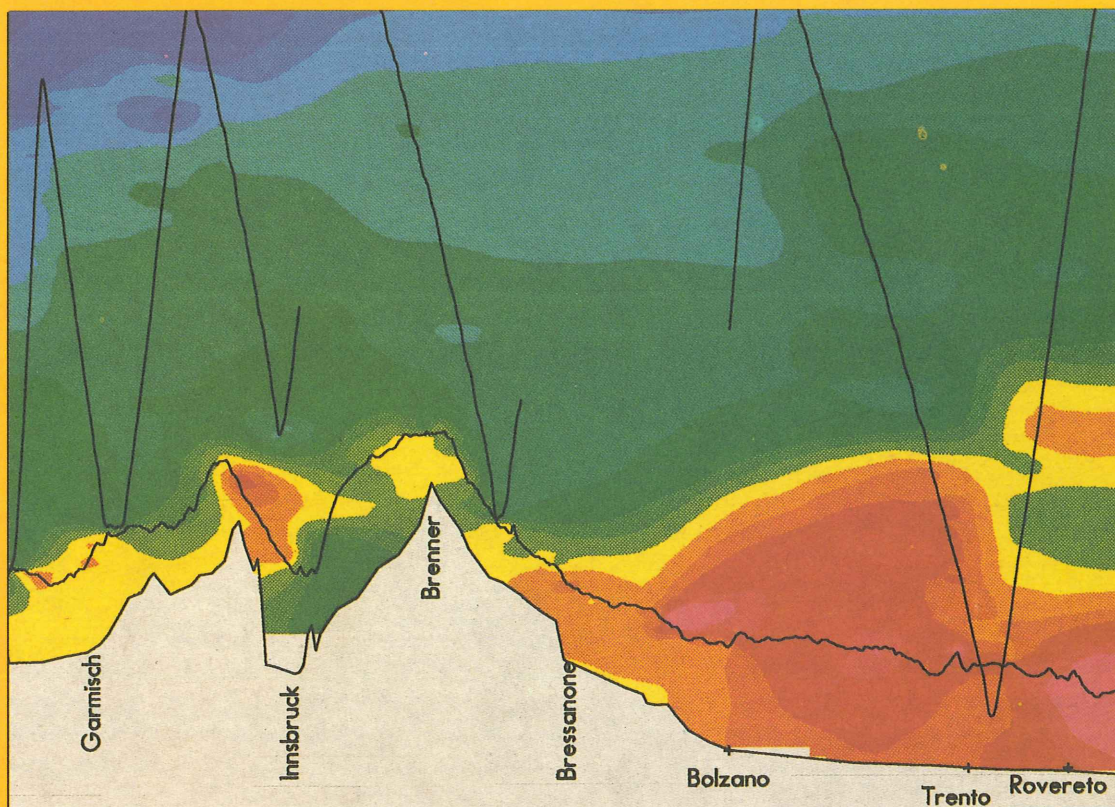


Projekt / Progetto

MEMOSA

Messungen und Modellierung
des Schadstoffverhaltens im Alpenbereich



**Rilevamento e Simulazione del Comportamento
di Sostanze Inquinanti Aeriformi in Ambiente Alpino**

Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen,
Amt der Tiroler Landesregierung,
Autonome Provinz Bozen-Südtirol/Provincia Autonoma di Bolzano – Alto Adige,
Provincia Autonoma di Trento



Vorwort

Die Alpen als zentral gelegenes und größtes Gebirge Europas bilden einen komplexen und gegenüber Umweltbelastungen aller Art besonders empfindlichen Naturraum von herausragender Bedeutung. Die Untersuchung möglicher Umweltbelastungen und deren Wechselwirkungen ist deshalb gerade hier wichtig.

Die Belastung der Alpen durch Luftschadstoffe galt bislang als eher unbedeutend. Auch heute ist die Luftverschmutzung der Alpen durch klassische Schadstoffe, wie etwa Schwefeldioxid oder Staub, trotz vielfältig gestiegener Nutzungsansprüche großräumig sehr gering. Wie überall zeigt sich jedoch auch in den Alpen, daß Luftverschmutzung und Luftchemie in komplexer Weise zusammenhängen. Vor allem die Bildung von sekundären Luftschadstoffen wie insbesondere von Photooxidantien spielt hierbei eine wichtige Rolle. Es besteht mittlerweile kein Zweifel mehr, daß die troposphärischen Ozonkonzentrationen seit mehreren Jahren zunehmen – und dies auch in Gebieten mit relativ geringer Vorbelastung durch klassische Luftschadstoffe.

Im Rahmen des Gemeinschaftsprojekts „**Messung und Modellierung des Schadstoffverhaltens im Alpenbereich (MEMOSA)**“ haben deshalb das Bundesland Tirol, die Autonomen Provinzen Bozen und Trient sowie der Freistaat Bayern in den Jahren 1990 bis 1992 die lufthygienische Belastung der Alpen durch verschiedene Schadstoffe detailliert untersucht. Hierbei sollte insbesondere geklärt werden, in welchem Umfang die lufthygienische Belastung der Alpen durch gasförmige Schadstoffe wie Ozon, Stickstoffoxide und Kohlenwasserstoffe verursacht wird, deren Quellen sich in den Alpen befinden, bzw. durch Schadstoffe, die von außerhalb in die Alpen hineingetragen werden, wie diese Schadstoffe transportiert und verteilt werden und welche photochemischen Reaktionen aus der lufthygienischen Belastung resultieren. Die Untersuchungen wurden vom Institut für Physik der Atmosphäre der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt und umfaßten Flugzeugmessungen, Modellrechnungen und die Auswertung ergänzender Messungen an Boden- bzw. Bergstationen bei jeweils sommerlicher Witterung.

Premessa

Le Alpi, nella loro caratterizzazione di maggiore catena montuosa europea, situata in posizione centrale nel vecchio continente, formano un ambiente naturale di eccezionale rilevanza, complesso e particolarmente sensibile nei confronti degli inquinamenti ambientali di ogni tipo. La ricerca sui possibili tipi di inquinamento e sui loro reciproci effetti assume qui, perciò, particolare rilievo.

L'inquinamento dell'aria sulle Alpi era ritenuto finora tutto sommato insignificante. Anche tutt'ora, l'inquinamento atmosferico in ambiente alpino da parte di agenti inquinanti classici, come per esempio il biossido di zolfo o le polveri, nonostante le molteplici ed accresciute esigenze, è in fondo limitato. Come ovunque, tuttavia, anche nelle Alpi risulta evidente che l'inquinamento atmosferico e la chimica dell'atmosfera dipendono l'uno dall'altra all'interno di un rapporto complesso. Soprattutto la formazione di agenti inquinanti secondari, in particolare i fotoossidanti, gioca un ruolo importante in tale ambito. Ormai non c'è più dubbio che le concentrazioni di ozono troposferico sono in aumento da diversi anni e questo anche in regioni con minimi livelli di inquinamento da agenti inquinanti atmosferici classici.

Nell'ambito del comune progetto „**Rilevamento e simulazione del comportamento di sostanze inquinanti aeriformi in ambiente alpino (MEMOSA)**“, la Regione Tirolo, le Province Autonome di Bolzano e di Trento ed il Libero Stato di Baviera hanno perciò esaminato dettagliatamente, nel periodo 1990–1992, l'inquinamento dell'aria nelle Alpi. In particolare, si è trattato di chiarire in quale misura il carico inquinante dell'aria in ambiente Alpino fosse da attribuire a sostanze tossiche gassose, quali l'ozono, gli ossidi di azoto o gli idrocarburi di origine locale o piuttosto al trasporto di agenti inquinanti da regioni limitrofe, ovvero come tali sostanze siano trasportate e si distribuiscono e quali reazioni fotochimiche risultino dall'inquinamento dell'aria. Le ricerche sono state effettuate dall'Istituto per la Fisica dell'Atmosfera del Centro Tedesco di Ricerche Atmosferiche e Spaziali (DLR) e hanno compreso misurazioni aeree, simulazioni su modelli e la valutazione

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die lufthygienische Belastung der Alpen in bedeutendem Umfang „hausgemacht“ ist und daß hierfür insbesondere der Kraftfahrzeugverkehr verantwortlich ist. Für den Schadstofftransport innerhalb der Alpen sind aufgrund der ausgeprägten Orographie gerade bei Hochdruckwetterlagen lokale, kleinräumige Windsysteme von Bedeutung, die besonders in den Südalpen wegen der dort stärkeren Sonneneinstrahlung deutlich ausgeprägt sind. Die Ozonbildung wird maßgeblich vom Konzentrationsniveau der Stickstoffoxide und der flüchtigen Kohlenwasserstoffe sowie deren Verhältnis zueinander beeinflusst. Der Verringerung dieser Primärschadstoffe kommt daher bei der künftigen Luftreinhaltestrategie besondere Bedeutung zu.

di misurazioni aggiuntive realizzate in stazioni al suolo situate nei fondivalle e in alta montagna, in condizioni di tempo estive.

Le ricerche hanno dimostrato che il carico delle sostanze inquinanti nella regione alpina è in larga misura di origine locale, e che, in particolare, ne è responsabile il traffico veicolare. In merito al trasporto delle sostanze inquinanti verso le Alpi, particolare rilievo riveste, in situazione di alta pressione ed in considerazione delle caratteristiche orografiche, il sistema locale dei venti, particolarmente accentuati nel settore meridionale alpino a causa della maggiore insolazione. La formazione dell'ozono viene notevolmente influenzata dal livello di concentrazione degli ossidi di azoto e degli idrocarburi in forma volatile, così come dal loro rapporto reciproco. La riduzione di tali agenti inquinanti primari assume dunque particolare importanza nella futura strategia del mantenimento della qualità dell'aria.

Einleitung

Während die Schwefeldioxidbelastung in den letzten 10–15 Jahren in Westeuropa deutlich reduziert werden konnte, ist für den gleichen Zeitraum eine Zunahme der Konzentration der Stickoxide (NO_x) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) zu verzeichnen. Diese primären Schadgase können bei starker Sonneneinstrahlung und austauscharmen Wetterlagen Photo-smog bilden, der meist im Abwindbereich von städtischen und industriellen Ballungsgebieten beobachtet wird. Die wichtigste Komponente unter den photochemisch gebildeten Oxidantien ist das Ozon, das bei hohen Konzentrationen eine negative Wirkung auf die Vegetation und die Gesundheit des Menschen hat. Die Hauptquelle für die Smog-Vorläuferverbindungen (NO_x , VOC) ist der Kraftfahrzeugverkehr.

Für den Alpenraum ist dieses Problem von besonderer Bedeutung. Der europäische Transitverkehr in Nord-Süd Richtung führt überwiegend durch die großen Alpentäler. So überqueren derzeit etwa acht Millionen Fahrzeuge pro Jahr den Brennerpaß, etwa doppelt so viele Fahrzeuge wie noch vor 20 Jahren. Die Schadstoffemissionen entlang der Transitautobahnen verursachen im alpinen Raum besonders starke Belastungen aufgrund der speziellen klimatologischen Ausbreitungsbedingungen für Luftschadstoffe. Häufigere und stabilere Inversionslagen sowie Schwachwindzeiten in den Tälern gegenüber dem Flachland behindern eine Verdünnung der Emissionen. Bei Strahlungswetterlagen können thermisch bedingte, lokale Windsysteme zu einem kanalisiertem Schadstofftransport in den großen Alpentälern unter Einbeziehung des Vorlandes führen. Hangaufwinde können die bodennahen Schadstoffe schnell in die mittleren und hohen Hanglagen verfrachten, d. h. in Bereiche des Bergwaldes, der eine wichtige Schutzfunktion u. a. gegen Bodenerosion, Murenbildung und Schmelzhochwasser ausübt. Bei Starkwindlagen muß neben den Schadstoffquellen im Alpenraum selbst ein Ferntransport von Luftschadstoffen aus den Industrie- und Ballungszentren außerhalb der Alpen in Betracht gezogen werden.

