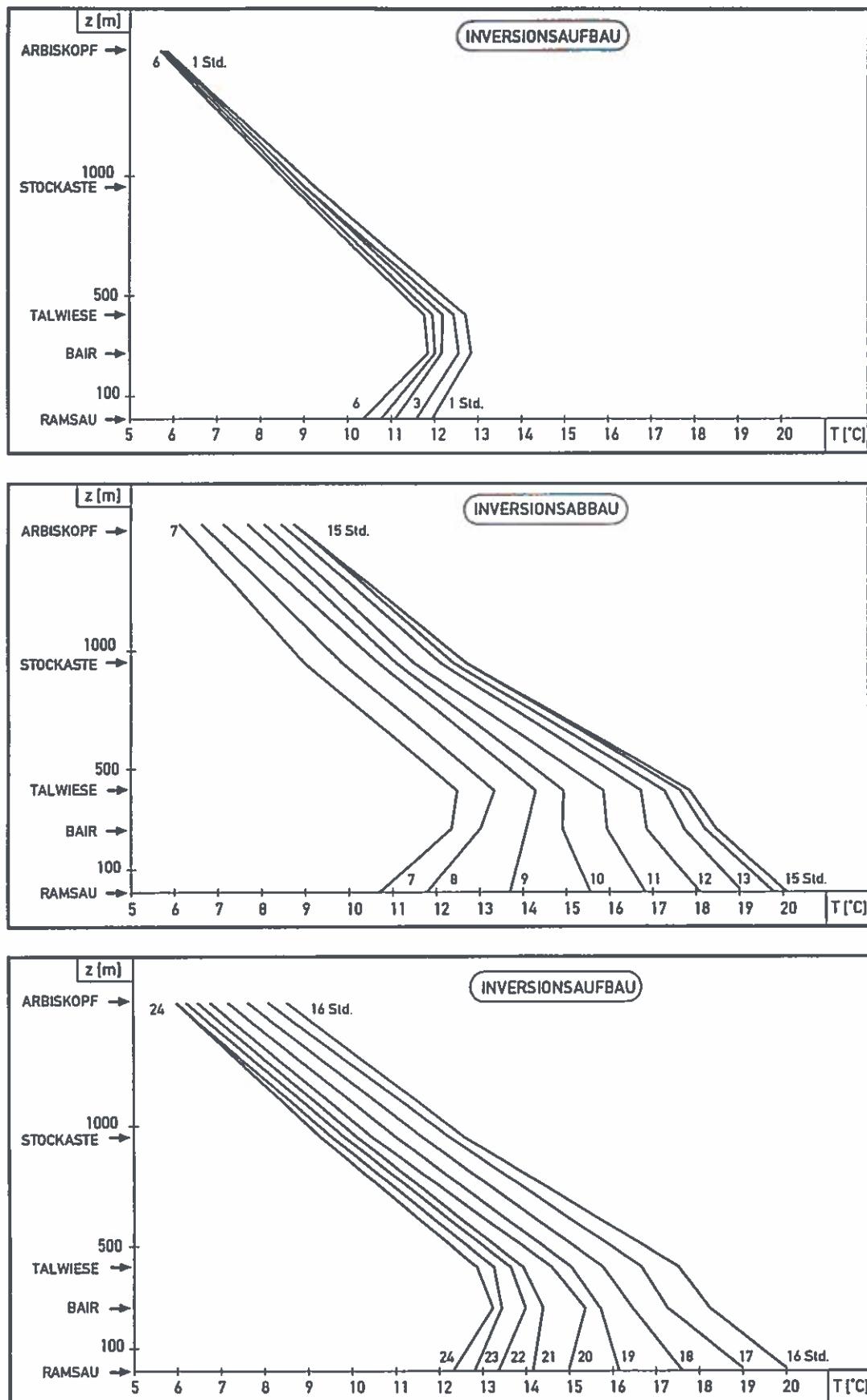


Abbildung 3b: Stundenweise gemittelte Temperaturen (°C) an den Hangstationen in Abhängigkeit von ihrer Seehöhe (m NN); Sodarperiode.

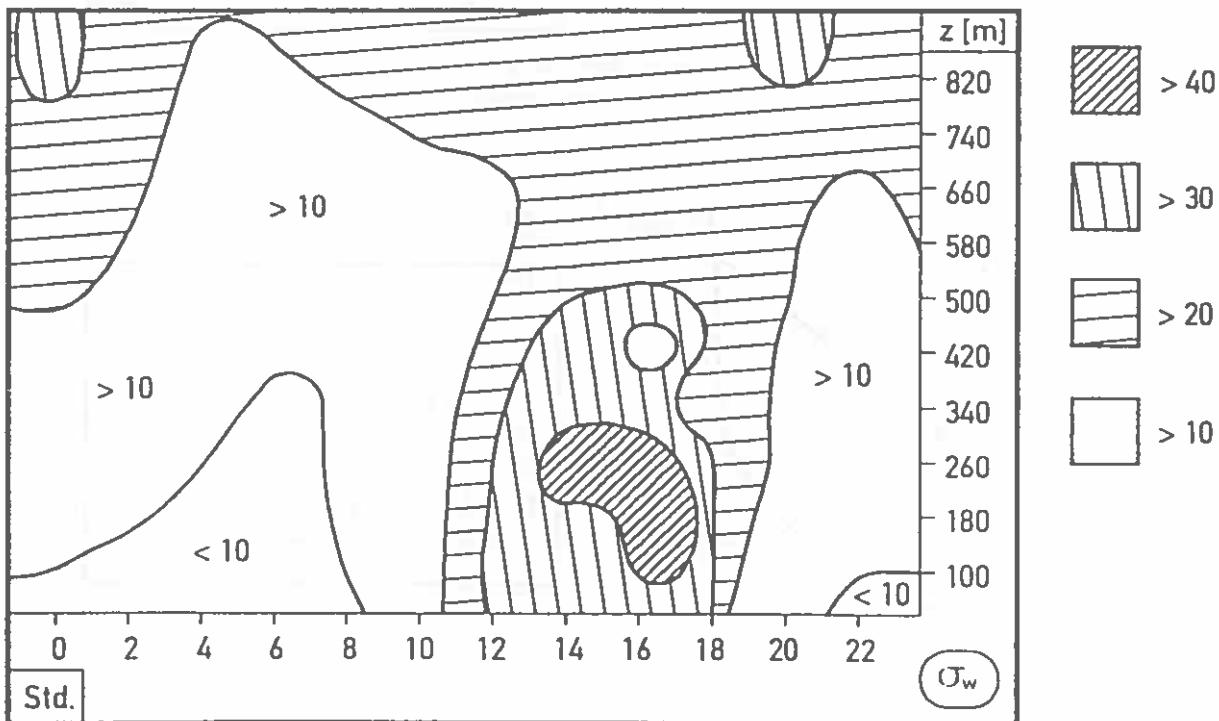
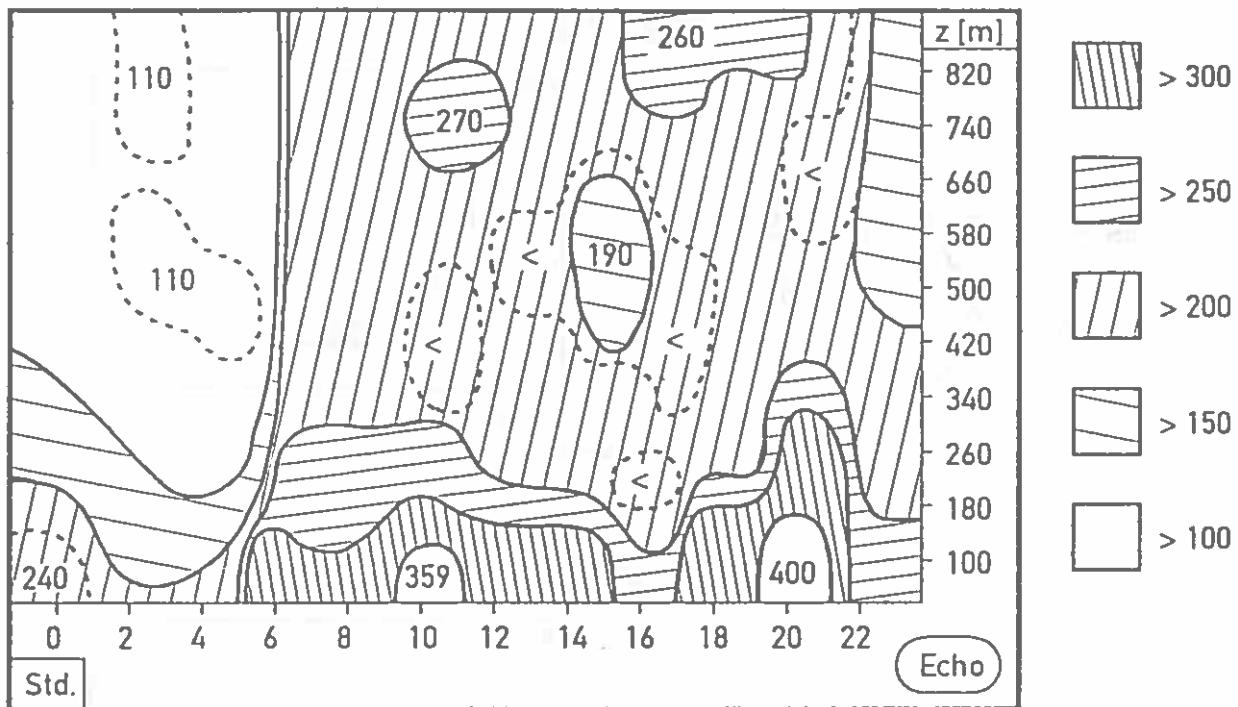
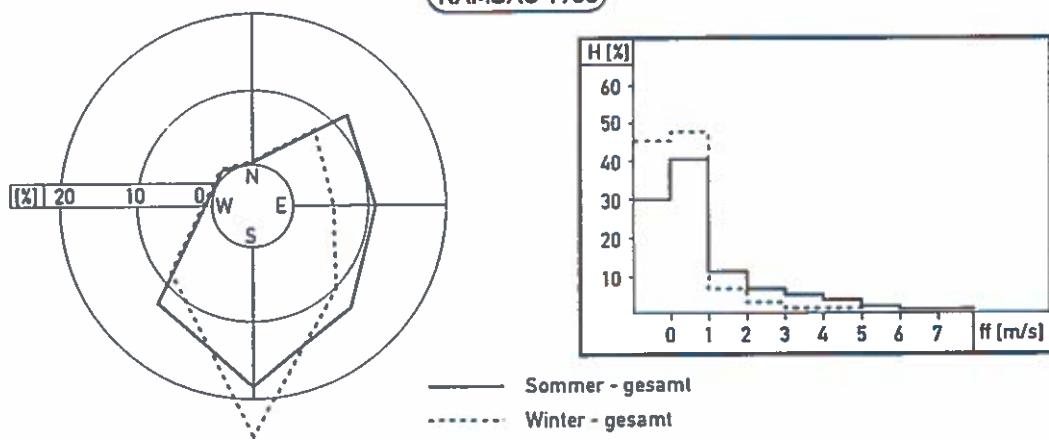
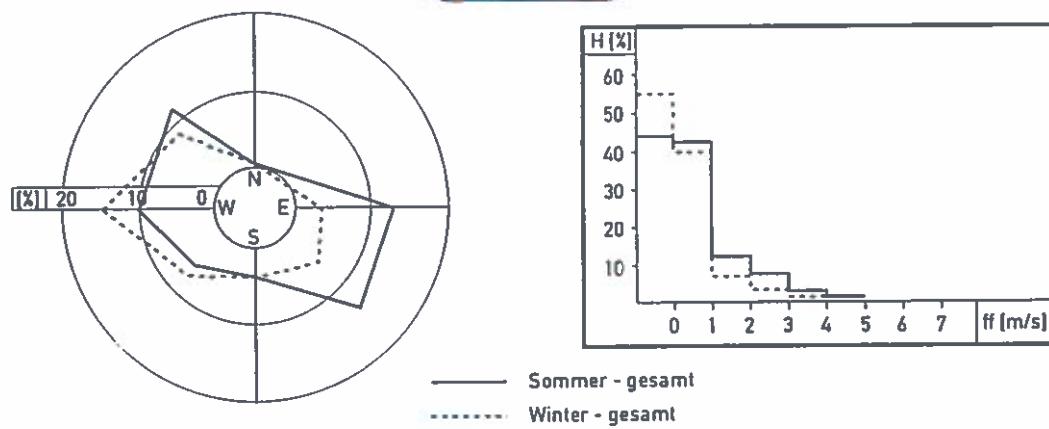


Abbildung 4: Mittlere Vertikalprofile der Echointensität und der Streuung des Vertikalwinds s_w (cm/s) (bezogen auf die Sodarperiode; die Höhenangaben sind m über Grund).

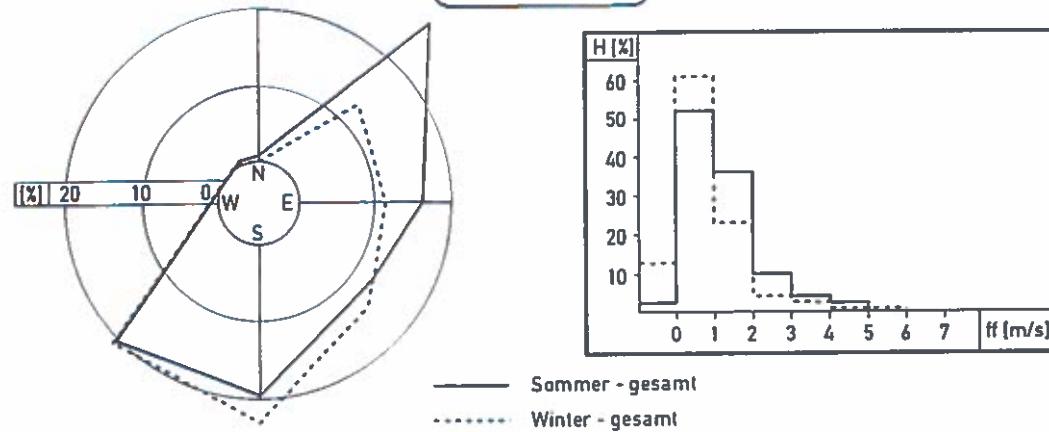
RAMSAU 1988



TALWIESE 1988



STOCKASTE 1988



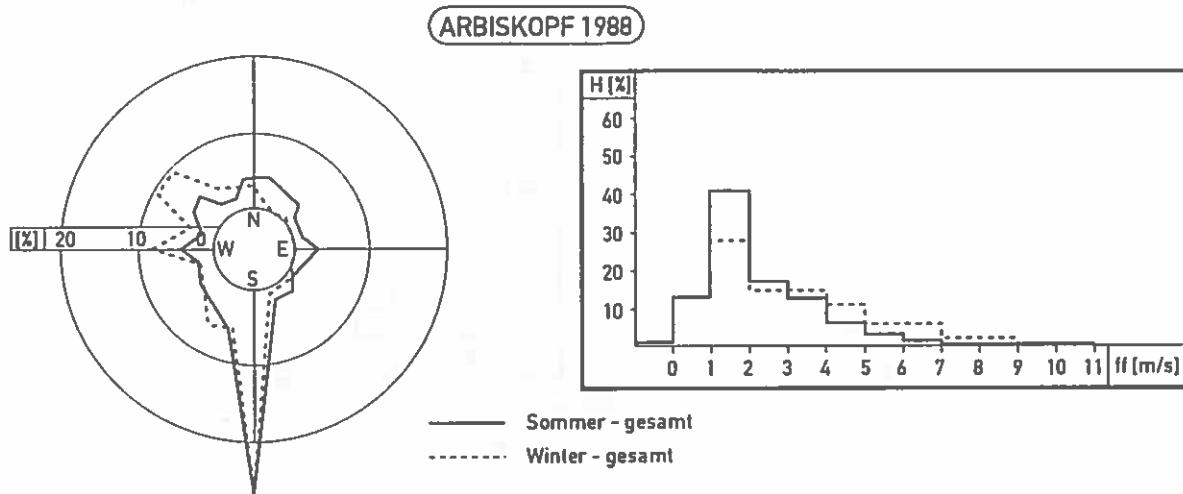


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung (Prozent) von Windrichtung und Windgeschwindigkeit (Klassengrenzen in m/s) in Abhängigkeit von der Jahreszeit an den Meßstellen des Höhenprofils (bezogen auf das Jahr 1988).

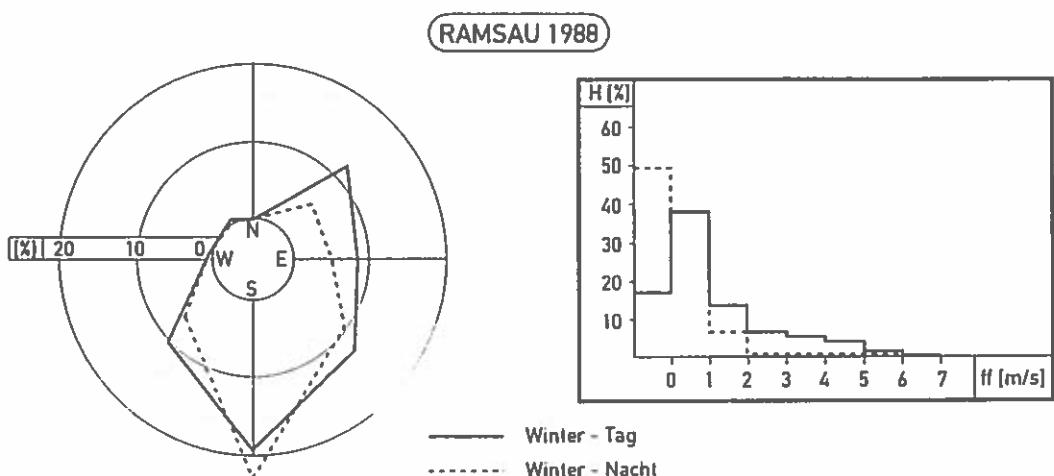
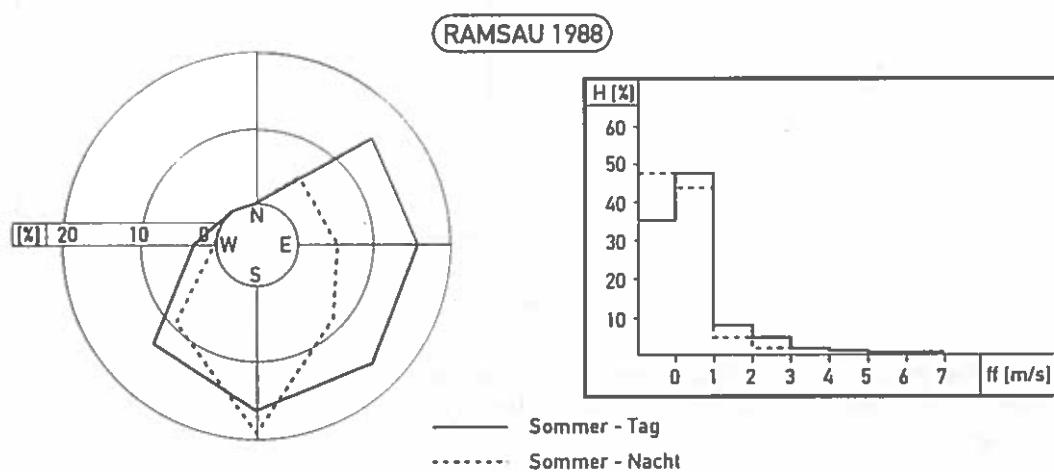


Abbildung 6a: Häufigkeitsverteilung (Prozent) von Windrichtung und Windgeschwindigkeit (Klassengrenzen in m/s) in Abhängigkeit von der Tageszeit, getrennt für Winter- und Sommerhalbjahr, für die Ramsau (bezogen auf das Jahr 1988).

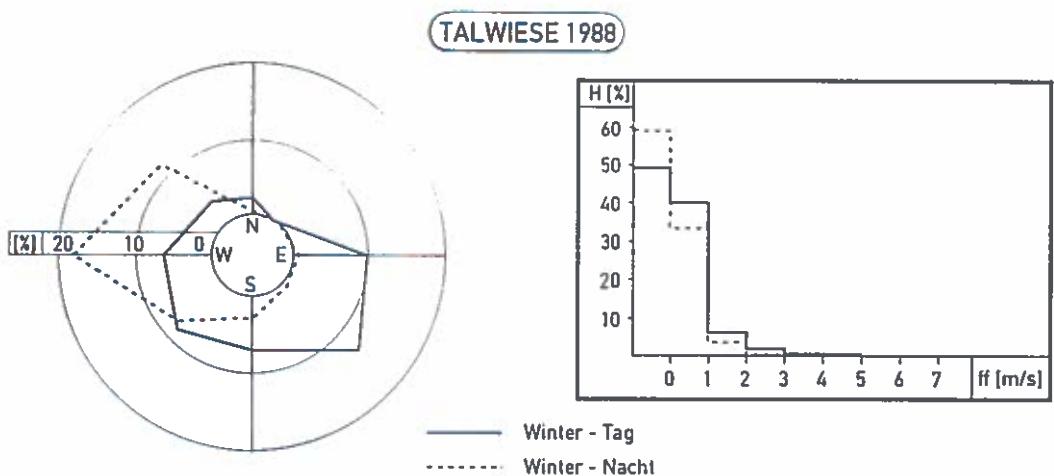
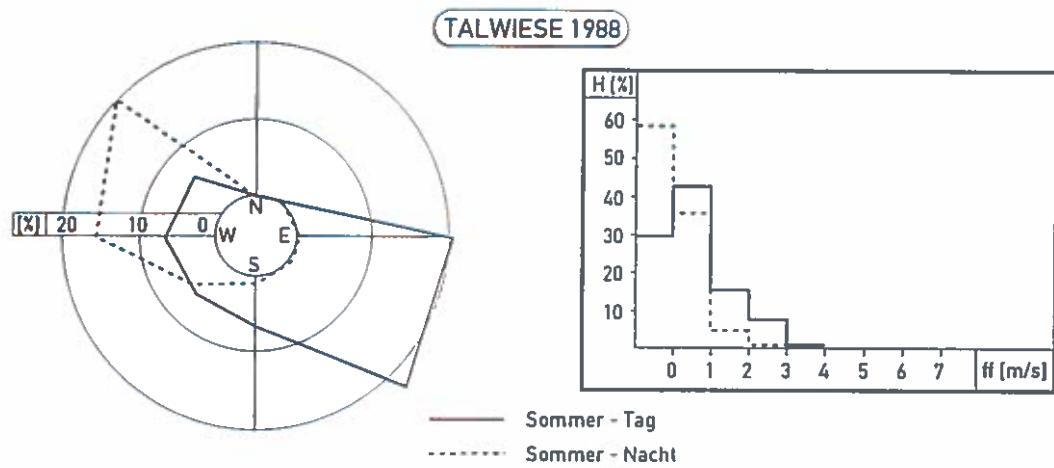
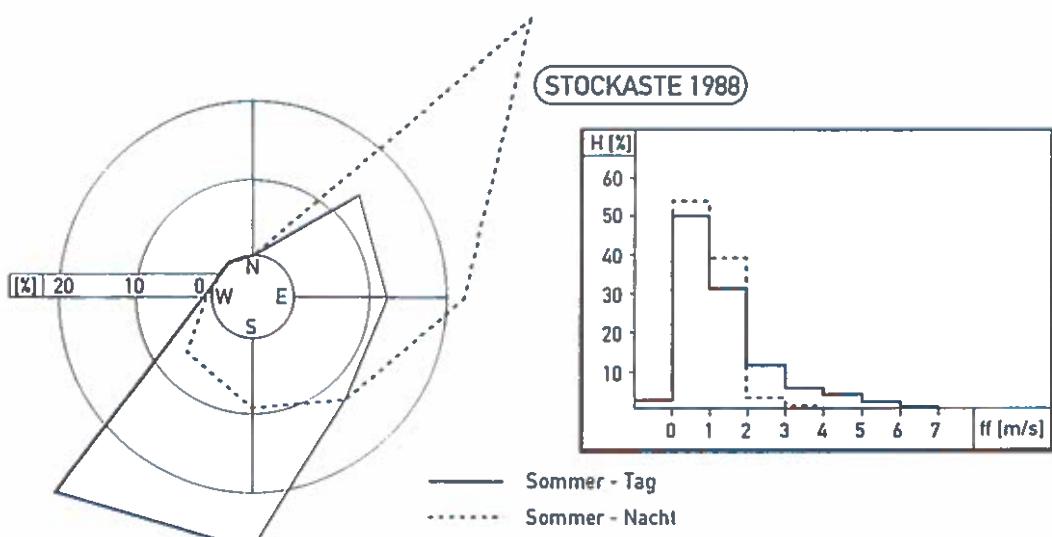


Abbildung 6b: Häufigkeitsverteilung (Prozent) von Windrichtung und Windgeschwindigkeit (Klassengrenzen in m/s) in Abhängigkeit von der Tageszeit, getrennt für Winter- und Sommerhalbjahr, für die Talwiese (bezogen auf das Jahr 1988).



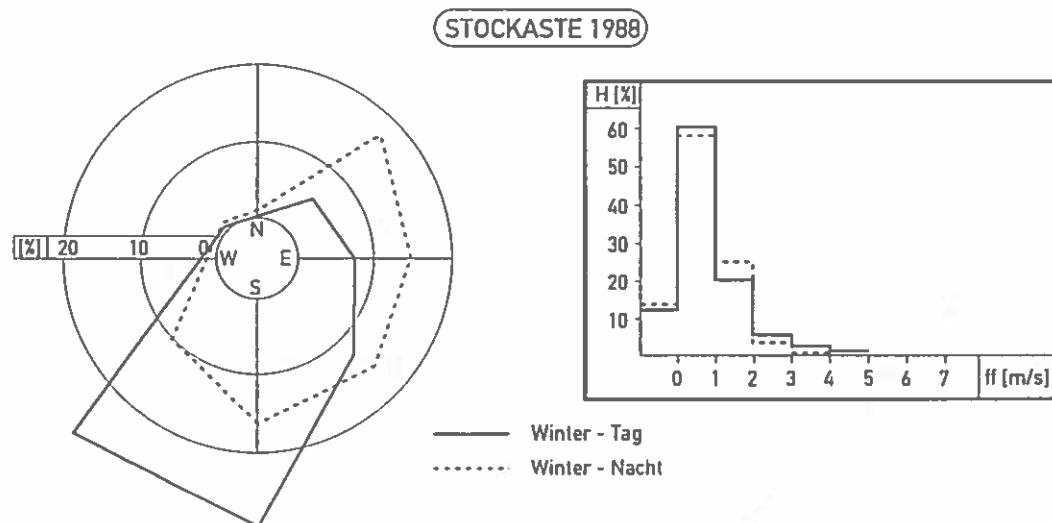


Abbildung 6c: Häufigkeitsverteilung (Prozent) von Windrichtung und Windgeschwindigkeit (Klassengrenzen in m/s) in Abhängigkeit von der Tageszeit, getrennt für Winter- und Sommerhalbjahr, für die Stockaste (bezogen auf das Jahr 1988).

