

LUFTCHEMISCHE MESSUNGEN AM SONNBLICK: DER ÖSTERREICHISCHE BEITRAG ZUM GLOBAL ATMOSPHERE WATCH PROGRAMM DER WMO

August Kaiser, Rita Nemeth, ZAMG Wien

1. Einleitung

Global Atmosphere Watch (GAW) ist ein Programm der World Meteorological Organization (WMO) mit dem Ziel, langfristig meteorologische und umweltrelevante Parameter an „Hintergrundmeßstellen“ fern ab von anthropogenen Emissionsquellen zu messen. Die Messungen sollen der Überwachung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und als „Frühwarnsystem“ (frühe Erkennung von Veränderungen) dienen.

Auch an Hintergrundstationen sind umweltrelevante Messungen jedoch nicht völlig frei von unerwünschten Einflüssen, sie bedürfen daher einer Interpretation: In Mace Head, Irland, als Beispiel für eine Küstenstation, werden Trajektorien benutzt, um die Herkunft der Luftmassen (vom Atlantik oder vom Europäischen Kontinent) zu klassifizieren (Derwent et al., 1998). An Gebirgsstationen werden vielfach Luftmassen, die von der Grundsicht beeinflusst sind, unterschieden von solchen, die repräsentativ für die freie Troposphäre sind; als Kriterien werden Trajektorien, Windrichtung (Hangab- oder Hangaufwind), Luftfeuchte, Lage von Inversionen oder Tracersubstanzen verwendet (Mauna Loa: Ridley et al., 1992, Carroll et al., 1992). Schmitt et al., 1988, benutzen die Streuung der luftchemischen Parameter als Maß für ihre Repräsentanz für die Station Izana, Teneriffa.

Wesentlich komplexer als an den genannten Stationen an Küsten oder auf Inseln sind die Verhältnisse im Alpenraum inmitten eines dicht besiedelten und emissionsreichen Kontinents und beeinflusst von einer Vielzahl meteorologischer Prozesse, die belastete Luft zu den Stationen führen können. Die Wetterdienste und Umweltbundesämter (bzw. die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt) aus Deutschland, Österreich und der Schweiz haben daher eine Zusammenarbeit initiiert, in der für die Stationen Zugspitze/Hohenpeißenberg (2963 m bzw. 986 m), Sonnblick (3106 m) und Jungfraujoch (3580 m) gemeinsam Methoden für die „Datenfilterung“ erarbeitet werden (GAW-DACH Kooperation). Diese Zusammenarbeit baut direkt auf Ergebnissen von ALPTRAC auf, wo ebenfalls Schadstofftransporte in die Alpen untersucht wurden (z.B. Tschewenka et al., 1998, Seibert et al., 1998, Pichlmayer et al., 1998). Im ersten Projektabschnitt wurden von den jeweiligen Stationsbetreibern zunächst stationsspezifische Filter entwickelt. Anhand von Episodenstudien wird im Folgenden ein Überblick über die Schadstoffbelastung am Sonnblick gegeben, und erste Entwürfe der „Datenfilterung“ werden kurz vorgestellt (genauere Informationen dazu finden sich in Kaiser et al., 1999 und Fricke et al., 2000). Das Hauptinteresse dieser Arbeit gilt den statistischen Trajektorienanalysen.

Am österreichischen GAW Programm sind das Umweltbundesamt (Ozon, Stickoxide, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid), das Institut für Analytische Chemie der TU Wien (Niederschlagschemie), das Institut für Meteorologie und Physik der Universität für Bodenkultur (Gesamtozon und UV-B) und die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (meteorologische Messungen und wissenschaftliche Auswertung) beteiligt. Ausgewertet wurde die Periode von 1. Jänner 1993 bis 30. April 1998. Kohlenmonoxid- und -dioxidmessungen liegen ab Mai 1996, Stickstoffmonoxid- und Stickstoffdioxidmessungen nur für den Zeitraum von November 1993 bis April 1996 vor.

Die Stickoxidmessungen am Sonnblick zeigen einen starken Einfluß photochemischer Prozesse: Tagsüber wird bei Einstrahlung Stickstoffdioxid zu Stickstoffmonoxid (und einem Sauerstoffatom) aufgespalten, wodurch die Stickstoffmonoxidkonzentration tagsüber steigt, während die Stickstoffdioxidkonzentration zurückgeht. Die photochemischen Prozesse sind hier aber nicht von Interesse. Im Folgenden wird daher die Stickoxidkonzentration als Ganzes (NO_x), also die Summe von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, betrachtet.

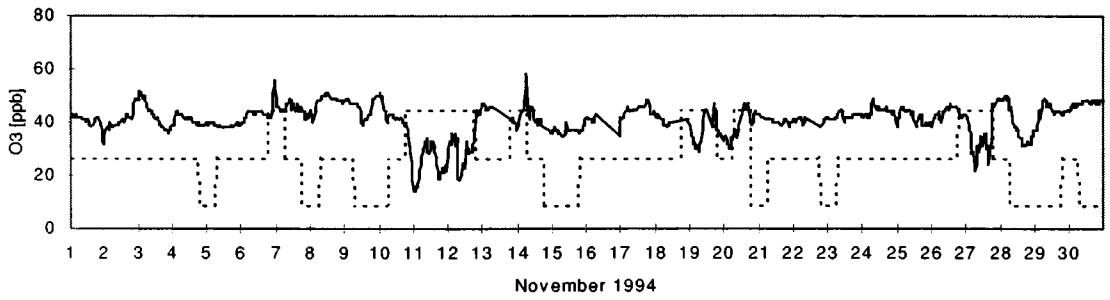
2. Synoptisch bedingte Vertikaltransporte

2.1 Synoptisch bedingte Hebungen - Transporte aus der Grundsicht

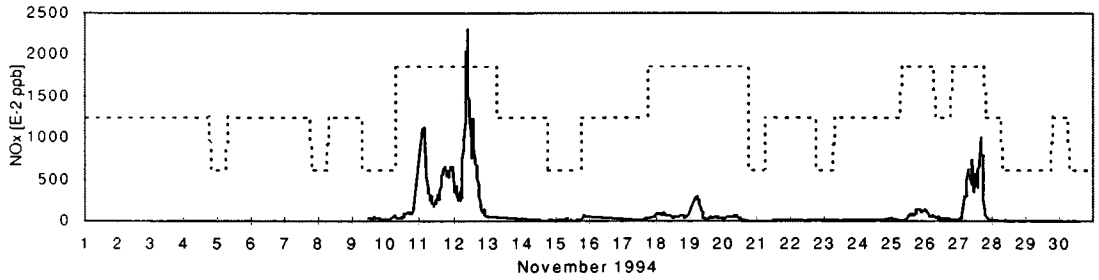
Abbildung 1 enthält einige ausgewählte Meßreihen für November 1994: Dieser Monat zeigt drei Episoden mit stark erhöhten Stickoxidkonzentrationen: 10.-12., 17.-20. und 25.-27. November. Gleichzeitig geht die Ozonkonzentration markant zurück. Zu allen drei Episoden herrscht Schlechtwetter: Niederschlag, Nebel (Luftfeuchte nahe 100%, vgl. dazu Kasper et al., 1998), Nord- und Nordostwind (vgl. dazu Schöner, 1995, Kaiser, 1996, und Pichlmayer, 1998). Es gibt aber umgekehrt auch Fälle mit den typischen Wettererscheinungen, an denen keine Episode beobachtet wird (hier z.B. Niederschlag am 7., 14. und 16. November; auch der Nordostwind hält nach der Episode vom 27. November noch bis Monatsende an, die Stickoxidkonzentration ist dann jedoch sehr klein). Auffallend am Ozon ist zudem, daß nach einer Episode mit sehr niedrigen Konzentrationen häufig abrupt eine Episode mit recht hohen Werten folgt: Das Ende von Schlechtwetterphasen ist häufig mit Absinkvorgängen verbunden.

Eine genaue Analyse der Episode von 10.-12. November ist in Kaiser et al. (1999) enthalten: Ihr ging eine lang andauernde Hochdruckphase mit stabiler Schichtung voraus (seit Anfang November). In der stabil geschichteten Grundsicht konnten sich offensichtlich mehrere Tage hindurch Schadstoffe anreichern, während gleichzeitig Ozon abgebaut wurde. Zum 11. November hin drehte die Strömung auf Nordost, am 12. erreichte eine Kaltfront aus Nordost die Alpen; beides bewirkte, daß Luft aus der sehr schadstoffreichen, aber ozonarmen Grundsicht über den Sonnblick gehoben wurde. Die Ursache dieser Episode ist also die großräumige synoptische Strömung. Dreidimensionale Trajektorien konnten diesen Vorgang recht gut erfassen.

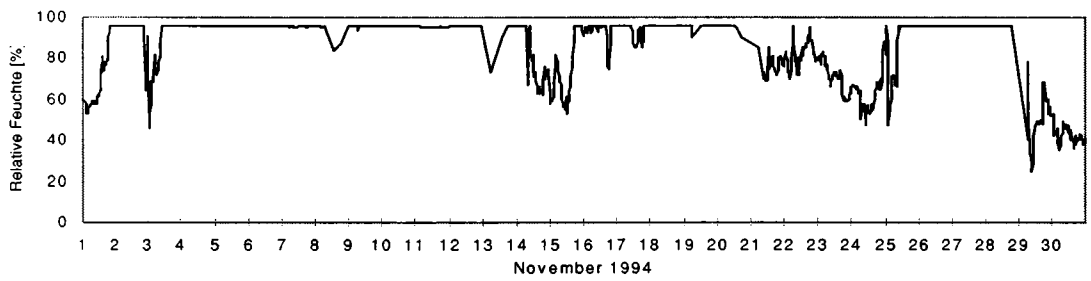
Transporte aus der Grundsicht sind während der kalten Jahreszeit ozonarm, weil dann Ozonabbau überwiegt; im Sommer können derartige Transporte aber auch ozonreich sein: Abbildung 2 enthält monatsweise durchschnittliche Korrelationskoeffizienten für Stickoxide bzw. Kohlenmonoxid mit Ozon. Während der Wintermonate sind die Korrelationen negativ, d.h. stickoxid- oder kohlenmonoxidreiche Luft ist meist ozonarm; im Sommer hingegen sind die durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten schwach positiv, stickoxid- und kohlenmonoxidreiche Luft ist dann meist auch ozonreich, offensichtlich eine Wirkung der photochemischen Ozonbildung.