In Bezug auf die photochemische Ozonbildung spielen neben den meteorologischen Faktoren (Lufttemperatur, solare Einstrahlung, Luftaustausch) auch luftchemische Aspekte eine Rolle. Das mittlere tägliche

Introduzione

Mentre negli ultimi 10–15 anni in Europa occidentale si è potuto ottenere un drastico calo dell'inquinamento da anidride solforosa, nello stesso periodo è stato registrato un aumento della concentrazione degli ossidi di azoto (NO_x) e dei composti organici volatili (VOC = Volatile Organic Compounds). In presenza di un'intensa radiazione solare e in condizioni meteorologiche di scarsa inversione termica questi gas inquinanti primari possono dare origine a smog fotochimico, osservabile perlopiù nel campo delle correnti provenienti dalle aree urbane ed industriali. Tra gli ossidanti di origine fotochimica il principale è l'ozono, che se presente in elevate concentrazioni produce effetti negativi sulla vegetazione e sulla salute dell'uomo. La principale fonte dei precursori dello smog (NO_x , VOC) è il traffico veicolare.

Questo problema riveste particolare rilevanza in ambiente alpino. Le linee di transito europeo in direzione nord – sud passano prevalentemente per le grandi vallate alpine. Attualmente, ad esempio, attraversano il valico del Brennero circa otto milioni di autoveicoli l'anno, corrispondente ad un numero approssimativamente doppio rispetto a quello di 20 anni fa. Le emissioni di sostanze inquinanti lungo le strade di transito sono causa, nel settore alpino, di inquinamento particolarmente grave, in virtù delle particolari condizioni climatiche che regolano la diffusione degli inquinanti aeriformi. La maggiore frequenza e stabilità delle inversioni termiche, come di periodi di scarsa ventilazione nelle vallate alpine rispetto alla pianura, contrastano la diluizione degli inquinanti emessi. In condizioni di maggiore radiazione solare, sistemi locali di vento per induzione termica possono dar luogo ad un trasporto canalizzato di sostanze inquinanti nelle grandi vallate alpine, con coinvolgimento delle zone prealpine. Le correnti ascendenti possono trasportare velocemente le sostanze inquinanti presenti nelle vicinanze del suolo fino a quote medie ed elevate, ovvero fino alle zone boschive montane, che esplicano un'importante funzione antierosiva del suolo e di tutela nei confronti di movimenti franosi e di fenomeni alluvionali. In condizioni di forti venti si deve considerare l'eventualità che nella regione alpina, oltre alle fonti locali di

Maximum der Ozonkonzentration hängt in komplexer Weise vom Niveau der NO_x - und VOC-Belastung ab. Das in der Atmosphäre auftretende NO_x/VOC -Verhältnis bestimmt, welcher der beiden Vorläuferschadstoffe die Ozonbildung maßgeblich steuert. Ist NO_x im Überschuß vorhanden, dann bestimmt die VOC-Konzentration entscheidend den Ozonaufbau, die Ozonbildung ist VOC-limitiert. In Gebieten mit geringen NO_x -Belastungen hängt die Ozonbildung hauptsächlich von der NO_x -Konzentration ab und praktisch nicht von der VOC-Konzentration. Der Übergang zwischen den beiden Regimen liegt im Alpenraum bei einem NO_x/VOC -Verhältnis von etwa 1:5. Für eine Strategie zur lokalen oder regionalen Verminderung des Ozongehalts durch Reduktion der Vorläuferschadstoffe ist demnach auch von Bedeutung, welches Regime im betreffenden Gebiet bei der Belastungssituation vorliegt.

Projekt MEMOSA

Das Ziel des Projektes bestand darin, Aussagen über die großräumige Verteilung und die Herkunft der Luftschadstoffe in ausgewählten Gebieten des Alpenraums zu gewinnen. Es sollten primär und sekundär gebildete Schadstoffe berücksichtigt werden. Vom Institut für Physik der Atmosphäre der DLR (Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt) in Oberpfaffenhofen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- **Flugzeugmessungen** der Schadgase NO , NO_2 , VOC, O_3 , H_2O_2 und SO_2 sowie der meteorologischen Größen im Bereich der bayerischen und südlichen Voralpen sowie über Tirol und Südtirol insbesondere bei Smog-Wetterlagen.

sostanze inquinanti, entri in gioco anche un trasporto a grande distanza di inquinanti atmosferici dai centri industriali e dagli insediamenti urbani limitrofi.

Alla formazione fotochimica di ozono, concorrono oltre a fattori meteorologici (temperatura dell'aria, radiazione solare, ricambio d'aria) anche aspetti di chimica dell'atmosfera. La media dei valori massimi giornalieri della concentrazione di ozono dipende, in maniera complessa, dal livello di inquinamento da NO_x e VOC. Il rapporto NO_x/VOC presente nell'atmosfera stabilisce quale dei due inquinanti determini la formazione di ozono. Se gli NO_x sono presenti in eccesso, allora è la concentrazione dei VOC a determinare la formazione di ozono. La produzione di ozono è pertanto limitata dai VOC. Nelle regioni con un ridotto inquinamento da NO_x la formazione di ozono dipende principalmente dalla concentrazione di questi e in misura pressoché irrilevante dalla concentrazione dei VOC. Nell'arco alpino il passaggio da un regime all'altro si verifica quando il rapporto tra NO_x e VOC è di circa 1/5. Una strategia volta alla riduzione, a livello locale o regionale, della concentrazione di ozono tramite la riduzione degli inquinanti, deve pertanto tener presente il tipo di regime nella regione considerata durante gli episodi di inquinamento.

Progetto MEMOSA

Il progetto MEMOSA era finalizzato a raccogliere informazioni in merito all'origine ed alla distribuzione su vasta scala delle sostanze inquinanti atmosferiche in regioni opportunamente scelte dell'arco alpino con particolare riguardo per gli inquinanti primari e secondari. L'Istituto per la Fisica dell'Atmosfera del Centro Tedesco di Ricerche Atmosferiche e Spaziali (DLR) ha quindi condotto i seguenti rilievi:

- **misurazione da piattaforma aerea** dei gas tossici NO , NO_2 , VOC, O_3 , H_2O_2 e SO_2 nonché dei parametri meteo a ridosso delle Prealpi bavaresi e meridionali come nel Tirolo del Nord ed in Alto Adige, soprattutto in condizioni atmosferiche favorevoli alla formazione di smog.

- **Modellrechnungen** zu Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen im Alpenraum sowie zur lokalen photochemischen Ozonbildung.

Die Flugzeugmessungen fanden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Atmosphärische Umweltforschung der Fraunhofergesellschaft (IFU), Garmisch-Partenkirchen, und der Firma AERODATA Luftchemie, Braunschweig, statt. Die Untersuchungen wurden ergänzt durch Messungen an Tal- und Bergstationen der beteiligten Institutionen entlang der Flugzeugmeßrouten während der Meßperioden.

Durchführung der Messungen

Im Rahmen des Projektes fanden an insgesamt sieben Meßtagen im Sommer 1990, Frühjahr 1991 und Sommer 1992 Flugzeugmessungen statt. Sie konzentrierten sich auf drei Meßgebiete (siehe Abb. 1). Die Meßflüge im Gebiet A wurden bei schwachwindigen Hochdruckwetterlagen vorgenommen, die es erlaubten, insbesondere lokale Schadstoffanreicherungen nachzuweisen und die Bildung von Photooxidantien zu untersuchen. Die Untersuchungen in den Meßgebieten B und C wurden bei advektiven Transportwetterlagen mit mäßigem Wind aus nördlichen (B) bzw. südlichen (C) Richtungen durchgeführt. Hier sollten mögliche Schadstofftransporte aus dem Alpenvorland in die Nord- bzw. Südalpentäler untersucht und benachbarte Täler mit unterschiedlichem Verkehrsaufkommen verglichen werden. Für die Auswahl der Meßperioden wurden die kontinuierlichen Messungen an den beteiligten Bodenstationen mit herangezogen.

Es wurden zwei instrumentierte Meßflugzeuge eingesetzt, ein zweimotoriges Propellerflugzeug vom Typ Queen Air Be-65 und eine zweimotorige Turboprop-Maschine vom Typ King Air 2000. Die Flugroute innerhalb des Meßgebietes A führte von Oberpfaffenhofen, Garmisch-Partenkirchen, Innsbruck, Brenner, Bozen, Trient, Rovereto und Brescia nach Bergamo und umgekehrt. Während eines der beiden Flugzeuge die bodennahe horizontale Verteilung der Schadgaskonzentrationen in einer konstanten Flughöhe von etwa 200 m über Grund erfaßte, nahm das andere Flugzeug

- **simulazioni mediante modelli matematici** in merito ai fenomeni di trasporto e diffusione in ambito alpino nonché alla formazione fotochimica di ozono a livello locale.

Le misurazioni dall'aereo sono state effettuate in collaborazione con l'Institut für Atmosphärische Umweltforschung der Fraunhofergesellschaft (IFU) e con la ditta AERODATA Luftchemie. Le rilevazioni sono state integrate con misurazioni eseguite durante il periodo del volo dalle stazioni montane e di valle poste al suolo lungo la rotta aerea e gestite dagli organismi partecipanti al progetto.

Esecuzione delle misurazioni

Le misurazioni aeree previste nel quadro del progetto sono state effettuate complessivamente in sette giorni nell'estate del 1990, nella primavera del 1991 e nell'estate del 1992. Le misurazioni hanno interessato tre zone diverse (cfr. figura 1). I rilievi nella zona A sono stati effettuati in occasione di situazioni di alta pressione atmosferica con venti deboli, le quali consentono di evidenziare in particolari locali accumuli di sostanze inquinanti, ovvero di indagare in merito alla formazione di fofossidanti. Le indagini nelle aree B e C sono state effettuate durante situazioni di circolazione atmosferica caratterizzata da trasporto advettivo con venti moderati da Nord (B) ovvero da Sud (C); ciò al fine di evidenziare l'eventuale trasporto di inquinanti dall'area prealpina verso le valli settentrionali e meridionali così come di confrontare vallate contigue a diversa intensità di traffico veicolare.

Per le indagini sono stati impiegati due aerei dotati di sofisticate strumentazioni di misurazione: un aereo bimotore ad elica del tipo Queen Air Be-65 (DLR) ed un bimotore a turboelica del tipo King Air 2000 (IFU/AERODATA). La rotta per la zona di misurazione A ha seguito l'allineamento Oberpfaffenhofen, Garmisch-Partenkirchen, Innsbruck, Brennero, Bolzano, Trento, Rovereto e Brescia fino a Bergamo e viceversa. Con il Queen Air è stata rilevata la distribuzione orizzontale delle concentrazioni di gas tossici ad una quota costante di circa 200 m dal suolo. Contemporaneamente il King Air ha effettuato sondaggi verticali lungo la rotta di misurazione, coprendo, con