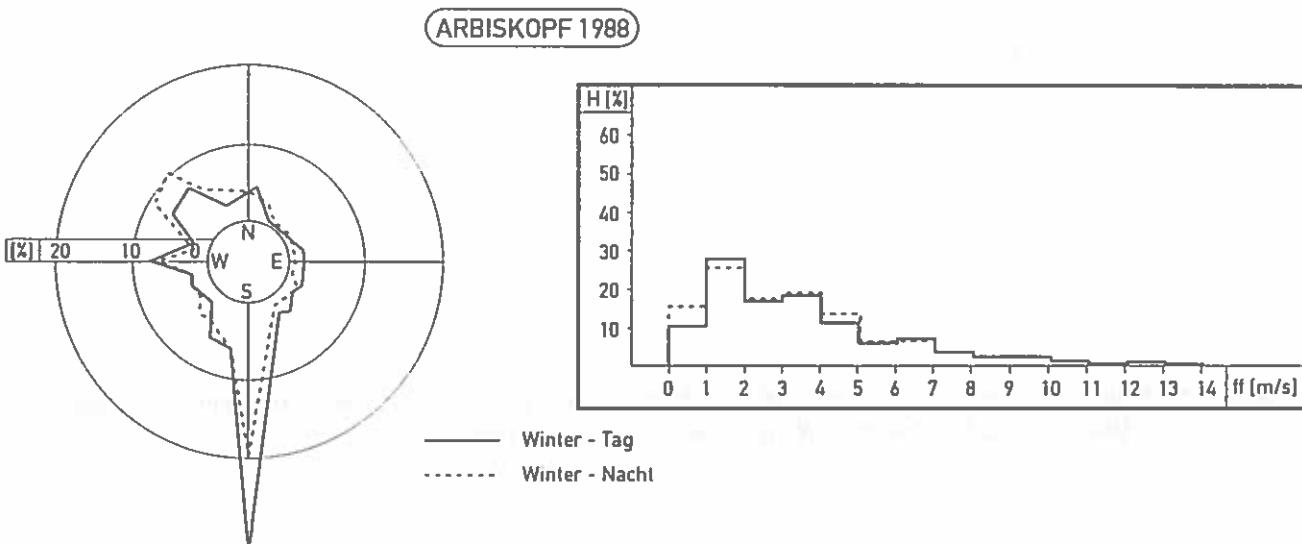
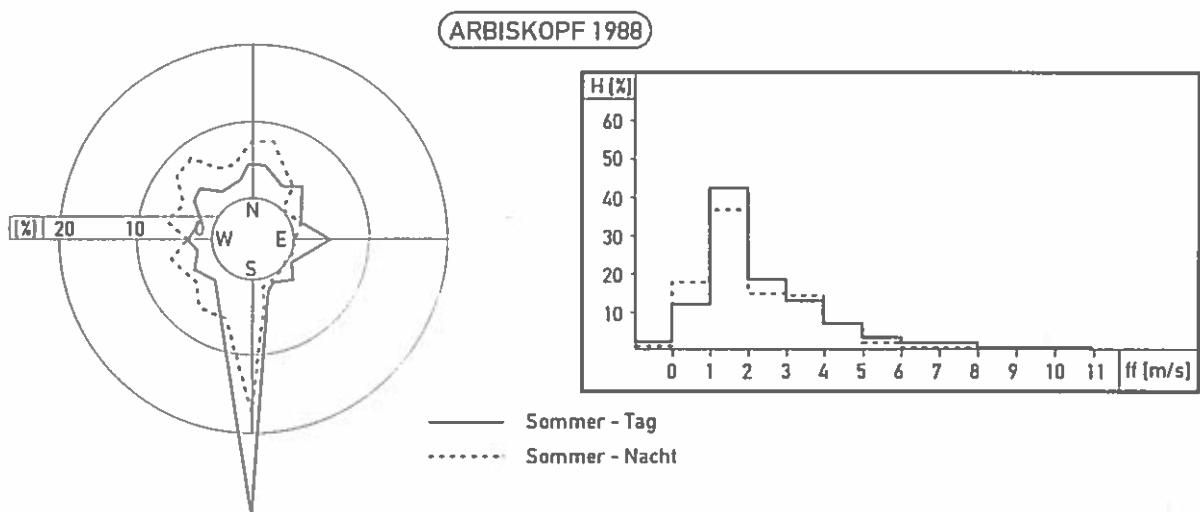
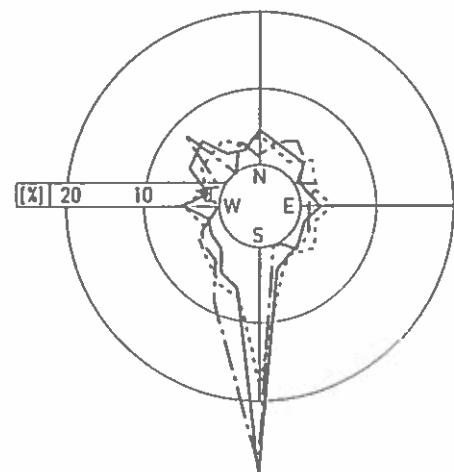


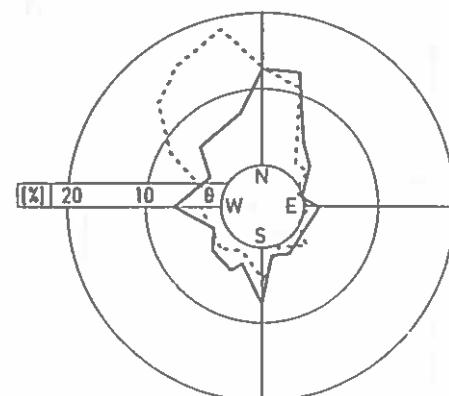
Abbildung 6d: Häufigkeitsverteilung (Prozent) von Windrichtung und Windgeschwindigkeit (Klassengrenzen in m/s) in Abhängigkeit von der Tageszeit, getrennt für Winter- und Sommerhalbjahr, für den Arbiskopf (bezogen auf das Jahr 1988).



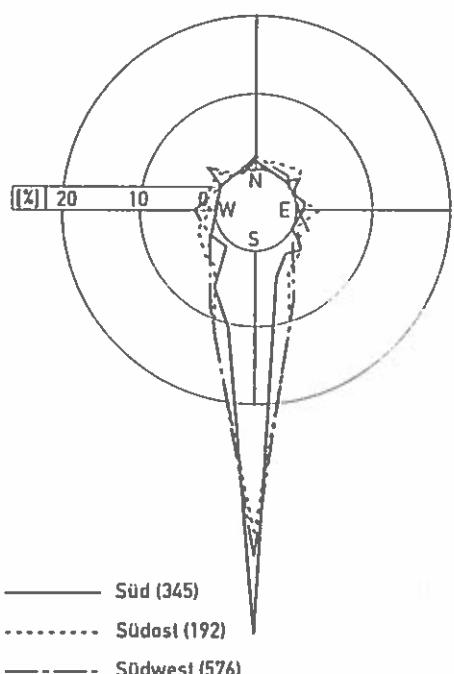
Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung (Prozent) der Windrichtungen im Tal (Sodar, 420 m über Grund) in Abhängigkeit von der Wetterlage nach STEINACKER. Werte in Klammer: Zahl der Fälle.



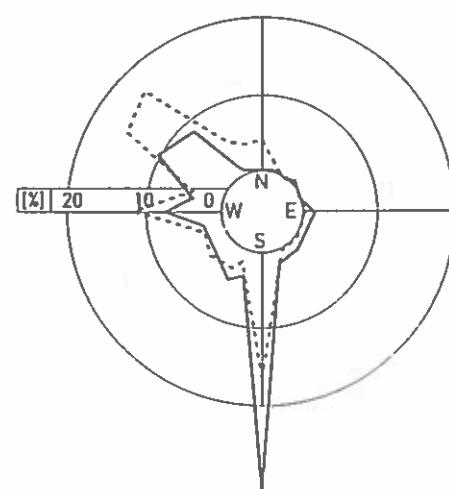
— variabel (3071)
- - - gradienstschwach (2005)
- · - Ost (72)



— Nordost (408)
- - - Nord (144)



— Süd (345)
- - - Südost (192)
- · - Südwest (576)



— West (805)
- - - Nordwest (942)

Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung (Prozent) der Windrichtungen am Arbiskopf in Abhängigkeit von der Wetterlage nach STEINACKER. (bezogen auf die Sodarperiode). Werte in Klammer: Zahl der Fälle.

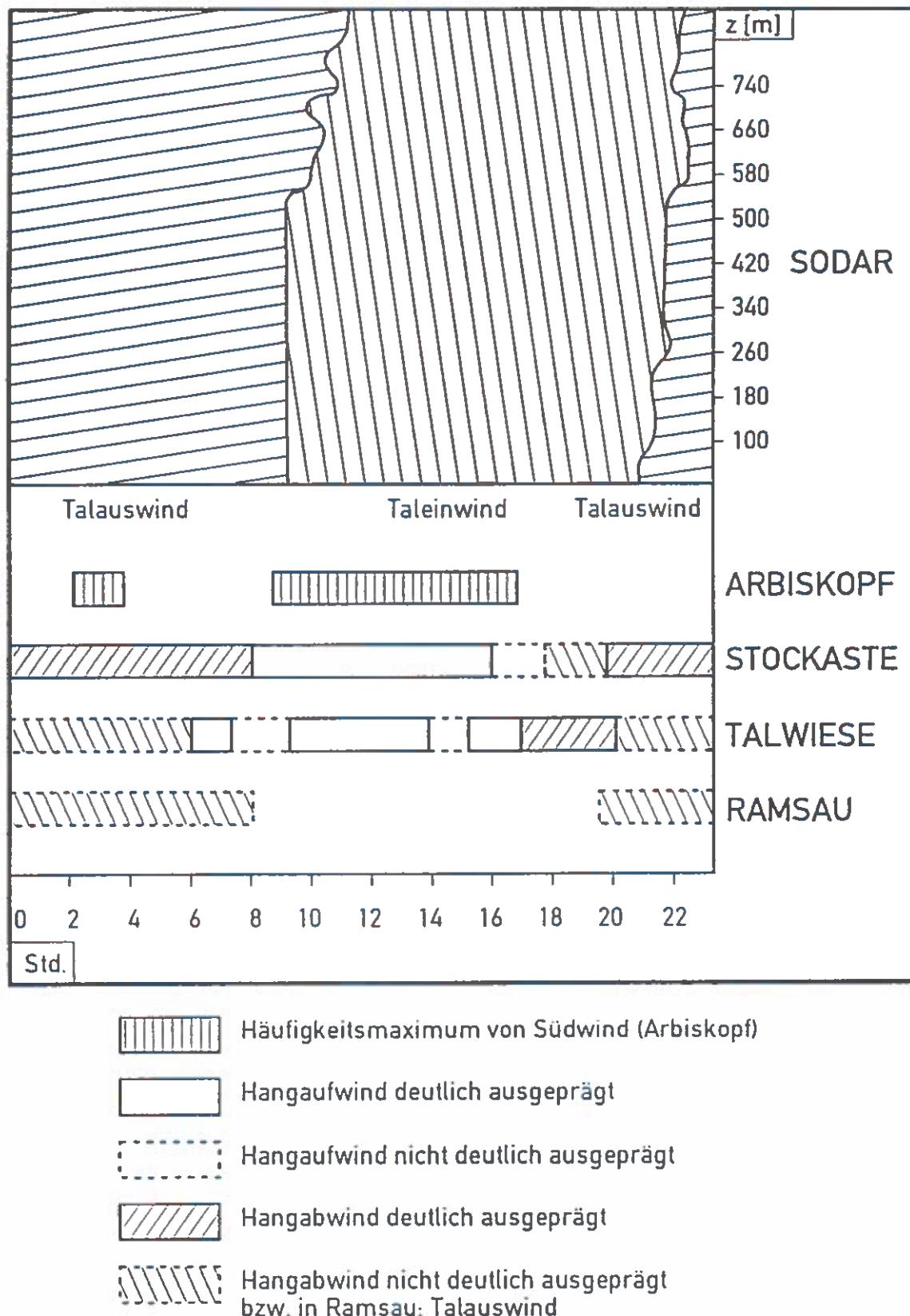


Abbildung 9: Mittlerer Tagesgang der Windrichtung anhand der Sodarmessungen (Unterscheidung Talein- Talauswind in Abhängigkeit von der Höhe über Grund (m)) und anhand der Messungen an den Hangstationen (Unterscheidung Hangauf- Hangabwind, Kennzeichnung von Talauswind (Ramsau) bzw. Südwind (Arbiskopf)), alles bezogen auf die Periode der Sodarmessungen.

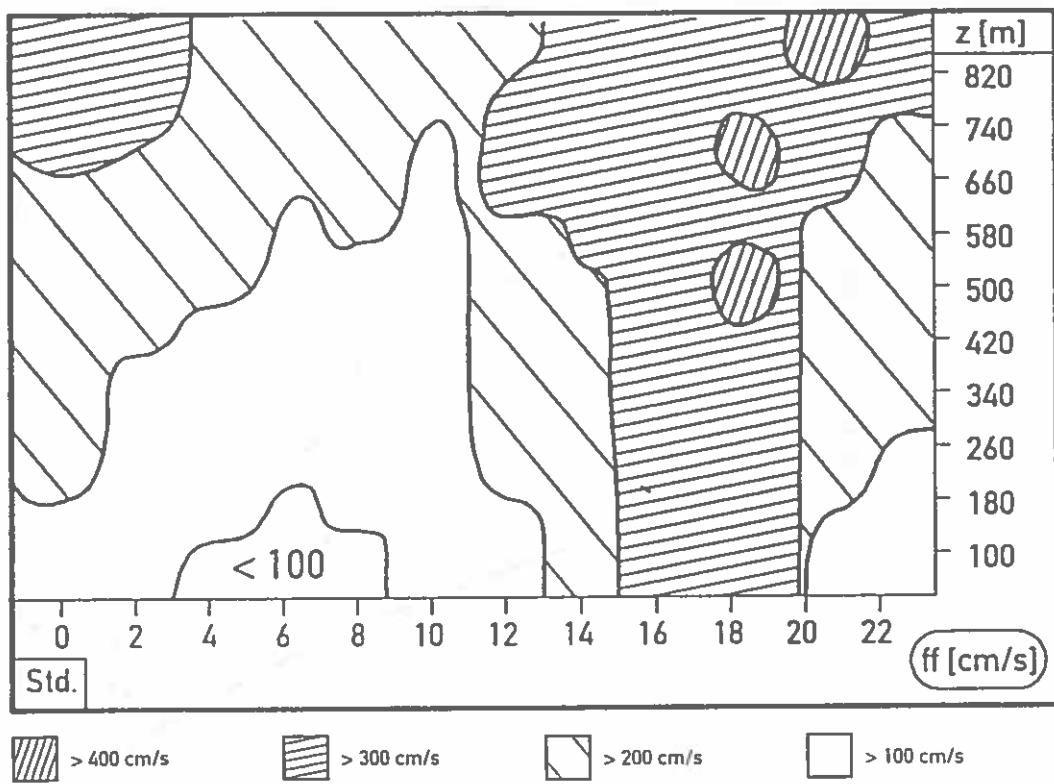


Abbildung 10: Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit (cm/s) anhand der Sodarmessungen in Abhängigkeit von der Höhe über Grund (m).

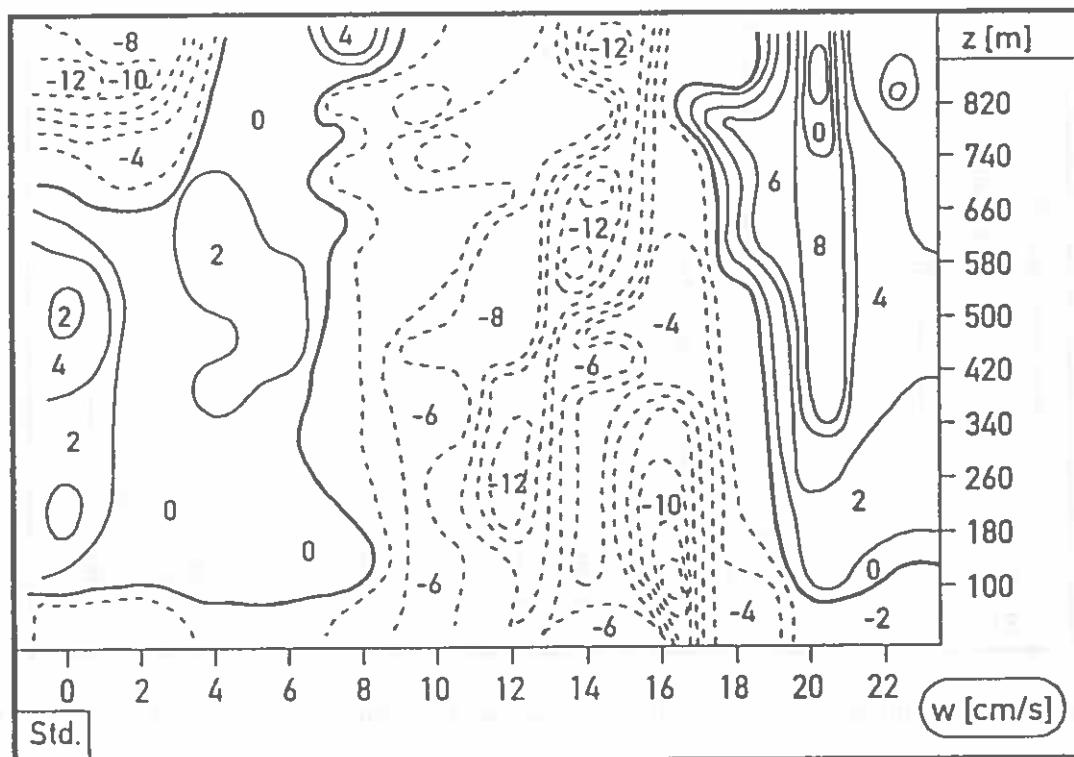


Abbildung 11: Mittlerer Tagesgang des Vertikalwinds (cm/s) anhand der Sodarmessungen in Abhängigkeit von der Höhe über Grund (m). Ausgezogen: Aufsteigen; strichiert: Absinken.

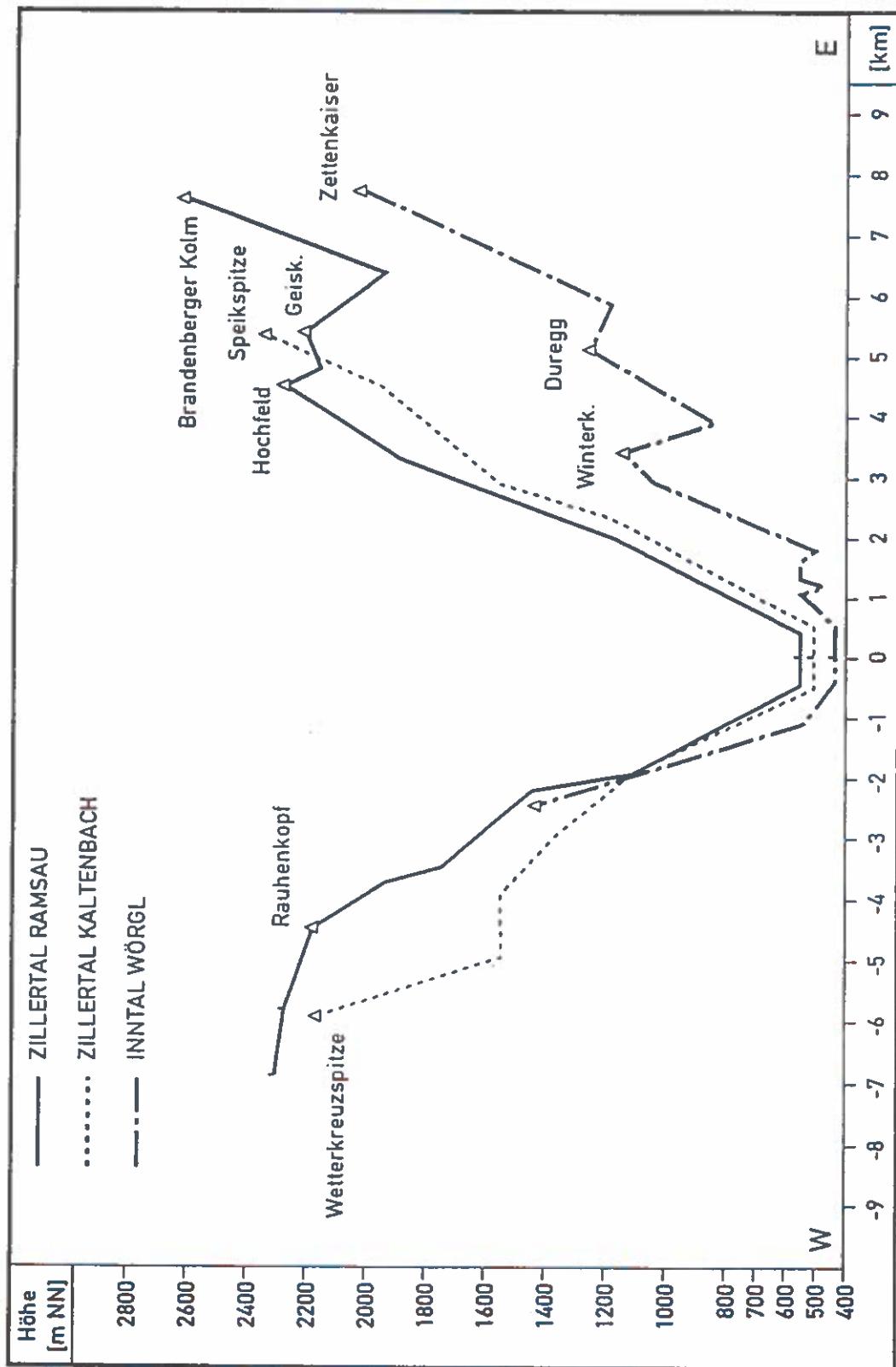


Abbildung 12: Querschnitte durch das Zillertal (bei Ramsau und Kaltenbach) und durch das Inntal (bei Wörgl).

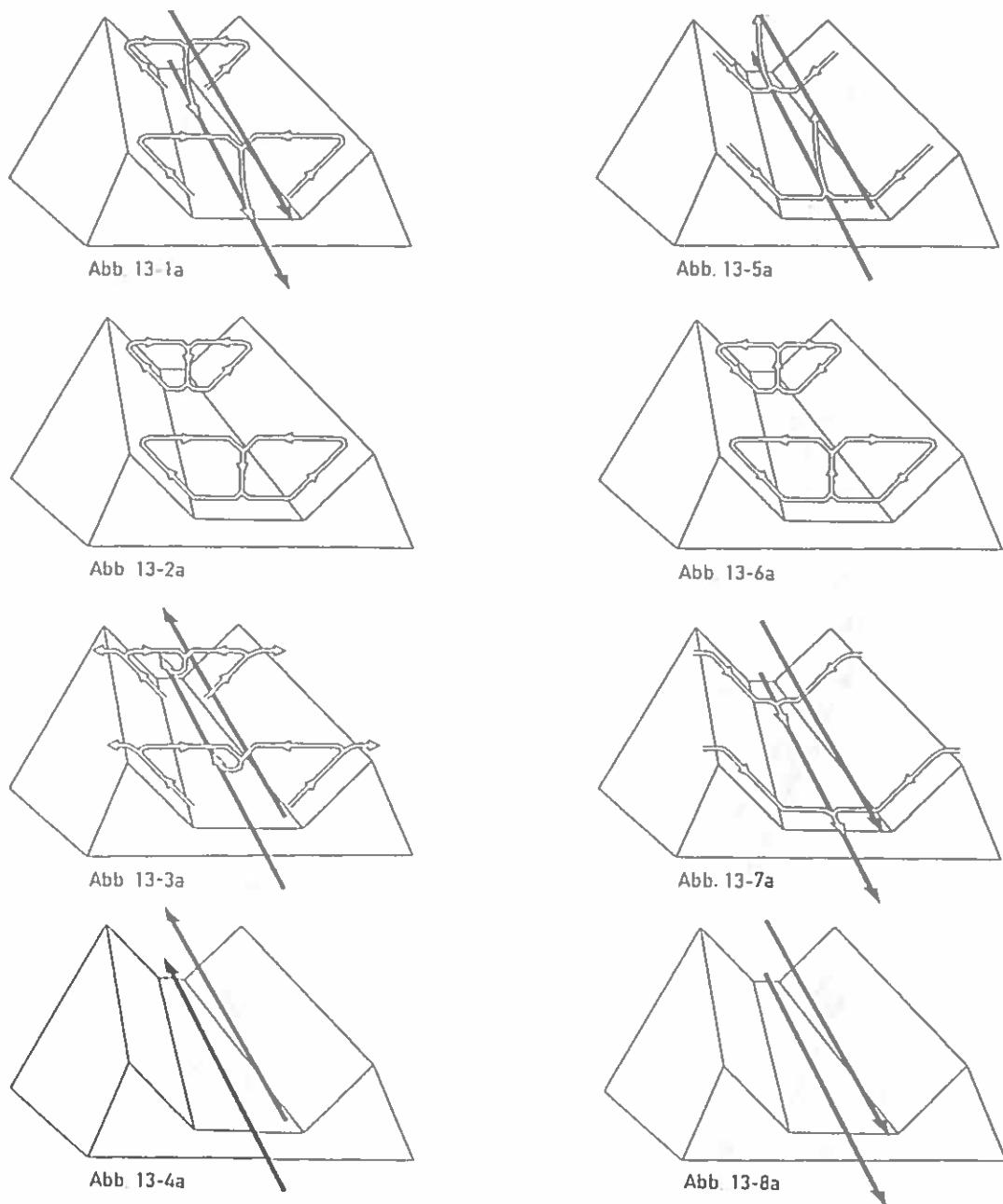


Abbildung 13a: Schema der Hang- und Talwinde nach Defant (1949).

- 1a: Luftströmung am Morgen bei Sonnenaufgang. Beginn der Hangaufwinde (weiße Pfeile). Im Tal selbst noch Talauswind (schwarze Pfeile). Druckgefälle: talabwärts. Temperatur: Tal kalt, Ebene relativ warm.
- 2a: Luftströmung vormittags (zirka 9 Uhr). Starke Hangaufwinde. Übergang vom Talaus- zu Taleinwind. Druckgefälle: Null. Temperatur: ausgéglichen
- 3a: Luftströmung Mittag bis früher Nachmittag. Abflauende Hangaufwinde. Taleinwind in voller Entwicklung. Druckgefälle: talaufwärts. Temperatur: Tal warm, Ebene relativ kalt.
- 4a: Luftströmung am späten Nachmittag. Hangaufwinde erloschen. Taleinwind in gleicher Stärke wie in Abb. 3a, tritt bis an die seitlichen Hänge heran. Druckgefälle: talaufwärts. Temperatur: Tal warm, Ebene relativ kalt.
- 5a: Luftströmung abends. Einsetzende Hangabwinde. Taleinwind abflauend. Druckgefälle: noch talaufwärts. Temperatur: im Tal wenig wärmer als über Ebene.
- 6a: Luftströmung später Abend bis erste Nachthälfte. Hangabwinde. Übergang vom Talein- zu Talauswind. Druckgefälle: Null. Temperatur: ausgéglichen.
- 7a: Luftströmung nachts. Hangabwinde. Talauswind. Druckgefälle: talabwärts. Temperatur: im Tal kalt, Ebene relativ warm.
- 8a: Luftströmung nachts bis morgens. Hangabwinde erloschen. Talauswind, tritt bis an die seitlichen Hänge heran. Druckgefälle: talabwärts. Temperatur: im Tal kalt, über der Ebene wärmer.