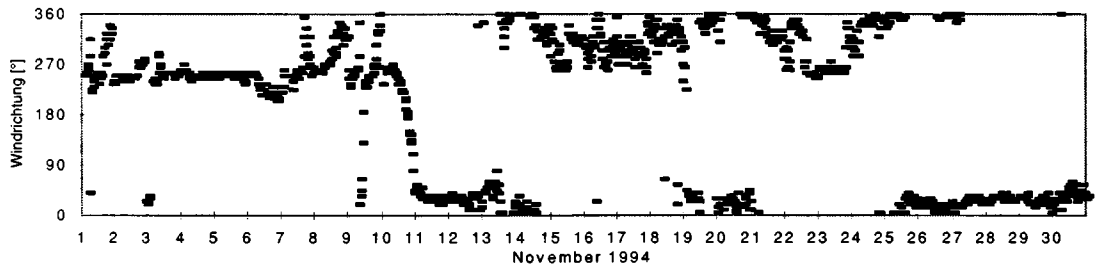
a) Ozon (ausgezogen) [ppb], Filter „ZAMG-Trajektorie“ (punktiert, 3 Stufen: Flags 0, 1 und 2, vgl. Kap. 4.1)



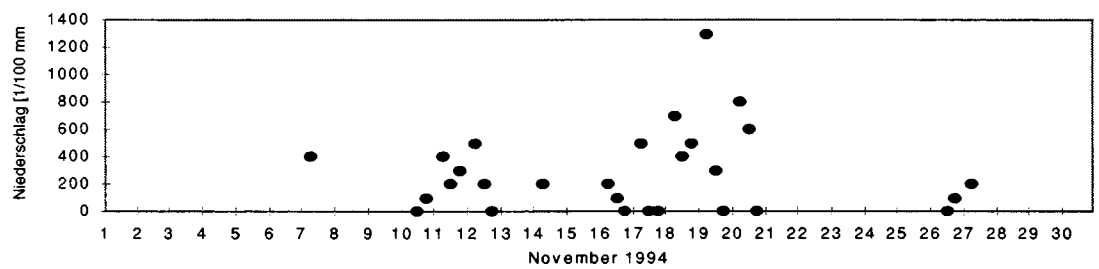
b) Stickoxide (ausgezogen) [10⁻² ppb], Filter „ZAMG-Trajektorie“ (punktiert, 3 Stufen)



c) Rel. Feuchte [%]



d) Windrichtung [°]



e) Niederschlag (6-stündige Summe) [1/100 mm]

Abbildung 1: Meßreihen November 1994

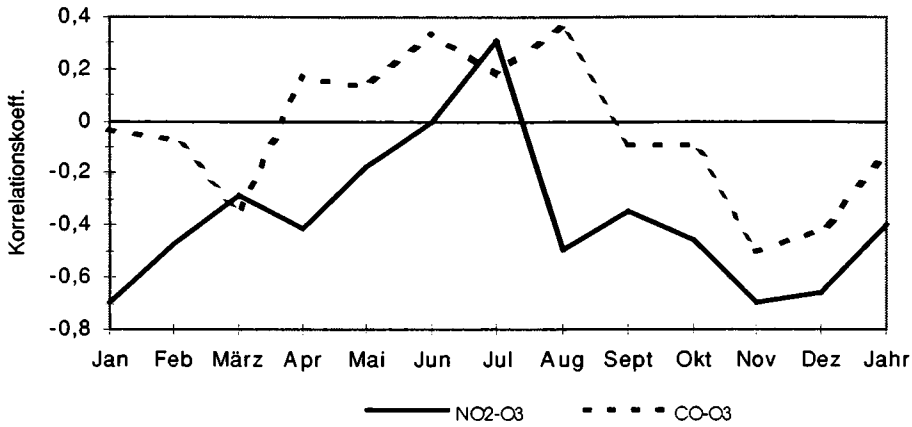


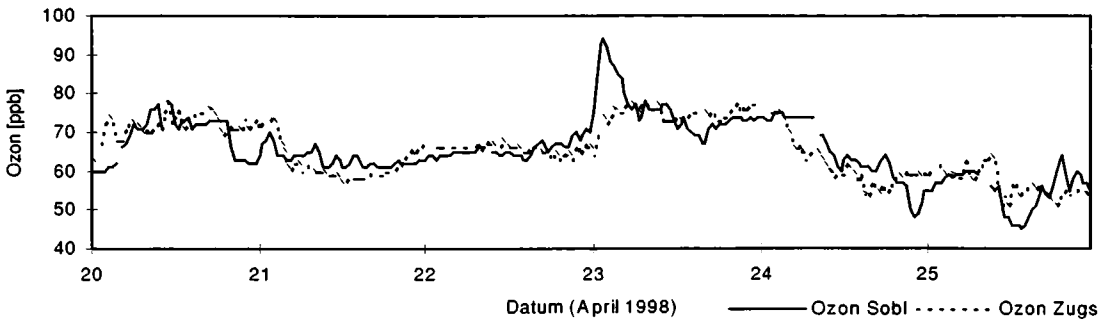
Abbildung 2: Korrelationskoeffizienten NO₂-O₃ und CO-O₃

2.2 Synoptisch bedingtes Absinken - stratosphärische Intrusionen

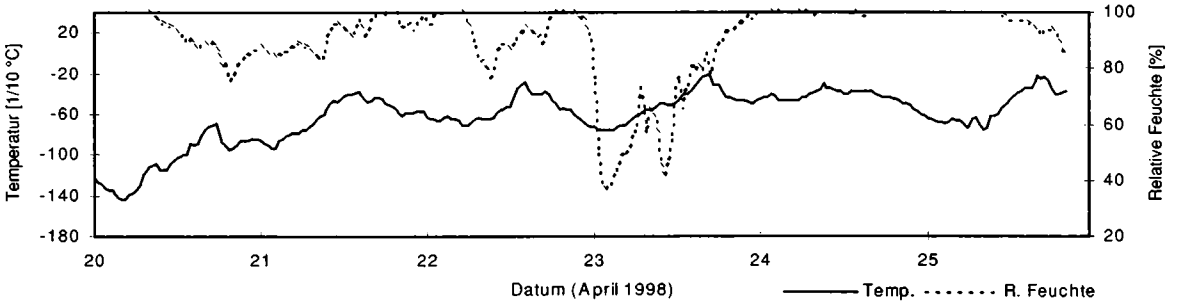
Abbildung 3 zeigt während der Nacht von 22. auf 23. April 1998 am Sonnblick eine Ozonspitze von mehr als 90 ppb; gleichzeitig gehen Relative Feuchte und Temperatur zurück, d.h. es muß eine andere, nämlich kältere und vor allem markant trockenere Luft herangeführt worden sein (in derselben Luftmasse muß die Relative Feuchte zunehmen, wenn die Temperatur sinkt!).

Abbildung 4 zeigt dreidimensionale 96-stündige Rückwärtstrajektorien, wie sie im Rahmen der DACH-Kooperation vom DWD für den Sonnblick berechnet werden (basierend auf dem Europamodell des DWD, Fay et al., 1995). Dargestellt ist die 700 hPa-Trajektorie (einem Luftdruck von 700 hPa entspricht im Mittel eine Höhe von rund 3000 m, also ungefähr die Höhe des Sonnblicks). Im Prognosemodell des DWD hat das Sonnblickgebiet eine Höhe von nur rund 2000 m. Vertikalbewegungen, die durch das Überströmen der Alpen erzwungen werden, werden von Trajektorien für die Höhe der Modellorographie besser erfaßt als von Trajektorien, die der tatsächlichen Orographie entsprechen (Fricke et al., 2000). Die Abbildung enthält daher auch eine Darstellung der „Stationstrajektorie“, die die Höhe des Sonnblicks im Rechenmodell repräsentiert.

Die Stationstrajektorie zeigt, daß erstens ein Transport aus der Grundschiicht auszuschließen ist (praktisch keine Vertikalbewegung, die Trajektorie hat keinen Bodenkontakt). Zweitens zeigt die 700 hPa-Trajektorie (allerdings etwas später, als es den Ozonmessungen entspricht) Absinken aus gut 9000 m Höhe. Ozonreiche Luft, die aus sehr großer Höhe zum Sonnblick absinkt, dürfte somit die Ursache für die Konzentrationsspitze sein. Sehr niedrige Grauwerte des Wasserdampf-Satellitenbilds und relativ hohe Werte der aus dem ECMWF-Modell berechneten Isentropen Potentiellen Vorticity bestätigen, daß die Ozonspitze durch Absinken stratosphärennaher Luft („stratosphärische Intrusion“) verursacht ist.



a) Ozon Sonnblick (ausgezogen) und Zugspitze (punktiert) [ppb]



b) Temperatur (ausgezogen) [1/10°C] und Relative Feuchte (punktiert) [%] Sonnblick

Abbildung 3: Meßreihen 20.-25. April 1998.

An der Zugspitze wird zwar ein Anstieg der Ozonkonzentration, aber keine ähnlich markante Spitze gemessen. Aus Stohl et al., 1999 (a), (b) und (c), und Steinbrecht et al., 1999, ist die kleinräumige, „filament-“, bzw. „laminartartige“ Struktur stratosphärischer Intrusionen bekannt. Tatsächlich zeigt das Wasserdampf-Satellitenbild ein kleinräumiges Feuchteband im Bereich westlich des Sonnblicks; die Zugspitze liegt in diesem Feuchteband und wird von der trockenen, absinkenden Luft nicht erreicht.

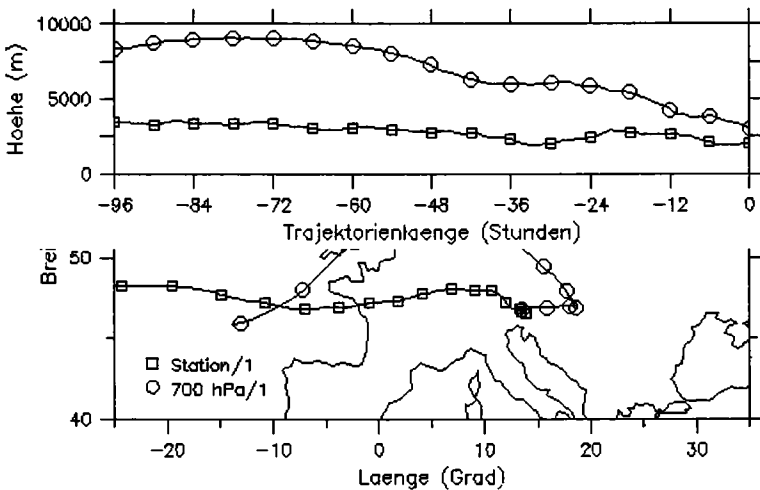


Abbildung 4:
Stations- und 700 hPa-
Trajektorie Sonnblick
(-96 Stunden rückwärts) für
23. April 1998, 12:00 UTC.