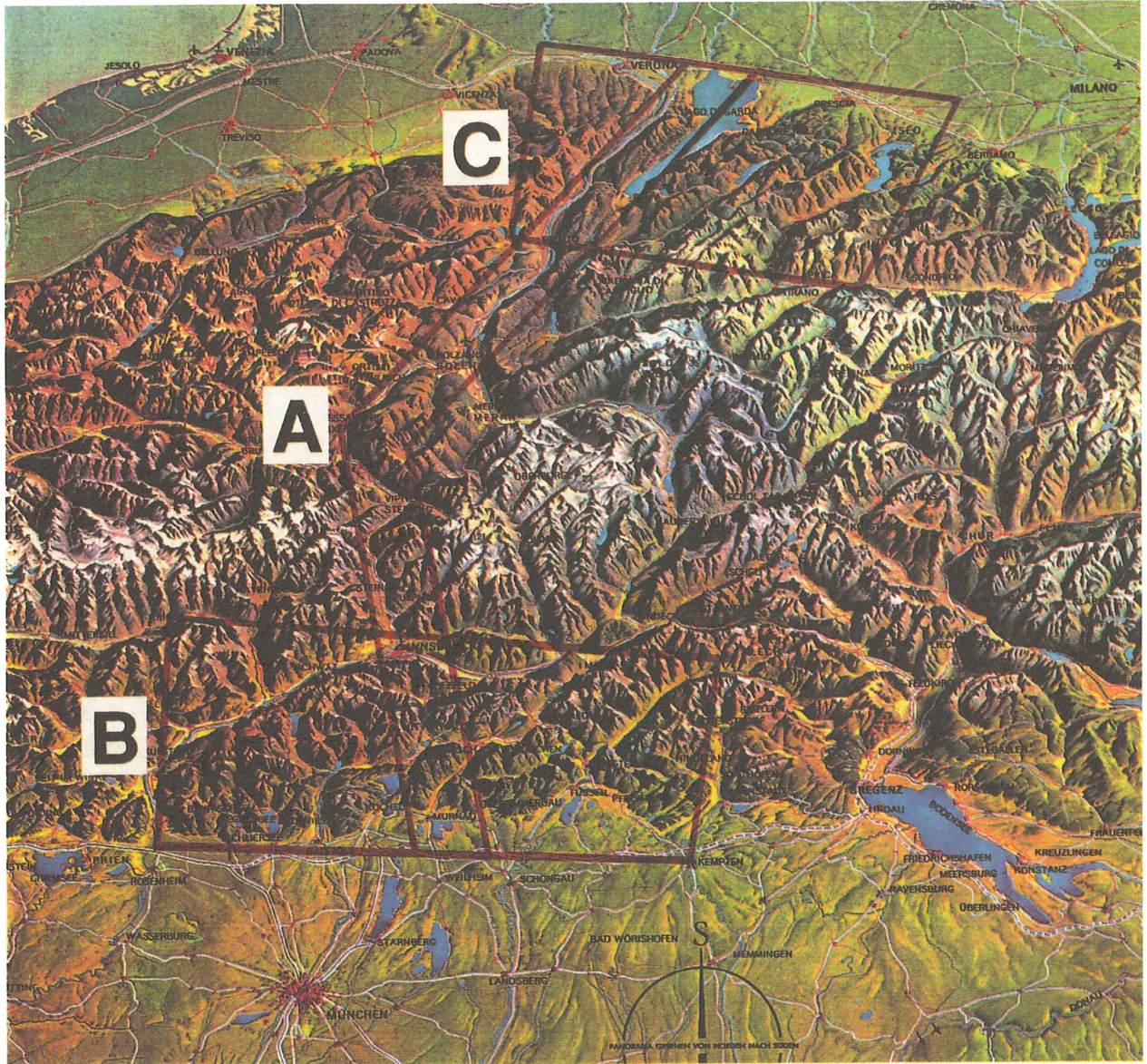


Abb. 1
Lage der MEMOSA Meßgebiete

Fig. 1
Zone interessate dai rilievi del progetto MEMOSA

zeitgleich dazu Vertikalsondierungen entlang der Meßroute vor, wobei in einem Delphinflugmuster ein Höhenbereich von etwa 3000m abgedeckt wurde. Nord-Süd-Traversierungen fanden am 5.8.90, 12.4.91, 23.7.91 und 6./7.8.91 ganztägig statt. Um tageszeitliche Effekte von räumlichen Unterschieden trennen zu können, wurden die Flüge am Morgen abwechselnd vom nördlichen oder südlichen Alpenvorland aus gestartet. Zudem fanden innerhalb der Smogperiode am 6./7. 8. 91 im Zeitraum von 26 Stunden insgesamt fünf Nord-Süd-Traversierungen statt. Um einen direkten Vergleich zwischen einem verkehrsbelasteten Tal (Eisacktal) und einem verkehrsarmen Tal (Sarntal) durchführen zu können, wurde die Route der beiden Flugzeuge zwischen Gossensaß und Bozen aufgesplittet. In diesem Teilstück flogen beide Flugzeuge in Bodennähe.

un volo a zigzag, un dislivello altimetrico di circa 3000 m. Le traversate nord-sud sono state effettuate nell'arco di un'intera giornata il 5. 8. 90, il 12. 4. 91, il 23. 7. 91 e nei giorni 6 e 7. 8. 91. Per poter separare gli effetti dovuti alle variazioni diurne dalle differenze di distribuzione spaziale, i voli sono stati fatti partire al mattino alternativamente dalle Prealpi settentrionali o da quelle meridionali. In particolare, durante il periodo con formazione di smog, nei giorni 6 e 7. 8. 91, sono state compiute complessivamente 5 traversate nord-sud nell'arco di 26 ore. Per poter fare un raffronto diretto tra una valle fortemente trafficata (Val d'Isarco) e una meno (Val Sarentino), i due velivoli hanno seguito rotte diverse tra Colle Isarco e Bolzano. In questo tratto anche il King Air è volato a bassa quota.

In den Meßgebieten B und C wurden am 30.7.91 bzw. 11. 7. 91 und 7. 8. 91 Flugzeugmessungen durchgeführt. Im Nordalpenbereich wurden das bayerische Alpenvorland zwischen Kempten und Rosenheim sowie das Inn-, Isar- und Loisachtal untersucht. Die Flüge im Südalpenbereich erstreckten sich auf das Vorland sowie das Etschtal und das Gebiet des Garda- und Iseosees.

Folgende Meßgrößen wurden bei den Flügen erfaßt:

- NO
- NO₂
- NO_x
- NO_y
- C_nH_m(VOC)
- O₃
- H₂O₂
- SO₂
- Position
- Luftdruck
- Temperatur
- relative Feuchte
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Streukoeffizient (Partikel)

Für die Analyse der VOC-Konzentration und -Zusammensetzung wurden in den Flugzeugen je Flugstunde etwa vier Luftproben gesammelt, die anschließend im Labor ausgewertet wurden. Alle anderen Meßgrößen wurden kontinuierlich registriert.

Zum Vergleich der Schadstoffmessungen an den Bodenstationen untereinander und mit den Flugzeugmessungen wurden im Rahmen des Projektes zwei Kalibrations-Quervergleiche der Eichstandards der Flugzeugmeßsysteme und der Bodenstationen durchgeführt.

Nelle zone B e C le misurazioni aeree hanno avuto luogo rispettivamente il 30. 7. 91 nonché l'11. 7. 91 e il 7. 8. 91. Nelle Alpi settentrionali si è preso in esame il territorio delle Prealpi bavaresi tra Kempten e Rosenheim e le valli dell'Inn, dell'Isar e del Loisach. Nelle Alpi meridionali le misurazioni aeree hanno interessato invece la regione prealpina, la Val d'Adige, la zona del Lago di Garda e del Lago d'Iseo.

Nel corso dei voli sono stati rilevati i seguenti parametri:

- NO
- NO₂
- NO_x
- NO_y
- C_nH_m (VOC)
- O₃
- H₂O₂
- SO₂
- posizione geografica
- pressione atmosferica
- temperatura
- umidità relativa
- velocità del vento
- direzione del vento
- coefficiente di dispersione (particolato)

Per l'analisi della concentrazione e della composizione dei VOC sono stati prelevati dagli aerei circa quattro campioni d'aria ogni ora, che sono stati successivamente analizzati nel laboratorio dell'IFU. Tutti gli altri parametri sono stati rilevati in continuo.

Ai fini della comparabilità delle misurazioni di inquinanti eseguite nel corso del progetto tra le varie stazioni al suolo e quelle effettuate dall'aereo si sono rese necessarie due intercalibrazioni delle strumentazioni.

Meßergebnisse

An den MEMOSA-Meßtagen wurden im Bereich der Flugzeugmeßrouten und an den Bodenstationen sowohl vormittags als auch nachmittags südlich des Alpenhauptkammes im allgemeinen höhere Konzentrationen für die primären Schadgase NO_x und VOC sowie für das sekundär gebildete Ozon beobachtet als nördlich davon. In beiden Alpenbereichen gibt es jedoch geringer und stärker belastete Gebiete. Im Norden treten höhere Schadstoffkonzentrationen im Inntal auf, im Süden im Etsch- und Iseotal sowie im Südalpenvorland.

Bei den Flugzeugmessungen wurden am Vormittag im nördlichen Alpenraum bodennahe (150–300 m ü.G.) NO_x - und VOC-Konzentrationen von 5–10 ppb bzw. 15–20 ppbC registriert. Eine Ausnahme bildete das Inntal mit NO_x - und VOC-Werten von 10–30 ppb bzw. 20–35 ppbC. Südlich des Brenners wurden im Eisacktal, sowie im Gebiet des Garda- und Iseoses NO_x - und VOC-Konzentrationen von 8–10 ppb bzw. 10–40 ppbC gemessen sowie im Etschtal und Südalpenvorland 10–50 ppb bzw. 25–60 ppbC.

Für die mittleren Ozonmaxima während der Meßtage im Sommer wurden im Bereich der Nordalpen Konzentrationen von 80–90 ppb gemessen gegenüber 100–120 ppb im südlichen Alpenraum. Südlich des Brenners wurde eine positive Korrelation zwischen dem regionalen Ozon-Tagesmaximum und der VOC-Belastung beobachtet, nördlich davon praktisch nicht. Ozon-Spitzenwerte von 160 ppb und 200 ppb wurden am 11. 7. 1991 im Iseotal bzw. östlich von Bergamo registriert. Hier wurden an diesem Tag auch die höchsten VOC-Konzentrationen von bis zu 60 ppbC gemessen.

Große Unterschiede in der Schadstoffbelastung wurden zwischen den verkehrsarmen und verkehrsreichen Tälern festgestellt. Die mehrfachen direkten Vergleiche zwischen dem Eisacktal und dem Sarntal bei den Nord-Süd-Traversierungen ergaben eine etwa 3-fach höhere NO_x -Belastung im Eisacktal, durch das die Brennerautobahn führt. Auch ein Vergleich der NO_x -Messungen im Inntal zwischen Innsbruck und Jenbach vor und nach der Verkehrsbehinderung auf der Inntalautobahn aufgrund der damals zeitweiligen Sperrung der Autobahnbrücke bei Kufstein aufgrund des abgesackten Mittelpfeilers ergab eine 4-fach geringere NO_x -Belastung im verkehrsarmen Zeitraum.

Risultati

Durante le giornate di acquisizione dei dati MEMOSA le concentrazioni degli inquinanti primari, degli ossidi di azoto e dei composti organici volatili (VOC), come pure dell'ozono di formazione secondaria, rilevate lungo le rotte di volo, sono risultate essere globalmente maggiori sulle Alpi meridionali rispetto a quelle settentrionali; ciò sia durante le ore antimeridiane che pomeridiane. Nei due settori alpini esistono tuttavia aree a maggiore e minore carico d'inquinamento: al nord le maggiori concentrazioni si registrano nella Valle dell'Inn, al sud in Val d'Adige e sul lago d'Iseo come sulle prealpi.

Le misure da piattaforma aerea (150–300 m sopra il livello del suolo) hanno evidenziato al mattino concentrazioni di NO_x e di VOC rispettivamente di 5–10 ppb e 15–20 ppbC nel settore settentrionale alpino con esclusione della Valle dell'Inn in cui i valori sono saliti a 10–30 ppb e a 20–35 ppbC. A sud del Brennero le concentrazioni di NO_x e VOC si aggirano per la Val d'Isarco, e i laghi di Garda e d'Iseo attorno a 8–10 ppb e 10–40 ppbC, mentre per la Val d'Adige e per le Prealpi arrivano rispettivamente a 10–50 ppb e 25–60 ppbC.

Per l'ozono si sono registrate, durante le giornate estive di misurazione, concentrazioni massime medie di 80–90 ppb sulle Alpi settentrionali, contro 100–120 ppb sulle Alpi meridionali. A sud del Brennero è stata evidenziata a livello regionale una correlazione positiva fra i valori massimi giornalieri di ozono e le concentrazioni di VOC per i territori maggiormente inquinati; non così per il settore settentrionale. Valori di punta di 160 ppb e 200 ppb sono stati toccati l'11.07.1991 sul lago d'Iseo e ad est di Bergamo, ove sono state pure registrate alla stessa data le maggiori concentrazioni di VOC: fino a 60 ppbC.

