

## Schadstofftransporte in die Alpenregion

Jutta Graf und Dieter Heimann  
DLR, Institut für Physik der Atmosphäre

### Abstract

Transport paths of air pollutions originating from major emission sources around the Alps are investigated using a mesoscale model. Eight numerical experiments of a daily cycle with varying direction of the prescribed large-scale air flow yield typical mesoscale flow patterns modified by the Alpine orography. The simulations show that air pollutants are carried into the Alpine area only for three distinct large-scale flow directions, but are transported around the Alps or remain in the Alpine forelands for other directions.

### 1. Einleitung

In den Alpen nehmen in den letzten Jahren die Waldschäden gravierend zu. Als Ursache hierfür können Luftschadstoffe, wie z.B. Stickoxide, Kohlenwasserstoffe und Ozon in Betracht kommen. Darauf weisen auch die von der DLR durchgeführten Flugzeugmessungen der großräumigen Verteilung verschiedener Luftschadstoffe im Zusammenhang mit den Waldschäden und die Messung der Vertikalverteilung des Ozons im Alpenbereich hin (Paffrath und Peters, 1987; Paffrath et al., 1987; Paffrath, 1988). Meßergebnisse kontinuierlicher Stationen wurden bezüglich luftchemischer Prozesse von Seiler (1988) vorgestellt. Die in den Alpen gemessenen Schadstoffe stammen zum einen aus Quellen, die in den Alpen selbst lokalisiert sind, wie z.B. Autobahnen, zum anderen werden sie aus den angrenzenden Industrie- und Ballungsgebieten in die Alpenregion verfrachtet. Umweltschützende Maßnahmen erfordern nun Kenntnisse über die Herkunft dieser Schadstoffe. Aus den üblichen Messungen ist nicht erkennbar, ob die Luftverunreinigungen lokal verursacht wurden oder durch Ferntransporte in die Alpen gelangt sind. Mit Hilfe von Modellrechnungen kann untersucht werden, ob überhaupt ein Transport in die Alpenregion stattfinden kann.

### 2. Vorgehensweise

#### 2.1. Modellbeschreibung

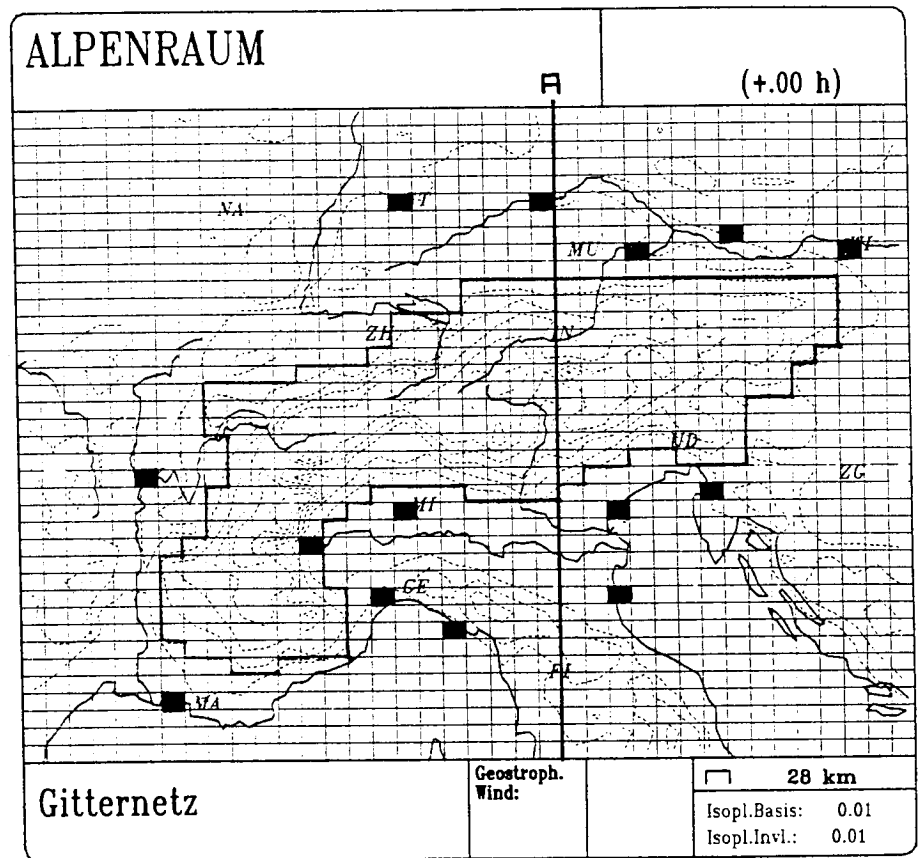
Die vorliegende Untersuchung wird in einem Gebiet durchgeführt, das der Mesoskala  $\alpha$  zuzuordnen ist. Folglich ist die Annahme der Hydrostasie gerechtfertigt und es wird das dreidimensionale, hydrostatische Modell (Heimann, 1990) verwendet. Die dem Modell zugrundegelegten Gleichungen - Bewegungsgleichungen, Kontinuitätsgleichung, hydrostatische Gleichung, thermodynamische Gleichung, Advektions-Diffusionsgleichung für Luftbeimengungen - werden in einem  $\lambda - \varphi$ -Gitter formuliert. Eine transformierte z-Koordinate berücksichtigt die Orographie. Aus der Gleichung für die turbulente kinetische Energie werden die vertikalen Diffusionskoeffizienten berechnet. Feuchteprozesse und Niederschlagsbildung können ebenfalls simuliert werden, sind aber für diese Studie nicht erforderlich.