2.3 Statistik der synoptischen Transporte

Wie in den Abschnitten 2.1 und 2.2 gezeigt wurde, können synoptisch bedingte Transporte aus der Grundschicht, für Ozon zudem auch stratosphärische Intrusionen zu Episoden mit markant erhöhten Schadstoffkonzentrationen führen. Von besonderem Interesse ist nun die Frage, aus welchen Gebieten die belastete Luft kommt bzw. wo die für den Sonnblick relevanten Emissionsgebiete liegen.

Die folgenden Abbildungen enthalten Clusteranalysen (statistische Auswertungen) der für Sonnblick berechneten Stationstrajektorien (sie sind für eine Diskussion von Transporten aus der Grundschicht besser geeignet, als die 700 hPa-Trajektorien). Für die geografischen Darstellungen wurde ein Gitternetz von 1°gg. Breite und 1,5°gg. Länge gebildet und für jede Trajektorie die Zahl der Stunden ermittelt, mit der sich die Trajektorie in einem Gitterelement aufhält, danach die gesamte Stundensumme (für alle Trajektorien und Gitterelemente) gebildet und die Stunden für jedes Gitterelement relativ zur Gesamtstundensumme berechnet. Man erhält so ein Maß für die Häufigkeit, mit der die Strömung aus einem bestimmten Gebiet den Sonnblick erreicht. Diese Auswertung wurde in Abhängigkeit von der Höhe der am Sonnblick gemessenen Konzentration durchgeführt. Die Trajektorien liegen für jeweils 0:00 und 12:00 UTC Ankunft am Sonnblick vor. Für die folgenden Statistiken wurden daher aus den Immissionskonzentrationen 12-stündige Mittelwerte (6 Stunden vor bis 6 Stunden nach Ankunftsstermin) berechnet und davon Perzentile ermittelt.

2.3.1 Ozon

Abbildung 5 gibt ein Beispiel einer Clusteranalyse für Ozon. Für das Sommerhalbjahr fällt auf, daß niedrige Ozonkonzentrationen (kleiner oder gleich dem 25-Perzentil) recht häufig verbunden sind mit Strömungen aus West oder Nordwest; bei hohen Ozonkonzentrationen (größer oder gleich dem 75-Perzentil) hingegen kann die Strömung aus allen möglichen Richtungen kommen, die relativen Verweilzeiten bilden nahezu konzentrische Kreise um den Sonnblick. Konträr dazu das Bild im Winterhalbjahr: Hohe Konzentrationen vor allem bei Strömungen aus West, niedrige Konzentrationen vergleichsweise häufig auch bei Strömungen aus nördlichen und südlichen Richtungen. Strömungslagen aus West führen also im Sommer häufig zu niedrigen, im Winter eher zu hohen Ozonkonzentrationen; hohe Ozonkonzentrationen dürften daher im Winter im wesentlichen auf dynamische Prozesse zurückzuführen sein. Im Sommer dürften hohe Konzentrationen eher bei schwachen Strömungen, also hauptsächlich bei Hochdrucklagen auftreten, ein Hinweis für die Bedeutung der photochemischen Ozonbildung.

Die Unterschiede der Clusteranalysen für hohe und niedrige Konzentrationen treten besser hervor, wenn man die jeweiligen Verweilzeiten relativ zueinander betrachtet, etwa indem man die Verweilzeiten für niedrige Konzentration gleich 100% setzt und relativ dazu die Verweilzeiten für hohe Konzentration berechnet. Man erhält so die Aussage, um wieviel häufiger/seltener die Luft aus einem bestimmten Gebiet antransportiert wird, wenn die Konzentration hoch ist im Vergleich zu Situationen mit niedriger Konzentration. Eine derartige Auswertung ist für Ozon in Abbildung 6 dargestellt. Auch daraus ist ersichtlich, daß im Sommer Strömungen aus West und Nordwest meist relativ ozonarm sind. Dies ist eine Folge relativ geringer photochemischer Ozonproduktion, weil dann meist bewölktetes Wetter vorherrscht.

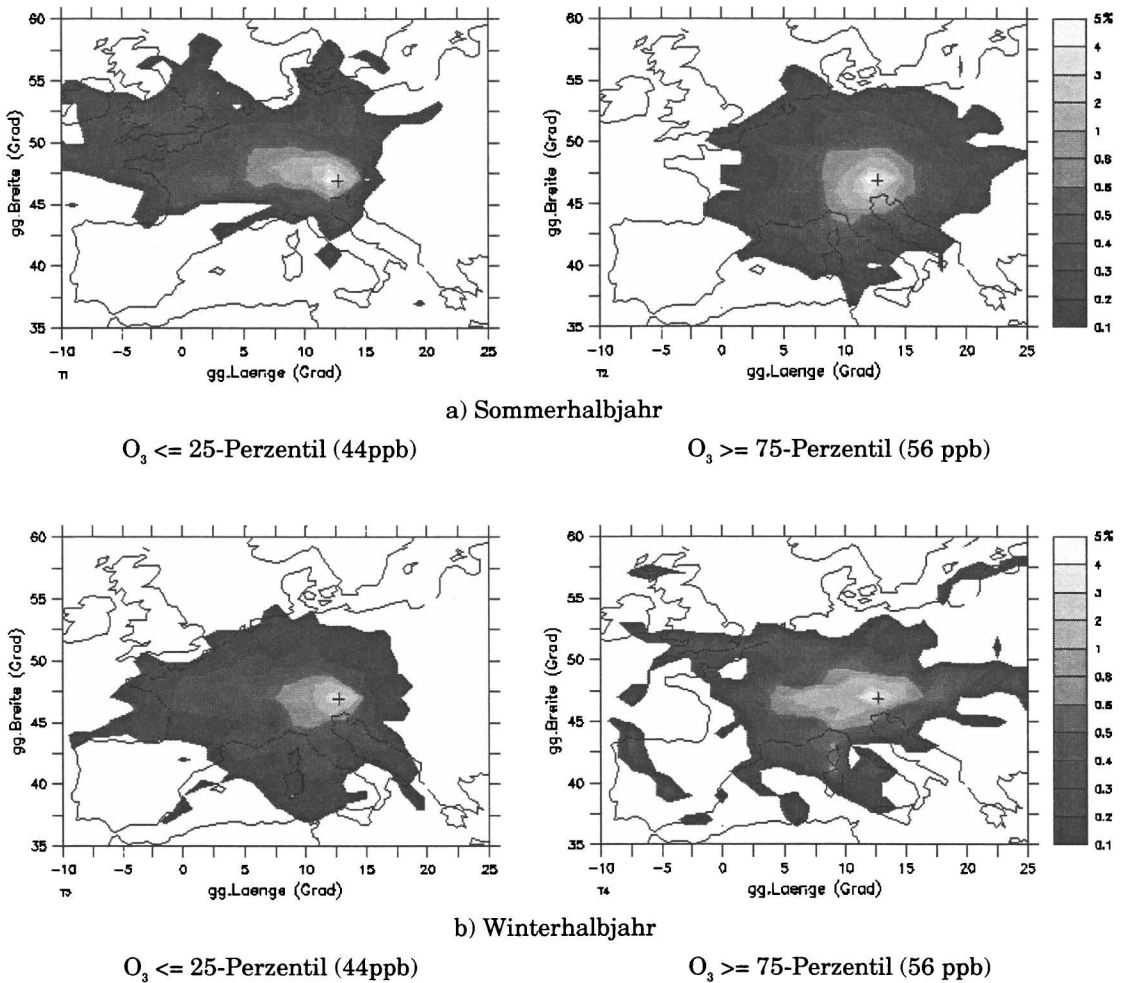


Abbildung 5: Relative Verweildauer (% der Stunden) der Trajektorien in Abhängigkeit von der Ozonkonzentration (Perzentile basierend auf 12-stündigen Mittelwerten) und der Jahreszeit. + bezeichnet die Lage des Sonnblicks.

Kröger et al. (1999) konnten zeigen, daß für den Sommer sehr wohl auch eine Ozonproduktion aus den Industriegebieten nördlich der Alpen nachweisbar ist, wenn man bei Strömungen aus Nordwest nur wolkenarme Situationen betrachtet. Im Durchschnitt überwiegen für alle West- und Nordwestlagen jedoch niedrige Ozonkonzentrationen. Deutlich ist aus Abbildung 6 der Beitrag der Po-Ebene an hohen Ozonkonzentrationen im Sommer ersichtlich: Bei hoher Ozonkonzentration kommt die Luft rund 8 mal häufiger aus der Po-Ebene als bei niedriger Ozonkonzentration.

Die entsprechenden Abbildungen für das Winterhalbjahr sind vergleichsweise schwer interpretierbar; offensichtlich dürfte die horizontale Advektion alleine eine eher untergeordnete Rolle spielen. Bemerkenswert erscheint, daß typische winterliche Episoden mit Transport ozonarmer Luft aus Nord hier nicht zu erkennen sind. Nun sind Strömungen aus Nordwest relativ häufig und nicht immer hat die Trajektorie dann Bodenkontakt. Zudem sind diese Episoden oft nur kurz und werden häufig recht abrupt von hohen Ozonspitzen gefolgt; möglicherweise ist der durch die Trajektorienterminale vorgegebene Zeitraum von 12 Stunden zu lange, sodaß derartige Situationen nicht erfaßt werden können.

