

**Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln**  
mit dem  
**Rheinischen Institut für Umweltforschung an der Universität zu Köln (RIU)**

**ATMOFAST – Das Teilvorhaben „Modellsimulation“**

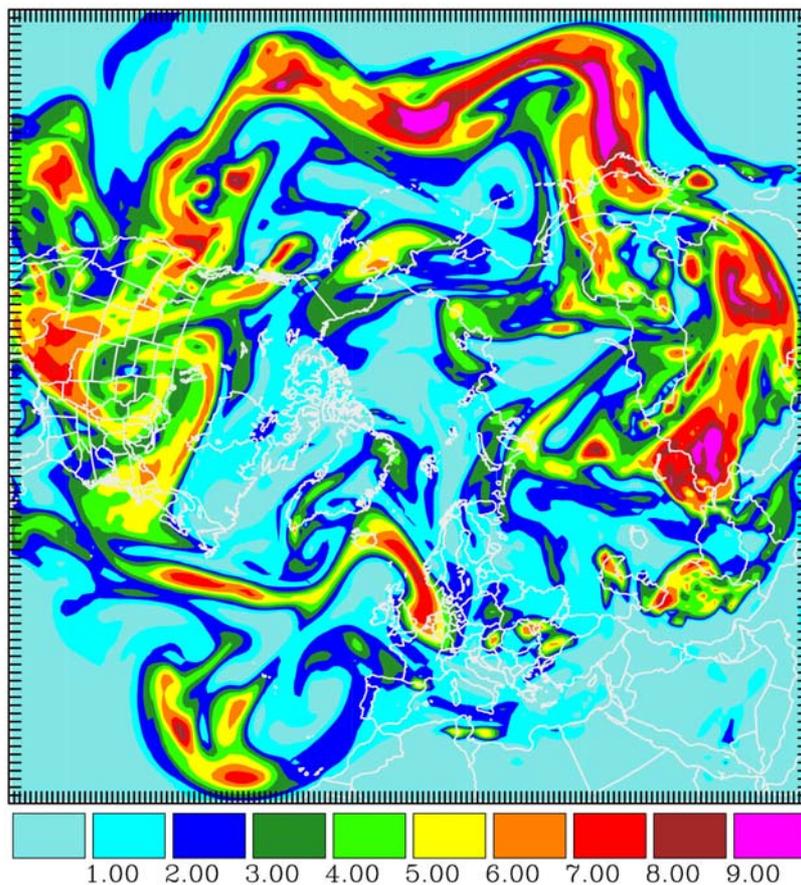
*Abschlußbericht*

*Auftraggeber:* Bundesministerium für Bildung und Forschung

*Auftragskennzeichen:* 07AFT09

*Förderzeitraum:* 1.4.2001 bis 31.3.2005

*Fertigstellung des Berichts:* 30.11.2005



*Durchführende Institute:* Rheinisches Institut für Umweltforschung an der Universität zu Köln  
(RIU, Aachener Str. 201-209, 50931 Köln)

*Projektleiter:* Hendrik Feldmann (hf@eurad.uni-koeln.de)

Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln

*Projektleiter:* Michael Kerschgens (kerschgens@meteo.uni-koeln.de)

*Beteiligte Wissenschaftler:* H. Feldmann, M. Memmesheimer, H.J. Jakobs, A. Ebel

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN <b>geplant</b>	2. Berichtsart <b>Schlussbericht</b>
3a. Titel des Berichts <b>ATMOFAST - Teilprojekt „Modellsimulation“</b>	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) <b>Feldmann, H., Memmesheimer, M., Jakobs, H. J. Ebel, A., Kerschgens, M.</b>	5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>31.03.2005</b>
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  <b>Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, 50923 Köln Rheinisches Institut für Umweltforschung an der Universität zu Köln (RIU), Aachener Str. 201-209, 50931 Köln</b>	7. Form der Publikation <b>Bericht</b>
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn</b>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen <b>07 ATF 09</b>
	11a. Seitenzahl Bericht <b>22</b>
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben <b>10 + 12</b>
	14. Tabellen <b>3</b>
	15. Abbildungen <b>14</b>
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <p>Das Ziel von ATMOFAST ist eine Verbesserung der Kenntnis des Einflusses von Ferntransportereignissen auf die atmosphärische Hintergrundbelastung. Der Schwerpunkt des Teilbeitrages „Modellsimulation“ ist die luftchemische und dynamische Analyse solcher Episoden. Das komplexe Chemie-Transport-Modell EURAD wurde weiterentwickelt, um solche Studien hoch aufgelöst auf der hemisphärischen Skala durchführen zu können.</p> <p>Mit dem Modell wurde eine Vielzahl von Episoden untersucht. Zusätzlich wird täglich eine Prognose im Internet veröffentlicht. Typische Episoden bei denen sich interkontinentaler Spurenstofftransport nachweisen lässt, zeichnen sich dadurch aus, dass belastete Grenzschichtluft über Konvektion und sogenannte „Warm Conveyor Belts“ in die obere Troposphäre in den Einflussbereich des Jets gehoben und dort schnell transportiert wird. Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass das Spurenstoff-Gemisch in der Anfangsphase eine signifikante Ozonproduktion bewirkt, bis die meisten Stickoxide und Kohlenwasserstoffe abgebaut wurden. Solche Plumes tragen dazu bei, die Hintergrundbelastung der Atmosphäre über Europa und anderen Regionen zu erhöhen. Eine besondere Rolle spielen die steigenden asiatischen Emissionen, welche derzeit schon den größten Beitrag liefern.</p>	
19. Schlagwörter <b>Atmosphärischer Ferntransport, Interkontinentaltransport, Modellsimulation mit dem EURAD-Modell, Freie Troposphäre, Tropopausenregion, Chemische Zusammensetzung der Atmosphäre</b>	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title ATMOFAST – Contribution „Model Simulation“	
3b. Title of Publication	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Feldmann, H., Memmesheimer, M., Jakobs, H.J. Ebel, A., Kerschgens, M.	5. End of Project 2005-03-31
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	6. Publication Date
	7. Form of Publication Report
8. Performing Organization(s) (Name, Address)  Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, 50923 Köln Rheinisches Institut für Umweltforschung an der Universität zu Köln (RIU), Aachener Str. 201-209, 50931 Köln	9. Originator's Report No.
	10. Reference No. 07ATF09
	11a. No. of Pages Report 22
	11b. No. of Pages Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. No. of References 10 + 12
	14. No. of Tables 3
	15. No. of Figures 14
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract The aim of ATMOFAST has been to increase the knowledge on the influence of long-range transport on atmospheric pollution. The focus of the contribution “Model Simulation” is to analyse the chemistry and dynamics of such events. The performance of the complex chemistry-transport-model EURAD has been enhanced to perform high-resolution und long-term simulations on a hemispheric scale. A number of events have been analysed. In addition, a daily forecast is published via the internet. Typical intercontinental transport episodes are characterized as follows: polluted boundary layer air gets lifted into the upper troposphere by convective system and warm conveyor belts. In the vicinity of the jet stream they are rapidly transported over long distances. The model simulations show that in the initial phase active photochemistry takes place in the free troposphere – increasing the ozone levels. After a few days most of the nitrogen oxides and hydrocarbons have been processed, so that the ozone production rates get small. Such plumes have been found to survive quite frequently in the free troposphere for rather extended periods. As a consequence they contribute to the background pollution over Europe and other regions. Asia plays an important role – where the emission rates are still increasing and which causes the largest export.	
19. Keywords Long-range transport, intercontinental transport, model-simulation with the EURAD-model, free troposphere, tropopause region, chemical composition of the atmosphere	
20. Publisher	21. Price

## 2.1. Gesamtziel des Teilvorhabens

Ziel des ATMOfAST-Teilvorhabens „Modellsimulation“ ist die Erweiterung des Projekt-Verbundes um den Bereich der Eulerschen Chemie-Transport-Simulation – als Alternative und Ergänzung des Langrangeschen Ansatzes beim FLEXTRA/FLEXPART-Modells des Partners TUM. Zum Einsatz kommt das EURAD-Modell, mit dem die Chemie und Ausbreitung von gas- und partikelförmigen Spurenstoffen in der Atmosphäre beschrieben werden kann.

## 2.2. Durchzuführende Arbeiten

Gemäß dem Arbeitsplan aus dem Projektantrag sollten die folgenden Arbeiten durchgeführt werden:

### 1. *Entwicklung von Methoden zur adäquaten Behandlung von Interkontinentaltransport mit dem EURAD Modell.*

Zum Zeitpunkt der Antragstellung war geplant, Methoden zu entwickeln, mit deren Hilfe ein regionales Modell in die Lage versetzt wird, die Effekte von interkontinentalem Transport adäquat zu beschreiben. Dazu wurden die Kopplung an globale Modelle sowie Parametrisierungen anhand von Luftmassenzuordnungen ins Auge gefasst. Im Verlauf des Projektes zeigte sich, dass der effizienteste Weg zur konsistenten Beschreibung der Episoden eine zirkumpolare hemisphärische Version des EURAD-Modells ist. Diese Modellversion erlaubt weitergehende Anwendungen als im Antrag beschrieben wurde.

Weiterhin war als Aufgabe die Beschaffung und Aufbereitung der notwendigen Modell-Input-Daten genannt worden. Dabei handelt es sich um meteorologische Analyse- bzw. Vorhersagedaten für die zu untersuchenden Zeiträume, vor allem aber um Emissionsdaten.

### 2. *Episodenstudien zu Stratosphären-Troposphären-Transport und zu Ferntransport Ereignissen*

In Absprache mit den Partnern IMK-IFU und TUM werden – hauptsächlich auf Basis der dort durchgeführten Analysen - geeignete Episoden ausgewählt, welche typische Transport-Strukturen zeigen. Zu den Zielen gehört die Untersuchung der Herkunft von Luftmassen. Dies kann als unabhängige Überprüfung der Ergebnisse der TUM mit dem Trajektorien-/Partikel-Modell FLEXTRA/FLEXPART. Weiterhin dienen die Simulationsrechnungen mit dem Chemie-Transport-Modell als Ergänzung des ATMOfAST-Projekts um den Bereich der chemischen Zusammensetzung der relevanten Luftmassen. Eine Frage, die dabei im Vordergrund steht, ist die ob in den *Plumes* in der oberen Troposphäre Ozon-Produktion stattfindet.

Die Modellergebnisse werden mit geeigneten Beobachtungsdaten evaluiert.

