

**Atmosphärischer Ferntransport und seine Auswirkungen auf die  
Spurengaskonzentrationen in der freien Troposphäre über Mitteleuropa  
(ATMOFAST) – Das Teilvorhaben „Transportmodellierung“**

*Abschlußbericht*

*Auftraggeber:* Bundesministerium für Bildung und Forschung

*Auftragskennzeichen:* 07AFT08

*Förderzeitraum:* 1.4.2001 bis 31.3.2005

*Fertigstellung des Berichts:* 30.11.2005



*Durchführendes Institut:* Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökoklimatologie, Am Hochanger 13, 85354 Freising-Weihenstephan

*Projektleiter:* Andreas Stohl\*) ([astohl@nilu.no](mailto:astohl@nilu.no))

*Beteiligte Mitarbeiter:* S. Eckhardt, C. Forster, P. James, N. Spichtinger-Rakowsky, A. Stohl\*)

\*) Neue Adresse: Norsk Institutt for Luftforskning, Postboks 100, 2027 Kjeller, Norwegen

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart <b>Abschlußbericht</b>
3a. Titel des Berichts <b>Atmosphärischer Ferntransport und seine Auswirkungen auf die Spurengaskonzentrationen in der freien Troposphäre über Mitteleuropa Teilvorhaben „Transportmodellierung“</b>	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) <b>Stohl, Andreas; James, Paul; Forster, Caroline; Eckhardt, Sabine; Spichtinger-Rakowsky, Nicole</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>Technische Universität München Lehrstuhl für Ökoklimatologie Am Hochanger 13 85375 Freising-Weihenstephan</b>	7. Form der Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn</b>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen <b>07ATF08</b>
	11a. Seitenzahl Bericht <b>28</b>
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben <b>43</b>
	14. Tabellen <b>2</b>
	15. Abbildungen <b>25</b>
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <b>In diesem Teilvorhaben von ATMOfAST wurden Transportsimulationen durchgeführt, um den Interkontinentaltransport von Luftschadstoffen, insbesondere Ozon, und seinen Einfluss auf die Vertikalverteilung von Spurenstoffen über Mitteleuropa genauer zu bestimmen. Des Weiteren stand der Einfluss stratosphärischer Intrusionen auf den natürlichen Hintergrund im Ozon im Mittelpunkt. Über Trajektorienstatistiken, insbesondere für die Station Zugspitze, wo umfangreiche Meßdaten vorliegen, wurden die Transportwege und die Quellenregionen relevanter Substanzen bestimmt. – Im Rahmen von ATMOfAST wurden zahlreiche Verbesserungen am Modell FLEXPART selbst sowie an der Methodik der Auswertung der Modellergebnisse erzielt. Nicht zuletzt aufgrund dieser Verbesserungen gelangen mit FLEXPART automatisierte Vorhersagen und Analysen, welche von den internationalen Projektpartnern zur Planung der ICARTT-Meßeinsätze verwendet wurden. Erstmals gelangen Rückwärtssimulationen mit FLEXPART in kurzer Intervallfolge über einen langen Zeitraum. Dies hat es erlaubt, schnelle, ozonreiche Luftströmungen bis nach Asien zurückzuverfolgen sowie eine Einjahres-Klimatologie des Ursprungs von CO an der Zugspitze zu erstellen. Neben den im Projektantrag vorgesehenen Aufgaben wurden auch noch einige zusätzliche Arbeiten durchgeführt. So wurden regelmäßig Vorhersagen erstellt, die es dem Projektpartner IMK-IFU erlaubten, Messungen effizienter zu planen und die Messzeiten zu optimieren. Darüber hinaus wurde unter dem Eindruck des Augusthochwassers 2002 eine Studie zum Ursprung des als Niederschlag gefallenen Wasserdampfs durchgeführt. Dabei kamen die gleichen Methoden zum Einsatz, die auch zur Interpretation der Ozonmessungen verwendet wurden. Die wichtigen Ursprungsgebiete lagen über dem Mittelmeer und später auch über dem Schwarzen Meer.</b>	
19. Schlagwörter: <b>Lagrangesche Modellierung; Schadstofftransport; Stratosphärische Intrusion</b>	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report <b>Final Report</b>	
3a. Report Title <b>Atmospheric Long-range Transport and its Impact on the Trace-gas Concentrations in the Free Troposphere over Central Europe (ATMOFAST) – Subproject “Transport Modelling“</b>		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) <b>Stohl, Andreas; James, Paul; Forster, Caroline; Eckhardt, Sabine; Spichtinger, Nicole;</b>	5. End of Project <b>March 31, 2005</b>	
	6. Publication Date	
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	7. Form of Publication	
8. Performing Organization(s) (Name, Address) <b>Technische Universität München Lehrstuhl für Ökoklimatologie Am Hochanger 13 85375 Freising-Weihenstephan</b>	9. Originator's Report No.	
	10. Reference No. <b>07ATF08</b>	
	11a. No. of Pages Report <b>34</b>	
	11b. No. of Pages Publication	
13. Sponsoring Agency (Name, Address) <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn</b>	12. No. of References <b>43</b>	
	14. No. of Tables <b>2</b>	
	15. No. of Figures <b>25</b>	
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract <p>This subproject of ATMOFAST has been devoted to transport simulations to evaluate details of the intercontinental transport of pollutants, in particular ozone, and its influence on the vertical distributions of atmospheric constituents over Central Europe. Another focus was the impact of stratospheric intrusions on the natural ozone background. With trajectory statistics, carried out in particular for the Zugspitze station because of its long data record, we figured out the important transport pathways and source regions of pollutants. – Within ATMOFAST we achieved numerous improvements of the tracer model FLEXPART itself as well as in the methods applied to evaluate the model results. This progress has helped us to generate automated forecasts and analyses with FLEXPART which were widely used by international partners in the planning of the individual measurements during the ICARTT field campaign. Furthermore, we managed to carry out long-term short-step FLEXPART backward simulations. In this way fast air streams rich in ozone could be traced all the way back to Asia and, additionally, a one-year climatology of the origin of the CO observed at the Zugspitze summit could be completed. Beyond the activities initially proposed a few more subjects were tackled. Routine forecasts for the precise measurement planning of partner IMK-IFU have been provided in the internet. In addition, the impressions of the terrible flooding in August 1998 stimulated a study to determine the origin of the water vapour that eventually precipitated over Central Europe. The model options and methods were directly adopted from those used for the interpretation of the ozone measurements. The source regions of the humidity were found to be the Mediterranean Sea as well as the Black Sea at later times.</p>		
19. Keywords <b>Lagrangian modelling, atmospheric transport, stratospheric intrusion</b>		
20. Publisher	21. Price	

### 3.1. Zielsetzung

Die Hauptzielsetzung von ATMOfAST war, den Interkontinentaltransport von Schadstoffen in der Luft, insbesondere Ozon, und seinen Einfluss auf die aus Messungen bestimmte Vertikalverteilung von Spurenstoffen über Mitteleuropa zu bestimmen. Hinzugezogen werden sollten vor allem die in Garmisch-Partenkirchen erhobenen Messdaten (Lidarmessungen, sowie *In-Situ*-Messungen am Zugspitzgipfel), aber auch weitere Vertikalsondierungen, wie z.B. mit dem Flugzeug (Zusammenarbeit mit MOZAIK und CONTRACE). Des Weiteren stand der Einfluß stratosphärischer Intrusionen auf den natürlichen Hintergrund im Ozon im Mittelpunkt. Die Rolle der TU München war dabei Transportmodellsimulationen durchzuführen, die sowohl in Fallstudien der Interpretation der Messdaten dienen als auch weiterführend klimatologische Studien und Budgetabschätzungen liefern sollten. Über Trajektorienstatistiken, insbesondere für die Station Zugspitze, wo besonders umfangreiche Meßdaten vorliegen, sollten die relevanten Transportwege und die Quellenregionen relevanter Substanzen bestimmt werden. Von besonderem Interesse sind dabei neben Ozon auch  $\text{NO}_x$  und vor allem CO. Es wurde erwartet, daß Trajektorienstatistiken für CO besonders interessante Ergebnisse in Bezug auf die Emissionen von Waldbränden ergeben würden. Außerdem waren auch die Durchführung von Trajektorienrechnungen für zahlreiche Stationen des EUROTRAC-Subprojekt TOR-2 (Tropospheric Ozone Research-2) für einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren geplant.

Ein weiteres wichtiges Thema war die Ausbreitung von Waldbrandemissionen. Es sollte versucht werden, in den Lidardaten durch Waldbrände verunreinigte Schichten zu identifizieren und den Ursprung der Verunreinigung mit FLEXPART-Simulationen zu belegen. FLEXPART sollte danach dazu eingesetzt werden, die Bedeutung der Waldbrände für den Schadstoffhintergrund über Europa in starken Waldbrandjahren und in normalen Waldbrandjahren klimatologisch abzuschätzen.

Für die Simulationen wurden das Trajektorienmodell FLEXTRA sowie das Lagrangesche Partikel-Ausbreitungsmodell FLEXPART verwendet, welches in ATMOfAST und weiteren AFO-2000-Projekten erheblich weiterentwickelt werden mußte, um Details des Ferntransports bis auf die hemisphärische Skala erfassen zu können.

### 3.2 Überblick

Dieser Bericht beschreibt die spezifischen Arbeiten der TUM-Arbeitsgruppe, wobei die wissenschaftliche Motivation dieser Arbeiten vornehmlich aus dem Gesamtüberblick (Kapitel 1) hervorgeht. Viele wissenschaftliche Ergebnisse, die in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern gewonnen wurden, sind ebenfalls in Kapitel 1 dargestellt und werden hier nur insofern wiederholt als es für die Darstellung der TUM-Arbeiten notwendig ist. In Kapitel 3.3 folgt eine kurze Beschreibung der verwendeten Lagrangeschen Modelle und Methoden, in Kapitel 3.4 ein Überblick über die durchgeführten Arbeiten. In Kapitel 3.5 werden Modellergebnisse zu Fallstudien präsentiert, die im Bericht des IMK-IFU (Kapitel 2) genauer beschrieben und durch weitere Fälle ergänzt sind, in Kapitel 3.6 werden Resultate zur Klimatologie der Quellenregionen von am Zugspitzgipfel gemessenem CO vorgestellt und in Kapitel 3.7 werden schließlich die außerplanmäßigen Arbeiten zum Wasserdampftransport im August 2002 kurz ausgeführt. Schließlich findet sich in Kapitel 3.8 eine kurze Bewertung der erzielten Resultate.

### 3.3. Eingesetzte Verfahren: Die Lagrangeschen Modelle FLEXTRA und FLEXPART

Es wurden zwei Lagrangesche Modelle verwendet: ein einfaches Trajektorienmodell, sowie ein komplexes Partikelausbreitungsmodell. FLEXTRA (<http://www.forst.tu-muenchen.de/ext/lst/meteo/stohl/flextra.html>) ist ein Modell zur Berechnung von dreidimensionalen Vorwärts- oder Rückwärtstrajektorien auf der Basis von ECMWF-Daten. Dieses Modell wurde z.B. für die ersten Nach-

weise von Interkontinentaltransport von Ozon [Stohl and Trickl, 1999] und von kanadischen Waldbrandemissionen über Europa [Forster et al., 2001] verwendet, sowie für die ersten globalen Transport-Klimatologien [Stohl, 2001] und eine Fünfzehnjahre-Klimatologie sogenannter *Warm Conveyor Belts* [Eckhardt et al., 2004].

Das stochastische Lagrangesche Partikel-Modell FLEXPART [Stohl et al., 1998] berechnet die Ausbreitung von Tracern, indem die Trajektorien einer großen Anzahl sogenannter Partikel berechnet werden. Zusätzlich zu von den Input-Daten aufgelösten Bewegungen werden zur Simulation von Turbulenz und Konvektion auch stochastische Komponenten zur Trajektorienberechnung verwendet. Das Modell wurde auch zur Berechnung von Ozontransport in stratosphärischen Intrusionen verwendet, wobei hierzu vor dem Projektstart bereits Vergleiche mit anderen Modellen [Meloan et al., 2003] und mit Messdaten [Stohl et al., 2000; Cristofanelli et al., 2003] vorlagen.

### **3.4. Durchführung der Arbeiten**

Im Verlauf des Projektes wurden das verwendete Modell FLEXPART sowie die Methodik zur Auswertung der Resultate wesentlich verfeinert. Neben Verbesserungen diverser Parameterisierungen (z.B. des Konvektionsschemas, sowie der Darstellung der Turbulenz in der freien Troposphäre und Stratosphäre) war die wesentlichste Modelländerung die Generalisierung der Methoden zur Durchführung von Rückwärtsläufen, sodass nun z.B. sowohl Mischungsverhältnisse als auch Konzentrationen durch Rückwärtsläufe rekonstruiert werden können. Des weiteren ist die Methodik neu, dass die Resultate der Rückwärtsläufe (sogenannte Emissionssensitivitäten) mit Emissionsinventaren verschnitten und als Quellenbeitragskarten dargestellt werden können. Die Fallstudien zeigen gute Beispiele für diese neue Technik, die auch in anderen AFO-Projekten zur Anwendung kam. Eine andere Studie zeigte auch die Grenzen der Verwendung von Analysedaten auf.

Für das EUROTRAC-Subprojekt TOR-2 (Tropospheric Ozone Research-2) wurden planmäßig auch Trajektorienrechnungen für zahlreiche Stationen und für einen Zeitraum von mehr als zehn Jahre abgeschlossen und den TOR-2-Kollegen über einen *ftp-Server* zur Verfügung gestellt. Diese werden derzeit vom Projektpartner IMK-IFU eingesetzt, um die Filterung seiner Langzeitreihen auf der Zugspitze zu vertiefen. Entgegen unseren Erwartungen wurde dieser Datensatz von den internationalen Kollegen aber weniger genutzt als erwartet, daher wird in diesem Bericht mangels wissenschaftlicher Ergebnisse nicht weiter auf dieses Thema eingegangen.

Gemeinsam mit Partner 1 wurden zahlreiche Fallstudien zu verschiedenen Transportmechanismen gemacht: Stratosphären-Troposphären-Transport, Interkontinentaltransport, Antransport aus Ostasien, sowie aus dem subtropischen Atlantik. Viele dieser Fallstudien sind im folgenden Unterkapitel sowie in Kapitel 1 ausführlich dokumentiert. Einige Arbeiten gemeinsam mit internationalen Partnern sind auch noch im Gange, z.B. für die Periode der ICARTT-Kampagne.