Notevoli differenze per quanto concerne il carico inquinante sono state registrate fra valli a maggiore e minore traffico veicolare. I molteplici confronti diretti fra la Val Sarentino e la trafficata parallela Val d'Isarco (autostrada del Brennero), hanno evidenziato una concentrazione di ossidi di azoto tripla per quest'ultima. Pure dal confronto relativo al segmento della Valle dell'Inn tra Innsbruck e Jenbach prima e dopo l'interruzione

Einen weiteren Hinweis auf den Kfz-Verkehr als Hauptquelle für die primären Schadgase im alpinen Raum liefert die gemessene Zusammensetzung der nachgewiesenen Kohlenwasserstoffe. Die registrierte VOC-Zusammensetzung in den bei den Meßflügen genommenen Luftproben stimmt gut mit der typischen Zusammensetzung des Kohlenwasserstoffgemisches von Kfz-Abgasen überein.

Im südlichen Alpenraum wurde bei den Messungen während der Smogepisoden eine sehr ausgeprägte Berg-Tal-Zirkulation beobachtet, die die Schadstoffverteilung und -anreicherung stark beeinflusste. Der Abfluß von Kaltluft von den Berghängen ins Etschtal während der Nacht führte dort zu sehr stabilen Inversionsschichten. Dadurch blieb die über der Sperrschicht liegende Luftmasse von bodennahen Ozonprozessen unbeeinflusst, so daß sich stabile Ozonreservoirschichten ausbilden konnten. Solche Ozonreservoirschichten in der Höhe wurden an allen Meßtagen bei photochemischer Aktivität im Etschtal beobachtet. In der Sperrschicht reichert sich die am Talboden emittierten Schadstoffe in der Nacht und am Vormittag stark an und wurden während des Tages durch den starken Talwind (Strömung talaufwärts) in Richtung Brenner transportiert. Dabei wurde im Etschtal ein Talwind mit Geschwindigkeiten von bis zu 8 m/s gemessen.

Die **Abbildungen 2–5** zeigen beispielhaft die am 6. 8. 91 gemessene NO_2 - und Ozon-Vertikalverteilung am Vormittag und Nachmittag längs einer Nord-Süd-Traverse in Form von farbkodierten Konturdarstellungen. **Abbildung 6** zeigt zum Vergleich die registrierten Meßwerte, die der Interpolation für die **Abbildung 4** zugrunde liegen. Zudem sind hier auch die Halbstundenmittelwerte der Ozonmessungen an den Bodenstationen zur Überflugzeit eingetragen.

Die NO_2 -Konturplots zeigen am frühen Vormittag (**Abb. 2**) nördlich des Brenners in den bodennahen Schichten NO_2 -Konzentrationen von 3–8 ppb. Wesentlich höhere Werte werden südlich des Brenners beobachtet (12–25 ppb), wobei die Spitzenwerte südlich von Bozen auftreten. Dieser Unterschied wird auch bei den Bodenstationen Garmisch-Partenkirchen und Giggelberg (Gossensaß) registriert. Zur Zeit dieses Fluges lag der bodennahe Horizontalflugweg im gesamten Meßgebiet innerhalb einer ausgeprägten Inversionsschicht mit einer Obergrenze von 550 m ü. G. bei Garmisch-Partenkirchen und 450 m ü. G. bei Trient. Bei der Messung am Nachmittag hat sich die Sperrschicht am Talboden aufgelöst und im südlichen Alpenbereich hat ein kräftiger Talwind eingesetzt. Aufgrund der

dell'autostrada in seguito al crollo del pilone centrale del ponte presso Kufstein, emergono valori di inquinamento da NO_x quattro volte inferiori durante il periodo di minore traffico.

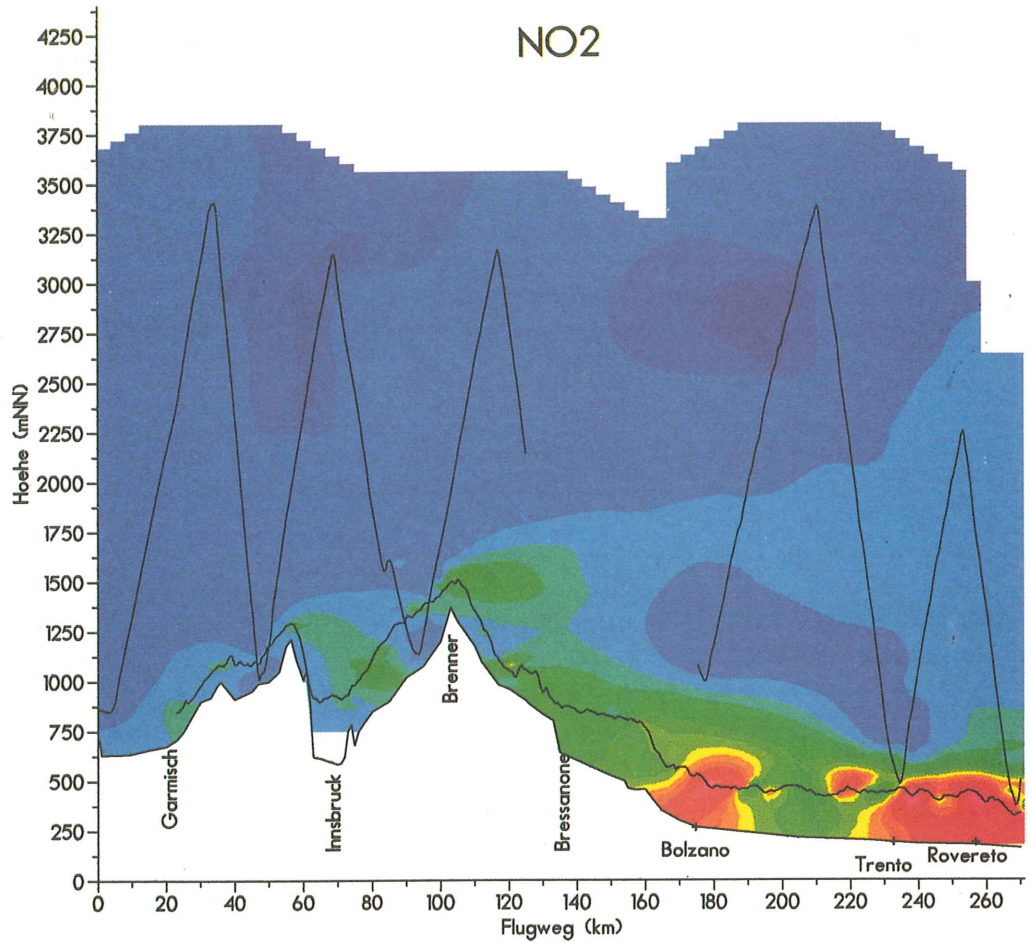
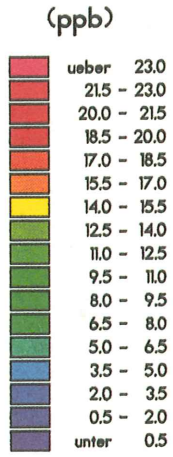
Un'ulteriore indicazione circa la responsabilità del traffico veicolare quale principale fonte delle sostanze inquinanti primarie in ambiente alpino discende dall'analisi dei composti organici volatili (VOC), la cui composizione, accertata nei campioni d'aria raccolti durante i voli, corrisponde molto bene con quella dei gas di scarico di origine veicolare.

Si è osservata, durante episodi di smog, la presenza di una pronunciata circolazione monte-valle nel settore alpino meridionale, che influisce decisamente su distribuzione ed accumulo degli inquinanti. L'afflusso di aria fredda dalle pendici montane della Val d'Adige durante la notte induce uno strato di inversione termica molto stabile. In tal modo le masse d'aria sovrastanti lo strato di separazione termica non vengono interessate dai processi ozonoriducenti di fondovalle con conseguente formazione di strati di accumulo di ozono. In Val d'Adige nei giorni di misurazione è stata osservata ogni volta la presenza di tali serbatoi d'accumulo di ozono in quota in concomitanza di processi fotochimici. Nottetempo ed al mattino lo strato di inversione termica si arricchisce degli inquinanti emessi a fondovalle. Questi poi, sospinti durante il giorno da venti di valle di una certa intensità (in Val d'Adige sono state misurate velocità del vento anche di 8 m/s), subiscono un trasporto verso il Brennero.

Le **Fig. 2 e 5** esemplificano i profili verticali per NO_2 ed O_3 determinati al mattino ed al pomeriggio del 06. 08. 1991 lungo l'asse nord-sud e restituiti secondo un codice a colori. La **Fig. 6** riporta per confronto i valori misurati su cui si basano le interpolazioni di **Fig. 4**. Qui sono riportati altresì i valori semiorari dell'ozono misurati presso le stazioni al suolo durante il periodo di volo.

La **Fig. 2** evidenzia concentrazioni di 3–8 ppb di NO_2 nel primo mattino negli strati inferiori, a nord del Brennero. Valori sensibilmente maggiori vengono registrati a sud del Brennero (12–25 ppb), con valori di punta a sud di Bolzano. Tali differenze sono confermate anche dalle stazioni al suolo di Garmisch-Partenkirchen e Moncucco (Colle Isarco). Durante questo rilievo il volo orizzontale basso si è svolto all'interno di un

MEMOSA
06.Aug. 1991
Vormittag (A1)



MEMOSA
06.Aug. 1991
Nachmittag (B1)

