

# UFOPLAN

## Abschlussbericht

Anwendung des EURAD-Modell-Systems  
im Rahmen des FE-Vorhabens (UFOPLAN Nr. 202 43 270)

**„Entwicklung von Modellen zur Identifizierung von  
Schadstoffquellen – insbesondere im Verkehrsbereich  
– im Rahmen der 22. BimSchV -  
Dokumentation, Weiterentwicklung und Validierung und  
Maßnahmenplanung für  
ein bundeseinheitliches Vorgehen“**

## Teil B Hemisphärische Untersuchungen

Köln, Dezember 2005



**Fördervereins des Rheinischen Instituts für Umweltforschung an der  
Universität zu Köln e.V.**

**als Unterauftrag für die FU Berlin**



## **Teil B**

# **Hemisphärische Simulationsexperimente**

**Stand: Mai 2006**

# 1 Modellbeschreibung und Eingangsdaten

## Meteorologische Analysedaten

Bei der Jahresrechnung für 1999 kamen 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.

## Modellentwicklung

Für die Anwendung auf der hemisphärischen Skala wurde das EURAD Modell in vielen Bereichen weiterentwickelt. Dies geschah in Verbindung mit den AFO2000 Projekten TRACHT (Transport, Chemie und Spurengasverteilung in der Tropopausenregion) und vor allem ATMOFAST (Atmosphärischer Ferntransport und seine Auswirkungen auf die freie Troposphäre über Europa).

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 ermöglichte.

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

Bei den Langfristrechnungen wurde eine nichthydrostatische Modellversion eingesetzt.

Die Gasphasenchemie wurde der RADM2 Mechanismus verwendet.

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

**Tabelle 1:** Beschreibung der Modellversionen, mit denen für hemisphärische Simulationen durchgeführt 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	27	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

Für den interkontinentalen Transport spielt die mittlere und obere Troposphäre mit der Tropopausenregion eine wichtige Rolle. Daher muss diese Region in den Modellrechnungen adäquat repräsentiert werden. Weiterhin muss der Bereich der Grenzschicht gut aufgelöst werden. Daher wurde für die hemisphärischen Rechnungen in diesem Projekt ein Kompromiss entwickelt, der beide Bereiche hinreichend beschreiben kann, ohne die Rechenzeit zu stark zu erhöhen:



- Gegenüber den Studien mit Schwerpunkt auf den Grenzschicht-Prozessen wurde die Auflösung in der Grenzschicht moderat verringert. Dabei wurde die Schichtdicke in den untersten Schichten (ca. 35 m) beibehalten.
- Oberhalb ca. 2 km wurde die Schichtenzahl erhöht und der Oberrand von 100 hPa (etwa 16 km) auf 30 hPa (etwa 24 km) erhöht. Damit lassen sich auch stratosphärische Intrusionen noch erfassen.
- Gegenüber der Modellversion mit Schwerpunkt obere Troposphäre /untere Stratosphäre (UTLS) wurde auf die obersten Schichten verzichtet. Dies lässt sich dadurch rechtfertigen, dass die Quellregion Stratosphärischer Intrusionen in mittleren Breiten meist unterhalb von 100 hPa liegt.

Das stratosphärische Ozon wird bei den Rechnungen an die potentielle Vorticity gekoppelt. Die Güte dieses Ansatzes wurde bereits in mehreren Studien überprüft und zuletzt beim Projekt TRACHT anhand von Satellitendaten, Ozonsonden und Flugzeugmessungen evaluiert und die Parametrisierung angepasst. Für die hemisphärischen Jahresrechnungen wurde das Ozon fest an die potentielle Vorticity gekoppelt, um realistische obere Randbedingungen zu erhalten.

Die Modellkonfiguration für die Jahresrechnungen wurde zum Einen gegenüber der – horizontal und vertikal – höher aufgelösten Version aus dem ATMOfAST Projekt getestet, als auch für spezielle Ferntransport-Episoden gegenüber den im Rahmen von ATMOfAST verfügbaren Daten – zum Beispiel den Messungen des Ozon-Lidar in Garmisch-Partenkirchen – getestet.

### **Datenlieferungen**

Insgesamt wurden im Rahmen der hemisphärischen Studien ca. 2 Terabyte an Modelldaten produziert. Die Analyse und Archivierung solcher Datenmengen stellen einen hohen Aufwand dar. Auch nach Projekt-Ende stehen die Simulations-Ergebnisse für weitere Untersuchungen zu Verfügung.

Sowohl für die Basis Simulation 2001 als auch für die Studie mit Emissions-Prognose für 2010 wurden die Konzentrationen der Gasphasen- und Aerosol-Komponenten in hoher chemischer Auflösung für einen Europa umfassenden Ausschnitt in Absprache an die Arbeitsgruppe der FU-Berlin geliefert. Diese wurden dort als Randwerte des dortigen RCG-Modells genutzt.

**Tabelle 2:** Vertikalstruktur des Modellgitters für die hemisphärischen Jahresrechnungen (bei Standard-Bodendruck)

Höhenstruktur in  $\sigma$ -Schichten

Anz Schichten 27

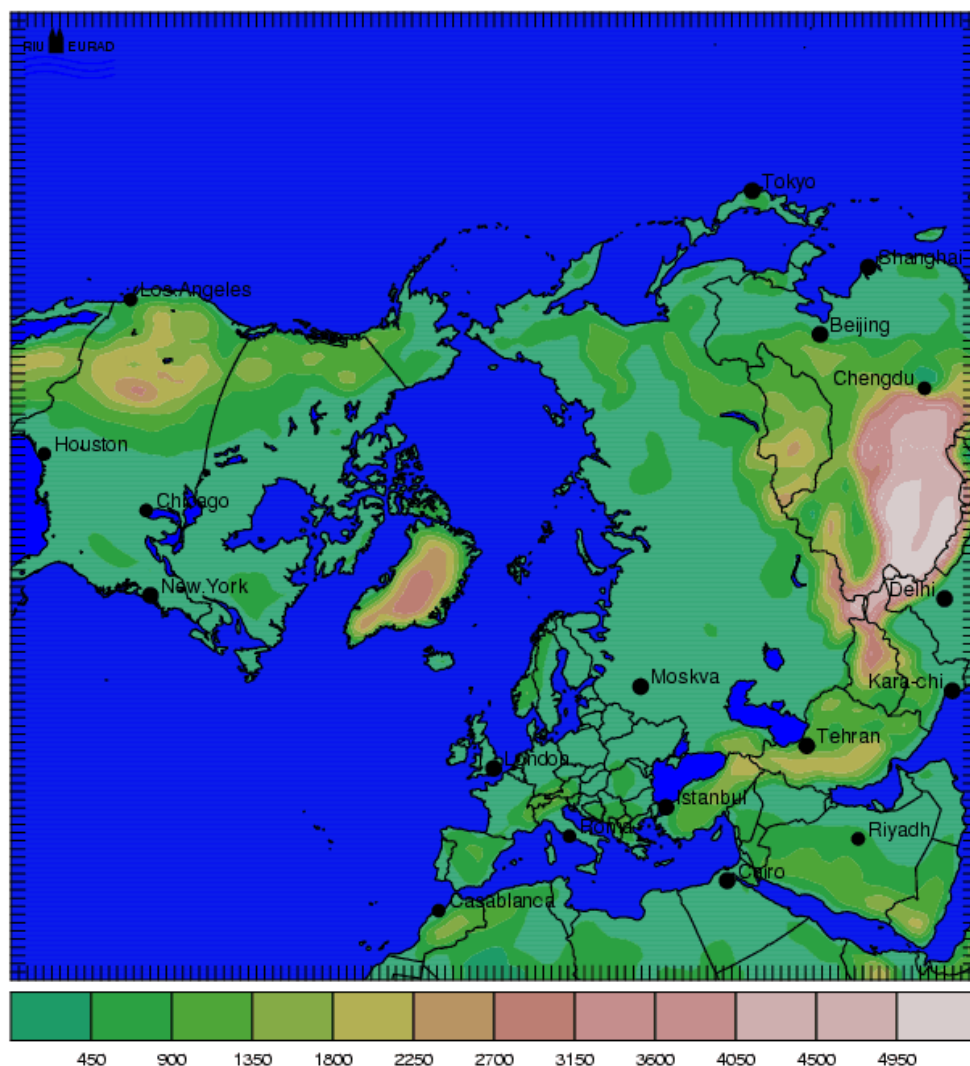
$P_0$  1013 hPa

$P_{Top}$  30 hPa

Level	$\sigma_{Full}$	$\Delta\sigma$	$\sigma_{Half}$	$p_{Full}$ [hPa]	$p_{half}$ [hPa]
0	1			1013	
1	0,995	0,005	0,9975	1008	1011
2	0,99	0,005	0,9925	1003	1006
3	0,98	0,01	0,985	993	998
4	0,97	0,01	0,975	984	988
5	0,955	0,015	0,9625	969	976
6	0,94	0,015	0,9475	954	961
7	0,92	0,02	0,93	934	944
8	0,9	0,02	0,91	915	925
9	0,87	0,03	0,885	885	900
10	0,84	0,03	0,855	856	870
11	0,8	0,04	0,82	816	836
12	0,76	0,04	0,78	777	797
13	0,72	0,04	0,74	738	757
14	0,68	0,04	0,7	698	718
15	0,64	0,04	0,66	659	679
16	0,6	0,04	0,62	620	639
17	0,56	0,04	0,58	580	600
18	0,52	0,04	0,54	541	561
19	0,48	0,04	0,5	502	522
20	0,43	0,05	0,455	453	477
21	0,38	0,05	0,405	404	428
22	0,32	0,06	0,35	345	374
23	0,26	0,06	0,29	286	315
24	0,2	0,06	0,23	227	256
25	0,14	0,06	0,17	168	197
26	0,07	0,07	0,105	99	133
27	0	0,07	0,035	30	64

Terrain (m)

UTC (F+ 0)



VISAQ

**Abbildung 1.1:** Modellgebiet der hemisphärischen Jahresrechnungen mit Topographie [m].

## 2 Interkontinental Transport – Prozesse und Episoden

Atmosphärischer Ferntransport im interkontinentalen Maßstab findet im wesentlichen in der freien Troposphäre statt. In größerer Höhe erlauben die höheren Windgeschwindigkeiten - insbesondere im Bereich des Jets - Transportzeiten die kurz genug sind um Luftmassen über einige tausend Kilometer verfrachten zu können, ohne dass diese ihren chemischen Charakter verlieren. Bevorzugte Zonen in denen Plumes interkontinental transportiert werden, sind kohärente Strömungen im Bereich des Strahlstroms. Dies zeigen die vorliegenden Untersuchungen im Einklang mit verschiedenen anderen Studien (z.B. Stohl et al., 2003A; Huntrieser et al., 2005). So können in dem relativ eng begrenzten Bereich des Jets verschmutzte Plumes innerhalb weniger Tage den Atlantik überqueren und Europa erreichen (Stohl et al., 2003B). Es gibt verschiedene Mechanismen mit denen Grenzschichtluft in die freie Troposphäre gehoben werden kann. Dazu gehören konvektive Systeme, die Überströmung von Gebirgen und „Warm Conveyor Belts (WCB)“.

- Konvektive Systeme treten häufig auf, sie haben allerdings in der Regel eine relative geringe räumliche Erstreckung und keine große Lebensdauern. Da ihr Auftreten häufig mit Niederschlägen verbunden ist, werden wasserlösliche Substanzen häufig teilweise ausgewaschen. Ozon, Stickoxide und Kohlenwasserstoffe können aber mit signifikanten Konzentrationen die freie Troposphäre erreichen.
- Der Prozess des „Alpinen Pumpens“ wurde im intensiv im Rahmen der EU-Projekte VOTALP I und II sowie im Projekt CHAPOP untersucht. Es wurde festgestellt. Dass ein großer Anteil der bodennahen Luft im Alpenraum aus den Alpentälern in die freie Troposphäre exportiert. Die Spurenstoffe gelangen in eine so genannte „Injection Layer“ die bis etwa 4-5 km Höhe reicht. Die obere Troposphäre wird also nicht erreicht. Dieser Prozess findet auch ohne begleitende Niederschläge statt.
- Als auf der globalen Skala wichtigster Prozess zum Export von Spurenstoffen aus der Grenzschicht haben sich die Warm-Conveyor-Belts erwiesen (Eckhardt et al., 2004). Auch bei WCBs kommt es durch die Niederschläge zum Auswaschen von Aerosolen und anderen leicht löslichen Spurenstoffen.
- Als weiterer Prozess kommen großflächige Waldbrände als Ursache für eine hohe Verschmutzung der freien Troposphäre in Frage (Wofsy et al., 1994; Wotawa und Trainer, 2000). Sie finden überwiegend im Sommer statt und können Plumes mit starker Aerosolbelastung auf der interkontinentalen Skala bewirken.

### Episode Mai/Juni 1997

Eigene Untersuchungen z.B. im Rahmen von ATMOFAST (siehe: Trickl et al., 2005; Feldmann et al., 2005) zeigen, wie sich die Zusammensetzung und chemische Aktivität der Luftmassen im Verlauf der Entwicklung eines Interkontinental-Plumes ändern.

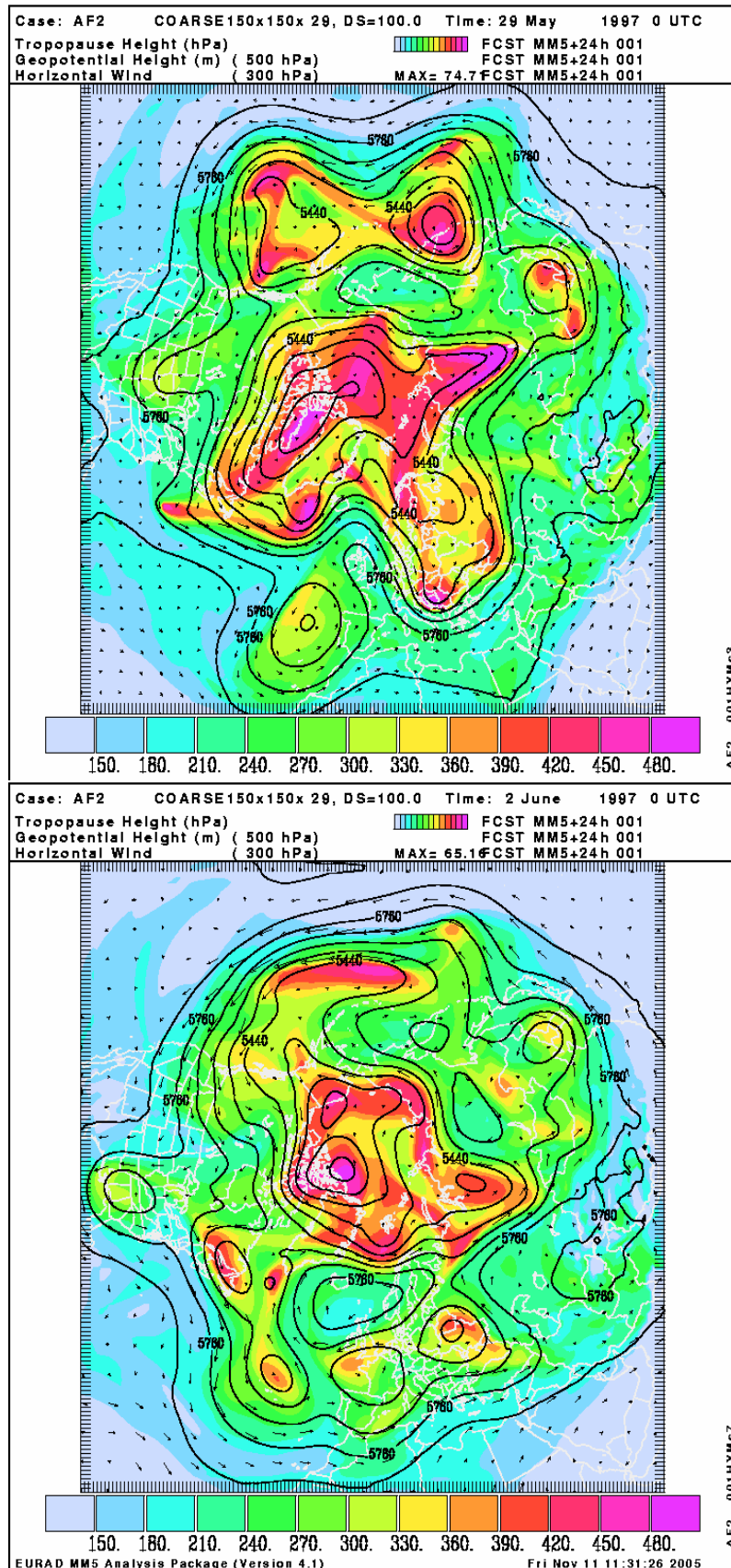
Eine besonders intensiv untersuchte Episode fand im Mai 1997 statt (Stohl and Trickl, 1999). Die Episode beginnt etwa am 20. Mai 1997 als sich in der Nordamerikanischen Grenzschicht erhöhte Ozonkonzentrationen entwickeln (Abbildung 2.2). Ein Trog überquert Nordamerika und führt zum Export von belasteter Grenzschichtluft in die obere Troposphäre. Ab dem 25. Mai liegt im Bereich der Ostküste der USA eine Zyklone, die einen so genannten „Warm Conveyor Belt (WCB)“ ausbildet. Im dieser Region wird in größerem Umfang verschmutzte Luft bis an die Tropopause gehoben. Im Bereich des Jets wird diese Luft in den nächsten 2-3 Tagen über den Atlantik transportiert. Lidar-Messungen in Garmisch-Partenkirchen zeigen das Eintreffen dieser Luftmasse zu Beginn des 29. Mai (siehe Abbildung 2.2 unten).

Die Ergebnisse bezüglich der chemischen Entwicklung können als typisch gelten für Interkontinental-Plumes im Sommerhalbjahr. Die frisch aus der Grenzschicht über den zentralen

und östlichen USA exportierten Luftmassen enthalten bereits hohe Ozon-Konzentrationen zwischen 75 und 100 ppb. Stickoxide und Kohlenwasserstoffe sind in moderaten Konzentrationen vorhanden. In der oberen Troposphäre findet daher noch weitere Ozon-Produktion statt. In den Modell-Daten für 5000 m Höhe finden sich Netto-Produktionsraten von bis etwa 3 ppb/Stunde (siehe Tabelle unten). Die chemische Produktion kann die Reduzierung der Konzentration durch diffusive Prozesse in Teilbereichen des Plumes ausgleichen. Innerhalb von 2 Tagen sind die Vorläufersubstanzen weitgehend abgebaut. Die chemischen Umsätze nehmen ab und die maximalen Produktionsraten liegen unter 0.5 ppb/Stunde.

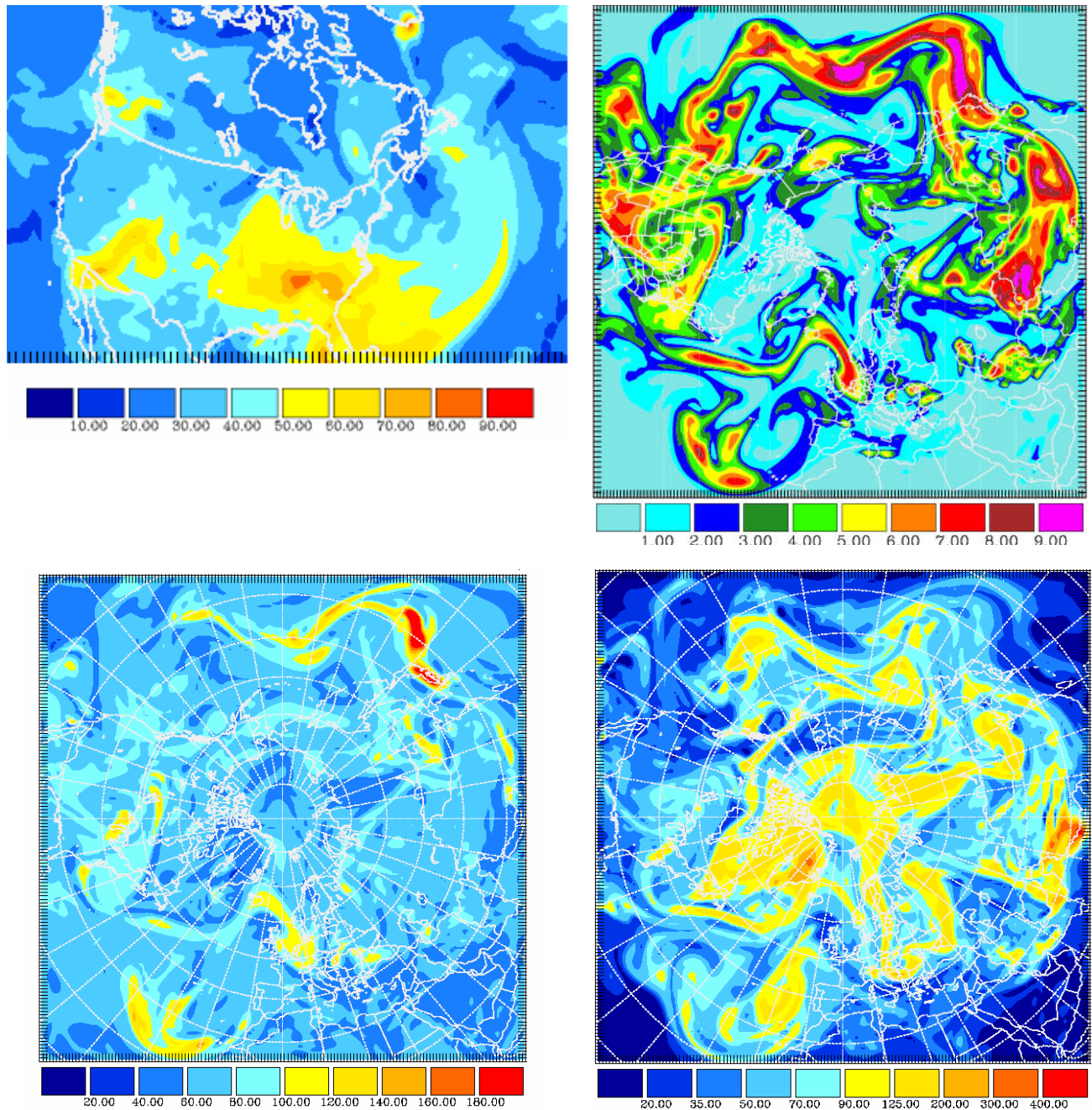
**Tabelle 3:** Konzentration und chemische Produktion ausgewählter Spezies im Bereich eines interkontinentalen Plumes 25.-29. Mai 1997 (aus Feldmann et al., 2005)

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. 1ppb	ca. 0.25 ppb
HNO <sub>3</sub>	0.5 – 5 ppb	0.25 – 3 ppb
PAN	< 2 ppb	< 2 ppb

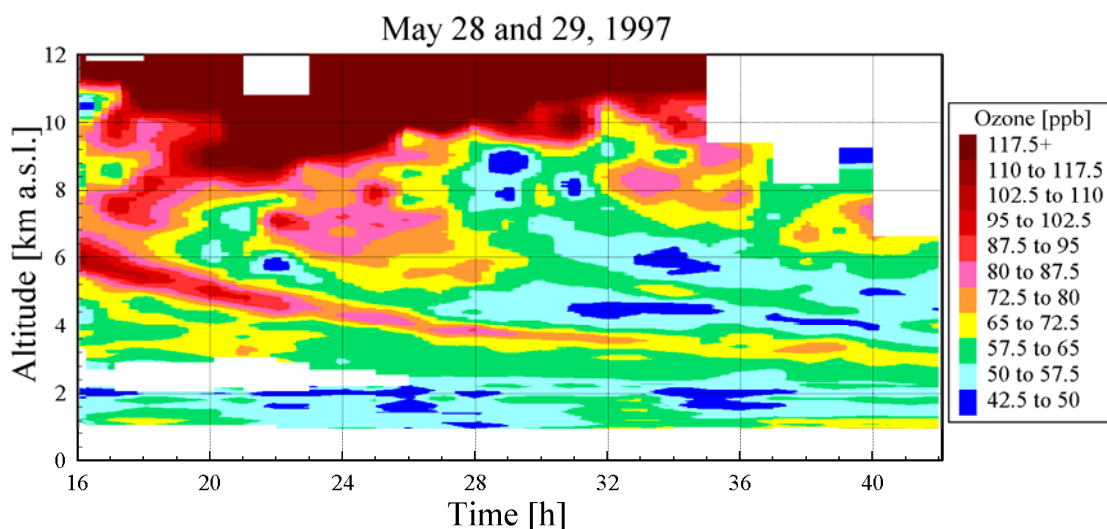


**Abbildung 2.1:** Meteorologische Situation am 29. Mai 1997, 0 UTC (oben) und am 2. Juni 1997, 0 UTC (unten); Tropopausenhöhe ([hPa], farbig), geopotentielle Höhe bei 500 hPa ([gpm], Isolinien) und Windgeschwindigkeit bei 300 hPa ([m/s], Vektoren)

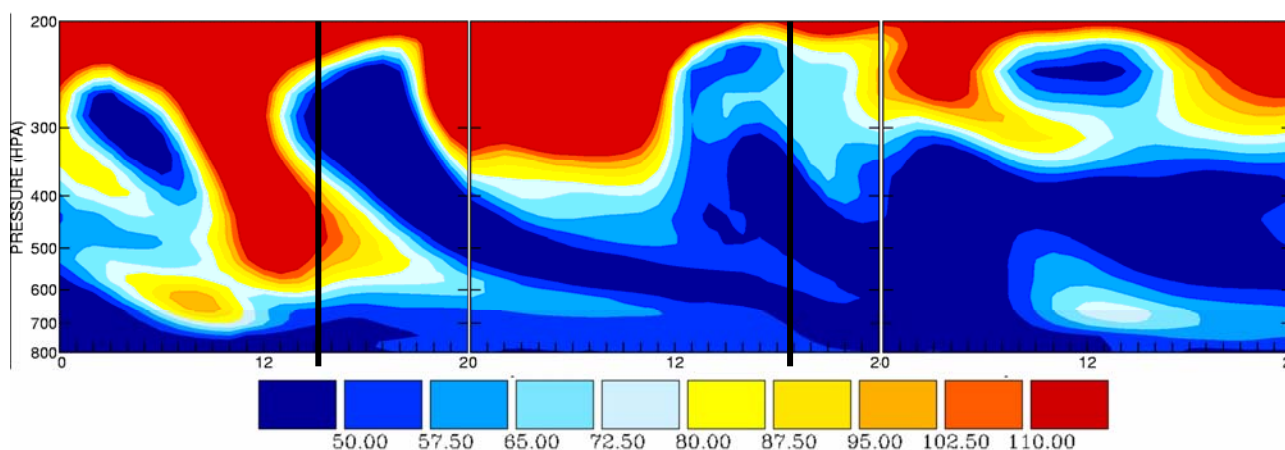




**Abbildung 2.2:** Episode Mai 1997 – links oben: bodennahes Ozon [ppb] über Nordamerika am 23. Mai 1997, 21 UTC, rechts oben: Säulendichte eines hemisphärischen Grenzschicht-Tracers [g/m<sup>2</sup> als CO] am 29. Mai 1997, 1 UTC – links unten CO Konzentration [ppb] in ca. 8000 m Höhe am 29. Mai 1997, 1 UTC – rechts unten: Ozon Konzentration [ppb] in ca. 8000 m Höhe, 29. Mai 1997, 1 UTC (aus Feldmann et al., 2005)



**Abbildung 2.3:** Lidar-Messung von Ozon [ppb] Garmisch-Partenkirchen (nach [Stohl and Trickl, 1999]).



**Abbildung 2.4:** 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 (aus Feldmann et al., 2005).

### 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 hemisphärischen EURAD-Modell abgedeckt. Auf Abb. 2.3 und 2.4 sind Lidar-Beobachtungen und EURAD-Simulation gegenübergestellt (der längere Zeitraum der EURAD-Daten soll einen Vergleich mit dem zitierten Artikel zu erleichtern). Weitere Bilder zu dieser Episode finden sich in Anhang 2.