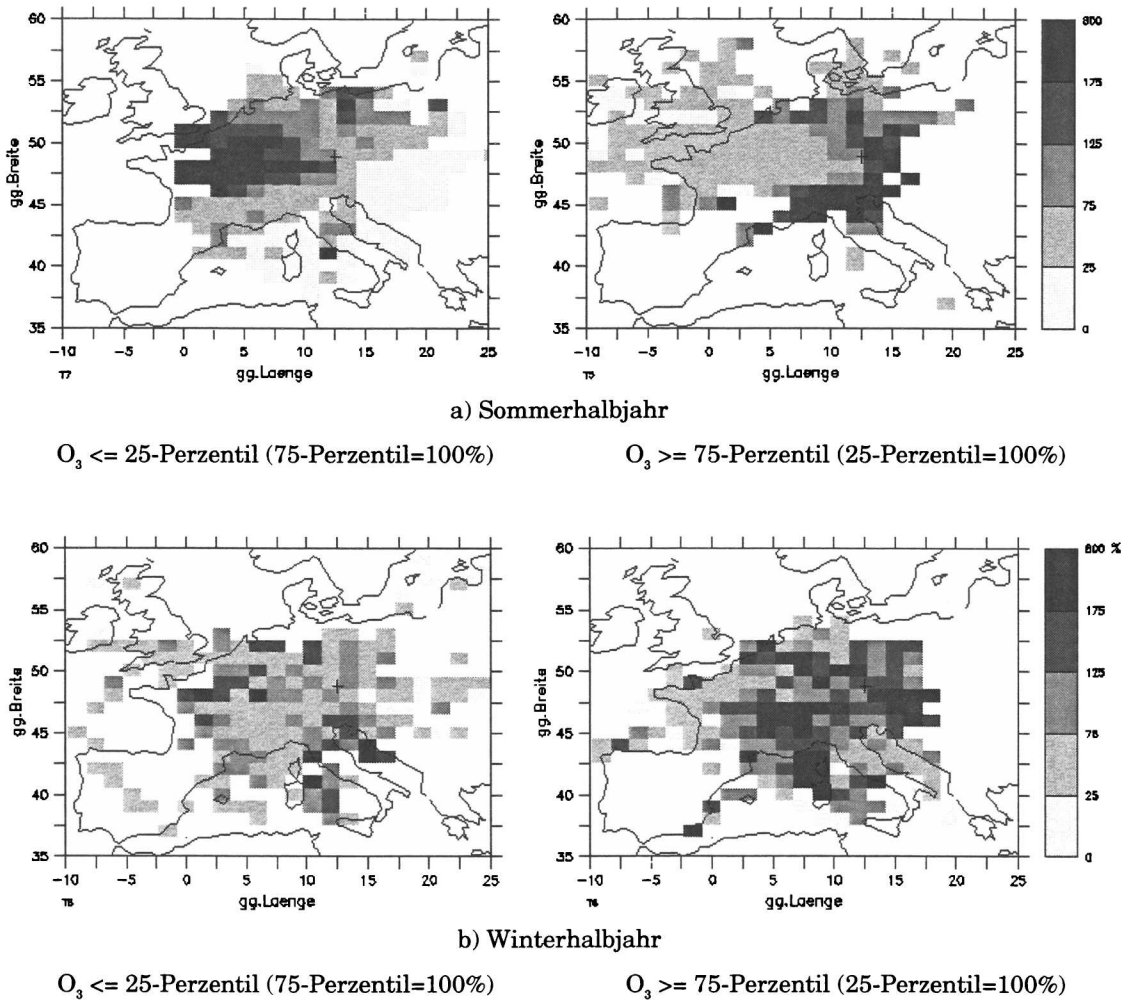


Abbildung 6: Relative Verweildauer (% der Stunden) für Situationen mit hohen Ozonkonzentration ($\geq 75\text{-Perzentil}$) bezogen auf Situationen mit niedrigen Ozonkonzentrationen ($\leq 25\text{-Perzentil}$) und umgekehrt in Abhängigkeit von der der Jahreszeit.

Zum Studium, aus welcher Höhe die Trajektorien (je nach Immissionskonzentration) kommen, wurden die Trajektorien zurückverfolgt und - Stunde für Stunde - die Häufigkeit, mit der sich die Trajektorien in bestimmten Höhenklassen (je 100 m) befinden, ermittelt. Die Ergebnisse für Ozon sind in Abbildung 7 dargestellt. Sie zeigen generell, daß bei niedriger Ozonkonzentration die Trajektorien besonders häufig aus unmittelbar bodennahen Schichten kommen. Die markantesten Unterschiede sind im Winterhalbjahr zu finden: Bei hohen Ozonkonzentrationen kommen die Trajektorien häufig aus relativ großer Höhe (die Stationstrajektorie ist für das Erfassen von Absinkvorgängen weniger gut geeignet - hier gilt das Hauptinteresse aber den Transporten aus der Grundsicht).

Zusammenfassend geben die Ergebnisse der Trajektorienanalysen folgendes Bild für Ozon: Im Sommerhalbjahr zeigt sich die Bedeutung der photochemischen Ozonproduktion, ozonreiche Luft kommt dann häufig aus dem Bereich der Po-Ebene. West- und Nordwestströmungen sind im Sommer eher ozonarm, da sie meist mit bewölktem Wetter verbunden sind. Im Winter sind hohe Ozonkonzentrationen im wesentlichen Folge der Dynamik der Atmosphäre: Strömungen aus West, vor allem Absinken aus größeren Höhen. Transporte aus unmittelbar bodennahen Luftschichten sind im allgemeinen eher ozonarm (vor allem im Winter).

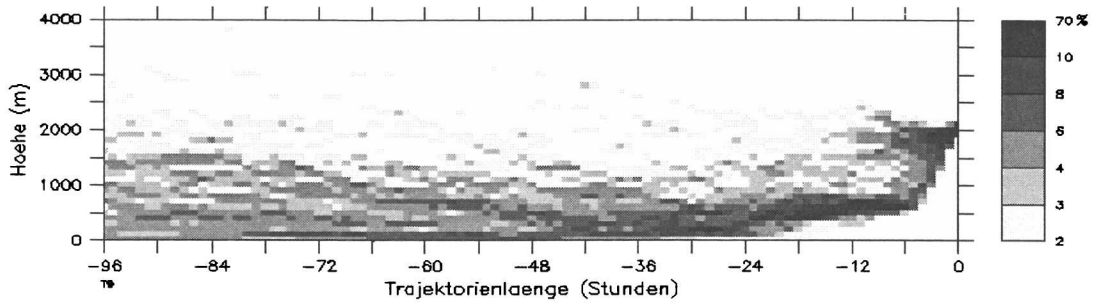
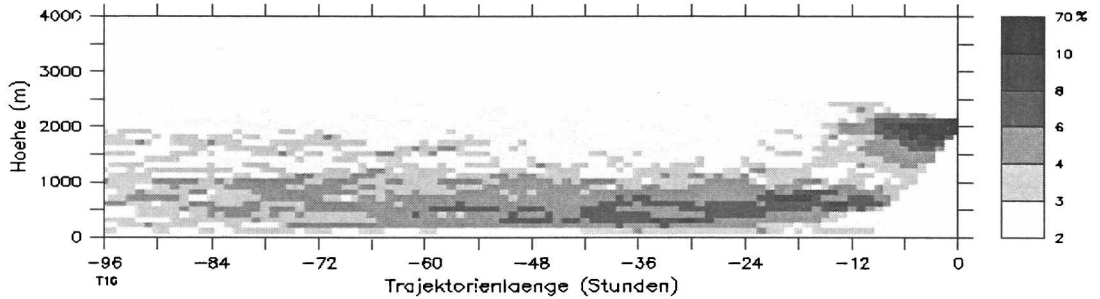
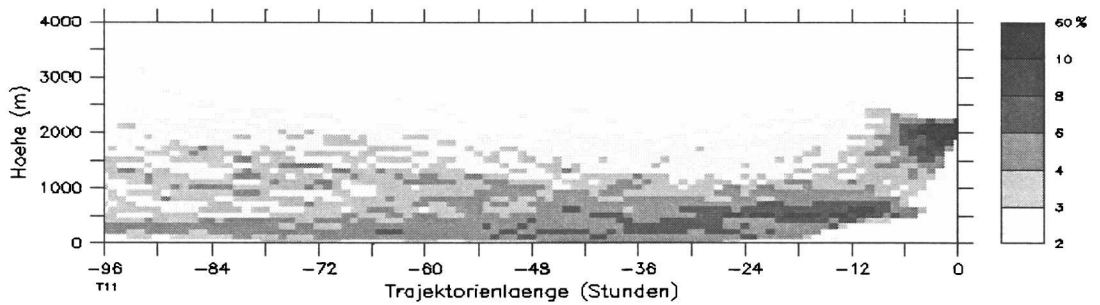
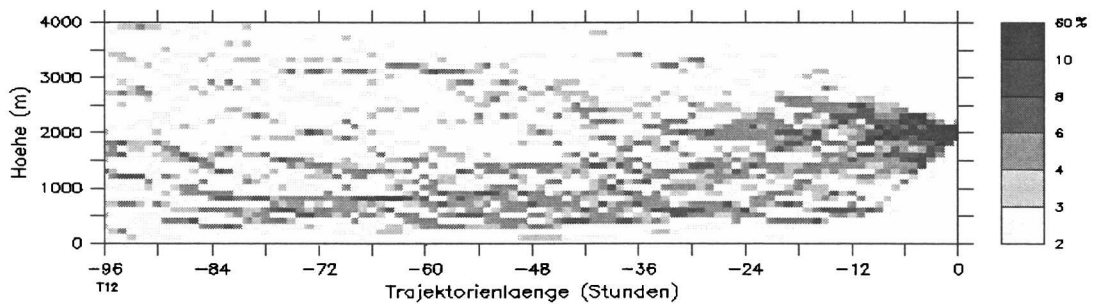
a) Sommerhalbjahr, $O_3 \leq$ 25-Perzentil (44 ppb)b) Sommerhalbjahr, $O_3 \geq$ 75-Perzentil (56 ppb)c) Winterhalbjahr, $O_3 \leq$ 25-Perzentil (44 ppb)d) Winterhalbjahr, $O_3 \geq$ 75-Perzentil (56 ppb)

Abbildung 7: Höhenverteilung der Trajektorien (% der Stunden) in Abhängigkeit von der Ozonkonzentration (Perzentile basierend auf 12-stündigen Mittelwerten) und der Jahreszeit.

2.3.2 Stickoxide

Wie den Abbildungen 8 und 9 entnommen werden kann, treten hohe Stickoxidkonzentrationen vor allem bei Strömungen aus nördlicher Richtung und bei Transport aus bodennahen Schichten auf: Bei hoher Konzentration kommt die Luft etwa 10mal häufiger aus dem Bereich nördlich der Alpen als bei niedriger Konzentration. Bei hoher Konzentration kommen die Trajektorien aus unmittelbar bodennahen Schichten, besonders eindrucksvoll im Sommerhalbjahr: Die Durchmischung ist im Sommer im allgemeinen besser als im Winter; damit stickoxidreiche Luft den Sonnblick dann überhaupt erreichen kann, muß die Luft offensichtlich über längere Zeit unmittelbar Bodenkontakt gehabt haben. Umgekehrt unterschreiten die Trajektorien bei niedriger Stickoxidkonzentration im Winter praktisch nie eine Höhe von 500 m.

Bemerkenswert erscheint, daß für das Observatorium Jungfraujoch auch Südströmungen (Föhn) zu stark erhöhten Stickoxidkonzentrationen führen können (Forrer et al., 1999). Für den Sonnblick konnten solche Situationen nicht gefunden werden. Möglicherweise treten Hebungen schadstoffreicher Luft aus Süd eher bevorzugt im westlichen Bereich der Alpen auf; möglicherweise ist auch die Lebensdauer der Stickoxide zu kurz oder die Durchmischung an den Gebirgen südlich vom Sonnblick zu stark, sodaß Stickoxide mit hoher Konzentration von Süden her den Sonnblick nicht mehr erreichen können (für Kohlenmonoxid, das eine deutlich längere Lebensdauer als Stickoxide hat, gibt es Hinweise für Transporte aus Süd, allerdings waren die Messungen wegen technischer Probleme leider recht unsicher).