### 3. *Über den Antrag hinausgehende Arbeiten*

Im Rahmen eines – noch nicht abgeschlossenen - Projektes für das Umweltbundesamt wurden hemisphärische Modellrechnungen für längere Zeiträume durchgeführt. Dabei handelt es sich um Rechnungen für die Jahre 1999, 2001 und Januar bis April 2003. Diese Rechnungen basieren auf einer Weiterentwicklung des Modells (nicht-hydrostatische Version, Behandlung von Aerosolen). Diese Rechnungen eignen sich sehr für eine Auswertung im Sinne des ATMOfAST Projektes hinsichtlich typischer Transportwege auf der nördlichen Hemisphäre und vieler weiterer Fragestellungen.

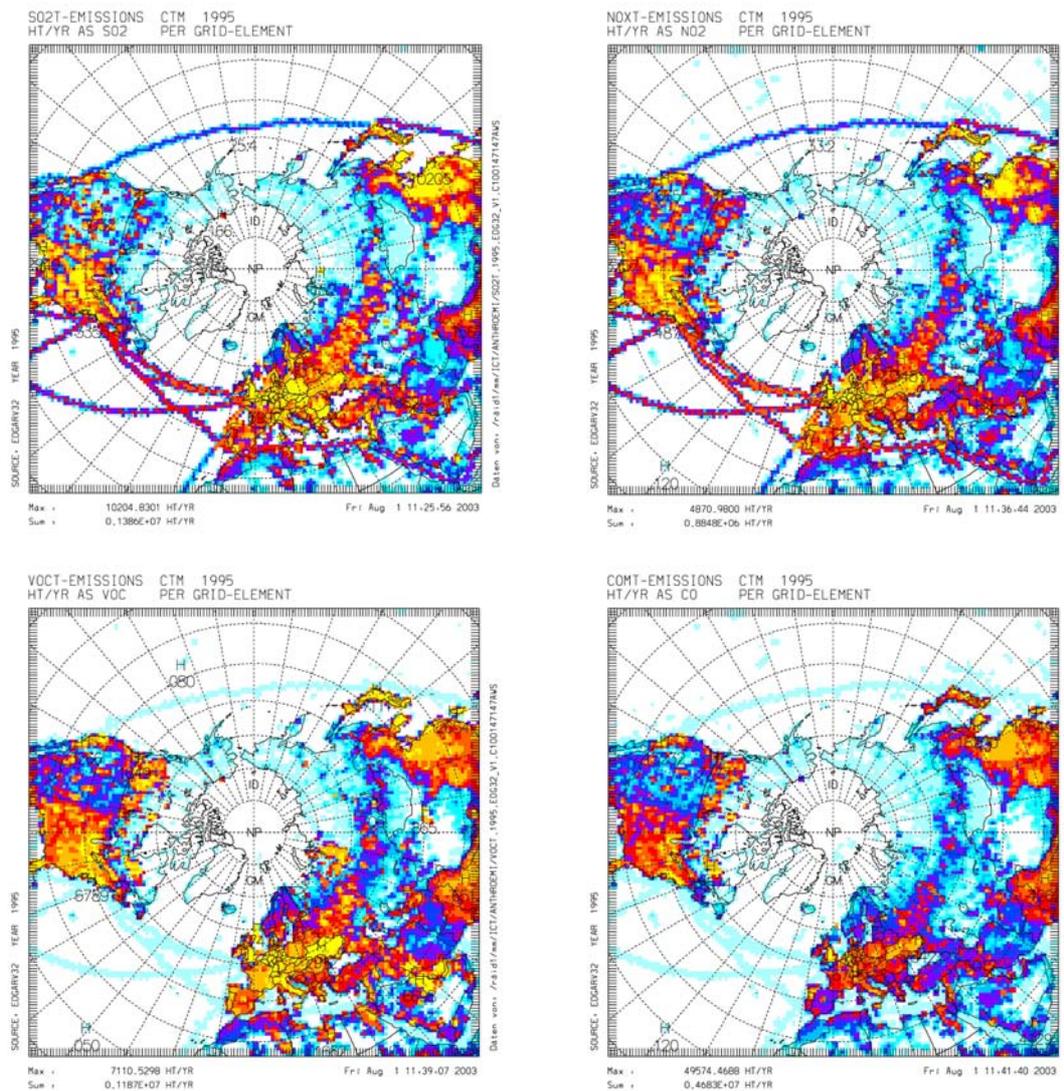
Weiterhin wurde im Frühjahr 2005 eine Routine Prognose (Zeitraum drei Tage) eingeführt, die täglich im Internet unter [www.eurad.uni-koeln.de](http://www.eurad.uni-koeln.de) publiziert wird.

## 2.3. Modellversionen, Inputdaten, Charakteristika der Modell-Experimente

### 2.3.1. Emissionen

Die Beschaffung belastbarer Emissionsdaten für globale oder hemisphärische Simulationsrechnungen ist ein kritischer Bereich des Projektes. Es existieren wenige geeignete Emissionskataster. Für Anwendungen mit dem EURAD-Modell kommen im Prinzip GEIA (<http://www.geiacenter.org>) und EDGAR (<http://www.mnp.nl/edgar>) in Frage. Für ATMOfAST wurden die EDGAR-3.2-Daten benutzt (Abb. 4.1) – da diese vollständiger und aktueller sind. Das EDGAR-Kataster hat das Bezugsjahr 1995. Dies liegt gegenüber den simulierten Episoden zurück, so dass sich in der Zwischenzeit die Emissionen in den Regionen geändert haben. In Europa gab es seit Mitte der Neunzigerjahre einen deutlichen Emissions-Rückgang. Die Simulationsrechnungen überschätzen daher in Europa die Verschmutzung. In Asien ist die Situation umgekehrt, da dort die Emissionen angestiegen sind. Aktuellere Daten standen aber zum Zeitpunkt der Rechnungen nicht zur Verfügung.

Partikel-Emissionen sind in keinem der Kataster berücksichtigt. Mit einer - mit Hilfe europäischer Kataster abgeleiteten - Beziehung, lassen sich partikelförmige Kohlenstoff Emissionen (Abb. 4.1, rechts unten) über die CO Emissionen ableiten.



**Abb. 4.1:** Jahresemissionen auf dem hemisphärischen Modell-Gitter (Gitterweite 100 km) auf der Basis des EDGAR-3.2-Katasters mit dem Basisjahr 1995; von links oben nach rechts unten: SO<sub>2</sub> [ht/Jahr], NO<sub>2</sub> [ht/Jahr], VOC [ht/Jahr], CO [ht/Jahr].

### 2.3.2. Meteorologische Analysedaten

Die ersten regionalen Testrechnungen basierten auf meteorologischen Analysen des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (ECMWF). Je nach Bezugsjahr wurden verschiedene Datensätze für die hemisphärischen Simulationen verwendet:

Bei Episoden bis Ende 2000 kamen hauptsächlich die NCAR/NCEP-Re-Analysis Daten (NNRP) zum Einsatz. Diese haben eine horizontale Auflösung von 2.5°.

Ab 2001 standen die die besser aufgelösten AVN/MRF-Daten bzw. GFS-Daten zur Verfügung. Details dieser Datensätze änderten sich im Lauf der Zeit.

### 2.3.3. Modellentwicklung

Das EURAD Modell wurde während der Laufzeit von ATMOfAST in vielen Bereichen weiterentwickelt. So wurde das Modell parallelisiert und von CRAY-Vektorrechnern auf PC-Cluster umgestellt, welches zu deutlich schnelleren Rechenleistungen führte und den Einsatz des Modells auf größere Gebiete, längere Zeiträume und auch die Einbeziehung der Aerosole erleichterte.

Im Einzelnen wurde eine hemisphärische Version des Modells auf einem polar-stereographischen Gitter entwickelt, mit dem Nordpol als Zentrum.

Zur Analyse der Herkunft der Luftmassen während der Fallstudien wurde eine Version mit passiven Tracern entwickelt. Dazu wird der Herkunftsort des Inhalts einer Gitterbox verwendet (Länge, Breite, Höhe), sowie die Zugehörigkeit zu einer Atmosphärenschicht (Grenzschicht, Stratosphäre) zum Startzeitpunkt. Diese Methode wurde eingesetzt, um auch mit einem Eulerschen Modell die Ursprungsregion von Luftpaketen genauer identifizieren zu können. Dies erlaubt es, Zonen mit intensivem Meridional-, Longitudinal- oder Vertikaltransport zu identifizieren.

Bei den Langfristrechnungen wurde eine nichthydrostatische Modellversion eingesetzt.

Außerdem wurde ein Aerosol-Chemie- und -Dynamik-Modell einbezogen.

**Tabelle 4.1:** Beschreibung der Modellversion, welche in ATMOfAST für hemisphärische Simulationen verwendet wurden

Anwendung	Fallstudien	Jahresrechnungen	Vorhersage
Projektion	pol. stereogr.	pol. stereogr.	pol. stereogr.
Gitterpunkte	150x150	120x120	90x90
Gitterweite	100 km	125 km	250 km
Oberrand	10 hPa	30 hPa	100 hPa
Schichten	29	26	23
Schwerpunkt	freie Troposphäre	PBL und FT	PBL
Chemiemechanismus	RADM2	RADM2 + Aerosole	RADM2 + Aerosole
Meteorologie	MM5 hydrostatisch	MM5 nichthydrost.	MM5 nichthydrost.
Zeitschritt (Chem.)	600 s	600 s	1200 s

Seit Frühjahr 2005 wird das tägliche Angebot an chemischen und meteorologischen Vorhersagen des RIU um eine hemisphärische Dreitageprognose ergänzt.