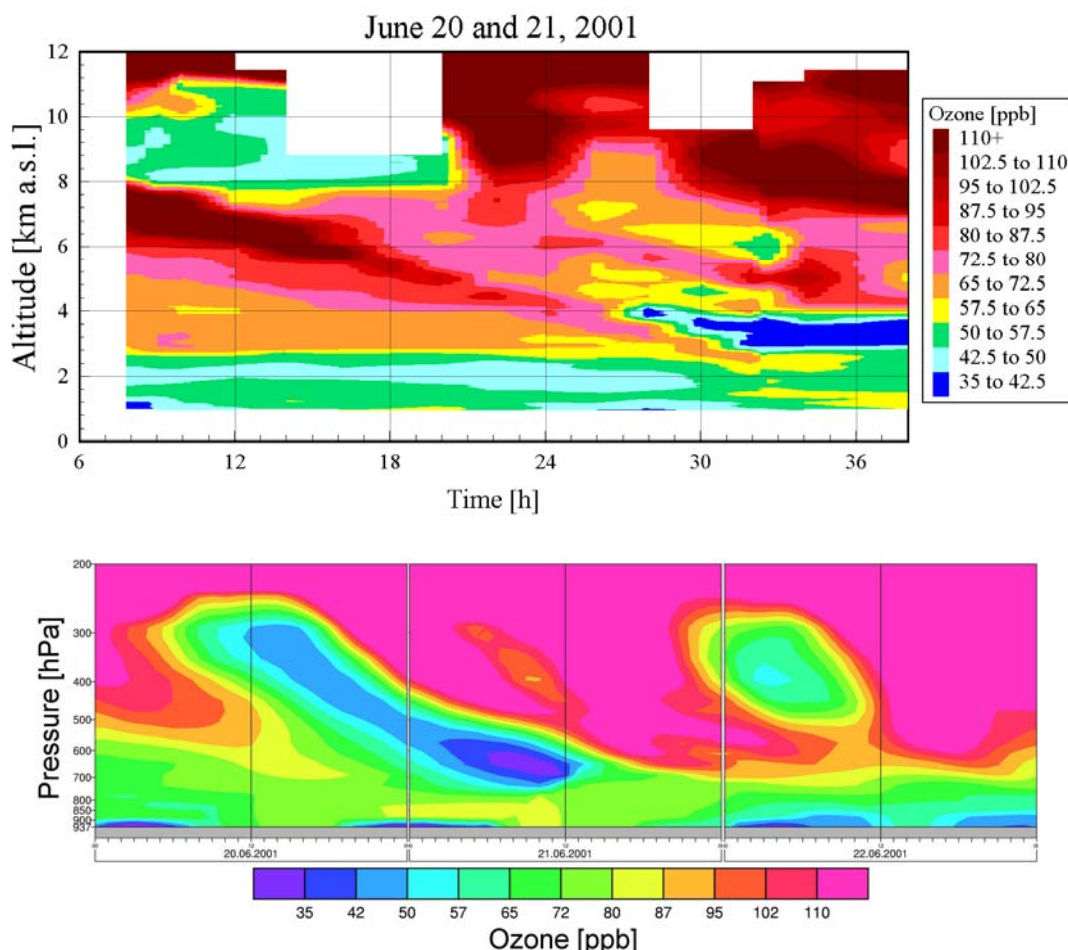
Die Intrusion am Anfang des Beobachtungszeitraums erstreckt sich zwischen etwa 5 und 8 km Höhe und dem Niveau der Zugspitze. Nachfolgend erreicht eine Zone mit niedrigen Konzentrationen den Messort. Anschließend folgt wiederum eine stratosphärische Intrusion. Die



Simulation gibt diese Strukturen wieder. Dies gilt im Wesentlichen auch für ihre vertikale Erstreckung und den Konzentrationsbereich, mit Einschränkungen infolge der schlechteren Höherauflösung des Modells.

Die Vergleiche zeigen, dass das hemisphärische EURAD-Modell in der Lage ist die Dynamik von Ferntransport-Ereignissen zu simulieren. Dies zeigt sich deutlich in der guten Übereinstimmung mit den Lidar-Daten Garmisch-Partenkirchen für solche Episoden. Dies gilt sowohl für das Eintreffen von Interkontinental-Plumes oder Intrusions-Ereignissen als auch ihre Dauer, ihre vertikale Erstreckung und - mit Einschränkungen - ihre Intensität. Ein besonders wichtiger Aspekt ist Beschreibung des antizyklonalen Absinkens aus der oberen Troposphäre bis zur Grenzschicht. Denn dies ist der wichtigste Weg auf dem der Ferntransport die bodennahen Konzentrationen beeinflusst.

Untersuchungen von Trickl, Scheel und anderen Kollegen am FZK-IMK (z.B. EUROTRAC Projekte TOR (2), EU-Projekt VOTALP und AFO2000-Projekt ATMOFAST) zeigen, dass ein Großteil der Intrusionen bis zum Höhenniveau der Zugschuppe – also ca. 3 km – hinabgelangt und das zugehörige Ozon also potentiell zum Einmischen in die Grenzschicht bereit steht. Die Simulationsergebnisse des EURAD-Modells zeigen ebenfalls dieses Verhalten.



**Abbildung 2.5:** 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.

### Blocking und interkontinentaler Transport

Die Analyse verschiedener Ferntransport-Episode im Rahmen dieses Projektes sowie der Projekte TRACHT und ATMOfAST zeigen, dass es häufig einen Zusammenhang mit blockierenden Wetterlagen („Blocking“) gibt.

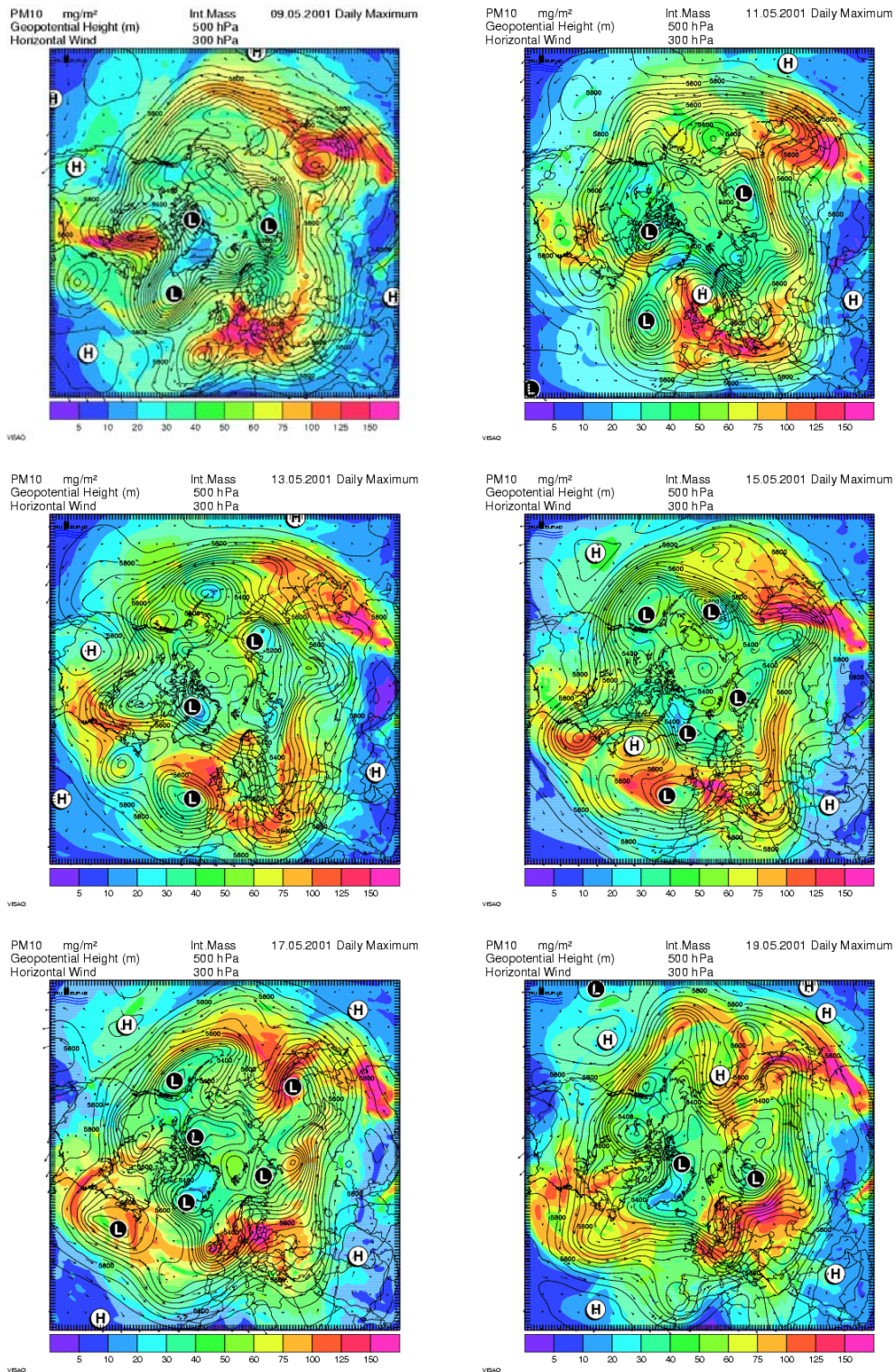
*Blocking*-Strukturen entstehen, wenn sich Luftmassen von Norden (Tiefdruck, kalt, niedrige Tropopause) nach Süden verlagern und im Gegenzug ein Hoch (warm, hohe Tropopause) nach Norden gelangt. Definition und Beschreibung finden sich unter anderem bei Berggren et al. [1949], Rex [1950a, b] eine jüngere Studie stammt von 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. 2.1, 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, typisch Formation stellen so genannte  $\Omega$ -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. 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]).

Auch die weiträumige Verteilung sowohl der gehobenen Grenzschicht-Luft als auch der stratosphärischen Luft fand beispielsweise in der Episode Mai/Juni 1997 unter dem Einfluss von *Blocking* statt.

Abbildung 2.6 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.



**Abbildung 2.6:** Verlauf einer Episode mit „ $\Omega$  Blocking“ vom 9.-19. Mai 2001 mit anormalen Transportmustern. Tagesmaximum der PM<sub>10</sub> Säulendichte [mg/m<sup>3</sup>], Geopotential 500 hPa und Wind in 300 hPa (aus Feldmann et al. 2005).



## **Weitere Episoden mit interkontinentalem Transport**

Transport von Spurenstoffen findet zu jeder Zeit in vielen Regionen der Welt statt. Häufig entstehen daraus Fahnen oder „Plumes“ die über weite Strecken verfrachtet werden. Die Lebensdauer und die zurückgelegte Entfernung hängen dabei in starken Maße von den speziellen meteorologischen Bedingungen ab – wie Wind, Wolken, Niederschläge, Temperatur und Strahlung. Die Lebensdauer variiert abhängig von den chemischen Eigenschaften der Spurenstoffe und ihrer Wasserlöslichkeit.

Eine Aufgabe bei der Identifikation von Interkontinental-Transport (ICT) Ereignissen ist die Wahl von geeigneten Luftmassen-Tracern.

Von der Lebensdauer her geeignet und – wissenschaftlich wie politisch – von besonderem Interesse ist das Ozon. Allerdings wird Ozon sekundär in der Atmosphäre gebildet und lässt sich daher nicht unmittelbar einer Emissionsquelle zuordnen. Des Weiteren gibt es eine Fülle von Prozessen die die Ozon Konzentration in der Atmosphäre beeinflussen. Eine große Rolle spielt das stratosphärische Ozon – welches durch Intrusionen in Form von Tropopausenfaltungen, Streamer und Cut-off lows in die Troposphäre gelangt. Es gilt nun bei Transport-Episoden zu unterscheiden ob die Ozon-Plumes im Zielgebiet bodennah gebildetem Ozon oder der Stratosphäre entstammen. Dies wird dadurch erschwert, dass Plumes aus beiden Schichten häufig gekoppelt auftreten (siehe Stohl und Trickl, 1999).

Die Basis-Simulationen wurden im Hinblick auf Ferntransport nach Europa analysiert. Ziel war es, Episoden mit Interkontinentalplumes zu identifizieren, welche zum einen durch anthropogene Emissionen anderer Kontinente beeinflusst werden, zum anderen auf die untere Troposphäre über Europa wirken und damit das Potential haben die bodennahen Spurenstoff-Konzentrationen zu erhöhen. Daher wurden die Tagesmaxima bzw. maximalen 8-Stunden-Mittel verschiedener Komponenten – neben Ozon vor allem noch PM<sub>10</sub> und CO – untersucht. Dies geschah für verschiedene Höhenbereiche: Boden, 1500 m, 3000 m und 5000 m. In vielen Fällen bleibt eine eindeutige Zuordnung der Herkunft der Luftmassen trotzdem schwierig, da in der oberen Troposphäre Luftmassen stratosphärischer Herkunft und solche mit Grenzschichtkontakt oft nahe beisammen liegen. In den untersten Schichten lösen die kohärenten Transportwege häufig auf, so dass eine weitere Verfolgung erschwert wird.

## **Experiment: Abschaltung der Nordamerikanischen Emissionen**

Um den Einfluss des interkontinentalen Transports von Nordamerika nach Europa quantifizieren zu können, wurde im Rahmen einer weiteren Sensitivitätsstudie die nordamerikanischen Emissionen aus dem Kataster entfernt (siehe Abbildung 2.7). Dies erlaubt es direkte und indirekte Effekte erfassen zu können. Als Simulationszeitraum wurde der Sommer 2001 (1. April – 30. September) gewählt – da der Focus des Experimentes auf dem Einfluss auf die Europäischen Ozon Konzentrationen lag. Auf diese Weise wurde eine sehr detaillierte Analyse des Einflusses der Nordamerikanischen Emissionen auf die Imissionen über Europa möglich. Die Ergebnisse dieses Experiments bilden daher den Schwerpunkt der folgenden Betrachtungen. Im Folgenden wird als „Nordamerika Effekt“ die Differenz der Konzentrationen von Basislauf und Reduktionslauf bezeichnet:

$$\text{Nordamerika Effekt} = C_{\text{Basis-Experiment}} - C_{\text{Reduktionslauf}} \text{ [alle in } \mu\text{g/m}^3\text{]}$$

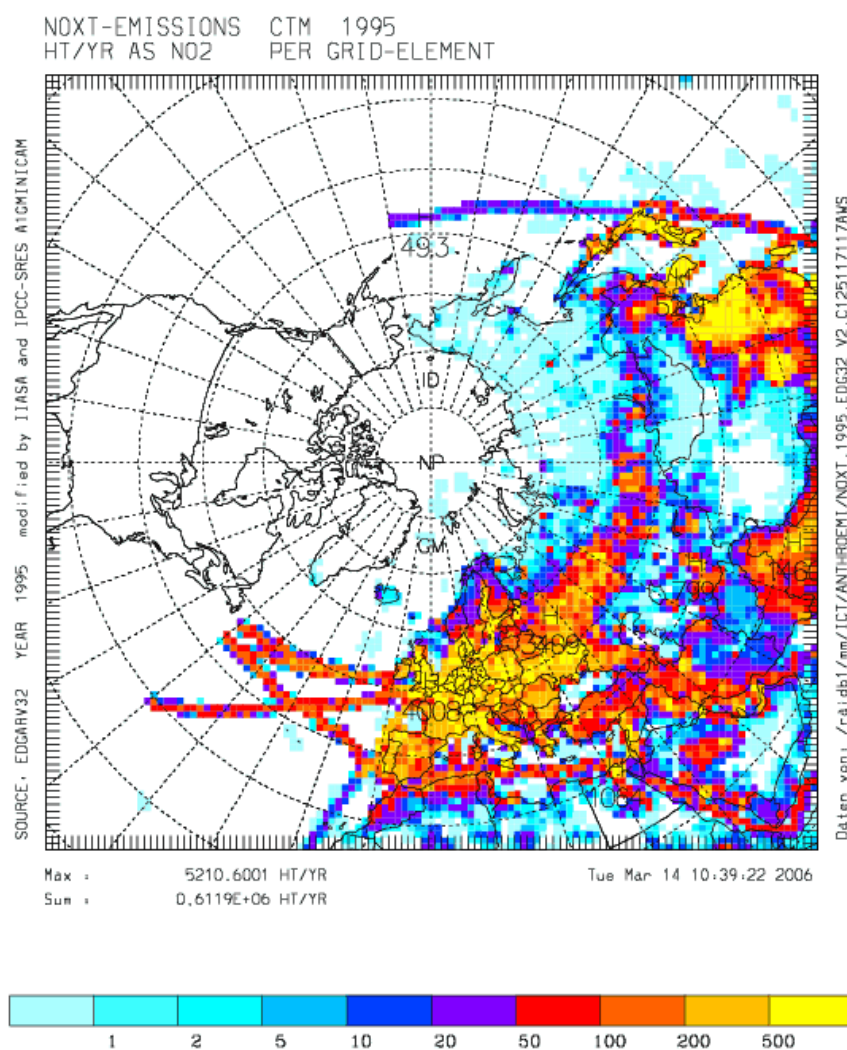
Mit C = Konzentration einer chemischen Spezies an einem bestimmten Ort und Zeit

Damit werden die Beiträge anderer Quellregionen aus der Auswertung eliminiert. Es heißt aber nicht, dass sich über Nordamerika kein Ozon mehr befindet. Dieses stammt nur nicht mehr aus der Umsetzung der dortigen Vorläufer-Emissionen, sondern wird von außen herant transportiert.

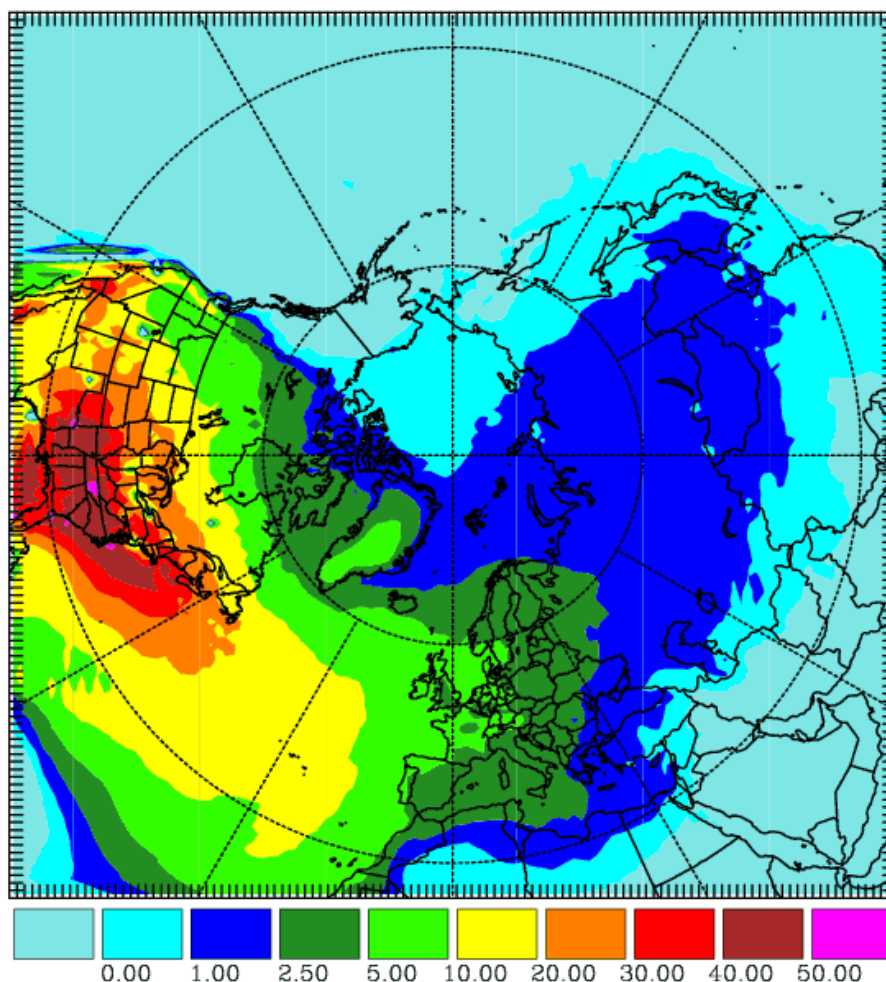
In den Mittelwerten von Ozon für den Sommer 2001 (Abbildung 2.8) tritt der größte „Nordamerika-Effekt“ (bezeichnet hier die Differenz Basisexperiment – Reduktionsexperiment) im Bereich der Ostküste der USA auf. Auch der gesamte Nordatlantik wird signifikant beeinflusst – mit dem Reservoir-Gebiet im Bereich der Azoren. Über Europa liegt der Einfluss – nach Osten hin abnehmend – im Mittel zwischen  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Bis nach Ostasien macht sich ein geringer Beitrag bemerkbar.

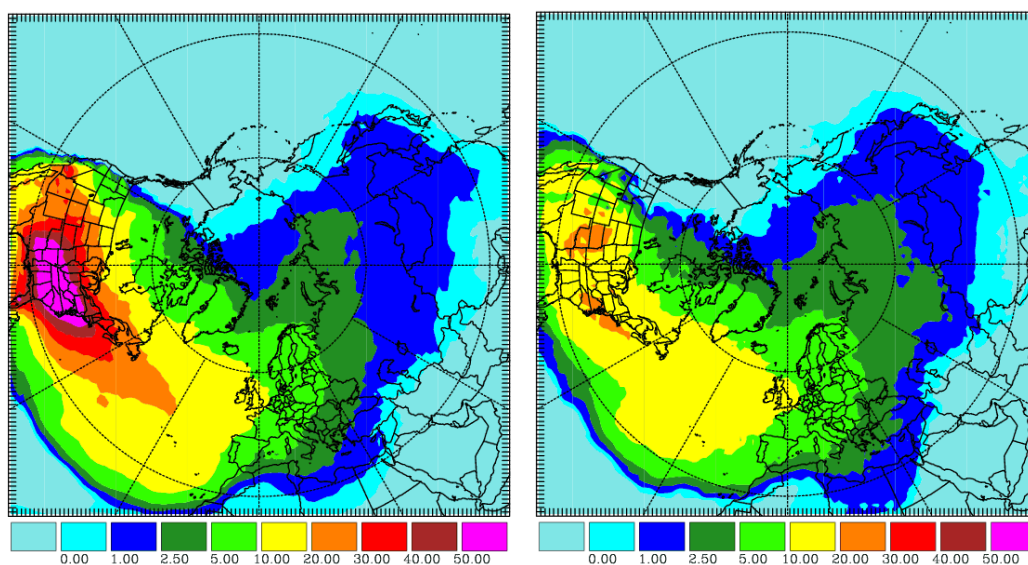
Schaut man oberhalb der bodennahen Schicht (Abbildung 2.9) steigt der Einfluss über Europa an. Auch bei AOT40 (Abbildung 2.10) tragen die Emissionen Nordamerikas zu einer Erhöhung der Belastung über Europa bei – insbesondere über Deutschland. Bei den anderen Luftschadstoffen ist der interkontinentale Beitrag geringer. Über dem Atlantik liegt der Beitrag im Mittel zwischen  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , über Europa und weiten Teilen Asiens zwischen  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Abbildung 2.7:** Jahresrate der NO<sub>x</sub> Emissionen (in HT/Jahr und Box) auf der Basis des EDGAR Katasters transformiert auf das Modellgitter unter Ausschuss der Nordamerikanischen Emissionen (Bereich 170° W – 50° W).