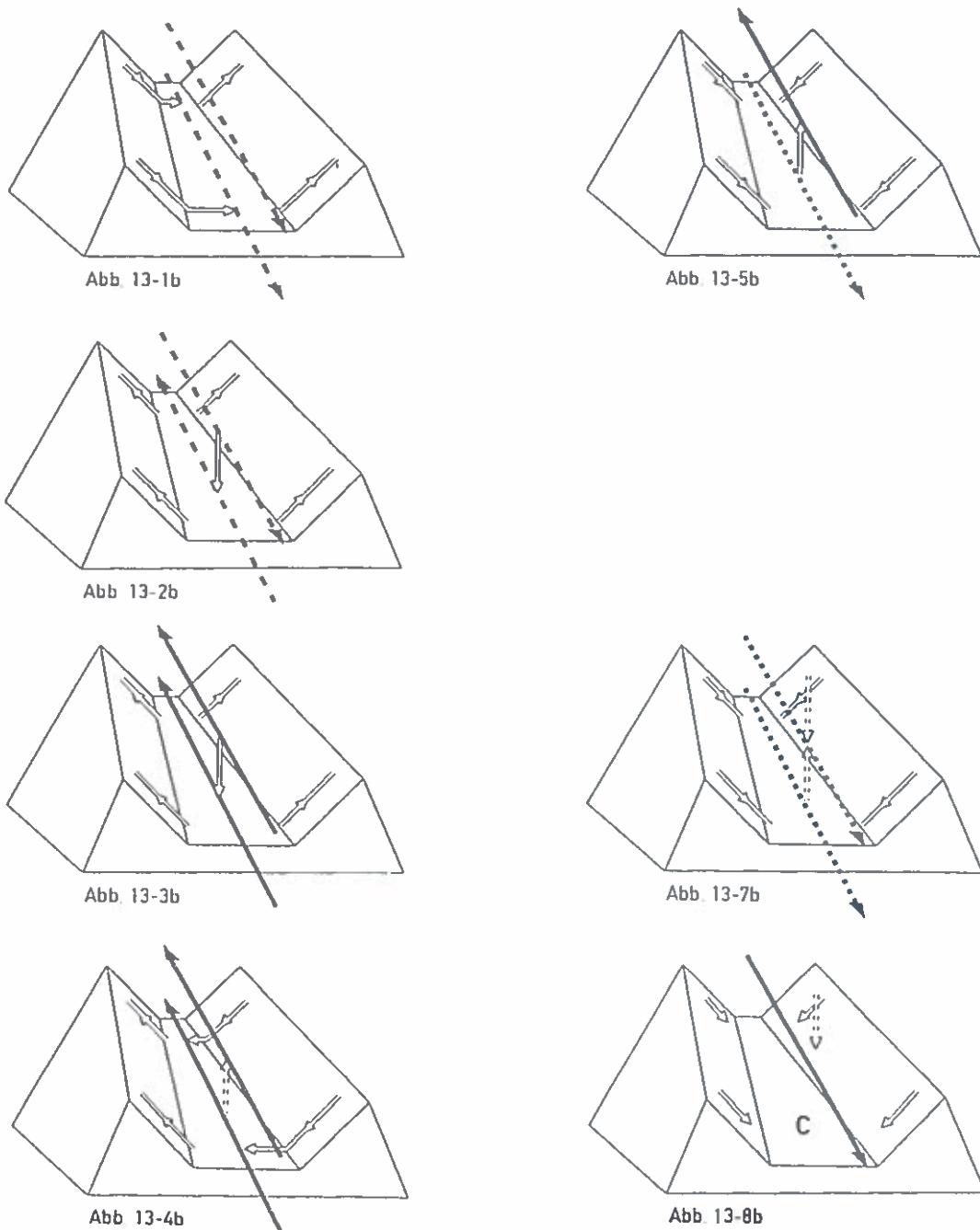


Abbildung 13b: Schema der Hang- und Talwinde in Zillertal.

- 1b: Luftströmung am Morgen bei Sonnenaufgang: Beginn der Hangaufwinde am besonnten Hang; am beschatteten Hang: Hangabwind, erreicht am Talboden Talmitte (Ramsau) (weiße Pfeile). Schwacher Talauswind (schwarze Pfeile).
- 2b: Luftströmung vormittags. Starke Hangaufwinde. Übergang vom Talaus- zu Taleinwind, beginnend am Talboden; Windgeschwindigkeit sehr klein. Absinkbewegungen in Talmitte.
- 3b: Luftströmung Mittag bis früher Nachmittag: Hangaufwind. Taleinwind. Absinkbewegungen.
- 4b: Luftströmung am späten Nachmittag. Einsetzender Hangabwind am beschatteten Hang, erreicht am Talboden Talmitte; besonnter Hang: Hangaufwind. Taleinwind. Absinken lässt nach.
- 5b: Luftströmung abends. Hangabwinde. Übergang vom Talein- zu Talauswind, beginnend am Talboden; Talauswind hat nur geringe Geschwindigkeit. Aufsteigende Luftbewegung über Talmitte.
- 7b: Luftströmung nachts (bis zirka 2 Uhr). Hangabwind. Schwacher Talauswind. Im unteren Höhenbereich Aufstiegs-, darüber Absinkbewegung.
- 8b: Luftströmung zweite Nachthälfte (ab zirka 2 Uhr) bis morgens. Bodennahe Luftsicht (bis zirka 700 m über Grund): Hangabwinde und Talauswind schlafen ein, meist Windstille. Größere Höhen: Hangabwind. Talauswind. Schwaches Absinken in Talmitte.

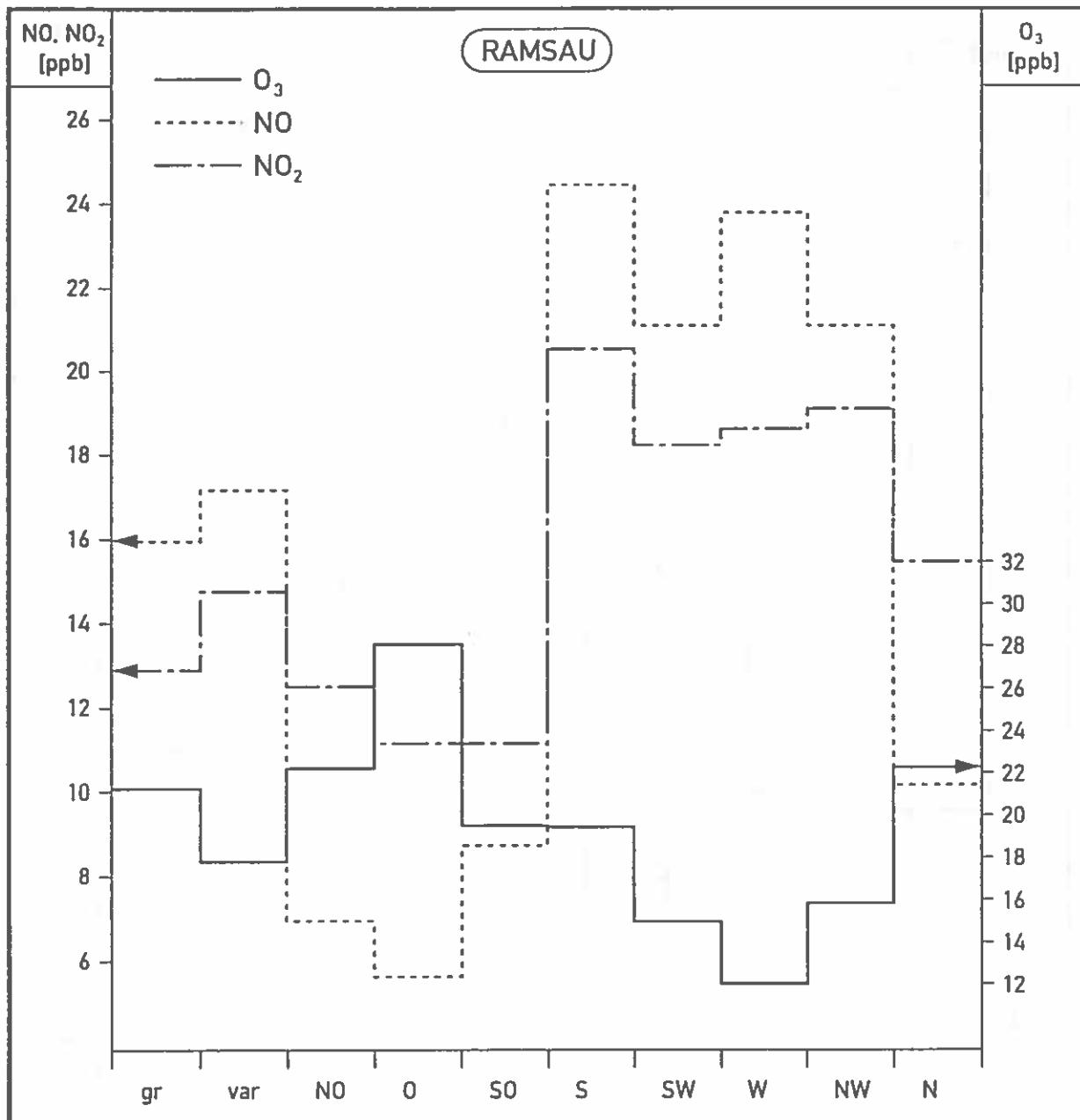


Abbildung 14: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils ppb) an der Ramsau in Abhängigkeit von der Wetterlage nach STEINACKER. (bezogen auf das Jahr 1988).

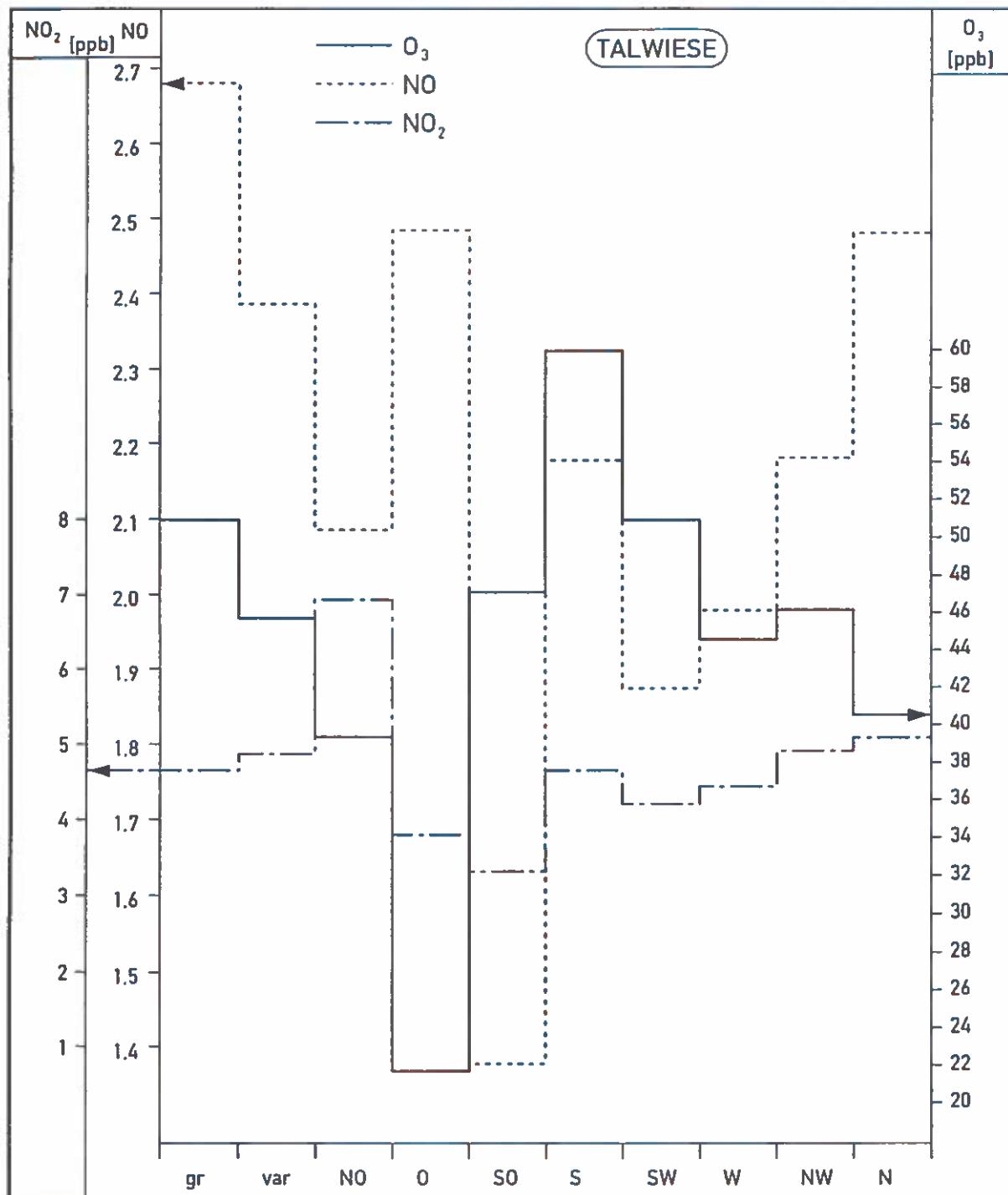


Abbildung 15: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxi und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils ppb) an der Talwiese in Abhängigkeit von der Wetterlage nach STEINACKER. (bezogen auf das Jahr 1988).

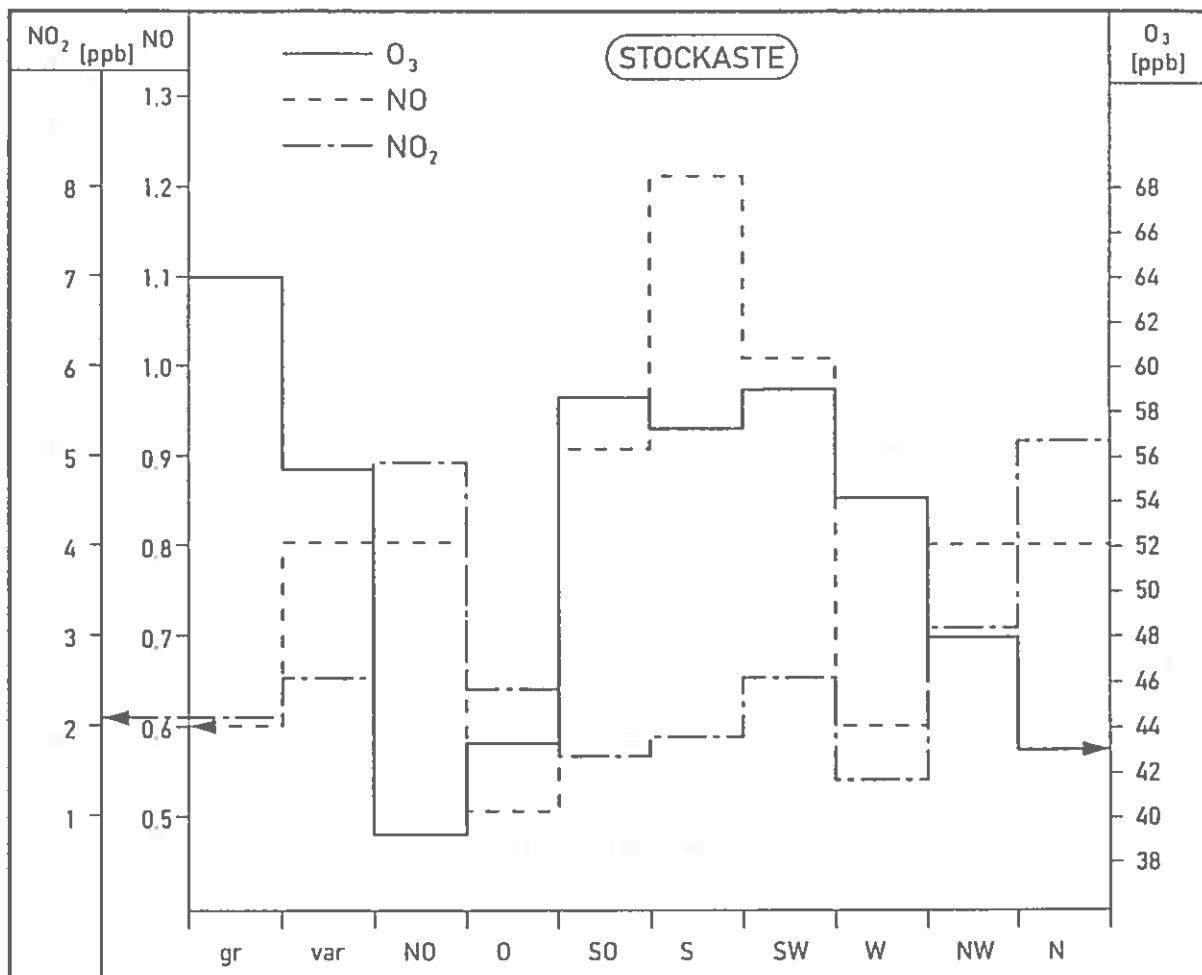


Abbildung 16: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw. NO₂, jeweils ppb) an der Stockaste in Abhängigkeit von der Wetterlage nach STEINACKER. (bezogen auf das Jahr 1988).

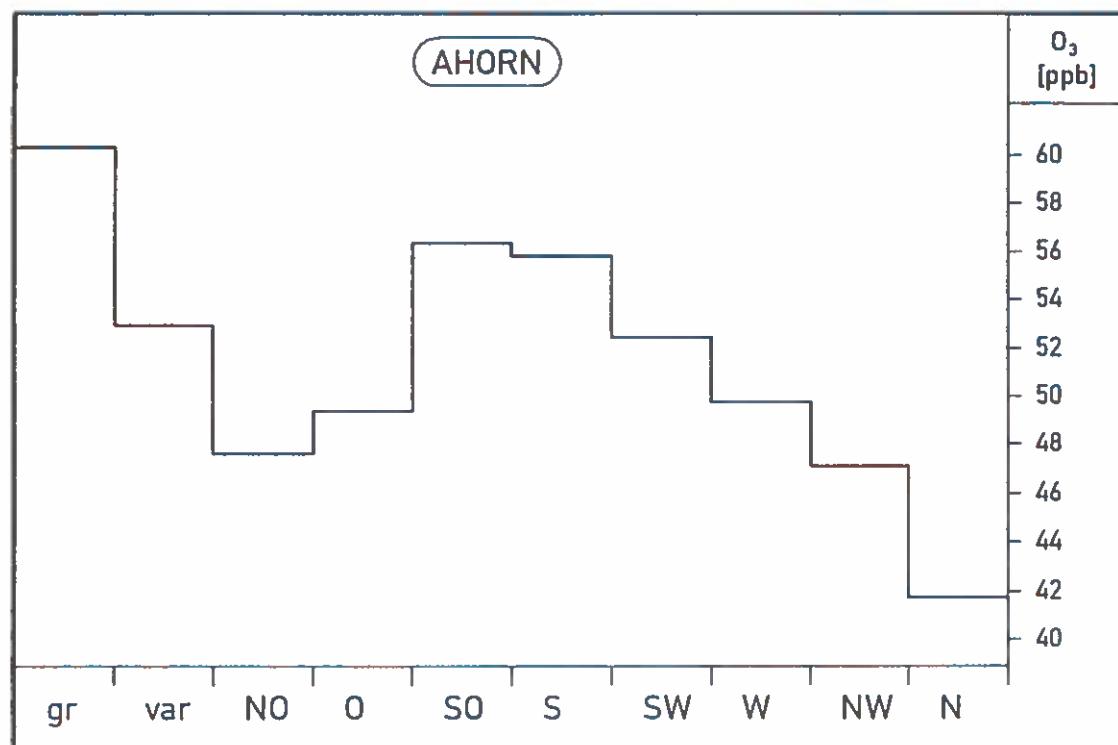


Abbildung 17: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils ppb) am Ahorn in Abhängigkeit von der Wetterlage nach STEINACKER.(bezogen auf das Jahr 1988).

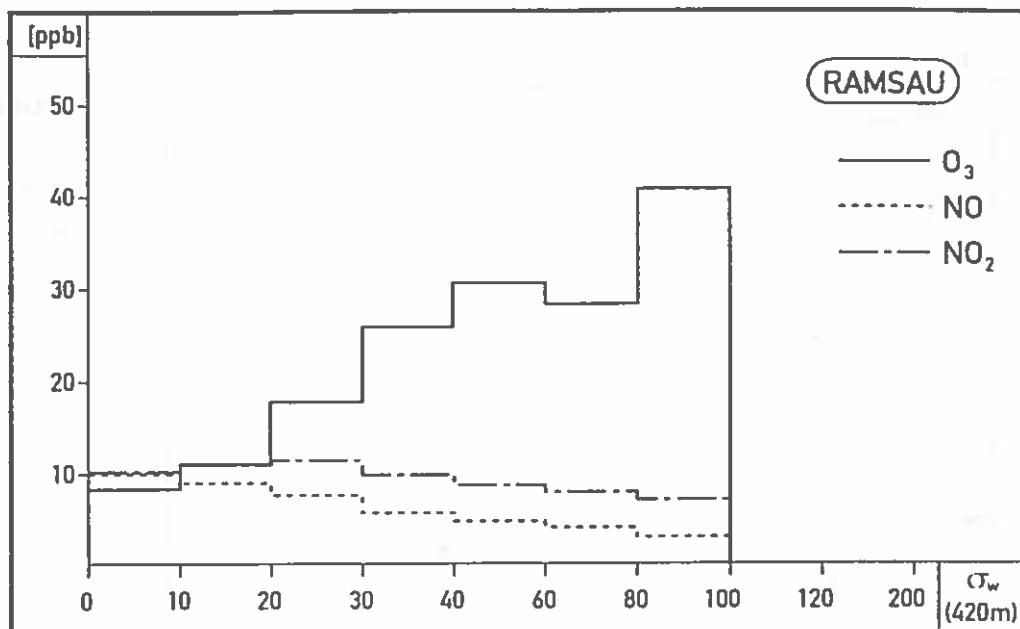


Abbildung 18: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils ppb) an der Ramsau in Abhängigkeit von der Streuung des Vertikalwinds (anhand der Sodarmessungen in 420 m über Grund (s_w , cm/s)).

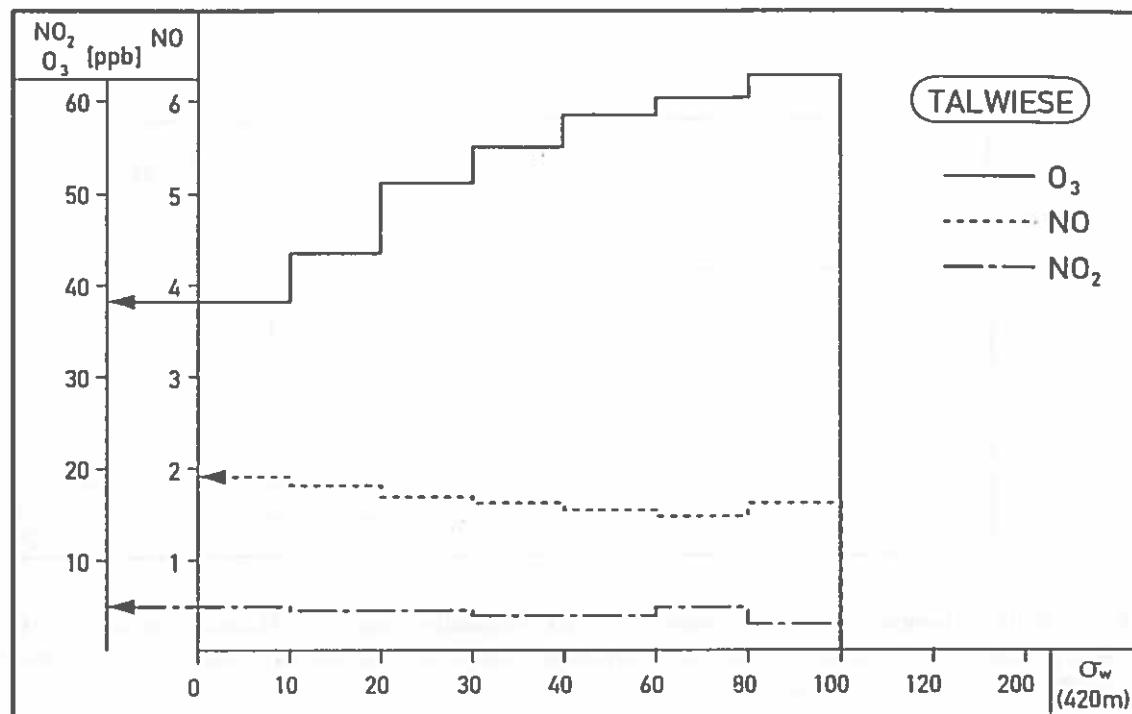


Abbildung 19: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils ppb) an der Talwiese in Abhängigkeit von der Streuung des Vertikalwinds (anhand der Sodarmessungen in 420 m über Grund (s_w , cm/s)).

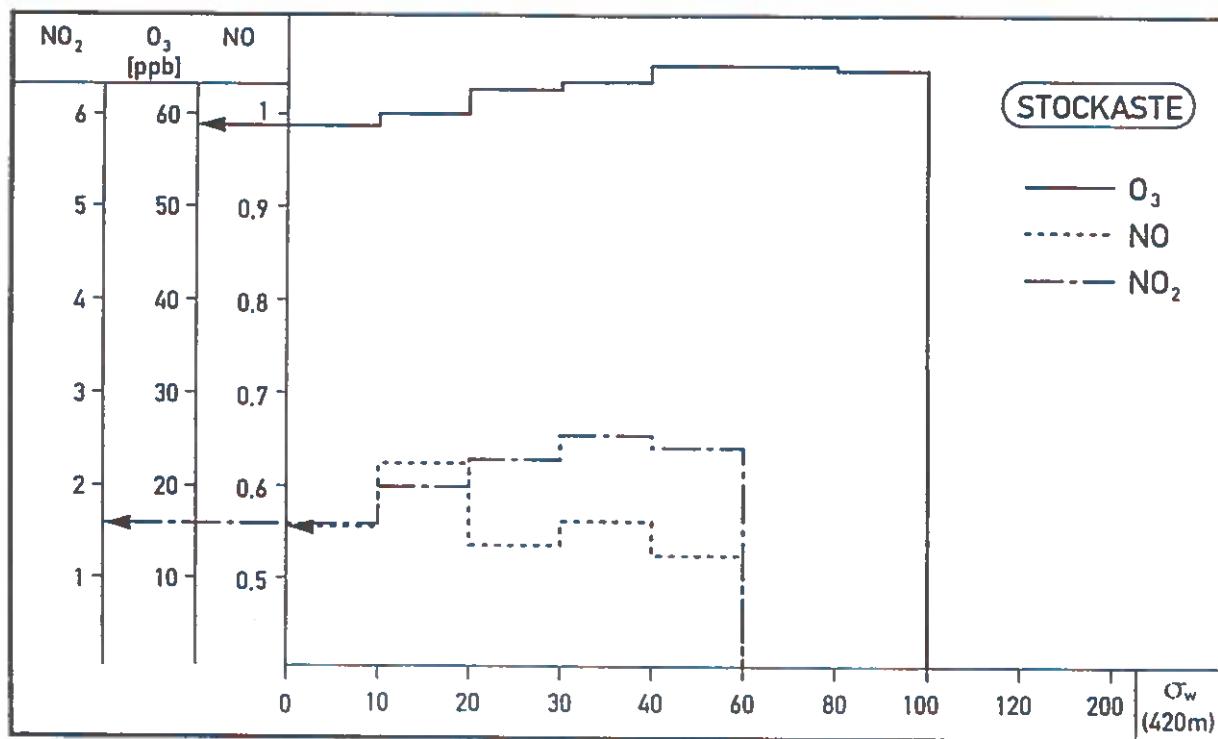


Abbildung 20: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw. NO₂, jeweils ppb) an der Stockaste in Abhängigkeit von der Streuung des Vertikalwinds (anhand der Sodarmessungen in 420 m über Grund (s_w , cm/s)).