## 2.4. Eingehende Darstellung der erzielten Resultate

### 2.4.1. Untersuchte Zeiträume

**Tabelle 4.2** Untersuchte Episoden

Bezeichnung	Art	Focus	Zeitraum
AF1	Fallstudie/regional	Intrusion	Mai/Juni 1996
AF2	Fallstudie (reg. + hem.)	Intrusion, Ferntransport, Transport aus niederen Breiten	Mai/Juni 1997
AF3	Fallstudie (hem.)	Ferntransport	Juli 1997
AF4	Fallstudie (hem.)	Ferntransport	Mai 1999
AF5	Fallstudie (hem.)	Ferntransport	September 2000
TC2	Fallstudie (reg.+hem.)	Intrusionen, Cut-off Low, <i>Blocking</i> , Ferntransport	August 1997
AFH	Fallstudie (hem.)	Vorhersage	Okt./Nov. 2002
U99	Langzeit (hem.)	Ferntransport, Saisonalität	1999
U01	Langzeit (hem.)	Ferntransport, Saisonalität Emissionssensitivität (Szenario 2010)	2001
U03	Langzeit (hem.)	Ferntransport, Saisonalität	Jan.-April 2003
HFOR	Routine (hem.)	Vorhersage (72h)	Seit Frühjahr 2005

Die Langzeitrechnungen für die Jahre 1999, 2001 und 2003 werden in Kooperation mit dem FE-Vorhaben UFOPLAN Nr. 202 43 270 des Umweltbundesamtes durchgeführt, bei dem es um die Weiterentwicklung und Validierung von Modellen im Rahmen der 22. BImSchV (Bundes-Immissionsschutz-Gesetz) geht. Dabei wird auch der Einfluss überregionaler Luftbelastung bei Aerosolen und gasförmigen Komponenten untersucht.

### 2.4.2. Beispiel-Episode Mai/Juni 1997 („Textbook Example“)

Bei den episodischen Studien wurde – neben den für den Ferntransport wichtigen dynamischen Prozessen - vor allem die chemische Entwicklung der Luftmassen von den Quellgebieten an untersucht. Eine besonders gut interpretierbare Episode wurde von den Projektpartnern im Mai/Juni 1997 beschrieben ([Eisele et al., 1999; Stohl und Trickl, 1999], Abbildungen 4.2-4.9). Diese gut dokumentierte Episode wurde auch im Rahmen dieses ATMOfAST-Beitrages intensiv untersucht, um das erweiterte Modellsystem in bereits bekanntem „Terrain“ zu erproben. Während des untersuchten Zeitraumes traten sehr viele der zu untersuchenden Phänomene in sehr typischer Ausprägung auf, daher können auch viele der späteren Ergebnisse des Teilvorhabens anhand dieser Episode exemplarisch dargestellt werden.

#### Quellenregion

Es zeigt sich, dass der wesentliche Teil der Ozons – welches später in den *Plumes* zu finden ist - bodennah in den Quellenregionen produziert wird. Die Simulationsrechnungen mit dem EURAD-

Modell ergeben in der Beispiel-Episode Mai/Juni 1997 etwa 90 ppbV Ozon über dem Südosten und Osten der USA (Abb. 4.4). Dies steht perfekt in Einklang mit Stationsmessungen, z.B. in Virginia oder New Jersey am Tag des Exports, wiewohl viele Stationen auch geringere Werte zeigen [Stohl und Trickl, 1999]. Ein Trog überquert Nordamerika von West nach Ost (ab 23./24 Mai). In seinem Einflussbereich wird die belastete Grenzschichtluft in die obere Troposphäre gehoben (Abb. 4.3). Ab dem 25. Mai 1997 findet dann im Bereich der amerikanischen Ostküste ein kräftiges Aufgleiten in einem *Warm Conveyor Belt* statt. Diese Luftmassen werden über dem Atlantik bis knapp unter die Tropopause angehoben und im Bereich des *Polarjets* dann nach Europa transportiert. Der eigentliche Transatlantik-Transport dauert also in diesem Fall etwa drei Tage. Im Bereich des *Jets* wirkt sich die Diffusion nur gering aus und wird in der Anfangsphase durch die chemische Produktion überkompensiert. Das heißt, dass es Bereiche innerhalb des *Plumes*, in denen die Ozonkonzentration das Niveau aus der Quellregion hält oder leicht überschreitet. Eine Wesentliche Vermischung mit dem Hintergrund findet hauptsächlich dann statt wenn die Luftpakete die „Flussröhre“ des *Jets* verlassen haben.

### Chemische Produktion

Neben Ozon werden aber bei der Hebung der Luftmassen auch Vorläufersubstanzen wie Stickoxide und Kohlenwasserstoffe in der freien Troposphäre verfrachtet. Dort herrscht aufgrund der Verdünnung eine luftchemische Situation, welche eine effiziente Ozonbildung bewirkt. So prognostiziert das EURAD-Modell maximale Produktionsraten von etwa 3 ppbV/Stunde am 26. Mai 1997 für den *Plume* in der lokalen Mittagszeit (Abb. 4.8). Im Laufe der Zeit – wenn die Vorläufersubstanzen prozessiert sind – nimmt das Potential für chemische Produktion ab. Daher wird bei der Ankunft des *Plumes* in Europa am 28. Mai 1997 nur noch eine geringe chemische Produktion erreicht (Abb. 4.9). Nachts kommt es aber auch zur Netto-Zerstörung von Ozon.

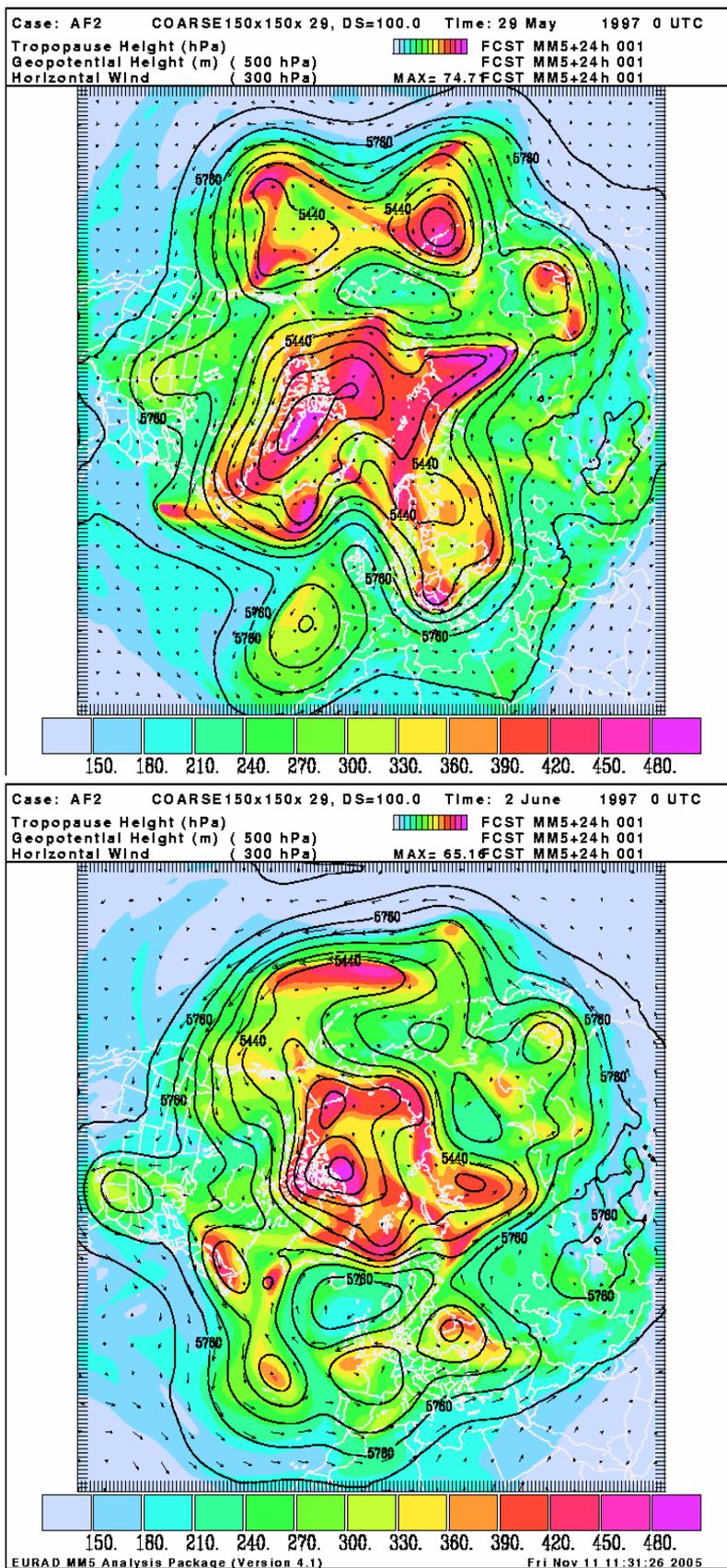
Über Garmisch-Partenkirchen liegen die Konzentrationen dann im Bereich 100-120 ppbV (Abb. 4.7). Das ergibt einen Nettoanstieg von 10-30 ppbV während des Transports im Laufe dieser Episode.

Da die chemischen Netto-Änderungsraten in gealterten *Plumes* sehr gering sind, ist der chemische Verlust von Ozon nicht der Grund für das Verschwinden des *Plumes* nach einigen Tagen - Die Zeitskala hierfür wären mehrere Wochen. Die Auflösung geschieht eher über Mischungsprozesse. Es ist daher davon auszugehen, dass Ferntransportereignisse zu einer Erhöhung des troposphärischen Ozonhintergrunds führen.