**Abbildung 2.8:** Mittelwert des „Nordamerika-Effektes“ für bodennahes Ozon in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  für das Sommerhalbjahr 2001



**Abbildung 2.9:** wie Abbildung 2.8 aber für 1500 m (links) und 3000 m (rechts).

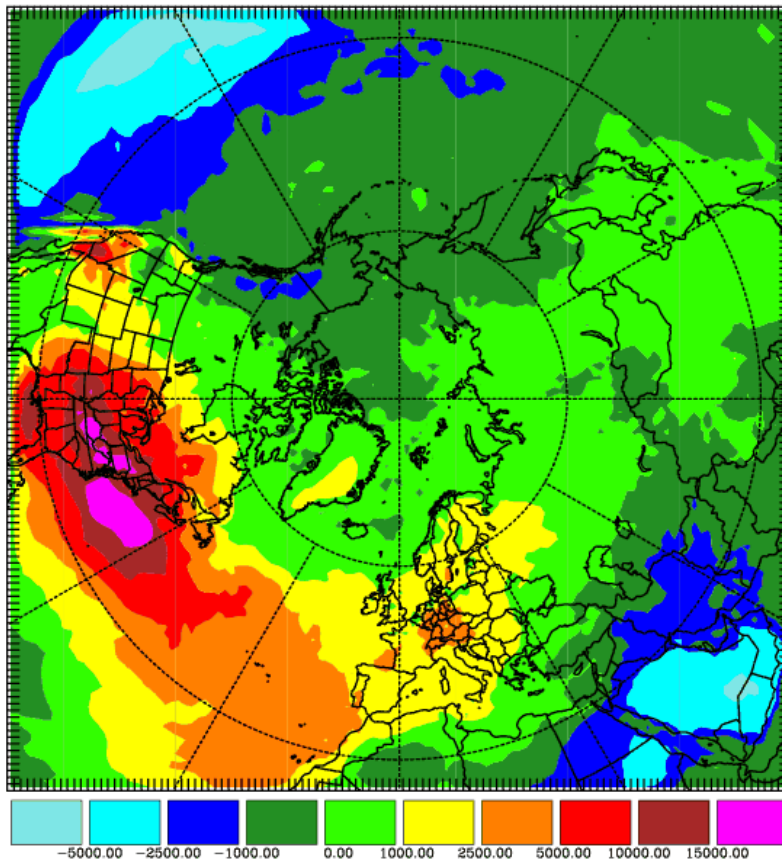


Abbildung 2.10: „Nordamerika-Effekt“ bei AOT40 [ppb\*h]

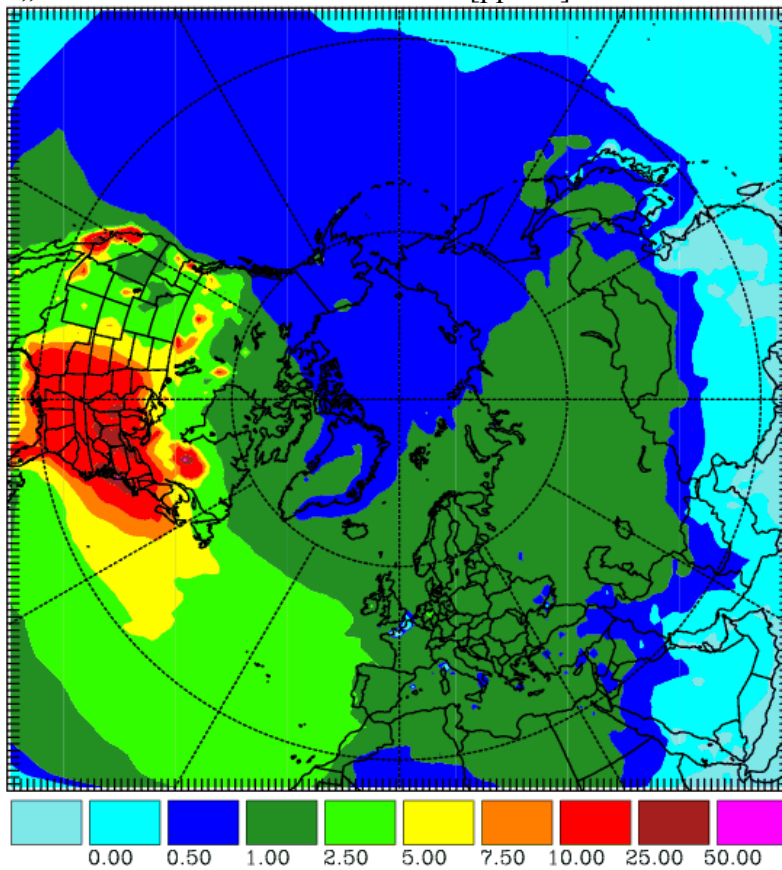
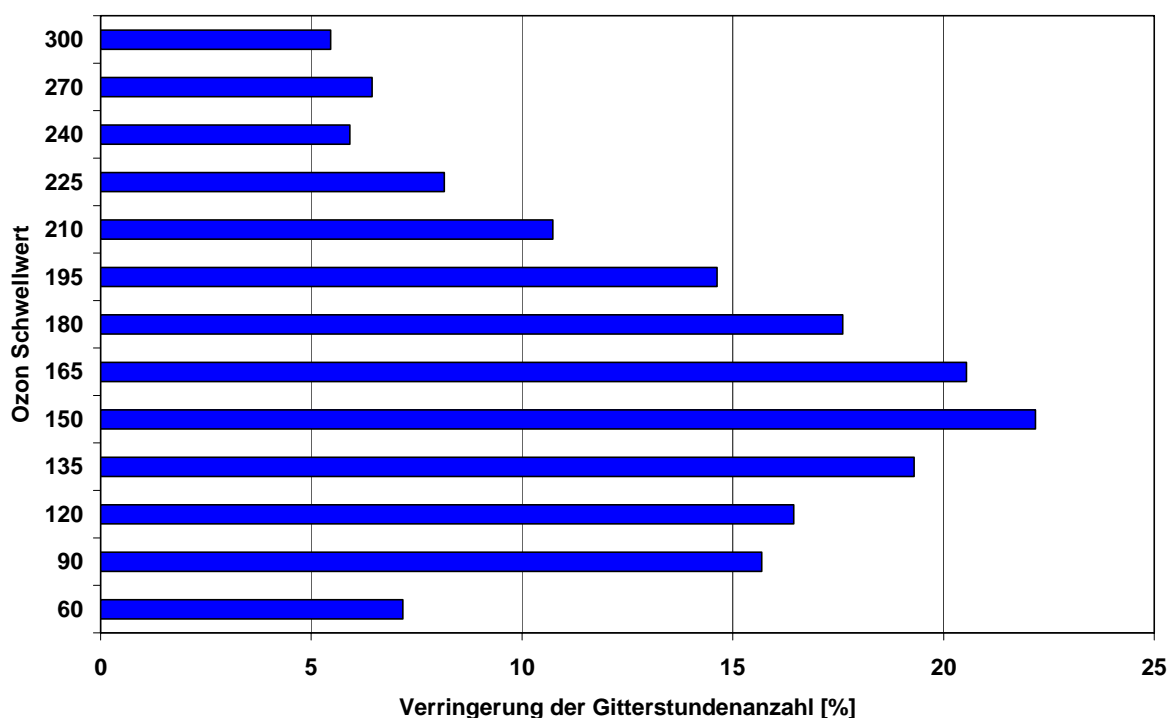


Abbildung 2.11: „Nordamerika-Effekt bei bodennahem PM10 in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  für das Sommerhalbjahr 2001





**Abbildung 2.12:** Anteil [%] der Gitterstundenwerte welche die jeweiligen Schwellwerte (Y-Achse in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) im Basis-Experiment überschreiten aber nicht bei „Abschaltung“ der Nordamerikanischen Emissionen.

Extrahiert man diejenigen Ozon Gitterstundenwerte über Europa (hier als der Bereich des Modellgebietes, welcher an die FU Berlin geliefert wurde – vergleiche Gebiet in Abbildung 3.8), welche ein bestimmtes Konzentrations-Niveau nur Überschreiten, wenn die Nordamerikanischen Emissionen berücksichtigt werden (Abbildung 2.12), ergibt sich der größte Einfluss Nordamerikas im Bereich der mäßig erhöhten bis hohen Konzentrationen im Bereich zwischen  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und ca.  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . In diesem Konzentrationsbereich führt das „Nordamerikanische Ozon“ zu 20% mehr Überschreitungen. Dies wirkt sich auch auf die AOT40 Werte (Abbildung 2.11) aus.

Bei niedrigen Konzentrationen  $< 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und sehr hohen ( $> 240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) liegt der Anteil mit 6-10 % niedriger.

$$\text{Verringerung [\%]} = 100 * \frac{\# \text{Stundenwerte BE mit } C > X \text{ und RE mit } C < X}{\# \text{Stundenwerte BE mit } C > X}$$

Mit: BE = Basisexperiment

RE = Reduktionsexperiment

C = Gitterstundenwert einer chemischen Spezies in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

X = Schwellwert der Konzentration in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Der maximale Einfluss der Nordamerikanischen Emissionen über Europa lag bei über  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die Maxima traten am 18. Juni, 20. Juni, 11.-13. August und 16. August auf alle im westlichen Bereich des betrachteten Gebietes. Die Konzentrationen des Basisexperimentes lagen zwischen  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , die Konzentrationen wurden in diesen Fällen also überwiegend durch die Nordamerikanischen Emissionen geprägt.

Bei einigen vielen Ereignissen tritt der Nordamerika-Plume nur in der Höhe auf und wird dann über Europa abwärts in die bodennahe Schicht gemischt. Dann treten isolierte, regionale Maxima auf. Ein Beispiel ist der 20. Juni 2001 (Abbildung A2.10-A2.13 in Anhang 2). Oft



lassen sich die Fahnen aber auch bodennah bis Nordamerika zurückverfolgen. Hierfür ist die Augustepisode 2001 ein gutes Beispiel (Anhang A1).

Zur Beschreibung des integralen Effektes der nordamerikanischen Emissionen wurde in Abbildung 2.13 für den Ausschnitt „Europa“ (wieder entsprechend Abbildung 3.8) die Gitterstundenwerte des „Nordamerika-Effektes“ (Basislauf – Reduktionslauf Nordamerika) beim bodennahen Ozon in  $[\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}]$  als Zeitreihe dargestellt. Nach einer Einschwingphase von ca. 14 Tagen (diese wurde in der Grafik ausgelassen) lassen sich im Schnitt ca. alle 10 Tage Spitzen der „Nordamerikanischen Ozon Dosis“ über Europa feststellen, welche in der Regel nach einigen Tagen wieder abklingen. Generell lässt sich im Laufe des Sommers ein Ansteigender Trend bis Mitte August (Maximum Tag 229 = 17. August) feststellen. Um den 20. Juli (Julianischer Tag 202) herum findet ein drastischer Anstieg statt. Das erhöhte Niveau wird dann bis zum Ende des Simulationszeitraums nicht mehr unterschritten.

Für Deutschland und Umgebung (Abbildung 2.14) erkennt man im Wesentlichen dieselben Episoden. Auch hier ist die Episode Mitte August die intensivste des Simulationszeitraums.

Wie schon Abbildung 2.12 zeigt Abbildung 2.16, dass der stärkste Einfluss der Nordamerikanischen Emissionen nicht notwendigerweise zum Zeitpunkt der höchsten Konzentrationen eintritt. Bei den meisten Ereignissen tritt der größte Effekt in der unteren Troposphäre auch nicht in der untersten Schicht sondern am Oberrand der Grenzschicht oder der freien Troposphäre auf (Abbildung 2.17).

Wie viele Episoden mit Interkontinentaltransport man findet, hängt sehr stark vom gewählten Kriterium ab. Beispielsweise vom gewählten Parameter (Wahl des Spurenstoffs, Konzentration oder Differenz zwischen Basis- und Sensitivitätsexperiment, Schwellwert, etc.)

In der Regel trifft die transportierte Luftmasse zu verschiedenen Zeitpunkten in verschiedenen Höhen an verschiedenen Orten ein. Man könnte dies als ein einzelnes oder als separate Ereignisse zählen.

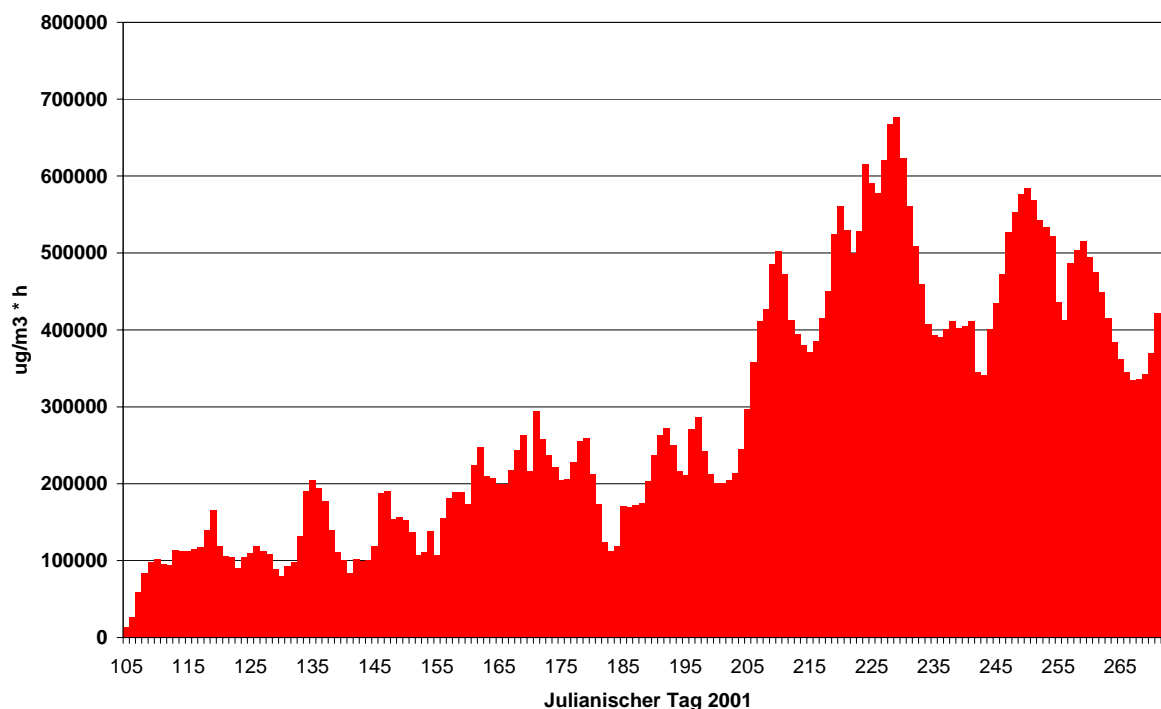
Im Sommerhalbjahr 2001 lassen sich trotz Probleme mit der aktuellen Definition eine Reihe von Ereignissen fest machen (Kriterien bodennahes Ozon, starker absoluter/relativer Anstieg, mehr als 10% oberhalb des gleitenden 21-Tage-Mittels):

### **Liste der Interkontinentaltransport Episoden von Nordamerika nach Europa – Sommerhalbjahr 2001**

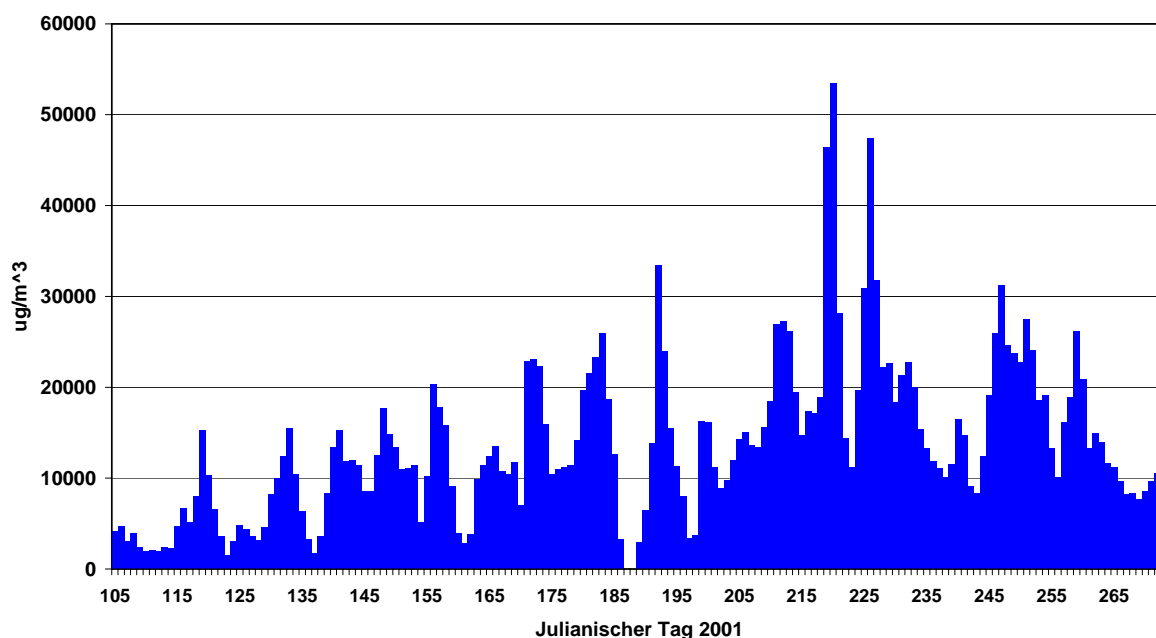
(die angegebenen Daten beziehen sich auf die Zeiträume in denen signifikante Effekte über Europa zu finden sind)

- 16. – 21. April
- 28. – 29. April
- 11. – 17. Mai
- 25. – 29. Mai
- 10. – 11. Juni
- 18. – 21. Juni
- 26. – 28. Juni
- 08. – 12. Juli
- 15. – 16. Juli
- 23. – 30. Juli
- 05. – 08. August
- 11. – 19. August
- 01. – 09. September
- 14. – 17. September

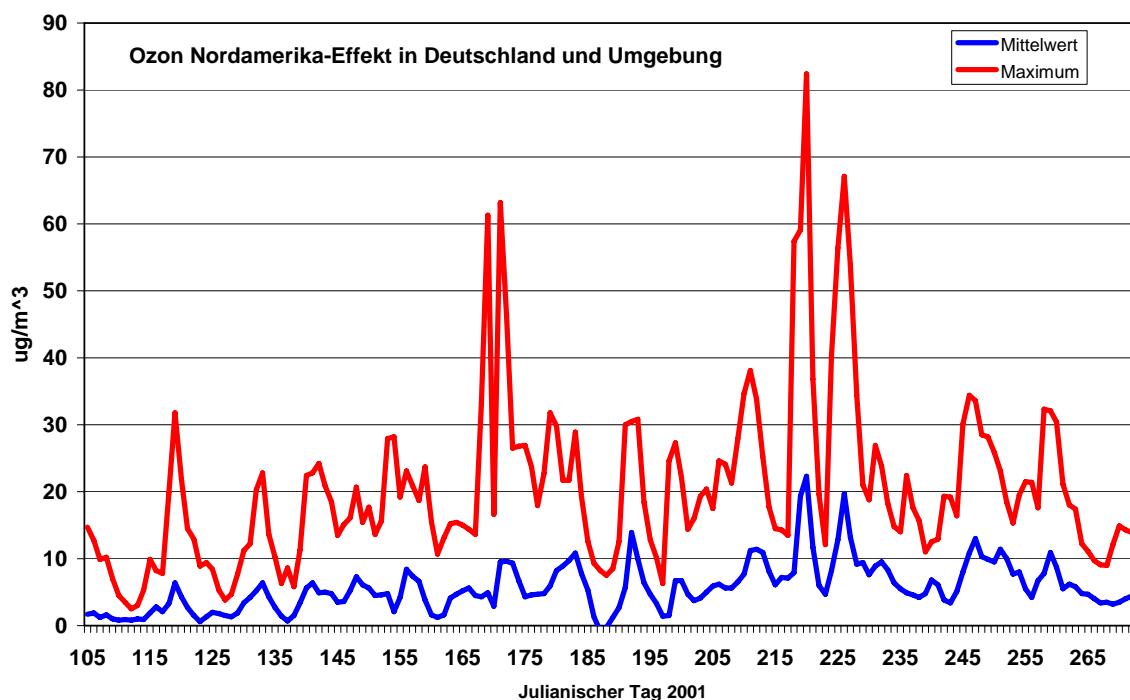
Im Anhang finden sich Darstellungen zu Art und Verlauf verschiedener Transport-Episoden.



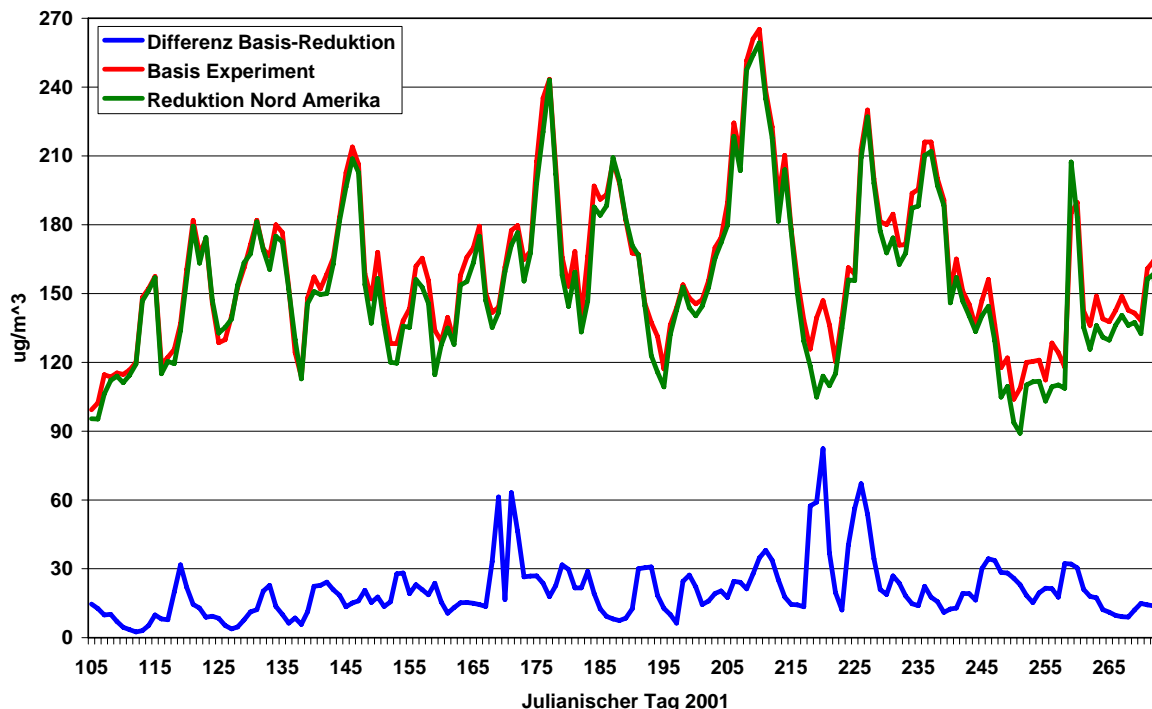
**Abbildung 2.13** „*Nordamerikanische tägliche Gesamtdosis Ozon*“: Summe der Differenzen beim bodennahen Ozon Basislauf – Reduktionsexperiment Nordamerika über das Teilgebiet Europa (vgl. Abbildung 3.8) in  $[\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}]$  je Tag



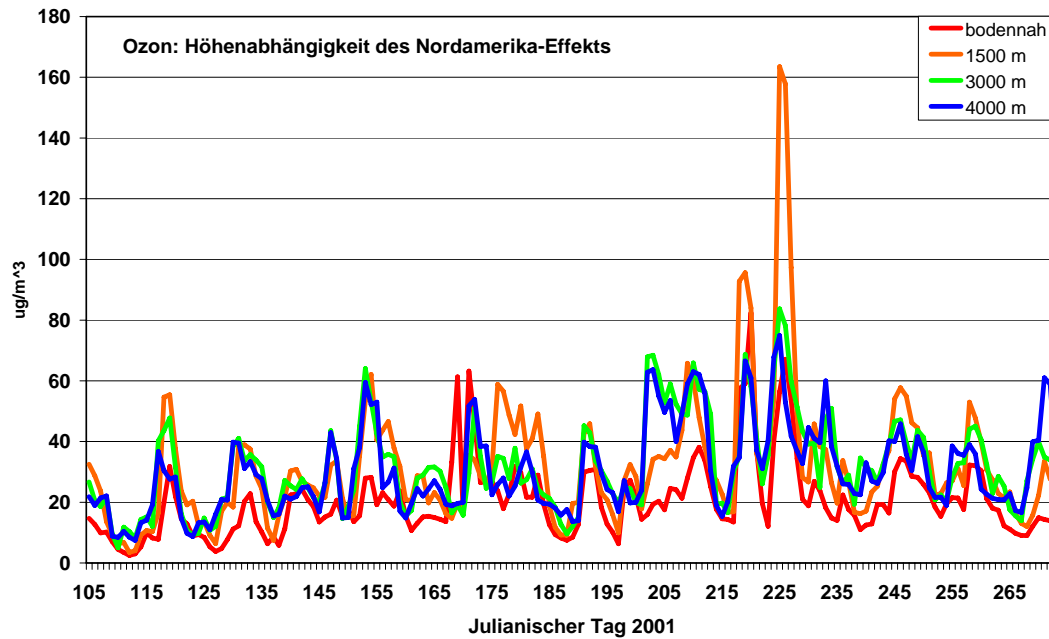
**Abbildung 2.14** „*Tägliche Gesamtdosis Ozon Deutschland*“: Summe der Differenzen beim bodennahen Ozon Basislauf – Reduktionsexperiment Nordamerika über ein Teilgebiet von 10x10 Boxen mit Deutschland als Zentrum in  $[\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}]$  je Tag



**Abbildung 2.15 Nordamerika Effekt auf Ozon in Deutschland und Umgebung** (bodennah) täglicher Mittelwert und Maximum der Differenz Basislauf – Reduktionsexperiment Nordamerika über ein Teilgebiet von 10x10 Boxen mit Deutschland als Zentrum in [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



**Abbildung 2.16 Tagesmaximum Ozon in Deutschland und Umgebung** (bodennah) Basislauf, Reduktionsexperiment Nordamerika und Differenz (nicht identisch mit Differenz der Maxima) über ein Teilgebiet von 10x10 Boxen mit Deutschland als Zentrum in [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



**Abbildung 2.17 Höhenabhängigkeit beim Tagesmaximum Ozon in Deutschland und Umgebung** (bodennah) Basislauf, Reduktionsexperiment Nordamerika und Differenz (nicht identisch mit Differenz der Maxima) über ein Teilgebiet von 10x10 Boxen mit Deutschland als Zentrum in  $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$

### 3 Jahreswerte 1999 und 2001

Im Folgenden werden die Jahresmittelwerte und Stundenmaxima der Simulationsrechnungen für die Jahre 1999 und 2001 dargestellt. Hierbei ergeben sich für beide Jahre prinzipiell sehr ähnliche Verteilungen der Spurengase und des Aerosols. Unterschiede im Detail sind aber sehr wohl vorhanden.

#### Ozon

Die Jahresmittelwerte von Ozon (Abbildung 3.1) werden sowohl von den niedrigen Konzentrationen im Winter und in der Nacht beeinflusst. Die höchsten Mittelkonzentrationen treten in den mittleren Breiten auf mit niedrigeren Konzentrationen in polaren und tropischen Breiten.

Die mittleren Breiten umfassen wiederum verschiedene Zonen:

- Viele der Hauptemissionsgebiete sind durch niedrige Jahresmittel gekennzeichnet. Dies kommt durch die Titration aufgrund der reichlich vorhandenen Stickoxide zustande. Auch hohe Spitzenkonzentrationen treten in diesen Gebieten auf (Mitteleuropa, Nordosten der USA und Ostasien)
- Abgelegene, wenig belastete Landstriche finden sich fast nur in Sibirien.
- Hohe Konzentrationen treten auch über Gebirgen auf (vor allem Himalaja – teilweise auch Grönland). Diese hochgelegenen Gebiete werden mit erhöhter Wahrscheinlichkeit von stratosphärischen Intrusionen betroffen.
- Erhöhte Jahresmittelwerte treten auch über den Ozeanen im Abwindbereich der Kontinente auf. Hier spielt der Effekt der geringen Depositionsgeschwindigkeit von Ozon über Wasserflächen eine Rolle. Man erkennt die kontinentalen Abluftfahnen von Asien auf dem Pazifik und Nordamerikas über dem Atlantik. Diese können mehrere Tausend Kilometer weit erkennbar sein. Besonders über dem Atlantik wird Ozon auch entlang der Schifffahrtswege aufgrund der vorhandenen Vorläufersubstanzen gebildet. Westlich von Europa (und im Nordseeraum) befindet sich ein ausgedehnter Bereich mit hoher Ozon-Belastung dieser rührt vom europäischen Export her, aber in diesem Bereich befindet sich auch ein Reservoir des Nordamerika Plumes (siehe auch Abbildung 2.2).
- Die höchste mittlere Ozon-Belastung tritt im Mittelmeerraum und im Persischen Golf auf. In diesen Regionen kommen hohe Temperaturen und hohe Sonnenscheindauer mit intensiver menschlicher Nutzung zusammen (Städte, Schiffsverkehr, bei Arabien auch die Erdölindustrie).

Spitzenkonzentrationen von Ozon von über  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  treten in ganz Europa, Nordafrika, Ostasien, dem mittleren Osten, Ostasien und der West- und Ostküste der USA auf, sowie über den angrenzenden Meeresregionen.

Noch höhere Konzentrationen sind auf den engeren Bereich der Hauptemissionsgebiete beschränkt sowie auf die Himalaja Region.

#### Stickoxide

Die Stickoxide haben eine kürzere Lebensdauer als Ozon. Die höchsten Konzentrationen treten über den Emissionsgebieten Europas, Asiens und Nordamerikas (Abbildung 3.2). Die Schifffahrtsrouten zeichnen sich ebenfalls ab.

### **Schwefeldioxid**

Wie bei  $\text{NO}_x$  ist bei  $\text{SO}_2$  kaum interkontinentaler Transport zu erkennen (Abbildung 3.3). Die Konzentrationen sinken spätestens einige 100 km von den Emissionsgebieten auf niedrige Werte ab. Hierbei spielt vor allem die Umwandlung zu Sulfat eine Rolle, aber auch die trockene Deposition.

### **Kohlenmonoxid**

CO ist in der Atmosphäre langlebiger als die beiden vorherigen Stoffklassen. Dies führt dazu, dass auch weit entfernt von den Hauptemissionsgebieten ein signifikanter Anstieg der Konzentrationen festgestellt werden kann (Abbildung 3.4). Dies passiert beispielsweise über dem Nordatlantik.