Für den Zugspitzgipfel wurde FLEXPART über einen langen Zeitraum mit zeitlich hoher Auflösung rückwärts laufen gelassen. Die berechneten Emissionssensitivitäten wurden dann mit den gemessenen CO-Konzentrationen gefaltet und so die Ursprungsgebiete des gemessenen CO identifiziert. Partner 1 hat diese Resultate dann auch für eine Transportwegestatistik und Untersuchungen zum Aerosol in der freien Troposphäre genutzt.

Fallstudien wurden auch zum weiträumigen Transport von Waldbrandemissionen angestellt. Insbesondere die ICARTT-Kampagne bot hier eine grossartige Gelegenheit, da es in diesem Zeitraum sehr viele Waldbrände in Alaska und Westkanada gegeben hat und auch viele Messdaten sowohl von Projektpartner 1 als auch von internationalen Projektpartnern vorliegen. Von besonderem Interesse sind z.B. die Interpretation von Lidarmessdaten aus Chebogue Point, USA, mit Hilfe von FLEXPART (Duck, T., A. Stohl et al., in Vorbereitung) sowie von Lidar- und Flugzeugmessdaten

in Europa. Diese Daten zeigen massive Aerosolerhöhungen sowie auch schwach erhöhte Ozonkonzentrationen in den Waldbrandschichten. Da die ICARTT-Kampagne noch nicht vollständig ausgewertet ist, sind Publikationen hierzu erst in ein paar Monaten zu erwarten.

Als zusätzliche (d.h., im Arbeitsplan nicht vorgesehene) Hilfestellung für die Projektpartner zur Planung von ATMOFAST-Messkampagnen (besonders mit Ziel Interkontinentaltransport) wurden basierend auf GFS (Global Forecast System) Daten des NCEP (National Center for Environmental Prediction) täglich Trajektorienvorhersagen mit FLEXTRA durchgeführt und auf eine speziell eingerichtete und täglich automatisch aktualisierte Internetseite gestellt ([http://www.forst.tu-muenchen.de/EXT/LST/METEO/trajs\\_fx.html](http://www.forst.tu-muenchen.de/EXT/LST/METEO/trajs_fx.html)). Umfangreichere Vorhersagen wurden auf Bedarf fallweise gemacht, insbesondere für die ICARTT-Kampagne, an der auch ATMOFAST beteiligt war.

Als eine besondere, im Projektantrag ebenfalls nicht aufgeführte Arbeit wurde schliesslich in Reaktion auf die katastrophalen Überschwemmungen im August 2002 in weiten Teilen Mitteleuropas auch Untersuchungen des Ferntransports von Wasserdampf aufgenommen. Insbesondere sollten dabei die Ursprungsregionen des Wassers, das im August 2002 fiel, identifiziert werden.

### **3.5. Bestimmung der Quellenregionen in Fallstudien zu mit Hilfe des Lidars in Garmisch-Partenkirchen gemessenem Ozon**

In diesem Abschnitt werden die eingesetzten Verfahren anhand einiger der gemeinsam mit Partner IMK-IFU durchgeführten Fallstudien erläutert und bewertet. Weitere Details (unter anderem über die zur Interpretation einbezogenen Meßdaten) sowie weitere Fälle finden sich im Bericht des IMK-IFU (Kapitel 2) bzw. in bereits erschienenen Veröffentlichungen [z.B. Trickl et al. 2003]. Zusätzliche Fälle wurden in Zusammenarbeit mit dem CONTRACE-Projekt und während der ICARTT-Kampagne untersucht. Letztere Arbeiten sind erst teilweise abgeschlossen.

#### **3.5.1. Methoden**

Für die Perioden der Fallstudien wurden typischerweise vier verschiedene Simulationen durchgeführt. Erstens wurden zur Erlangung einer ersten Übersicht eine Vielzahl von Rückwärtstrajektorien gerechnet, die entlang des Lidar-Vertikalprofils in engem zeitlichen Abstand endeten. Dies ergab erste Hypothesen bezüglich des Ursprungs erhöhter Ozonkonzentrationen, z.B. Ozon stratosphärischen Ursprungs, oder aber interkontinental transportiertes Ozon.

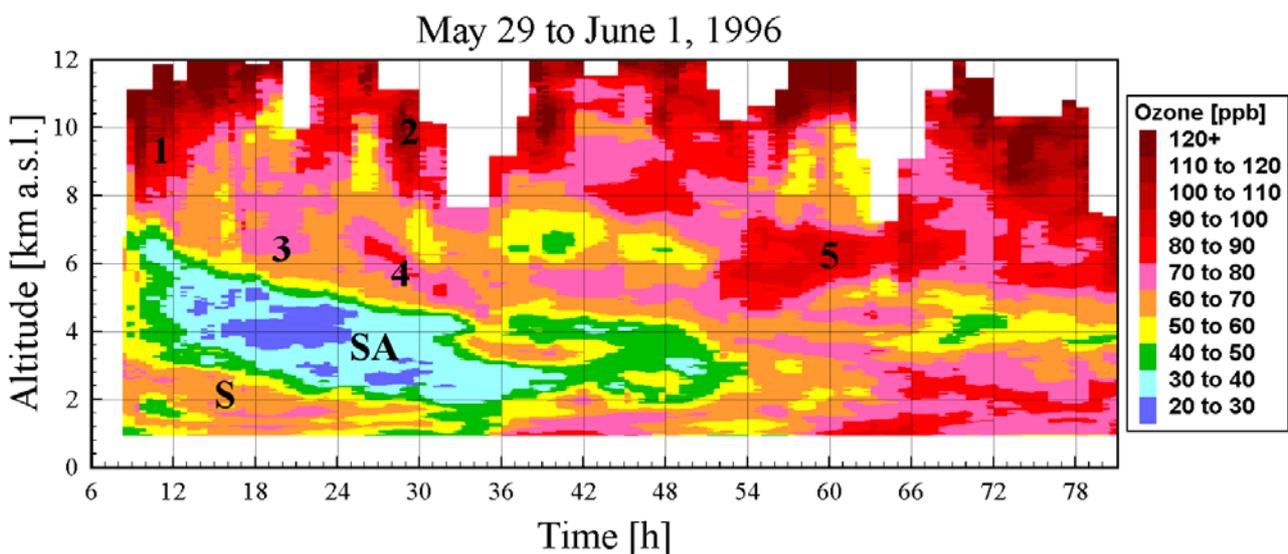
Im nächsten Schritt wurde FLEXPART typischerweise zweimal vorwärts gerechnet, wobei einerseits ein stratosphärischer Ozontracer, andererseits ein nordamerikanischer Emissionstracer verwendet wurden. Der stratosphärische Ozontracer wurde entsprechend einer statistischen Beziehung von Ozon mit der sogenannten potentiellen Wirbelgröße (*potential vorticity*, PV) in der Stratosphäre initialisiert und dann in der Troposphäre passiv advehiert. Dieser Tracer wurde als Zeit-Höhenprofil über Garmisch dargestellt und mit den Messungen verglichen. Dabei ergab sich oft eine gute Übereinstimmung der beobachteten Strukturen und damit eine Bestätigung des stratosphärischen Ursprungs des gemessenen Ozons. Der nordamerikanische Emissionstracer wurde entsprechend der Verteilung von anthropogenen Emissionen (typischerweise von CO, oder von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>)) in Nordamerika am Erdboden freigesetzt. Dazu wurde zunächst das GEIA, später das EDGAR-Emissionsinventar (EDGAR (1995), <http://arch.rivm.nl/env/int/coredata/edgar>) verwendet.

Im letzten Schritt wurde FLEXPART rückwärts gerechnet. Hierzu wurden Partikel in engen vierdimensionalen (Zeit und Raum) Boxen freigesetzt, die an Stellen gesetzt wurden, an denen interessante Ozonmessungen (normalerweise erhöhtes Ozon) gemacht wurden. Diese Partikel wurden dann rückwärts in der Zeit advehiert, wobei sich eine Sensitivitätsfunktion zum Emissionsinput ergibt [Stohl et al. 2003]. Insbesondere der sogenannte *Footprint* dieser Funktion gibt Information

darüber, wo Bodenemissionen (und Ozonbildung aus diesen Emissionen) einen relevanten Beitrag zu den Messungen geliefert haben könnten. Eine Multiplikation dieser Funktion mit einem Emissionsfluss ergibt dann außerdem noch die raum-zeitliche Verteilung des Quellenbeitrags eines bestimmten Tracers (z.B. CO, oder NO<sub>x</sub>). Es folgen ein paar Beispiele von Fallstudien, die gemeinsam mit dem Projektkoordinator, Thomas Trickl, durchgeführt wurden.

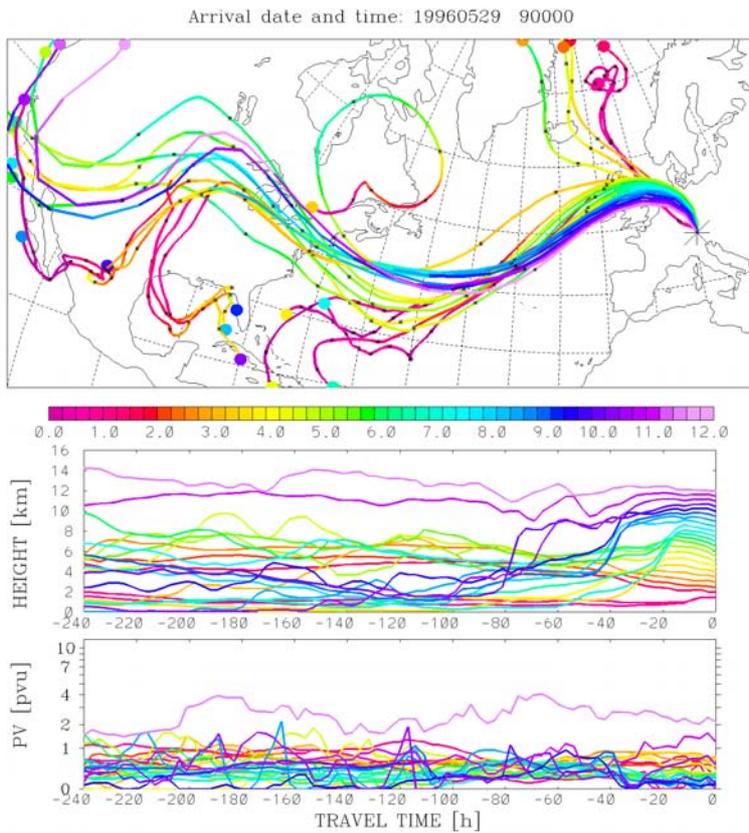
### 3.5.2. Fall 1 – Mai 1996

Abb. 3.1 zeigt eine 4-Tages-Zeitreihe von Lidarmessungen während des Durchzugs eines Hochdruckgebiets über Mitteleuropa im Mai 1996. Mehrere absinkende Schichten von erhöhtem sowie niedrigem Ozon, sowie der Aufbau von photochemisch gebildetem Grenzschichtozon ab dem 30. Mai sind erkennbar. Am 29. Mai ist die niedrigste Schicht (unterhalb von 3.5 km a.s.l.) von einer stratosphärischen Intrusion verursacht, die später auch den Boden erreicht. Während der ersten 2 Tage wurde eine ca. 2 km tiefe Schicht besonders niedriger Ozonkonzentrationen (z.T. nur 25 ppb) beobachtet. In der mittleren und oberen Troposphäre wurden während der gesamten Periode z.T. sehr hohe Ozonkonzentrationen (80 bis mehr als 100 ppb) gemessen.

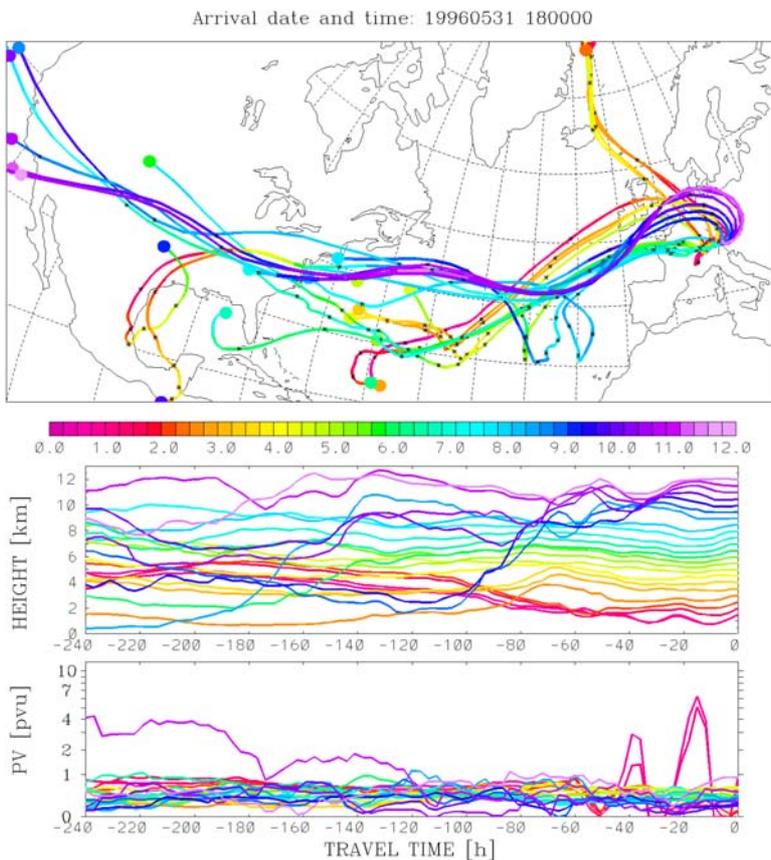


**Abb. 3.1:** Messungen mit dem Garmischer Ozonlidar vom 29. Mai bis zum 1. Juni 1996: Die fünf markierten Bereiche wurden durch Modellsimulationen genauer untersucht (siehe [Trickl et al. 2003]).

FLEXTRA Rückwärtstrajektorien zeigen, dass die Luftmassen, die oberhalb der subtropischen Schicht ankommen, einige Zeit über den USA verbracht haben. Abb. 3.2 and 3.3 zeigen FLEXTRA Rückwärtstrajektorien für den 29. Mai (9 UTC) und 31. Mai (18 UTC). Abb. 3.2 zeigt die Situation knapp nach Beginn der Lidarmessungen. Trajektorien, die in den untersten 3 km ankommen, kommen aus dem Nordwesten. Ein Teil von ihnen sinkt über Island stark ab und ist mit einer stratosphärischen Intrusion assoziiert. Trajektorien, die zwischen 3 und 4 km ankommen, scheren stark von nordwestlicher nach südwestlicher Ankunftsrichtung, während diejenigen, die in noch größerer Höhe, bis etwa 6-7 km, ankommen, aus dem subtropischen Atlantik stammen. Sie steigen überdies aus der maritimen Grenzschicht auf und sind mit den sehr niedrigen Ozonkonzentrationen in Abb. 3.1 assoziiert. Oberhalb von 7 km kommen die Trajektorien von weiter nördlich. Ein Teil davon steigt rasch aus der nordamerikanischen Grenzschicht (Texas sowie westliches und zentrales Mexiko) auf und folgt dem *Jet Stream* in der oberen Troposphäre nach Europa. Diese Trajektorien kommen in Höhen an, in denen sehr hohe Ozonkonzentrationen gemessen wurden.