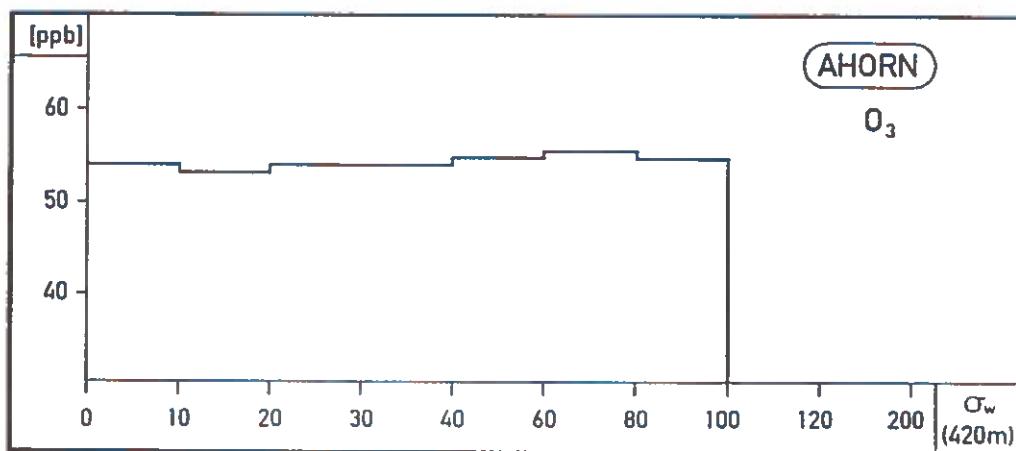


Abbildung 21: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw. NO₂, jeweils ppb) am Ahorn in Abhängigkeit von der Streuung des Vertikalwinds (anhand der Sodarmessungen in 420 m über Grund (s_w , cm/s)).

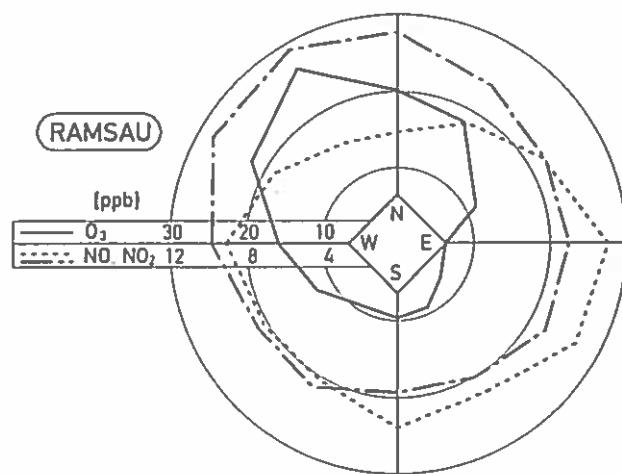


Abbildung 22: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw. NO₂, jeweils ppb) an der Ramsau in Abhängigkeit von der Windrichtung im Tal (anhand der Sodarmessungen in 300 m über Grund).

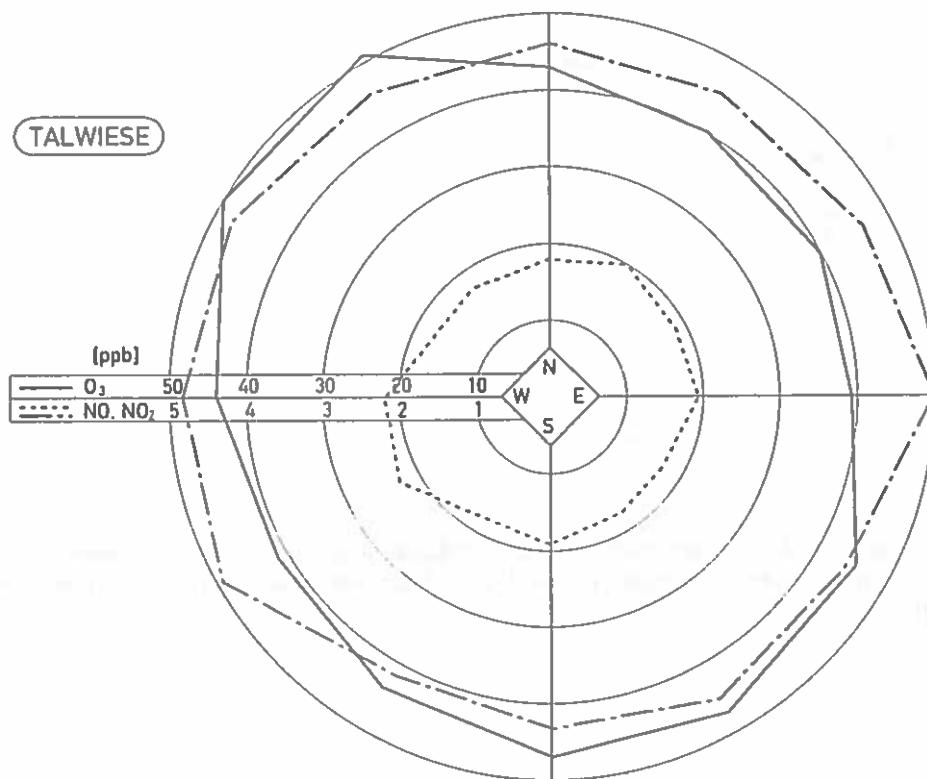


Abbildung 23: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw. NO₂, jeweils ppb) an der Talwiese in Abhängigkeit von der Windrichtung im Tal (anhand der Sodarmessungen in 300 m über Grund).

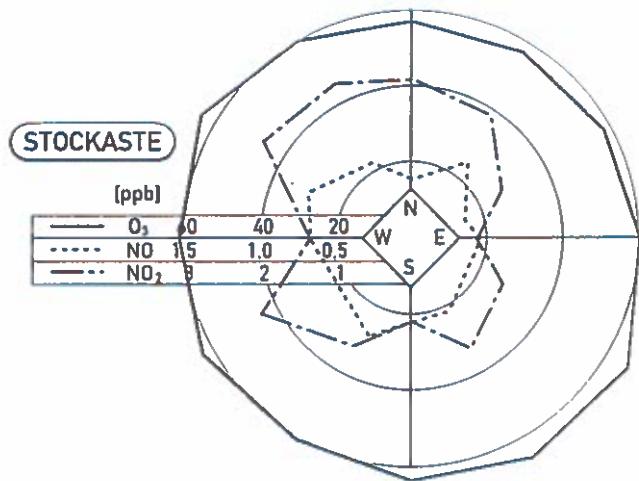


Abbildung 24: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw. NO₂, jeweils ppb) an der Stockaste in Abhängigkeit von der Windrichtung im Tal (anhand der Sodarmessungen in 300 m über Grund).

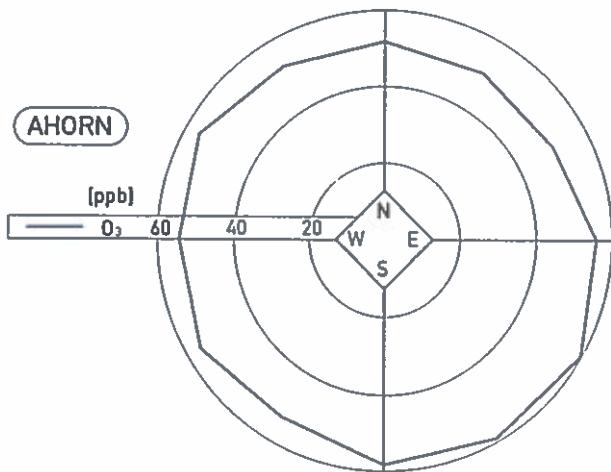


Abbildung 25: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw. NO₂, jeweils ppb) am Ahorn in Abhängigkeit von der Windrichtung im Tal (anhand der Sodarmessungen in 300 m über Grund).

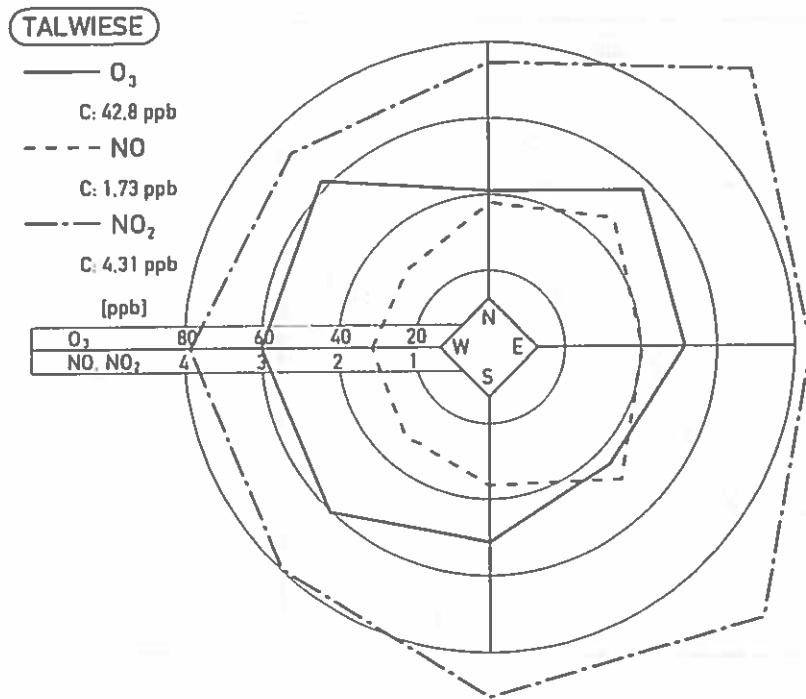


Abbildung 26: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw NO_2 , jeweils ppb) an der Talwiese in Abhängigkeit von der vor Ort gemessenen Windrichtung (bezogen auf die Periode der Sodarmessungen).

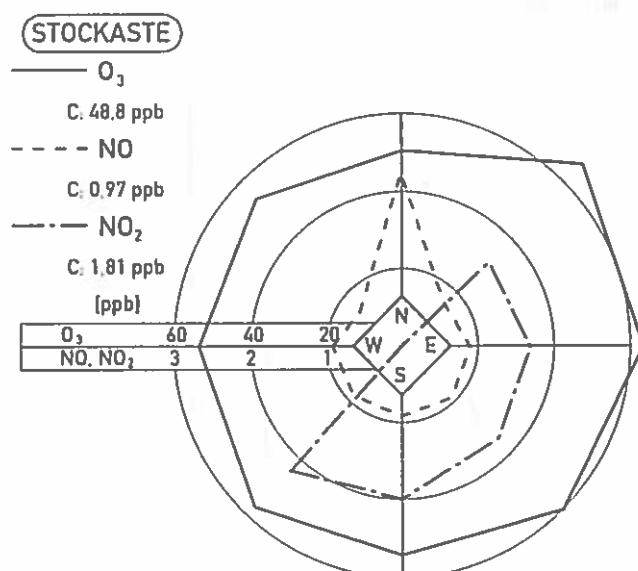


Abbildung 27: Mittlere Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw NO_2 , jeweils ppb) an der Stockaste in Abhängigkeit von der vor Ort gemessenen Windrichtung (bezogen auf die Periode der Sodarmessungen).

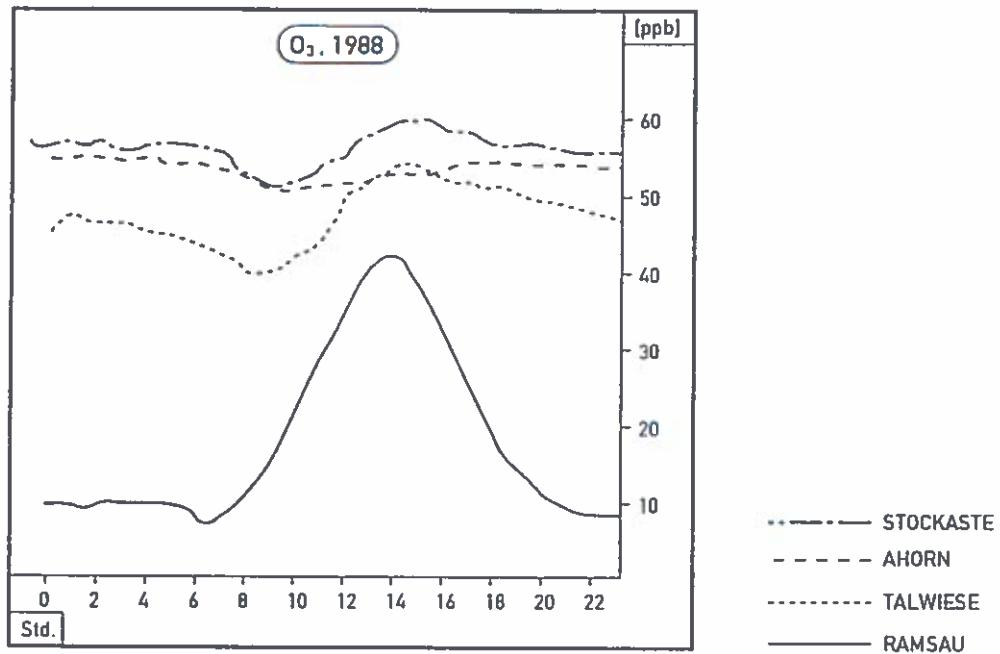


Abbildung 28a: Mittlerer Tagesgang der Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw NO₂, jeweils ppb) an den Meßstellen des Hangprofils, bezogen auf das Jahr 1988.

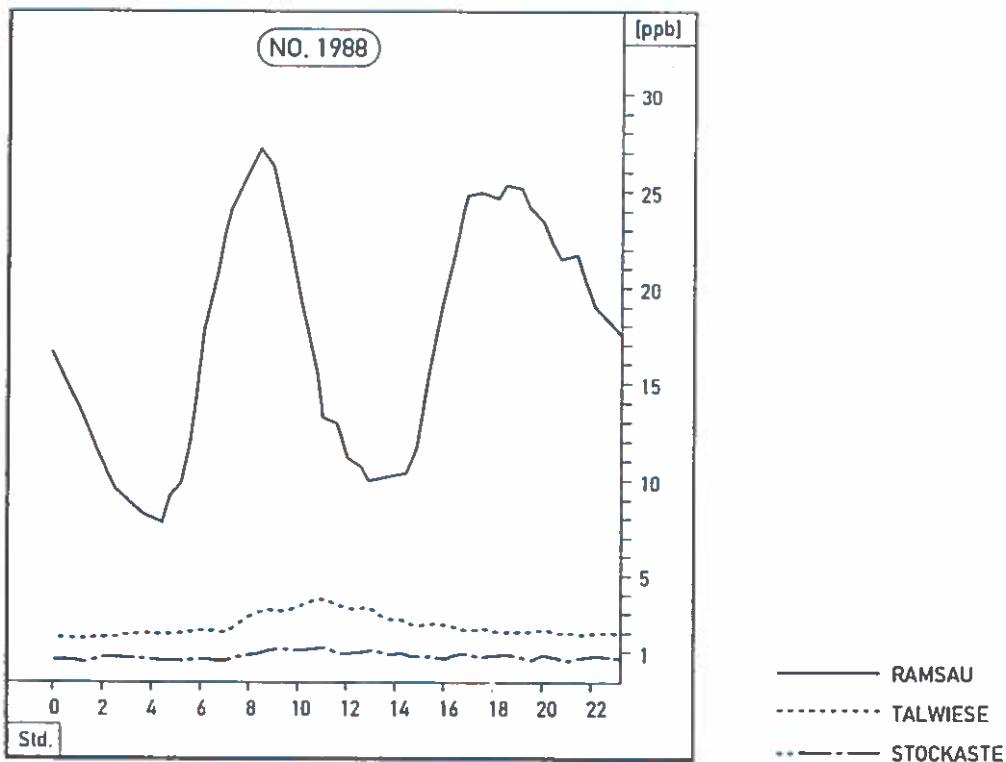


Abbildung 28a (Fortsetzung): Mittlerer Tagesgang der Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw NO₂, jeweils ppb) an den Meßstellen des Hangprofils, bezogen auf das Jahr 1988.

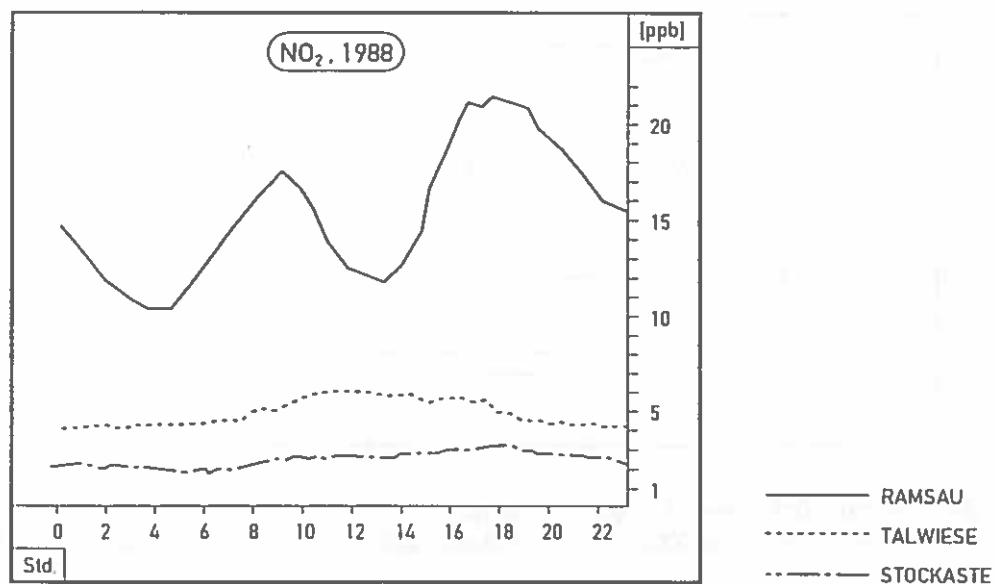


Abbildung 28a (Fortsetzung): Mittlerer Tagesgang der Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw NO_2 , jeweils ppb) an den Meßstellen des Hangprofils, bezogen auf das Jahr 1988.

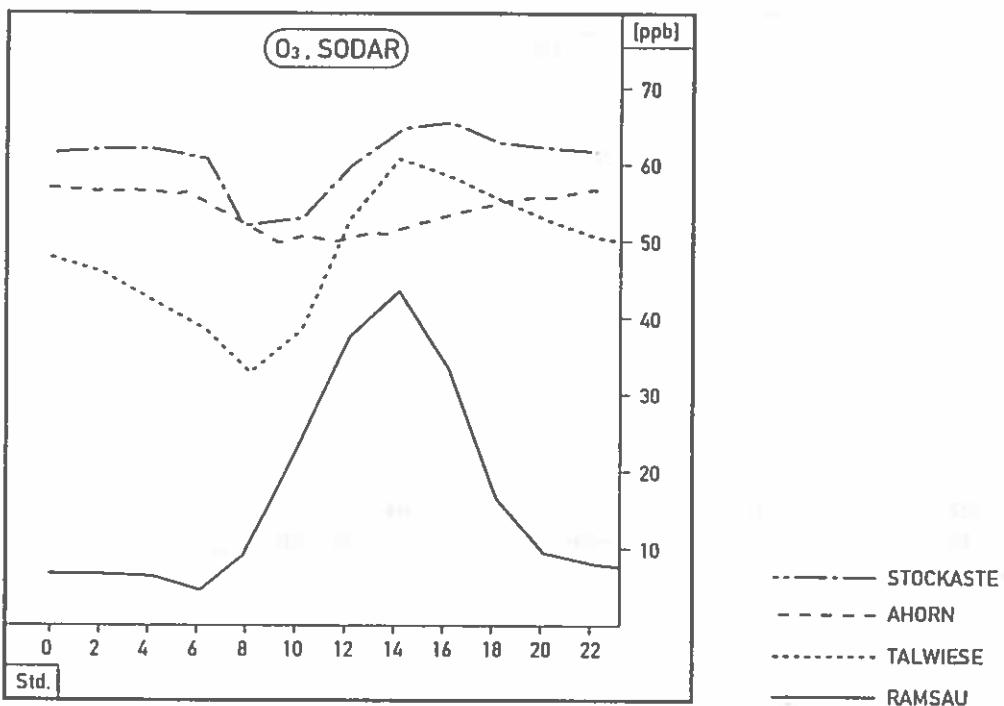


Abbildung 28b: Mittlerer Tagesgang der Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw NO_2 , jeweils ppb) an den Meßstellen des Hangprofils, bezogen auf die Periode der Sodarmessungen.

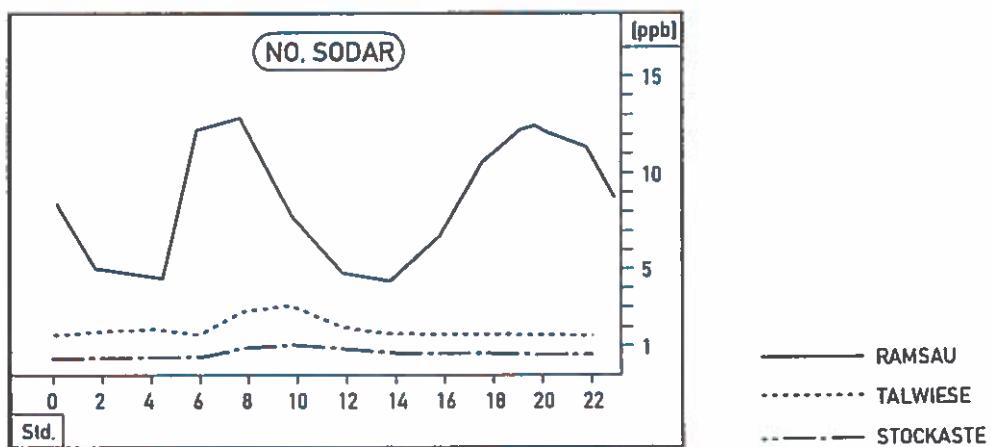


Abbildung 28b (Fortsetzung): Mittlerer Tagesgang der Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils ppb) an den Meßstellen des Hangprofils, bezogen auf die Periode der Sodarmessungen.

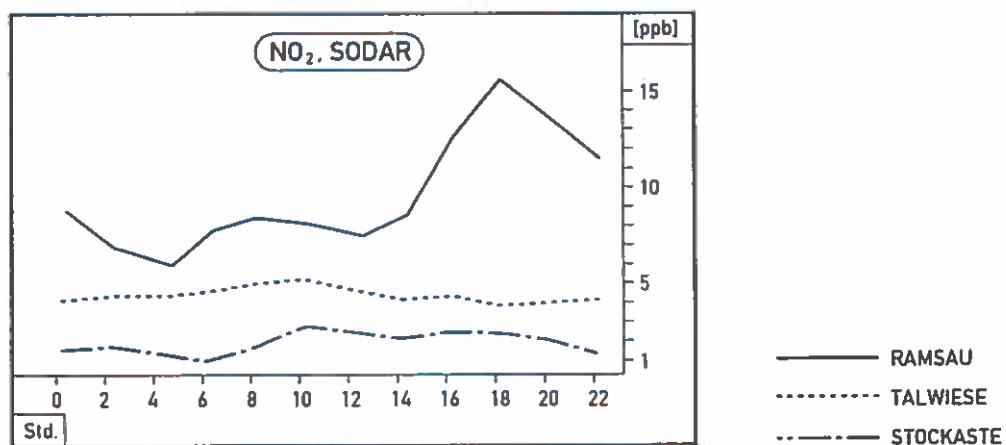


Abbildung 28b (Fortsetzung): Mittlerer Tagesgang der Immissionskonzentrationen von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils ppb) an den Meßstellen des Hangprofils, bezogen auf die Periode der Sodarmessungen.

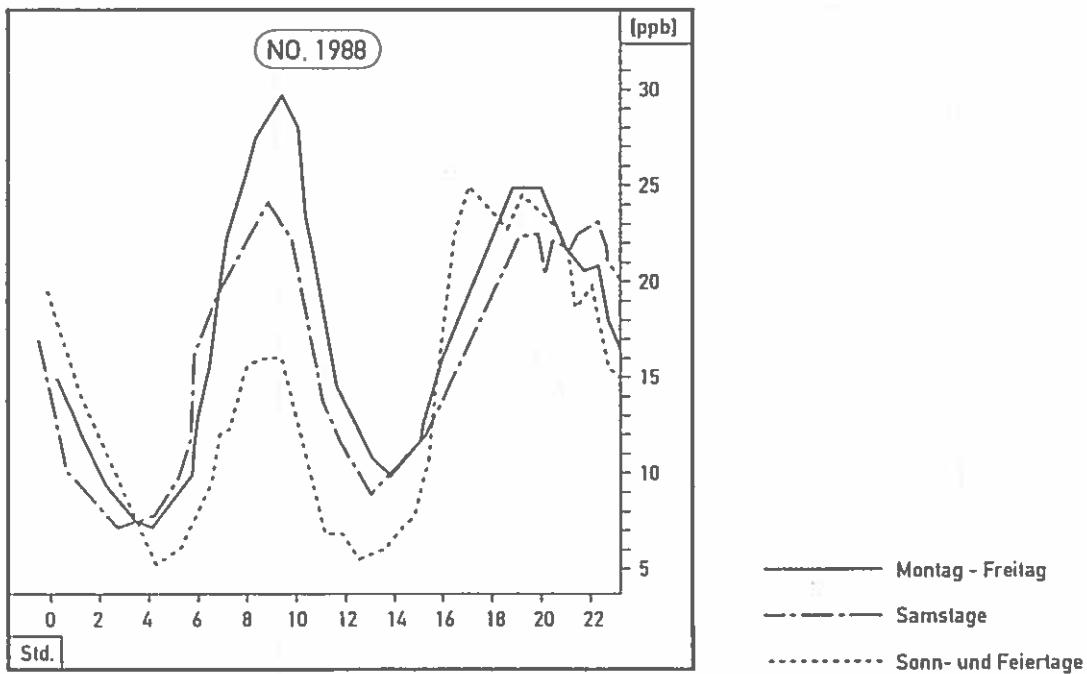


Abbildung 29a: Mittlerer Tagesgang der Immissionskonzentrationen von Stickstoffmonoxid (NO, ppb) an der Ramsau in Abhängigkeit vom Wochentag (bezogen auf das Jahr 1988). Ausgezogen: Montag-Freitag; strichliert: Sonn- u. Feiertage; strichpunktierter: Samstage.

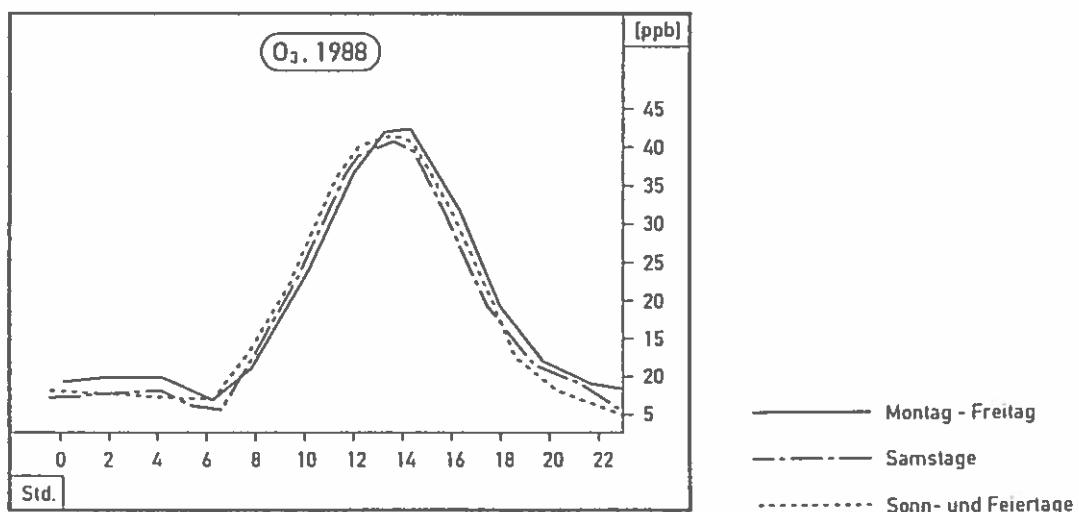


Abbildung 29b: Mittlerer Tagesgang der Immissionskonzentrationen von Ozon (O₃, ppb) an der Ramsau in Abhängigkeit vom Wochentag (bezogen auf das Jahr 1988). Ausgezogen: Montag-Freitag; strichliert: Sonn- u. Feiertage; strichpunktierter: Samstage.