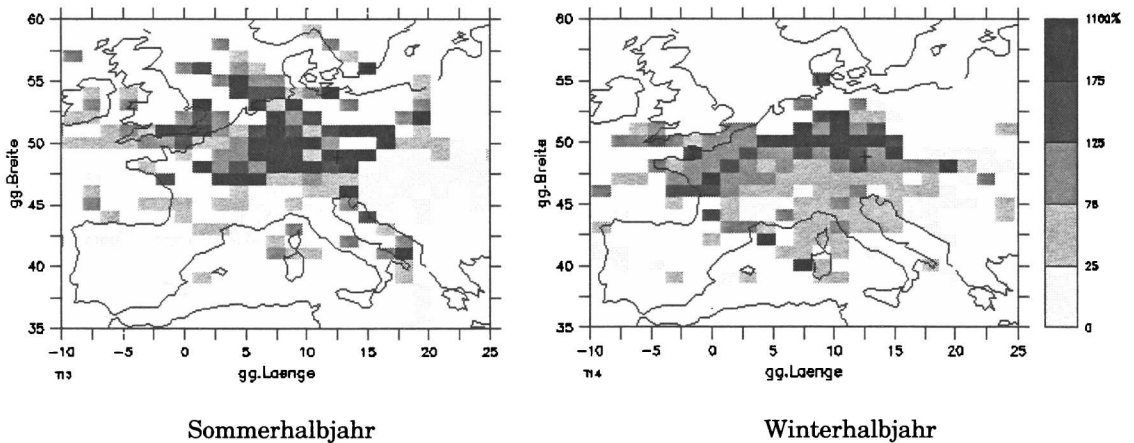


Abbildung 8: Relative Verweildauer (% der Stunden) für Situationen mit hohen Stickoxidkonzentration (≥ 75 -Perzentil, 460 ppt) bezogen auf Situationen mit niedrigen Stickoxidkonzentrationen (≤ 25 -Perzentil, 110 ppt) in Abhängigkeit von der Jahreszeit.

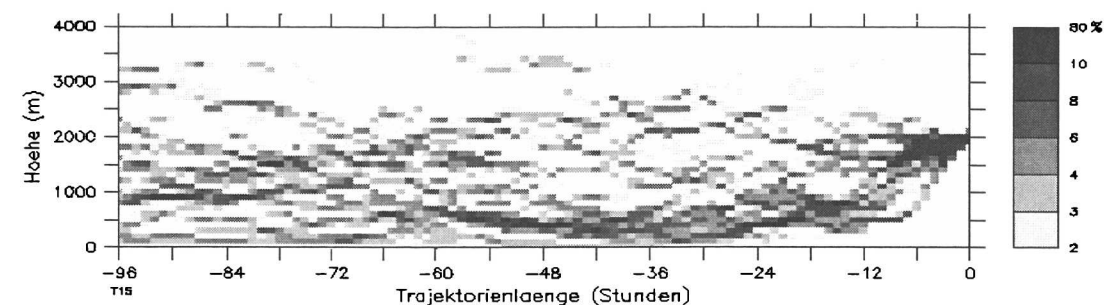
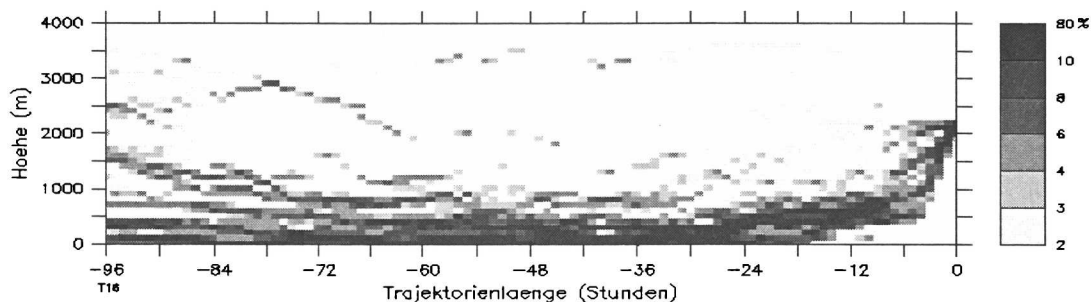
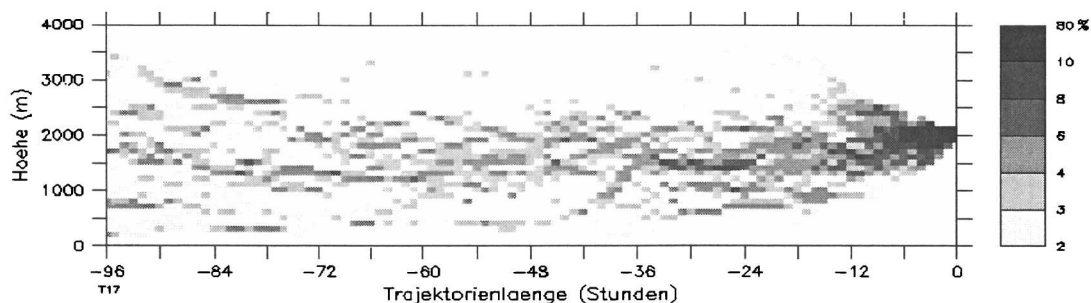
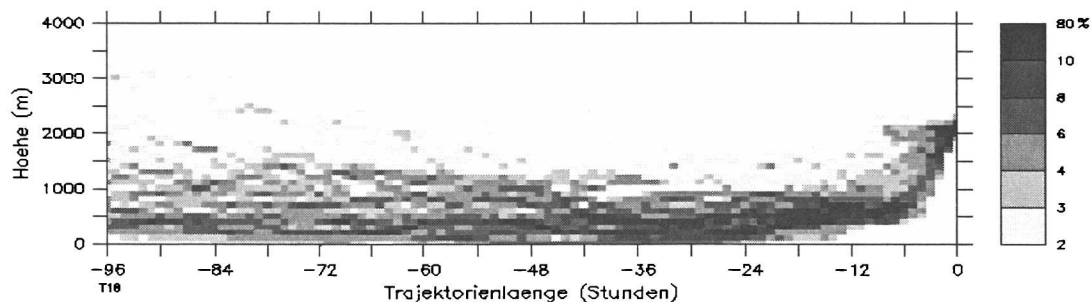
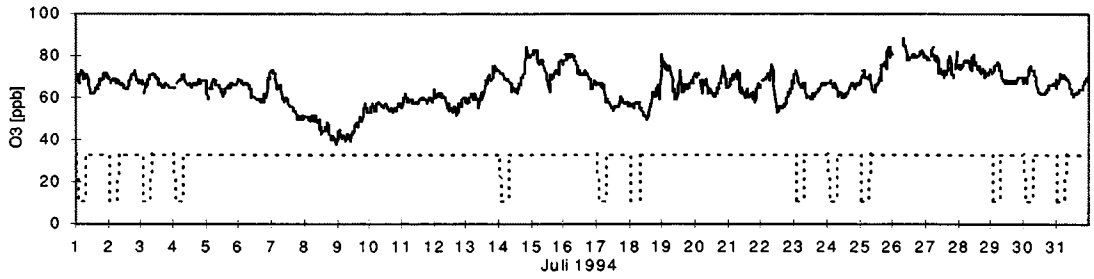
a) Sommerhalbjahr, $\text{NO}_x \leq 25$ -Perzentil (110 ppt)b) Sommerhalbjahr, $\text{NO}_x \geq 75$ -Perzentil (460 ppt)c) Winterhalbjahr, $\text{NO}_x \leq 25$ -Perzentil (110 ppt)d) Winterhalbjahr, $\text{NO}_x \geq 75$ -Perzentil (460 ppt)

Abbildung 9: Höhenverteilung der Trajektorien (% der Stunden) in Abhängigkeit von der Stickoxidkonzentration (Perzentile basierend auf 12-stündigen Mittelwerten) und der Jahreszeit.

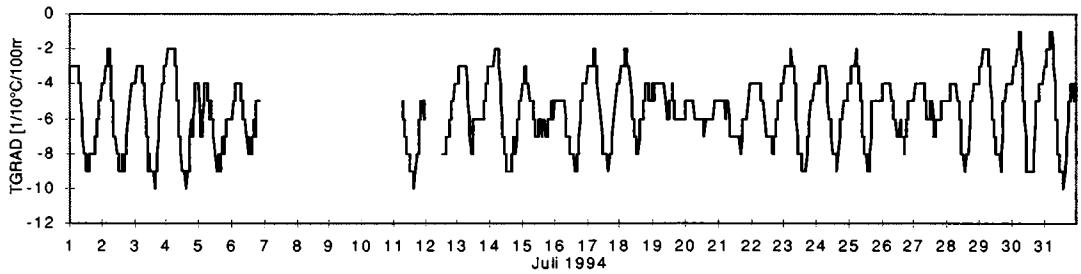
3. Thermisch bedingte Vertikaltransporte

Erwärmung der Luft in Bergtälern und an Berghängen infolge der Einstrahlung tagsüber ist Ursache für lokale Windsysteme (Taleinwind und Hangaufwind) und für thermische Konvektion. Thermisch bedingte Vertikaltransporte sind neben den synoptisch bedingten Hebungen ein weiterer Mechanismus, mit dem Schadstoffe zum Sonnblick

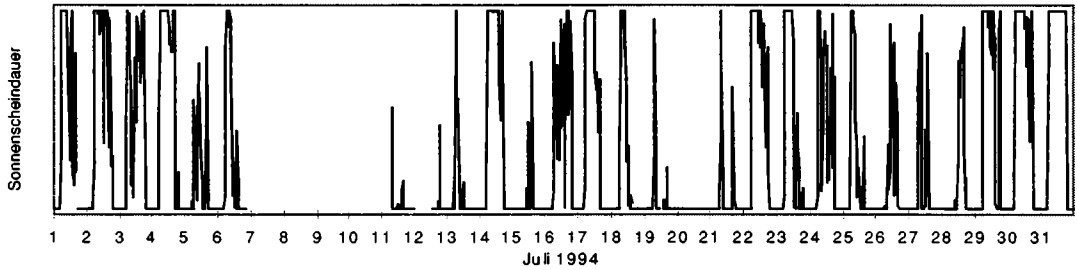
gelangen können. Sie sind an bestimmte Tageszeiten gebunden und verursachen daher tageszeitliche Änderungen der Schadstoffkonzentration (jedenfalls solange sie hauptsächlich im Nahbereich des Gebirges stattfinden).



