

Windsysteme und Transport von Luftverunreinigungen im Großraum Marseille: ESCOMPTE

Ch. Kottmeier, N. Kalthoff, U. Corsmeier, F. Fiedler, IMK

Ziele und Durchführung von ESCOMPTE

Ozon, ein entscheidender Luftschadstoff während der Entwicklung sogenannter Sommersmogepisoden, kann beim Menschen ernsthafte Gesundheitsprobleme verursachen und Ökosysteme, Agrarkulturen und Materialien schädigen. Es entsteht, wenn bestimmte luftverunreinigende Stoffe aus Industrie und Verkehr unter Einwirkung von Sonnenlicht chemisch reagieren. Gemäß einer Richtlinie der Europäischen Union müssen die Regierungen die Öffentlichkeit unterrichten, wenn Überwachungsstationen Ozonkonzentrationen oberhalb eines kritischen Schwellenwertes feststellen, der mit 180 Mikrogramm Ozon je Kubikmeter Luft als Mittelwert während einer Stunde angegeben ist. Warnungen vor hohen Ozonkonzentrationen sind aber vor allem dann sinnvoll, wenn sie frühzeitig vor ihrem Eintreten ausgesprochen werden, so dass Handlungsmöglichkeiten durch Reduktion von Emissionen gegeben sind. Für die Ozonprognose werden Chemie-Transportmodelle (CTM) eingesetzt, die unter anderem auch am Institut für Meteorologie und Klimaforschung entwickelt wurden.

Nach Evaluierungen der Europäischen Umweltagentur wurde z.B. im Zeitraum von April bis August 2002 der Schwellenwert von $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 11 der 15 EU Mitgliedsstaaten und in 6 von 12 weiteren europäischen Staaten, die Daten bereitstellten, überschritten. Eine Überschreitung trat in mindestens einem dieser 27 Länder an 120 der 153 erfassten Tage auf. Die häu-

figsten Überschreitungen wurden in den Monaten Juni und Juli gemessen. Der Schwellenwert für die Unterrichtung der Bevölkerung wurde in Frankreich, Griechenland, Italien und Spanien in allen fünf überwachten Monaten überschritten. Die Gesamtüberschreitungen waren in Südfrankreich, in der italienischen Poebene und in Mittelitalien am höchsten.

Die realistische Simulation solcher Photosmogsituationen stellen an Chemie-Transportmodelle besonders hohe Anforderungen, wenn die Strömungsverhältnisse durch Sekundärzirkulationssysteme wie z.B. Land-Seewind- und Berg-Talwind-Zirkulationen beeinflusst werden. Durch umfangreiche Messprogramme stehen bereits gute Datensätze zur Modellüberprüfung und -verbesserung, z.B. für flache Gebiete beim BERLIOZ-Experiment 1998 (Becker et al. [2]; Corsmeier et al. [3]) und den südwestdeutschen Mittelgebirgsraum bei TRACT (Fiedler und Borrell [4]), zur Verfügung. Bisher wurde aber noch kein vergleichbarer Datensatz für gebirgige Küstenregionen gewonnen.

Das unter französischer Koordination durchgeführte Forschungsvorhaben ESCOMPTE diente der Gewinnung eines solchen geeigneten Datensatzes zur Überprüfung und Verbesserung von Modellen zur Berechnung des Transports und der chemischen Umwandlungen von Luftschadstoffen in belasteten Küstenregionen. Es war Ziel des Programms, die dreidimensionalen Verteilungen atmosphärischer und chemischer Größen sowie deren zeitliche Va-