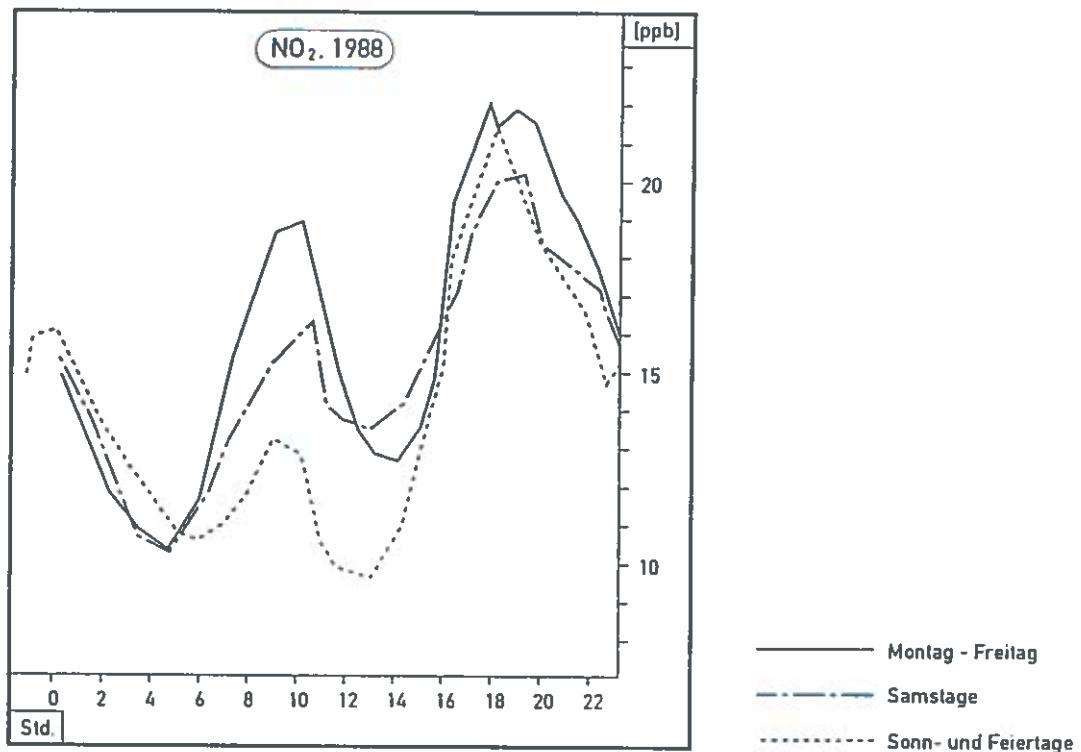


Abbildung 29c: Mittlerer Tagesgang der Immissionskonzentrationen von Stickstoffdioxid (NO₂, ppb) an der Ramsau in Abhängigkeit vom Wochentag (bezogen auf das Jahr 1988).
Ausgezogen: Montag-Freitag; strichliert: Sonn- u. Feiertage; strichpunktierter: Samstage.

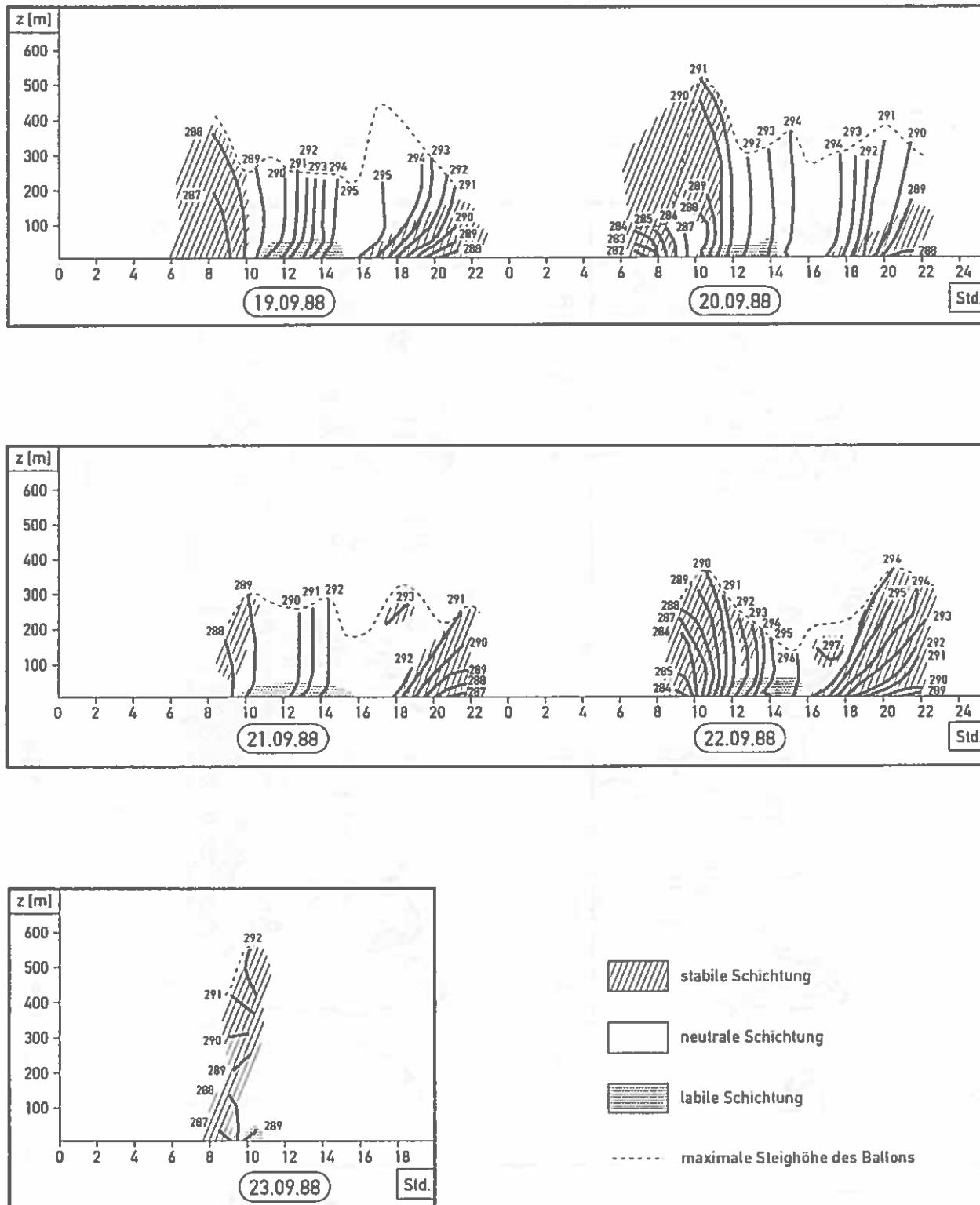


Abbildung 30: Zeit-Höhendiagramm der Potentielle Temperatur (anhand der Fesselballonmessungen, °K) für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

Schraffiert: Stabile Schichtung, Punktier: Überadiabatische Schichtung.

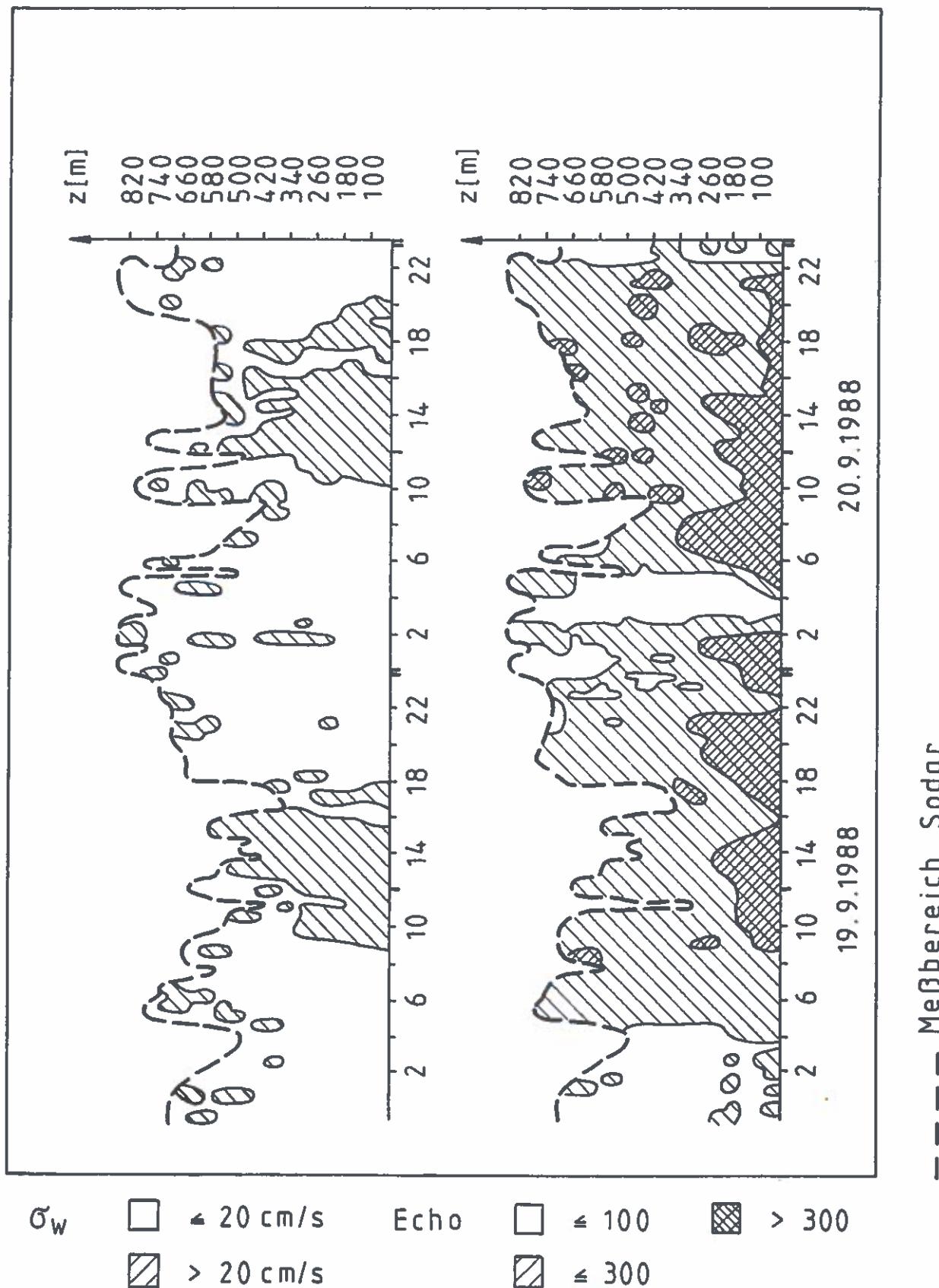


Abbildung 31: Profile der Streuung des Vertikalwinds (s_w , cm/s) und der Echointensität für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

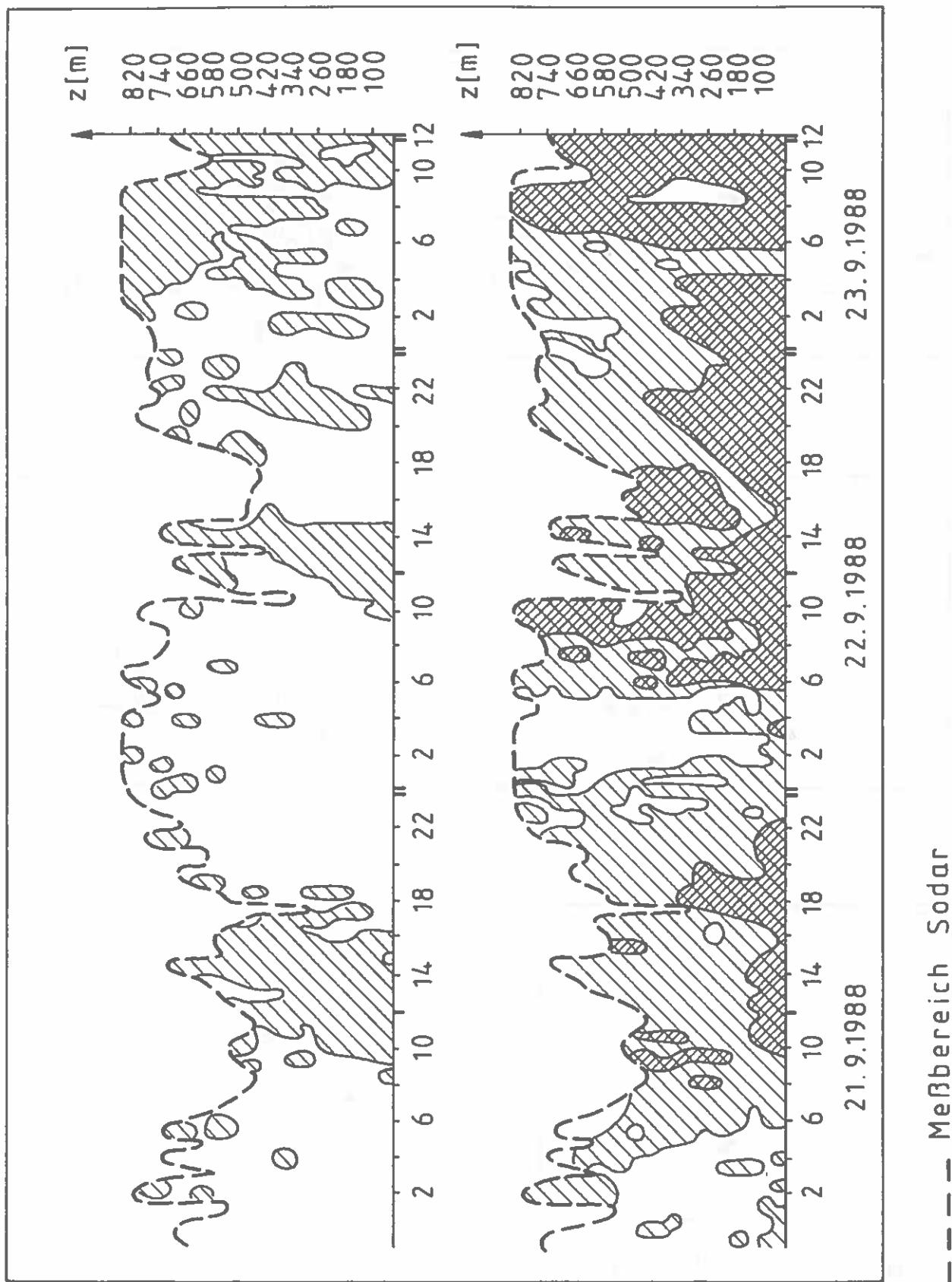


Abbildung 31 (Fortsetzung): Profile der Streuung des Vertikalwinds (s_w , cm/s) und der Echointensität für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

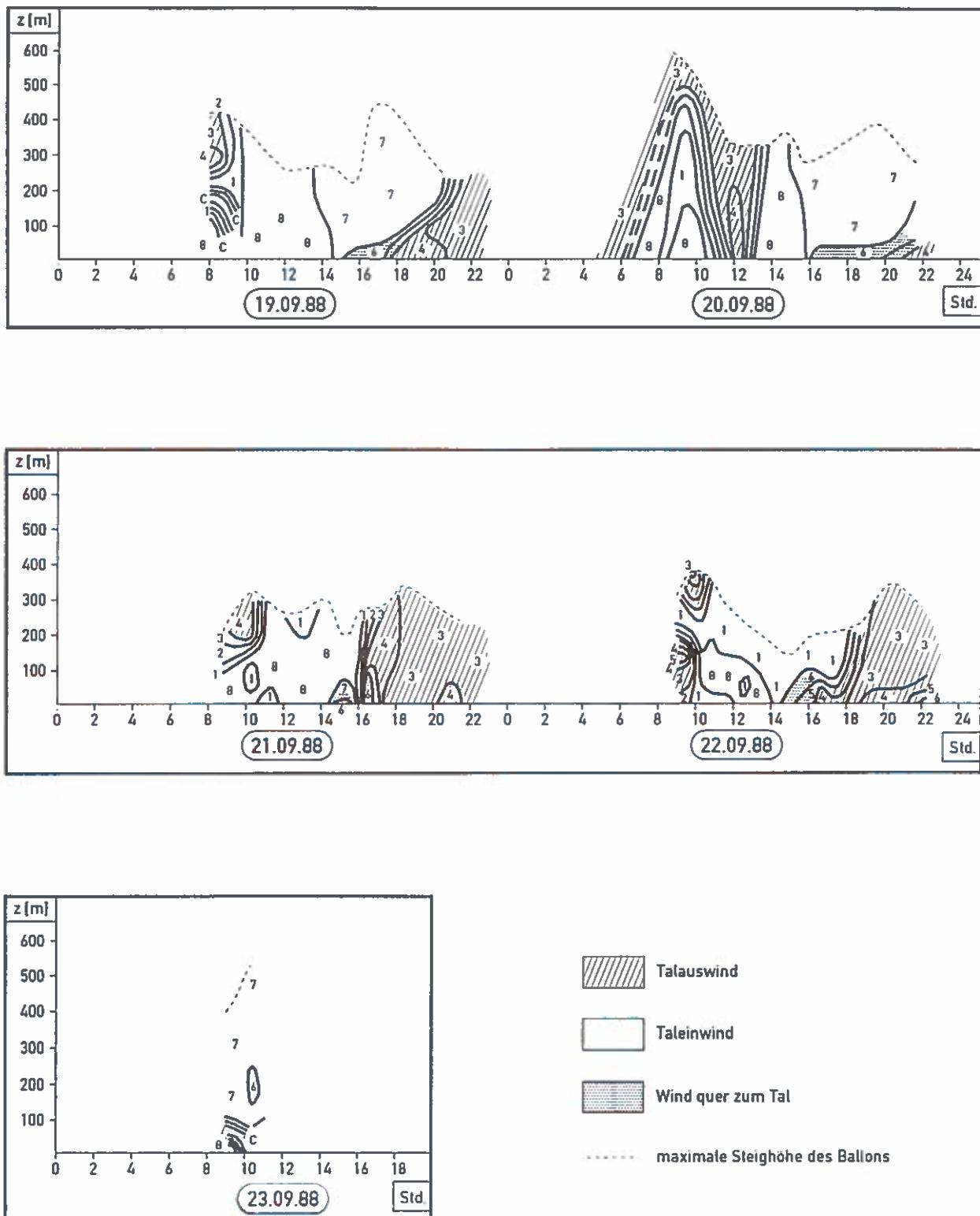


Abbildung 32: Profile der Windrichtung anhand der Fesselballonmessungen für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.
 1 = Nordost, 2 = Ost, 3 = Südost, 4 = Süd, 5 = Südwest, 6 = West, 7 = Nordwest, 8 = Nord, C = Windstille.
 Schraffiert: Talauswind, Weiß: Taleinwind, Punktierter: Wind quer zum Tal (Westwind).

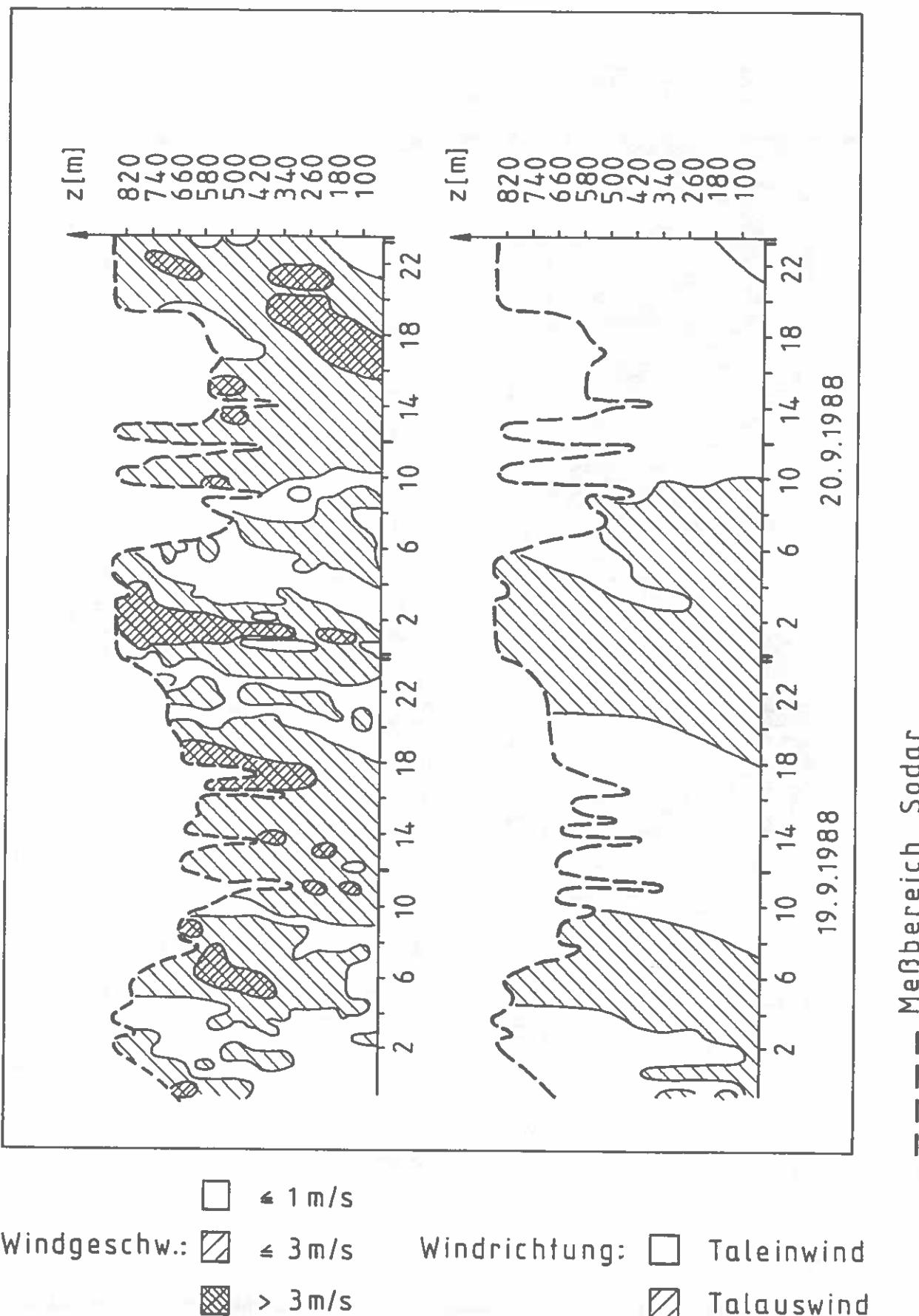


Abbildung 33: Profile von Windgeschwindigkeit (cm/s) und Windrichtung (Unterscheidung Talein- bzw. Talauswind) anhand der Sodarmessungen für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

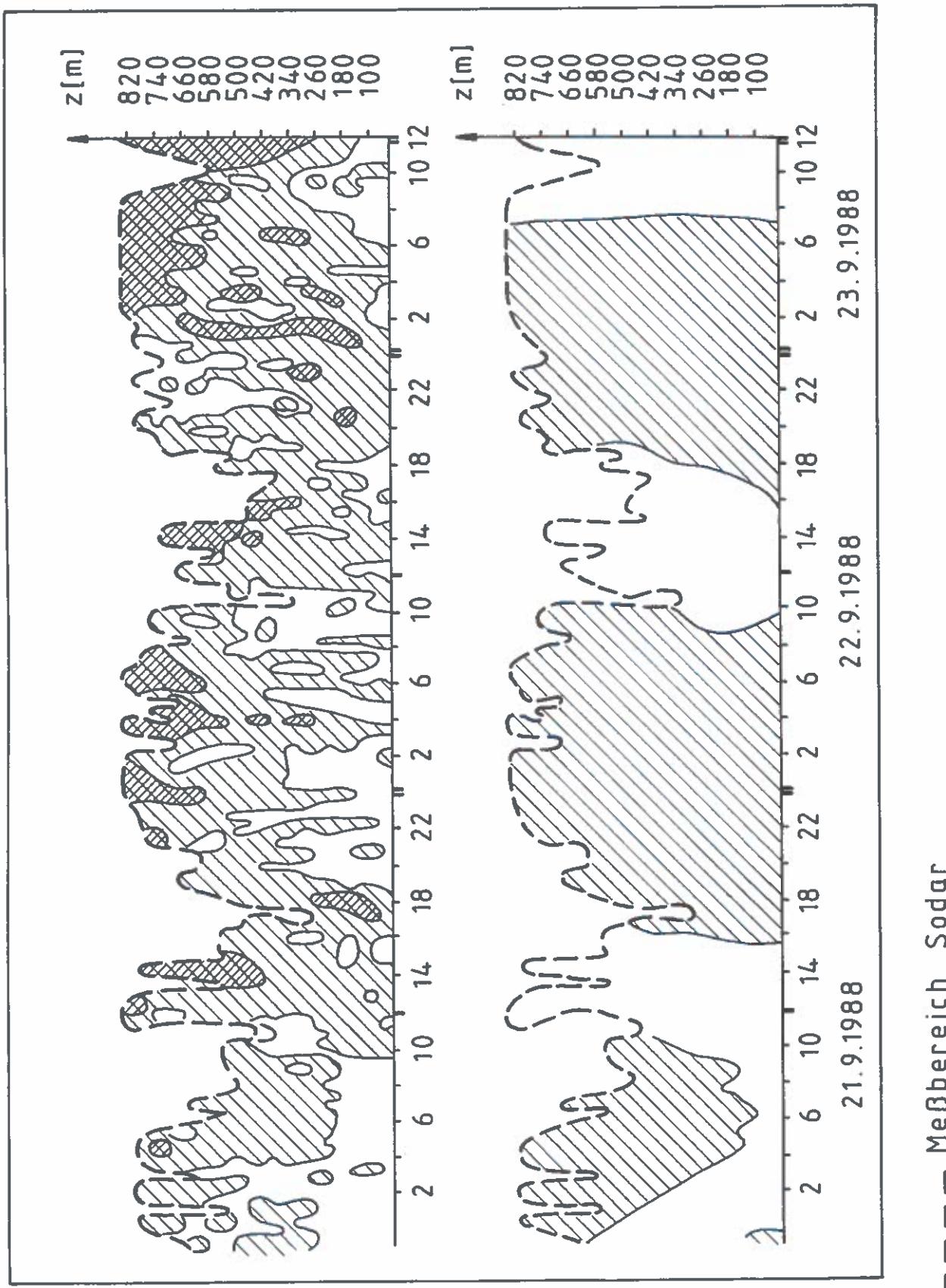


Abbildung 33 (Fortsetzung): Profile von Windgeschwindigkeit (cm/s) und Windrichtung (Unterscheidung Talein- bzw. Talauswind) anhand der Sodarmessungen für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

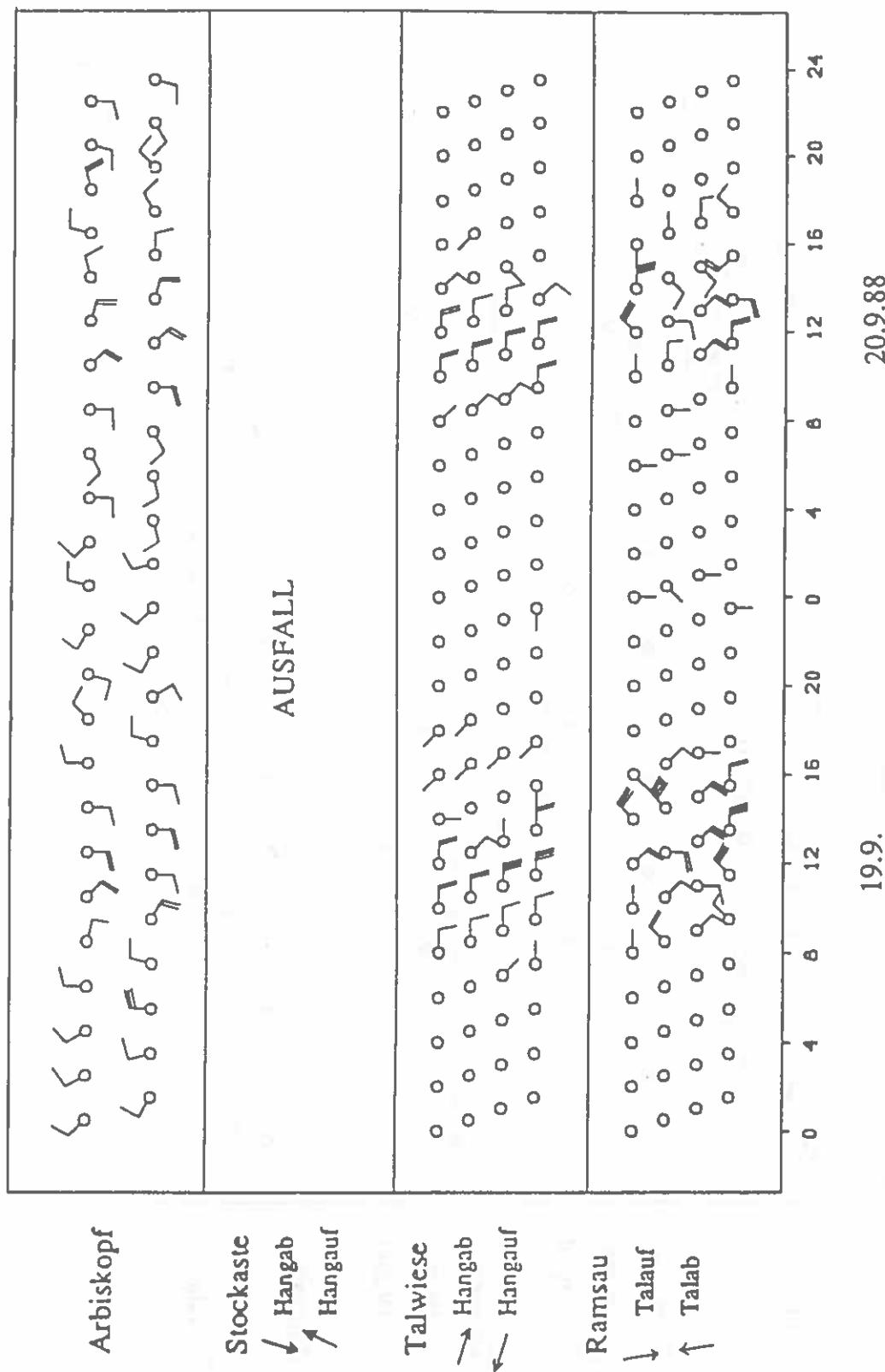


Abbildung 34: Winddaten (Halbstundenmittelwerte, aus Platzgründen zeilenweise versetzt) an den Stationen des Hangprofils für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

Die Fähnchen geben die Windrichtung an, jeder Querstrich entspricht 1 m/s. Für jede Station ist zudem die Richtung für Hangab- und Hangaufwind bzw. für die Ramsau für Talab- und Talaufwind angegeben.