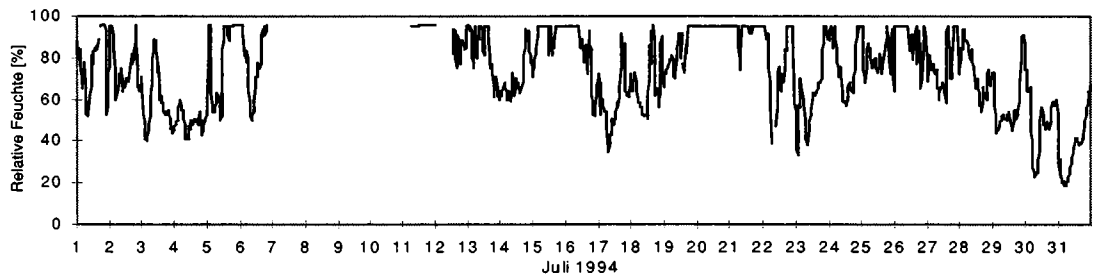
a) Ozon (ausgezogen) [ppb], Filter „ZAMG-Schönwetter“ (punktiert, 2 Stufen: Flags 0 und 1, vgl. Kap. 4.2)



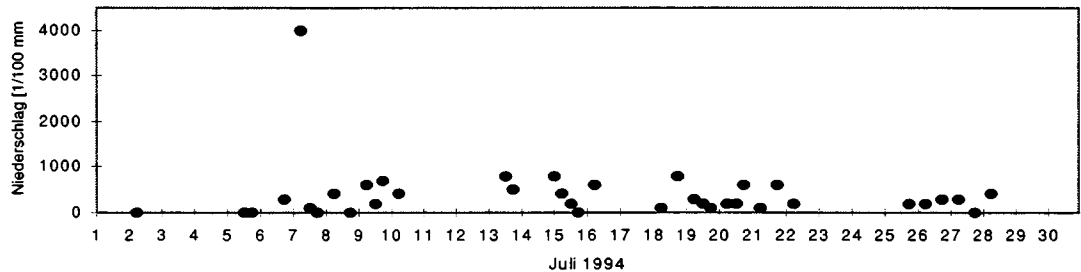
b) Vertikaler Temperaturgradient Sonnblick - Rauris [1/10 °C/100 m]



c) Sonnenscheindauer (Halbstundensumme) [min]



d) Relative Feuchte [%]



e) 6-stündige Niederschlagssumme [1/100 mm]

Abbildung 10: Meßreihen Juli 1994

Abbildung 10 zeigt - beispielhaft für Ozon - einige Perioden mit systematischen Tagesgängen, insbesondere während der ersten und letzten Tage im Juli 1994: Nachts sind die Konzentrationen dann um rund 10 ppb höher als tagsüber, d.h. es wird tagsüber ozonärmere Luft aus tieferen Schichten antransportiert. Teilweise sind den Tagesgängen Trends überlagert: Etwa um Monatsmitte, um den 23. und während der letzten Tage im Monat.

Die Phasen mit systematisch ausgeprägten Tagesgängen sind gekennzeichnet durch einen deutlichen Tagesgang im vertikalen Temperaturgradienten Sonnblick-Rauris: Morgens ist die Schichtung relativ stabil (infolge von geringer Bewölkung ungehinderte Ausstrahlung, daher starke Abkühlung), tagsüber wird eine nahezu trockenadiabatische Schichtung erreicht (als Folge starker Einstrahlung) - eine Temperaturschichtung, wie sie typisch für „thermisch aktive“ bzw. für „Schönwettertage“ ist. Die dann gut ausgebildete Thermik kann nachmittags zu Konvektionsbewölkung führen, vgl. dazu die Registrierung der Sonnenscheindauer, die an solchen Tagen nachmittags oft Abschattungen zeigt. Phasen mit geringen Ozontagesgängen oder mit unregelmäßigen Konzentrationsschwankungen sind hingegen gekennzeichnet durch kleine Tagesgänge im vertikalen Temperaturgradienten (besonders deutlich von 25. bis 28. Juli), meist Schlechtwetter (wenig Sonne, meist Nebel und Niederschläge) - leider liegen für die Schlechtwetterperiode von 7. bis 10. Juli keine Werte für Temperaturgradienten und Sonnenscheindauer vor (man beachte aber die Niederschlagsmessungen).

Tagesgänge der luftchemischen Parameter, verursacht durch thermisch bedingte Vertikaltransporte, werden am Sonnblick nur während der warmen Jahreszeit beobachtet; sie führen tagsüber im allgemeinen relativ ozonarme, aber stickoxid- und kohlenmonoxidreiche Luft zu den Hochgebirgsstationen; während der zweiten Nachthälfte bis in die frühen Morgenstunden werden hingegen Minima der Stickoxid- und Kohlenmonoxid- und Maxima der Ozonkonzentration gemessen (Forrer et al., 1999, Kaiser et al., 1999); während der kalten Jahreszeit werden keine Tagesgänge beobachtet, d.h. eventuelle thermische Hebungen erreichen dann die Höhe des Sonnblicks nicht (Kaiser et al., 1999).

4. Erste Vorschläge zur Datenfilterung

4.1 Filter „ZAMG-Trajektorie“: Identifikation von synoptisch bedingten Hebungen

Ziel der DACH-Kooperation im Rahmen des GAW Programms ist die Kennzeichnung der Repräsentativität der an den DACH-Stationen (Hohenpeißenberg, Zugspitze, Jungfraujoch und Sonnblick) gemessenen luftchemischen Parameter. Die für die Kriterien der Filter relevanten statistischen Analysen sind in Fricke et al. (2000) und auszugsweise in Kaiser et al. (1999) enthalten. An dieser Stelle werden nur kurz die für den Sonnblick entwickelten Filter und ihre Wirkungsweise vorgestellt.

Zur Identifikation von synoptisch bedingten Hebungen wird eine Filterung anhand der dreidimensionalen Trajektorien vorgeschlagen (Filter „ZAMG-Trajektorie“). Die Kriterien dieses Filters sind wie folgt:

Stationstrajektorie (über dem Kontinent) unterschreitet eine Höhe von 1500 m		
länger als 12 Stunden Trajektorie „bodennah“		höchstens 12 Stunden kein „Bodenkontakt“
Streuung des luftchem. Parameters +/- 6h vom Trajektorientermin:		-
> Grenzwert Flag = 2	</= Grenzwert Flag = 1	Flag = 0

Die Höhe der Stationstrajektorie wird solange untersucht, bis die Trajektorie den Kontinent verläßt, d.h. der Weg der Luft über dem Atlantik oder über dem Mittelmeer wird mangels relevanter Emissionsquellen nicht berücksichtigt. Die geografische Herkunft der Trajektorien (also die Ergebnisse aus Abschnitt 2.3) ist in der derzeitigen Fassung des Filters nicht berücksichtigt.

„Bodennahe“ Trajektorien können, müssen aber nicht zu Episoden am Sonnblick führen. Als Zusatzinformation wird daher die Streuung des jeweiligen luftchemischen Parameters im Zeitfenster 6 Stunden vor bis 6 Stunden nach Trajektorientermin untersucht (eine große Streuung ist ein Hinweis, daß Luft aus der Grundsicht den Sonnblick tatsächlich erreicht hat). Die Grenzwerte für die Streuung sind: CO: >30 ppb, O₃: >3 ppb, NO_x: Sommer: >3·10² ppb, sonst: >10·10² ppb. Sie wurden anhand von Korrelationen zwischen den Streuungen und den Konzentrationen festgesetzt.

Der Filter kann *rein meteorologisch* interpretiert werden: Als unbeeinflusst von der Grundsicht werden nur Daten mit Flag = 0, Daten mit Flag = 1 oder 2 werden als möglicherweise beeinflusst von der Grundsicht interpretiert; der Filter kann aber auch *schadstoffspezifisch* ausgewertet werden: Als unbeeinflusst von der Grundsicht werden Daten mit Flag = 0 oder 1 interpretiert, weil bei Flag = 1 der Einfluß der Grundsicht am luftchemischen Parameter nicht zu erkennen ist. Daten mit Flag = 2 sind jedenfalls von der Grundsicht beeinflusst. Entsprechend der vorgegebenen Trajektorientermin werden die Flags einem Zeitfenster von 6 Stunden vor bis 6 Stunden nach dem Trajektorientermin zugeordnet. Der Filter erfaßt synoptisch bedingte Hebungen; thermisch bedingte Hebungen (Tagesgänge) werden höchstens dann erfaßt, wenn die Trajektorie bodennah und die Streuung der Konzentration groß ist.

Die Häufigkeit von Flag = 0 liegt bei rund 23%, Flag = 1 - schadstoffspezifisch - bei ca. 38% bis 55% und Flag = 2 - ebenfalls schadstoffspezifisch - bei 12% bis 34%. In ca. 7% aller Fälle läßt sich der Filter nicht bestimmen (Ausfall der Trajektorien).

Eine Zeitreihe des Filters „ZAMG-Trajektorie“ ist in Abb. 1 als dreistufige Funktion eingetragen (unterste Stufe: Flag = 0, mittlere Stufe: Flag = 1, höchste Stufe: Flag = 2); daraus ist ersichtlich, daß die NO_x-Episoden recht gut erfaßt werden; Flag = 0 tritt relativ selten auf, die Konzentration ist dann klein. Infolge der starken Fluktuationen ist die Unschärfe des Filters bei Ozon relativ groß.

4.2 Filter „ZAMG-Schönwetter“: Identifikation von Situationen, an denen thermisch (und synoptisch) bedingte Hebungen unwahrscheinlich sind

Als Kriterium für thermisch bedingte Hebungen wird der Tagesgang des vertikalen Temperaturgradienten Sonnblick-Rauris (bzw. bei Ausfall: Mallnitz-Rauris) herangezogen (Filter „ZAMG-Schönwetter“): „Thermisch aktive“ Tage zeichnen sich durch einen relativ starken Tagesgang im vertikalen Temperaturgradienten aus (relativ stabile Schichtung der Talatmosphäre nachts und relativ labile Schichtung tagsüber). Entsprechend den durchschnittlichen Tagesgängen der luftchemischen Parameter an „Schönwettertagen“ (Fricke et al., 1999) wurde für solche Tage ein jahreszeitlich unterschiedlich definiertes Zeitfenster, zu dem thermische Hebungen nicht auftreten können (zweite Nachthälfte, im Winter ganztags), abgeleitet.

Weiters konnte gezeigt werden, daß an „Schönwettertagen“ synoptisch bedingte Vertikaltransporte äußerst unwahrscheinlich sind; vor allem im Herbst und Winter werden an „Schönwettertagen“ nur sehr kleine Stickoxidkonzentrationen gemessen (Fricke et al., 2000). Herbstliche und winterliche Schönwetterperioden zeichnen sich offensichtlich durch

eine gut ausgeprägte Trennung zwischen „verschmutzter“ Grundsicht und freier Troposphäre aus - ein Umstand, der jedem Bergsteiger vertraut ist, weiß er doch die gute Fernsicht herbstlicher und winterlicher Hochdrucklagen zu schätzen!