Als Anfangsbedingung wird ein reibungsfreies, horizontal homogenes und geostrophisch balanziertes Windfeld über flachem Gelände vorgegeben. Während der ersten Integrationsstunde wird die Orographie langsam aufgebaut ("Diastrophie"). Die Strahlungsrandbedingung an den seitlichen Rändern, sowie eine durchlässige Modelobergrenze haben sich als brauchbar erwiesen. Am Modellunterrand werden alle Geschwindigkeitskomponenten und die turbulente kinetische Energie Null gesetzt, für die übrigen Modellvariablen deren Gradient.

## 2.2. Eingabedaten und Simulationsstrategie

Das für die Studie verwendete Modellgebiet ist in Bild 1 dargestellt. Die Höhenlinien sind mit einem Isolinienabstand von 400 m punktiert eingezeichnet.

Bild 1: Modellgebiet mit den berücksichtigten Emittenten. Die Linie entlang des Alpenrisses stellt die fiktive Wand dar, durch die der Schadstofffluß berechnet wird. Linie A kennzeichnet die Position des Nord-Süd-Schnittes.



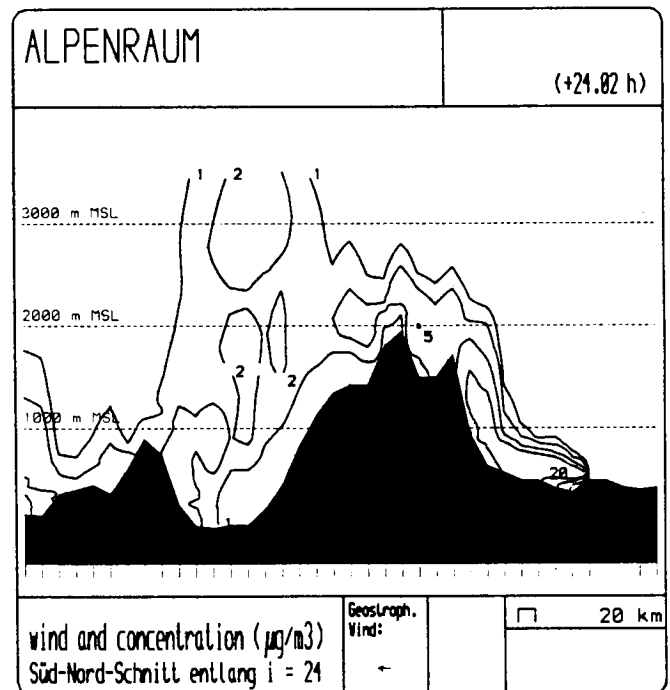
In der Mitte des Gebietes sind die Alpen erkennbar. Das Modellgebiet wird horizontal in 40 x 40 Maschen eingeteilt. Daraus ergibt sich ein Gitterabstand  $\Delta y \cong 20\text{km}$  in Nord-Süd-Richtung und ein Gitterabstand  $\Delta x \cong 30\text{km}$  in Ost-West-Richtung. Mit dieser Auflösung ist es zwar möglich die Alpen in ihrer Grundstruktur zu erfassen, einzelne Täler können aber nicht aufgelöst werden. Vertikal wird das Modellvolumen in 20 Schichten eingeteilt. In den unteren Schichten beträgt die Mächtigkeit 50 m und nimmt nach oben hin zu. Die Modelobergrenze liegt bei 9000 m.

Zur Berechnung der Immissionsverteilung und des Schadstofftransportes wurden 14, den Alpen nahegelegene Industriegebiete berücksichtigt, deren Emissionen gleich der Einheitsquellstärke gesetzt werden (Bild 1). Die Quellhöhe ist jeweils 125 m. Zur Abschätzung des Transportes wird der Schadstofffluß durch eine fiktive Wand entlang des Alpenrandes berechnet (Bild 1). Der Fluß ist definitionsgemäß positiv, wenn

Schadstoffe in die Alpen transportiert werden und negativ, wenn ein Fluß aus den Alpen stattfindet. Der Fluß wird entlang dieser Fläche integriert und höhenabhängig berechnet.