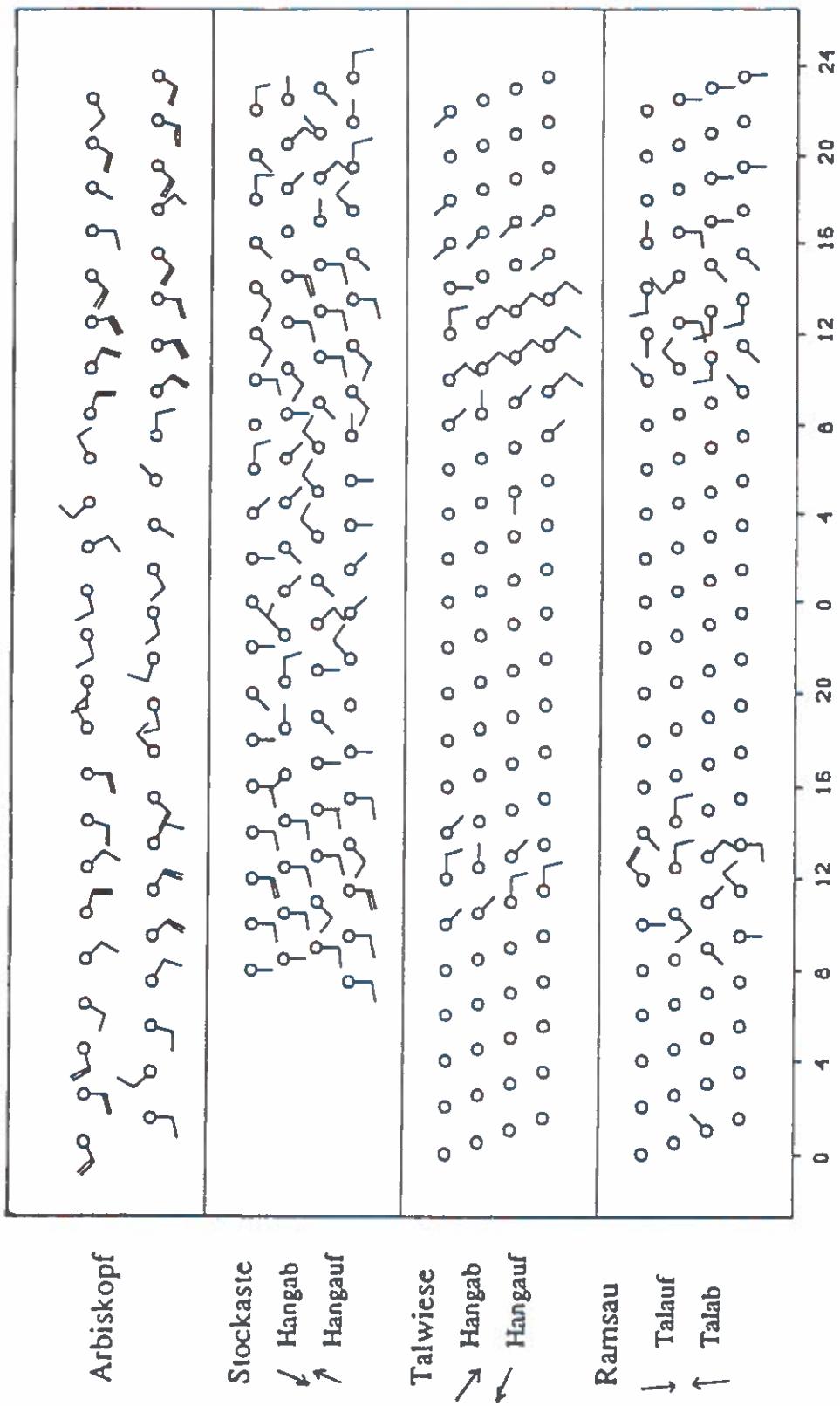


Abbildung 34 (Fortsetzung): Winddaten (Halbstundenmittelwerte, aus Platzgründen zeilenweise versetzt) an den Stationen des Hangprofils für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

Die Fähnchen geben die Windrichtung an, jeder Querstrich entspricht 1 m/s. Für jede Station ist zudem die Richtung für Hangab- und Hangaufwind bzw. für die Ramsau für Talab- und Talaufwind angegeben.

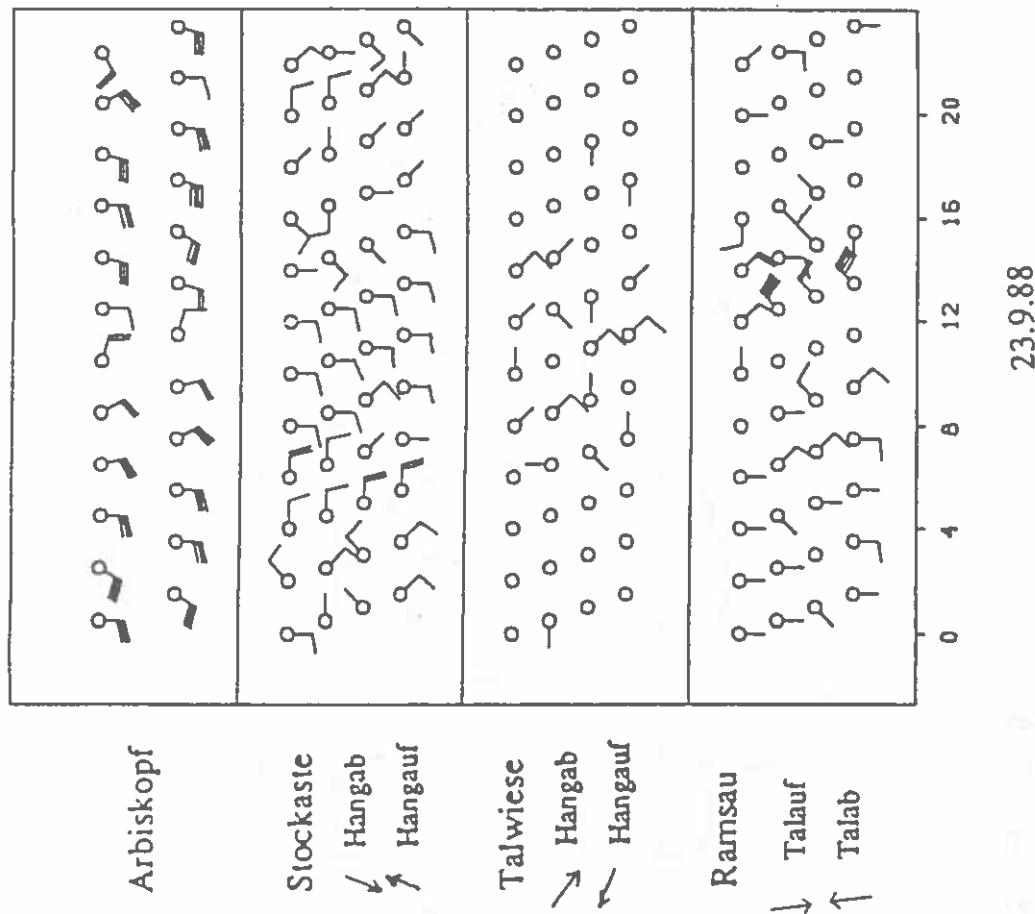


Abbildung 34 (Fortsetzung): Winddaten (Halbstundenmittelwerte, aus Platzgründen zeilenweise versetzt) an den Stationen des Hangprofils für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

Die Fähnchen geben die Windrichtung an, jeder Querstrich entspricht 1 m/s. Für jede Station ist zudem die Richtung für Hangab- und Hangaufwind bzw. für die Ramsau für Talauf- und Talabwind angegeben.