Die Kriterien für das Filter „ZAMG-Schönwetter“ sind wie folgt:

	Tagesbezogene Schwankungsbreite des vertikalen Temperaturgradienten	
	< 0,6°C/100 m „Schlechtwettertag“	>= 0,6°C/100 m „Schönwettertag“
Frühjahr, Sommer, Herbst	„Schlechtwettertag“: ganzer Tag, „Schönwettertag“: außerhalb Zeitfenster: Flag = 1	„Schönwettertag“: im Zeitfenster (Fr: 5-8 Uhr; So, He: 2-7 Uhr MEZ): Flag = 0
Winter	ganzer Tag: Flag = 1	ganzer Tag: Flag = 0

Die Interpretation der Flags ist analog zum Filter „ZAMG-Trajektorie“, d.h. Flag = 0: unbeeinflusst von der Grundsicht, Flag = 1: Einfluß von der Grundsicht nicht auszuschließen. Der Filter ZAMG-Schönwetter ist rein meteorologisch. Die Häufigkeit von Flag = 0 liegt bei 10,7%, jene von Flag = 1 bei 88,9%. In 0,4% der Fälle läßt sich der Filter nicht bestimmen, weil wegen Ausfall der Temperaturmessung der vertikale Temperaturgradient nicht berechnet werden konnte.

Eine Zeitreihe des Filters ZAMG-Schönwetter ist in Abb. 10 eingetragen; „Schönwettertage“ (erkennbar an Flag = 0 während der Morgen- und Flag = 1 während der Nachmittags- und Abendstunden) zeichnen sich alle durch gut erkennbare Tagesgänge aus, der Zeitraum mit relativ hoher Ozonkonzentration (kein Einfluß aus der Grundsicht) wird meist gut erfaßt. Andere Tage zeigen kaum Tagesgänge, oder die Tagesgänge sind „gestört“.

4.3 Anwendung der Filterung

Die Wirkung beider Filter auf die gesamten Meßreihen wird in Abb. 11 dargestellt. Sie enthält für die untersuchten luftchemischen Parameter monatsweise Median, 25- und 75-Perzentil, jeweils für alle Daten, für jene Daten, für die ein Einfluß aus der Grundsicht nicht ausgeschlossen (Flag = 1) oder sogar wahrscheinlich ist (Flag = 2) und für Daten, die frei von Einflüssen aus der Grundsicht sein sollten (Flag = 0). Im Grunde wäre ein Zusammenführen beider Filteransätze - also ein gleichzeitiges Erkennen synoptisch und thermisch bedingter Vertikaltransporte - sinnvoll. Infolge der doch noch recht kurzen CO- und NO_x-Meßreihen, häufiger Ausfälle und Problemen bei der CO-Messung erscheint ein Zusammenführen derzeit jedoch nicht sinnvoll. Daher wird die Wirkungsweise beider Filteransätze getrennt untersucht. Die unterschiedlichen Ansätze („ZAMG-Trajektorie“ identifiziert (synoptische) Transporte aus der Grundsicht, „ZAMG-Schönwetter“ identifiziert Situationen, an denen solche Transporte unwahrscheinlich sind) ermöglichen zudem eine gewisse gegenseitige Kontrolle.

Die Filterung zeigt für Stickoxide die besten Ergebnisse: Vor allem für die Wintermonate sind für Flag = 0 (unbeeinflusste Daten) die Werte für Median, 25- und 75-Perzentil vergleichsweise klein, auch die Spanne zwischen 25- und 75-Perzentil ist recht klein: die Konzentrationen sind relativ niedrig und streuen wenig. Bei Einfluß aus der Grundsicht (Flag = 2, nur für Filter „ZAMG-Trajektorie“) sind alle statistischen Kenngrößen zu markant höheren Konzentrationen hin verschoben. Die Werte für Flag = 1 (nur für „Filter

ZAMG-Schönwetter“) unterscheiden sich hingegen nur wenig von jenen für alle Daten, weil Filter „ZAMG-Schönwetter“ zwar Situationen, die wahrscheinlich unbeeinflusst sind, identifiziert, alles andere aber „in einen Topf wirft“. Infolge des allgemein niedrigen Konzentrationsniveaus gibt die Filterung für die Sommermonate nur relativ wenig aus.

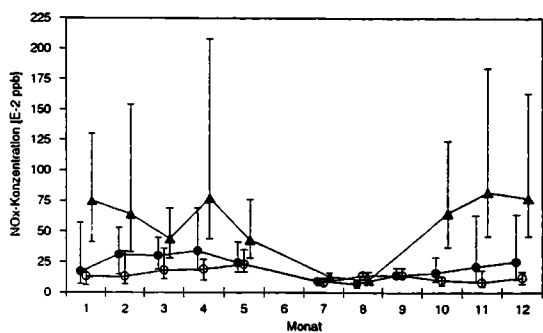
Weniger deutlich sind die Ergebnisse für CO: Dies liegt wahrscheinlich am vergleichsweise geringeren vertikalen Konzentrationsgradienten (als Folge der relativ langen Lebensdauer); auch Unsicherheiten bei den Messungen dürften sich hier auswirken.

Am wenigsten wirksam ist die Filterung erwartungsgemäß bei Ozon: Erstens können sich Transporte aus der Grundschicht unterschiedlich auswirken: Während der kalten Jahreszeit sind sie ozonarm, im Sommer können sie aber auch relativ ozonreich sein; in den Übergangsjahreszeiten, vor allem im Frühjahr, können beide „Typen“ auftreten. Zweitens können Absinkbewegungen z.T. markante Ozonspitzen verursachen (insbesondere stratosphärische Intrusionen). Folge sind ständige Fluktuationen in der Meßreihe (siehe dazu z.B. Stohl et al., 1999 (a), (b) und (c) und Steinbrecht et al., 1999). Ungenauigkeiten bei der Filterung, vor allem auch die Länge der Zeitfenster bewirken, daß solche Ozonspitzen oft noch mitgefiltert werden; übrig bleiben Situationen mit „durchschnittlichem“ Ozongehalt.

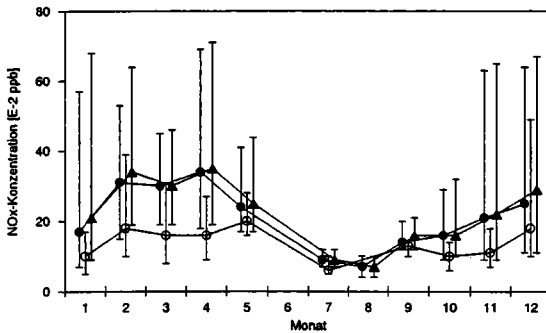
Für das Filter „ZAMG-Schönwetter“ ergibt sich weiters die Möglichkeit, anhand der Trajektorienstatistiken die Wirksamkeit des Filters zu überprüfen. Gemäß Abschnitt 2.3.2 können Stickoxide in hoher Konzentration den Sonnblick nur dann erreichen, wenn die Trajektorie zuvor Bodenkontakt hatte. Tatsächlich zeigen die Trajektorien für „Schönwetterflag“ = 1 (Transport aus der Grundschicht nicht ausgeschlossen) häufigen Bodenkontakt und für „Schönwetterflag“ = 0 (kein Transport aus der Grundschicht) kaum Vertikalbewegungen (wenn, dann höchstens Absinken), siehe Abbildung 12 (helle Grautöne weisen auf eine Verteilung der Trajektorien in allen Höhen hin).

Die meteorologischen Analysen der am Sonnblick gemessenen Immissionskonzentrationen haben gezeigt, daß - zumindest für Ozon und Stickoxide - Episoden mit starkem Einfluß aus der Grundschicht eng an bestimmte meteorologische Verhältnisse geknüpft sind; leider aber gilt die Umkehrung nicht: Die entsprechenden meteorologischen Verhältnisse können auch auftreten, ohne zu Episoden am Sonnblick zu führen. Dies führt zu einem Grundproblem der Filterung: Werden die Kriterien sehr streng gewählt, hat das zur Folge, daß eine große Zahl offensichtlich von der Grundschicht nicht beeinflusster Daten als beeinflusst gekennzeichnet wird; umgekehrt, bei weniger strengen Kriterien, werden eventuelle Transporte nicht erkannt. Dennoch liefert die Filterung der luftchemischen Meßreihen am Sonnblick erstaunlich plausible Ergebnisse. Insbesondere ist bemerkenswert, daß trotz dieser Unsicherheiten beide Filter für Flag = 0 (d.h. kein Einfluß aus der Grundschicht) zu doch recht ähnlichen Ergebnissen führen (Abbildung 11: bitte die für beide Filter unterschiedliche Skalierung bei den Stickoxiden beachten).

Es erscheint daher durchaus sinnvoll, die Datenfilterung weiter zu verfeinern, mit den in Rahmen der DACH Kooperation in der Schweiz und in Deutschland entwickelten Methoden zu vergleichen und zu objektivieren. Dies soll im Rahmen eines weiteren Projekts durchgeführt werden. In dieses Projekt sollen auch Gebirgsstationen aus Italien (Plateau Rosa und Monte Cimone) und aus Slowenien (Mt. Krvavec) mit einbezogen werden. Ziel dieser Arbeiten ist, für den gesamten Alpenraum vergleichbare Methoden der Datenfilterung anzuwenden und mit den gefilterten Meßreihen eventuelle Trends, sowohl in den großräumig repräsentativen Daten („globaler Hintergrund“), als auch in den von der Grundschicht beeinflussten Daten zu ermitteln und mit entsprechenden Emissionskatastern zu vergleichen.