**Abb. 3.2:** FLEXTRA Rückwärtstrajektorien von Garmisch-Partenkirchen (29. Mai 1996; 9:00 UTC). In der oberen Abbildung kodiert die Farbe direkt die aktuelle Höhe in Kilometern. Die farbigen Kreise am Ende (10 Tage zurück) zeigen die entsprechende Ankuftshöhe oberhalb von Garmisch-Partenkirchen. Kreuze markieren tägliche Intervalle entlang der Trajektorien. In der mittleren und unteren Abbildung zeigt die Farbkodierung die entsprechende Ankuftshöhe oberhalb von Garmisch-Partenkirchen.

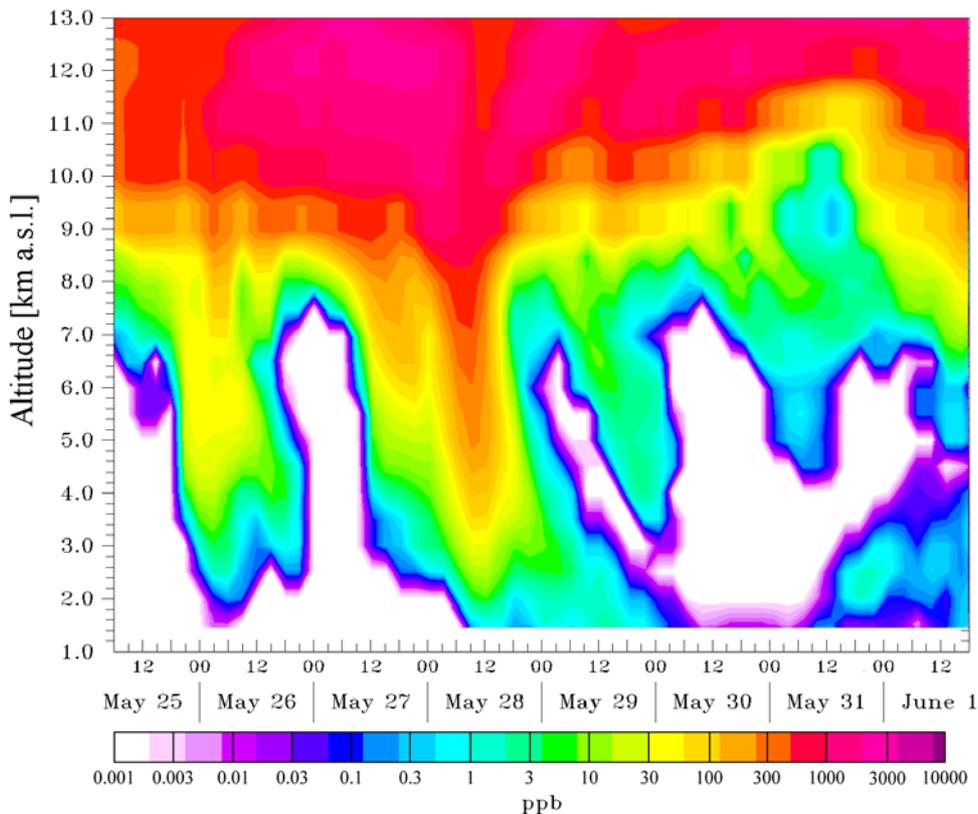


**Abb. 3.3:** Wie Abb. 3.2., aber für den 31. Mai um 18 Uhr UTC.



Um die Ankunft nordamerikanischer Verschmutzung noch besser einordnen zu können, wurde ein nordamerikanischer  $\text{NO}_x$ -Tracer vorwärts gerechnet und als Zeit-Höhen-Diagramm am Meßstandort Garmisch-Partenkirchen geplottet (Abb. 3.5). Diese Simulation bestätigt die Herkunft der ozonreichen Schichten in der obersten Troposphäre und des von ca. 6 auf 4 km absinkenden transatlantischen Bereichs in der Meßserie aus der nordamerikanischen Grenzschicht. Die höchsten Konzentrationen ergeben sich am Beginn der Messungen und sind mit der Ankunft texanisch-mexikanischer Luftmassen assoziiert. Im Anschluß durchgeführte Simulationen zeigen in der obersten Troposphäre zu späteren Zeiten einen noch deutlicheren Beitrag aus Mexiko (sowie Texas, Kalifornien und dem Südosten des U.S.A.). Diese Verstärkung ist vermutlich durch den Wechsel von GEIA- auf den neueren EDGAR-Kataster zurückzuführen.

In der zweiten Hälfte der Beobachtungsperiode war die freie Troposphäre überwiegend sehr trocken. In diesen trockenen Schichten waren die Ozonkonzentrationen teilweise sehr hoch und es lag nahe, dass dieses Ozon aus der Stratosphäre stammt. Deshalb wurde eine Simulation mit einem stratosphärischen Ozon-Tracer gemacht und für Garmisch-Partenkirchen dargestellt (Abb. 3.6). Diese Simulation wurde für das Gebiet zwischen  $80^\circ \text{ W}$  und  $40^\circ \text{ O}$  gemacht und umfasst damit ein etwas größeres Gebiet als eine frühere Simulation, die wenig stratosphärischen Beitrag zeigte. Abb. 3.6 zeigt, dass am 31. Mai stratosphärischer Ozon-Tracer oberhalb von Garmisch-Partenkirchen ankam. Allerdings sind die Konzentrationen deutlich niedriger als die beobachteten Ozonwerte und können damit einen stratosphärischen Ursprung des hohen Ozons nur teilweise bestätigen.. Eine Erklärung dieser ozonreichen Schicht gelang schließlich durch Rückverfolgung der Luftströmung bis in den Pazifikraum (Kapitel 2.4.2.2).



**Abb. 3.6:** Zeit-Höhen-Schnitt eines stratosphärischen Ozon-Tracers von 25. Mai bis 1. Juni oberhalb von Garmisch-Partenkirchen. Die Farbskala ist logarithmisch.

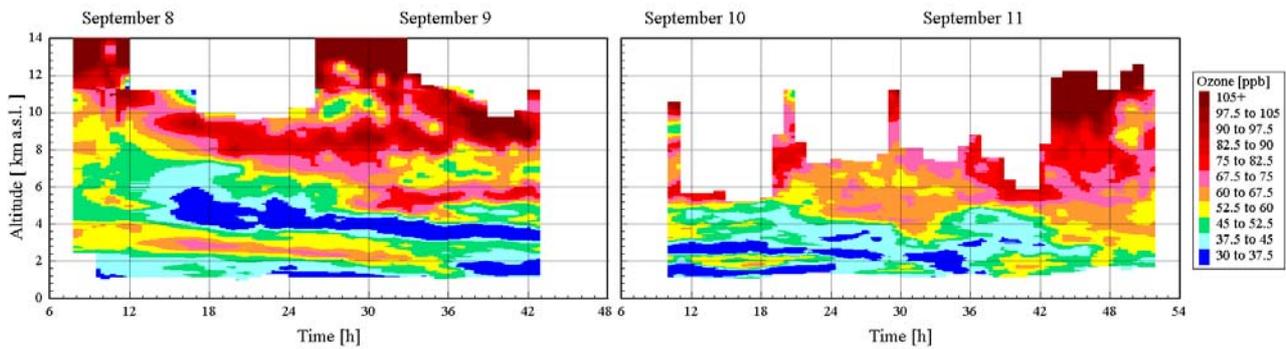


Abb. 3.7: Lidar Messungen vom 8. bis 12. September 2000.

### 3.5.2. Fall 2 – September 2000

Abb. 3.7 zeigt Ozonsondierungen vom 8.-12. September 2000. Wieder wurde zunächst eine stratosphärische Intrusion beobachtet (hohe Ozonkonzentrationen zwischen 2 und 4 km am 8. September), subtropische Luft mit niedrigem Ozon zwischen 4 und 7 km und nordamerikanische Luft mit hohem Ozon darüber (oberhalb von 7 km). Die Trajektorienrechnungen (Abb. 3.8) zeigen ein Ursprungsgebiet in den östlichen U.S.A., aber diesmal weit im Süden. Der Export erfolgte im Gegensatz zu den Fällen Mai 1996 und 1997 entlang der Ostküste nach Nordosten, der Import nach Mitteleuropa ist jedoch (nach Anhebung der Luft in einem Warm Conveyor Belt) wiederum anti-zyklonal, wodurch sich die Ähnlichkeit mit diesen Fällen ergibt. Die Trajektorien reichen über dem Südosten der U.S.A. nur bis knapp unter 3 km. Wie aus Satellitenbilder zu entnehmen ist, gab es jedoch in dieser Gegend erhöhte Gewittertätigkeit, wodurch ein Austausch mit der Grenzschicht gefolgert werden kann.

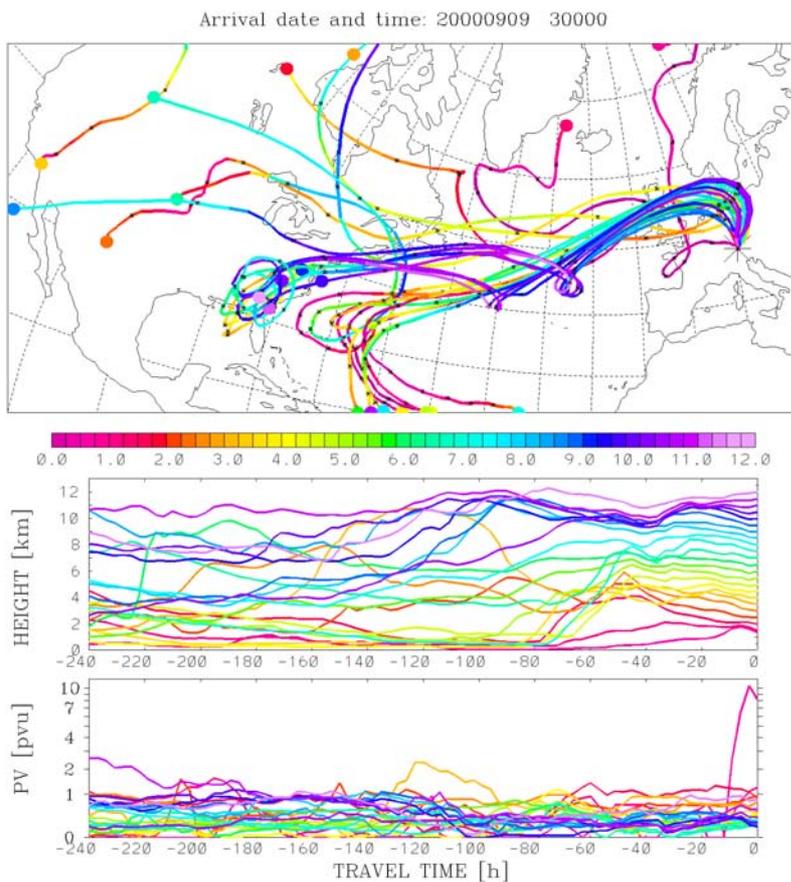
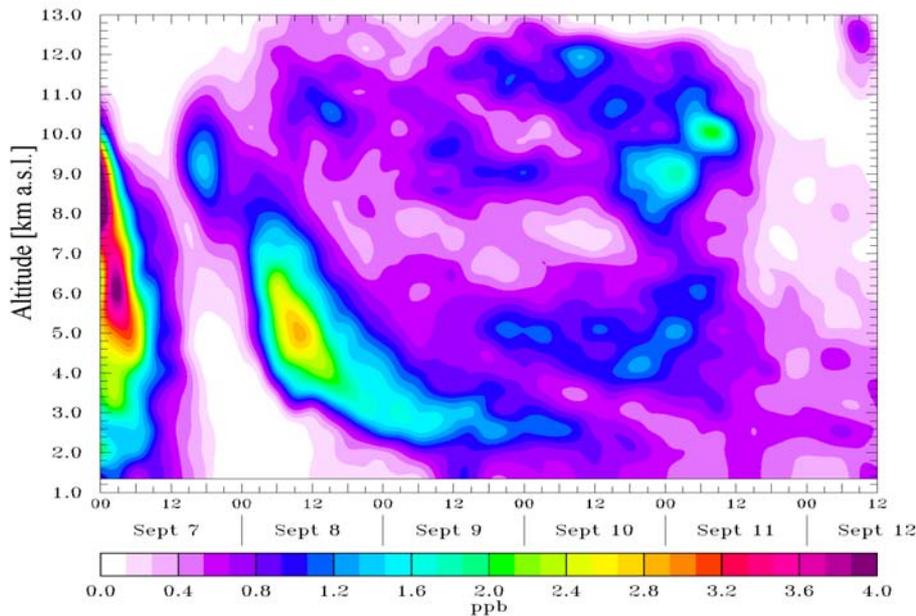


Abb. 3.8: FLEXTRA Rückwärtstrajektorien für den 9. September 2000 um 3 Uhr UTC.

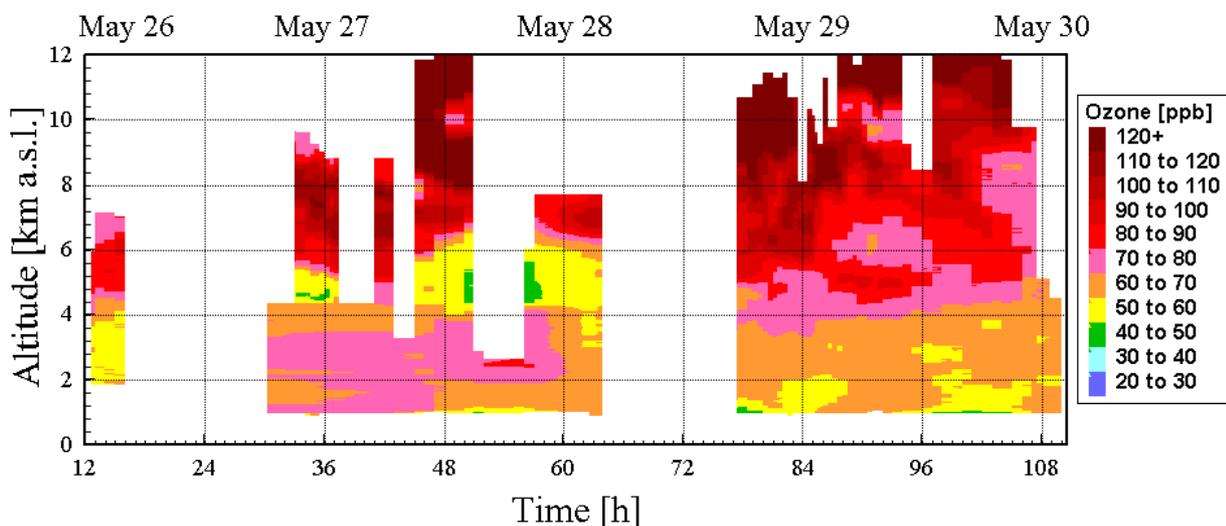


**Abb. 3.9:** Zeit-Höhenchnitt des nordamerikanischen NO<sub>x</sub>-Tracers oberhalb von Garmisch-Partenkirchen vom 7. bis 12. September 2000.