RAMSAU

19. 9. 1988-20. 9. 1988

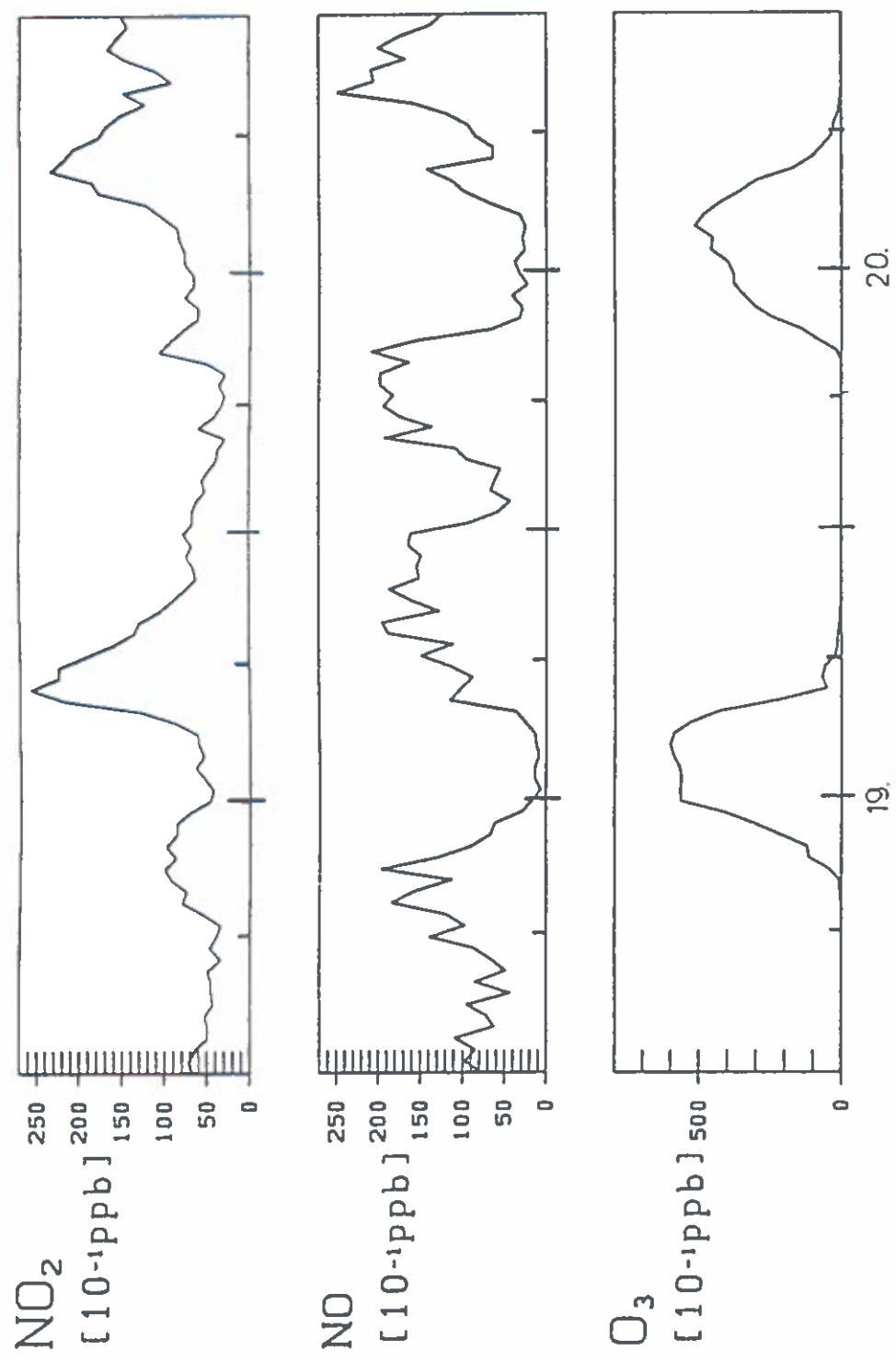


Abbildung 35: Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

RAMSAU
21. 9. 1988-22. 9. 1988

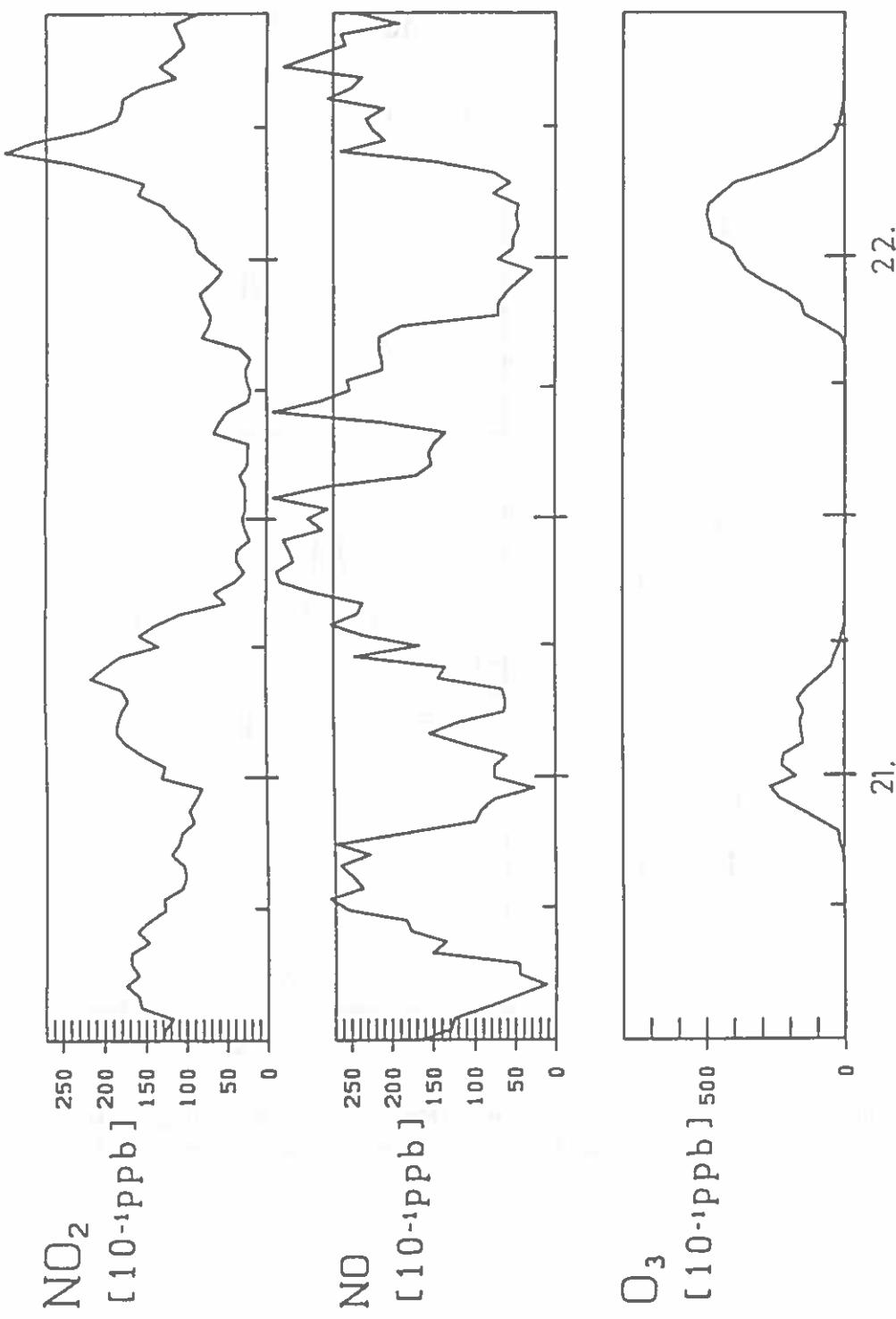


Abbildung 35 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

RAMSAU

23.9.1988-24.9.1988

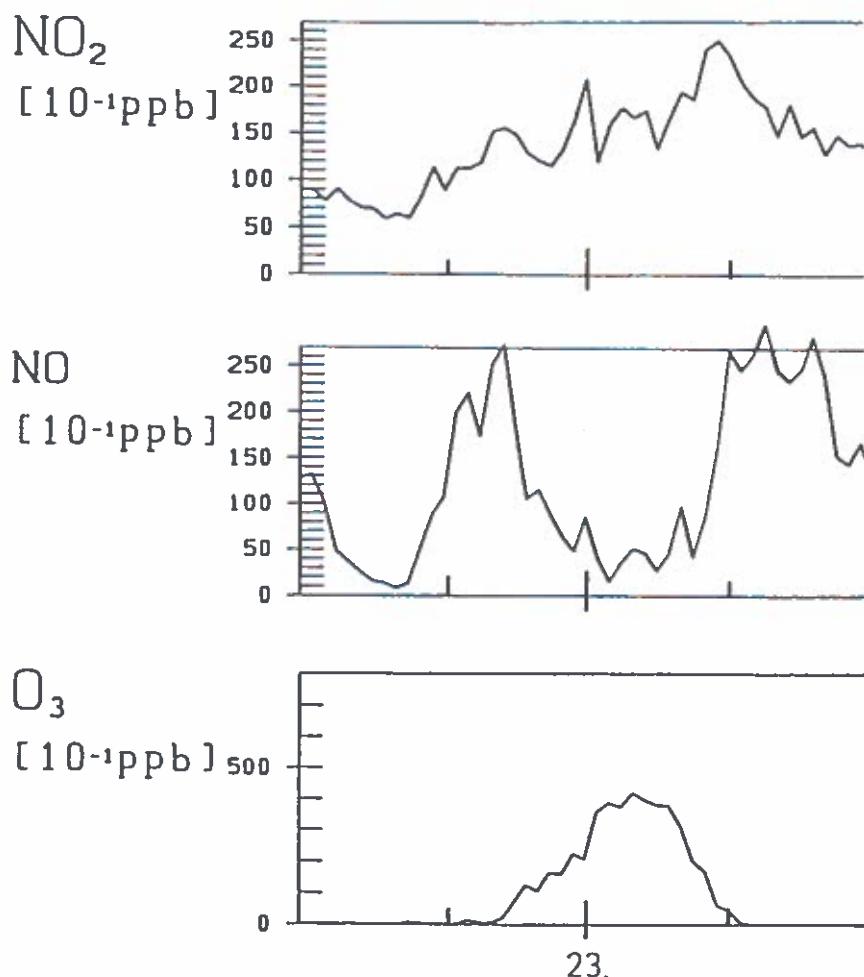


Abbildung 35 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

TALWIESE
19.9.1988-20.9.1988

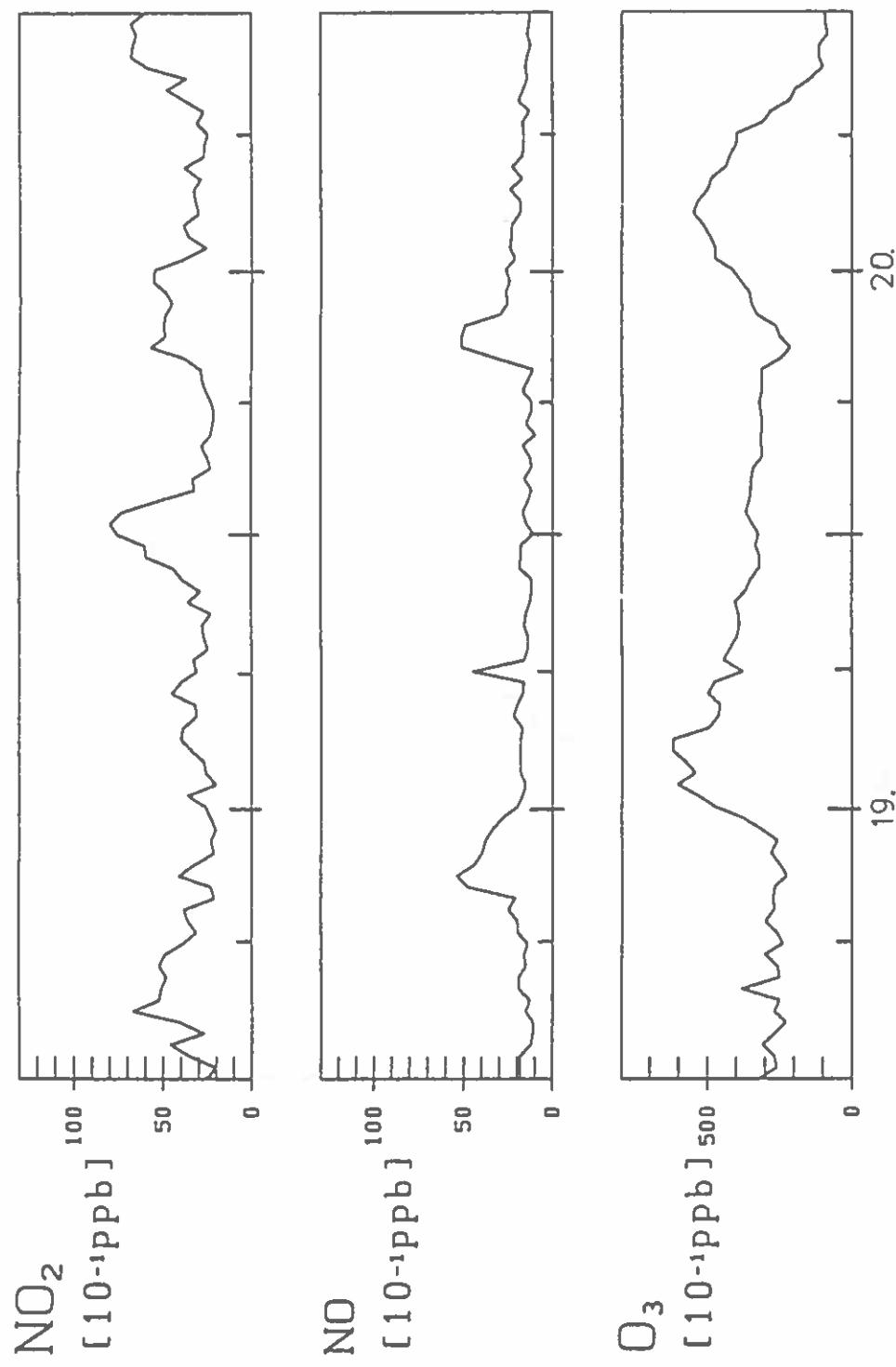


Abbildung 35 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

TALWIESE

21. 9. 1988-22. 9. 1988

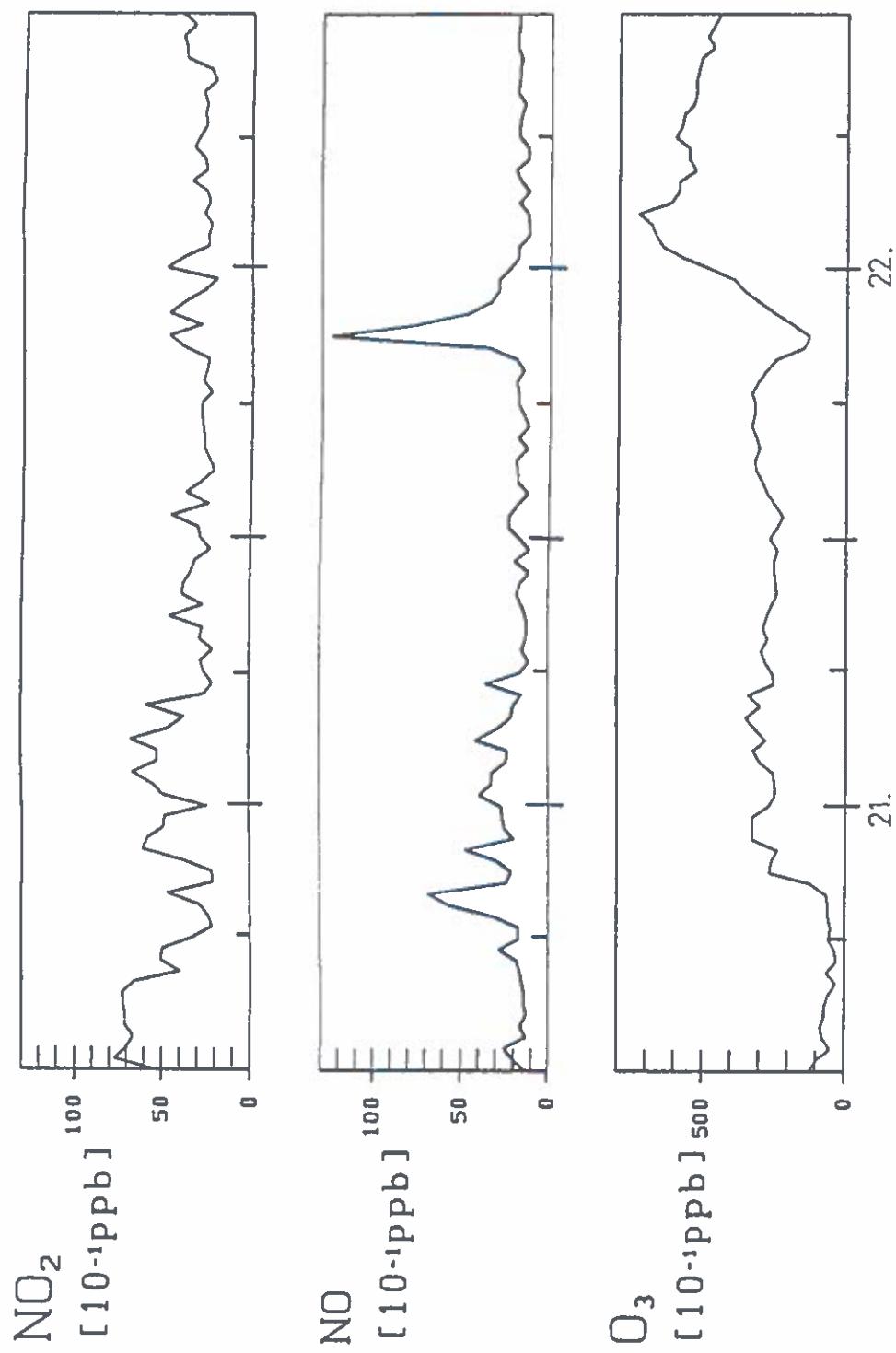


Abbildung 35 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

TALWIESE

23.9.1988-24.9.1988

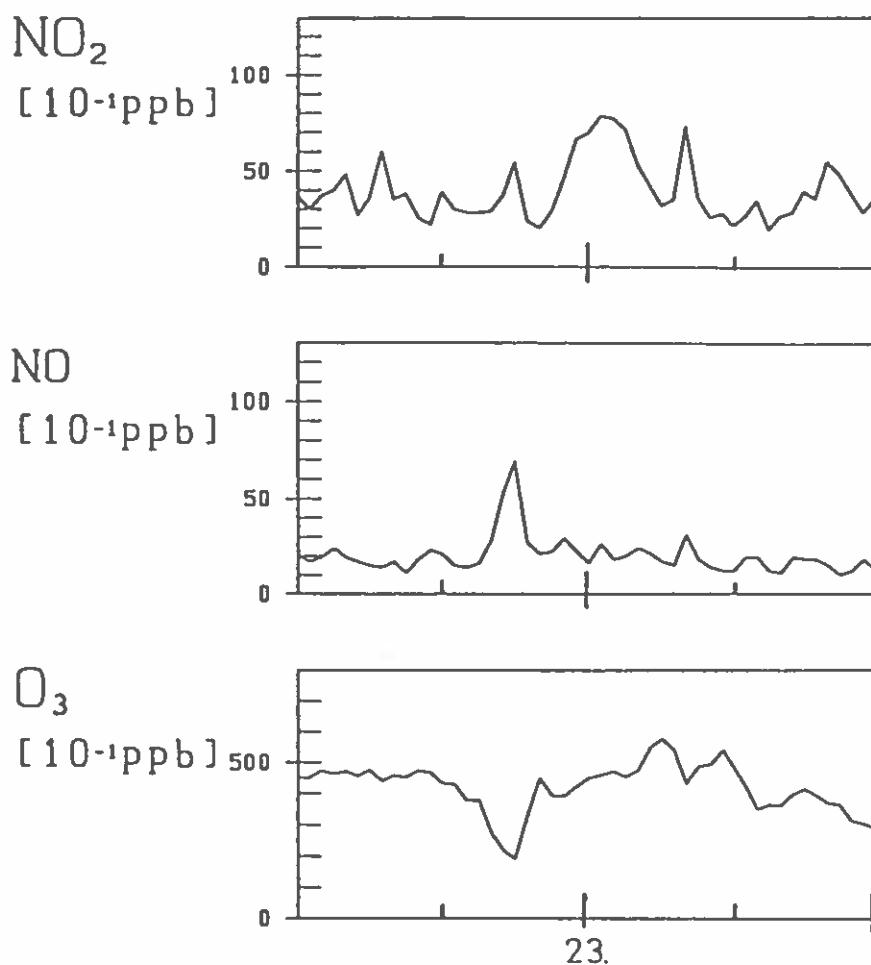


Abbildung 35 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

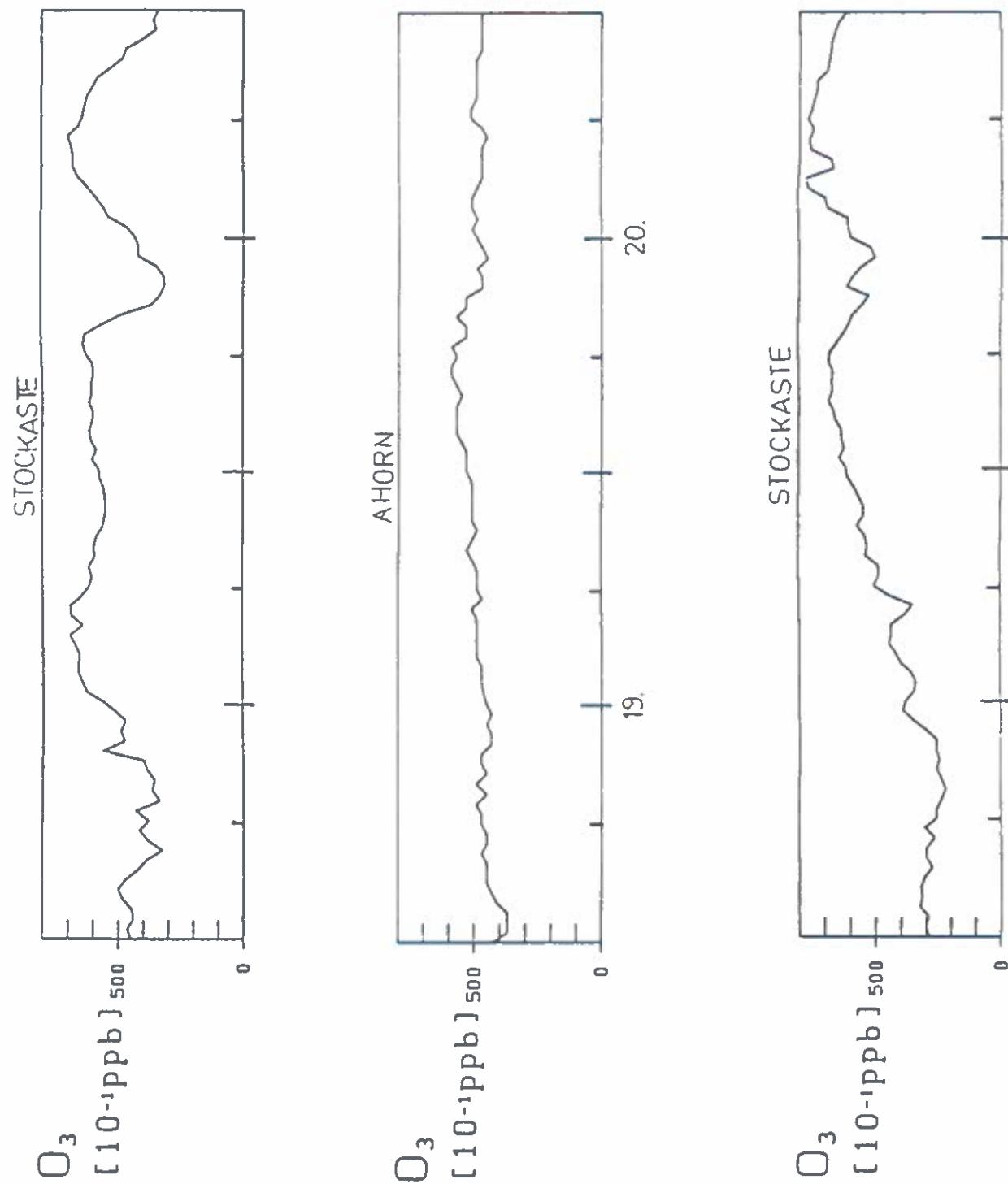


Abbildung 35 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

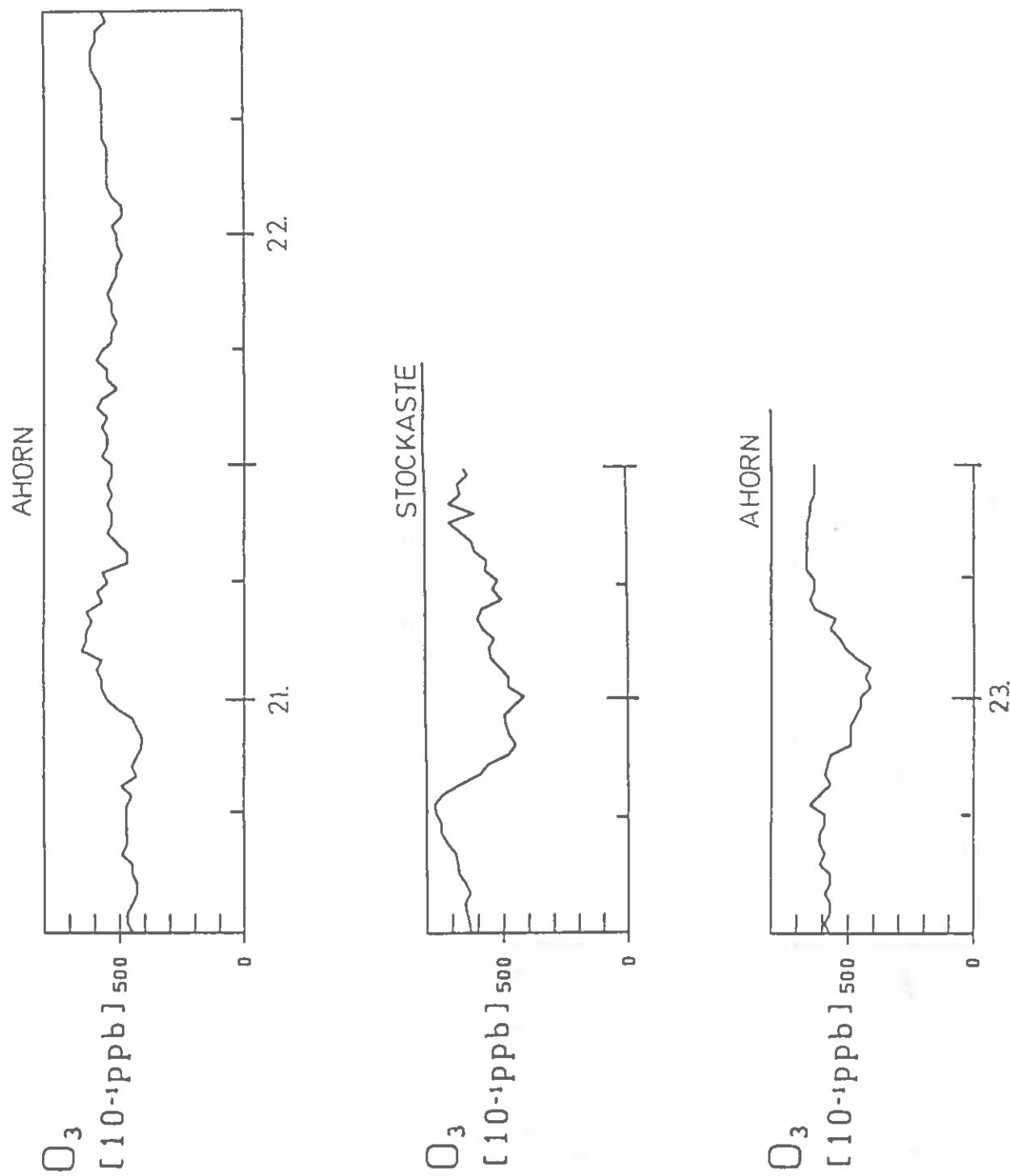


Abbildung 35 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

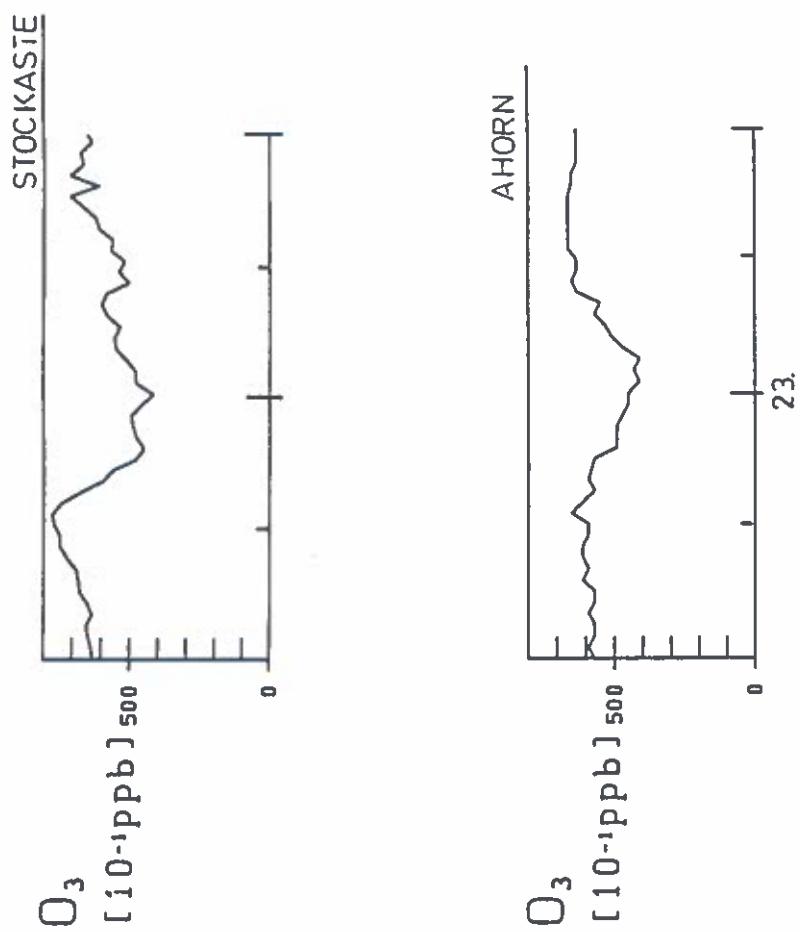


Abbildung 35 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw. NO₂, jeweils 10⁻¹ ppb) für die Periode von 19. bis 23. 9. 1988.

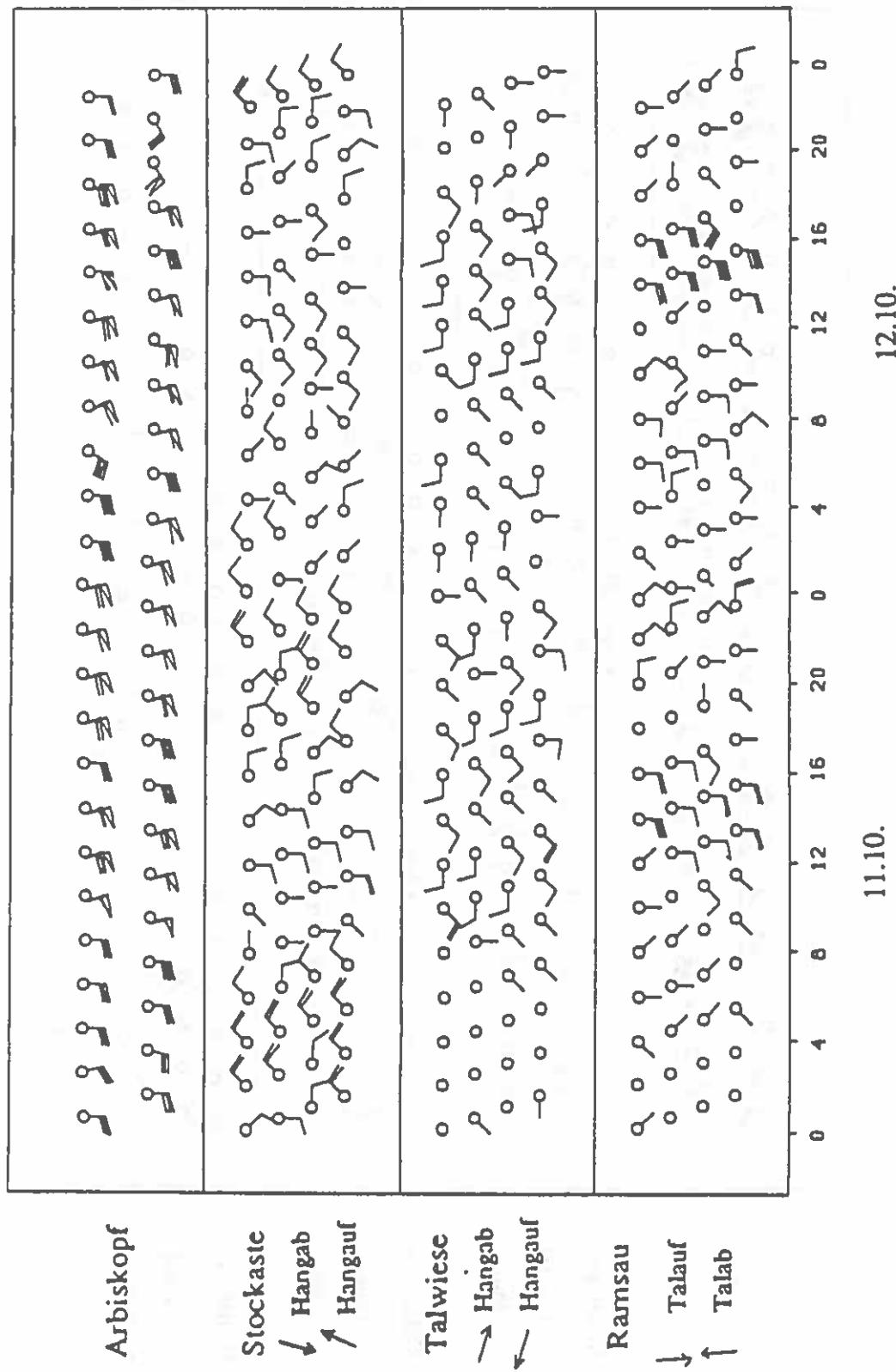


Abbildung 36: Winddaten (Halbstundenmittelwerte, aus Platzgründen zeilenweise versetzt) an den Stationen des Hangprofils für ausgewählte Tage mit Föhn.

Die Fähnchen geben die Windrichtung an, jeder Querstrich entspricht 1 m/s, jedes Dreieck 5 m/s, jedes volle Dreieck 10 m/s. Für jede Station ist zudem die Richtung für Hangab- und Hangaufwind bzw. für die Ramsau für Talab- und Talaufwind angegeben.

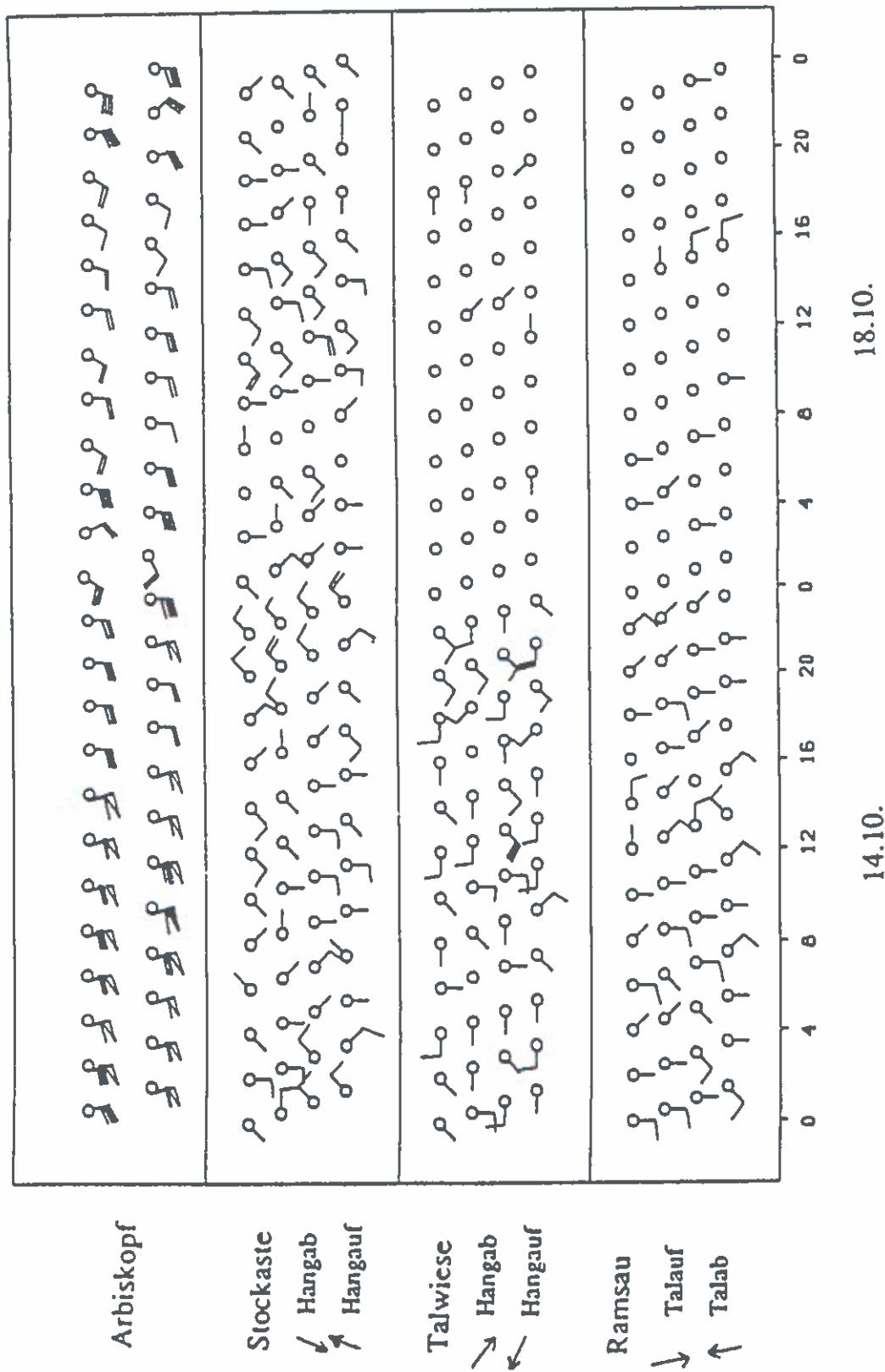


Abbildung 36 (Fortsetzung): Winddaten (Halbstundenmittelwerte, aus Platzgründen zeilenweise versetzt) an den Stationen des Hangprofils für ausgewählte Tage mit Föhn. Die Fähnchen geben die Windrichtung an, jeder Querstrich entspricht 1 m/s, jedes Dreieck 5 m/s, jedes volle Dreieck 10 m/s. Für jede Station ist zudem die Richtung für Hangab- und Hangaufwind bzw. für die Ramsau für Talab- und Talaufwind angegeben.

18.10.

14.10.

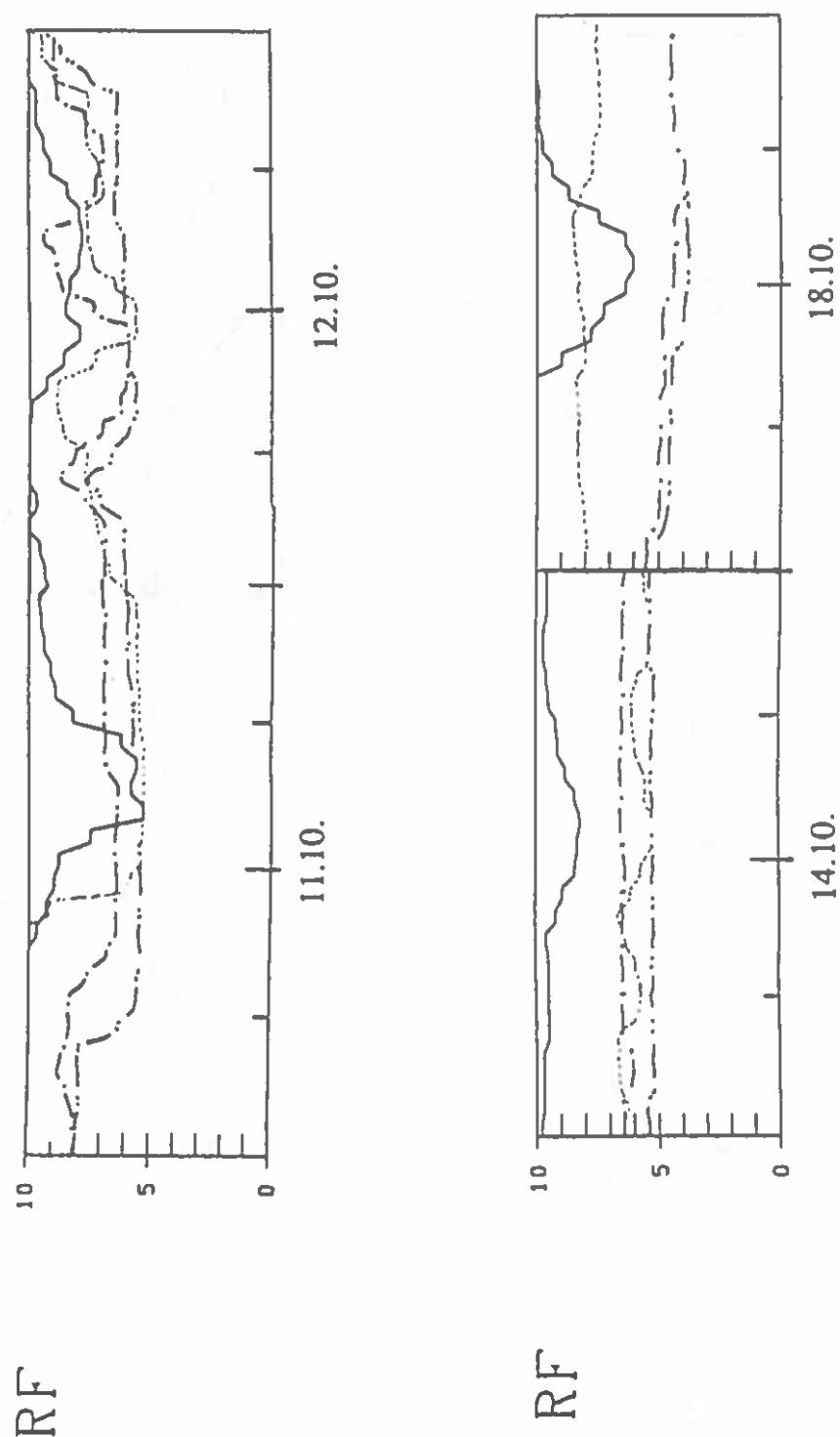


Abbildung 37: Zeitreihen der Relativen Feuchte (RF, %) für die Meßstellen des Hangprofils für ausgewählte Tage mit Föhn. Ausgezogen: Ramsau; strichpunktiert: Arbiskopf; Strich-Punkt-Punkt: Ahorn; punktiert: Talwiese.