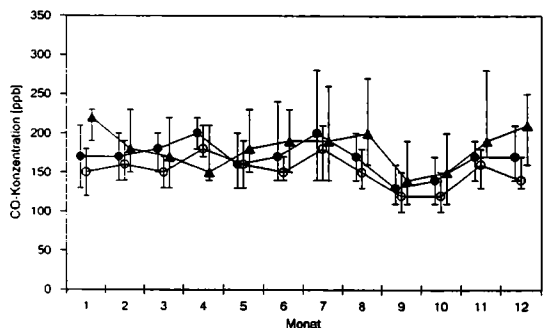


Filter ZAMG-Trajektorie

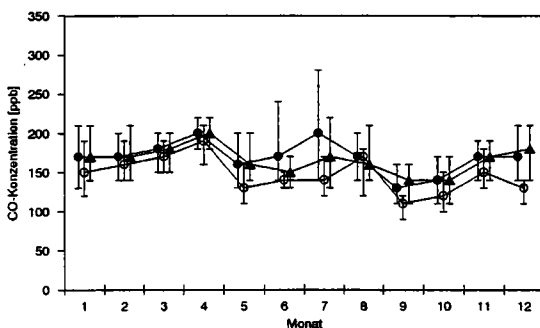


Filter ZAMG-Schönwetter

a) Stickoxide

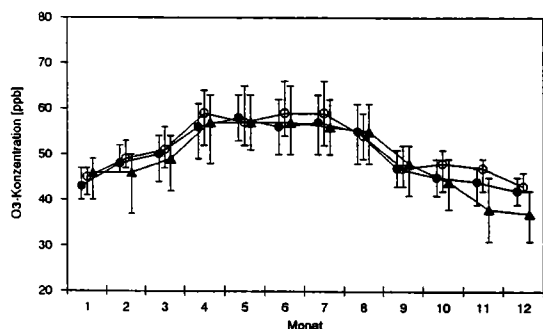


Filter ZAMG-Trajektorie

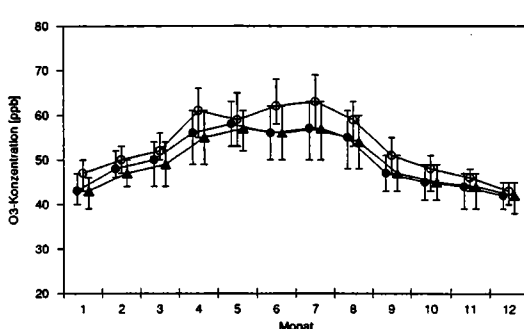


Filter ZAMG-Schönwetter

b) Kohlenmonoxid



Filter ZAMG-Trajektorie



Filter ZAMG-Schönwetter

c) Ozon

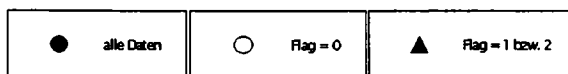
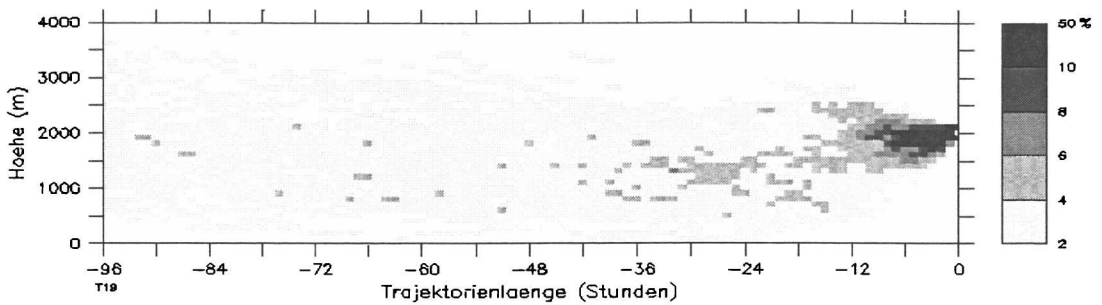
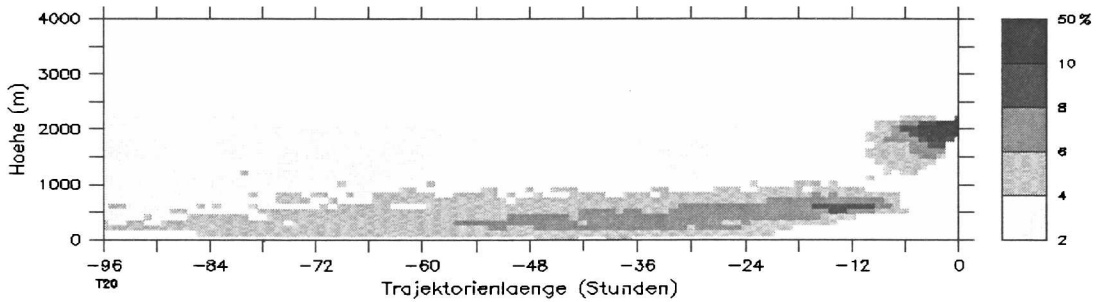


Abbildung 11: Median, 25- und 75-Perzentil der luftchemischen Parameter am Sonnblick, ungefilterte und gefilterte Meßreihen. Flag = 0: unbeeinflusst von der Grundsicht, Flag = 1 (nur für Filter ZAMG-Schönwetter): Einfluß aus Grundsicht nicht ausgeschlossen, Flag = 2 (nur für Filter ZAMG-Trajektorie): Einfluß aus Grundsicht an Meßwerten erkennbar.



a) „Schönwetterfilter“ = 0 (d.h. kein Einfluß aus der Grundschicht)



b) „Schönwetterfilter“ = 1 (d.h. Einfluß aus der Grundschicht ist möglich)

Abb. 12: Höhenverteilung der Trajektorien in Abhängigkeit vom „Schönwetterfilter“.

5. Literatur

- CARROLL, M. A., B. A. RIDLEY, D. D. MONTZKA, G. HUBLER, J. G. WALEGA, R. B. NORTON, B. J. HUEBERT, F. E. GRAHEK (1992): Measurements of Nitric Oxide and Nitrogen Dioxide During the Mauna Loa Observatory Photochemistry Experiment. *J. Geoph. Res.*, Vol. 97, 10,361-10,374.
- DERWENT, R. G., P. G. SIMMONDS, S. SEURING, C. DIMMER (1998): Observation and interpretation of the seasonal cycles in the surface concentrations of ozone and carbon monoxide at Mace Head, Ireland, from 1990 to 1994. *Atm. Env.*, Vol. 32, No.2, 145-157.
- FAY, B., H. GLAAB, I. JACOBSEN, R. SCHRODIN (1995): Evaluation of Eulerian and Lagrangian atmospheric transport models at the Deutscher Wetterdienst using ANATEX surface tracer data. *Atm. Env.*, Vol. 18, 2485-2497.
- FORRER, J., P. HOFER, D. SCHNEITER (1999): Variabilität von Spurengasen an der hochalpinen Station Jungfraujoch. Bericht über den Sonnblick Workshop „Umweltforschung im Hochgebirge - Ergebnisse von GAW-DACH und verwandten Projekten“. *Österr. Beiträge zu Met. u. Geoph.*, Heft 21, 125-134.
- FRICKE, W., A. FISCHER, J. FORRER, S. GILGE, P. HOFER, P. JEANNET, A. KAISER, K. KENNDORFF, R. NEMETH, L. RIES, P. WINKLER (2000): GAW-DACH-Projekt. Abschlußbericht im Auftrag der Lenkungsgruppe und Materialienband. DWD, in Druck.
- KAISER, A. (1996): Die meteorologischen Verhältnisse im Achantal und ihre Auswirkungen auf die gemessenen Immissionskonzentrationen. *Ökosystemare Studien im Kalkalpin*. FBVA-Berichte, Heft 94, 23-46.
- KAISER, A., R. NEMETH (1999): Die GAW-DACH Kooperation: Bisherige Ergebnisse für den Sonnblick. Bericht über den Sonnblick Workshop „Umweltforschung im Hochgebirge - Ergebnisse von GAW-DACH und verwandten Projekten“. *Österr. Beiträge zu Met. u. Geoph.*, Heft 21, 113-123.

- KASPER, A., H. PUXBAUM (1998): Seasonal variations of SO₂, HNO₃, NH₃ and selected aerosol components at Sonnblick (3106 m a.s.l.). *Atm. Env.*, Vol. 32, 3925-3939.
- KRÖGER, H., G. WOTAWA, H. KROMP-KOLB (1999): Ozontransport zu den Alpen - Ergebnisse von Trajektorienanalysen und Modellstudien. Bericht über den Sonnblick Workshop „Umweltforschung im Hochgebirge - Ergebnisse von GAW-DACH und verwandten Projekten“. *Österr. Beiträge zu Met. u. Geoph.*, Heft 21, 100-105.
- PICHLMAYER, F., W. SCHÖNER, P. SEIBERT, D. WAGENBACH (1998): Stable isotope analysis for characterization of pollutants at high elevated alpine sites. *Atm. Env.*, Vol. 32, 4075-4087.
- RIDLEY, B. A., E. ROBINSON (1992): The Mauna Loa Observatory Photochemistry Experiment. *J. Geoph. Res.*, Vol. 97, 10,285-10,290.
- SCHMITT, R., B. SCHREIBER, B. LEVIN (1988): Effects of long-range transport on atmospheric trace constituents at the baseline station Tenerife (Canary Islands). *J. Atm. Chem.* 7, 335-351.
- SCHÖNER, W. (1995): Schadstoffdeposition in einer hochalpinen winterlichen Schneedecke am Beispiel von Wurtenkees und Goldbergkees (Hohe Tauern). *Diss. Uni Salzburg*.
- SEIBERT, P., H. KROMP-KOLB, A. KASPER, M. KALINA, H. PUXBAUM, D. T. JOST, M. SCHWIKOWSKI, U. BALTENSPERGER (1998): Transport of polluted boundary layer air from the Po valley to high alpine sites. *Atm. Env.*, Vol. 32, 3953-3967.
- STEINBRECHT, W., U. KÖHLER, H. CLAUDE, H. DIER, W. ADAM, A. HAUCHECORNE, B. HEESE (1999): Extreme Schichtung im Ozonprofil. *Ozonbulletin des DWD*, Nr. 61.
- STOHL, A., N. SPICHTINGER-RAKOWSKY, P. BONASONI, H. FELDMANN, M. MEMMESHEIMER, H. E. SCHEEL, T. TRICKL, S. HÜBNER (1999a): The influence of stratospheric intrusions on alpine ozone concentrations: 1. Case studies and model validation. In prep. for *Atm. Env.*
- STOHL, A., N. SPICHTINGER-RAKOWSKY, P. BONASONI, H. FELDMANN, M. MEMMESHEIMER, H. E. SCHEEL, T. TRICKL, S. HÜBNER (1999b): The influence of stratospheric intrusions on alpine ozone concentrations: 2. Climatology from observations and from model calculations. In prep. for *Atm. Env.*
- STOHL, A., T. TRICKL (1999c): A textbook example of ozone transports related to a stratospheric intrusion. In prep. for *Weather*.
- TSCHERWENKA, W., A. KASPER, P. SEIBERT, H. PUXBAUM (1998): On-line measurements of sulfur dioxide at the 3 km level over Central Europe (Sonnblick Observatory, Austria) and statistical trajectory source analysis. *Atm. Env.*, Vol. 32, 3941-3952.

Kontaktadresse:

Dr. August Kaiser

Mag. Rita Nemeth

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Hohe Warte 38

A-1190 Wien