riationen zu erfassen. Das Messprogramm fand unter Beteiligung des IMK im Juni und Juli 2001 im Großraum Marseille statt. In diesem Gebiet treten in den Sommermonaten regelmäßig Situationen mit großer luftchemischer Belastung auf, die ihre Ursache in den Emissionen der Millionenstadt Marseille und ihrer hoch industrialisierten Umgebung haben. Die turbulente Diffusion und der Transport erfolgen in dieser Region unter dem Einfluss verschiedener komplexer Windsysteme, die sich durch das Auftreten der regionalen Strömungskanalisation im Rhonetal (Mistral), ein tagesperiodisches Land-Seewindsystem und ein überlagertes Gebirgswindsystem über den französischen Seealpen ergeben. Das IMK beteiligte sich unter anderem mit dem Forschungsflugzeug DO128, zwei Radiosondenstationen und verschiedenen Bodenmessstationen an ESCOMPTE. Insgesamt kamen 7 Flugzeuge, 23 Bodenstationen, 20 Fernerkundungssysteme und 2 Schiffe zum Einsatz (Abb. 1). Neben der Beteiligung an abgestimmten Messungen für die Kernziele von ESCOMPTE wurde als eigenes Forschungsziel auch Spurenstofftransporte durch Konvektion untersucht.

Verteilung von Luftschadstoffen während einer Photosmog-Episode

Photo- oder Sommersmogsituationen entwickeln sich in den Ballungsgebieten am Mittelmeer ähnlich wie in Mitteleuropa bei wind-schwachen Hochdrucklagen mit hoher Sonneneinstrahlung und