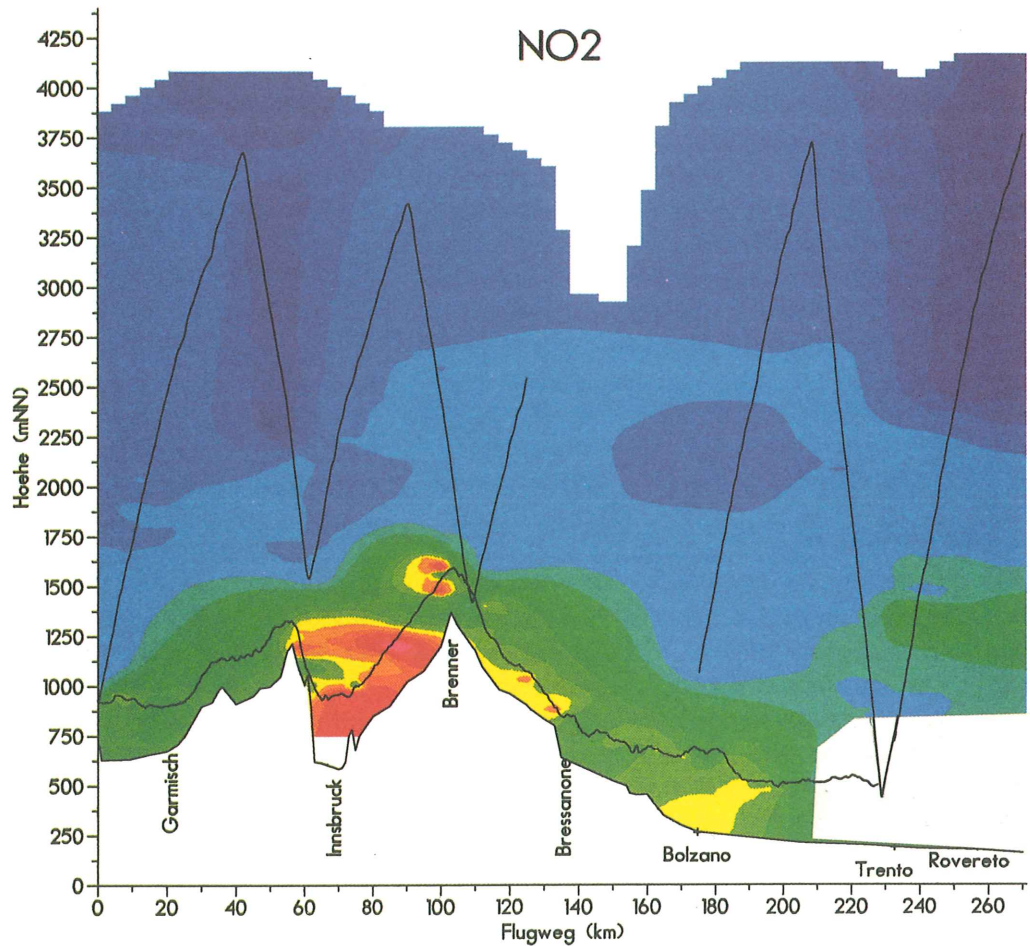
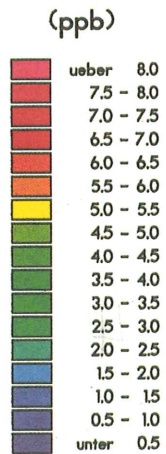
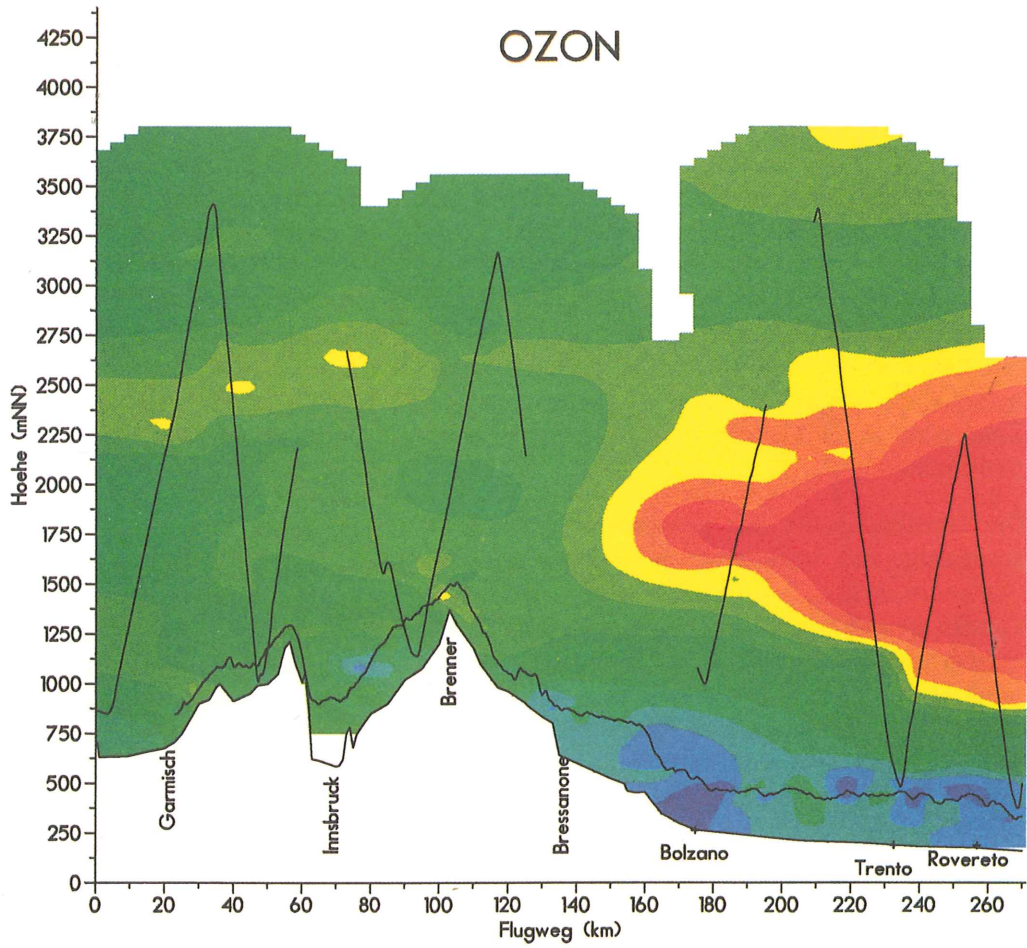
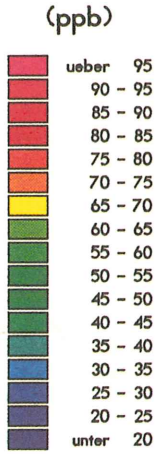


Abb. 213
Nord-Süd-Vertikalschnitt der NO₂-Konzentration
am 6. 8. 91 vormittags (oben) und
nachmittags (unten)

Fig. 213
Sezione verticale Nord-Sud della
concentrazione di NO₂ il 6/8/91 al mattino (sopra)
e nel pomeriggio (sotto)

MEMOSA
06.Aug. 1991
Vormittag (A1)



MEMOSA
06.Aug. 1991
Nachmittag (B1)

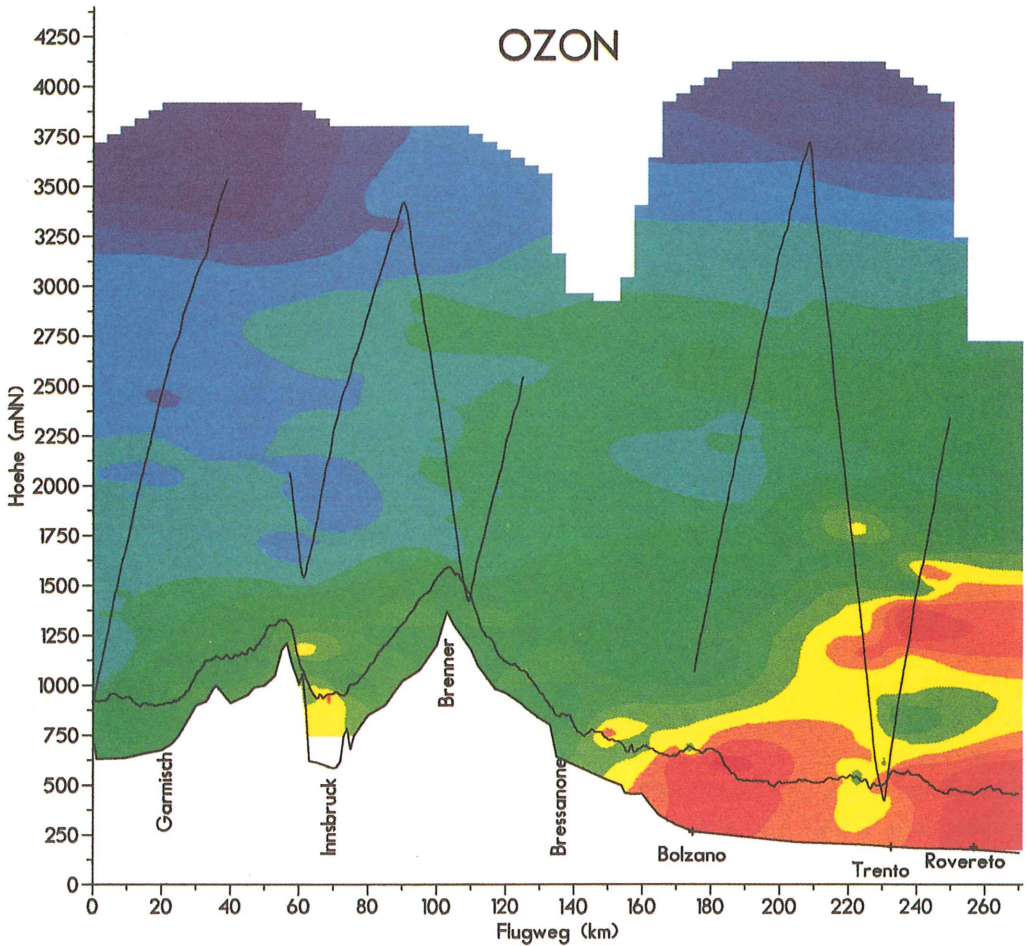
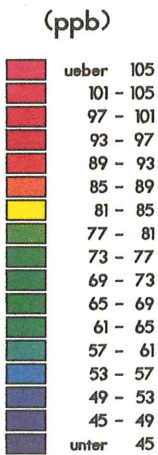


Abb.4/5
Nord-Süd-Vertikalschnitt der Ozon-Konzentration
am 6. 8. 91 vormittags (oben) und
nachmittags (unten)

Fig. 4/5
Sezione verticale Nord-Sud della
concentrazione di ozono il 6/8/91 al mattino
(sopra) e nel pomeriggio (sotto)

besseren Durchmischung liegen die NO_2 -Konzentrationen insgesamt niedriger. Hohe NO_2 -Werte werden nun zwischen Karwendel und Brenner im Inn- und Wipptal gemessen. Bei den registrierten Windgeschwindigkeiten beträgt die Transportzeit von Bozen zum Brenner etwa 2–4 Stunden. Ein weiterer Meßflug am späten Nachmittag zeigt eine Zunahme der Schadstoffanreicherung im Inn- und Wipptal mit NO_2 -Konzentrationen bis 16 ppb. Eine entsprechende Verteilung und zeitliche Entwicklung wird auch für die VOC-Konzentrationen beobachtet.

Der Vertikalschnitt der gemessenen Ozonkonzentration am Vormittag zeigt oberhalb der Inversionsschicht deutlich eine mächtige Ozonreservoirschicht mit sehr hohen Ozonkonzentrationen von bis zu 90 ppb, die sich über Nacht vom Vortag erhalten hat. Sie erstreckt sich von etwa 800 m über dem Talboden bis zu den Kammhöhen südlich von Bozen und wird nach Norden durch die Zillertaler und Öztaler Alpen begrenzt. Die Ozonreservoirschicht wird auch an der Rittnerhorn-Meßstation beobachtet, die zur Überflugzeit eine Ozonkonzentration von 67 ppb registriert (s. **Abb. 6**). Zum Zeitpunkt des Meßfluges am frühen Nachmittag treten die höchsten Ozonwerte im Tal südlich von Brixen auf (bis 110 ppb). Zur Entstehung dieser hohen Ozonbelastung hat das Einmischen der ozonreichen Luft aus den mittleren Lagen beigetragen. Die Ozonwerte im Inntal liegen etwa 30 ppb niedriger. Die höchsten H_2O_2 -Konzentrationen werden ebenfalls südlich von Brixen gemessen.

Das **Titelbild** zeigt den Nord-Süd-Vertikalschnitt der Ozonkonzentration für den späten Nachmittag des gleichen Tages. Hohe Ozonkonzentrationen mit Werten über 90 ppb haben sich nun auch zwischen Innsbruck und Mittenwald und nördlich von Garmisch-Partenkirchen gebildet.

pronunciato strato di inversione, esteso a tutta l'area interessata dalle misurazioni, con un limite superiore di 550 m sopra il livello del suolo a Garmisch-Partenkirchen e di 450 m s.l.s. presso Trento. Nel pomeriggio lo strato di separazione termica si è dissolto e nel settore alpino meridionale si è instaurata una vigorosa brezza di valle con conseguente miglior rimescolamento delle masse d'aria e diminuzione delle concentrazioni di NO_2 . Elevati valori di NO_2 sono stati dunque registrati fra Karwendel ed il Brennero nelle valli dell'Inn e dello Still. Sulla base della velocità dei venti accertata, i tempi di trasporto da Bolzano al Brennero si aggirano attorno alle 2–4 ore. Un ulteriore volo nel tardo pomeriggio ha evidenziato un incremento degli inquinanti nelle Valli dell'Inn e dello Still con concentrazioni di NO_2 fino a 16 ppb. Una corrispondente distribuzione ed evoluzione temporale è stata osservata anche per i VOC.