Abbildung 3.9 zeigt den nordamerikanischen NO<sub>x</sub>-Tracer für das Profil oberhalb von Garmisch-Partenkirchen. Wie schon im vorangegangenen Fall sind die Schichten mit hoher Ozonkonzentration in der oberen Troposphäre zu Beginn der Messungen sehr gut durch den Tracer erklärt. Die relativ geringen simulierten NO<sub>x</sub>-Tracer-Konzentrationen sind unter Umständen auf die erwähnte Gewittertätigkeit zurückzuführen, die vielleicht von dem Konvektionsschema nicht voll erfasst wurde.

### 3.5.3. Fall 3 – Mai 1999

Im Mai 1999 wurden ungewöhnlich hohe Ozonkonzentrationen, bis zu 130 ppb, in der freien Troposphäre oberhalb von Garmisch-Partenkirchen beobachtet (Abb. 3.10). Die Messungen wurden aufgrund von Regenfällen mehrmals unterbrochen. Trotzdem wird die beobachtete Ozonverteilung relativ gut durch eine Simulation eines nordamerikanischen NO<sub>x</sub>-Tracers reproduziert (3.11), was einen großen Anteil nordamerikanischen Ozons nahelegt. Rückwärtstrajektorien (Abb. 3.12 und 3.13) zeigen den Transport dieses Ozons nach Europa.



**Abb. 3.10:** Ozonlidar-Messungen vom 26. bis 30. Mai 1999 oberhalb von Garmisch-Partenkirchen.

Die hohen Ozonwerte lassen sich jedoch nicht durch Beobachtungen in den U.S.A. belegen. Ein Teil der Luftströmung stammt wiederum (wie in Fall 1) aus dem Pazifikraum. Rückwärtsrechnungen zeigen auch hier den Einfluß einer Stratophärenluftintrusion (Kapitel 3.4.4).

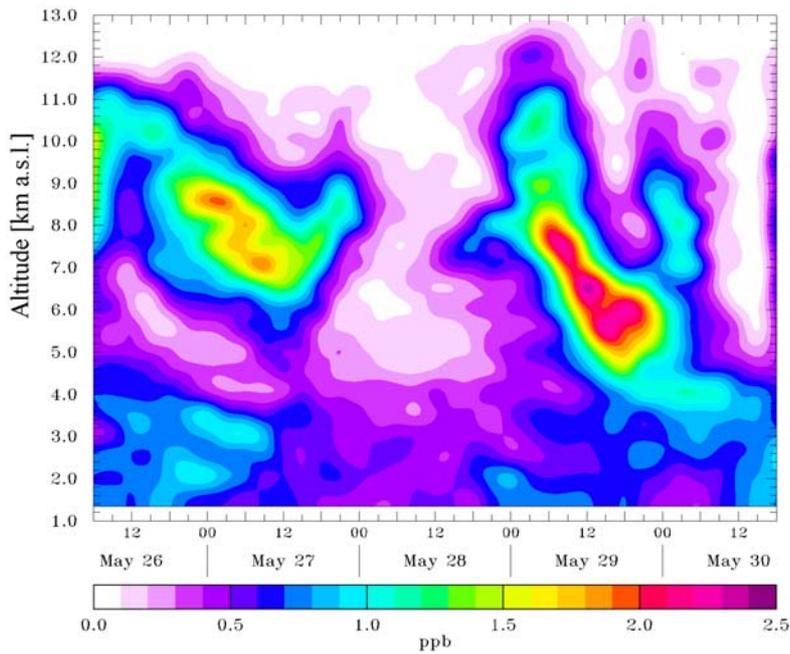


Abb. 3.11: Nordamerikatracer-Simulation für den 26. bis 30. Mai 1999

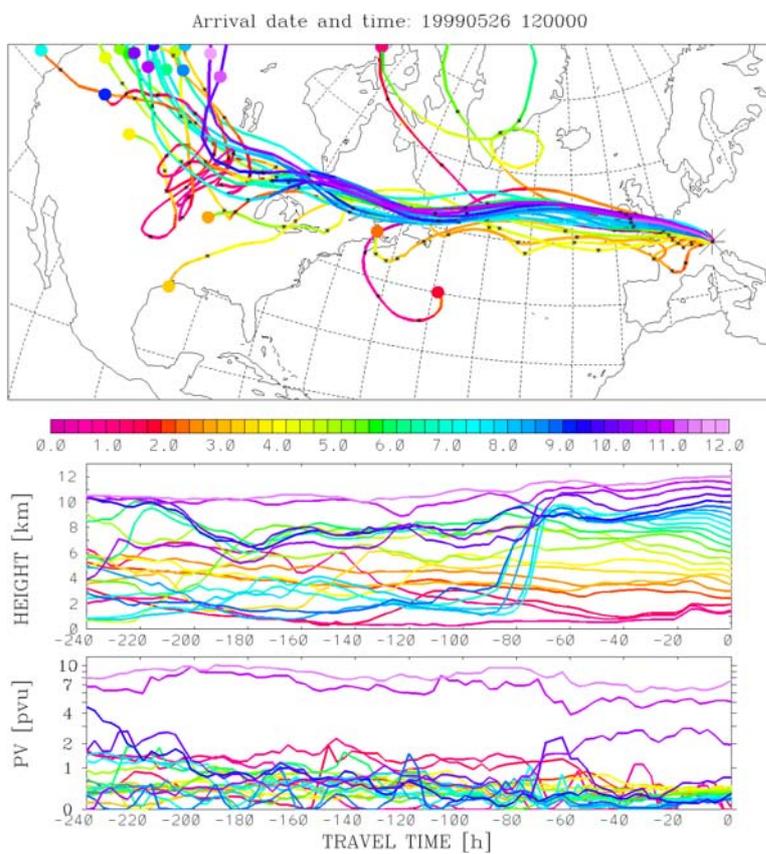


Abb. 3.12: FLEXTRA Rückwärtstrajektorien für 26. Mai, 1999, 12:00 UTC; Details: siehe Abb. 2.2.

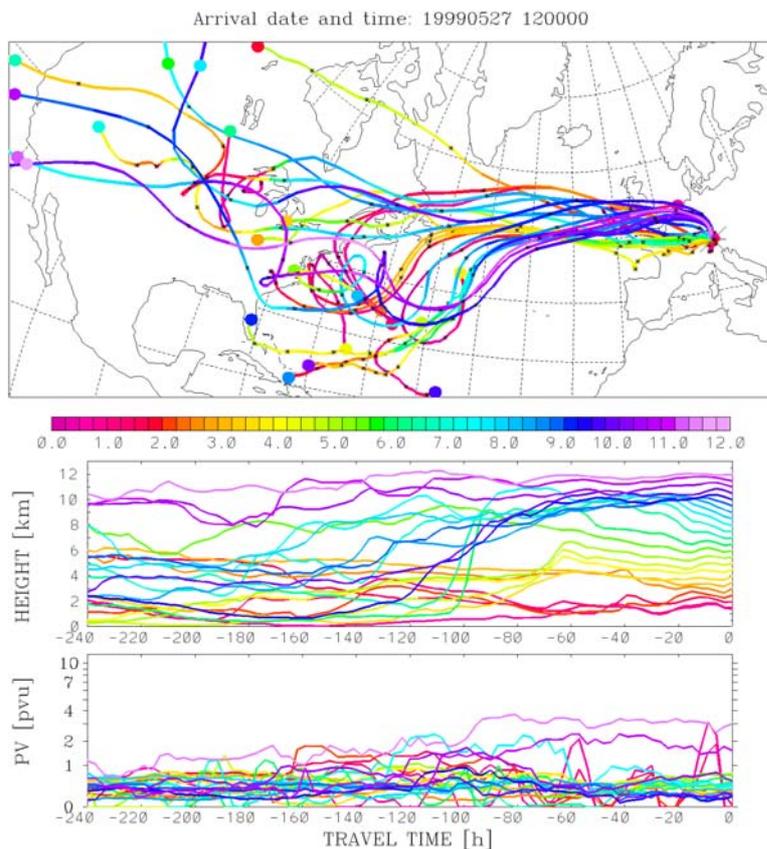


Abb. 3.13: FLEXTRA Rückwärtstrajektorien 27. Mai 1999, 12:00 UTC; Details: siehe Abb. 2.2.

### 3.6. Eine “Klimatologie” der Quellenregionen von CO für die Zugspitze

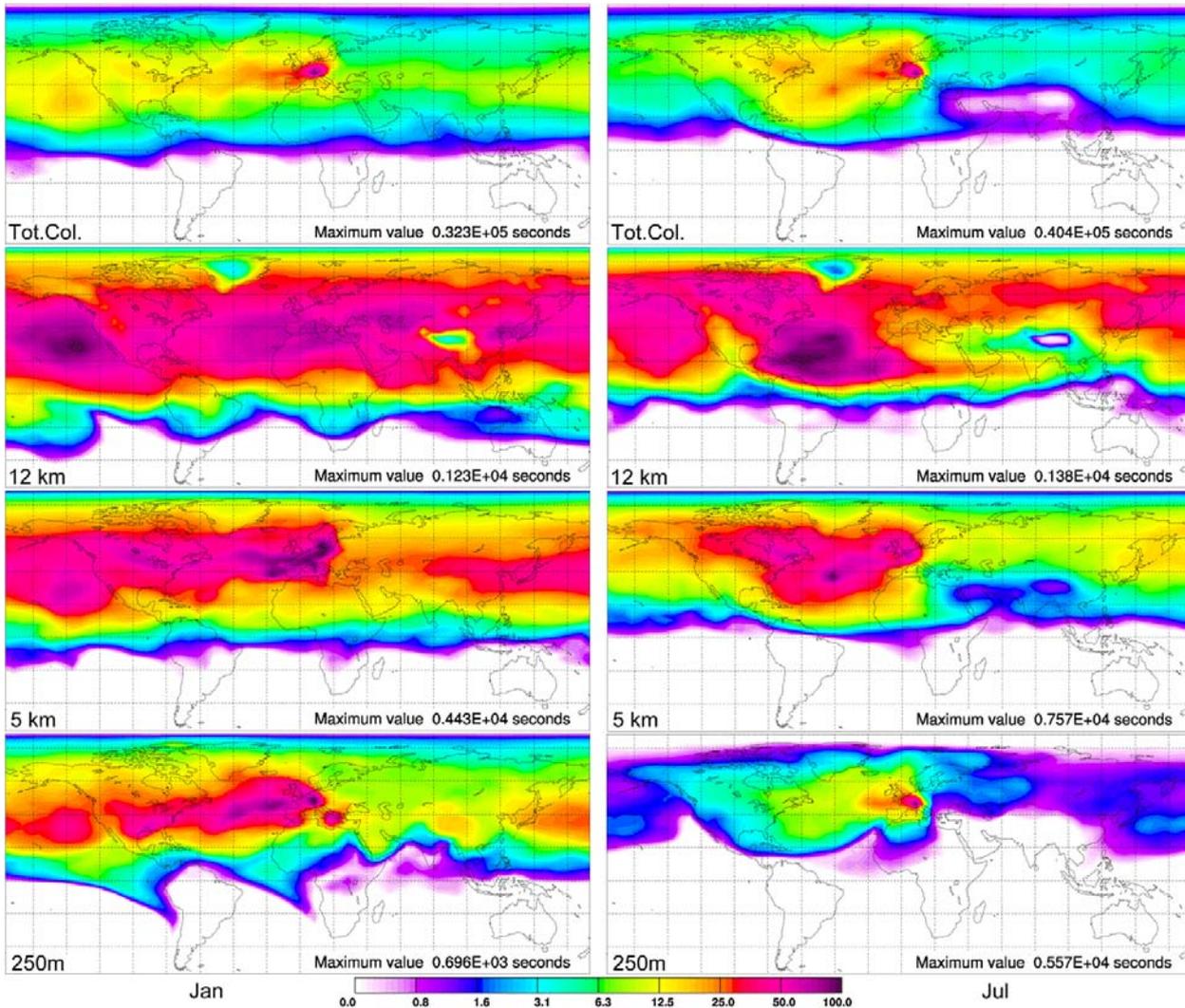
Kohlenmonoxid (CO) wird kontinuierlich an der Zugspitze gemessen und eignet sich daher hervorragend für die statistische Untersuchung zum Ursprung der Luftverschmutzung an der Zugspitze. Wir haben deshalb für das Jahr 2000 alle drei Stunden Rückwärtsrechnungen mit FLEXPART von der Zugspitze gemacht und mit den Messungen kombiniert, um die Quellenregionen des CO statistisch zu bestimmen.

Alle drei Stunden wurde eine Vierzigtag-Rückwärtssimulation mit 20000 Partikeln gestartet, die in einer kleinen Box (400 m Höhe sowie  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$  horizontale Ausdehnung) am Ort der Zugspitze freigesetzt wurden. Aus den Simulationen wurde eine Größe berechnet, welche die Sensitivität zu den eingegebenen Emissionen angibt und der Aufenthaltszeit der Partikel proportional ist.