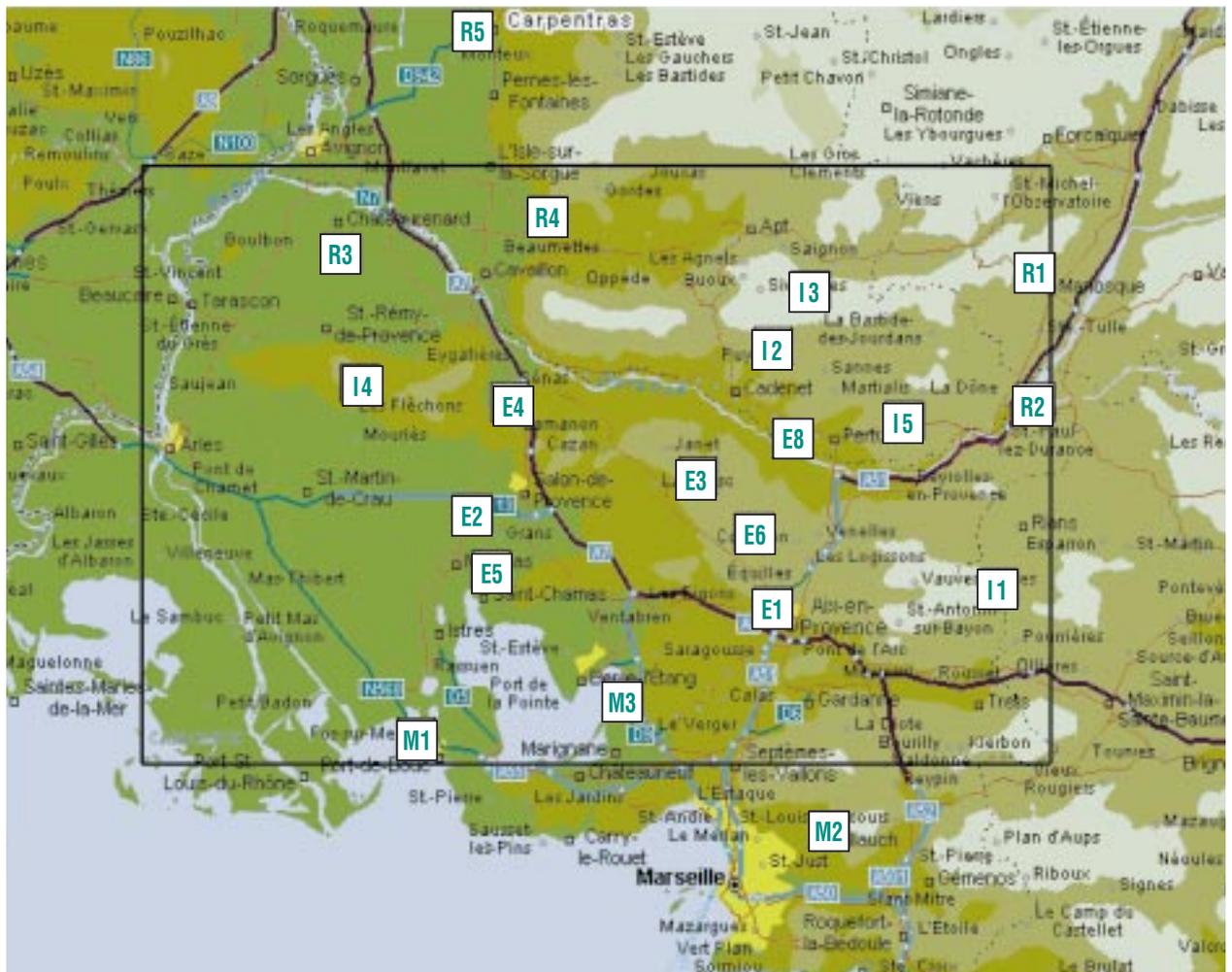


Abb. 1: Stationsnetz mit bodennahen Messungen meteorologischer und luftchemischer Parameter sowie mit Radar- und Lidarmessungen. Das IMK betrieb unter anderem zwei Radiosondenstationen bei Vinon (R1) and St. Remy (R3) sowie eine Station für Energiebilanz-, Turbulenz- und Windprofilmessungen (SODAR) bei R1. Das Forschungsflugzeug DO128 wurde von Avignon aus im gesamten Gebiet im Höhenbereich bis 4 km eingesetzt.

hohen Emissionsraten von Ozonvorläufersubstanzen, vor allem von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen. In solchen Situationen bildet sich häufig nachts über Land eine Bodeninversion aus, in der sich früh morgens zunächst die primär emittierten Stoffe aufgrund fehlender Durchmischung anreichern. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung nimmt in dieser Luft durch photochemische

Produktion der Ozongehalt in wenigen Stunden um 40 bis 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zu.

Eine solche Wettersituation war auch während ESCOMPTE zwischen dem 24. und 27. Juni 2001 gegeben. Am 25. Juni 2001 setzte in den Vormittagsstunden an der Küste der Seewind ein, der die von Marseille und seinen umgebenden Industriegebieten emittierten Stoffe landeinwärts transportierte.

Gleichzeitig erfolgte bei zunehmender Sonneneinstrahlung photochemische Ozonbildung, durch die die Stickoxidkonzentration in der belasteten Luftmasse reduziert wurde. Die Ozonbelastung in den landeinwärts gelegenen Gebieten dagegen hängt von den Emissionen, der Effizienz der luftchemischen Umwandlungen, den Transportvorgängen und der turbulenten Vermischung in der pla-

netarischen Grenzschicht, d.h. bis etwa 1000 m Höhe über der Erdoberfläche, ab. Während an diesem Tag an den Küstenstationen maximale Konzentrationen von knapp $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen wurden, traten 50 km landeinwärts über den Mittelgebirgen am Alpenrand fast $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf.

Durch die Messungen konnte gezeigt werden, dass sich das Land-Seewind-System im Rhonedelta deutlich weiter nordwärts erstreckt als an der Cote d'Azur. In die Alpen strömt die belastete Luft vor allem durch die Taleinschnitte ein, was etwa beim annähernd küstenparallelen Durancetal durch den Umweg über das Rhonetal eine Verzögerung der Entwicklung bedeutet. Dies wird durch Messungen an der IMK-Bodenstation in Vinon deutlich (Abb. 2). Während am Vormittag der Wind schwach war und aus verschiedenen Richtungen wehte, stellte sich dort ab 13 Uhr eine fast talparallele Strömung mit Windgeschwindigkeiten von ca. 3 m/s sein. Etwas mehr als eine Stunde später stieg die Ozonkonzentration abrupt an und erreichte in Vinon um 16 Uhr einen Wert von $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$, bevor in den Nachtstunden erwartungsgemäß bodennaher Abbau von Ozon die Konzentrationen wieder sinken ließ.