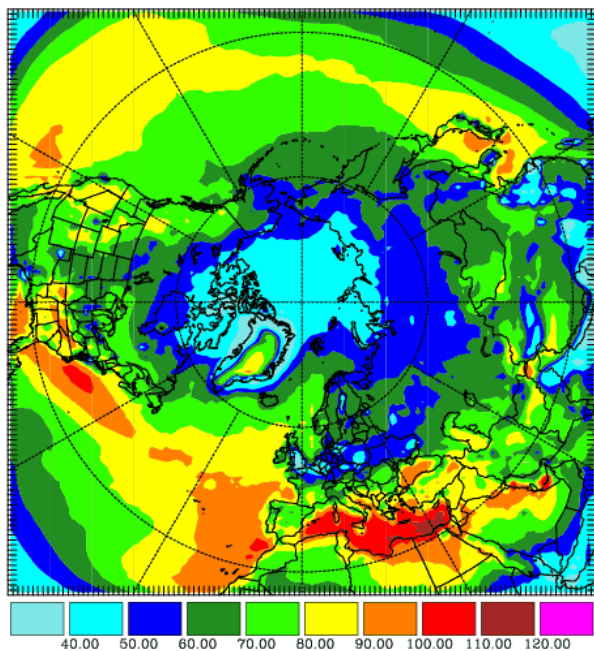
### **Aerosole**

Auch bei den Partikeln (Abbildung 3.5 – 3.7) lassen sich typischen die kontinentalen Exportgebiete schon in den Jahresmitteln identifizieren. Neben dem Pazifik und den mittleren Breiten des Atlantiks, fällt hier auch der Ostatlantik südöstlich der Iberischen Halbinsel auf, welches durch Europäische Exporte verursacht wird, aber auch ein Zielgebiet der Spurenstoffe Nordamerikanischer Herkunft.

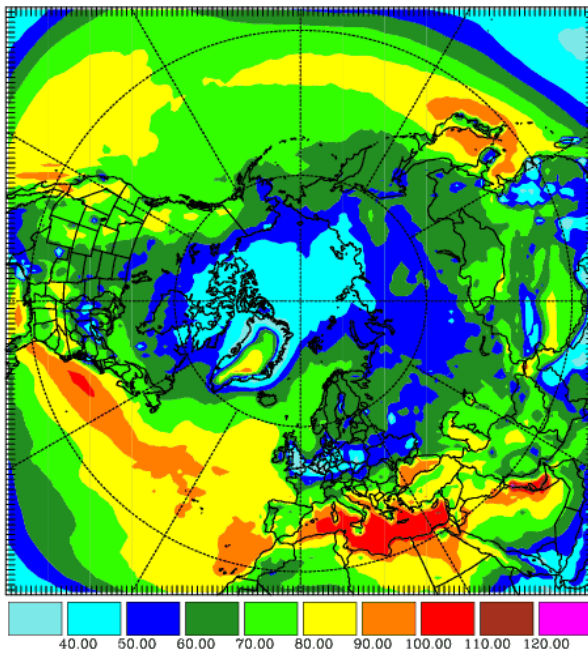


## Ozon

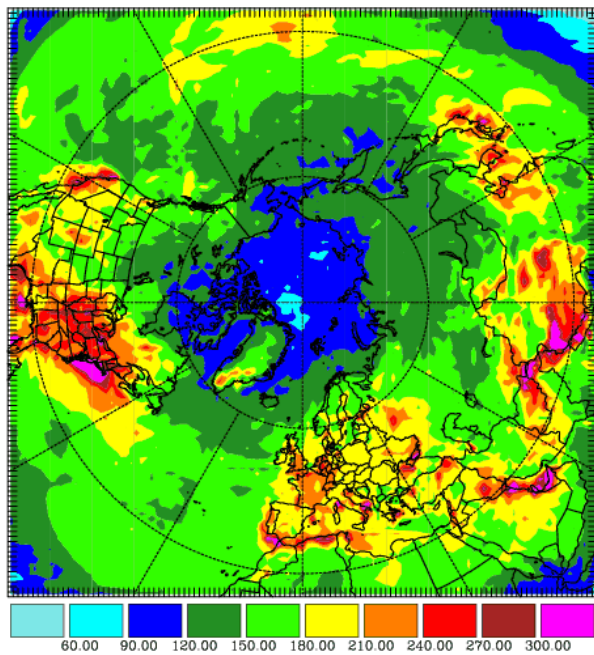
### Jahresmittelwert 1999



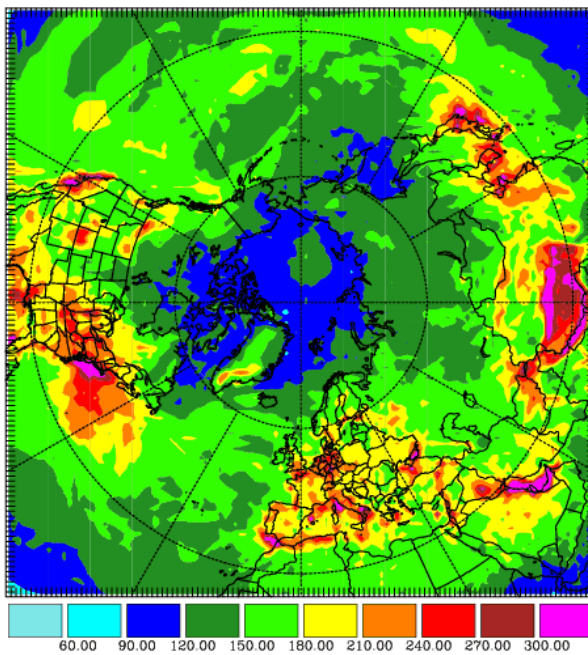
### Jahresmittelwert 2001



### Stundenmaximum 1999



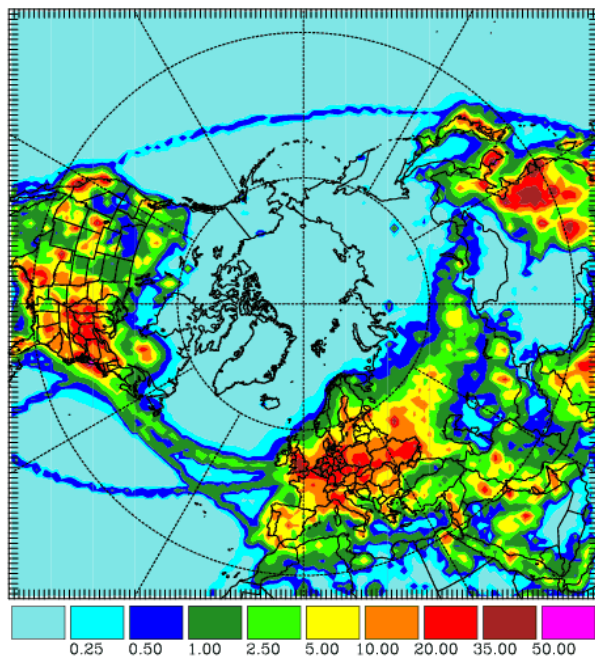
### Stundenmaximum 2001



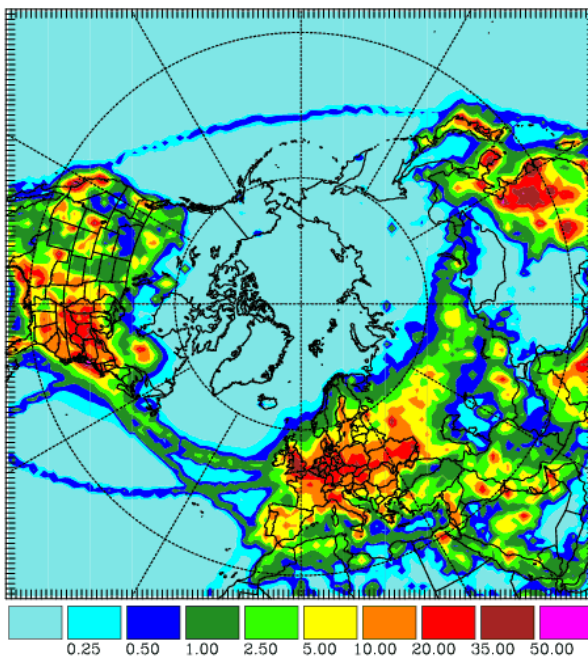
**Abbildung 3,1:** Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] bodennahe Schicht – oben Jahresmittelwert, links 1999 rechts 2001– unten Stundenmaxima, links 1999, rechts 2001

## NO<sub>2</sub>

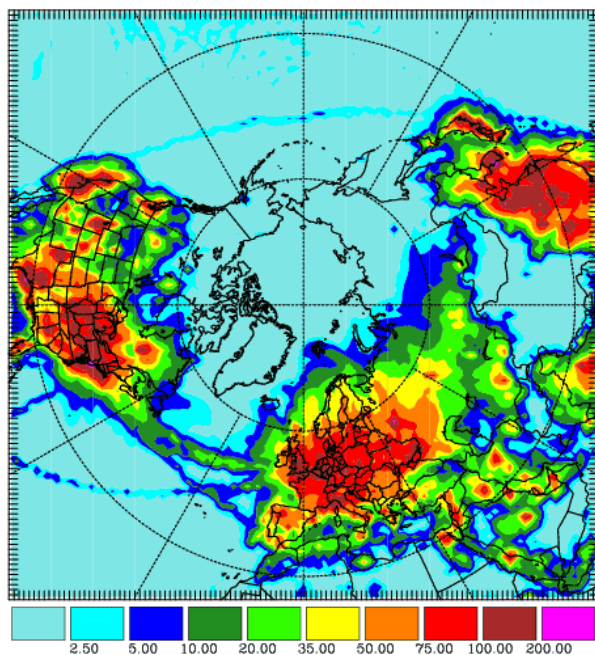
### Jahresmittelwert 1999



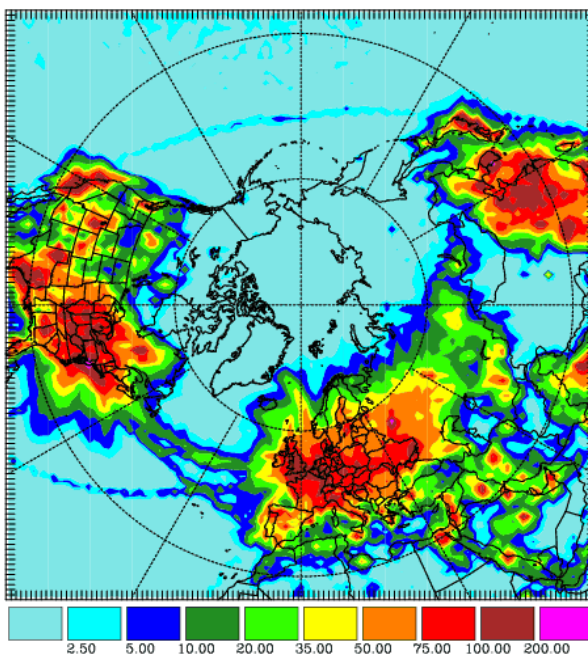
### Jahresmittelwert 2001



### Stundenmaximum 1999



### Stundenmaximum 2001

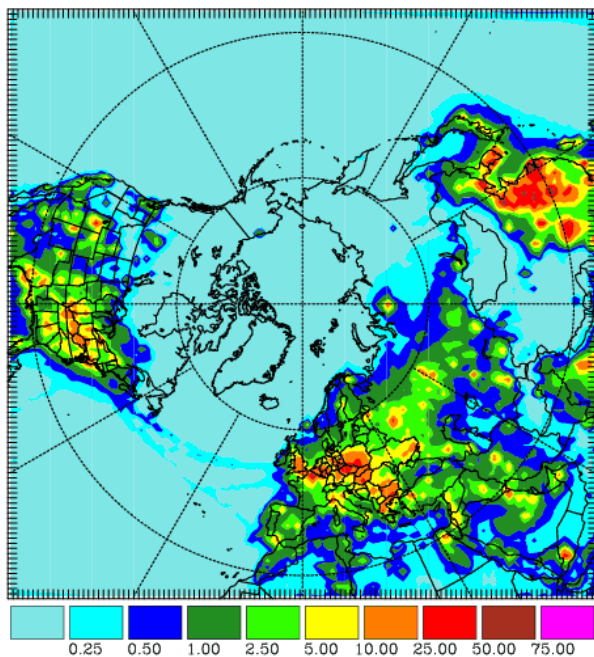


**Abbildung 3.2:** NO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>] bodennahe Schicht – oben Jahresmittelwert, links 1999 rechts 2001– unten Stundenmaxima, links 1999, rechts 2001

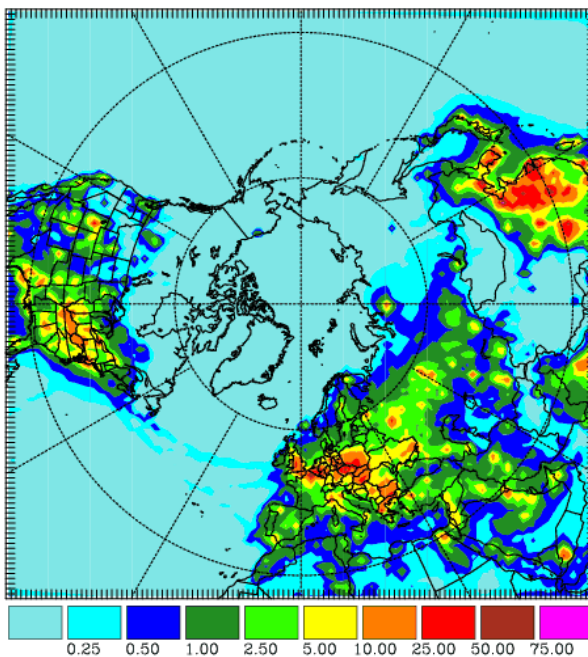


SO<sub>2</sub>

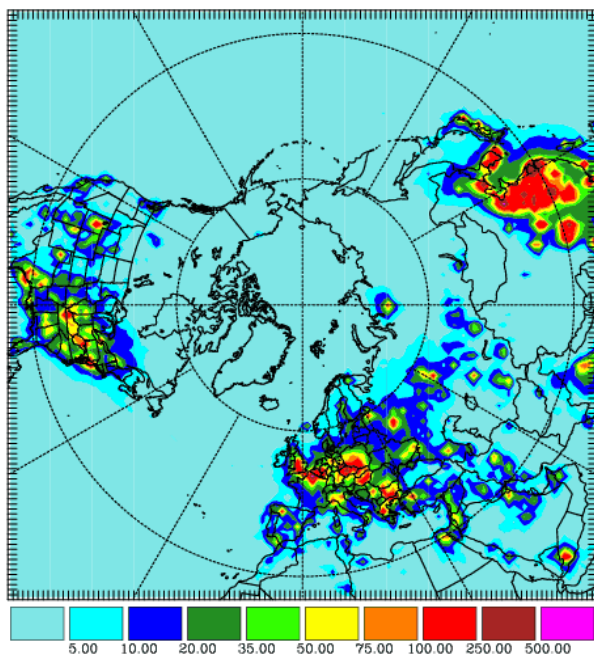
Jahresmittelwert 1999



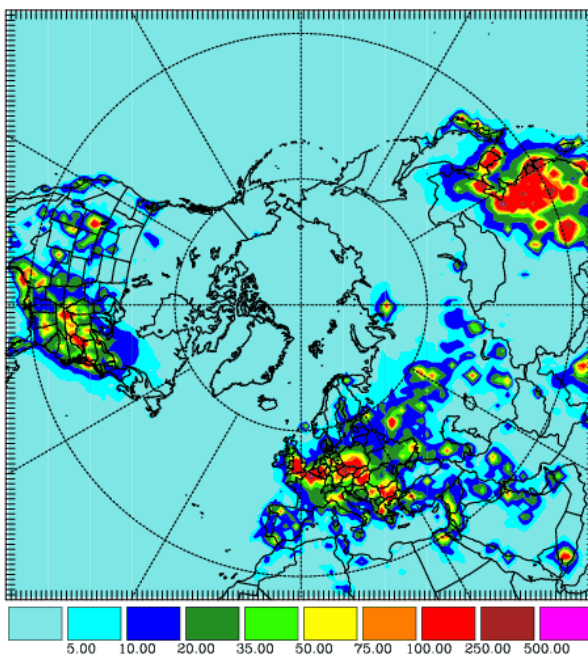
Jahresmittelwert 2001



Stundenmaximum 1999



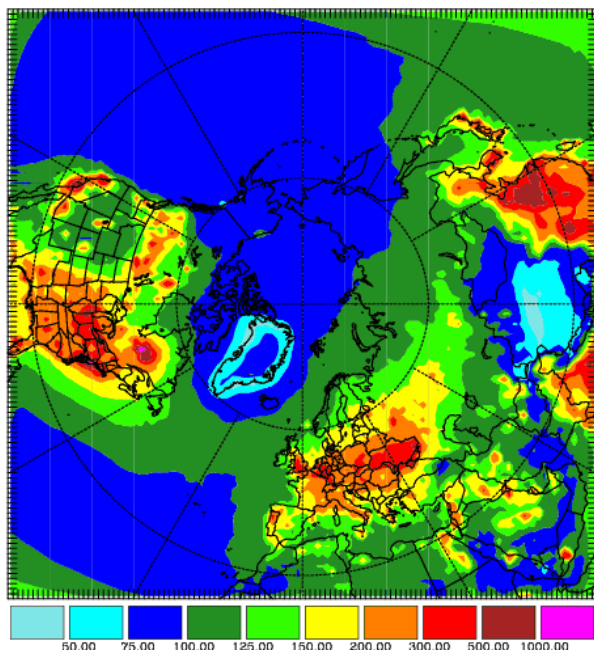
Stundenmaximum 2001



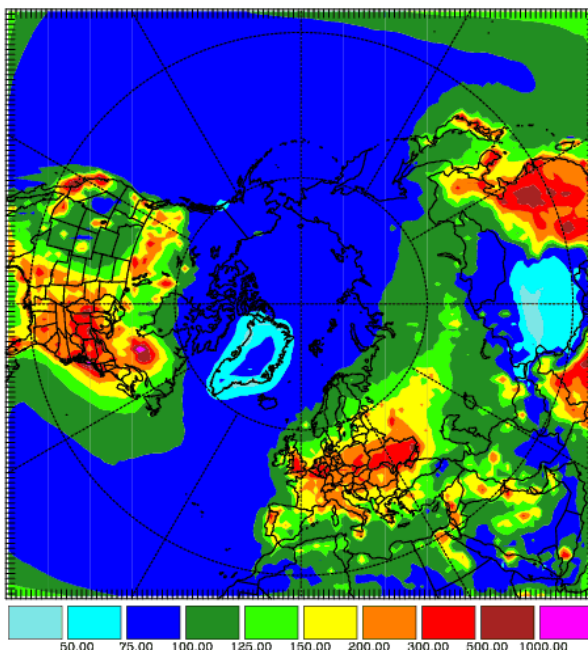
**Abbildung 3.3:** SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>] bodennahe Schicht – oben Jahresmittelwert, links 1999 rechts 2001– unten Stundenmaxima, links 1999, rechts 2001

# CO

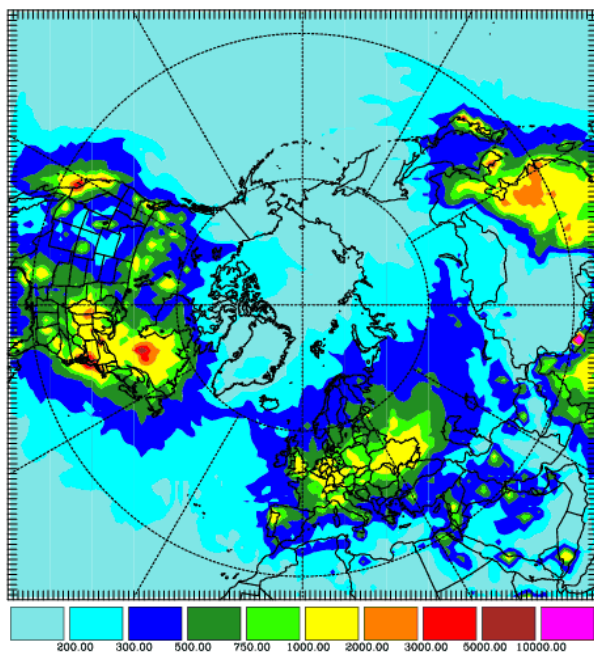
## Jahresmittelwert 1999



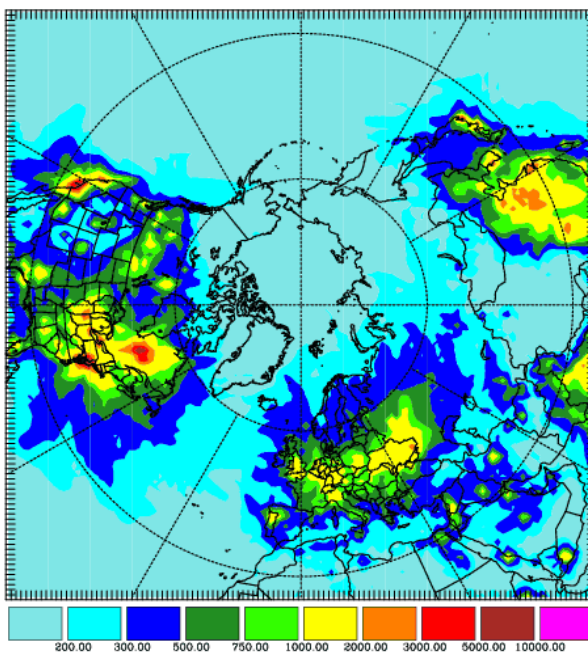
## Jahresmittelwert 2001



## Stundenmaximum 1999



## Stundenmaximum 2001

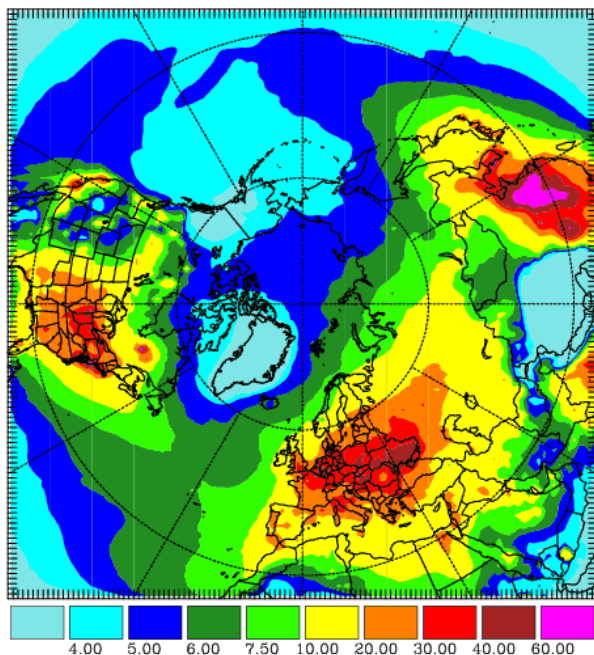


**Abbildung 3.4:** CO [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] bodennahe Schicht – oben Jahresmittelwert, links 1999 rechts 2001– unten Stundenmaxima, links 1999, rechts 2001

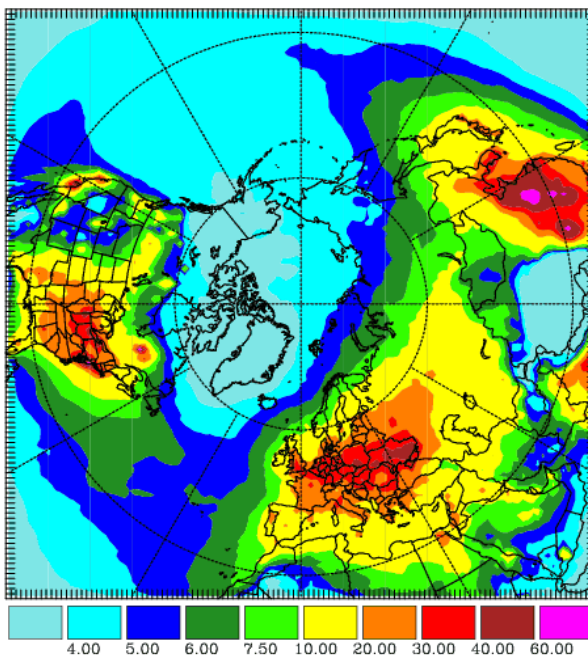


# PM<sub>10</sub>

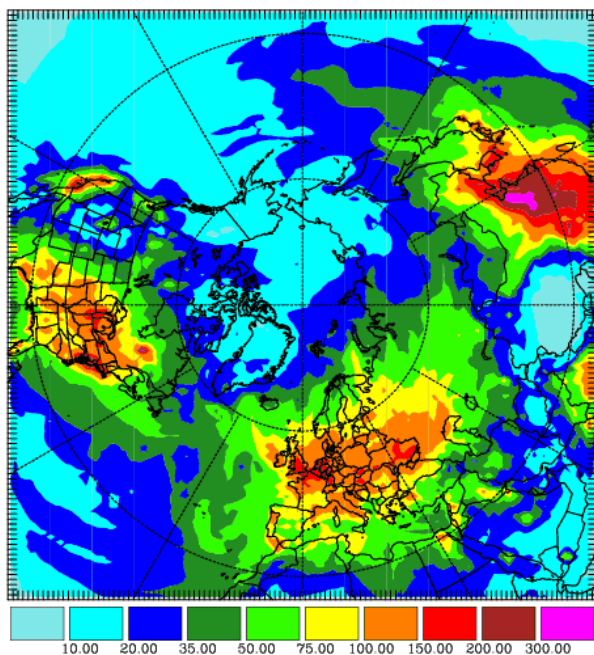
## Jahresmittelwert 1999



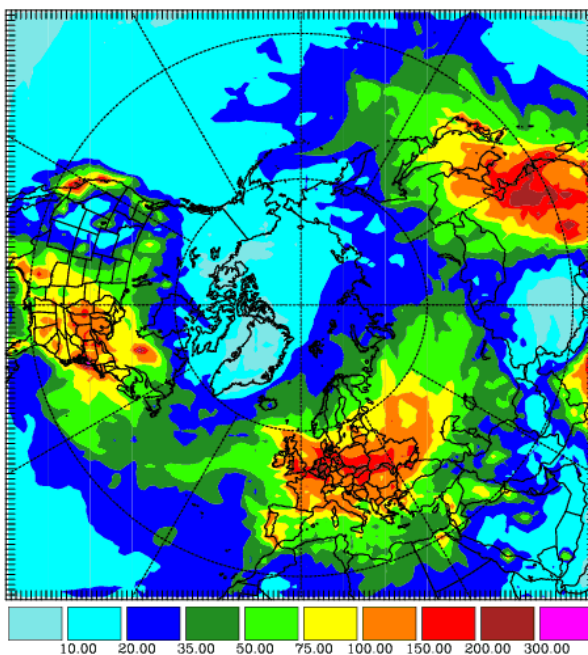
## Jahresmittelwert 2001



## Stundenmaximum 1999



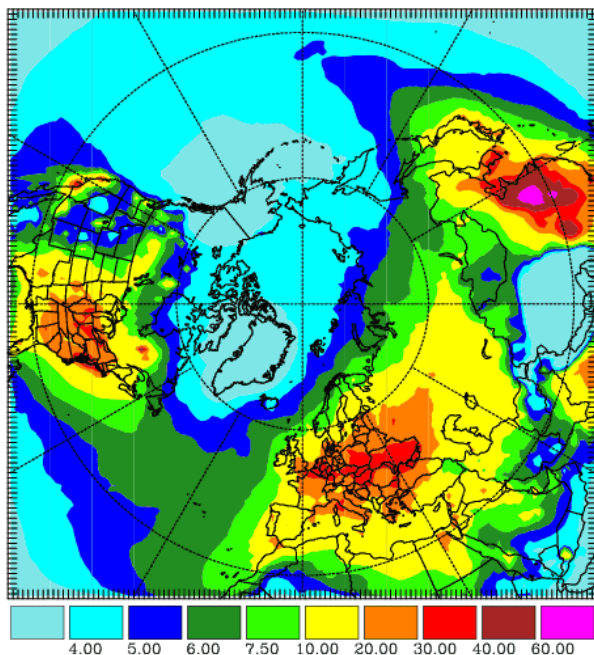
## Stundenmaximum 2001



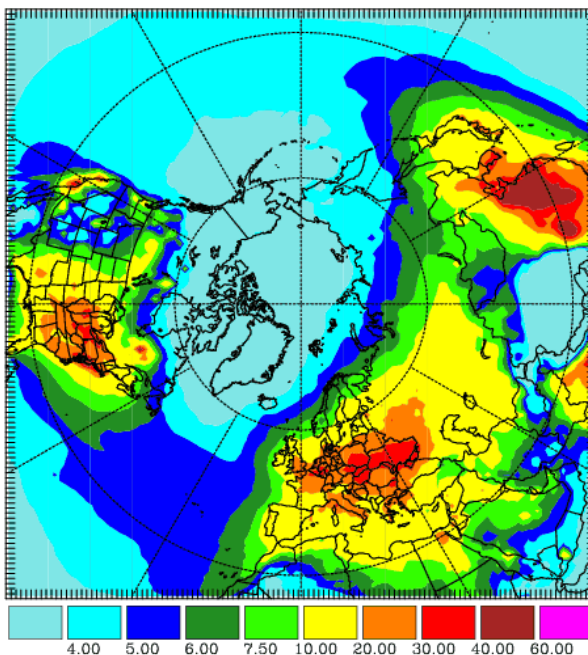
**Abbildung 3.5:** PM<sub>10</sub> [µg/m<sup>3</sup>] bodennahe Schicht – oben Jahresmittelwert, links 1999 rechts 2001– unten Stundenmaxima, links 1999, rechts 2001