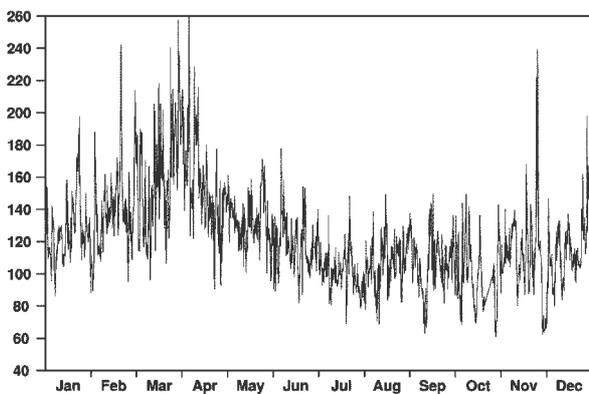
Abbildung 3.14 zeigt die Verteilung der Partikel-Aufenthaltszeiten in drei verschiedenen Höhengschichten und in der gesamten Säule für alle Luftmassen, die im Januar und im Juli 2000 an der Zugspitze ankamen. Wie zu erwarten war, werden die Luftmassen in beiden Jahreszeiten vor allem aus Westen herantransportiert, woraus sich lange Aufenthaltszeiten in der westlichen Hemisphäre ergeben. Die schnelleren Windgeschwindigkeiten im Winter führen zu einer großflächigeren Verteilung der Partikel, vor allem in niedrigen Höhen. Selbst nach 40 Tagen erreichen nur ganz wenige Partikel die Süd-Hemisphäre.

Die beobachteten CO-Mischungsverhältnisse wurden über drei den Modellsimulationen entsprechende Stunden-Intervalle gemittelt und sind in Abb. 3.15 dargestellt. Es zeigt sich ein Frühlingsmaximum und ein Herbstminimum, das aufgrund der im Sommer höheren OH-Radikal-Konzentrationen zustande kommt, welche Kohlenmonoxid im Sommer verstärkt abbauen. Um diesen vom Transport weitgehend unabhängigen Effekt zu eliminieren, wurde die Zeitreihe mit einem

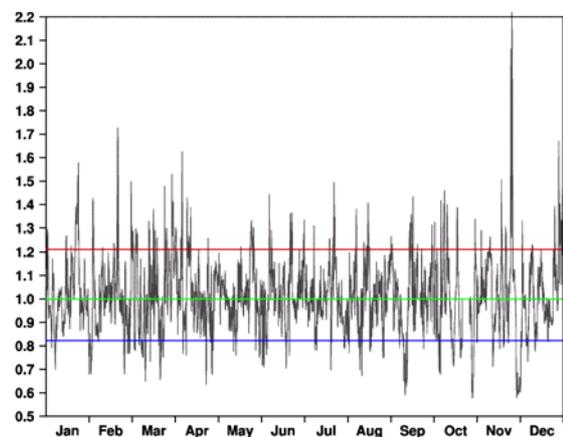
gleitenden Dreissigtage-Mittel normalisiert (Abb. 3.16). Aus dieser Zeitreihe wurden sodann die 10% niedrigsten und die 10% höchsten CO-Werte ausgesucht und die Partikelauflaufzeiten getrennt für diese beiden Datensätze berechnet.



**Abb. 3.14:** Mittlere Aufenthaltszeit der Partikel für die Vierzigtag-Rückwärtssimulationen von der Zugs Spitze im Januar (linke Seite) und Juli (rechte Seite) 2000. Die Abbildungen zeigen von oben nach unten die Aufenthaltszeiten in der gesamten atmosphärischen Säule, sowie in 12 km, 5 km, und 250 m Höhe. Die Aufenthaltszeiten wurden mit dem maximal auftretenden Wert skaliert.

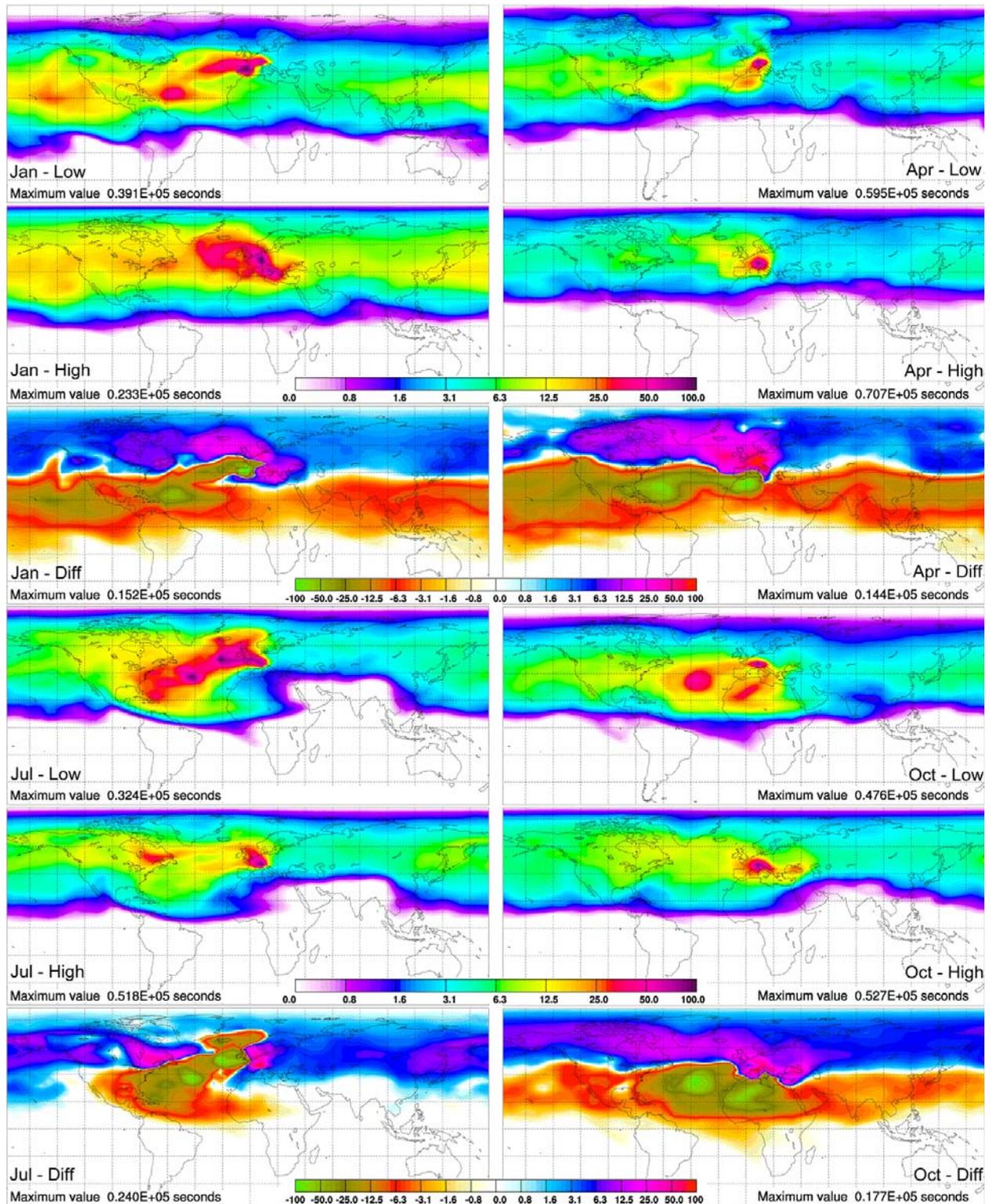


**Abb. 3.15:** Dreistundenmittelwerte von CO [ppb] an der Zugs Spitze im Jahr 2000.

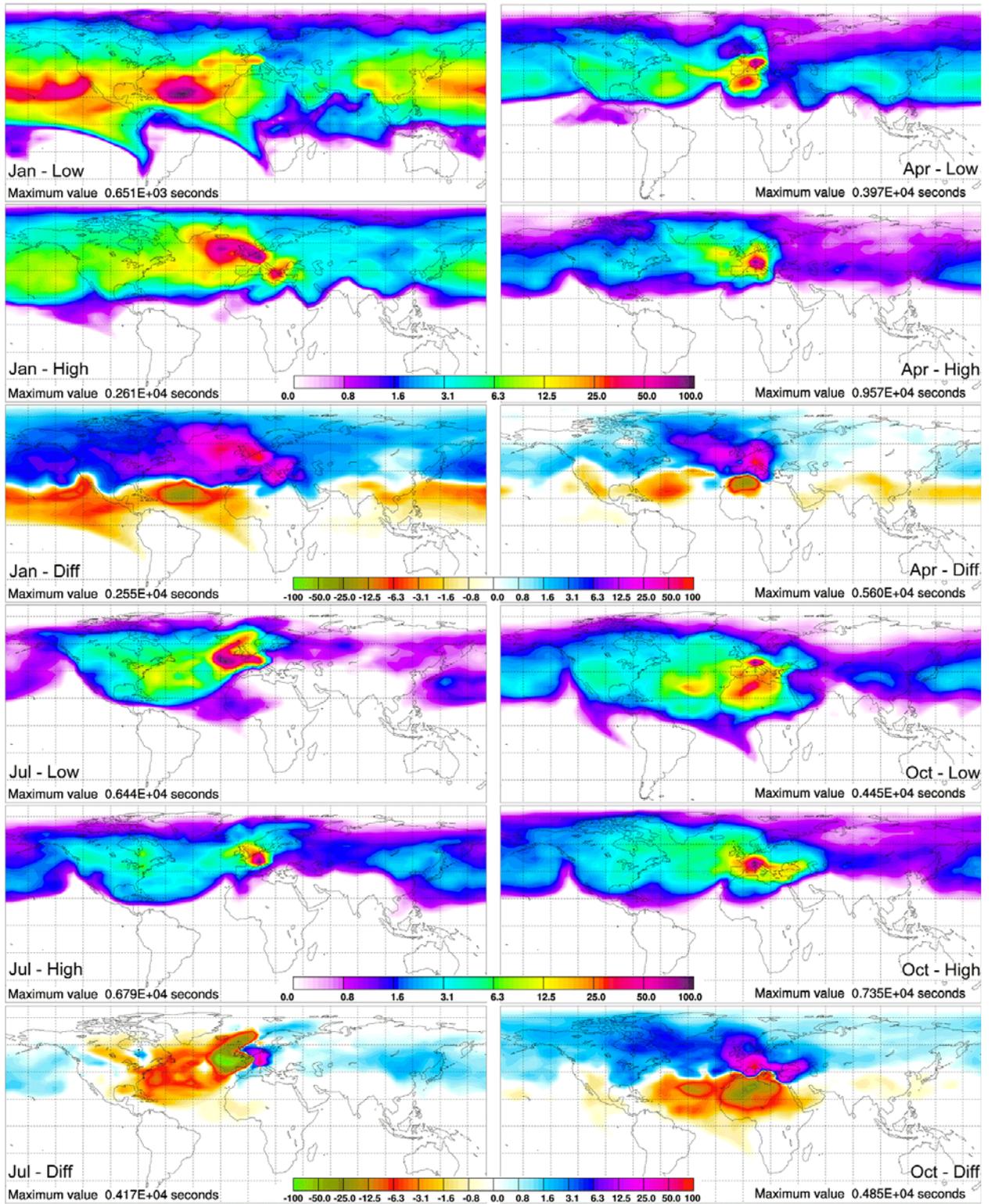


**Abb. 3.16:** Mit einem Dreissigtage-Mittelwert normierte Zeitreihe von CO [ppb] an der Zugs Spitze. Die rote Linie zeigt das 90%-Perzentil, die blaue das 10%-Perzentil.

Die Abbildungen 3.17 bis 3.20 zeigen die Resultate für die Monate Januar, April, Juli, und Oktober 2000:



**Abb. 3.17:** Mittlere Partikel-Aufenthaltszeiten aus Vierzigtag-Rückwärtssimulationen in der gesamten atmosphärischen Säule für Partikel, die an der Zugspitze in den Monaten Januar, April, Juli und Oktober 2000 ankommen. Es wurden nur jene Zeiten verwendet, in denen die CO-Messungen an der Zugspitze entweder in den höchsten oder niedrigsten 10% lagen. Die Abbildungen zeigen die Resultate für diese beiden Datensätze, sowie deren Differenz.