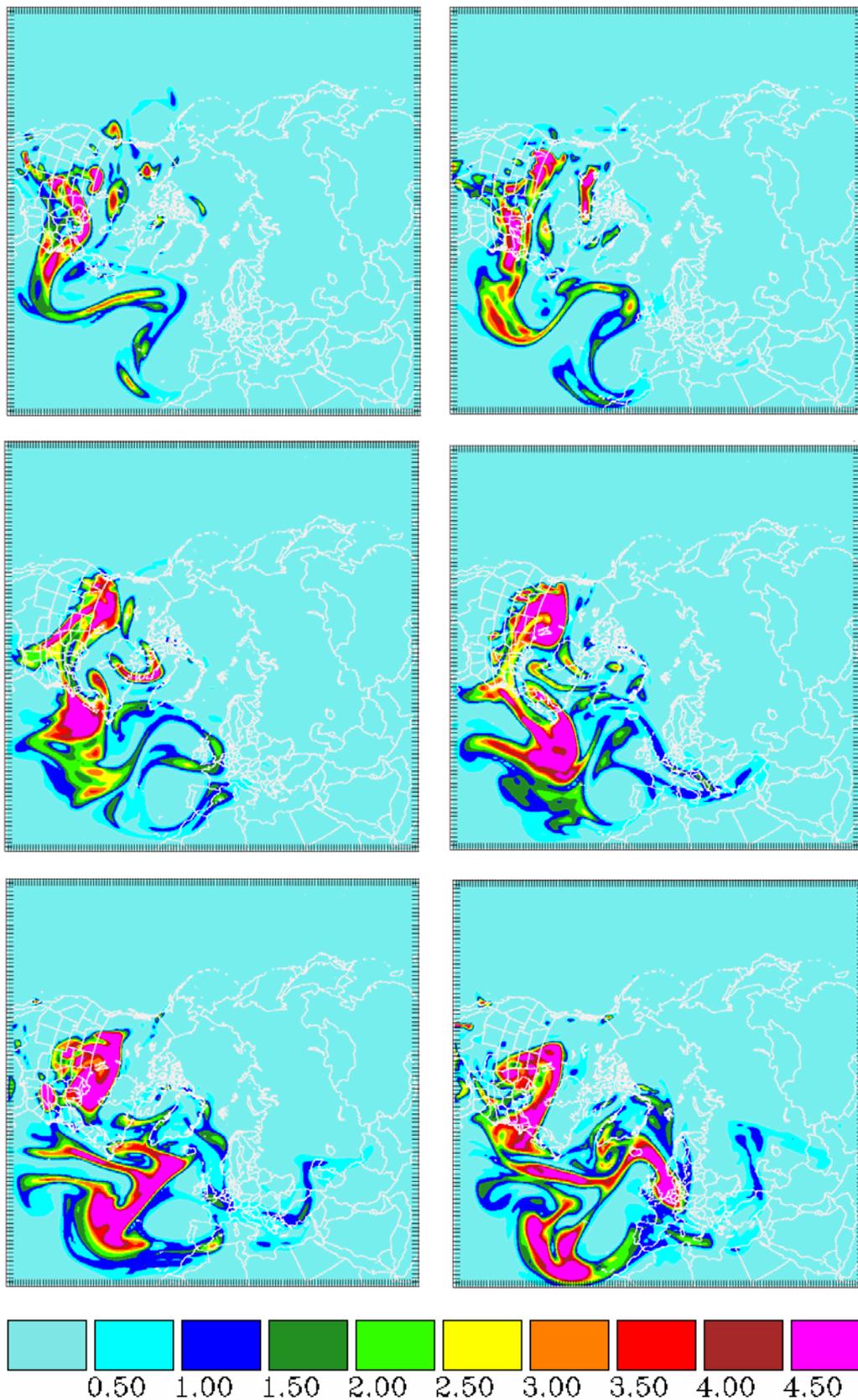
### Luftmassen aus niederen Breiten

In den Lidar-Profilen treten vor, während (unterhalb) und nach dem Auftreten der Nordamerika-*Plumes* Bereiche mit sehr niedrigem Ozon-Mischungsverhältnis zwischen 20 und 30 ppb auf. Die zugehörigen Luftpakete lassen sich bis zum West-Atlantik südlich von 30° oder gar bis in die Karibik zurückverfolgen. Dort liegen die Hintergrundkonzentrationen deutlich niedriger als in den mittleren Breiten.

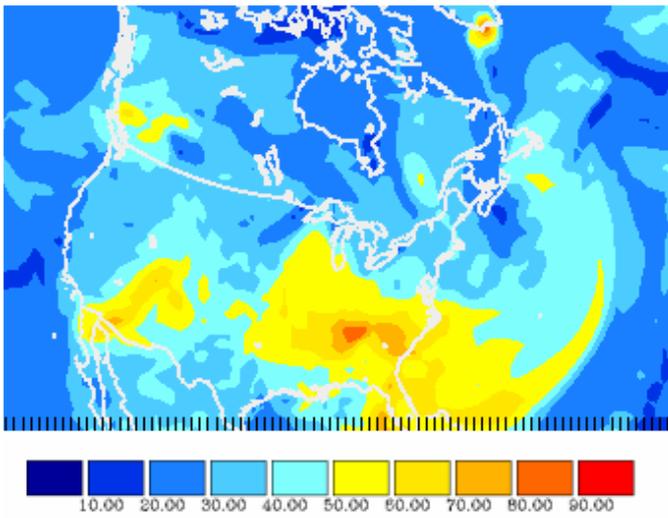
Der Transport erfolgt häufig wesentlich langsamer. Zum Teil werden die Luftmassen am Vorderrand des *Conveyor Belts* angehoben, wenn auch meist nicht so weit wie die nordamerikanische Grenzschichtluft der *Plumes* [Trickl et al., 2003]. Oft haben sich diese Luftmassen vorher längere Zeit im Bereich des Azoren-Hochs befunden. Sie sind häufig lange Zeit nicht mehr mit frischen Emissionen in Kontakt gekommen. Die chemischen Umsätze sind, verglichen mit der belasteten Luft sehr gering, oft findet ein langsamer Abbau statt.



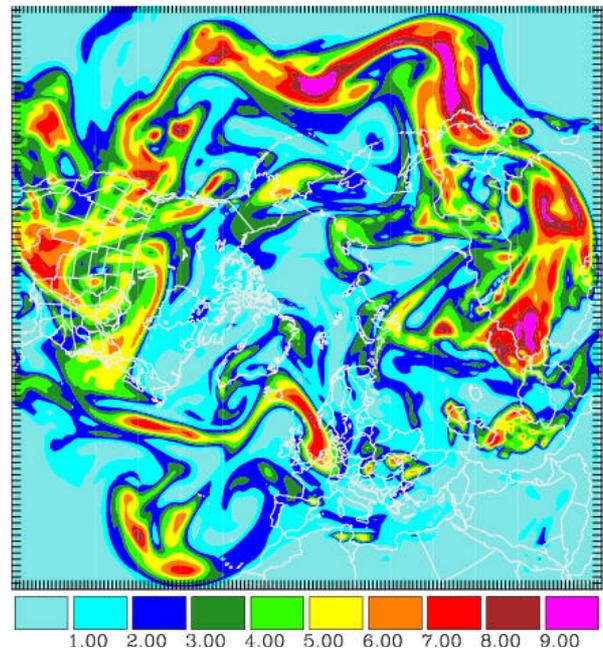
**Abb. 4.2:** Meteorologische Situation am 29. Mai 1997, 0 UTC (oben) und am 2. Juni 1997, 0 UTC (unten); Tropopausenhöhe ([hPa], farbig), geopotentielle Höhe bei 500 hPa ([gpm], Isolinien) und Windgeschwindigkeit bei 300 hPa ([m/s], Vektoren)



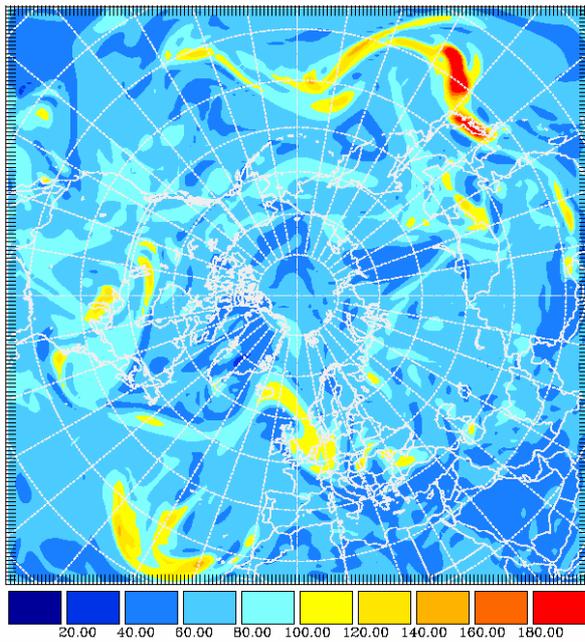
**Abb. 4.3:** Entwicklung der Interkontinentaltransport-Episode im Mai/Juni 1997: Tracer für nordamerikanische Grenzschichtluft – Säulendichte oberhalb von 5000 m ( $[g/m^3]$  als CO); von links oben nach rechts unten: 24. Mai 1997, 0 UTC, 25. Mai, 0UTC, 26. Mai, 0 UTC, 27. Mai 1997, 0 UTC, 28. Mai, 0 UTC, 29. Mai, 0 UTC



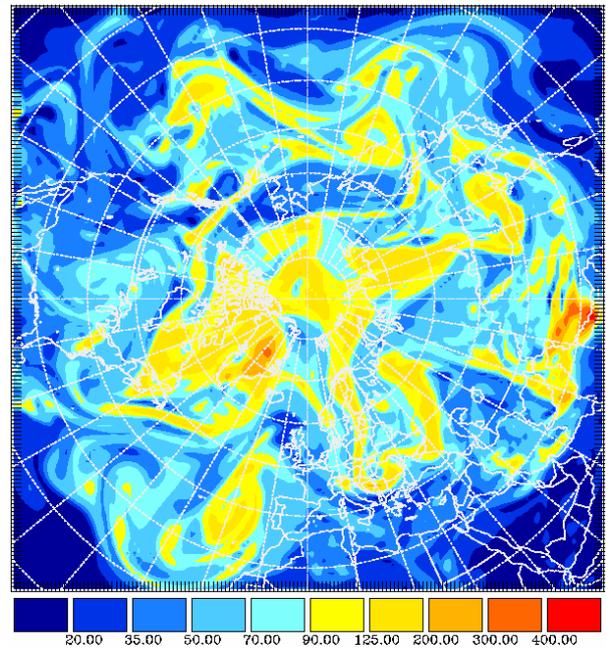
**Abb. 4.4:** Bodennahes Ozon [ppb] am 23. Mai 1997, 21 UTC



**Abb. 4.5:** Säulendichte eines hemisphärischen Grenzschicht-Tracers [g/m<sup>2</sup> als CO] am 29. Mai 1997, 1 UTC



**Abb. 4.6:** CO Konzentration [ppb] in ca. 8000 m Höhe am 29. Mai 1997, 1 UTC



**Abb. 4.7:** Ozon Konzentration [ppb] in ca. 8000 m Höhe, 29. Mai 1997, 1 UTC

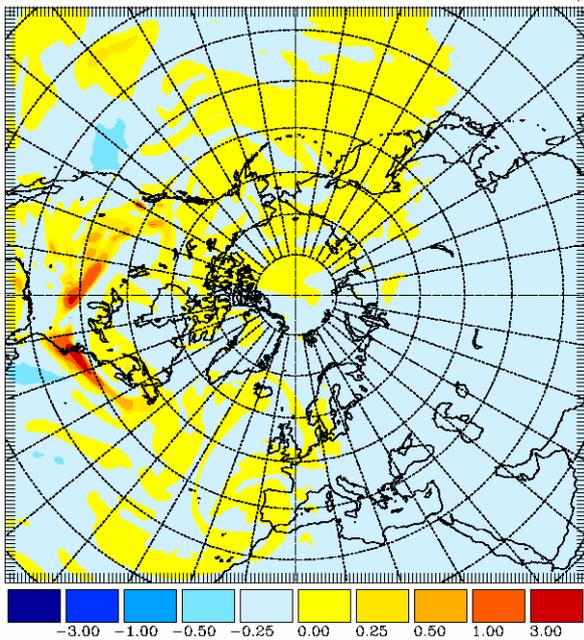


Abb. 4.8: Netto Ozonproduktion [ppb/h] in ca. 5000 m Höhe am 26. Mai 1997, 18 UTC