Il profilo verticale delle concentrazioni di ozono al mattino evidenzia chiaramente un imponente serbatoio di accumulo sopra lo strato di inversione termica, con elevate concentrazioni fino a 90 ppb, conservatosi dal giorno precedente per tutta la notte ed esteso dagli 800 m s.l.s. fino alle cime delle montagne a sud di Bolzano e delimitato a nord dalle Alpi delle valli del Ziller e dell'Ötz. La presenza di questo strato di accumulo viene registrata anche dalla stazione al Corno del Renon, che durante il periodo di volo misura concentrazioni di ozono di 67 ppb (v. **Fig. 6**). Durante il volo nel primo pomeriggio i maggiori valori di ozono in valle si registrano a sud di Bressanone (fino a 110 ppb). Alla formazione di questi elevati carichi concorre l'afflusso di aria ricca di ozono dalle quote intermedie. I valori nella Valle dell'Inn sono inferiori di circa 30 ppb. Anche per l' H_2O_2 le concentrazioni più elevate si registrano a sud di Bressanone.

La **figura di copertina** riporta il profilo verticale delle concentrazioni di ozono nel tardo pomeriggio dello stesso giorno. Anche in questo caso lo strato di accumulo di ozono si è conservato durante la notte sulle Valli d'Isarco e d'Adige. Elevati valori di ozono anche oltre i 90 ppb si registrano altresì fra Innsbruck e Mittenwald come pure a Nord di Garmisch-Partenkirchen.

MEMOSA

06. Aug. 1991
Vormittag (AI)

OZON

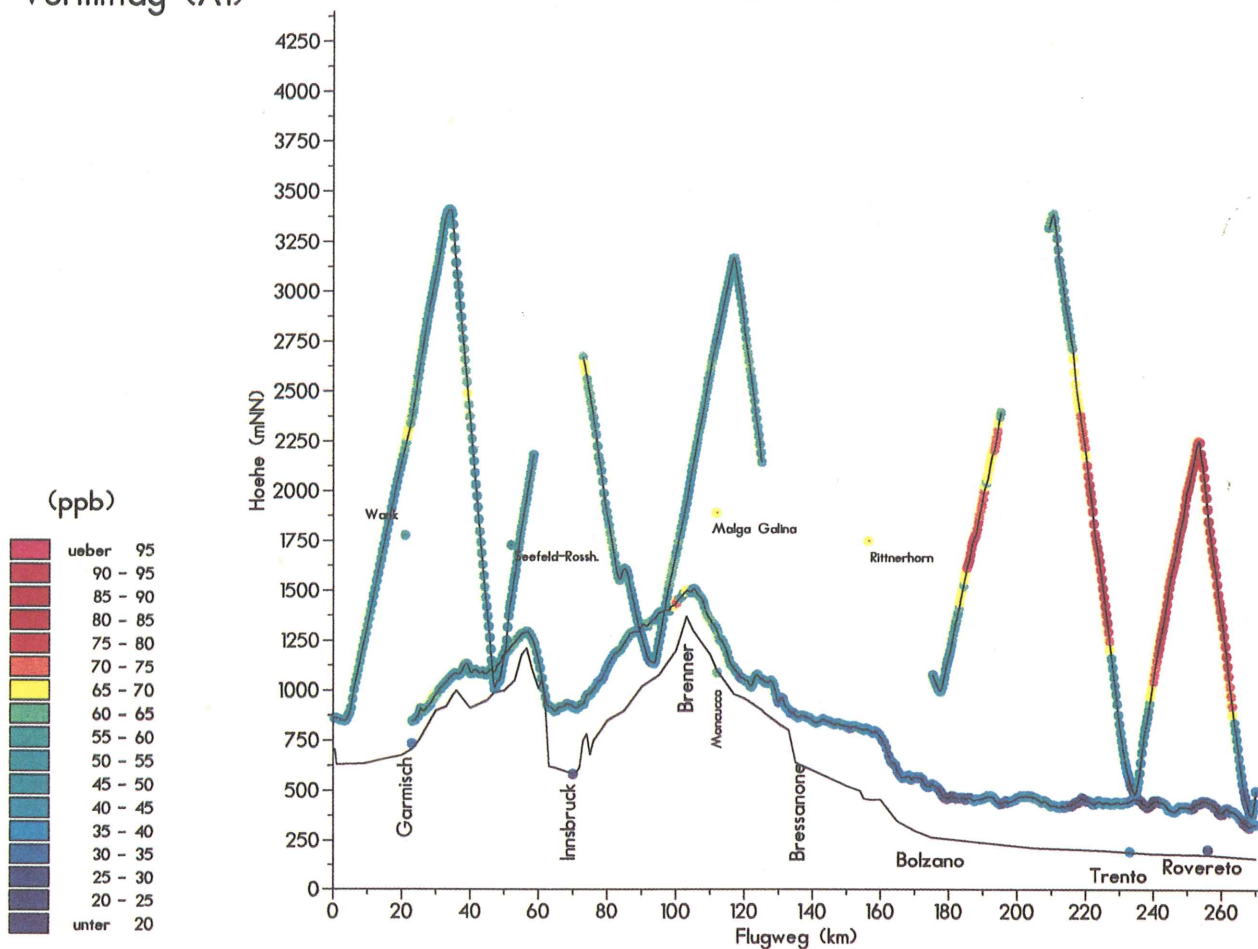


Abb. 6
Gemessene Ozonkonzentration entlang der Flugzeugmeßbrouten und an den Berg-Talstationen am 6. 8. 91 (vormittags)

Fig. 6
Concentrazioni di ozono rilevate lungo le rotte di volo e nelle stazioni al suolo il 6/8/91

Modellsimulationen

Zur weiteren Interpretation der MEMOSA-Meßergebnisse wurden verschiedene numerische Simulationen durchgeführt. Ziel dieser Rechnungen war die Charakterisierung der meteorologischen Bedingungen, bei denen ein Ferntransport in die Alpen stattfinden kann und die Untersuchung des Einflusses von thermisch induzierten Windsystemen auf die Schadstoffverteilung. Darüberhinaus wurden Modellrechnungen zur Analyse des Einflusses der beobachteten NO_x - und VOC-Konzentrationen auf die

Simulazioni con modelli

Per una migliore interpretazione dei risultati di misurazione MEMOSA sono state realizzate diverse simulazioni. Scopo di queste elaborazioni è stata la caratterizzazione delle condizioni meteorologiche durante le quali può avere luogo un trasporto a distanza nelle Alpi, oltre allo studio dell'influsso di sistemi di venti di induzione termica sulla diffusione degli inquinanti. Sono stati inoltre realizzati dei modelli di calcolo per l'analisi di tali influssi sulla formazione fotochimica dell'ozono.

photochemische Bildung von Ozon durchgeführt.

Die Simulationen des Ferntransports und der autochthonen Windsysteme wurden mit einem Mesoskalen-Modell (REWIH3D) durchgeführt. Dieses Modell ist ein hydrostatisches, dreidimensionales Gittermodell. Parallel zur Berechnung der meteorologischen Größen kann für eine oder mehrere Schadstoffkomponenten die Ausbreitung berechnet werden. Die Bildung von Ozon aus den Vorläufersubstanzen NO_x und VOC wurde mit einem vertikal eindimensionalen Chemiemodell simuliert.

In Abhängigkeit von der meteorologischen Situation wurden mögliche Transportwege in die Alpenregion bestimmt. Das Modellgebiet wurde so gewählt, daß sowohl die Alpen als auch die umliegenden Industriegebiete erfaßt werden. Es überdeckt ein Areal von ca. 1200 km x 800 km, mit dem Golf von Lyon in der Süd-West-Ecke und Oberösterreich in der Nord-Ost-Ecke. Mit dem Modell REWIH3D wurden 8 verschiedene Simulationen ausgeführt, die sich in der großräumigen Anströmrichtung unterscheiden. Die Simulationszeit betrug jeweils 24 Stunden, beginnend um 0 Uhr. Die Instationarität der Strömung stellt sich aufgrund des Tagesganges der bodennahen Temperatur ein. Zur Berechnung der Immissionsverteilung wurden 14, den Alpen nahegelegene Industriegebiete berücksichtigt, wobei jeweils von einer Einheitsquellstärke ausgegangen wurde. Die Quellhöhe wurde jeweils 125 m angenommen.

Die Simulationen belegten, daß ein Schadstofftransport über die Alpen in den meisten Fällen nicht stattfindet. Lediglich bei einer großräumigen Anströmrichtung aus Nord-Ost gelangen Luftbeimengungen aus den Industriegebieten nördlich der Alpen (Ingolstadt, Burghausen) entlang des Inntals in Richtung Brenner. Ein Transport von Schadstoffen aus den Industriegebieten in der Poebene über die Alpen nach Norden wurde für Süd- und Süd-West-Strömung berechnet. Bei Südströmung gelangen sie hauptsächlich über die Westalpen, bei Süd-West-Strömung dagegen auch über den östlichen Teil der Alpen und erreichen das Inntal.

Die Transportwege von Norden nach Süden bei einer nordöstlichen Anströmrichtung wurden besonders deutlich erkennbar, wenn nur Emissionen von nördlich der Alpen gelegenen Quellen berücksichtigt werden. Simuliert wurden in diesem Fall zwei Tage, um sicherzustellen, daß Schadstoffe infolge Advektion mit dem mittleren Wind über eine

Le simulazioni del trasporto a distanza e dei sistemi di venti locali sono state condotte con un modello a mesoscala REWIH3D. Si tratta di un modello a griglia, idrostatico e tridimensionale. Parallelamente al calcolo delle grandezze meteorologiche è possibile calcolare la diffusione di uno o più componenti inquinanti. La formazione di ozono dai precursori NO_x e VOC è stata simulata con un modello chimico verticale monodimensionale.

In dipendenza della situazione meteorologica sono state determinate possibili vie di trasporto nella regione alpina. L'area campione è stata scelta, per questo, di dimensioni tali da comprendere sia le Alpi sia le regioni industriali circostanti. Essa copre un areale di circa 1200 km x 800 km con il golfo del Leone nell'angolo Sud-Ovest e l'Austria superiore nell'angolo Nord-orientale. Con il modello REWIH3D sono state condotte 8 diverse simulazioni, che si differenziano per la direzione di provenienza delle masse d'aria su grande scala. Il tempo di simulazione è stato ogni volta di 24 ore, cominciando alle 0.00, dato che il movimento delle masse d'aria dipende dall'andamento giornaliero della temperatura in vicinanza del suolo. Per il calcolo della distribuzione delle immissioni sono state considerate 14 regioni industriali prossime alle Alpi, considerate ogni volta come sorgente di intensità unitaria. L'altezza della sorgente è stata sempre fissata in 125 m.

Le simulazioni hanno dimostrato che nella maggioranza dei casi non si verifica un trasporto di inquinanti attraverso le Alpi. Soltanto in presenza di una corrente a grande scala proveniente da Nord-Est, le masse d'aria delle regioni industriali a Nord delle Alpi (Ingolstadt, Burghausen) giungono al Brennero, lungo la valle dell'Inn. Un trasporto di inquinanti dalle zone industriali della pianura Padana attraverso le Alpi verso Nord è stato calcolato per correnti da S e da SO. In presenza di correnti da Sud gli inquinanti arrivano soprattutto sopra le Alpi Occidentali; con correnti da SO, invece, essi superano anche il settore orientale delle Alpi e raggiungono la valle dell'Inn.

Le vie di trasporto da N verso S in presenza di una corrente proveniente da NE diventano chiaramente riconoscibili quando si considerino solamente le emissioni di sorgenti localizzate a Nord delle Alpi. In questo caso la simulazione è stata protratta per due giorni, al fine di verificare se il trasporto degli inquinanti per advezione con

Distanz von der Breite der Alpen transportiert werden können. Geht man von einer mittleren Windgeschwindigkeit von 5 m/s aus, so können Schadstoffe in zwei Tagen etwa 900 km weit verfrachtet werden. Die Emissionsgebiete nördlich der Alpen liegen maximal 120 km vom Alpenrand entfernt, die Breite der Alpen beträgt ca. 300 km, so daß eine Simulationsdauer von zwei Tagen ausreichend war. In **Abbildung 7** ist beispielhaft die horizontale Verteilung der Schadstoffe nach 27 h Simulationszeit in 250 m ü.G. dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Alpen wie eine Barriere wirken mit Ausnahme zweier Transportwege von Norden nach Süden: des Brennerpasses und eines Durchlasses bei Triest. Schadstoffe können somit entlang dieser Pfade südwärts bis an die Adria und in die Poebene gelangen.

vento di media intensità, possa coprire una distanza pari alla larghezza delle Alpi. Partendo da una velocità media del vento di 5 m/sec, gli inquinanti in due giorni possono essere trasportati a circa 900 km di distanza. Le zone di emissione a Nord delle Alpi sono situate al massimo a 120 km dalla cerchia alpina, e la larghezza delle Alpi raggiunge circa i 300 km, cosicché è stata sufficiente una simulazione della durata di due giorni. Nella **figura 7** è rappresentata come esempio la distribuzione orizzontale degli inquinanti dopo 27 ore di simulazione a 250 m dal suolo. Si riconosce come le Alpi fungano da barriera, con l'eccezione di 2 vie di trasporto da N a S: il passo del Brennero ed un passaggio presso Trieste. Lungo queste vie gli inquinanti possono così giungere, muovendosi verso Sud, fino alla pianura Padana ed all'Adriatico.