**Abb. 3.18:** Wie Abb. 3.17, aber für die Aufenthaltszeit in 250 m Höhe.

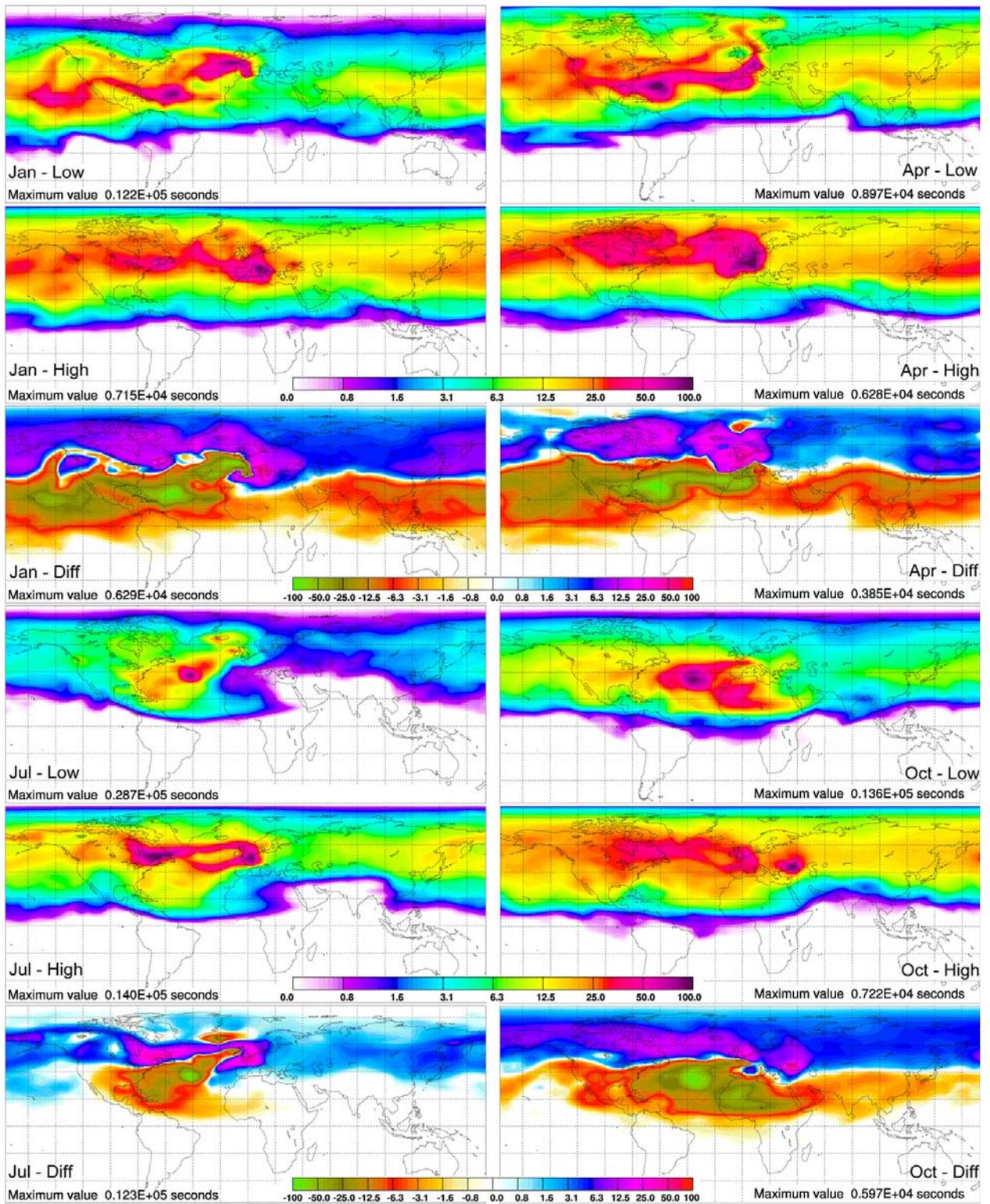
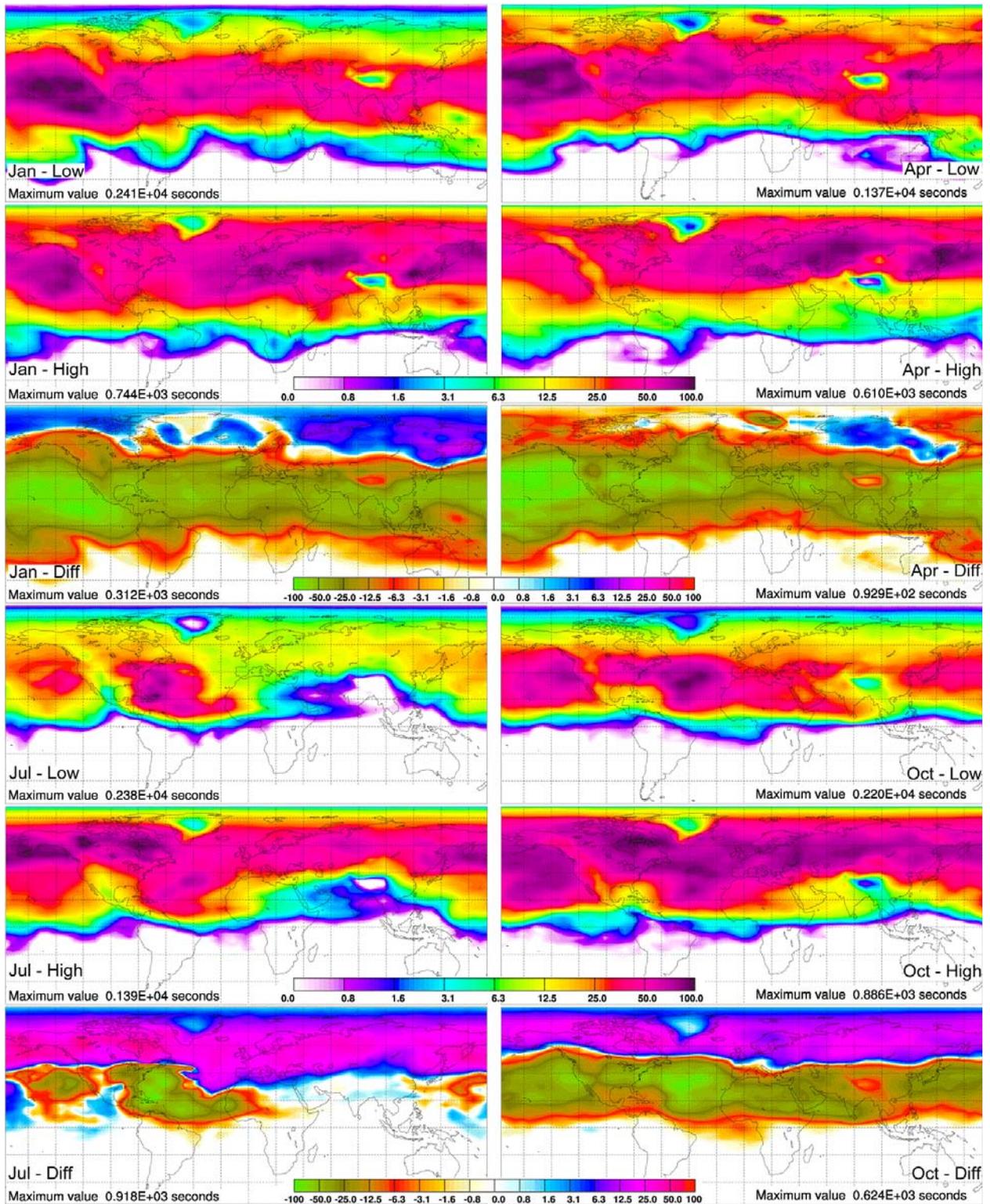


Abb. 3.19: Wie Abb. 3.17, aber für die Aufenthaltszeit in 5 km Höhe.



**Abb. 3.20:** Wie Abb. 3.17, aber für die Aufenthaltszeit in 12 km Höhe.

Es ergeben sich sehr große Unterschiede, je nachdem ob man Aufenthaltsdauern für die Fälle mit sehr hohen oder sehr niedrigen Kohlenmonoxid-Konzentrationen betrachtet, die auf systematisch unterschiedliche Transportwege hinweisen. Niedrige CO-Werte werden vor allem aus den Tropen und Subtropen herantransportiert, in Analogie zu den Ozonsondierungen im Rahmen des Projekts, wo besonders ozonarme Luft ebenfalls meist in die Tropen oder Subtropen zurückverfolgt werden konnte. Vor allem für die untere und mittlere Troposphäre ergibt sich ein

„Rein-Luft-Korridor“ aus dem subtropischen Atlantik. Hohe CO-Konzentrationen werden hingegen von weiter nördlich herantransportiert und zeigen auch längere Aufenthaltsdauern über dem nördlichen Nordamerika. Im Sommer sind die Aufenthaltszeiten über Europa deutlich länger als im Winter und es liegt nahe, dass dann der CO-Anteil, der aus Europa selbst herantransportiert wird, deutlich größer ist als im Winter - vor allem, wenn man die im Sommer kürzere Lebenszeit von CO berücksichtigt.

Die relative Bedeutung unterschiedlicher Emissionsregionen wurde untersucht, indem der CO-Quellenbeitrag aus dem Produkt der Aufenthaltszeiten in der untersten Modellschicht und den Emissionsflüssen aus dem EDGAR-Emissionsinventar (EDGAR (1995), <http://arch.rivm.nl/env/nt/coredata/edgar>) bestimmt wurde. Diese wurden dann jeweils mit den tatsächlich an der Zugspitze beobachteten CO-Konzentrationen korreliert. Die Ergebnisse in Tabelle 3.1 zeigen wie wichtig die anthropogenen Quellbeiträge der verschiedenen Kontinente sind.

**Tabelle 3.1:** Monatsmittel der Korrelationen zwischen an der Zugspitze gemessenem CO und den aus den Modellsimulationen sich ergebenden CO-Werten, getrennt nach den einzelnen Kontinenten.

Mon	N.Am.	S.Am.	Eur.	Afr.	Asia	Total
1	0.252	-0.480	0.579	-0.405	-0.126	0.570
2	0.036	-0.429	0.732	-0.262	-0.144	0.596
3	0.113	-0.522	0.619	-0.180	-0.559	0.570
4	0.197	-0.560	0.483	-0.237	-0.376	0.511
5	0.078	-0.177	0.383	-0.190	0.140	0.411
6	0.168	-0.031	0.277	0.063	0.068	0.316
7	-0.108	0.104	0.149	-0.063	0.353	0.134
8	0.098	-0.106	0.377	-0.142	0.365	0.430
9	-0.191	0.044	0.483	0.093	-0.101	0.462
10	0.323	-0.295	0.390	-0.484	-0.143	0.476
11	0.458	-0.518	0.678	-0.128	-0.007	0.749
12	0.258	-0.475	0.477	-0.493	-0.456	0.490

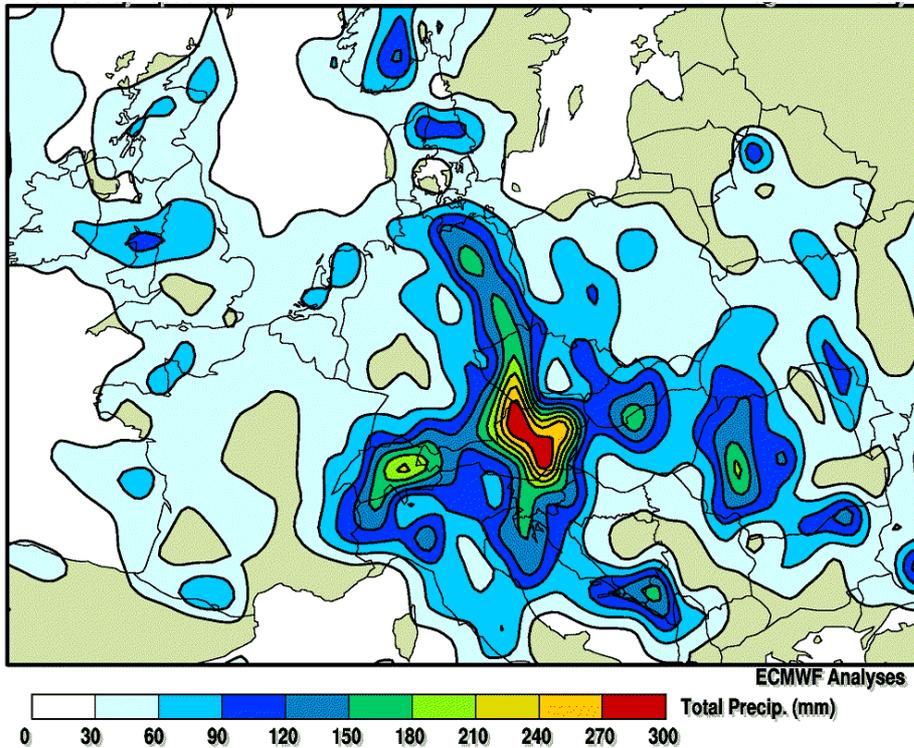
Die gemessenen CO-Werte korrelieren demnach am stärksten mit dem europäischen Quellenbeitrag, vor allem im Winterhalbjahr. Die sich dafür ergebenden Korrelationen sind zum Teil sehr hoch und können im Winter bis zu ca. 50% der beobachteten Variabilität erklären. Neben den europäischen Emissionen ist Nordamerika der einzige Kontinent mit überwiegend deutlich positiven Korrelationen, während sich für die anderen Kontinente meist negative Korrelationen ergeben, was sich durch den Herantransport von CO-arter Luft aus tropischen oder subtropischen Gebieten ergibt.

### 3.7. Lagrangesche Untersuchungen zum Wasserdampftransport

#### 3.7.1. Einführung

Im August 2002 kam es über Mitteleuropa zu ungewöhnlich starken Niederschlägen, was zum Teil zu verheerenden Überflutungen führte [Ulbrich et al., 2003a,b; Rudolf and Rapp, 2003]. Das Stadtzentrum von Dresden wurde z.B. überflutet als die Elbe einen historischen Höchststand von 940 cm erreichte. Ein Jahr später, während des heißen Sommers 2003 betrug der Elbewasserstand hingegen nur 80 cm. James et al. [2004] und Stohl und James [2004] untersuchten woher das Wasser, das in diesem Überflutungsereignis als Niederschlag fiel, herantransportiert wurde, bzw. wo es ursprünglich verdunstet wurde. Für eine detaillierte Beschreibung der Methodik sowie der Ergebnisse wird auf die beiden Arbeiten verwiesen, aber einige Resultate sollen

hier kurz wiedergegeben werden. Abb. 3.21 zeigt die Niederschlagsmengen aus den operationellen ECMWF-Vorhersagen, Tabelle 3.2 listet sechsstündliche Niederschläge für einige ausgewählte Stationen, und Abb. 3.22. zeigt die Wetterlage zum Zeitpunkt des stärksten Regenereignisses.



**Abb. 3.21:** Gesamte Niederschlagsmenge (mm), die während der 14 Tage vom 1.-15. (jeweils 0 UTC) August 2002 nach den operationellen ECMWF-Vorhersagen fiel. Werte kleiner als 30 mm sind nicht dargestellt.

**Table 3.2:** Sechsstündliche Niederschlagssummen für einige ausgewählte Stationen vom 11. bis 4.8.2002

Date:	11.08				12.08				13.08				14.08		Total
	06	12	18	00	06	12	18	00	06	12	18	00	06	12	
<u>Station</u>															
Brocken	1	0	0	52	49	9	3	1	1	1	-	0	0	0	117
Dresden	-	-	0	0	11	64	52	22	21	7	6	0	0	0	183
Fichtelberg	2	0	6	26	28	40	32	44	17	1	1	0	1	3	201
Goerlitz	-	-	0	0	5	6	2	0	10	25	32	16	1	-	97
Linz	-	3	8	5	45	29	18	17	8	-	-	-	-	-	133
Potsdam	0	-	-	0	7	21	43	16	4	14	2	-	-	-	107
Prague	-	-	0	4	17	13	14	12	11	0	5	2	-	-	78
Salzburg	1	6	3	27	43	15	3	1	1	-	-	-	-	-	100
Vienna	-	0	51	2	1	5	13	20	10	21	9	2	2	-	136
Wittenberg	0	0	4	0	5	23	12	2	1	0	1	0	0	0	48
Zinnwald	-	0	7	2	59	99	95	69	50	23	3	1	0	1	409

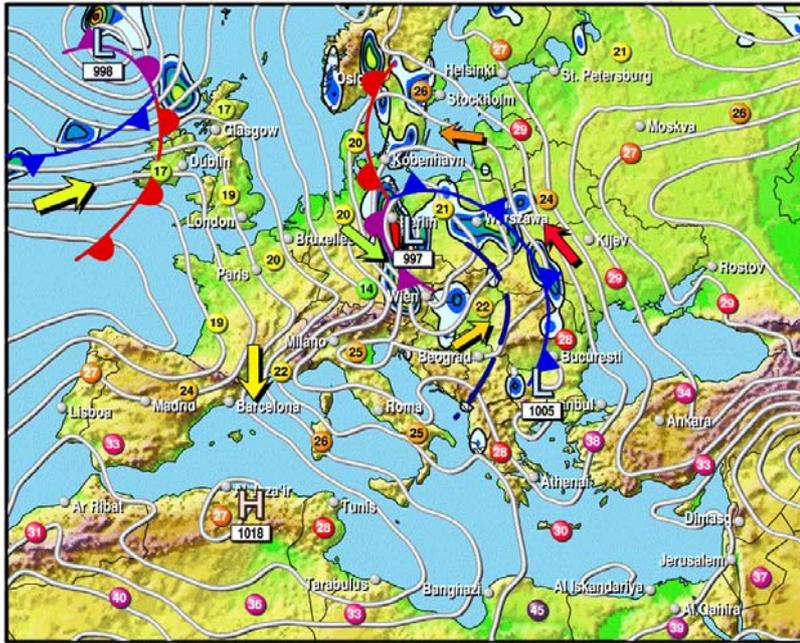


Abb. 3.22: Bodenwetterkarte, basierend auf einer Re-Analyse des ECMWF, für den 12 August 2002 um 12 UTC. Konturen zeigen Gebiete mit besonders starkem Niederschlag.