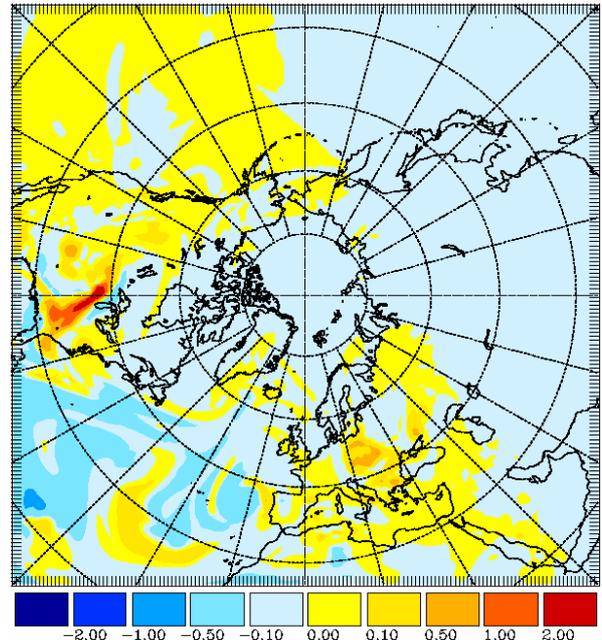


Abb. 4.9: Wie Abb. 4.8 aber 28. Mai 1997, 15 UTC

Tabelle 4.3: Konzentration ausgewählter Spurengase im Bereich des *Plumes*

Spezies	Frischer <i>Plume</i> 26. Mai	Gealterter <i>Plume</i> 28. Mai
O <sub>3</sub> -Bildung mittags	ca. 3 ppb/h	< 0.5 ppb/h
CO	200 ppb	150 ppb
NO <sub>x</sub>	ca. 1 ppb	ca. 0.25 ppb
HNO <sub>3</sub>	0.5 – 5 ppb	0.25 – 3 ppb
PAN	< 2 ppb	< 2 ppb

### Vergleich Modell-Lidar

Der Vergleich der Lidar-Daten (Abb. 4.10) mit den Modelldaten (Abb. 4.11) zeigt, dass das Modell gut in der Lage ist, die Faltung zu reproduzieren. Die Ozon-Zunge sinkt im Zeitraum der Messungen von ca. 6000 m auf 3000 m ab und wird schwächer. Die Zone mit amerikanischer Grenzschichtluft tritt gegen Ende des 28. Mai oberhalb der Intrusion auf. Auch hier findet ein Absinken statt. Die Luftmasse lässt sich bis zum Ende des Messintervalls identifizieren. Die Ozon-Konzentration liegt im Modell in diesem Bereich teilweise höher als die Messung zeigt. Außerdem erscheinen die beiden beobachteten Maxima in dieser Zone beim simulierten Ozon nicht getrennt. Dies kann auf die im Vergleich zur Skala der Strukturen zu grobe horizontale und vertikale Modellauflösung zurückgeführt werden. Außerdem wirken sich auch hier die vermutlich zu hohen Emissionsraten aus. Schon während des Transportes treten im Modell etwas höhere Werte auf als über dem Atlantik mit MOZAIC gemessen wurde (bis etwa 100 ppb; vergleiche Stohl and Trickl, 1999). Inwieweit diese Überschätzung auf die bodennahe Chemie oder die Bildung in der oberen Troposphäre zurückzuführen ist, lässt sich anhand der verfügbaren Daten nicht klären. Des Weiteren könnte die vertikale Auflösung dazu führen, dass über Europa auch Stratosphärische Luft in die

Schicht mit eintritt. Bei CO (Abb. 4.12) zeigen sich im Modell allerdings zwei Zonen mit stärker belasteter Luft.

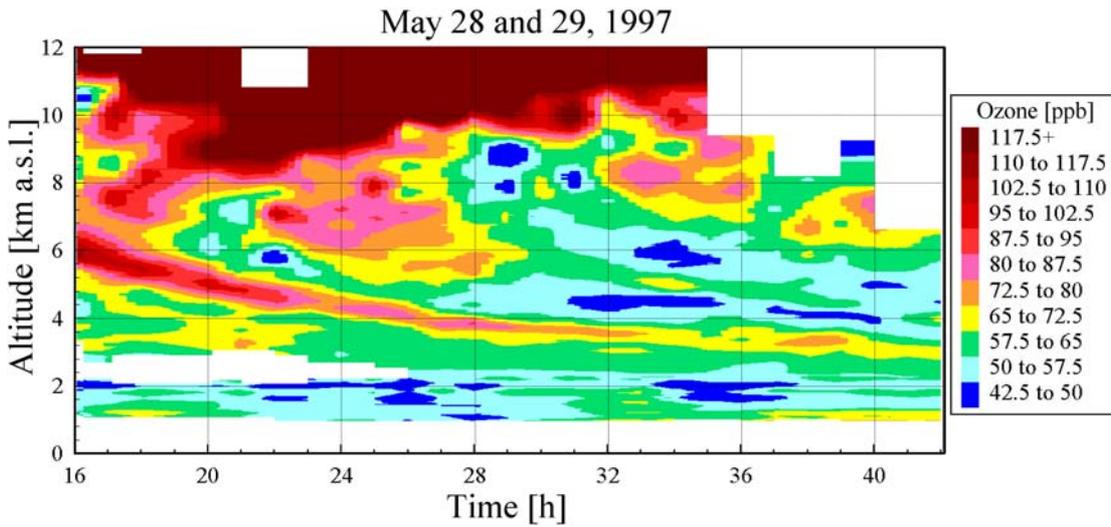


Abb. 4.10: Lidar-Messung von Ozon [ppb] Garmisch-Partenkirchen (nach [Stohl and Trickl, 1999]).

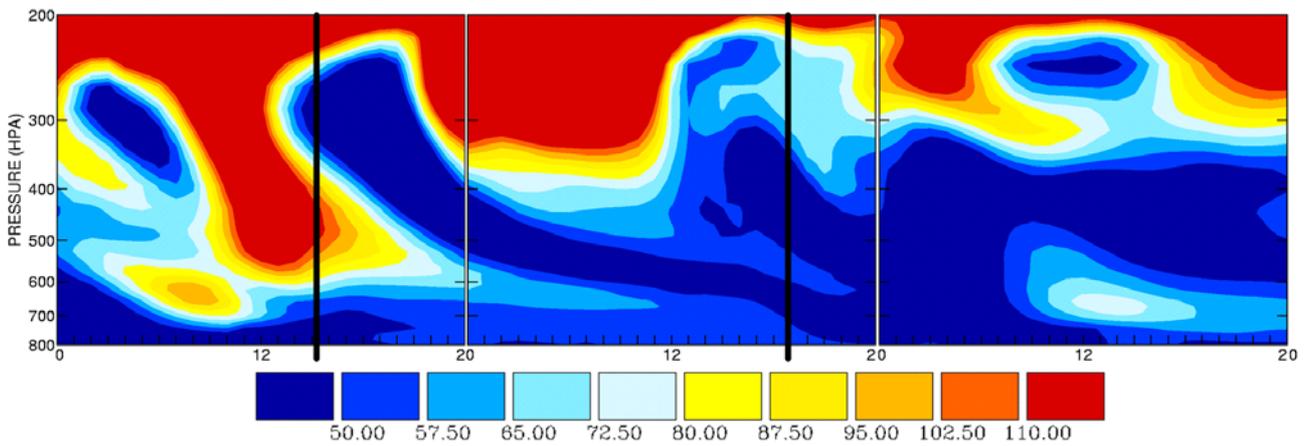


Abb. 4.11: Zeit-Höhen-Schnitt Ozon [ppb] für Garmisch-Partenkirchen vom 28. bis 30. Mai 1997 aus EURAD-Simulations-Rechnungen. Die Balken markieren den Zeitraum der Lidar-Messungen.

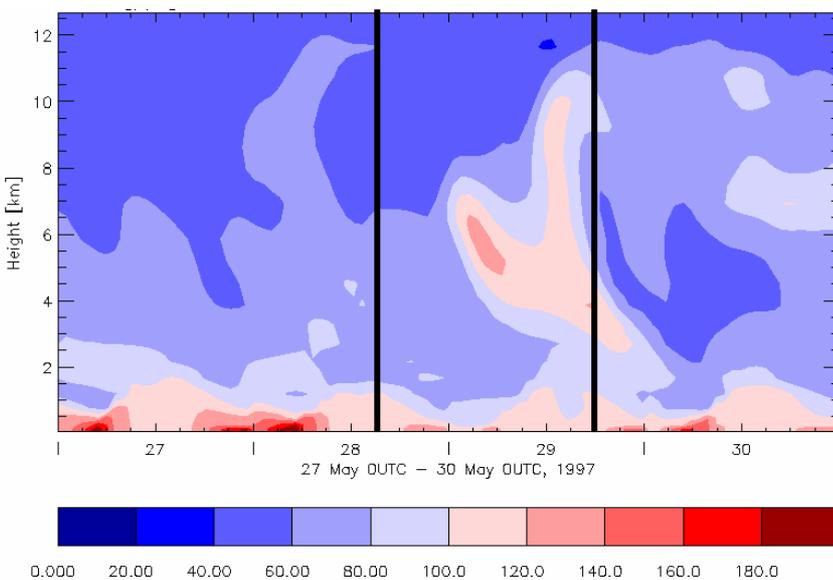


Abb. 4.12: Zeit-Höhen-Schnitt CO [ppb] für Garmisch-Partenkirchen vom 27. bis 30. Mai 1997 aus EURAD-Simulations-Rechnungen. Die Balken geben den Zeitraum der Ozon-Messungen an.

### Auflösung der *Plumes*

Vorbedingung dafür, nordamerikanische Grenzschichtluft über Europa identifizieren zu können, ist, dass diese in den Bereich des Strahlstroms gelangen. In dieser schnellen, kohärenten Strömung können die Luftpakete den Interkontinentaltransport überstehen, ohne dass die chemischen Charakteristika ganz verloren gehen. Dies passiert erst, wenn eine Region erreicht wird, in der sich der *Jet* abschwächt oder auffächert. Dies während der Episode Mai/Juni 1997 in zwei Bereichen.