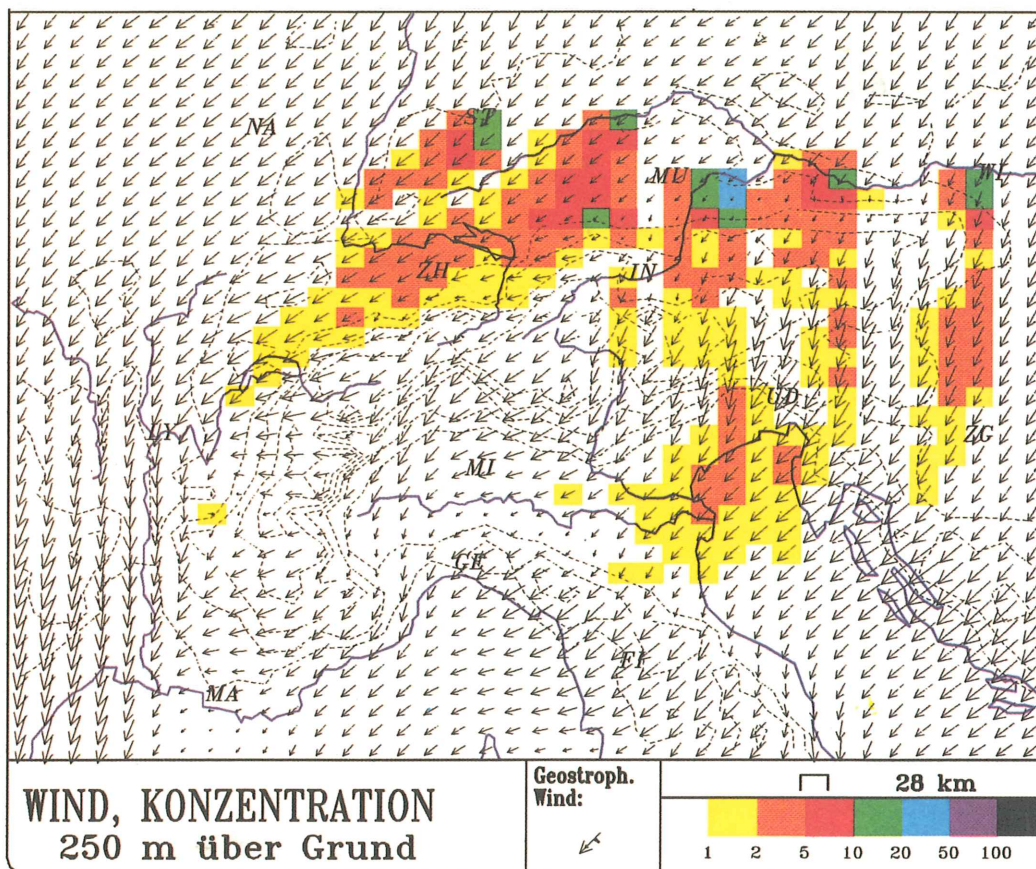


Abb. 7
Schadstoffverteilung und Windfeld nach 27 Stunden Simulationszeit bei Vorgabe von Emissionen im Norden der Alpen und einer Anströmung von 315° und 10 m/s

Fig. 7
Distribuzione degli inquinanti e campo del vento dopo 27 ore di tempo di simulazione in presenza di emissioni a Nord delle Alpi e di una corrente da 315° e 10 m/sec.

Für die Häufigkeit der Windrichtungen, bei denen ein Transport über die Alpen stattfinden kann, ergeben sich im langjährigen Mittel folgende Werte:

Windrichtung	rel. Häufigkeit
45°	5 %
180°	3 %
225°	10 %

Bei gradientschwachen Wetterlagen, wenn keine großräumigen Druckgegensätze vorhanden sind und die Einstrahlung bzw. Ausstrahlung nicht durch Wolkenbedeckung abgeschwächt wird, kommt es, bedingt durch unterschiedliche Erwärmung, zur Ausbildung autochtoner Windsysteme. Kleinräumig entstehen Hangwindzirkulationen, die mit den räumlich ausgedehnteren Berg-Talwindzirkulationen verzahnt sind. In Gebirgen treten solche thermischen Windsysteme bei intensiver Sonneneinstrahlung in fast allen Tälern auf und es kann zu einer wechselseitigen Beeinflussung der lokalen Windsysteme kommen, zumindest dann, wenn sie gemeinsam in dieselbe Ebene oder das nächste größere Gebirgstal münden. Zu diesen mehr lokalen Windsystemen kommt noch ein regionaler Effekt der thermischen Zirkulation Gebirge-Vorland hinzu. Tagsüber stellt sich eine Strömung vom Vorland ins Gebirge ein, nachts in umgekehrter Richtung. Mit diesen Strömungen können Luftbeimengungen aus dem Vorland in die Alpen transportiert werden. Diesen Mechanismus wird man aufgrund der intensiveren Sonneneinstrahlung und der orographischen Gegebenheiten vor allen Dingen in den Südalpen erwarten.

Numerische Simulationen dieser Prozesse wurden für die Meßtage im südlichen Alpenbereich bei Strahlungswetterlagen durchgeführt. Dazu wurden in der Poebene Flächenquellen spezifiziert. Die Simulation der thermisch induzierten Gebirge-Vorland-Zirkulation wurde jeweils um 21 Uhr gestartet. Das Gebirge kühlt nachts stärker ab als das Vorland, der Wind weht folglich vom Gebirge ins Vorland. Schadstoffe, die in der Poebene emittiert werden, reichern sich bei fehlender großräumiger Strömung in der Poebene an. Nach Sonnenaufgang werden die Gebirgshänge erwärmt und die Strömungsrichtung kehrt sich um. In der Poebene und am südlichen Alpenrand baut sich eine südliche

Su una media pluriennale si evidenziano i seguenti valori di frequenza delle correnti per mezzo delle quali può verificarsi un trasporto attraverso le Alpi:

direzione del vento	frequenza relativa
45°	5 %
180°	3 %
225°	10 %

Con circolazione atmosferica a debole gradiente, in assenza di elevate differenze di pressione e quando l'insolazione così come l'irraggiamento non è limitata da coperture di nubi, si giunge, per il differente grado di riscaldamento, alla formazione di sistemi di venti locali. Su piccola scala sussistono circolazioni di vento di versante, nell'ambito di più estese circolazioni di vento di monte e di valle. In montagna questi sistemi di vento di induzione termica compaiono in quasi tutte le valli in presenza di intenso irraggiamento solare con influssi reciproci sui venti locali, per lo meno quando essi confluiscono nella stessa pianura od in una valle maggiore. A questi vari sistemi di correnti locali si aggiunge ancora l'effetto su scala regionale della circolazione termica montagna-pianura: durante il giorno si verifica una corrente dal piano al monte, di notte nella direzione opposta. Con queste correnti masse d'aria possono essere trasportate alle Alpi dalla zona antistante. Questo meccanismo è prevedibile, soprattutto nelle Alpi meridionali, a causa dell'insolazione più intensa e delle condizioni orografiche.

Simulazioni numeriche di questi processi sono state realizzate per i giorni di misurazione nel settore alpino meridionale in condizioni di tempo sereno. Allo scopo sono state individuate aree di emissione nella pianura padana. La simulazione della circolazione monte-valle indotta termicamente è iniziata sempre alle h 21.00 serali. La montagna di notte si raffredda di più del fondovalle e il vento di conseguenza soffia da monte verso valle. Gli inquinanti emessi nella pianura Padana, in assenza di correnti su grande scala si concentrano nella pianura stessa. Dopo il sorgere del sole, le pendici delle montagne si riscaldano e la direzione della corrente si inverte. Nella pianura Padana e al limite sud delle Alpi si instaura una corrente

Strömung auf, mit der Schadstoffe aus der Poebene in Richtung Alpen gelangen. Am Spätnachmittag sind sie bereits am Brenner angelangt. **Abbildung 8** zeigt einen Süd-Nord-Vertikalschnitt des Strömungsfeldes und der Konzentrationsverteilung zu verschiedenen

meridionale con la quale gli inquinanti da questa giungono alle Alpi. Nel tardo pomeriggio essi sono già arrivati al Brennero. La **figura 8** mostra una sezione verticale Sud-Nord del campo della corrente e della distribuzione della concentrazione degli

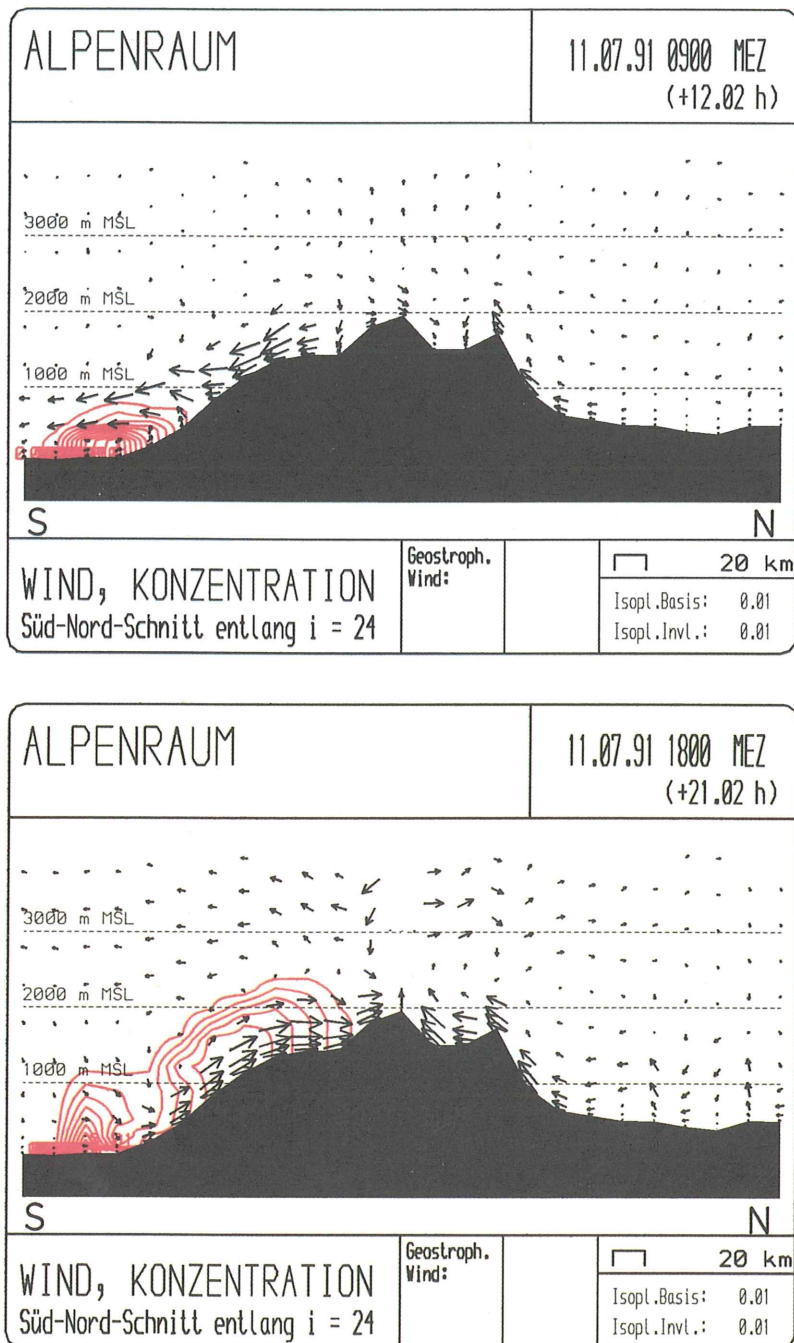


Abb. 8
Süd-Nord-Vertikalschnitt des simulierten Strömungsfeldes und der Schadstoffkonzentration um 9 Uhr (oben) und 18 Uhr (unten) infolge der lokalen Gebirge-Vorland-Zirkulation.