In Abhängigkeit von der meteorologischen Situation, in erster Linie von der großräumigen Anströmrichtung, werden mögliche Transportwege in die Alpenregion bestimmt. Dazu werden 8 verschiedene Simulationen ausgeführt, die sich nur in der großräumigen Anströmrichtung unterscheiden. Der Betrag des geostrophischen Windes beträgt bei allen Rechnungen 10 m/s, für die Richtung wurden 0°, 45°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° ausgewählt. Das Temperaturfeld wurde so initialisiert, daß die Atmosphäre unterhalb 1000 m ü.NN anfangs adiabatisch geschichtet ist. Der Tagesgang der bodennahen Temperatur, der im Modell ebenfalls eingegeben wird, weist eine Amplitude von ca. 6 K auf. Die maximale Temperatur wird am Spätnachmittag erreicht, das Temperaturminimum liegt in den Morgenstunden. Simuliert wurden 24 Stunden, beginnend um 0 Uhr, wobei sich die Instationarität aufgrund des Tagesganges der bodennahen Temperatur einstellt.

Bild 2: Süd-Nord Vertikalschnitt der Schadstoffkonzentration entlang der Schnittlinie A (siehe Bild 1) nach 24 h Simulationszeit. Die großräumige Windrichtung beträgt 45°.



### 3. Diskussion der Ergebnisse

Die Rechnungen zeigen, daß in den meisten Fällen kein Schadstofftransport über die Alpen stattfindet. Lediglich bei einer Anströmung aus 45° gelangen Luftbeimengungen aus den Industriegebieten nördlich der Alpen (Ingolstadt, Burghausen) entlang des Inntals in Richtung Brenner (Bild 2). Dieser Transport von Norden nach Süden findet bei einer großräumigen Windgeschwindigkeit von 10 m/s erst nach 24 Stunden Simulationszeit statt. Bei höheren Windgeschwindigkeiten wird dieser Transport natürlich früher eintreten. In Bild 4 (oben) ist die Konzentrationsverteilung zusammen mit dem Windfeld in 25 m über Grund um 0 Uhr dargestellt. Der Einfluß der Orographie auf das Strömungsfeld ist am Alpennordrand deutlich in Form von Hangabwinden mit süd- bis südwestlichen Winden erkennbar. Abhängig von der thermischen Schichtung der Atmosphäre bilden sich die orographisch bedingten