- Über dem Ostatlantik zwischen den Azoren und der Iberischen Halbinsel befindet sich ein Kaltlufttropfen. Dieser liegt südlich eines Hochdruckrückens westlich von Irland (siehe Abb. 4.2 oben). Zusammen bilden diese Beiden eine Dipol-artige blockierende Struktur. Der *Jet* spaltet sich in einen nördlichen und einen südlichen Ast. Im südlichen Bereich in Höhe der Azoren bildet sich ein Reservoir belasteter Luft. Später wird ein Teil dieser Reservoire durch den Kaltlufttropfen über die Iberische Halbinsel, Nordafrika in den westlichen Mittelmeerraum und nach Westeuropa verfrachtet.
- Der nördliche Ast des *Jets* transportiert die ozonreiche Luft dann antizyklonal über den Messort in Garmisch-Partenkirchen (Abb. 4.10 und 4.11). Dabei findet ein Absinken statt, so dass der *Plume* bis in die mittlere und untere Troposphäre gelangt. Unter dem Einfluss eines relativ ortsfesten Trogens über dem Balkan gelangen die Luftpakete in den östlichen Mittelmeerraum und teilweise wieder nach Zentraleuropa.

Zusammengenommen bilden diese Drucksysteme Anfang Juni ein sogenanntes „Omega-Blocking“ (Abb. 4.2, unten) – welches über mehrere Tage im Wesentlichen bestehen bleibt. Eine solche „Blocking Situation“ wurde auch intensiv im AFO2000-Projekt TRACHT (07ATF06) analysiert. Etwa zwei Wochen nach der Hebung der bodennahen Luft über Nordamerika werden weite Teile der freien Troposphäre über Europa von ihr beeinflusst. Diese Angaben basieren weitgehend auf der Analyse der passiven Tracer, da die Vermischung – durch Filament-Bildung der Luftmassen – dazu führt, dass sich die chemischen Felder nicht mehr signifikant von der Umgebung abheben, somit also praktisch zum troposphärischen Hintergrund geworden sind. Das importierte Ozon steht damit auch als Reservoir für ein Einmischen in die Grenzschicht dar.

### **2.4.3. Ergebnisse der Jahresrechnungen**

#### Hemisphärische Betrachtung

Die bisherigen Betrachtungen befassten sich mit der Wirkung von Interkontinentaltransport auf Europa. Die neuen Modellsimulationen umfassen neben Nordamerika und Europa auch Asien. Vergleicht man diese drei großen Quellregionen fällt die Dominanz Asiens auf (siehe Abbildung auf der Titelseite). Dies gilt sowohl bei der Häufigkeit als auch bei der Intensität von Exportereignissen.

So fanden sich in der Episode Mai/Juni 1997 nach zwei Wochen Simulationsdauer etwa doppelt soviel asiatische Grenzschichtluft in der oberen Troposphäre als europäische und nordamerikanische Luftpakete zusammen.

In den Jahresrechnungen 1999, 2001 (und Q1 2003) finden sich eine Vielzahl von Ferntransport-Ereignissen.

- Der Export amerikanischer Grenzschicht-Luft führt in vielen Fällen zu Bildung eines temporären Reservoire über dem Atlantik im Bereich des Azorenhochs (siehe auch Abb. 4.3)
- Transportwege europäischer Grenzschichtluft führen beispielsweise nach Norden in polare Regionen, nach Osten in Richtung Sibirien oder nach Westen auf den Atlantik (was zu einem Re-Import führen kann). Die Hebung erfolgt oft nicht so weit reichend wie an den Ostküsten Amerikas und Asiens.

- Asiatische Emissionen unterliegen oft starker Hebung. Zielregion der *Plumes* ist häufig der Westen Nordamerikas. Ein weiterer Transportpfad führt über Ostsibirien bis zum Polarmeer (siehe auch Abb. 4.13).
- Im Bereich von Hochdruckrücken über Europa (siehe Abschnitt *Blocking*) kann es zum Import afrikanischer Luft nach Europa kommen (zum Beispiel bei Sahara-Staub-Ereignissen). Umgekehrt führen die atmosphärischen Strömungsmuster vielfach in den östlichen Mittelmeerraum und die angrenzenden Regionen.

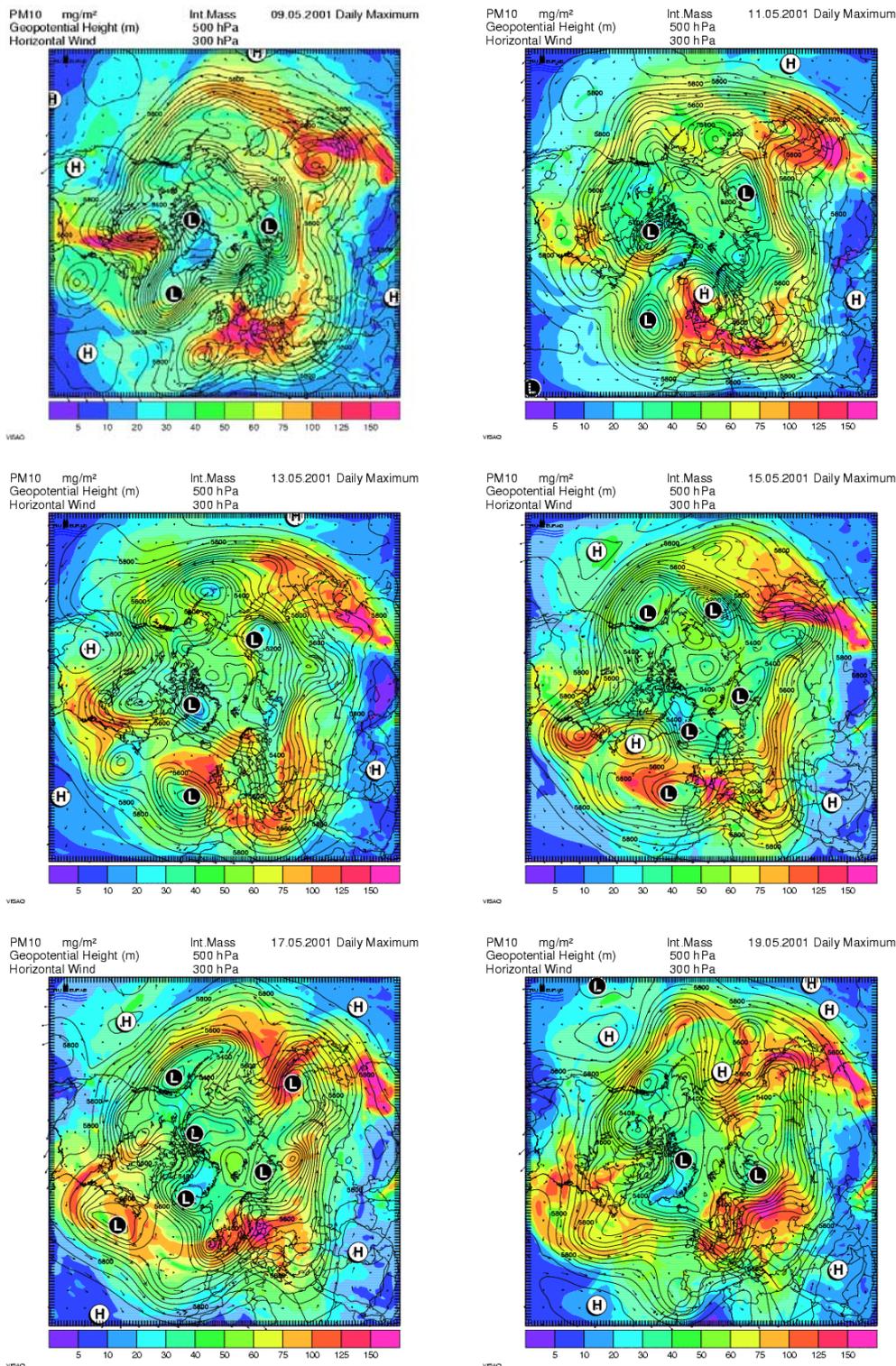


Abb. 4.13: Verlauf einer Episode mit „ $\Omega$  Blocking“ vom 9.-19. Mai 2001. Tagesmaximum der PM<sub>10</sub> Säulendichte [mg/m<sup>3</sup>], Geopotential 500 hPa und Wind in 300 hPa.

## Saisonale Variation

Nimmt man Ozon als Indikator für gehobene Grenzschichtluft in der freien Troposphäre ist nur im Sommerhalbjahr mit erhöhten Konzentrationen in den *Plumes* zu rechnen. Signifikante Ozon-*Plumes* wurden hauptsächlich zwischen März und Oktober gefunden. Dominante Regionen mit aufsteigender Grenzschichtluft sind die Ostküsten der Kontinente, also Ostasien und die Ostküste Nordamerikas. Dies ist konsistent mit den Ergebnissen von Eckhardt et al. [2004].

## Der Einfluss von *Blocking* auf die freie Troposphäre

Für den Interkontinental-Transport spielt der atmosphärische *Jet* – als Region mit schnellem West-Ost-Transport – eine wichtige Rolle. Im Zusammenhang mit Ferntransport- und Austausch-Ereignissen trat auch häufig sogenanntes „*Blocking*“ auf. *Blocking*-Episoden sind Phasen mit anormalen atmosphärischen Strömungs-Mustern, die auf vielfältige Weise mit den – in ATMOFAST untersuchten – Phänomenen in Zusammenhang stehen. Es findet eine Unterbrechung, Abschwächung oder auch Umleitung des zonalen Grundstroms statt. *Blocking*-Ereignisse können eine Persistenz von mehreren Tagen haben.

*Blocking*-Strukturen entstehen, wenn sich Luftmassen von Norden (Tiefdruck, kalt, niedrige Tropopause) nach Süden verlagern und im Gegenzug ein Hoch (warm, hohe Tropopause) nach Norden gelangt. Definition und Beschreibung finden sich unter anderem bei Berggren et al. [1949], Rex [1950a, b] oder neueren Datums bei Pelly and Hoskins [2003]. *Blocking* kommt beispielsweise in Form einer „Dipol-Struktur“ vor mit einem Hoch nördlich eines Tiefs (oder Kaltluft-Tropfens). Dies ist der Fall am 29. Mai 1997 westlich von Europa (siehe Abb. 4.2, oben). Er führt in diesem Fall zu einer Aufspaltung des *Jets* in einen nördlichen Ast, der die amerikanische Grenzschichtluft antizyklonal bis nach Garmisch führt und einen südlichen Ast, der im Endeffekt zu einem zyklonalen Transport nach Südwest-Europa führt.