Fig. 8
Sezione verticale Sud-Nord del campo della corrente simulata e della concentrazione di inquinanti alle ore 9.00 (sopra) e alle 18.00 (sotto) a seguito della circolazione locale montagna-pianura

Uhrzeiten. Der Schnitt wurde durch die Poebene, den Brenner und das Inntal gelegt. Orographie, Vertikalachse und -geschwindigkeit sind zur Verdeutlichung im Vergleich zu den horizontalen Längen- und Geschwindigkeitsskalen um den Faktor 50 überhöht dargestellt. Die vom Gebirge abwärts gerichtete Strömung ist um 9 Uhr morgens oberhalb 1000 m ü. NN am Südrand der Alpen noch deutlich ausgeprägt. In der Poebene setzt bereits Konvektion ein, Luft steigt bis ca. 1000 m ü. NN auf und die Luftbeimengungen werden vom Boden in größere Höhen transportiert. Im Laufe des Vormittags bildet sich dann eine ca. 200 m mächtige Schicht aus, mit einer zum Gebirge aufwärts gerichteten Strömung. Schadstoffe werden mit dieser Strömung in die Alpen verfrachtet und gegen 18 Uhr haben sie bereits den Brenner erreicht. Nach 21 Uhr drehen sich die Verhältnisse wieder um, d.h. der Wind weht wieder vom Gebirge in Richtung Vorland. Schadstoffe können somit über thermisch induzierten Gebirge-Vorland-Zirkulationen von der Poebene bis ins Inntal transportiert werden.

Zur Untersuchung der photochemischen Ozonbildung in Abhängigkeit von den Vorläufer-Schadstoffen NO_x und VOC wurden mit einem eindimensionalen Chemiemodell Sensitivitätsstudien durchgeführt. Dazu wurden für die bei den Meßflügen angetroffenen Verhältnisse Isoplethen der Ozon-Tagesmaxima als Funktion der NO_x - und VOC-Konzentration für eine gut durchmischte Grenzschicht am Nachmittag berechnet. Die Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe wurde so gewählt, wie sie für Kraftfahrzeugemissionen typisch ist. Die Einordnung der in den verschiedenen Alpentälern und dem Vorland gemessenen NO_x -, VOC und Ozonkonzentrationen in die berechneten Isoplethen-Diagramme zeigte, daß die Meßwerte in der Nordalpenregion überwiegend im Bereich derjenigen Ozon-Isoplethen liegen, der praktisch unabhängig von der VOC-Konzentration ist. Die Meßwerte im Südalpenbereich liegen hingegen in dem Bereich, in dem die Ozonbildung mit der VOC-Konzentration korreliert ist.

inquinanti alle diverse ore del giorno. La sezione è stata collocata attraverso la pianura Padana, il Brennero e la valle dell'Inn. Orografia, asse verticale e velocità verticale sono rappresentate, per chiarezza, ingrandite di un fattore 50 rispetto alla scala orizzontale della lunghezza e della velocità. La corrente che discende da monte è ancora chiaramente delineata alle 9 del mattino al di sopra dei 1000 m di quota al margine meridionale delle Alpi. Nella pianura padana incomincia già la convezione, l'aria sale fino a circa 1000 m s.l.m. e le miscele d'aria vengono trasportate dal suolo alle quote superiori. Nel corso della tarda mattinata si sviluppa uno strato dello spessore di circa 200 m, con un andamento ascendente verso monte. Gli inquinanti con questa corrente vengono trasportati nelle Alpi, e attorno alle 18.00 hanno già raggiunto il Brennero. Dopo le 21.00 i rapporti si invertono nuovamente, ciò significa che il vento soffia di nuovo dalla montagna verso il piano. Gli inquinanti possono così venire trasportati, tramite le correnti monte-piano termicamente indotte, dalla pianura Padana fino alla valle dell'Inn.

Per la ricerca sulla formazione fotochimica di ozono in dipendenza dai precursori NO_x e VOC sono stati condotti studi di sensitività con un modello chimico monodimensionale. All'uopo sono state calcolate, in base alle condizioni incontrate nel corso dei voli di rilevamento, le isoplete dei valori massimi giornalieri di ozono in funzione delle concentrazioni pomeridiane di NO_x e VOC per uno strato limite ben rimescolato. La composizione degli idrocarburi è stata scelta in conformità alle emissioni tipiche dei mezzi automobilistici. Il confronto delle concentrazioni di NO_x , VOC e ozono, misurate nelle diverse valli alpine e nelle pianure, con i diagrammi delle isoplete calcolati ha mostrato che i valori nella regione nordalpina si situano prevalentemente nel settore di quella isopleta dell'ozono che è praticamente indipendente dalla concentrazione di VOC. I valori nel settore sud alpino si situano invece nel campo in cui la formazione di ozono è correlata alla concentrazione di VOC.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Flugzeugmessungen und der numerischen Simulationen zur Analyse von Schadstoffverteilung und -herkunft im Alpenraum zeigen, daß Teilbereiche des Alpenraums besonderen Schadstoffbelastungen ausgesetzt sind, hauptsächlich aufgrund unterschiedlicher Verkehrsbelastung. Selbst für benachbarte Täler mit hohem und niedrigem Verkehrsaufkommen konnten deutliche Konzentrationsunterschiede bei den Schadstoffmessungen festgestellt werden. Die höchsten Schadstoffkonzentrationen wurden in den großen Alpentälern gemessen, durch die der Transitverkehr führt. Die Spitzenbelastungen sind in erster Linie hausgemacht, der atmosphärische Ferntransport von Schadstoffen aus Gebieten nördlich und südlich der Alpen ist über das Jahr gesehen von eher untergeordneter Bedeutung.

Bei Hochdruckwetterlagen mit hohen Ozonbelastungen wird besonders im südlichen Alpenraum die Schadstoffanreicherung und -verteilung durch die lokale Gebirge-Vorland- und Berg-Tal-Zirkulation beeinflusst. Dies wird beispielsweise an der Beobachtung von sehr ausgeprägten Ozonreservoirschichten im Etschtal sichtbar. Solche Vertikalstrukturen können mit Messungen an Bodenstationen allein nicht erfaßt werden.

Sensitivitätsanalysen hinsichtlich der Ozonbildung in Abhängigkeit von der regionalen NO_x - und VOC-Belastung lassen erkennen, daß bei den an den Meßtagen beobachteten Konzentrationen für die primären Schadgase die Ozonspitzenwerte im Südalpenraum effektiver durch eine VOC-Verminderung hätten reduziert werden können, im Nordalpenraum hingegen durch eine NO_x -Verminderung. In beiden Alpenbereichen lag das NO_x/VOC -Verhältnis an den Meßtagen jedoch nahe am Übergangsbereich zwischen dem NO_x - und VOC-kontrollierten Ozonbildungsregime, so daß eine generelle Verminderung der Ozonbelastung im Alpenraum nur durch eine Reduzierung beider Primärschadstoffe erreicht werden kann. Aufgrund der spezifischen Bedingungen des Alpenbereiches im Hinblick auf Orographie und Meteorologie können lokale Maßnahmen sehr wirksam sein.

Riassunto

I risultati delle misurazioni da piattaforma aerea e delle simulazioni numeriche per l'analisi dell'origine e della distribuzione di inquinanti nell'ambito alpino hanno mostrato che alcuni settori dell'area alpina sono particolarmente esposti a carichi inquinanti, soprattutto a causa di differenti intensità di traffico veicolare. Perfino in valli contigue con maggiore o minore flusso di traffico si sono potute stabilire evidenti differenze di concentrazione durante le misurazioni degli inquinanti. Le maggiori concentrazioni di inquinanti sono state rilevate nelle grandi valli alpine percorse dal traffico di transito. Gran parte degli inquinanti sono essenzialmente prodotti in loco, mentre il trasporto atmosferico a distanza dal Nord e dal Sud delle Alpi, durante l'anno, è poco significativo.

In condizioni di alta pressione atmosferica con alti valori di ozono la concentrazione e la distribuzione degli inquinanti, specie nella zona alpina meridionale, sono influenzate dalle circolazioni locali montagna-pianura e monte-valle come evidenzia la presenza di strati di accumulo d'ozono molto sviluppati in val d'Adige. Tali strutture verticali non possono venir rilevate mediante stazioni di misura al suolo.

Sulla base dei valori di concentrazione degli inquinanti primari accertati durante i giorni di misurazione, le analisi di sensitività relative alla formazione di ozono in dipendenza del carico regionale di NO_x e VOC, dimostrano che i valori massimi di ozono nella zona delle Alpi meridionali potrebbero effettivamente venir ridotti con una diminuzione dei VOC; al contrario nelle alpi settentrionali ciò si potrebbe conseguire con una diminuzione degli NO_x . In entrambi i settori alpini, nei giorni di rilievo il rapporto NO_x/VOC si è situato in vicinanza del limite di passaggio tra i regimi di formazione di ozono controllati rispettivamente dagli NO_x e dai VOC, cosicché per una generale diminuzione del carico di ozono nelle Alpi dovrebbe essere perseguita una riduzione di entrambi questi inquinanti primari. A causa delle specifiche condizioni orografiche e meteorologiche dell'area alpina, possono essere assai utili misurazioni locali.

Institutionen der MEMOSA-Arbeitsgruppe

Bayerisches Staatsministerium für
Landesentwicklung und Umweltfragen,
München

Amt der Tiroler Landesregierung,
Landesforstdirektion Innsbruck

Autonome Provinz Bozen
– Forstwirtschaftsinspektorat
– Chemisches Landeslabor

Provincia Autonoma Di Trento
– Servizio Foreste Caccia e Pesca
– Servizio Protezione Ambiente

Centro di Ricerca Termonucleare/ENEL
Milano

Gesellschaft für Strahlen- und
Umweltforschung, Neuherberg

Institut für Atmosphärische Umweltforschung
der FhG, Garmisch-Partenkirchen

AERODATA Luftchemie, Braunschweig

DLR, Institut für Physik der Atmosphäre,
Oberpfaffenhofen

Istituzioni del gruppo di lavoro MEMOSA

Bayerisches Staatsministerium für
Landesentwicklung und Umweltfragen,
München

Amt der Tiroler Landesregierung,
Landesforstdirektion Innsbruck

Provincia Autonoma di Bolzano
– Ispettorato per le Foreste
– Laboratorio Chimico Provinciale

Provincia Autonoma di Trento
– Servizio Foreste, Caccia e Pesca
– Servizio Protezione Ambiente

Centro di Ricerca Termica Nucleare/ENEL
Milano

Gesellschaft für Strahlen- und Umwelt-
forschung, Neuherberg

Institut für Atmosphärische Umweltforschung
der FhG, Garmisch-Partenkirchen

AERODATA Luftchemie, Braunschweig

DLR, Institut für Physik der Atmosphäre,
Oberpfaffenhofen

Impressum

Herausgeber:

DLR, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und
Raumfahrt, Oberpfaffenhofen

Anschrift der Autoren:

H. Schlager, J. Graf
DLR, Institut für Physik der Atmosphäre
Oberpfaffenhofen
D-82234 Wessling

Druckherstellung:

Peter Fuchs GmbH, München