Strömungsmuster unterschiedlich stark aus und die Windrichtung zeigt folglich einen tageszeitlichen Verlauf. Bei stabiler Schichtung, die in den Nacht- und Morgenstunden vorherrscht, ist das bodennahe Windfeld räumlich sehr inhomogen. Im Alpenvorland kommt der Wind in den Morgenstunden aus Südwest, dreht im Laufe des Tages über Nordwest nach Nord und in den Abendstunden zurück auf Südwest. In der Poebene sind am Vormittag westliche Winde vorherrschend, am Nachmittag dagegen nordöstliche bis östliche.

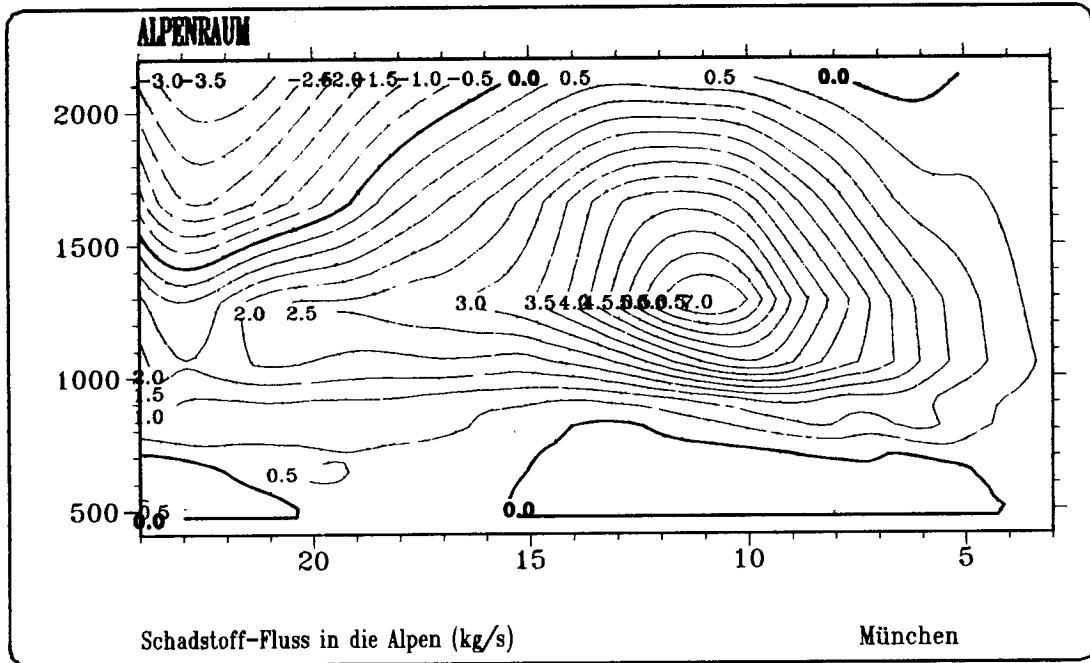


Bild 3: Zeit-Höhenschnitt des Schadstoffflusses durch die fiktive Wand (siehe Bild 1) in die Alpen für die Anströmrichtung 45°.

Mit diesen tageszeitlich unterschiedlichen Strömungen werden auch die Schadstoffe in unterschiedliche Richtungen verfrachtet. Um 0 Uhr (Bild 4, oben) werden die maximalen Konzentrationen für die Gegend westlich von München, der nördlichen Adria und der oberen Poebene berechnet. Vormittags dagegen ist das Gebiet um Burghausen und Linz mit hohen Konzentrationswerten belastet.