## PM<sub>2.5</sub>

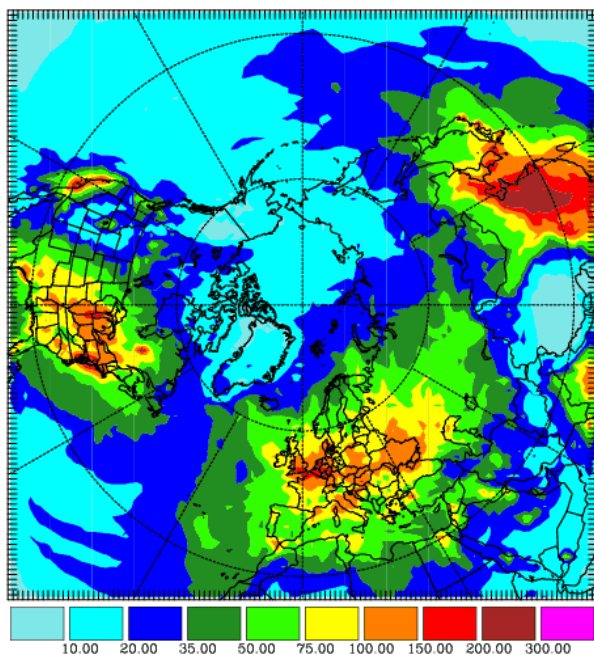
### Jahresmittelwert 1999



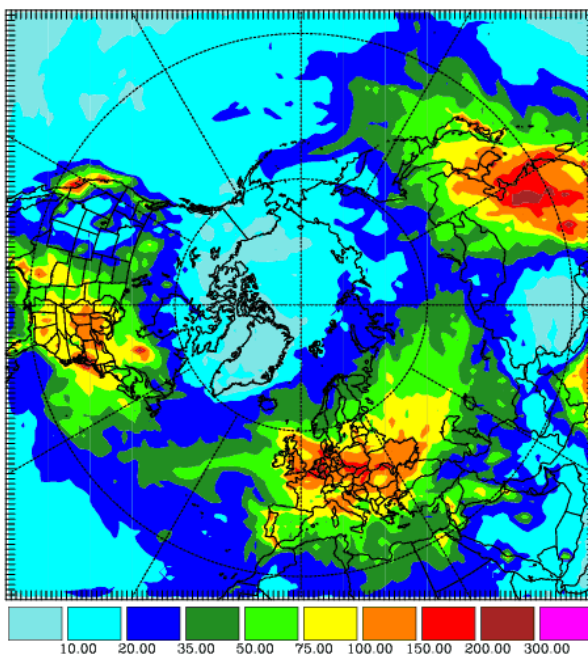
### Jahresmittelwert 2001



### Stundenmaximum 1999

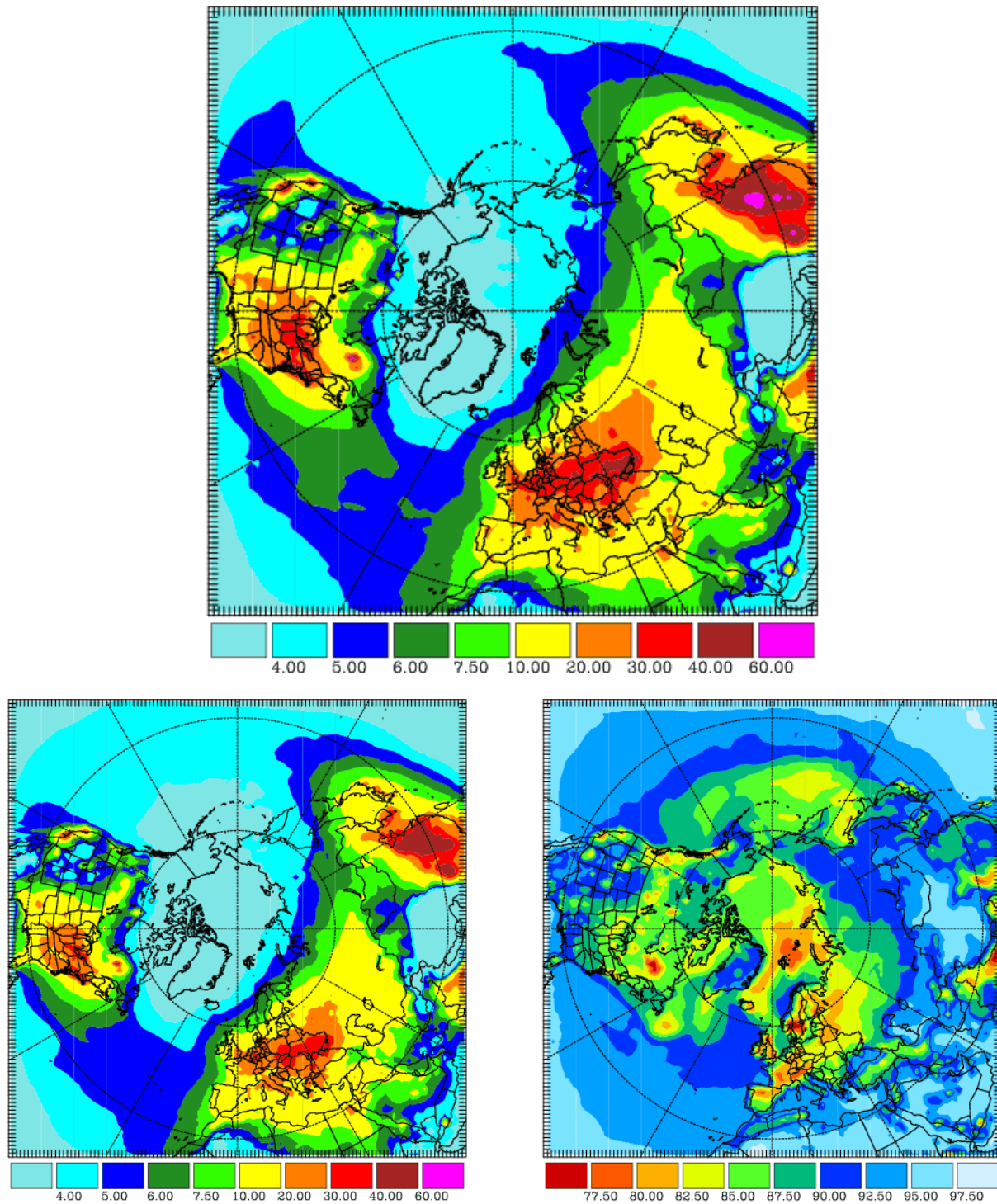


### Stundenmaximum 2001

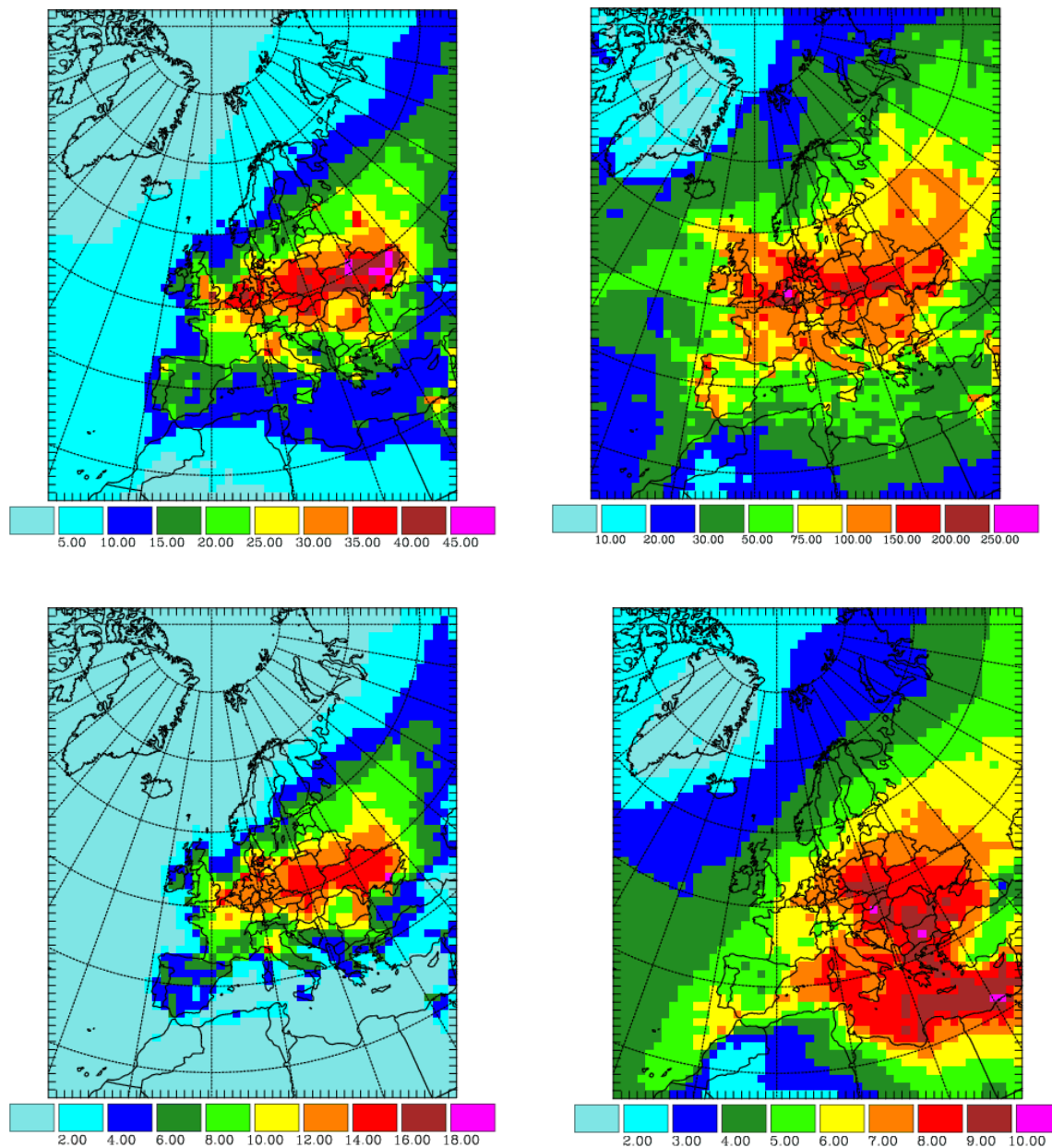


**Abbildung 3.6:** PM<sub>2.5</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] bodennahe Schicht – oben Jahresmittelwert, links 1999 rechts 2001 – unten Stundenmaxima, links 1999, rechts 2001



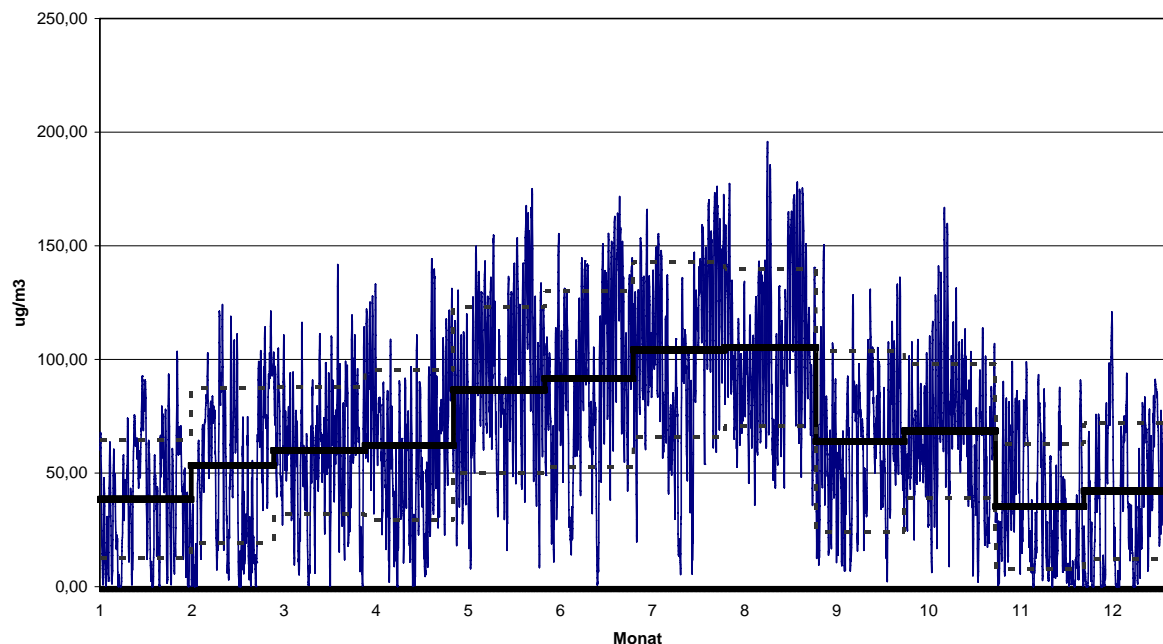


**Abbildung 3.7** Jahresmittelwerte 2001, bodennahe Schicht– oben: PM10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] – links unten: PM2.5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] – rechts unten: Verhältnis PM2.5 zu PM10 [%]



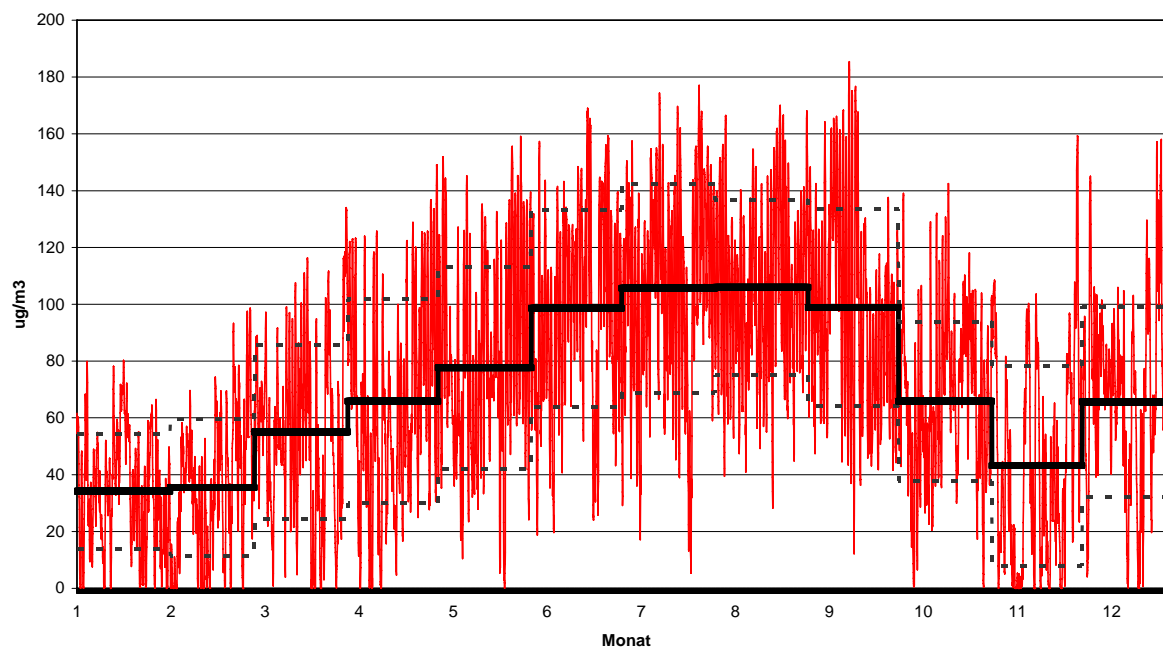
**Abbildung 3.8:** Europäischer Ausschnitt der hemisphärischen Simulationsrechnungen – Jahresmittelwerte 2001 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] – von links oben nach rechts unten: PM10, PM10 Jahresmaximum, Ammonium, Sulfat,

## Ozon Jahresgang 2001 Süddeutschland

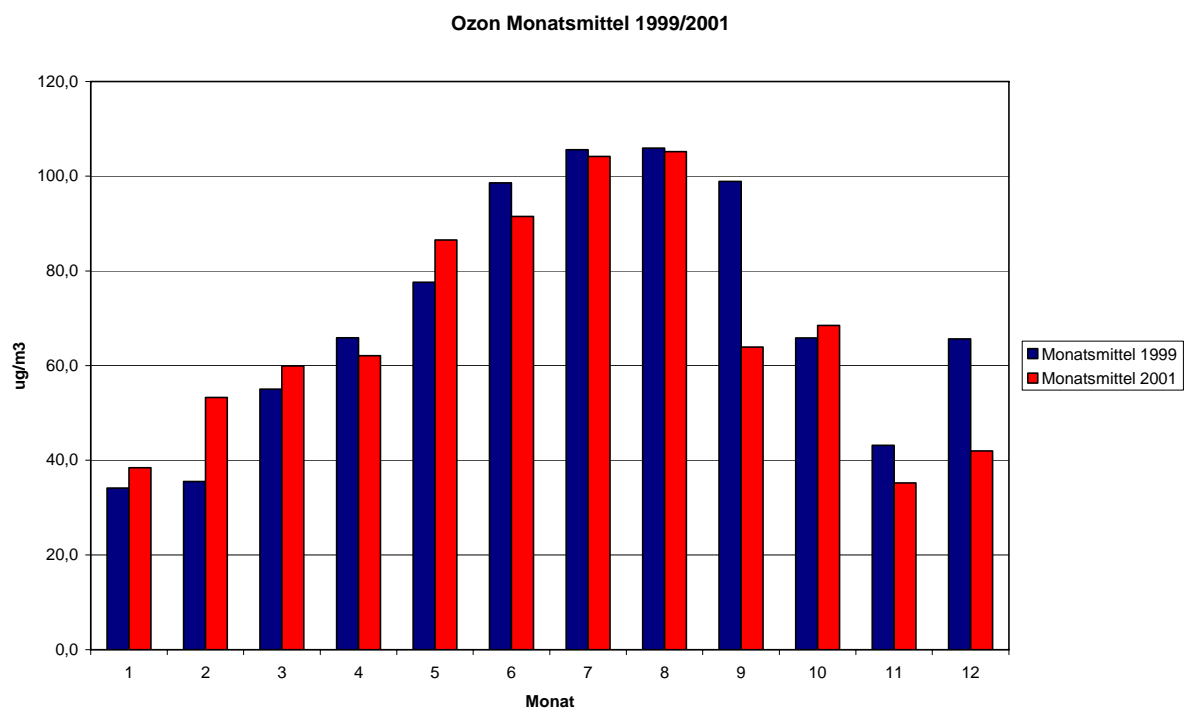


**Abbildung 3.9:** Jahresgang 2001 Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] für einen Gitterpunkt in Süddeutschland. Blau: Stundenwerte, schwarz Monatsmittel, gestrichelt: Mittelwert  $\pm$  eine Standardabweichung. Ab Mai steigt die Ozonbelastung deutlich an. In den Monaten Mai bis Oktober kommen Überschreitungen von  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## Ozon Jahresgang 1999 Süddeutschland



**Abbildung 3.10:** Jahresgang 1999 Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] für einen Gitterpunkt in Süddeutschland. Blau: Stundenwerte, schwarz Monatsmittel, gestrichelt: Mittelwert  $\pm$  eine Standardabweichung.

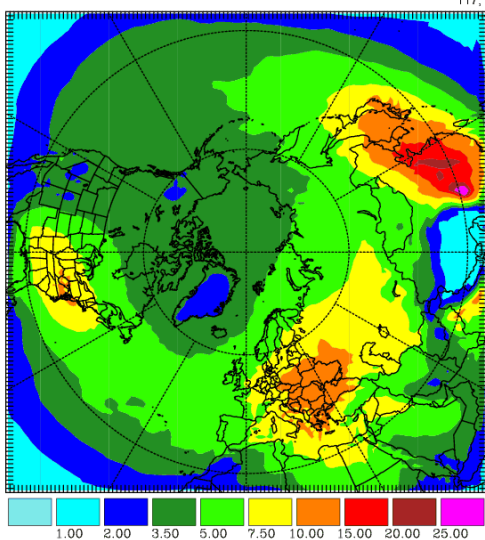


**Abbildung 3.11:** Monatsmittelwerte 1999 und 2001 Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] für einen Gitterpunkt in Süddeutschland.

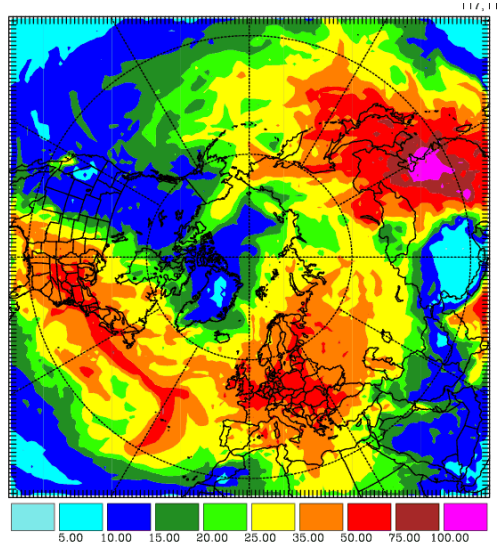
Die mittleren Konzentrationen liegen 1999 ab April über den entsprechenden Werten 2001 (Ausnahmen Mai und Oktober).



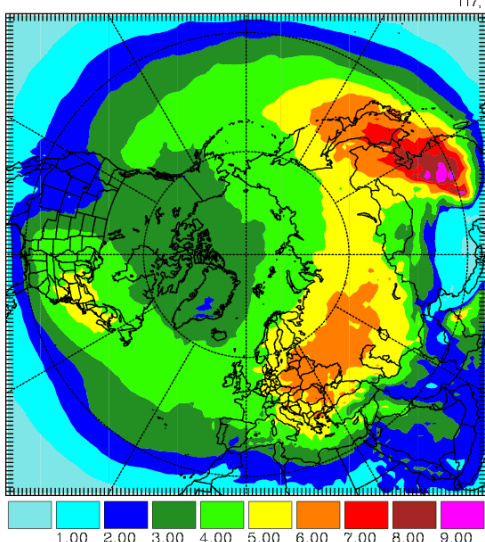
**PM<sub>10</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] Jahresmittel 2001 ca. 1500m**



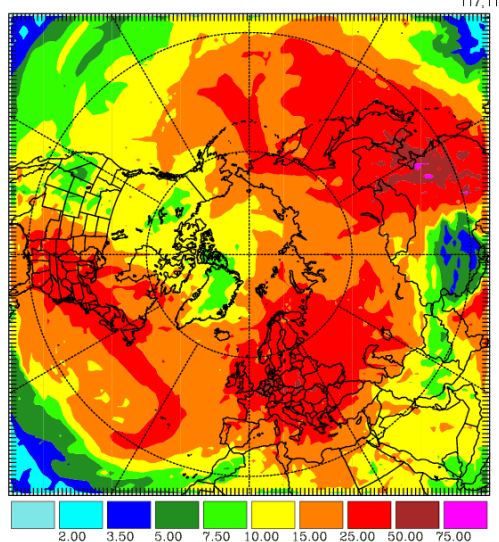
**Jahresmaximum 2001 ca. 1500m**



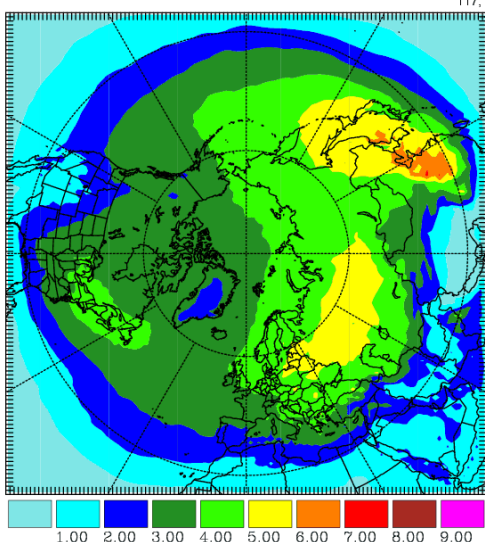
**PM<sub>10</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] Jahresmittel 2001 ca. 3000m**



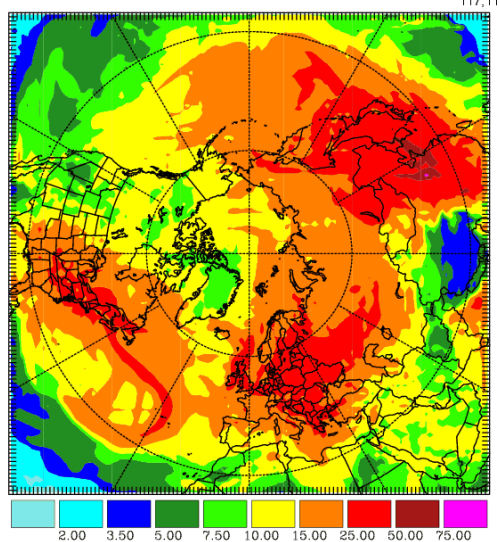
**Jahresmaximum 2001 ca. 3000m**



**PM<sub>10</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] Jahresmittel 2001 ca. 4000m**

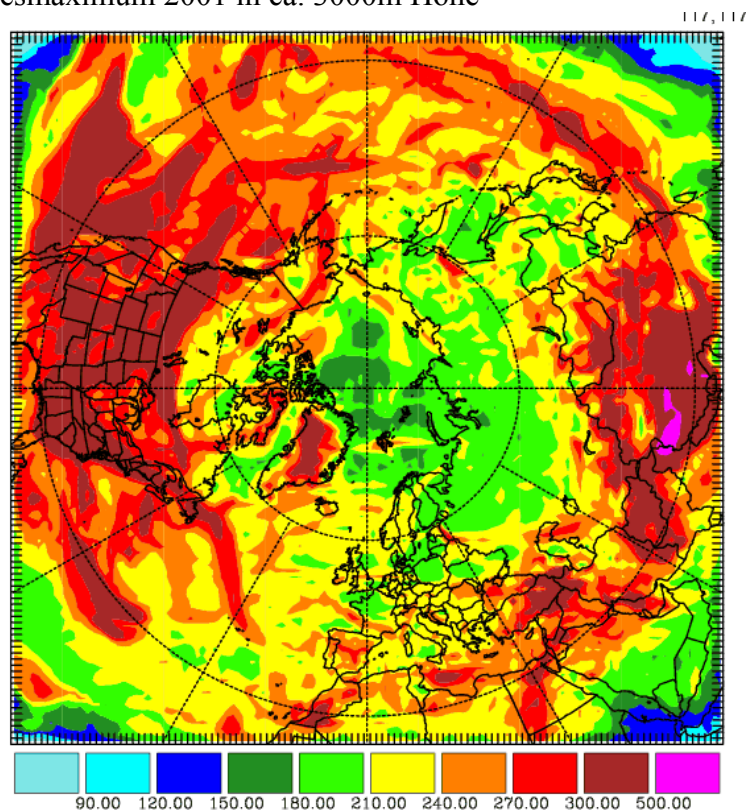


**Jahresmaximum 2001 ca. 4000m**

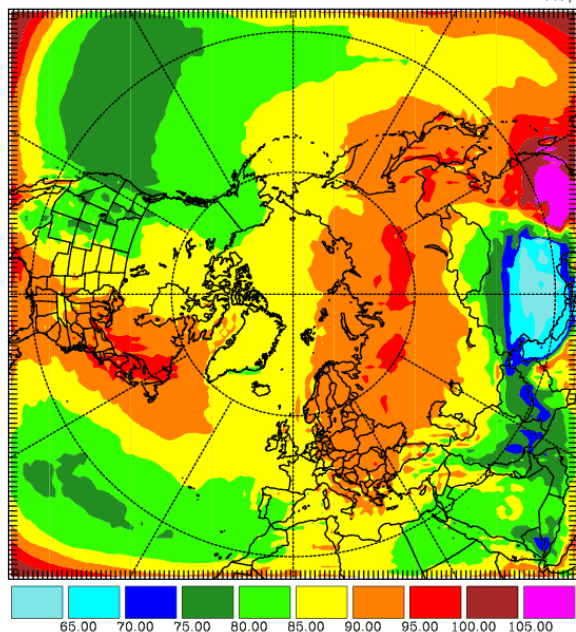


**Abbildung 3.12:** Jahresmittelwerte und Jahresmaximum 2001 PM<sub>10</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in verschiedenen Höhen.