Eine andere, typische Formation stellen sogenannte  $\Omega$ -Lagen dar, mit einem Hoch im Zentrum und westlich sowie östlich davon ein Trog - häufig in Form von Kaltlufttropfen und/oder Streamern. Während der CRISTA2 Mission [Offermann et al., 1999, 2002] im August 1997 wurde eine solche Struktur über Europa und dem Atlantik dokumentiert und im AFO2000 Projekt TRACHT (07 ATF 06, [Feldmann et al., 2003]) detailliert untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Zusammensetzung der freien Troposphäre auf verschiedene Weise beeinflusst wurde. So kam es über Osteuropa zur Intrusion stratosphärischer Luft in Streamern. Über dem Atlantik entstanden Kaltlufttropfen, die ebenfalls stratosphärische Luft tief in die Troposphäre brachten. Auf der anderen Seite bildete sich am Westrand des zentralen Rückens eine nordwärts gerichtete Strömung die Luftmassen von Nordafrika und der Mittelmeerregion in einem *Warm Conveyor Belt* (siehe auch [Tulet et al., 2003] bis in polare Regionen in die UTLS brachten.

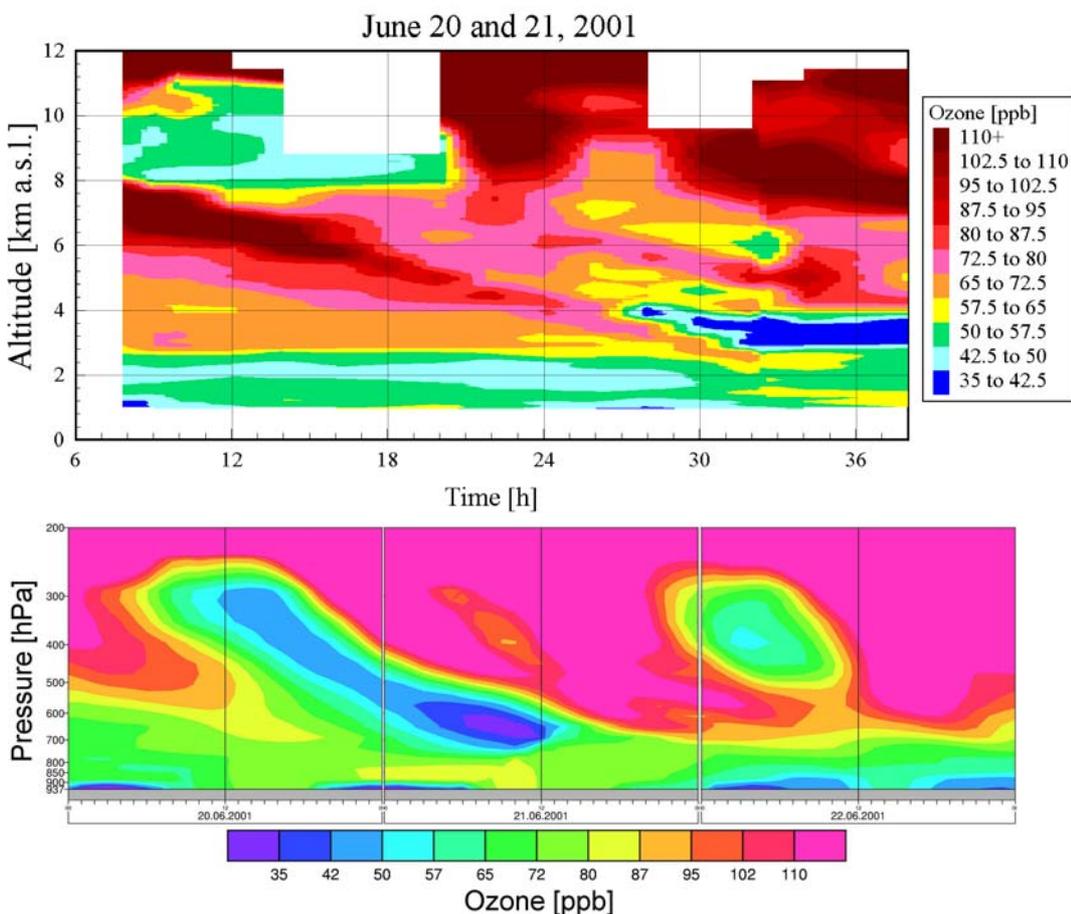
Auch die weiträumige Verteilung sowohl der gehobenen Grenzschicht-Luft als auch der stratosphärischen Luft fand beispielsweise in der Episode Mai/Juni 1997 (auch während der CRISTA-Episode) unter dem Einfluss von *Blocking* statt. Abbildung 4.13 zeigt den Verlauf einer „ $\Omega$ -*Blocking*“-Episode im Mai 2001, bei der es nach einer Akkumulationsphase über Europa zum Transport eines *Plumes* aus Aerosolen bis an die Ostküste Nordamerikas kommt. Dieser *Plume* ist im Ozon weniger ausgeprägt. Das von Süd nach Nord gerichtete Strömungsmuster im Bereich des zentralen Rückens scheint auch im Zusammenhang mit Sahara-Staub Ereignissen zu stehen (z.B. [Papayannis, 2003]).

### **2.4.4. Evaluierung**

Die Beobachtungen mit dem Ozonlidar des IFU in Garmisch-Partenkirchen boten eine hervorragende Gelegenheit vertikale und zeitliche Strukturen in der freien Troposphäre zu studieren. Diese Messungen wurden daher auch verwendet, um die Modellresultate zu überprüfen. Die Simulationen

mit dem EURAD-Modell zeigen die gleiche Struktur wie die Beobachtungsdaten. Auch beim Zeitpunkt des Eintreffens von Luftmassen am Messort, sowie bei der Höhenzuordnung gibt es eine gute Übereinstimmung. Auch bei der Ozonkonzentration gibt es eine gute Übereinstimmung wobei zu beachten ist, dass die Simulationsrechnungen – aufgrund der für die Bezugsjahre zu hohen Emissionsraten – bodennah eine Tendenz zur Überschätzung der Belastung haben.

Eine intensive Evaluierung des EURAD-Modells für die obere Troposphäre/untere Stratosphäre wurde auch in Verbindung mit dem AFO2000 Projekt TRACHT durchgeführt. Für Die Episode 8.-16. August 1997 standen neben Radiosonden-Daten (zum Beispiel Hohenpeißenberg) und Daten der Flüge aus dem MOZAIC Projekt auch Satellitendaten des CRISTA Instrumentes zur Verfügung. Zu den Ergebnissen gehörte auch hier, dass das Modell in der derzeitigen Konfiguration in der Lage ist, die Lage, Ausdehnung und Entwicklung von mesoskaligen Strukturen in der UTLS realistisch zu beschreiben. Speziell wurden Kaltlufttropfen, Streamer und *Plumes* aus aufgestiegener bodennaher Luft untersucht. Die Ozon-Konzentrationen lagen in der freien Troposphäre und der UTLS im Allgemeinen in einem Abweichungsbereich von 10-15% um die Messungen.



**Abb. 4.14:** Zeit-Höhenschnitt Ozon [ppb] für Garmisch Partenkirchen. Oben: Lidarmessungen (Zeitraum 20. Juni, 8 Uhr bis 21. Juni 14 Uhr). Unten: Daten des hemisphärischen EURAD Modells (Zeitraum 20.-22. Juni, markiert ist der Bereich der Lidar-Messungen). Achtung: die Farbskalen stimmen nicht überein.

### Episode Juni 2001

Roloefs et al [2003] verglichen die *Performance* verschiedener Chemie-Transport- bzw. Chemie-Klima-Modelle bei der Simulation einer Episode vom 20. bis 21. Juni 2001. Die Simulationsergebnisse wurden mit den Lidarmessungen aus Garmisch Partenkirchen verglichen. Diese zeigen eine komplexe Abfolge von stratosphärischen Intrusionen und Troposphärischen Luftmassen verschiedener Herkunft inklusive nordamerikanischer Grenzschichtluft. Details der Analysen finden sich in dem Artikel von Roloefs et al. Dieser Zeitraum wird auch von den Jahresrechnungen mit dem hemi-

sphärischen EURAD-Modell abgedeckt. Auf Abb. 4.14 sind Lidarbeobachtungen und EURAD-Simulation gegenübergestellt (der längere Zeitraum der EURAD-Daten soll einen Vergleich mit dem zitierten Artikel zu erleichtern). Die Intrusion am Anfang des Beobachtungszeitraums erstreckt sich zwischen etwa 5 und 8 km Höhe und dem Niveau der Zugspitze. Nachfolgend erreicht eine Zone mit niedrigen Konzentrationen den Messort. Anschließend folgt wiederum eine stratosphärische Intrusion. Die Simulation gibt diese Strukturen wieder. Dies gilt im Wesentlichen auch für ihre vertikale Erstreckung und den Konzentrationsbereich, mit Einschränkungen infolge der schlechteren Höhenauflösung des Modells.

## 2. 5 Bewertung des Erreichten/Ausblick

Im Rahmen des AFO2000 Projektes ATMOfAST wurde in Kooperation mit anderen Projekten – zum Beispiel dem AFO2000 Projekten TRACHT und IDEC/SENEVA das EURAD-Modellsystem erfolgreich auf hemisphärische Anwendungen erweitert. Damit steht ein komplexes und effizientes Werkzeug zur Verfügung, um die wichtigen Fragestellungen zur chemischen Hintergrundbelastung und zum Einfluss von Ferntransport untersuchen zu können. Dieses Modell ist auch in der Lage Emission, Bildung und Transport von Partikeln zu untersuchen. Weiterhin ist das Modell prognosefähig. Die Vorhersagen werden täglich im Internet den Interessierten zur Verfügung gestellt (unter <http://www.eurad.uni-koeln.de>). Dieses Modell konnte auch in einem Projekt des Umweltbundesamtes zu verwandten Fragestellungen eingebracht werden.