Für die Anströmrichtung 45° und 135° werden die maximalen Flüsse durch die fiktive Wand berechnet. Für die Richtung 45° ergibt sich ein maximaler Fluß in den Vormittagsstunden in ca. 1200 m ü.NN (Bild 3). Am nördlichen Alpenrand wird die Strömung in den Vormittagsstunden nach Osten und Westen abgelenkt, es findet eine Umströmung der Alpen statt. Mit dieser Strömung werden die Schadstoffe aus den Industriegebieten Ingolstadt, Burghausen und Linz sowohl nach Osten als auch nach Westen verfrachtet. Ein Teil der Schadstoffe gelangt auch durch die fiktive Wand in die Alpen. Im Laufe des Spätnachmittags dreht der Wind am Alpennordrand auf Nord und die Schadstoffe werden weit in die Alpen verfrachtet. Der Fluß ist zu dieser Tageszeit allerdings geringer, was darauf zurückzuführen ist, daß am Ost- und Südrand auch ein Transport aus den Alpen hinaus stattfindet.

Ein Transport von Schadstoffen aus den Industriegebieten in der Poebene über die Alpen nach Norden wird für die Anströmrichtung 180° und 225° berechnet. Bei 180° gelangen sie hauptsächlich über die Westalpen, bei 225° dagegen auch über den östlichen Teil der Alpen und erreichen das Inntal (Bild 4, unten). Bei dieser Windrichtung gelangen Luftbeimengungen aus Italien über den Alpenhauptkamm nach Norden.