An diesem Tag wurden mit mehreren Messflugzeugen zu verschiedenen Zeiten auf jeweils ähnlichen Flugmustern die räumlichen Verteilungen der Spurenstoffe und meteorologischen Größen erfasst. Der Flug der vom IMK eingesetzten DO128 in einer Höhe von 800 m bis 900 m (Abb. 3) zeigt, dass die bodennah gemessenen Ozonwerte den Werten in der

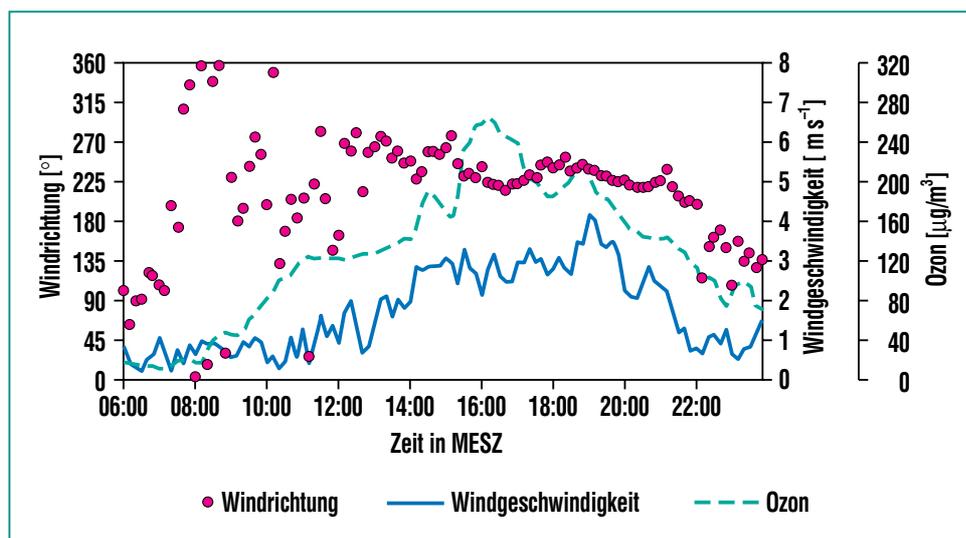


Abb. 2: Tagesgang der Windgeschwindigkeit, Windrichtung und der Ozonkonzentration aus IMK-Messungen am 25. Juni 2001 in Vinon (R1).