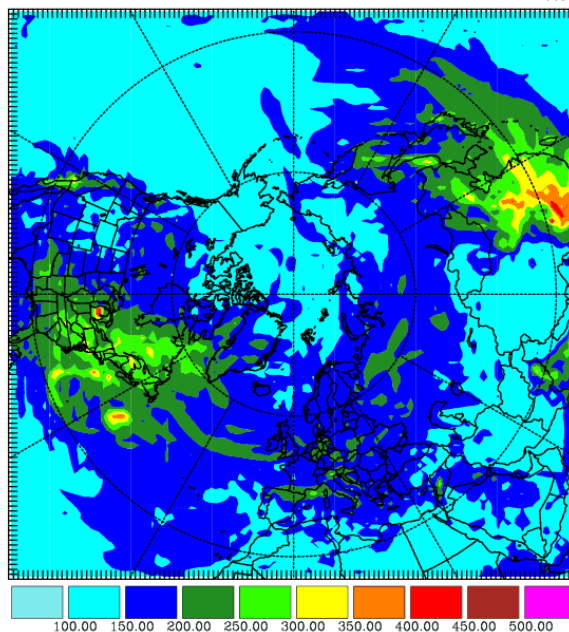
Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] Jahresmaximum 2001 in ca. 3000m Höhe



CO [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] Jahresmittel 2001 ca. 3000m



CO [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] Jahresmaximum ca. 3000m



**Abbildung 3.13:** Jahresmittelwerte und Jahresmaximum 2001 Ozon bzw. CO [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in ca. 3000m Höhe.

## 4 Trend 2001 – 2010

Zusätzlich zur Simulation des meteorologischen Jahres 2001 mit Basis-Emissionen wurde noch eine Sensitivitätsstudie mit den Emissionstrends bis 2010 durchgeführt – ebenfalls mit der Meteorologie des Jahres 2001 um den Effekt der Emissions-Änderungen zu isolieren.

Die Konzentrations-Änderungen primär emittierter Stoffe spiegeln weitgehend die Tendenzen in den Emissionsraten wieder (siehe Berichtsteil zu den Emissionen).

So hat die Belastung in den Hauptemissionsgebieten der Nordhemisphäre sehr unterschiedlich entwickelt. In Nordamerika nimmt die Belastung ab. In Europa ist dieser Effekt stärker aufgrund der höheren Reduktion. Umgekehrt ist der Effekt in Süd- und Ostasien wo generell ein starker Anstieg zu verzeichnen ist.

Die Maßnahmen wirken sich aber auch durch den Ferntransport auf weit entfernte Regionen aus:

- Das Einflussgebiet für Nordamerika ist im Wesentlichen der Atlantik.
- Für Europa insbesondere der östlichste Atlantik, der Mittelmeerraum, Teile Sibiriens und sowie die Nordsee und nördlich angrenzende Regionen.
- Asien beeinflusst Ostsibirien und weite Teile des Nordpazifiks bis zur amerikanischen Westküste

Bei Ozon gehen in Europa und Nordamerika die Spitzenkonzentrationen deutlich zurück. Hingegen steigen die Jahresmittelwerte tendenziell an. Da der Ozonabbau durch die Titration mit den Stickoxiden nachts und im Winter abnimmt.

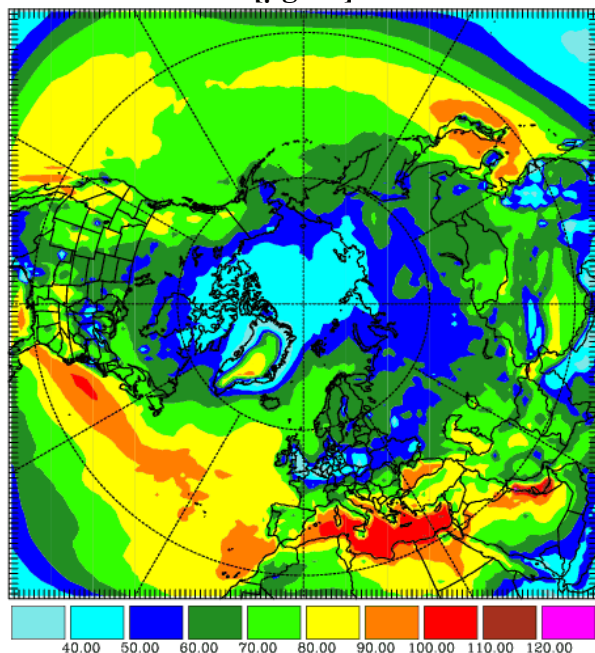
Tabelle 4 Änderungen 2001/2010 für verschiedene Spurenstoffe in der bodennahen Schicht.

	Mittelwert 2001	Zu-/Abnahme 2010	%
O <sub>3</sub>	70.0 µg/m <sup>3</sup>	+ 1.3 µg/m <sup>3</sup>	1.8 %
NO <sub>2</sub>	2.3 µg/m <sup>3</sup>	+/- 0 µg/m <sup>3</sup>	0.0 %
SO <sub>2</sub>	1,2 µg/m <sup>3</sup>	+ 0.1 µg/m <sup>3</sup>	7.8 %
CO	120 µg/m <sup>3</sup>	- 6,7 µg/m <sup>3</sup>	- 5.6 %
PM <sub>10</sub>	8.8 µg/m <sup>3</sup>	+ 0.18 µg/m <sup>3</sup>	2.0%
PM <sub>2.5</sub>	7.9 µg/m <sup>3</sup>	+ 0.12 µg/m <sup>3</sup>	1.5 %

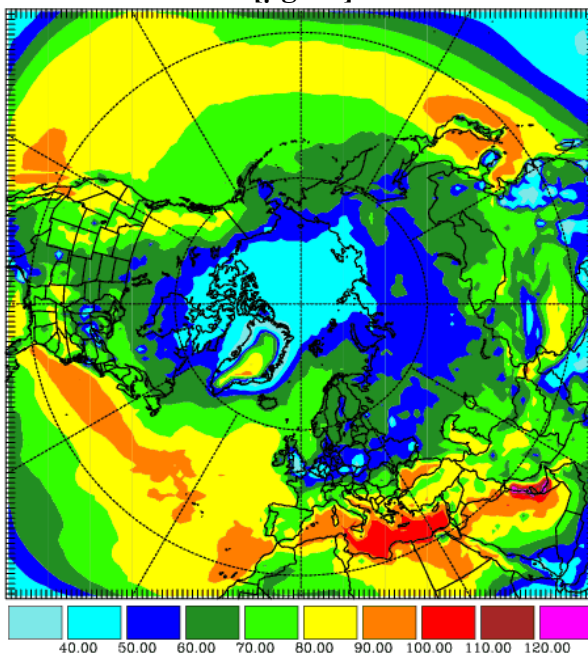


## Ozon

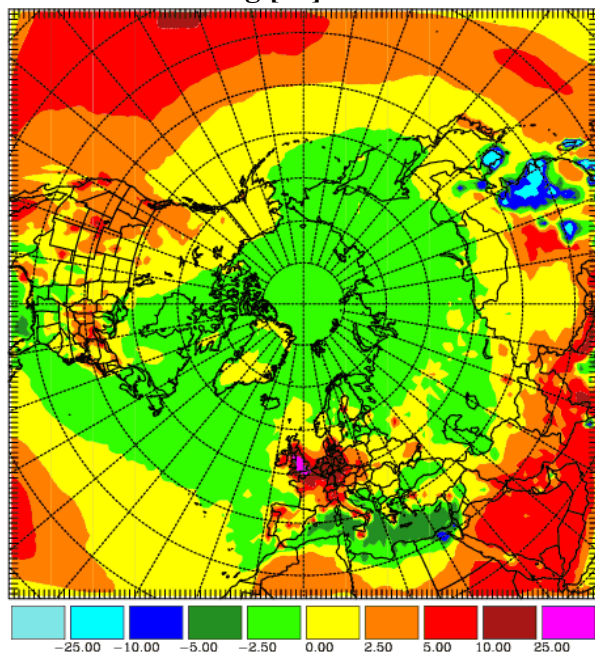
Jahresmittel 2001 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



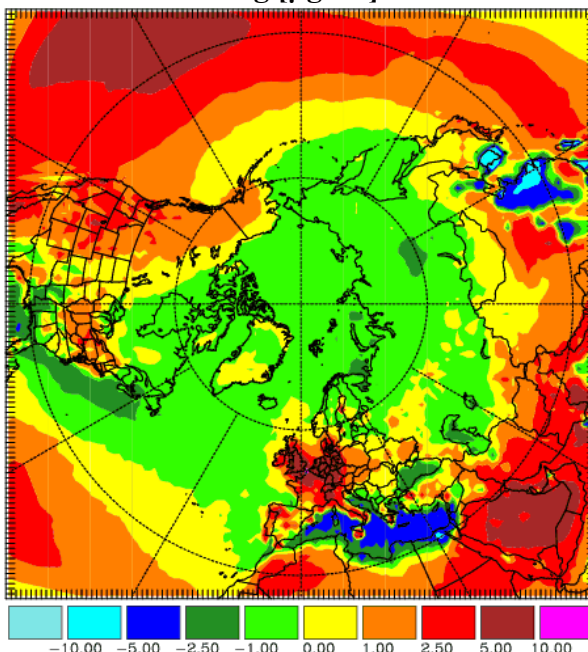
Jahresmittel 2010 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



Relative Änderung [%]



Absolute Änderung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

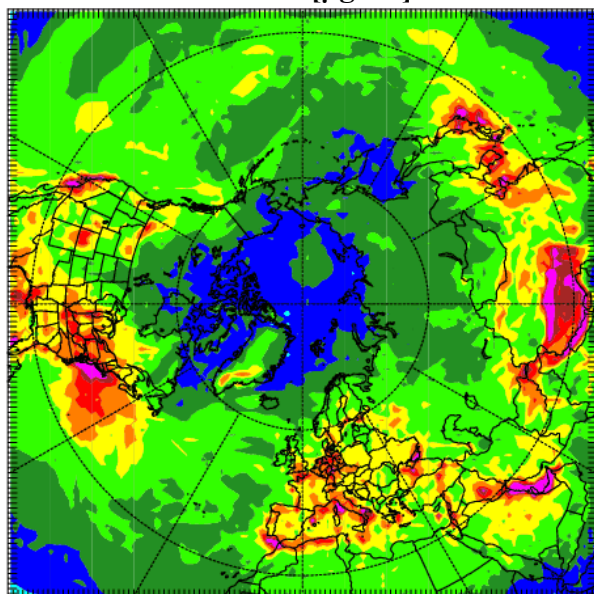


**Abbildung 4.1:** Trend 2001/2010 beim Ozon-Jahresmittelwert

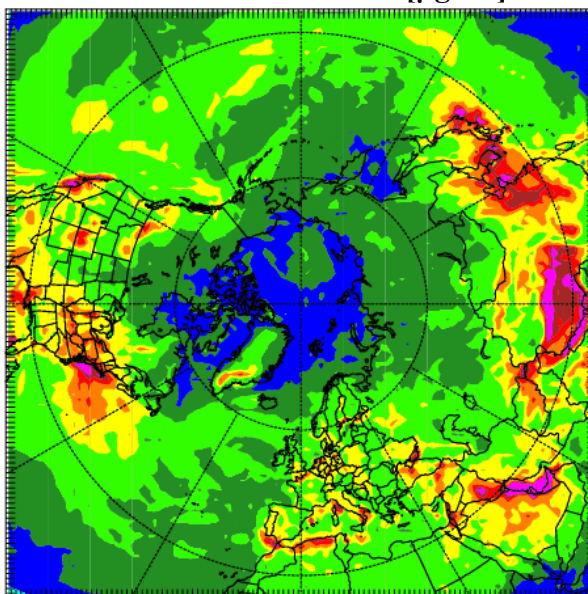
In den Subtropen überwiegt eine Zunahme von Ozon, nördlich davon eine leichte Abnahme. In den amerikanischen und europäischen Ballungsgebieten nimmt durch die Abnahme der Emissionen von Vorläufersubstanzen eine Erhöhung der Jahresmittelwerte (Abnahme der Titration) In Ostasien passiert genau das Gegenteil der Mittelwert sinkt. Positiv wirkt sich die Emissionsminderung insbesondere im stark Belasteten Mittelmeerraum aus.

## Ozon

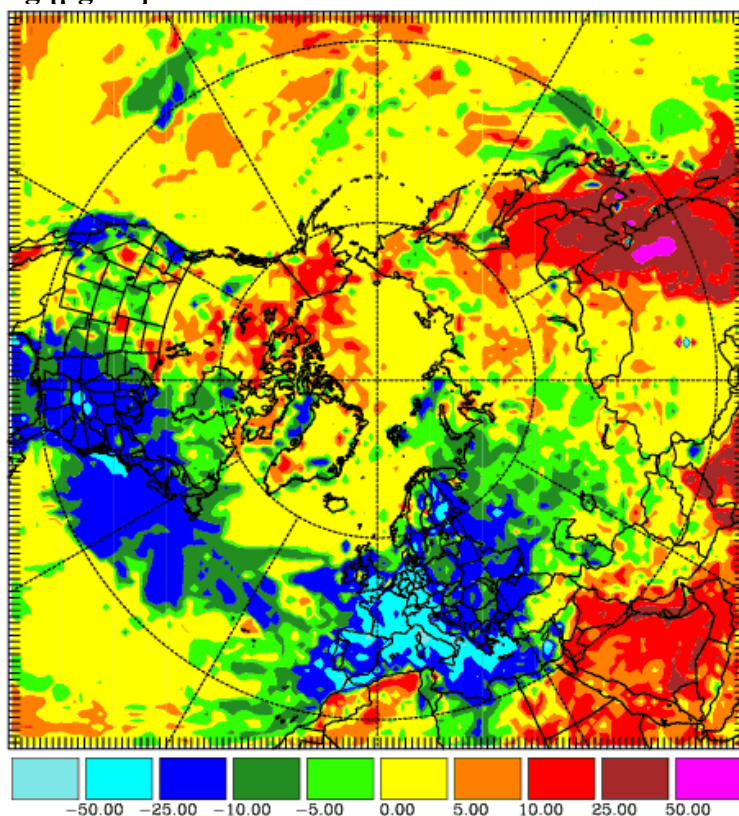
Jahresmaximum 2001 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



Jahresmaximum 2010 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



Absolute Änderung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



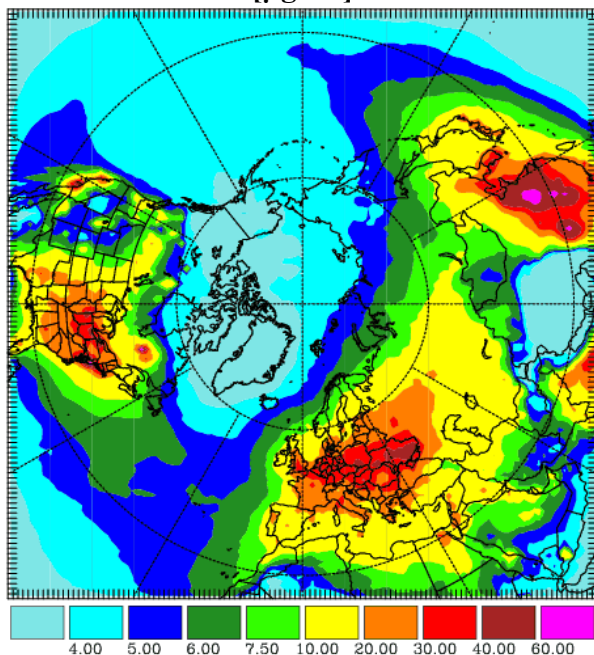
**Abbildung 4.2:** Trend 2001/2010 beim Ozon-Jahresmaximum

Über den stark belasteten Regionen Nordamerikas und Europas nehmen die Ozon-Spitzenkonzentrationen deutlich ab, über Ostasien hingegen stark zu. In den subtropischen Bereichen kommt es ebenfalls zu einer Zunahme, ebenso in polaren Breiten. Über dem Atlantik und im Mittelmeerraum machen sich die amerikanischen und europäischen Minderungsmaßnahmen positiv bemerkbar.

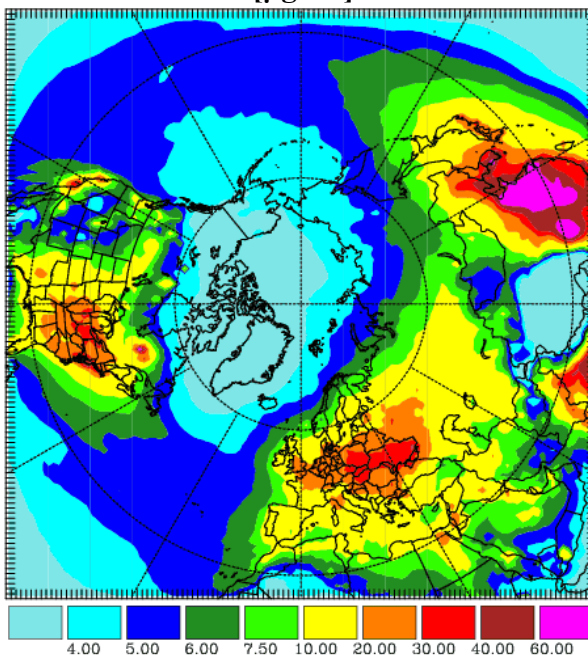


## PM10

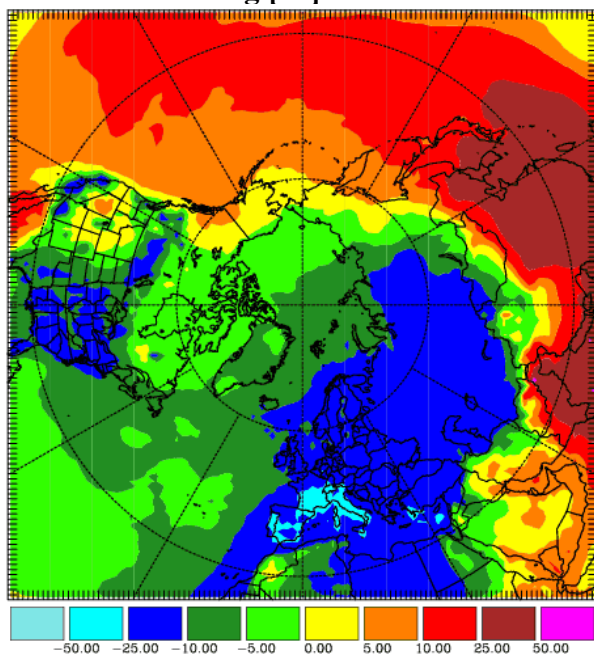
Jahresmittel 2001 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



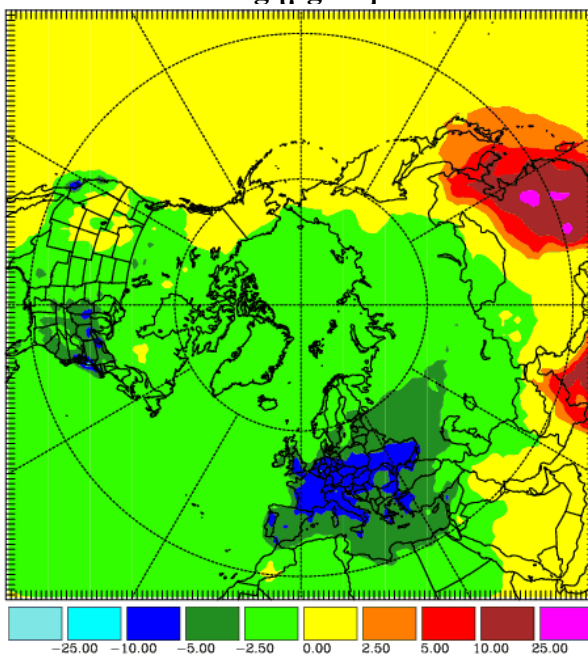
Jahresmittel 2010 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



Relative Änderung [%]

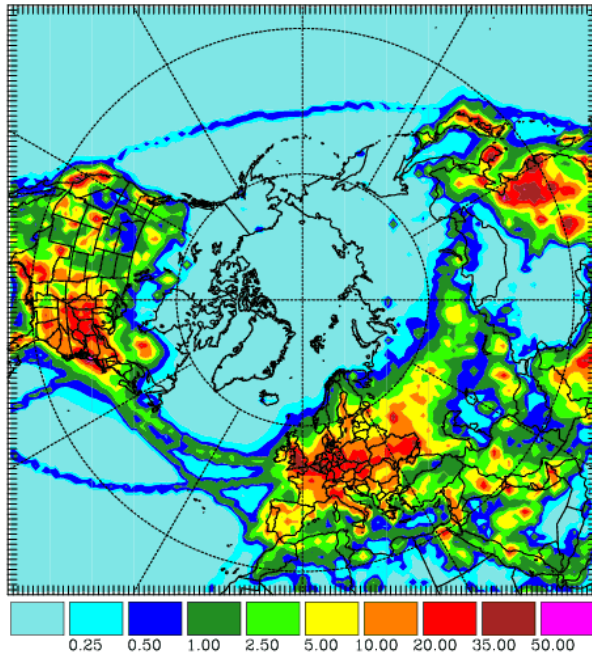
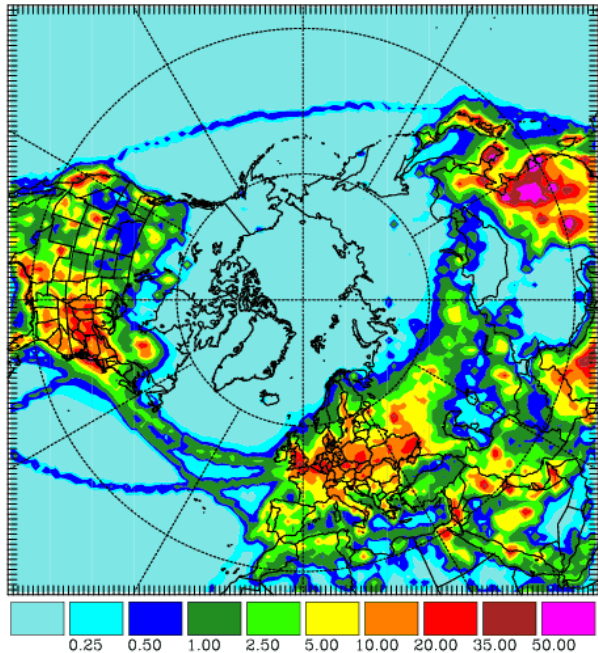


Absolute Änderung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

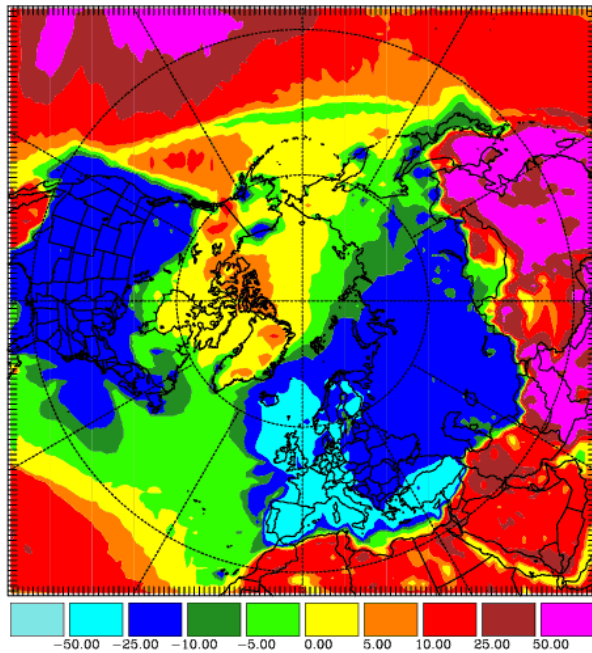
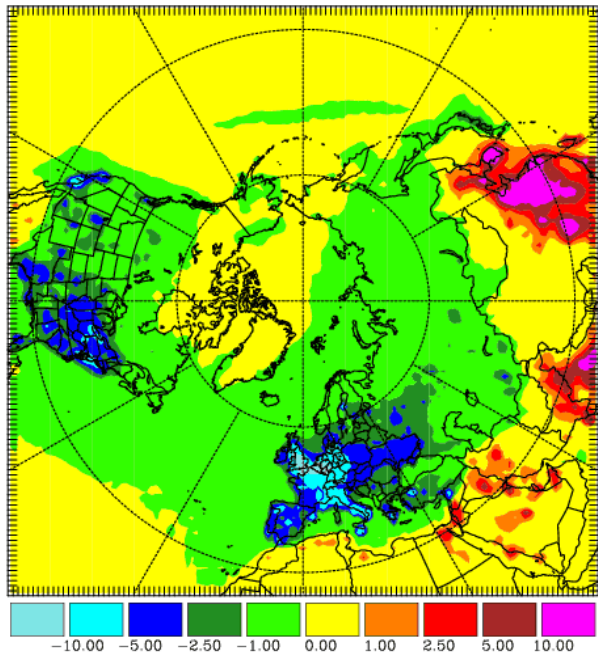


**Abbildung 4.3:** Trend 2001/2010 beim PM<sub>10</sub>-Jahresmittelwert

Auch bei der Partikelbelastung findet die stärkste Abnahme über Nordamerika (- 25%) und besonders Europa (- 50%) statt. Die Reduktion wirkt sich auch positiv über dem Atlantik, dem Nordmeer und Teilen Sibiriens aus. Hingegen nimmt die Mittlere Partikeldichte über Asien um 25-50% zu. Dies wirkt sich auch auf den Pazifik aus.