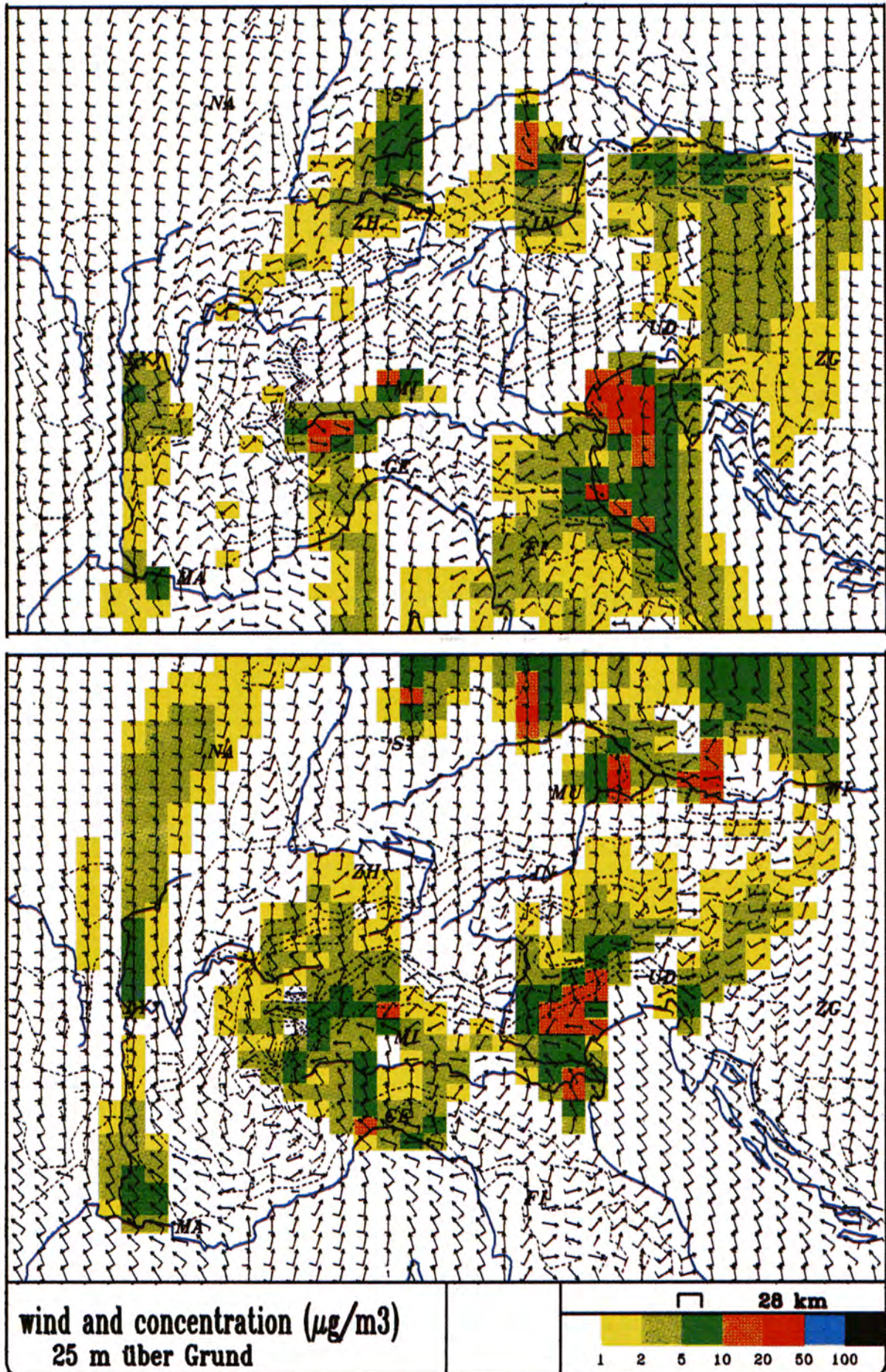


Bild 4: Windfeld und Konzentrationsverteilung in 25 m über Grund nach 24 Stunden Simulationszeit. Anströmrichtung 45° (oben), Anströmrichtung 225° (unten).



#### 4. Schlußfolgerung

Die Simulationen haben gezeigt, daß nur bei einigen großräumigen Windrichtungen ein Transport von Norden nach Süden, bzw. von Süden nach Norden stattfindet. Folglich kann man davon ausgehen, daß hohe Konzentrationen in den Alpen auf lokale Emittenten zurückzuführen sind. Zu diesem Ergebnis führten auch die vor kurzen durchgeführten Flugzeugmessungen der DLR in den Alpen.

#### Literatur:

- Heimann, D., 1990: Three-dimensional modelling of synthetic cold fronts approaching the Alps. *Meteorol.Atmosph.Phys.* 42, 197-219.
- Paffrath, D., 1988: Untersuchung über die Verteilung und Bildung von Ozon im Alpenbereich aus Flugzeugmessungen. In Symposium "Verteilung und Wirkung von Photooxidantien im Alpenraum", 11.-15. April 1988, Garmisch-Partenkirchen, GSF-Bericht 17/88, 242-251.
- Paffrath, D. und Peters, W., 1987: Untersuchung großräumiger Schadstoffbelastungen im Zusammenhang mit den Waldschäden in Bayern. Forschungsbericht DFVLR-FB-87-17.
- Paffrath, D., Peters, W. und E. Kirchschrager 1987: Untersuchung der Wirkung von Luftschadstoffen auf den Wald mittels Waldkartierung und Immissionsmessungen. 2. DFVLR-Statusseminar "Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung", 30.11.-2.12. 1987, Oberpfaffenhofen, Tagungsband 1988, Hrsg.: DFVLR-Tagungsbüro "Waldschäden".
- Seiler, W., 1988: Die Waldschäden aus der Sicht der Luftchemie. In Symposium "Verteilung und Wirkung von Photooxidantien im Alpenraum", 11.-15. April 1988, Garmisch-Partenkirchen, GSF-Bericht 17/88, 48-75.