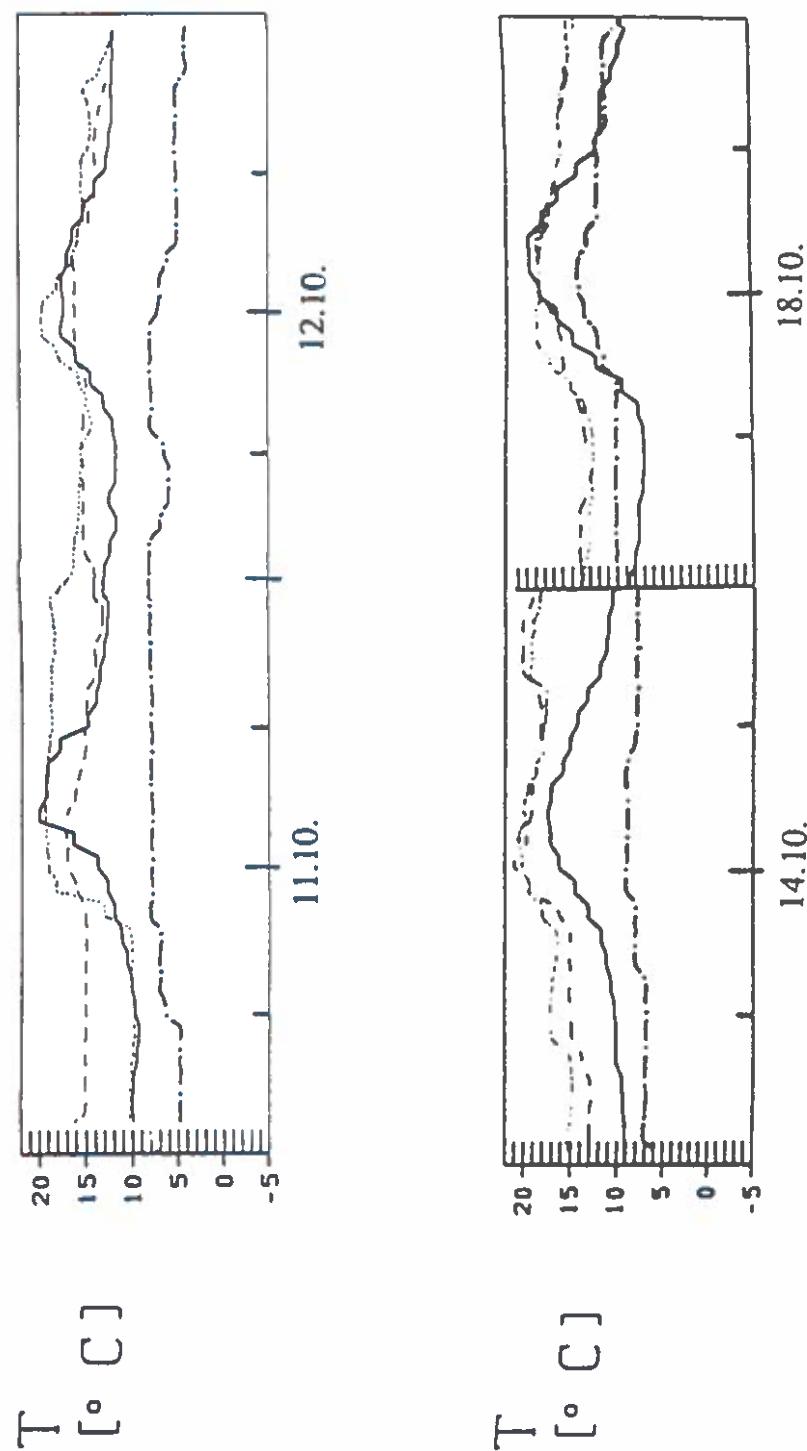


Abbildung 38: Zeitreihen der Lufttemperatur (T , $^{\circ}\text{C}$) für die Meßstellen des Hangprofils für ausgewählte Tage mit Föhn.
Ausgezogen: Ramsau; strichpunktiert: Arbiskopf; punktiert: Talwiese; strichliert: Bair.

TALWIESE

8. 10. 1988 - 9. 10. 1988

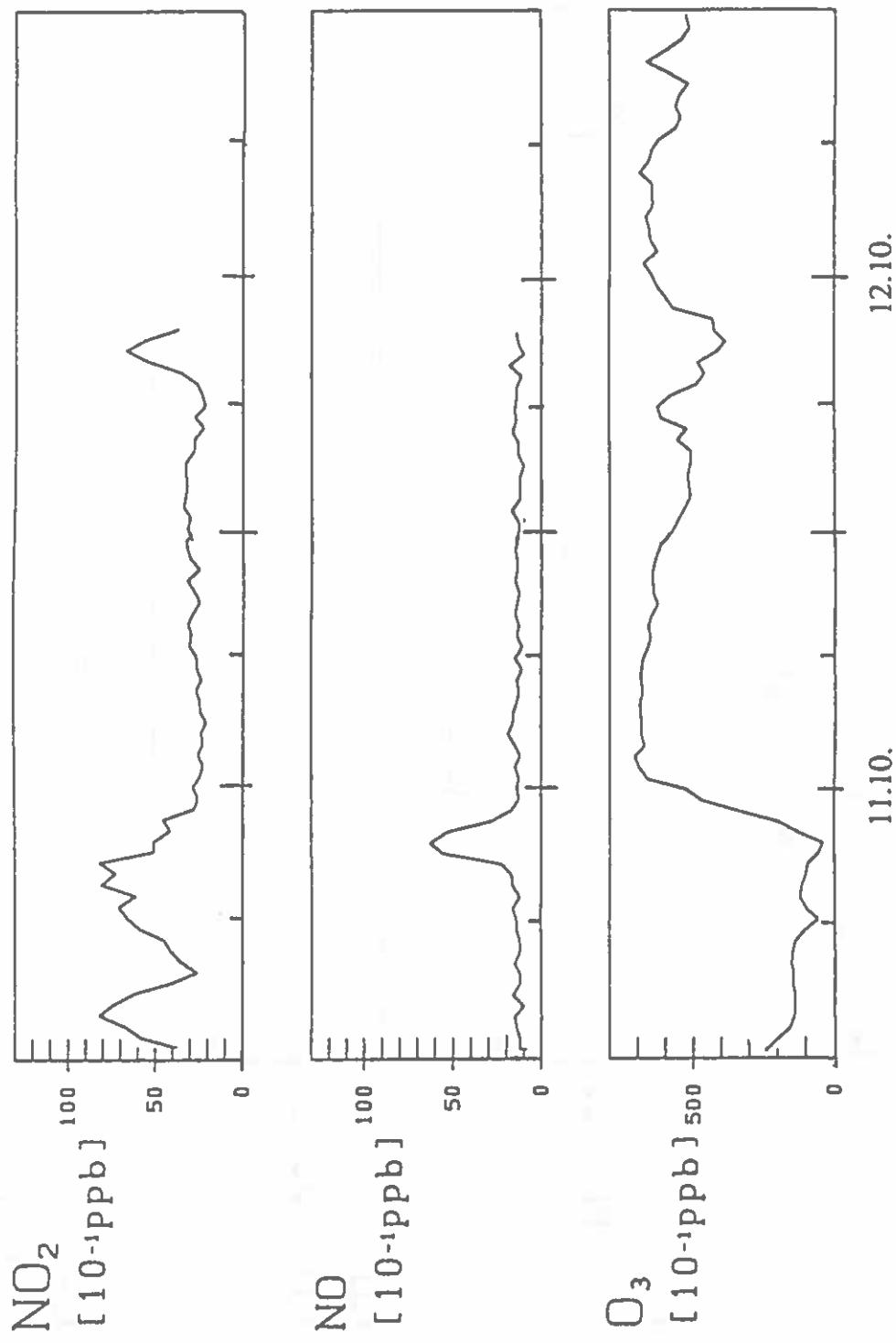


Abbildung 39: Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für ausgewählte Tage mit Föhn.

RAMSAU

0 . 10 . 1988 - 9 . 10 . 1988

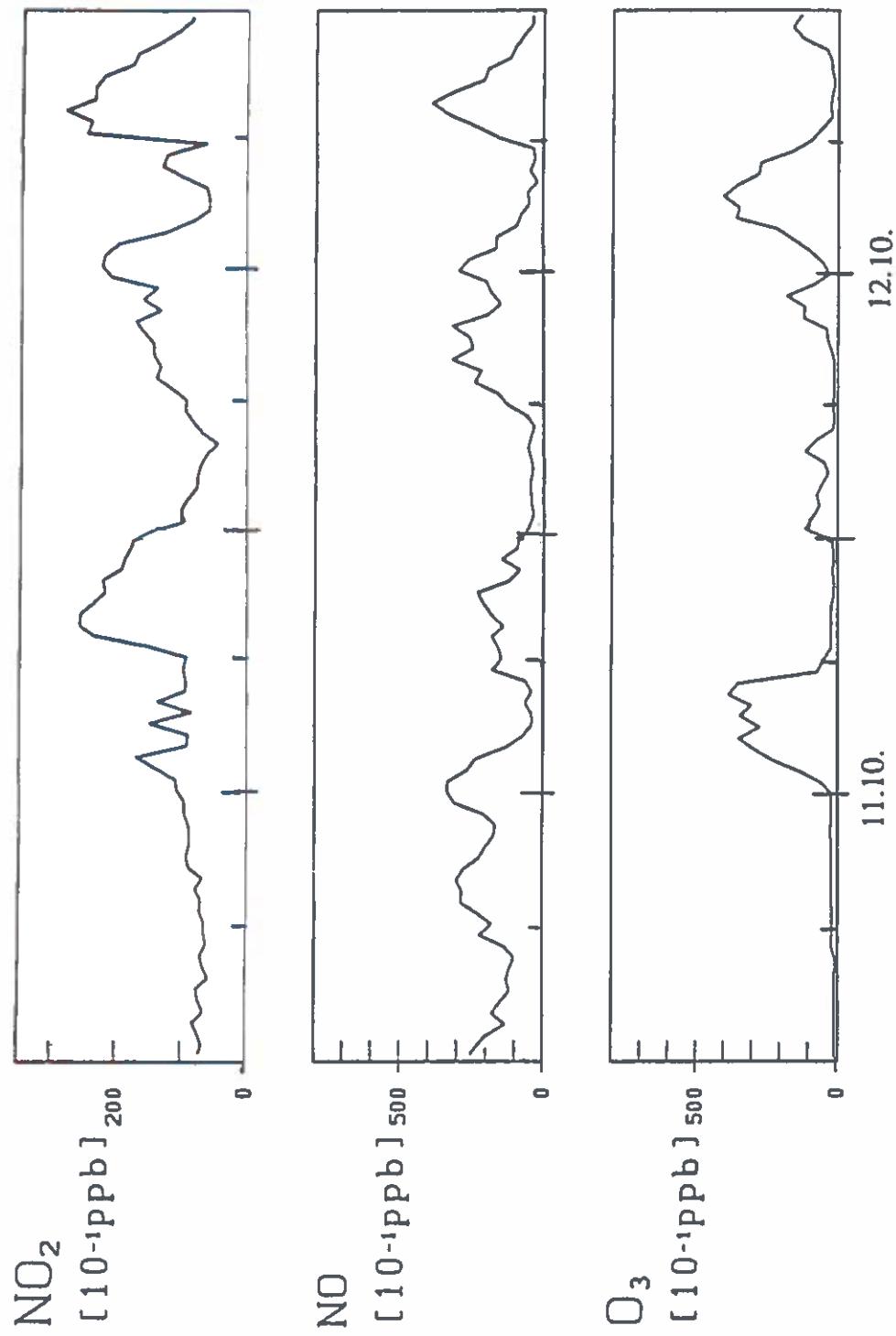


Abbildung 39 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für ausgewählte Tage mit Föhn.

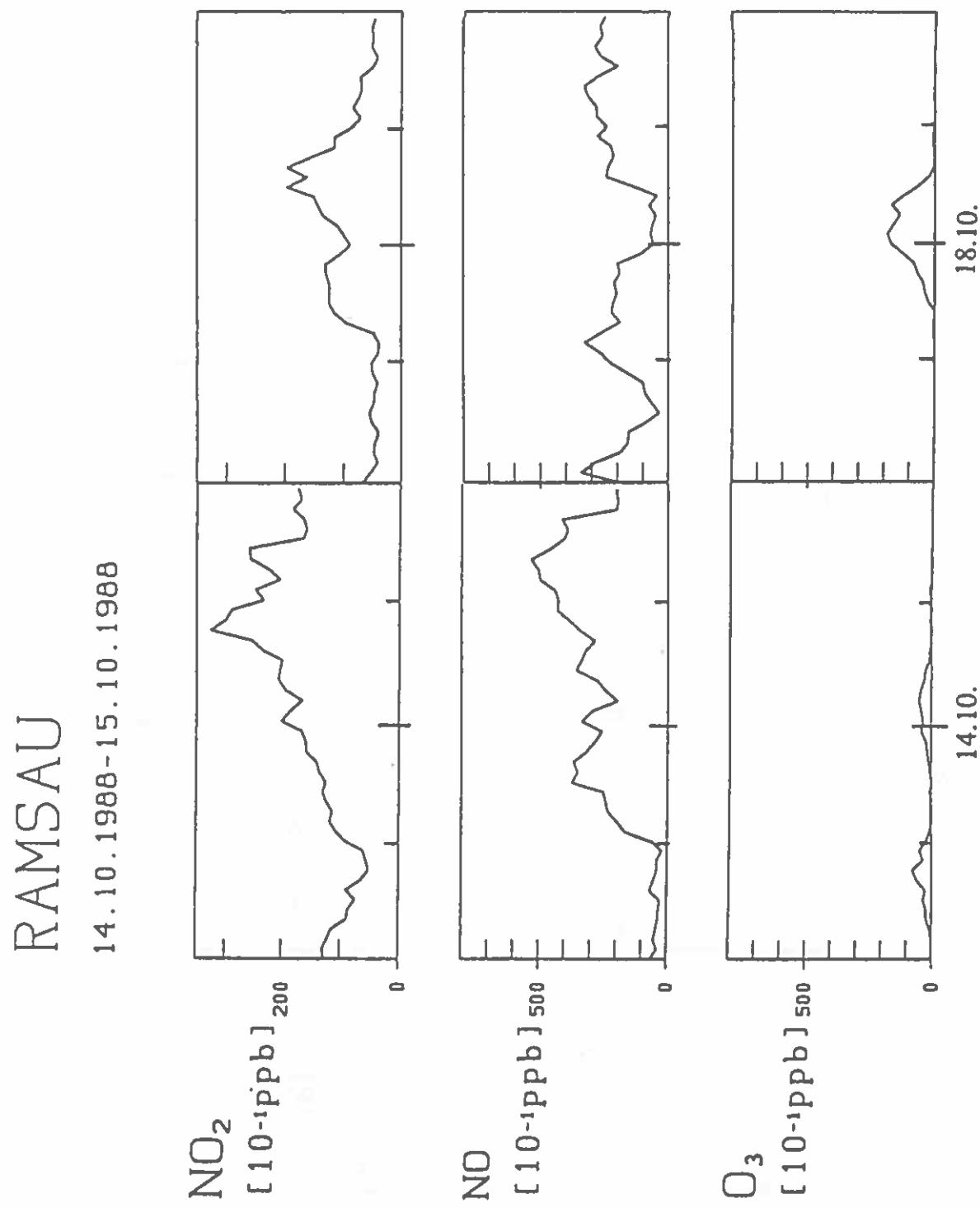


Abbildung 39 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O₃, NO bzw. NO₂, jeweils 10^{-1} ppb) für ausgewählte Tage mit Föhn.

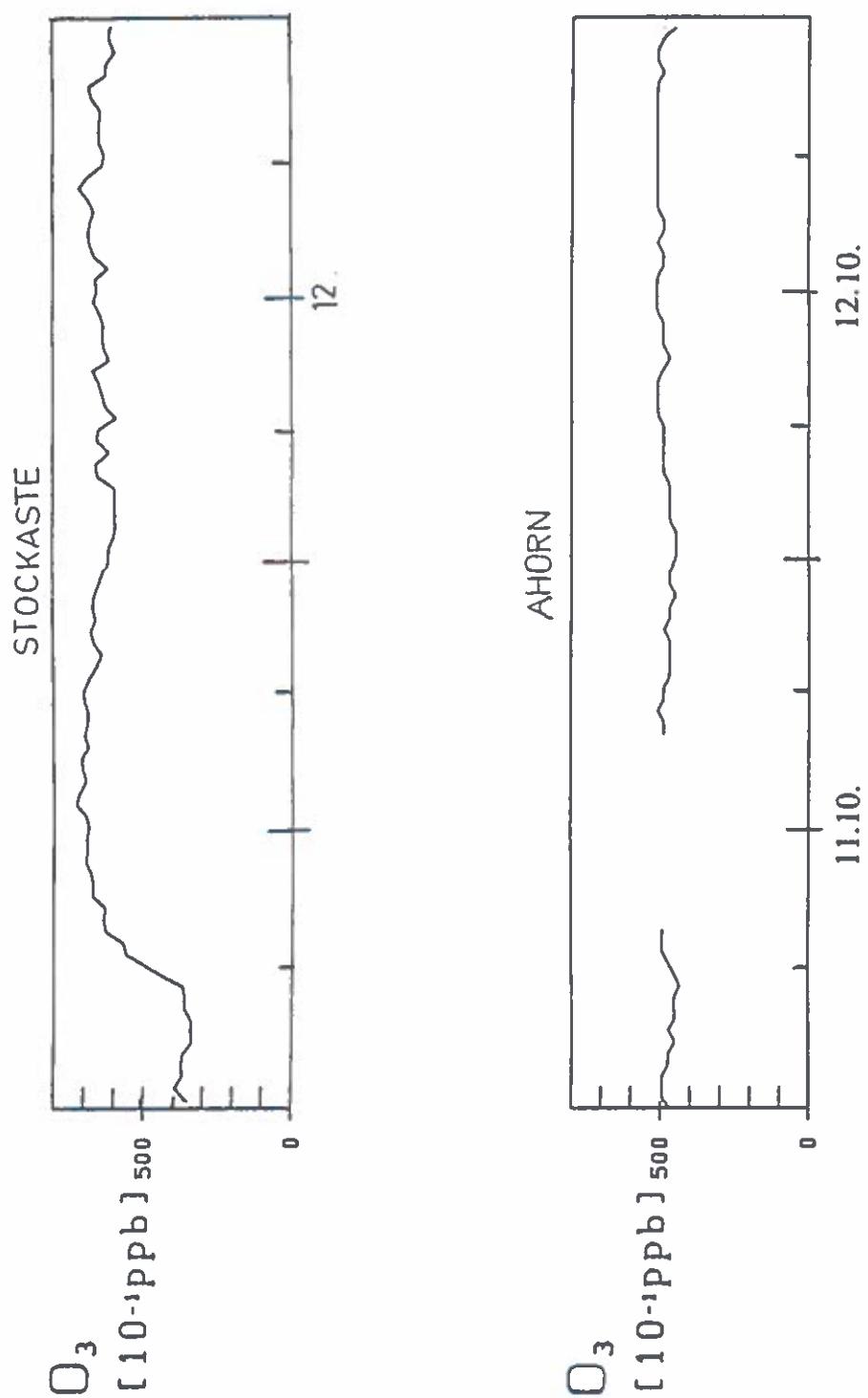


Abbildung 39 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für ausgewählte Tage mit Föhn.

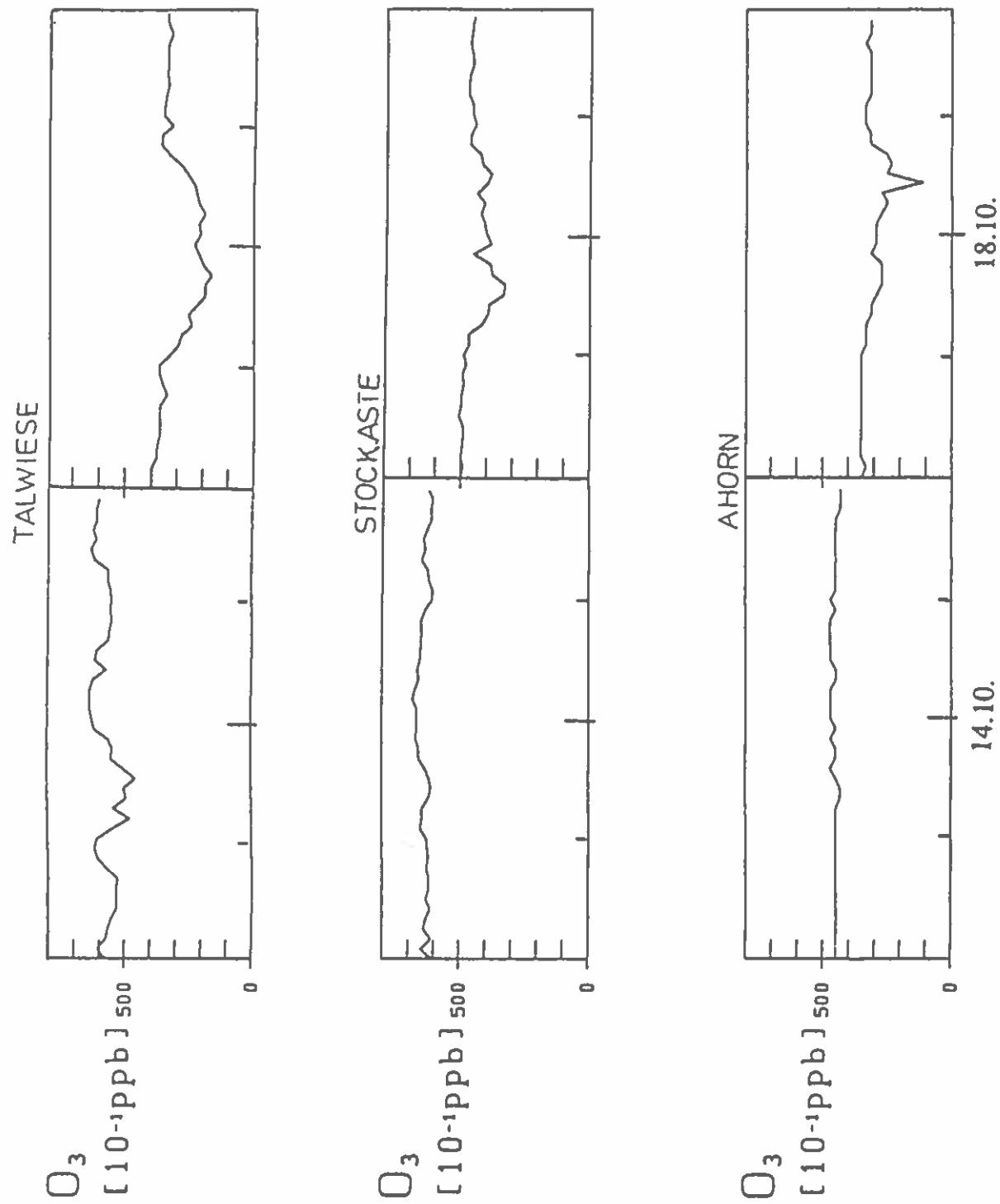


Abbildung 39 (Fortsetzung): Zeitreihen der an den Meßstellen des Hangprofils gemessenen Immissionsbelastung von Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (O_3 , NO bzw. NO_2 , jeweils 10^{-1} ppb) für ausgewählte Tage mit Föhn.

- 1991 57 Smidt, Stefan; Herman, Friedl; Leitner, Johann: Höhenprofil Zillertal. Meßbericht 1989/90.
Preis ÖS 30.— 28 S.
- 1991 58 Stagl, Wolfgang; Hacker, Robert: Weiden als Prosshölzer zur Äsungsverserung.
Preis ÖS 60.— 56 S.
- 1991 59 Holzer, Kurt; Ohene-Coffie, F.; Schultze, Ulrich: Vegetative Vermehrung von Fichte für Hochlagenauflorstungen. Physiologische und phänologische Probleme der Anpassung.
Preis ÖS 75.— 73 S.
- 1991 60 Holzschuh, Carolus: Neue Bockkäfer aus Asien II.
63 neue Bockkäfer aus Asien, vorwiegend aus China und Thailand, (Coleoptera: Disteniidae und Cerambycidae).
Preis ÖS 140.— 71 S.
- 1992 61 Stagl, Wolfgang: Auswertung der "Trakte" zum Staatsvertrag "Vereinbarung zwischen Bund und dem Land Kärnten über gemeinsame Maßnahmen zur Sicherung eines ausgewogenen Verhältnisses von Wald und Wild".
Preis ÖS 105.— 62 S.
- 1992 62 Jeglitsch, Friedrich: Wildbachereignisse in Österreich 1983-1985.
Preis ÖS 75.— 72 S.
- 1992 63 Fürst, Alfred: Blatt- und nadelanalytische Untersuchungen im Rahmen des Waldschaden - Beobachtungssystems. Ergebnisse 1989.
Preis ÖS 40.— 37 S.
- 1992 Sonderheft1 Dragovic, Nada: Terminologie für die Wildbachverbauung. Fachwörterbuch deutsch - serbokroatisch. Terminologija Uredjenja Bujicnih Tokova. Recnik Strucnih Termina Srpskohrvatsko - Nemacki.
Preis ÖS 50.— 43 S.
- 1992 64 Jeglitsch, Friedrich: Wildbachereignisse in Österreich 1986-1988.
Preis ÖS 95.— 91 S.
- 1992 65 Nather, Johann (Hrsg.): Proceedings of the meeting of IUFRO - WP S2.02-21 on "Actual problems of the legislation of forest reproductive material and the need for harmonization of rules at an international level". Gmunden / Vienna - Austria, June 10. - 14. 1991.
Preis ÖS 200.— 180 S.
- 1992 66 Jeglitsch, Friedrich: Wildbachereignisse in Österreich 1989.
Preis ÖS 60.— 60 S.
- 1992 67 Ökosystemare Studien in einem inneralpinen Tal. Ergebnisse aus dem Projekt "Höhenprofil Zillertal".
Preis ÖS 180.— 152 S.
- 1992 68 Luzian, Roland: Lawinenereignisse und Witterungsablauf in Österreich. Winter 1987/88, 1988/89, 1989/90, 1990/91.
Preis ÖS 200.— 188 S.

- 1992 69 Holzschuh, Carolus: Neue Bockkäfer aus Asien III.
57 neue Bockkäfer aus Asien, vorwiegend aus China, Thailand und Vietnam
(Coleoptera, Cerambycidae).
Preis ÖS 120.— 63 S.
- 1992 70 Ökosystemare Studien im Kalkalpin. Erste Ergebnisse aus dem Projekt
"Höhenprofile Achenkirch".
Preis ÖS 100.— 103 S.
- 1992 71 Österreichisches Waldschaden-Beobachtungssystem. Beiträge zum WBS-Se-
minar vom 23. April 1992.
Preis ÖS 115.— 111 S.
- 1992 72 Voshmgir, D. (Bearb.). Das Schrifttum der Forstlichen Bundesversuchsan-
stalt. Teil IV: 1974 bis 1990.
Preis ÖS 80.— 115 S.
- 1993 73 Müller, F. Auswahl und waldbauliche Behandlung von Gen-Erhaltungswäl-
dern.
Preis ÖS 25.- 24 S.
- 1993 74 Lawinenbericht 1991/92. Dokumentation und Fachbeiträge.
Preis ÖS 80.- 110 S
- 1993 75 Holzschuh, C. Neue Bockkäfer aus Europa und Asien IV.
60 neue Bockkäfer aus Asien, vorwiegend aus China und Thailand (Coleop-
tera:Cerambycidae).
Preis ÖS 100.- 63 S.
- 1994 77 Kaiser, A. Projekt "Höhenprofil Zillertal"
Analyse der vertikalen Temperatur- und Windstruktur und ihr Einfluß auf
die Immissionskonzentrationen
Preis ÖS 80.- 95 S.
- 1994 78 Herman, Friedl; Smidt, Stefan: Ökosystemare Studien im Kalkalpin. Höhen-
profil Achenkirch. Ergebnisse aus dem Bereich Phyllosphäre
Preis ÖS 120.- 134 S.