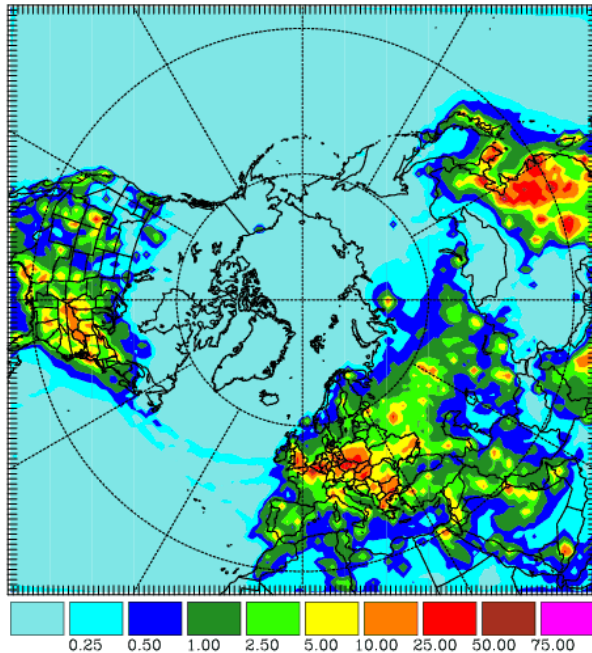
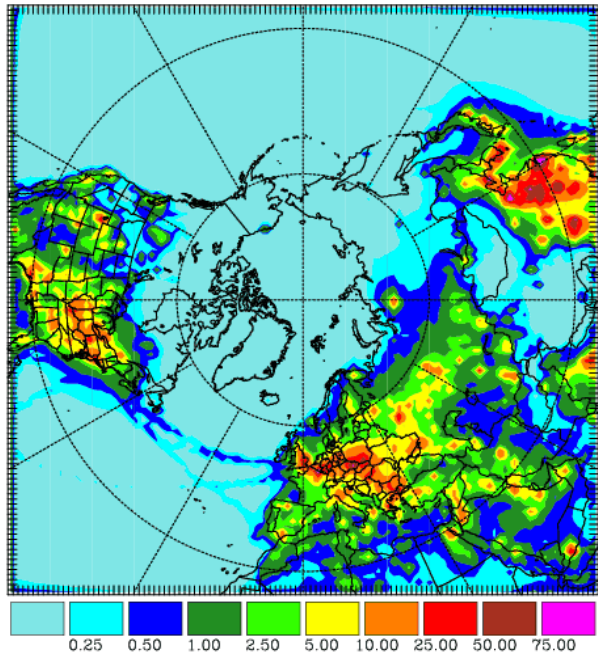
NO<sub>2</sub>Jahresmittel 2001 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]Jahresmittel 2010 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

Relative Änderung [%]

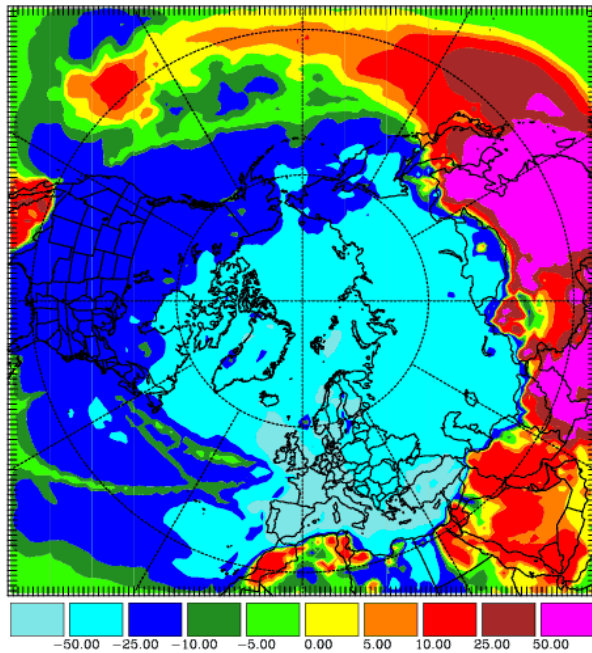
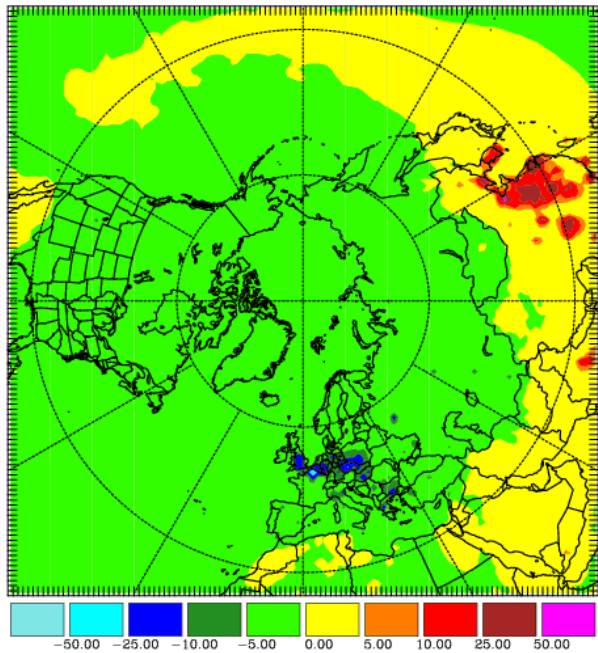
Absolute Änderung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]**Abbildung 4.4:** Trend 2001/2010 beim NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert

Wie bei den anderen primär emittierten Spurenstoffen finden sich eine Reduktion über Nordamerika (- 25%) und besonders Europa (- 50%) statt. Die Abnahme sich auch auf die Einflussgebiete über dem Atlantik, dem Nordmeer und Teilen Sibiriens aus. Hingegen nimmt die Stickoxidbelastung über Asien teilweise über 50% zu. Die Erhöhung über den Subtropen und Tropen erfolgt von einer sehr niedrigen Basis.



SO<sub>2</sub>Jahresmittel 2001 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]Jahresmittel 2010 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

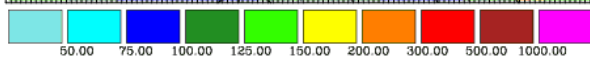
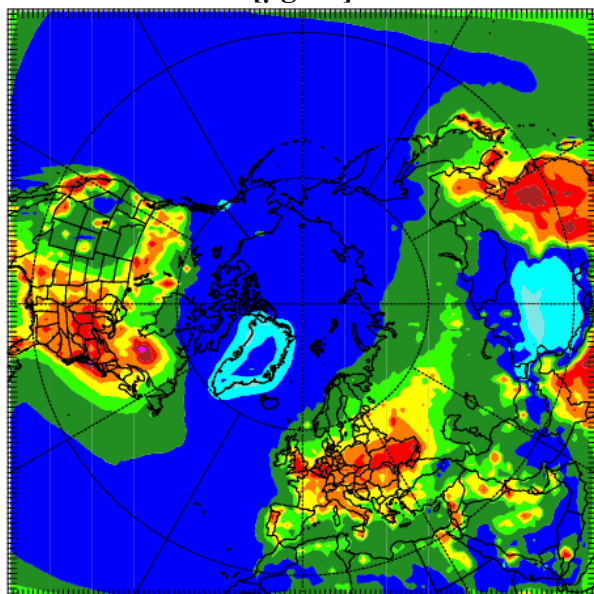
Relative Änderung [%]

Absolute Änderung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]**Abbildung 4.5:** Trend 2001/2010 beim SO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert

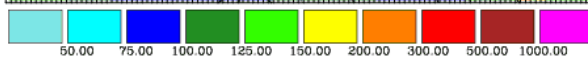
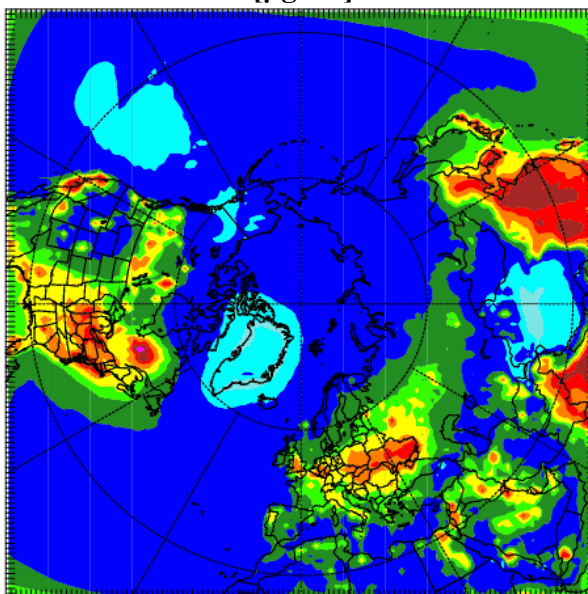
Die Schwefeldioxidbelastung nimmt in weiten Teilen der Nordhemisphäre ab, wiederum am stärksten in Europa (>50%). Ein Anstieg findet von Arabien über den Pazifik statt - Am deutlichsten wiederum in China (um 25-50%).

# CO

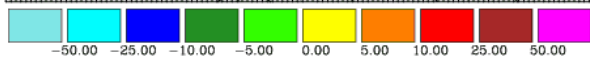
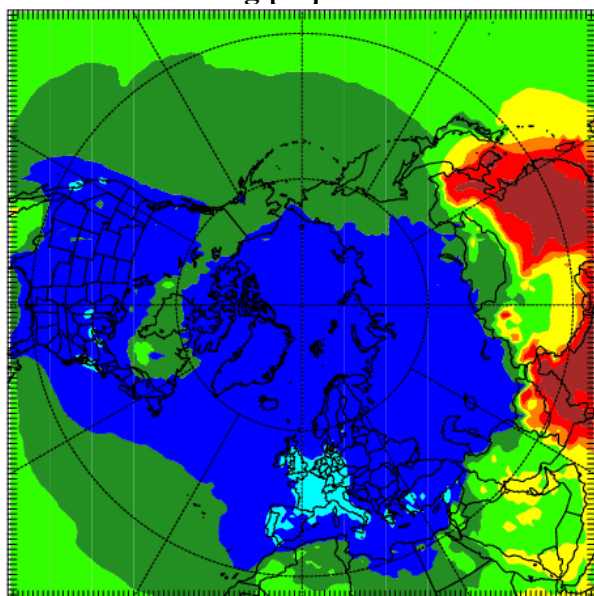
Jahresmittel 2001 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



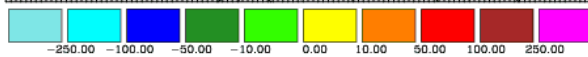
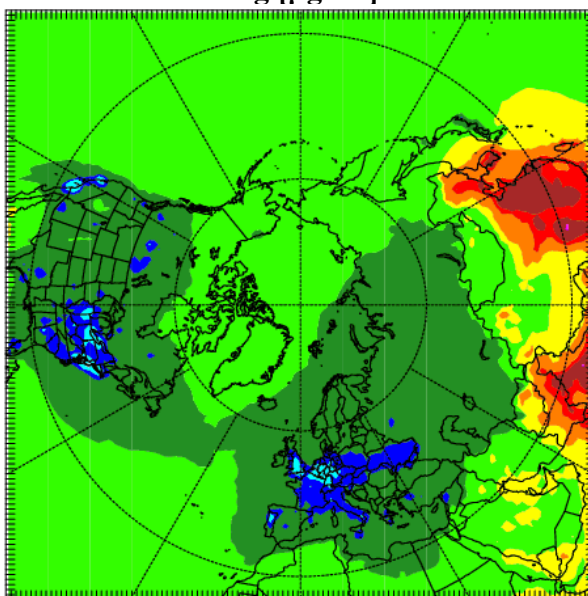
Jahresmittel 2010 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



Relative Änderung [%]



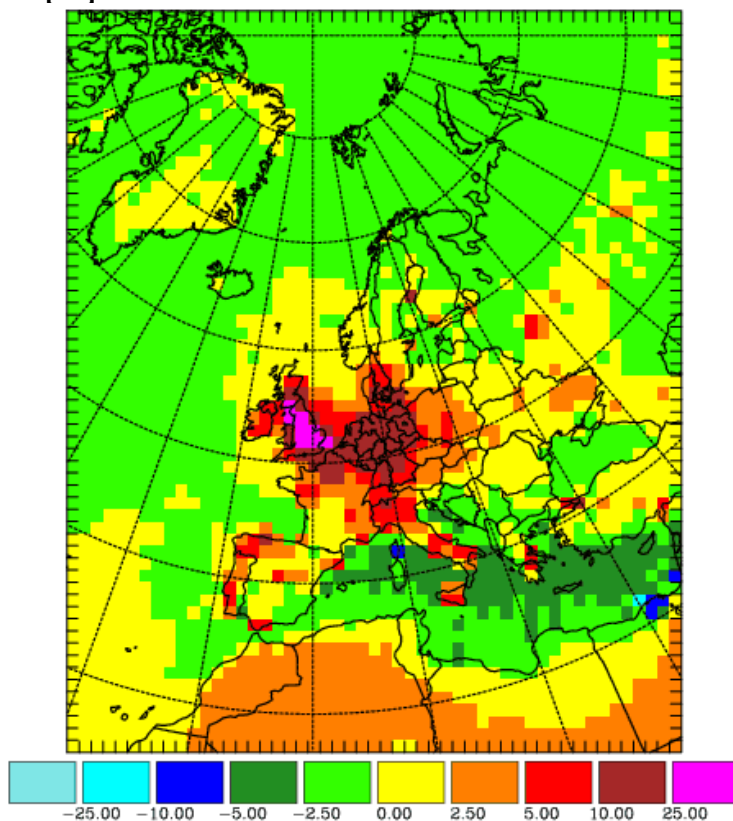
Absolute Änderung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



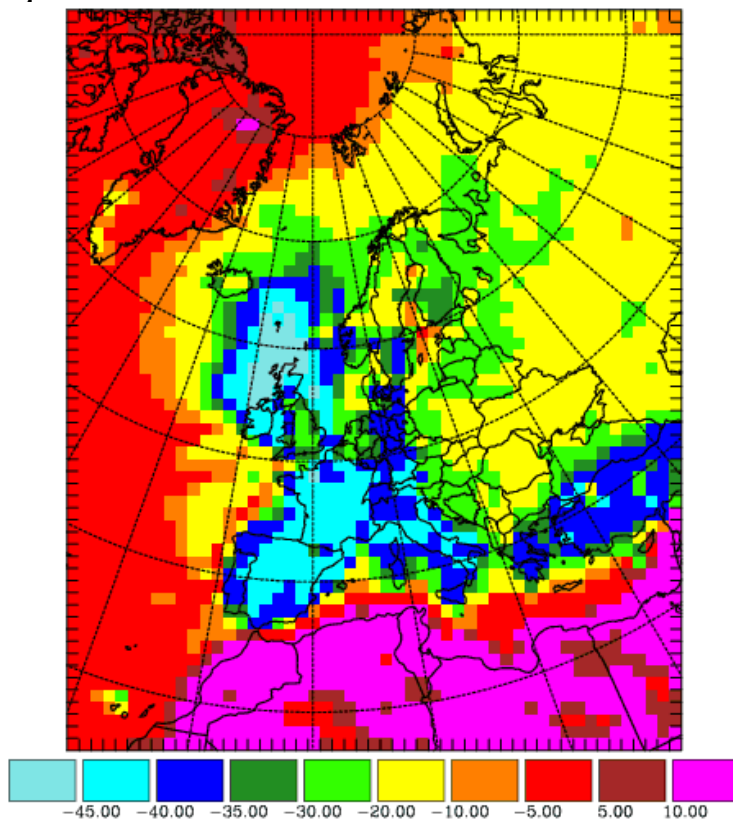
**Abbildung 4.6:** Trend 2001/2010 beim CO-Jahresmittelwert

Die Kohlenmonoxidbelastung nimmt in weiten Teilen der Nordhemisphäre ab, wiederum am stärksten in Europa (bis 50%). Ein Anstieg findet von Indien bis China statt (um 25-50%).

### Ozon 2010/2001 [%]



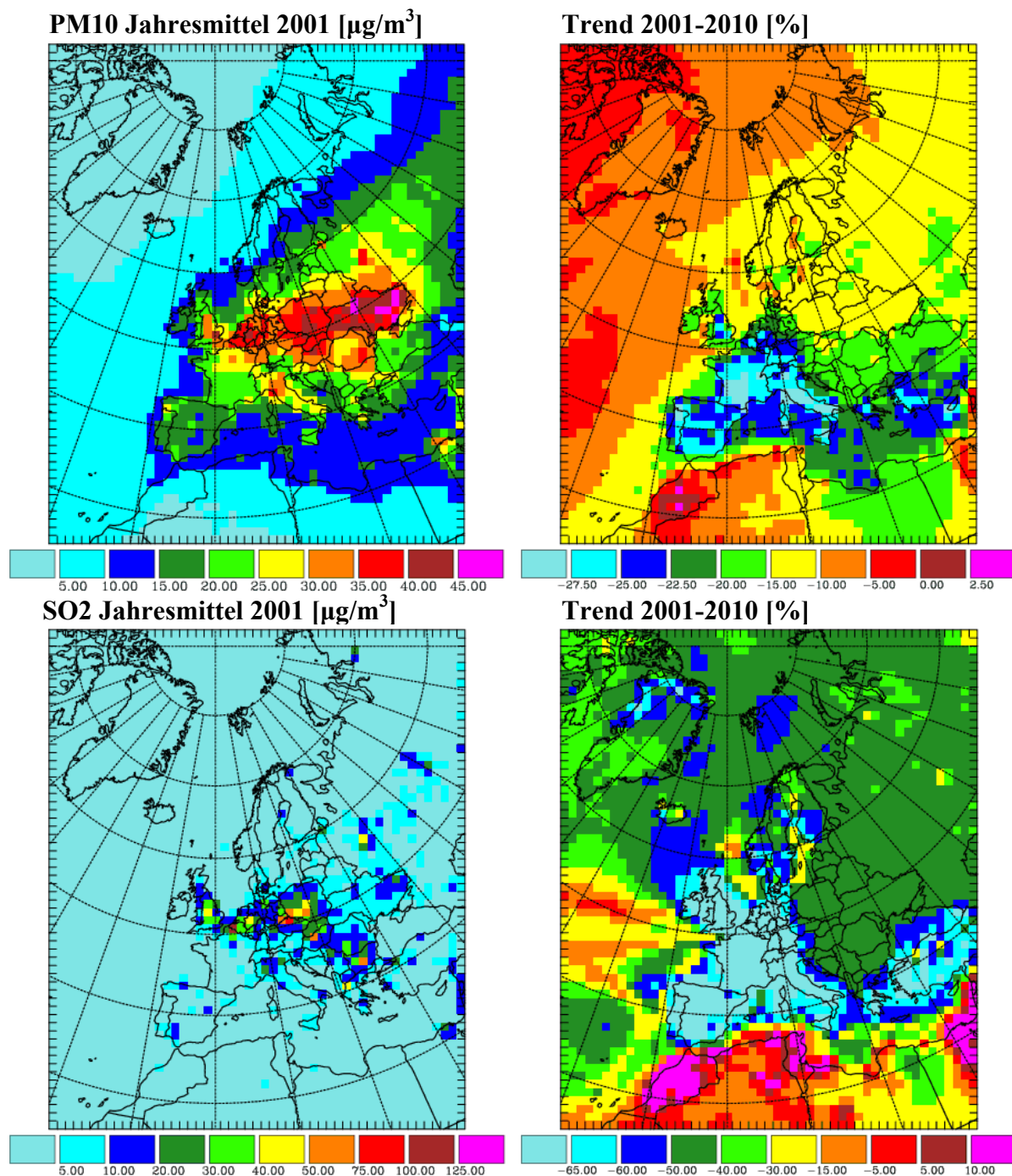
### NO<sub>2</sub> 2010/2001 [%]



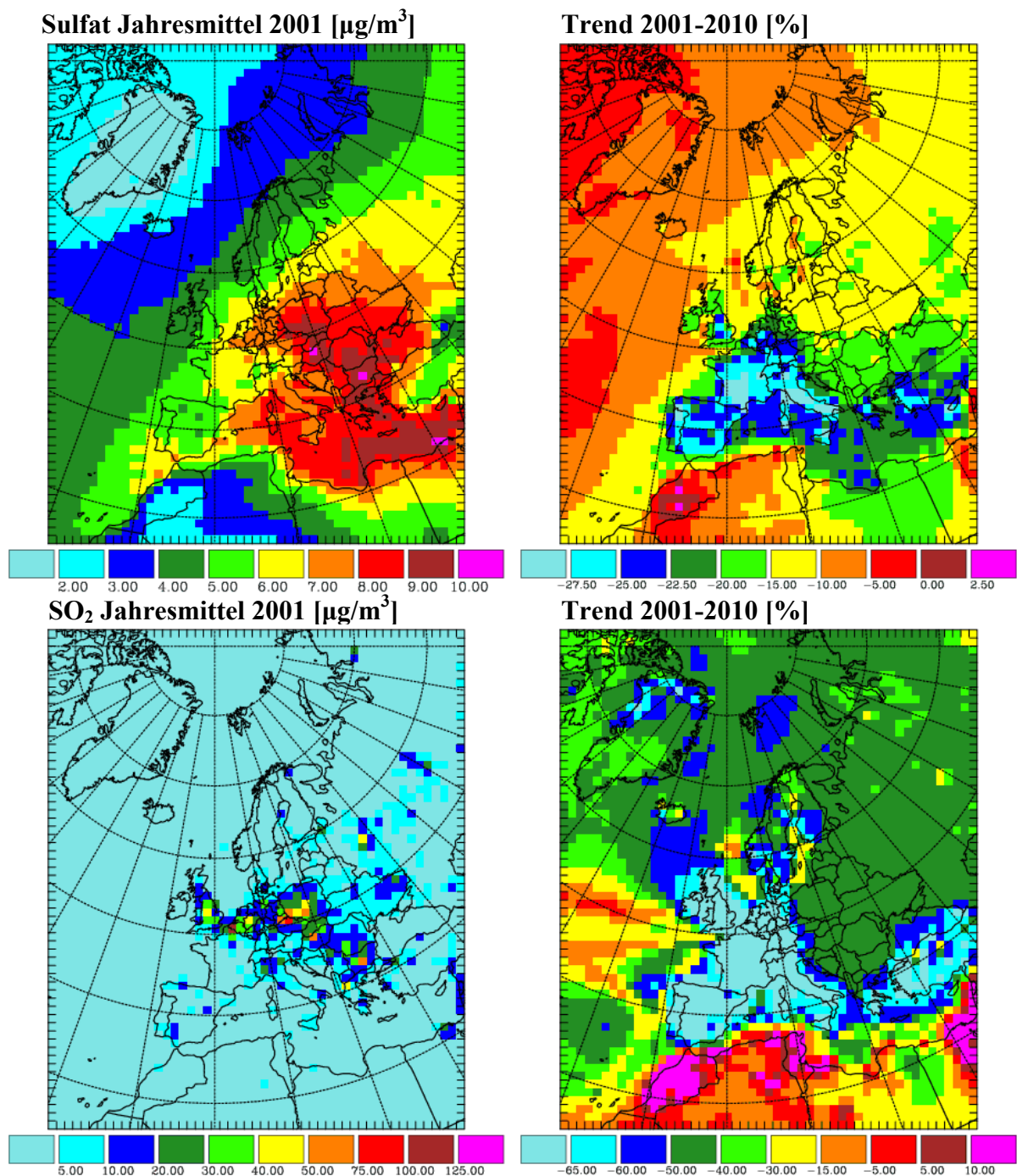
**Abbildung 4.7:** Trend 2001/2010 [%] europäischer Ausschnitt der hemisphärischen Simulationsrechnungen.