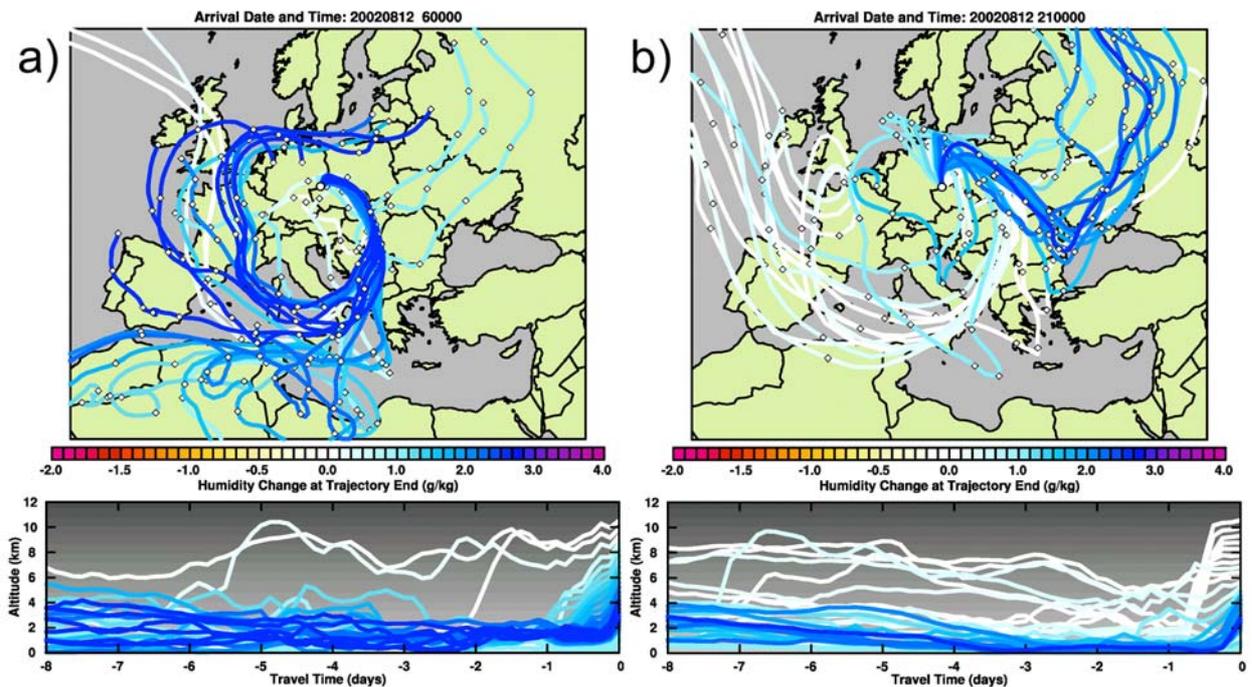
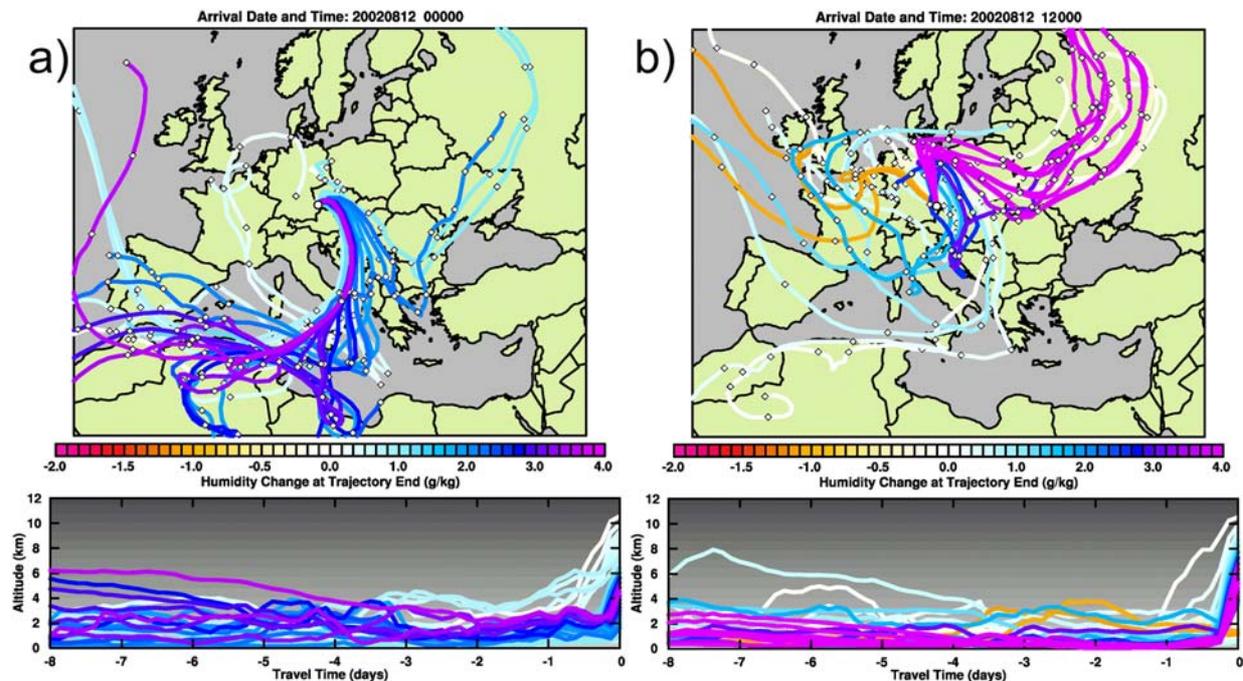


Abb. 3.23: Achttag-Rückwärtstrajektorien von einer Säule über der Station Zinnwald-Georgenfeld um (a) 06 UTC und (b) 21 UTC am 12. August 2002. Die Farbe zeigt den Abfall der spezifischen Feuchte (in g / kg) entlang dieser Trajektorien (positive Werte deuten Niederschlag an).

### 3.7.2. Trajektorienanalyse des Wassertransports

Zunächst wurden einzelne Trajektorien für Orte und Zeitpunkte mit besonders hohem Niederschlag berechnet. Abb. 3.23 zeigt die Trajektorien für die Station Zinnwald, wo die höchsten Niederschlagsmengen registriert wurden. Wie für diese Wetterlage zu erwarten war, wurde die Feuchte demnach zunächst vor allem aus dem Mittelmeerraum herantransportiert. Gegen Ende des Ereignisses kam die Feuchte jedoch vor allem aus Osteuropa. Hingegen überquerten sie teil-

weise auch das Schwarze Meer, wo besonders hohe Meeresoberflächentemperaturen herrschten. Für die Station Zwiesel (Abb. 3.24) ergibt sich dasselbe Bild, nämlich Feuchte-Transport aus dem Mittelmeer, gefolgt von Feuchtetransport aus Osteuropa während der späteren Phasen des Ereignisses. Es zeigt sich somit, dass der Niederschlag nicht durch eine klare Quellenregion des Wassers gekennzeichnet ist. Insbesondere scheint Verdunstung über dem Mittelmeer nicht die einzige Quelle des Wassers zu sein.



**Abb. 3.24:** Wie Abb. 4.3, aber für Zwiesel um (a) 00 UTC und (b) 12 UTC am 12 August.

Als nächstes wurde für das gesamte Niederschlagsgebiet eine große Anzahl von Trajektorien von einem regelmäßigen Gitter und alle 90 Minuten gestartet. Indem man die Änderungen der spezifischen Feuchte entlang der Trajektorien statistisch auswertet, kann man Niederschlagsgebiete wie auch Verdunstungsgebiete diagnostizieren. Abb. 3.25 zeigt das Resultat dieser Analyse: man sieht deutlich das Gebiet, in dem der Niederschlag gefallen ist, aber auch jene Gebiete, in denen die Feuchte entlang der Trajektorien angestiegen ist, d.h., wo Verdunstung stattgefunden hat und somit woher das Wasser kam.

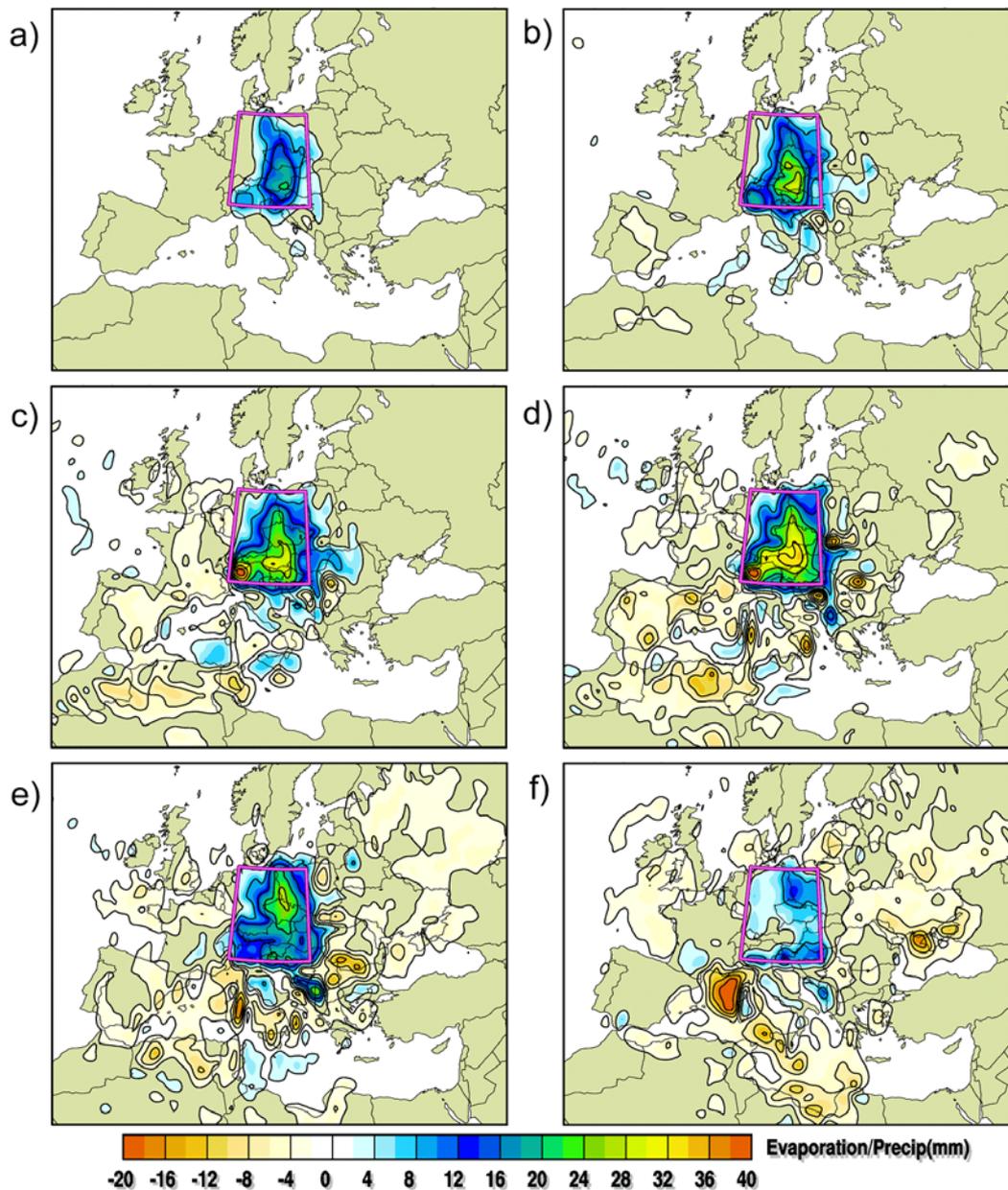
Wie schon zuvor qualitativ angedeutet, war das Quellengebiet der Feuchte, das sich vor allem in den unteren atmosphärischen Schichten zeigt (während der Niederschlag zum Teil auch in der mittleren und oberen Troposphäre gebildet wurde), sehr groß. Es umfasst neben dem Mittelmeer insbesondere auch das Schwarze Meer und weite Teile Osteuropas.

Die hier gezeigten Beispiele wurden der Arbeit von James et al. [2004] entnommen. Stohl und James [2004] kamen mit einer auf FLEXPART-Simulationen basierenden Methode zu ähnlichen Ergebnissen. Für weitere Erläuterungen und Details wird auf diese beiden Arbeiten verwiesen.

### 3.8. Grundsätzliches zur Verwendung von Analysedaten

Im gegenständlichen Projekt kamen überwiegend Analysedaten des ECMWF zum Einsatz. Eine Studie [Stohl et al., 2004], die ausserplanmässig im Rahmen von ATMOFAST durchgeführt wurde, zeigte, dass Transportrechnungen mit diese Daten im Vergleich zu Transportrechnungen aufgrund von ECMWF-Vorhersagen systematische Unterschiede aufweisen. So wird z.B. der Stratosphären-Troposphären-Transport systematisch überschätzt. Da man bei der Interpretation

von Messdaten mit Hilfe von FLEXPART auf Analysedaten angewiesen ist (Vorhersagedaten enthalten unerwünschte Vorhersagefehler), muss man diese systematischen Fehler in Kauf nehmen. Sie müssen aber bei der Interpretation der Ergebnisse entsprechend berücksichtigt werden.



**Abb. 3.25:** Abschätzung von Niederschlag und Verdunstung (mm) während der 72 Stunden vom 11.-13. August, aufgespalten in 6 100 hPa dicke Schichten rund um (a) 450 hPa, (b) 550 hPa, (c) 650 hPa, (d) 750 hPa, (e) 850 hPa and (f) 950 hPa.