Bei den Fallstudien konnten die Ergebnisse der Projektpartner von der TUM und vom IMK-IFU mit einer unabhängigen Methode bestätigt und ergänzt werden. Wesentliche neue Aspekte betreffen die chemischen Prozesse in den *Plumes*. Es konnte gezeigt werden, dass photochemische Prozesse eine wichtige Rolle in der ersten Phase der Transportereignisse. Gealterte Luftmassen sind im wesentlichen chemisch neutral (auf Zeitskalen von einigen Tagen bis Wochen). Das Verschwinden der *Plumes* erfolgt im Wesentlichen durch Filament-Bildung und Mischung. Nur in relativ abgeschlossenen Strömungssystemen welche fernab der Emissionen liegen finden sich so niedrige Stickoxid Konzentrationen, dass es großflächig zu einem langsamen chemischen Abbau kommt.

Die Langfrist-Rechnungen zeigen, dass Ferntransport von Spurenstoffen ein häufig auftretendes Phänomen ist. Dabei gibt es auf der Nordhemisphäre dominante Quellregionen in Ostasien, der Osthälfte Nordamerikas und auch in Europa. Abhängig vom Zusammenspiel von Emissionen und Dynamik unterscheiden sich Zusammensetzung der Luftmassen und ihre Transportwege. Wichtige Zielregionen der *Plumes* sind die Westküste Nordamerikas, Europa, der Bereich um den östlichen Mittelmeerraum, Nordasien. Die polaren Breiten stellen ein weiteres wichtiges Zielgebiet für den Ferntransport aus mittleren Breiten dar.

Einen großen Einfluss auf die Belastung der Atmosphäre über Europa haben *Blocking*-Ereignisse. Sie stehen in Beziehung zu Phänomenen gilt für Akkumulation von Schadstoffen, deren Hebung, aber auch mit stratosphärischen Intrusionen (Kaltluft-Tropfen, Streamer). Nicht zuletzt spielen die stagnierenden Wetterlagen auch bei der Vermischung der Luftmassen mit dem Hintergrund im Laufe mehrerer Tage eine Rolle.

Sowohl das stratosphärische Ozon aus Intrusionen, Streamern und Kaltluft-Tropfen als auch die verschmutzte Luft der Interkontinental-*Plumes* bilden – nach dem Absinken in die mittlere und untere Troposphäre – ein Reservoir, welches in die Grenzschicht eingemischt werden kann. Dies kann beim morgendlichen Aufbau der Grenzschicht oder auch über Konvektion passieren. Dann erhöht sich die Basis des photochemischen Tagesgangs in der Grenzschicht um einige ppb. Der Anstieg kann sich dann auf die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung von Grenzwerten haben aber vor allem auch auf die Belastung der Vegetation (Anstieg der AOT40-Werte).

Der Umfang und die Komplexität der erzielten Daten ermöglichen noch weitere Analysen – besonders bei den Jahresrechnungen.

Die Ausweitung des Anwendungsgebietes auf lange Zeiträume und interkontinentale Modellgebiete macht es sinnvoll, zusätzlich stärker auch den Einfluss langsamerer chemischer Prozesse des atmosphärischen Hintergrundes zu untersuchen – z.B. der maritimen Grenzschicht. Auf kürzeren Zeitskalen spielen diese eine geringere Rolle. Ein weiteres Feld für sinnvolle Weiterentwicklungen sind Emissionen aus natürlichen Quellen – wie zum Beispiel aus Waldbränden und Bodenerosion (Sahara-Staub). Auf diesen Gebieten wird derzeit schon gearbeitet.

## 2.6. Vorträge und Publikationen

Vorträge und Proceedings (eine Publikation der Ergebnisse in einem wissenschaftlichen Journal ist in Vorbereitung):

- M. BEEKMANN, P. BONASONI, H. FELDMANN, J. KOWOL-SANTEN, P. JAMES, M. MEMMESHEIMER, A. PRÉVÔT, N. SAVAGE, E. SCHEEL, E. SCHUEPBACH, D. S. STEVENSON, A. STOHL, T. TRICKL, Vertical uplifting and regional modelling, pp. 141 to 142 in: *Transport and Chemical Transformation in the Troposphere*, Proceedings of EUROTRAC Symposium 2002, Garmisch-Partenkirchen (Germany), March 11 to 15, 2002, P. M. Midgley, M. Reuther, Eds., Markgraf Verlag (Weikersheim, Germany, 2002)
- H. FELDMANN, A. EBEL, H.J. JAKOBS, M. MEMMESHEIMER, M. KERSCHGENS, Simulation of Intercontinental Transport of Atmospheric Trace Constituents with an Eulerian Mesoscale Model, beim *EXPORT-E2 Workshop*, Jülich Oktober 2002.
- H. FELDMANN, A. EBEL, B. SCHÄLER, V. KÜLL, D. OFFERMANN, T. TRICKL, Transport and mixing processes in the upper troposphere/lower stratosphere, *GLOREAM Workshop*, Cologne, 2003
- H. FELDMANN, T. TRICKL, A. EBEL, H.J. JAKOBS, M. MEMMESHEIMER, The Impact of Atmospheric Long-Range Transport Events on the Composition of the Free Troposphere, *EGS - AGU - EUG Joint Assembly*, Nice, France, April 6-11, 2003, Abstract EAE03-A-10208
- H. FELDMANN, A. EBEL, B. SCHÄLER, V. KÜLL, D. OFFERMANN, T. TRICKL, Transport and mixing processes in the upper troposphere/lower stratosphere, *GLOREAM/EURASP Workshop 2003*, Köln, Germany, September 29 to October 1, 2003, Book of Abstracts, p. 5
- H. FELDMANN, T. TRICKL, M. MEMMESHEIMER, H. J. JAKOBS, M. KERSCHGENS, Analysis of the Chemistry and Transport during Intercontinental Transport Events, *1<sup>st</sup> EGU General Assembly*, Nice, France, April 25 to 30, 2004, Abstract EGU04-A-06099
- H. FELDMANN, A. EBEL, D. OFFERMANN, B. SCHÄLER, V. KÜLL, Transport, Chemie und Spurengasverteilung in der Tropopausenregion: TRACHT-Modell, Abschlussbericht zum AFO2000-Projekt 07ATF06, 2003.
- P. JAMES, H. FELDMANN, H.-J. KANTER, H. E. SCHEEL, A. STOHL, T. TRICKL, Atmospheric Long-range Transport and its Impact on the Trace-gas Distribution in the Free Troposphere over Central Europe (ATMOFAST), *ACCENT Workshop on Transport and Transformation of Pollutants*, Barnsdale Hall (U.K.), October 18 to 21, 2004
- A. EBEL, S. ECKHARDT, H. FELDMANN, C. FORSTER, H. JÄGER, H. JAKOBS, P. JAMES, H.-J. KANTER, M. KERSCHGENS, S. KREIPL, M. MEMMESHEIMER, H. E. SCHEEL, A. STOHL, T. TRICKL, H.

VOGELMANN, Atmospheric Long-range Transport and its Impact on the Trace-gas Concentrations in the Free Troposphere over Central Europe (ATMOFAST), *Atmosphärenforschung 2000, Newsletter* **9**, December 2004, GSF-Forschungszentrum (München, Germany, 2004), 7-10

M. MEMMESHEIMER, H.J. JAKOBS, E. FRIESE, H. FELDMANN, G. PIEKORZ, A. EBEL, Numerical studies of hemispheric tracer transport with the EURAD model system, *ACCENT/GLOREAM Workshop*, Apeldoorn, the Netherlands, 7-9 September, 2005.

### Zitate

BERGGREN, R., B. BOLIN, AND C.-G. ROSSBY: An aerological study of zonal motion, its perturbations and breakdown. *Tellus* **1** (2), 14-37, 1949

ECKHARDT, S., A. STOHL, H. WERNLI, P. JAMES, C. FORSTER, AND N. SPICHTINGER, A 15-year climatology of warm conveyor belts. *J. Climate* **17**, 218-237, 2004

EISELE, H., H. E. SCHEEL, R. SLADKOVIC, AND T. TRICKL, High-resolution lidar measurements of stratosphere-troposphere exchange. *J. Atmos. Sci.* **56**, 319-330, 1999

OFFERMANN, D., K.U. GROSSMANN, P. BARTHOL, P. KNIELING, M. RIESE, AND R. TRANT, The Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere (CRISTA) Experiment and Middle Atmosphere Variability; *J. Geophys. Res.* **104**, 16,311-16,325, 1999

OFFERMANN, D., B. SCHAELE, M. RIESE, M. LANGFERMANN, M. JARISCH, G. EIDMANN, C. SCHILLER, H. G. SMIT AND W. G. READ, Water vapor at the tropopause during the CRISTA 2 mission, *J. Geophys. Res.* **107** (D23), 8176, doi: 10.1029/2001JD000700, 2002

PAPAYANNIS, A., Saharan dust outbreaks towards Europe: 3 years of systematic observations (2000-2003), at: 1st EARLINET Symposium, 11-12 February 2003, Hamburg, Germany ([http://lidarb.dkrz.de/ec\\_earlinet/earlisymp/talks/WP7-Final-Hamburg%202003.pdf](http://lidarb.dkrz.de/ec_earlinet/earlisymp/talks/WP7-Final-Hamburg%202003.pdf))

PELLY J.L. AND B.J. HOSKINS, A new perspective on blocking. *J. Atmos. Sci.* **60**, 743-755, 2003

REX, D.F., Blocking action in the middle troposphere and its effect on regional climate. I. An aerological study of blocking action. *Tellus* **2**, 196-211, 1950a

REX, D.F., Blocking action in the middle troposphere and its effect on regional climate. II. A climatology of blocking action. *Tellus* **2**, 196-211, 1950a

ROLOEFS, G.J., KENTARCHOS, A.S., TRICKL., T., STOHL, A., COLLINS, W.J., CROWTHER, R.A., HAUGLUSTAINE, D. KLONECKI, A., LAW, K.S, LAWRENCE, M.G., VON KUHLMANN, R., Intercomparison of tropospheric ozone models: Ozone transport in a complex tropopause folding event, *J. Geophys. Res.* **108** (2003) STA 14

STOHL, A., TRICKL, T., A textbook example of long-range transport: Simultaneous observation of ozone maxima of stratospheric and North American origin in the free troposphere over Europe, *J. Geophys. Res.* **104** (1999) 30445-30462

TULET, P., V. CRASSIER, F. SOLMON, D. GUEDALIA AND R. ROSSET: Description of the mesoscale nonhydrostatic chemistry model and application to a transboundary pollution episode between northern France and southern England. *J. Geophys. Res.* **108**, D1, 4021, ACH 5, 2003