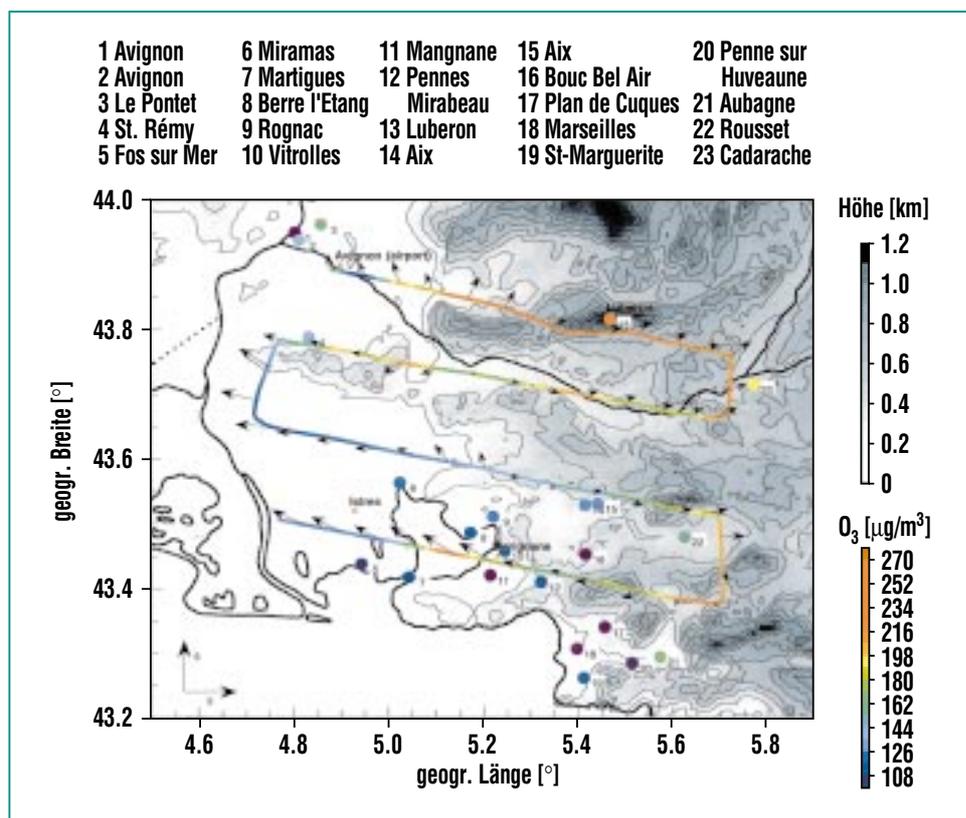


Abb. 3: Verteilung der Ozonkonzentration aus bodennahen Messungen des AIRMARAIX-Messnetzes und aus Messungen der DO128 mit den gemessenen Windvektoren (Referenzpfeil 5 m/s) am Nachmittag des 25. Juni 2001 in 920 m Flughöhe. Die Einzelpunkte geben die am Boden gemessenen Stundenmittelwerte von Ozon an.

Grenzschicht in erster Näherung entsprechen. Dagegen blieb die Atmosphäre in 2800 m Höhe unbeeinflusst. Die Bodenwerte werden erheblich durch Emittenten in ihrem Nahbereich, vor allem durch Verkehrsemissionen, beeinflusst. Auch in 800 m sind noch deutlich kleinräumige Variationen zu erkennen. Dies liegt an den Vermischungsvorgängen, die durch konvektive Wirbel erfolgen. Hierbei kann in Aufwindgebieten bodennahe ozonreiche Luft innerhalb von wenigen Minuten in die obere Grenzschicht gelangen. Die Abwinde dagegen beziehen oft Luft aus der unbelasteten Luft oberhalb der Grenzschicht mit ein und sind mit Minima verbunden.

Um die mittlere Entwicklung der Ozonverteilung zu bestimmen, wurde aus den Messungen auf den Flugwegen durch Glättung

und räumliche Interpolation eine Verteilung bestimmt (Thürauf [5]). Hierbei wurde das Kriging-Verfahren eingesetzt, das besonders günstige Interpolationseigenschaften besitzt und unter anderem eine Fehlerschätzung der Interpolation ermöglicht. Die mittlere Verteilung von NO_x (Abb. 4) zeigt erwartungsgemäß, dass die maximalen Stickoxidkonzentrationen nicht ortsgleich mit den Ozonmaxima auftraten. Beispielsweise werden am Gipfel des Luberon und im gesamten östlichen Rhonetal die höchsten Ozonkonzentrationen gemessen, während hohe Werte des Stickoxids nur am rhoneseitigen Eingang des Durancetals auftreten, während sie auf dem Transportweg in das östliche Gebiet mutmaßlich photochemisch abgebaut wurden. Die hohen Stickoxidwerte über dem

Mt. St. Victoire (Bildmitte rechts) sind bei schwachem Westwind als Emissionen von Marseille zu erklären, die aufgrund des kürzeren Transportweges noch nicht zur Ozonbildung beigetragen haben. Insgesamt gesehen führen die gleichzeitig wirkenden Umverteilungen der Spurenstoffe durch die Windsysteme und die luftchemischen Prozesse zu einer komplexen räumlichen Struktur, deren Interpretation nur durch Chemie-Transportmodelle mit Datenassimilation aller verfügbaren Messungen möglich sein wird.