### 3.9. Bewertung der Ergebnisse

Im Rahmen von ATMOfAST konnten einige neue Fälle von Interkontinentaltransport von Ozon nachgewiesen werden. Vor Beginn des Projektes gab es hierzu nur eine einzige Studie [Stohl und Trickl, 1999], die einen klaren Nachweis des aussereuropäischen Ursprungs von Ozon gebracht hat. Mit Abschluss von ATMOfAST sowie der ebenfalls an der TU München durchgeführten Projekte CONTRACE, CARLOTTA und NOXTRAM liegen nunmehr mehr als ein Dutzend in der Literatur gut dokumentierter Fälle in verschiedenen Jahreszeiten vor. Immer wieder zeigte sich, dass Nordamerika für Europa eine bedeutende Quelle von Ozon ist. Gegen

Ende der Projektlaufzeit erschienen vermehrt Publikationen von Kollegen, die weitere Fälle dokumentierten und unsere Resultate bestätigten. Was zu Projektbeginn eine Hypothese war, kann nunmehr als gesichertes Erkenntnis gereiht werden. Der Artikel von Stohl und Trickl [1999] wurde vom *Institute for Scientific Information* (ISI) im Juli 2005 als Startpunkt einer sogenannten *fast moving front* identifiziert, die in der Tat an erster Stelle der *fast moving fronts* in den Geowissenschaften gereiht wurde (siehe *ISI Essential Science Indicators*). Dies zeigt das Interesse, welches das Arbeitsgebiet auch bei anderen Kollegen hervorgerufen hat. Der Erfolg von ATMOfAST war es, dass sich weitere Publikationen an vorderer Stelle in diese *fast moving front* einreihen konnten.

Auf der Modellseite konnten wir im Rahmen von ATMOfAST zahlreiche Verbesserungen am Modell FLEXPART selbst sowie in der Methodik der Auswertung der Modellergebnisse erzielen. Nicht zuletzt aufgrund dieser Verbesserungen erfreuten sich Vorhersagen und Analysen mit FLEXPART im Rahmen der ICARTT-Kampagne auch bei internationalen Projektpartnern großer Beliebtheit.

Es ist des weiteren gelungen, erstmals Rückwärtssimulationen mit FLEXPART über einen langen Zeitraum in kurzer Intervallfolge durchzuführen, was es erlaubt hat, eine Einjahres-Klimatologie des Ursprungs von Kohlenmonoxid an der Zugspitze zu erstellen.

Neben den eigentlich im Projektantrag vorgesehenen Arbeiten wurden auch noch einige zusätzliche Studien gemacht. So wurden regelmässig Vorhersagen erstellt, die es dem Projektpartner erlaubten, Messungen effizienter zu planen und die Messzeiten zu optimieren. Darüber hinaus wurde unter dem Eindruck des Augusthochwassers im Jahr 2002 beschlossen, eine Studie zum Ursprung des als Niederschlag gefallenen Wasserdampfs durchzuführen. Dabei kamen das Modell und Methoden zum Einsatz, die auch zur Interpretation der Ozonmessungen verwendet wurden. Es liess sich damit also mit vertretbarem Aufwand eine höchst relevante wissenschaftliche Frage „Woher kam das viele Wasser?“ klären.

In einem Punkt haben wir die Projektziele nicht ganz erreicht. Laut Projektantrag sollte der Transport von Emissionen aus borealen Waldbränden nach Europa eingehend untersucht werden. Wir haben auf diesen Punkt im Projektverlauf etwas weniger Wert gelegt, weil wir auf diesem Gebiet im Rahmen eines anderen AFO-Projektes, NOXTRAM, sowie eines EU-Projektes, PARTS, beträchtliche Erfolge erzielen konnten und dieser Punkt daher wissenschaftlich nicht mehr ganz so spannend erschien wie zum Zeitpunkt des Projektantrags. Es wurden aber auch im Rahmen von ATMOfAST einige Fallstudien durchgeführt und insbesondere gegen Projektende haben wir diesem Punkt aufgrund der zahlreichen Waldbrände in Alaska und in Westkanada im Sommer 2004 wieder verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt. Einige Publikationen hierzu sind in Vorbereitung, konnten aber aufgrund der späten Datenverfügbarkeit nicht mehr vor Projektende fertiggestellt werden.

Abschließend ist zu bemerken, dass es insbesondere dem großen Einsatz von Paul James und Nicole Spichtinger zu verdanken ist, dass das ATMOfAST-Projekt auch nach dem Weggang des Projektleiters Andreas Stohl von der TU München im Sommer 2003 erfolgreich weitergeführt und vom Projektleiter aus der Ferne betreut werden konnte.

### **3.10. Begutachtete Publikationen der TU München, die im Rahmen von ATMOfAST erstellt wurden**

Im Rahmen des Projekts wurden zwölf begutachtete Publikationen erstellt, an denen an der TU München angestellte ATMOfAST-Projektmitarbeiter entweder führend oder beteiligt waren

(siehe zentrales Verzeichnis in Kapitel 1.8). Darüber hinaus sind noch weitere Publikationen des Projektkoordinators unter Beteiligung von TUM-Mitarbeitern in Vorbereitung, sowie einige Publikationen des TUM-Projektleiters zur ICARTT-Kampagne.

### 3.11. Literatur

- ADLER, R. F., G. J. HUFFMAN, A. CHANG, R. FERRARO, P.-P. XIE, J. JANOWIAK, B. RUDOLF, U. SCHNEIDER, S. CURTIS, D. BOLVIN, A. GRUBER, J. SUSSKIND, P. ARKIN, E. NELKIN, 2003: The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *J. Hydromet.* **4**, 1147-1167.
- Appenzeller, C., J. R. Holton and K. H. Rosenlof, 1996. Seasonal variation of mass transport across the tropopause. *J. Geophys. Res.*, **101**, 15,071-15,078.
- Brubaker, K. L., P. A. Dirmeyer, A. Sudradjat, B. S. Levy and F. Bernal, 2001. A 36-yr climatological description of the evaporative sources of warm-season precipitation in the Mississippi river basin, *J. Hydromet.*, **2**, 537-557.
- Cristofanelli, P., P. Bonasoni, W. Collins, J. Feichter, C. Forster, P. James, A. Kentarchos, P.W. Kubik, C. Land, J. Meloen, G. J. Roelofs, P. Siegmund, M. Sprenger, C. Schnabel, A. Stohl, L. Tobler, L. Tositti, T. Trickl and P. Zanis, 2003. Stratosphere to troposphere transport: a model and method evaluation, *J. Geophys. Res.*, **108**, 8525, doi: 10.1029/2002JD002600.
- Dirmeyer, P. A. and K. L. Brubaker, 1999. Contrasting evaporative moisture sources during the drought of 1988 and the flood of 1993, *J. Geophys. Res.*, **104**, 19,383-19,397.
- Eckhardt, S., A. Stohl, H. Wernli, P. James, C. Forster, and N. Spichtinger, 2004: A 15-year climatology of warm conveyor belts. *J. Climate* **17**, 218-237.
- Emanuel, K. A., and M. Zivkovic-Rothman, 1999: Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1766-1782.
- Forster, C., U. Wandinger, G. Wotawa, P. James, I. Mattis, D. Althausen, P. Simmonds, S. O'Doherty, C. Kleefeld, S. G. Jennings, J. Schneider, T. Trickl, S. Kreipl, H. Jäger and A. Stohl, 2001. Transport of boreal forest fire emissions from Canada to Europe, *J. Geophys. Res.* **106**, 22,887-22,906.
- Forster, C., A. Stohl, P. James and A. Marengo, 2003. The residence times of aircraft emissions in the stratosphere using a mean emission inventory and emissions along actual flight tracks. *J. Geophys. Res.* **108**, 8524, doi: 10.1029/2002JD002515.
- Forster, C., O. Cooper, A. Stohl, S. Eckhardt, P. James, E. Dunlea, D. K. Nicks Jr., J. S. Holloway, G. Hübler, D. D. Parrish, T. B. Ryerson, and M. Trainer, 2004: Lagrangian transport model forecasts and a transport climatology for the Intercontinental Transport and Chemical Transformation 2002 (ITCT 2k2) measurement campaign. In press in *J. Geophys. Res.*
- Hanna, S. R., 1982: Applications in air pollution modeling. In: *Nieuwstadt F.T.M. and H. van Dop (ed.): Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Hoinka, K. P., 1997. The tropopause: discovery, definition and demarcation. *Meteorol. Zeitschrift N.F.* **6**, 281-303.
- Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood and L. Pfister, 1995. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.*, **33**, 403-439.
- Jackson, D. R., S. J. Driscoll, E. J. Highwood, J. E. Harries and J. M. Russell III, 1998. Troposphere to stratosphere transport at low latitudes as studied using HALOE observations of water vapour 1992-1997. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **124**, 169-192.
- James, P., A. Stohl, C. Forster, S. Eckhardt, P. Seibert and A. Frank, 2003: A 15-year climatology of stratosphere-troposphere-exchange with a Lagrangian particle dispersion model: 1. Methodology and validation. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8519, doi: 10.1029/2002JD002637.
- James, P., Stohl, A., Spichtinger, N., Eckhardt, S. and C. Forster, 2004. Climatological aspects of the extreme European rainfall of August 2002 and a trajectory method for estimating the associated evaporative source regions. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* (submitted).
- Lin, J. C., C. Gerbig, S. C. Wofsy, A. E. Andrews, B. C. Daube, K. J. Davis, and C. A. Grainger, 2003: A near-field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The stochastic time-inverted Lagrangian transport (STILT) model. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4493, doi:10.1029/2002JD003161.
- Meloen, J., P. Siegmund, P. van Velthoven, H. Kelder, M. Sprenger, H. Wernli, A. Kentarchos, G. Roelofs, J. Feichter, C. Land, C. Forster, P. James, A. Stohl, W. Collins and P. Cristofanelli, 2003. Stratosphere-troposphere exchange: a model and method intercomparison. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8526, doi: 10.1029/2002JD002274.

- Newell, R. E., N. E. Newell, Y. Zhu, and C. Scott, 1992. Tropospheric rivers? – A pilot study. *Geophys. Res. Lett.* **19**, 2401-2404.
- Reale, O., L. Feudale and B. Turato, 2001. Evaporative moisture sources during a sequence of floods in the Mediterranean region, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2085-2088.
- Reijmer, H., R. van den Broeke and M. P. Scheele, 2002. Air parcel trajectories and snowfall related to five deep drilling locations in Antarctica based on the ERA-15 dataset, *J. Climate*, **15**, 1957-1968.
- Rudolf, B. and J. Rapp, 2003. The century flood of the river Elbe in August 2002: Synoptic weather development and climatological aspects, Quarterly Report of the operational NWP-models of the Deutscher Wetterdienst, Special Topic July 2003, 7-22.
- Saxony, 2002. Vorläufiger Kurzbericht über die meteorologisch-hydrologische Situation beim Hochwasser im August 2002. *Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie*. [<http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/documents/kb021202.pdf>]
- Saxony, 2003. Analyse und Prognose der meteorologisch-hydrologische Situation – Monatsbericht August 2003. *Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie*. [[http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/documents/Monatsbericht\\_2003\\_08.pdf](http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/documents/Monatsbericht_2003_08.pdf)]
- Spichtinger, N., M. Wenig, P. James, T. Wagner, U. Platt, and A. Stohl, 2001: Satellite detection of a continental-scale plume of nitrogen oxides from boreal forest fires. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4579-4582.
- Stohl, A., G. Wotawa, P. Seibert, and H. Kromp-Kolb, 1995: Interpolation errors in wind fields as a function of spatial and temporal resolution and their impact on different types of kinematic trajectories. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 2149-2165.
- Stohl, A., 1998. Computation, accuracy and applications of trajectories - a review and bibliography. *Atmos. Environ.* **32**, 947-966.
- Stohl, A., M. Hittenberger, and G. Wotawa, 1998: Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiment data. *Atmos. Environ.*, **32**, 4245-4264.
- Stohl, A., and P. Seibert, 1998: Accuracy of trajectories as determined from the conservation of meteorological tracers. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **124**, 1465-1484, 1998.
- Stohl, A., and D. J. Thomson, 1999: A density correction for Lagrangian particle dispersion models. *Boundary-Layer Meteorol.*, **90**, 155-167.
- Stohl, A. and T. Trickl, 1999. 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**, 30445-30462.
- Stohl, A., N. Spichtinger-Rakowsky, P. Bonasoni, H. Feldmann, M. Memmesheimer, H. E. Scheel, T. Trickl, S. Hübener, W. Ringer and M. Mandl, 2000. The influence of stratospheric intrusions on alpine ozone concentrations. *Atmos. Environ.*, **34**, 1323-1354.
- Stohl, A., 2001. A one-year Lagrangian "climatology" of airstreams in the northern hemisphere troposphere and lowermost stratosphere. *J. Geophys. Res.*, **106**, 7263-7279.
- Stohl, A., S. Eckhardt, C. Forster, P. James, and N. Spichtinger, 2002: On the pathways and timescales of intercontinental air pollution transport. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4684, doi: 10.1029/2001JD001396.
- Stohl, A., C. Forster, S. Eckhardt, N. Spichtinger, H. Huntrieser, J. Heland, H. Schlager, S. Wilhelm, F. Arnold, and O. Cooper, 2003: A backward modeling study of intercontinental pollution transport using aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4370, doi:10.1029/2002JD002862, 2003.
- Thomson, D. J., 1987: Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows. *J. Fluid Mech.* **180**, 529-556.
- Trenberth, K. E., 1997: Using atmospheric budgets as a constraint on surface fluxes. *J. Clim.*, **10**, 2796-2809.
- Trenberth, K. E., and C. J. Guillemot, 1998: Evaluation of the atmospheric moisture and hydrological cycle in the NCEP/NCAR reanalyses. *J. Clim.*, **14**, 213-231.
- Trenberth, K. E., A. Dai, R. M. Rasmussen, and D. B. Parsons, 2003: The changing character of precipitation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 1205-1217.
- Ulbrich, U., T. Brücher, A. Fink, G. Leckebusch, A. Krüger and J. Pinto, 2003a. The central European floods of August 2002: Part 1 – Rainfall periods and flood development, *Weather*, **58**, 371-377.
- Ulbrich, U., T. Brücher, A. Fink, G. Leckebusch, A. Krüger and J. Pinto, 2003b. The central European floods of August 2002: Part 2 – Synoptic causes and considerations with respect to climatic change, *Weather*, **58**, 434-442.

Vogelezang, D. H. P., and A. A. M. Holtslag, 1996: Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations. *Boundary-Layer Meteorol.*, **81**, 245-269.

Wernli, H. and H. C. Davies, 1997. A Lagrangian-based analysis of extratropical cyclones. I: The method and some applications, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **123**, 467-489.