Die Beiträge zur Änderung mittlerer Ozonkonzentrationen an festen Orten lassen sich zumindest qualitativ durch die Messungen abschätzen. Sie setzen sich aus der horizontalen Advektion des Spurenstoffs mit dem mittleren Wind, der vertikalen Advektion,

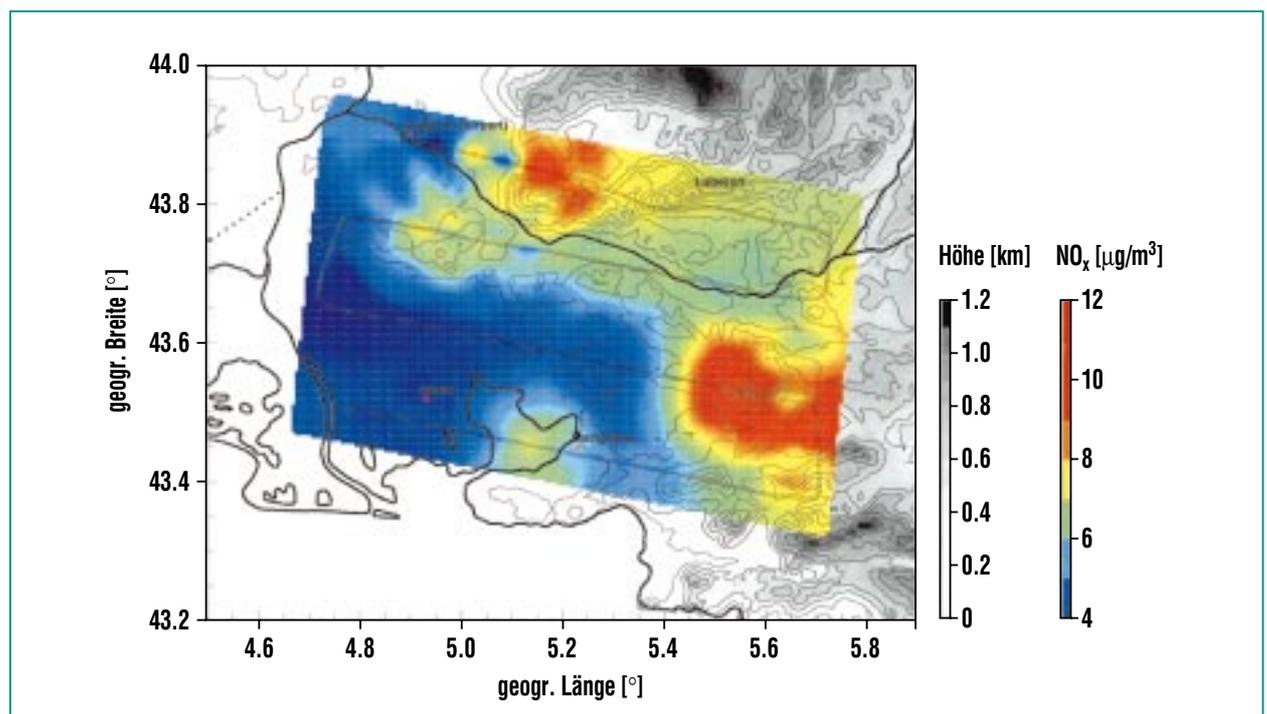


Abb. 4: Kriging-interpolierte Verteilung (geglättet) von Stickoxid (NO_x) aus Messungen der DO128 am Nachmittag des 25. Juni 2001 in 920 m Flughöhe.

der Änderung des turbulenten Vertikaltransports und chemischen Umwandlungen zusammen. Für eine Berechnung der einzelnen o.g. Beiträge lagen die umfangreichsten Daten für die Gebiete um Vinon (R1) und Marseille/Vallon Dol vor. Es ergibt sich, dass die beobachtete zeitliche Änderung der Ozonkonzentration zu keiner Tageszeit und in keinem der beiden Gebiete allein durch chemische Umwandlungen zu erklären ist. So ist im Gebiet um Vinon trotz einer geringen Zunahme der Ozonwerte um nur $4 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \text{ h})$ aufgrund der starken Advektion von Ozon mit einem Beitrag von $20 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \text{ h})$ auf eine intensive photochemische Ozonbildung zu schließen. Dieses Ergebnis stimmt grundsätzlich mit vielen Untersuchungen in anderen Gebieten, z.B. im Oberrheingraben, überein. Allerdings ist in Südfrankreich der Einfluss der regionalen Windsysteme noch schwieriger zu ermitteln als in anderen Gebieten.

Vertikalaustausch durch Konvektion

Aufgrund der hohen Sonneneinstrahlung und der relativ trockenen Erdoberfläche entwickelt sich an Sommertagen in der Bergregion des ESCOMPTE-Gebietes intensive Turbulenz in Form konvektiver Wirbel. Die Messungen am 17. Juni 2001 dokumentieren eine Situation mit intensiver Konvektion bei nordwestlichem Wind und Grenzschichthöhen von 2000 m. Es traten allerdings keine hohen Spurenstoffkonzentrationen auf, da die emittierten Spurenstoffe über das Mittelmeer verfrachtet wurden. Die Messungen eignen sich aber sehr

gut für Untersuchungen der Turbulenzstruktur und der Grenzschichtentwicklung (Hasel [6]). Bei dem Messflug über dem Randbereich der Alpen am Nachmittag wurden in Höhen von ca. 950 m, 1700 m und 3000 m identische Flugmuster geflogen. Dabei traten sehr intensive Auf- und Abwinde mit bis zu 8 m/s über den Gebirgszügen des Mt. St. Victoire und Luberon sowie dem Durancetal auf (Abb. 5). Aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten waren orographische Einflüsse auf die Konvektion nicht nachweisbar. Die Aufwinde waren mit erhöhten NO_2 -Werten verbunden, da sie die bodennah emittierten Stoffe aufwärts transportierten. Dagegen waren die ebenfalls sehr heftigen Abwinde trockener als die Umgebungsluft, was auf die Einmischung trockener Luft aus Höhen

oberhalb von 2 bis 3 km zu erklären ist.

Die Untersuchungen zur Bedeutung der Konvektion für den Vertikalaustausch, wie sie bei ESCOMPTE exemplarisch begonnen wurden, sollen in Zukunft noch intensiviert werden. Hierzu wurde im Jahr 2002 das Messprogramm „Vertikaler Austausch und Orographie (VERTIKATOR)“ als Teil des Atmosphärenforschungsprogramm AFO 2000 des BMBF unter Koordination des IMK durchgeführt. Seitens sechs beteiligter Helmholtzzentren sind darüber hinaus mehrere große Feldexperimente in verschiedenen Klimazonen der Erde unter dem Titel „Transporte und chemische Umsetzungen in konvektiven Systemen (TRACKS)“ geplant.

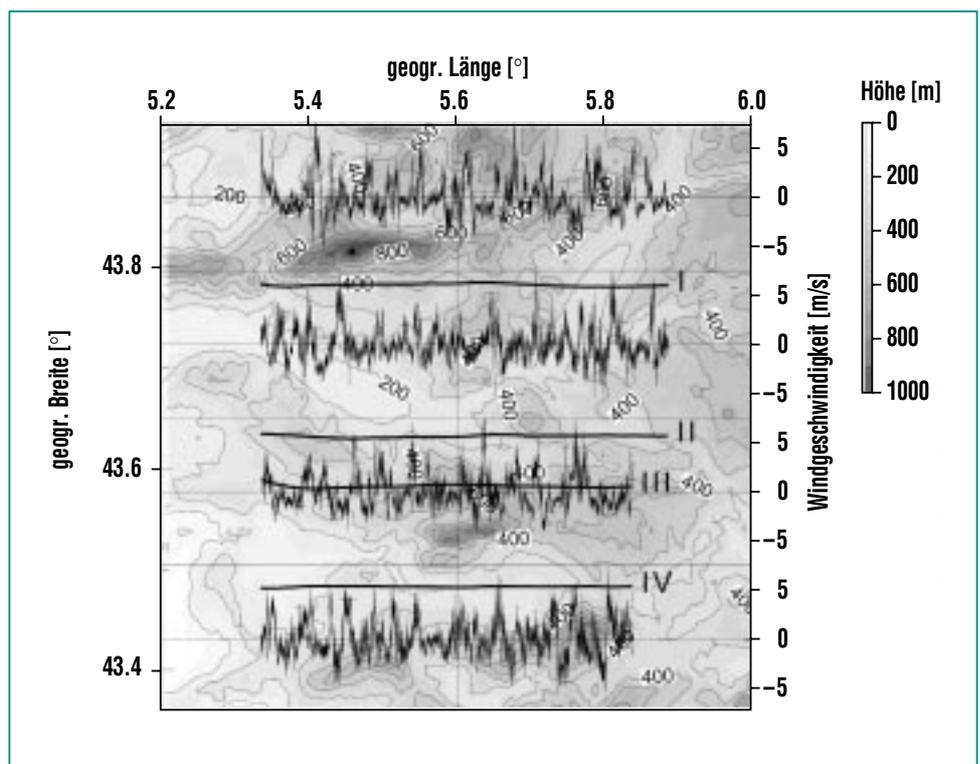


Abb. 5: Vertikalgeschwindigkeiten auf den Flugabschnitten I bis IV (dick ausgezogen) in einer Höhe von 950 m am Nachmittag des 17. Juni 2001.

Schlussbemerkungen

Durch die koordinierten Messungen während des ESCOMPTE-Experimentes entstanden wertvolle Datensätze zur Analyse atmosphärischer Transportprozesse und zur Überprüfung und Verbesserung von Chemie-Transportmodellen, wie sie mit KAMM/DRAIS auch am IMK betrieben werden. Die Beteiligung an

dem Programm ermöglicht dem Institut vollen Zugang zum Gesamtdatensatz. Das Modellsystem kann auf diese Weise auch unter Randbedingungen überprüft werden, wie sie weltweit in vielen hoch belasteten Ballungszonen in Küstenregionen herrschen. Hierdurch soll auch dem erkennbaren Forschungsbedarf zu Umweltproblemen in Ländern der dritten Welt Rechnung getragen werden, in

denen sich derzeit große Umwälzungen der Industrie und Wirtschaft, der Bevölkerungs- und Verkehrsentwicklung und der Schadstoffemissionen vollziehen.

Literatur

- [1] B. Cros , P. Durand , E. Frejafon, C. Kottmeier, P. E. Perros, V-H. Peuch, J.L. Ponche, D. Robin, F. Said , G. Toupance, H. Wortham, *Atmospheric Research*, 2003.
- [2] K. H. Becker, B. Donner, S. Gäb, *Proceedings of EUROTRAC Symposium 98 Band 2*, WIT Press, Southampton, 669-672, 1999.
- [3] U. Corsmeier, N. Kalthoff, B. Vogel, M.-U. Hammer, F. Fiedler, Ch. Kottmeier, A. Volz-Thomas, S. Konrad, K. Glaser, B. Neiniger, M. Lehning, W. Jaeschke, M. Memmesheimer, B. Rappenglueck, G. Jakobi, *J. Atmos. Chem.*, 42 , 289-321, 2002.
- [4] F. Fiedler, P. Borrell, *Springer* , 223-268, 2000.
- [5] J. Thürauf, *Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe*, 2002.
- [6] M. Hasel, *Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe*, 2002.