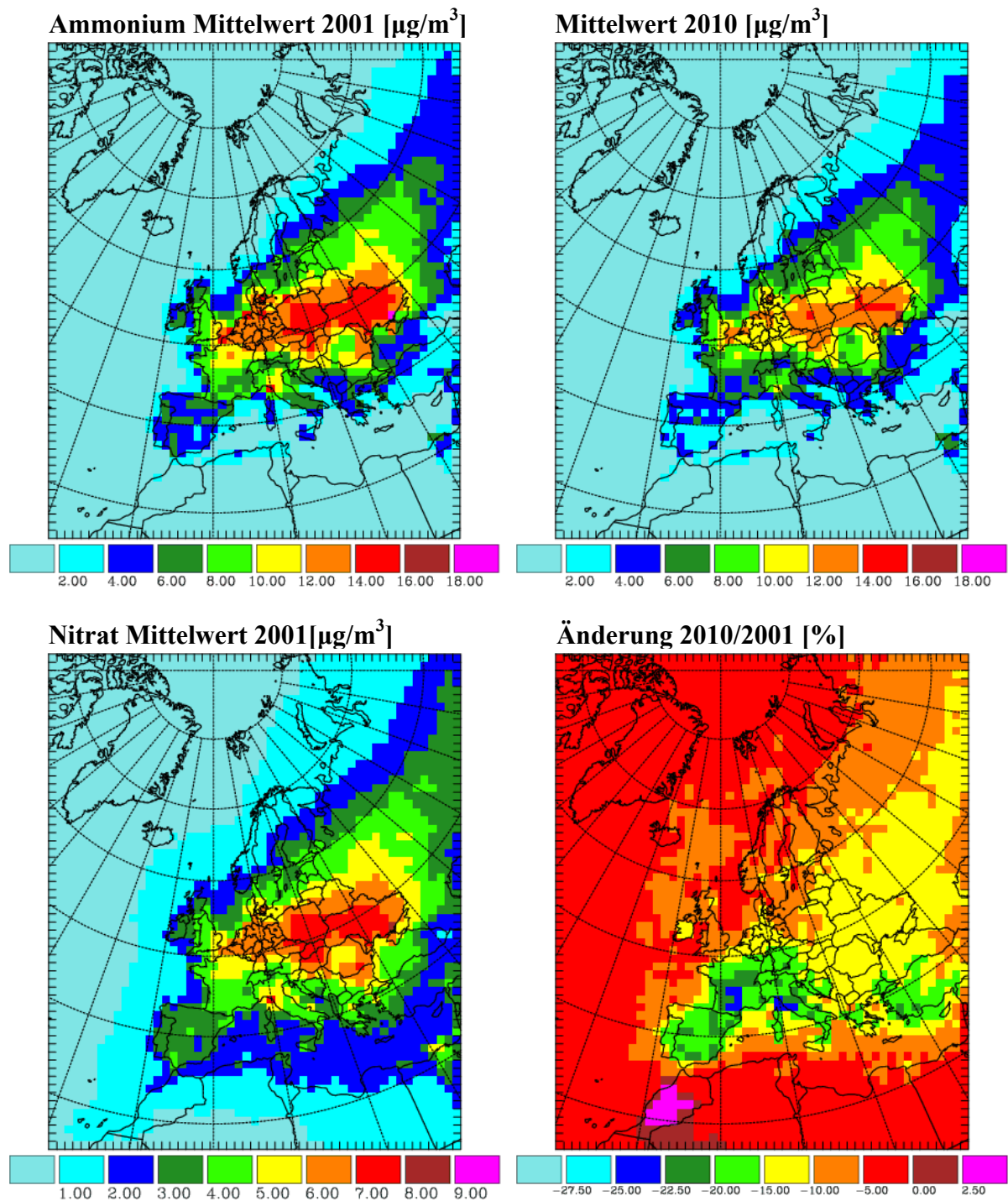
## Aerosole – Vorläufer und Komponenten



**Abbildung 4.8:** Trend 2001/2010 [%] europäischer Ausschnitt der hemisphärischen Simulationsrechnungen



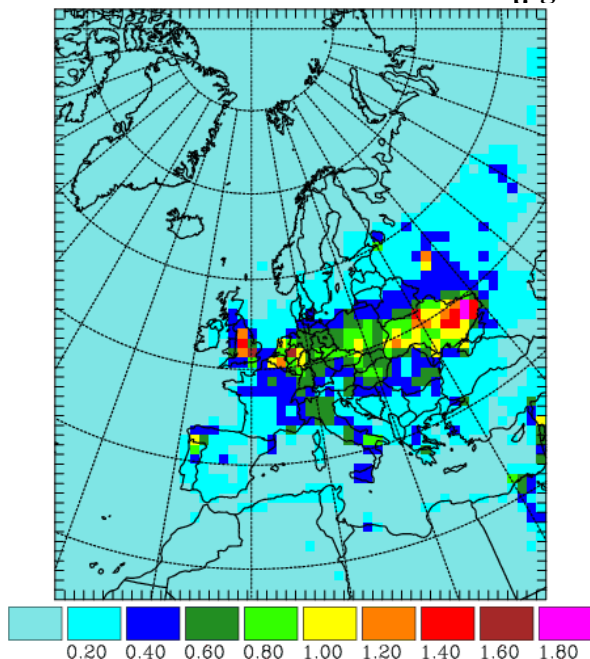
**Abbildung 4.9:** Jahresmittel 2001 und Trend 2001/2010 [%] europäischer Ausschnitt der hemisphärischen Simulationsrechnungen



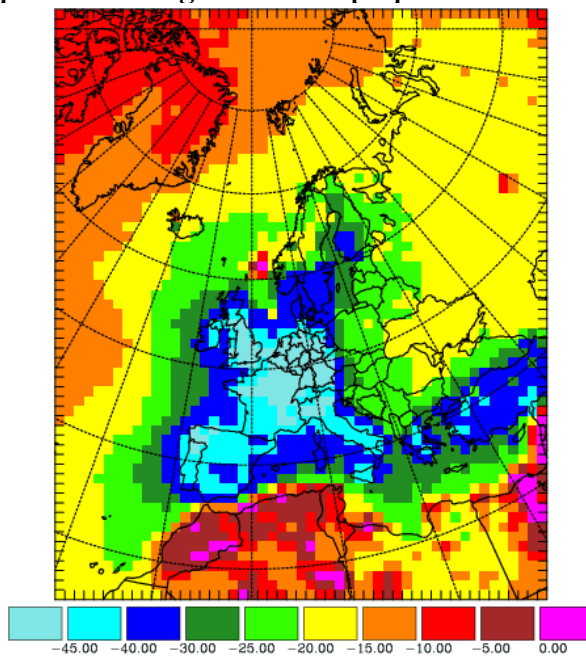
**Abbildung 4.10:** Jahresmittel 2001 und Trend 2001/2010 [%] europäischer Ausschnitt der hemisphärischen Simulationsrechnungen



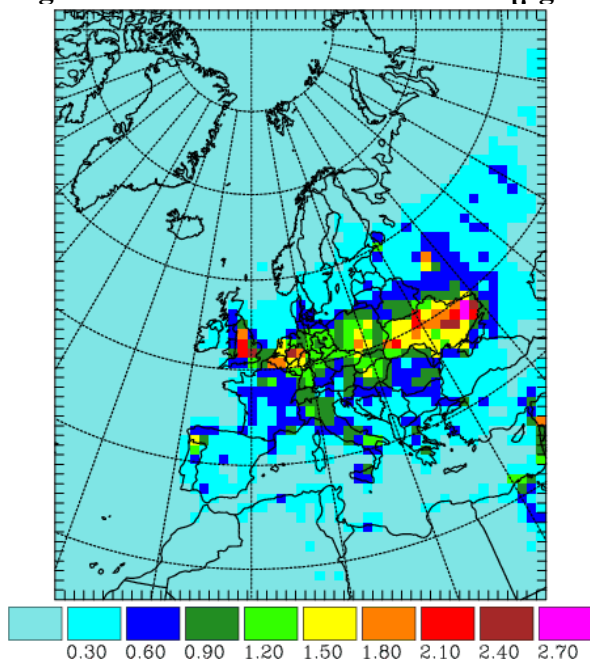
**Elementarer Kohlenstoff Mittel 2001 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]**



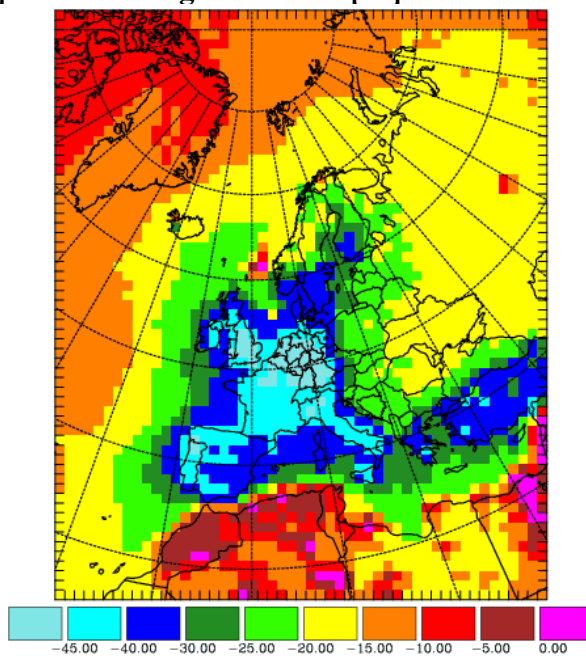
**Änderung 2010-2001 [%]**



**Organischer Kohlenstoff Mittel 2001 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]**

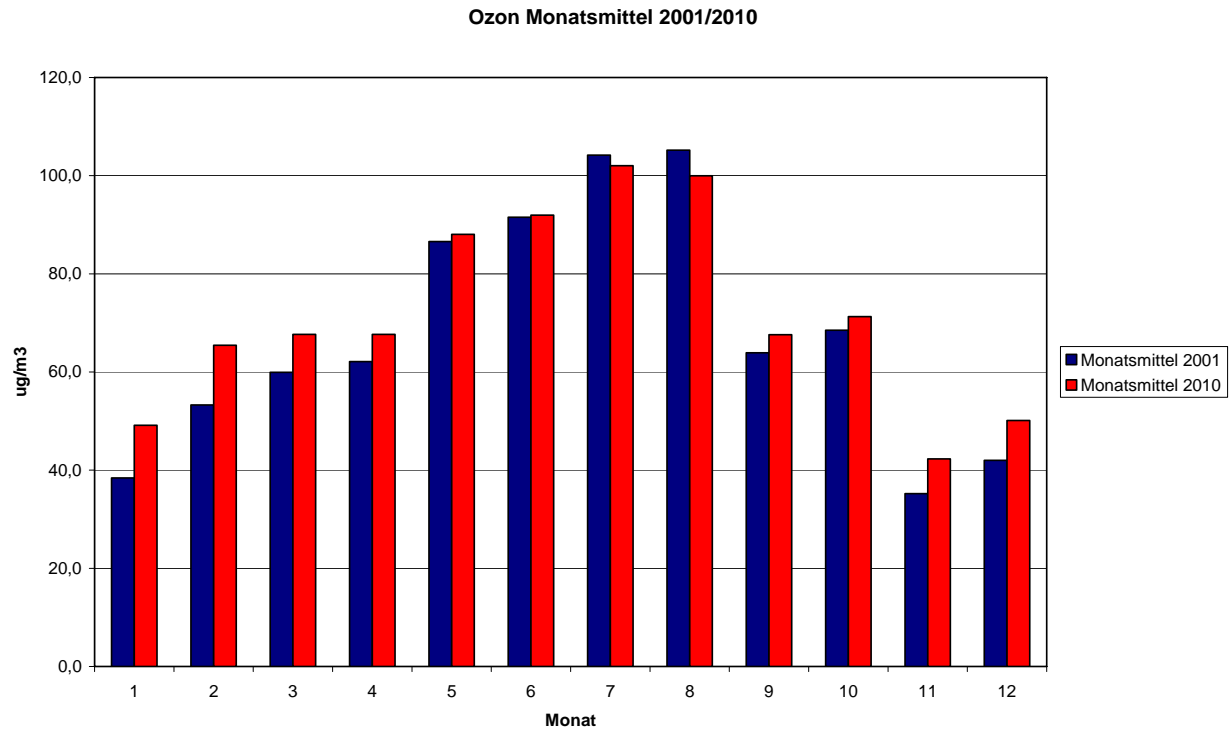


**Änderung 2010-2001 [%]**



**Abbildung 4.11:** Jahresmittel 2001 und Trend 2001/2010 [%] europäischer Ausschnitt der hemisphärischen Simulationsrechnungen





**Abbildung 4.12:** Monatsmittel Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] 2001 (blau) und 2010 (rot) für einen Gitterpunkt in Süddeutschland.

Im Winter nehmen die Mittleren Konzentrationen von Ozon durch den geringeren Abbau über  $\text{NO}_x$  2010 zu. Die Spitzenkonzentrationen im Sommer nehmen hingegen ab.

## 5 Zusammenfassung und Bewertung

Im Rahmen des Projektes konnte das EURAD-Modellsystem dahingehend weiterentwickelt werden; dass längerfristige Simualtionsrechnungen und Sensitivitätsexperimente auf einem Modellgebiet durchgeführt werden können, welche den wesentlichen Teil der Nordhemisphäre umfasst. Dies erfolgt mit einer horizontalen und vertikalen Auflösung die höher liegt als bei vergleichbaren Studien in der Vergangenheit.

Vergleiche mit Lidar-Daten aus Garmisch-Partenkirchen (in Kooperation mit dem AFO2000-Projekt ATMOFAST), sowie Satelliten und Flugzeugmessdaten (in Kooperation mit dem AFO2000-Projekt TRACHT) zeigen, dass davon auszugehen ist, dass das Modell in der vorliegenden Konfiguration in der Lage ist, die wesentlichen dynamischen und chemischen Prozesse beim atmosphärischen Ferntransport adäquat zu beschreiben. Dies gilt für das Auftreten und die räumliche Erstreckung von Plumes, sowie deren zeitliche Entwicklung. Es wird sowohl der Transport von Schadstoffen aus Quellen in der Grenzschicht, als auch von stratosphärischen Intrusionen erfasst.

Die wesentliche Unsicherheit bezüglich der Ergebnisse wird durch die unzureichende Kenntnis der Emissionsdaten verursacht. Hier ist ein großer Bedarf an aktuellen, harmonisierten Katastern. Das zum Zeitpunkt der Modellrechnungen verfügbare Basisjahr 1995 führt dazu, dass die Emissionen vieler Spurenstoffe in den Jahren 1999 und 2001 in Europa zu hoch liegen, aufgrund der dort abnehmenden Emissionstrends. Da diese Trends in anderen Regionen der Welt anders aussehen, spiegelt sich das auch in den Konzentrationen wieder. Die Fehler aufgrund des ungünstigen Emissionsbasisjahres sollten für die USA geringer ausfallen und für Ostasien eher zu einer Unterschätzung der Belastung führen (vergleiche auch „Trend 2010“).

Interkontinentaler Ferntransport ist ein episodisches Phänomen. Es erfordert spezielle meteorologische Bedingungen, damit Luftmassen nach einem Transport über mehrere tausend Kilometer noch eine chemische Signatur besitzen die auf die Quellregion schließen lässt.

Allerdings zeigen diese Untersuchungen so wie viele andere Studien, dass Ferntransportereignisse häufiger auftreten als erwartet. Die Simulationsrechnungen zeigen fast täglich weit reichende Plumes aus den vershienen Quellregionen.

Die Zusammensetzung solcher Luftmassen variiert stark nach Jahreszeit, Quellregion, Transportweg und Transportzeit.

Vielfach spielt Hebung von Luftmassen eine große Rolle, dabei werden vor allem wasserlösliche Substanzen (Aerosole, Schwefeldioxid...) teilweise ausgewaschen (Gegenbeispiel: Waldbrandemissionen, siehe Wotawa and Trainer, 2000).

Im Laufe des Transports werden Vorläufersubstanzen wie Stickoxide und Kohlenwasserstoffe abgebaut. Sie sind daher nur bei extrem schnellen Transport noch in der Rezeptor-Region signifikant nachweisbar (Beispiel: Stohl et al., 2003a – NO<sub>x</sub>-Transport).

Die besten Erfolge bei der Identifikation von interkontinentalem Transport hat man bei langlebigen Substanzen wie Ozon oder auch CO. Der Einfluss ist vor allem in der freien Troposphäre nachweisbar.

Der Nachweis von Interkontinental-Transport aus Messungen oder direkten Modell-Rechnungen ist bei vielen Ereignissen – aber auch wenn man integrale Aussagen treffen will - schwierig, da:

- sich die Konzentration der Spurenstoffe in Interkontinentalplumes nicht deutlich genug von der Zusammensetzung der umgebenden Luftmassen unterscheiden – zum Beispiel weil schon eine Vermischung statt fand oder weil es sich um einen gealterten

Plume handelt in dem die meisten Substanzen schon abgebaut wurden, so dass keine signifikante Änderung der chemischen Signatur feststellbar ist, die die Herkunft verrät.

- sich die Herkunft nicht eindeutig zuordnen lässt. Stratosphärische Intrusionen und interkontinentale Grenzschicht-Plumes sind häufig räumlich eng und zeitlich verzahnt, wie beispielsweise bei Stohl und Trickl (1999) aber auch vielen anderen Untersuchungen gezeigt werden konnte.

Die Quantifizierung des Einflusses von Ferntransport auf die Grenzschicht ist daher – von speziellen Ereignissen einmal abgesehen – in der direkten Simulation – aber auch bei Beobachtungsdaten nicht möglich.

Indirekte Auswirkungen der in der freien Troposphäre nachweisbaren Ereignisse sind beispielsweise:

- Die Meere der Nordhemisphäre sind in weiten Bereichen keine Regionen mehr mit unbelasteter Atmosphäre. Beispiel Ostatlantik: Dort befindet sich zum Einen ein Ausströmgebiet Nordamerikanischer Plumes, zum Anderen erreichen uns häufig Luftmassen aus dieser Region (Stichwort: „Keil des Azorenhochs“).
- Plumes in der freien Troposphäre erreichen Europa häufig in stabilen Hochdrucklagen (z.B.: Stohl and Trickl, 1999). Die absinkenden Luftmassen führen sowohl stratosphärisches Ozon als auch belastete nordamerikanische Grenzschichtluft aus der oberen in die untere Troposphäre, wo sie sich mit der europäischen Hintergrundbelastung verbinden. Tracer-Experimente in ATMOFAST (Feldmann et al., 2005) haben gezeigt, dass 14 Tage nach dem Export einer Luftmasse bis etwa 10 ppb Ozon aus der amerikanischen Grenzschicht verteilt über ganz Europa zum Hintergrund beitragen kann. Diese stehen dann zum Einmischen in die Grenzschicht zur Verfügung und erhöhen die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung von Schwellwerten.

Die Zuordnungs- und Nachweis-Problematik konnte mit einer Sensitivitätsstudie umgangen werden. Für das Sommerhalbjahr 2001 wurden in einem Zusatzexperiment die Nordamerikanischen Emissionen „abgeschaltet“ – bei gleichen Bedingungen im Rest des Modellgebietes. Aus der Differenz der Konzentrationen lässt sich nun der Einfluss Nordamerikas auf die Luftbelastung der nördlichen Hemisphäre ableiten, hier als „Nordamerika-Effekt“ bezeichnet (siehe Kapitel 2):

- Neben Nordamerika selbst wird besonders der Atlantik wesentlich durch die nordamerikanischen Emissionen belastet.
- Der Einfluss nimmt nach Osten hin ab, ist aber schwach noch bis nach Asien nachweisbar.
- Im Mittel liegt der „Nordamerika-Effekt“ über Europa beim bodennahen Ozon unter  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und unter  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beim  $\text{PM}_{10}$ .
- In der unteren freien Troposphäre über (West-) Europa werden im Mittel  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gebietsweise überschritten.
- Es lässt sich eine Vielzahl von Episoden identifizieren mit Transport von Ozon und anderen Spurenstoffen von Nordamerika nach Europa.
- In bestimmten Phasen treffen mehrere Nordamerika-Plumes in einer Serie in Europa ein, welche einer den Export begünstigen Wetterlage über Nordamerika zuzuordnen sind (Beispiele sind im Anhang zu finden).

- Je nach Art der Klassifizierung kann man davon ausgehen, dass etwa alle 1-2 Wochen eine Transportepisode vorliegt, welche dann mehrere Tage dauern kann.
- Den größten Einfluss hat das Nordamerikanische Ozon nicht während Phasen mit extremen Konzentrationen über Europa ( $[\text{O}_3] > 240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Für solche Episoden zeigt die Gitterstundenanalyse, dass nur etwa 6% der Fälle ohne die Nordamerikanischen Emissionen verhindert werden könnten.
- Wesentlich höher ist der Beitrag im Konzentrationsbereich  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3 - 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Bei etwa 20% liegt der Anteil der Überschreitungen, die erst mit dem amerikanischen Beitrag vorkommen.
- Dieser Effekt wirkt sich auch bei Dosis-Betrachtungen aus. So sind die AOT40 Werte über Europa signifikant höher unter Berücksichtigung des Interkontinental-Transports.
- Während spezieller Episoden (Beispiel: August 2001) werden die bodennahen Ozon-Konzentrationen über Europa punktuell sogar überwiegend durch die importierten Spurenstoffe bestimmt. In der Simulationsrechnung liegt der Beitrag bei bis zu  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Die Episode im August 2001 nimmt im Untersuchungszeitraum eine Sonderstellung ein: Der Transport erfolgt signifikant auch innerhalb der Grenzschicht und die Effekte sind auch bei den Partikeln noch deutlich nachweisbar.

Die beiden untersuchten Jahre 1999 und 2001 weisen generell vergleichbare Verteilungen von Spurenstoffen auf. Auch der Jahresgang über Europa weist ähnliche Muster in beiden Jahren auf, selbst wenn sich die Episoden unterscheiden. Insgesamt lag die Belastung 1999 höher als 2001. Dies ist allein der Meteorologie zu zuschreiben, da beide Jahre mit denselben Emissionsdaten simuliert wurde.

Die Trends der Emissionen führt die nächsten Jahre bis 2010 werden sich natürlich auch bei den Imissionen widerspiegeln. Die Änderungen wirken sich auch auf die jeweiligen Einflussregionen aus.

So ist für den Asiatisch/Pazifischen Raum mit einem weiteren drastischen Anstieg zu rechnen, der sich signifikant bis zur Westküste Nordamerikas auswirkt.

In Europa wird sich die Emissions-Reduktion positiv auswirken. Der Einfluss der Änderungen in Nordamerika spielt dagegen (für Europa) eine geringere Rolle.

Die Experimente zeigen einen Anstieg der mittleren troposphärischen Ozon-Belastung an. Dies hat den Effekt den regionalen Maßnahmen entgegen zu wirken.



## Literatur

- 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
- 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.
- FELDMANN, H., MEMMESHEIMER, M., JAKOBS, H.J. KERSCHGENS, M., EBEL, A., (2005) ATMOFAST – Teilvorhaben „Modellsimulation“ – Abschlussbericht zum AFO2000-Projekt 07ATF09, pp. 20
- Huntrieser, H., J. Heland, H. Schlanger, C. Forster, A. Stohl, O. Cooper, H. Aufmhoff, F. Arnold, H.E. Scheel, Campana, S. Gilge, and R. Eixmann, Intercontinental air pollution transport from North America to Europe: Experimental evidence from airborne measurements and surface observations, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 10.1029/2004JD005045, 2005.
- 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. SCHÄLER, 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))
- PELLEY 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.
- 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., H. HUNTRIESER, A. RICHTER, S. BEIRLE, O. R. COOPER, S. ECKHARDT, C. FORSTER, P. JAMES, N. SPICHTINGER, M. WENIG, T. WAGNER, J. P. BURROWS, U. PLATT, Rapid Intercontinental air pollution transport associated with a meteorological bomb, *Atmos. Chem. Phys.* **3** (2003a), 969-985
- 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, H. HUNTRIESER, J. HELAND, H. SCHLAGER, H. AUFMHOFF, F. ARNOLD, AND O. COOPER, 2003A: A backward modeling study of intercontinental pollution transport using aircraft measurements, *J. Geophys. Res.*, 108(D12), 4370, doi:10.1029/2002JD002862.
- STOHL, A., H. HUNTRIESER, A. RICHTER, S. BEIRLE, O. R. COOPER, S. ECKHARDT, C. FORSTER, P. JAMES, N. SPICHTINGER, M. WENIG, T. WAGNER, J. P. BURROWS, U. PLATT, Rapid Intercontinental air pollution transport associated with a meteorological bomb, *Atmos. Chem. Phys.* **3** (2003B), 969-985
- T. TRICKL, O. C. COOPER, H. EISELE, P. JAMES, R. MÜCKE, A. STOHL, Intercontinental transport and its influence on the ozone concentrations over central Europe: Three case studies, *J. Geophys. Res.* **108** (2003), 8530, 10.1029/2002JD002735, STA 15, 1-23

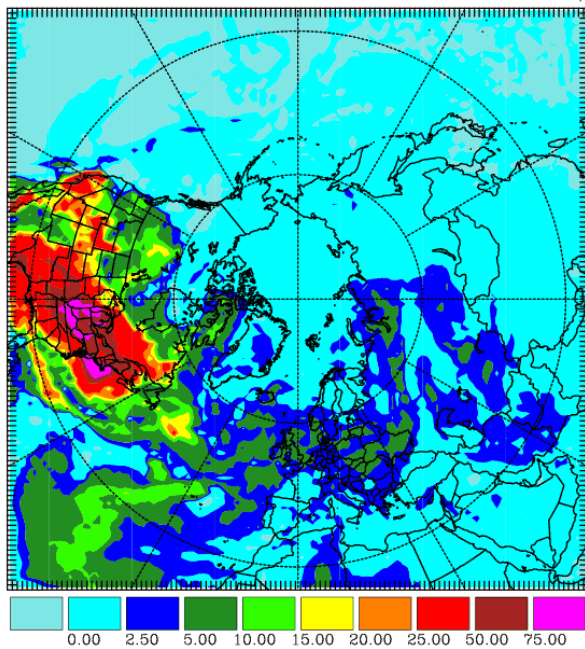
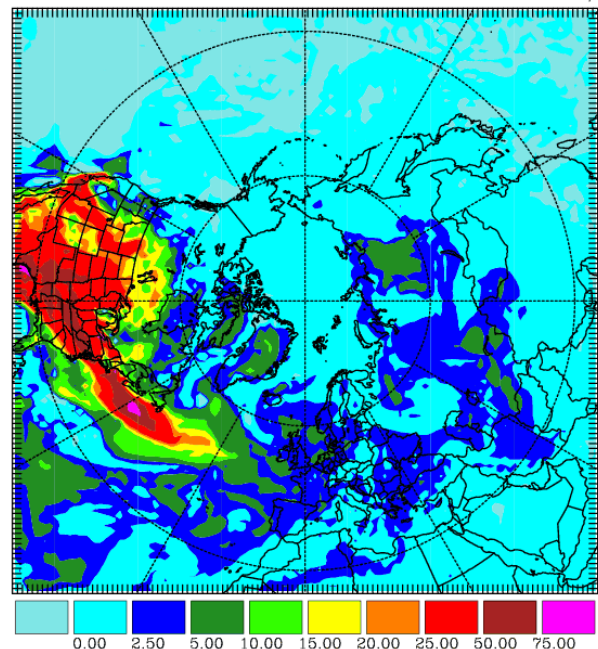
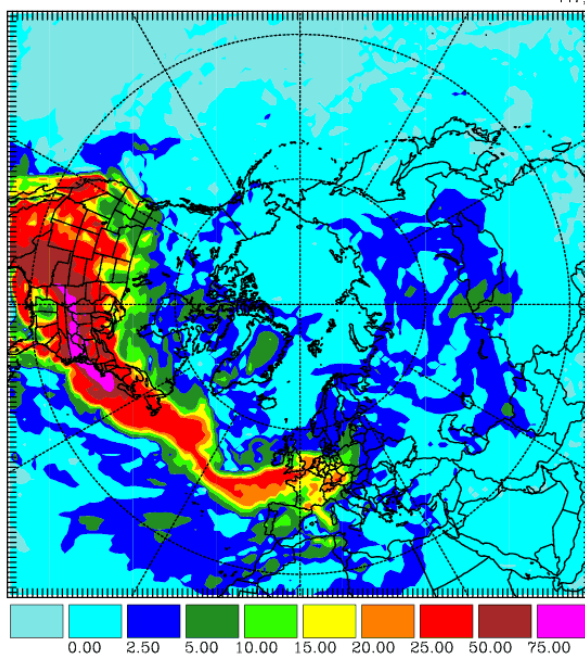
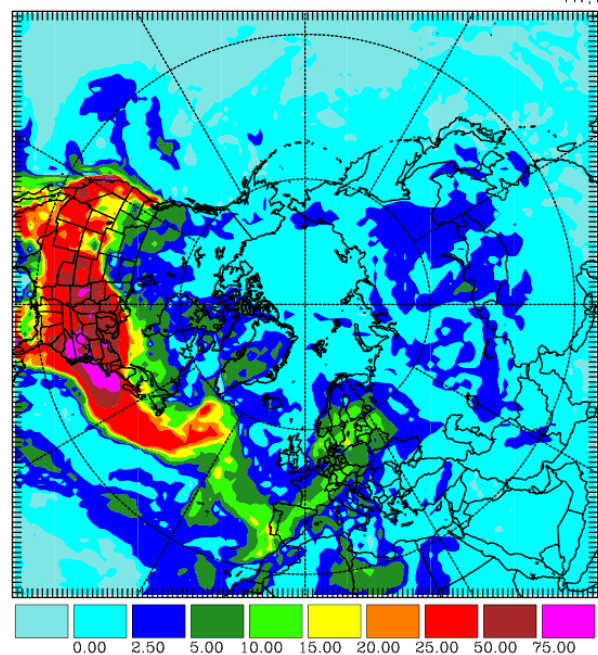
- T. TRICKL, A. STOHL, M.KERSCHGENS, H. GIEHL, H. JÄGER, H.-J. KANTER, S. KREIPL, H. E. SCHEEL, H. VOGELMANN, S. ECKHARDT, C. FORSTER, P. JAMES, N. SPICHTINGER-RAKOWSKY, A. EBEL, H. FELDMANN, H. J. JAKOBS, M. MEMMERSHEIMER: Atmosphärischer Ferntransport und seine Auswirkungen auf die Spurengaskonzentrationen in der freien Troposphäre über Mitteleuropa (ATMOFAST) – Abschlußbericht des AFO200 Projektes ATMOFAST 07ATF07 – 07ATF09 (2005).
- 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
- S. C. WOFSY ET AL., Factors influencing atmospheric composition over subarctic North America during summer, *J. Geophys. Res.* **99** (1994) 1887-1897
- G. WOTAWA, M. TRAINER, The Influence of Canadian Forest Fires on Pollutant Concentrations in the United States, *Science* **288** (2000) 324-328

**Anhang: Darstellung von Art und Verlauf verschiedener Transport-Episoden**

- A1 August 2001
- A2 Juni 2001
- A3 November 2001 (CONTRACE)
- A4 Juli 2001

Anhang 1: **August 2001**

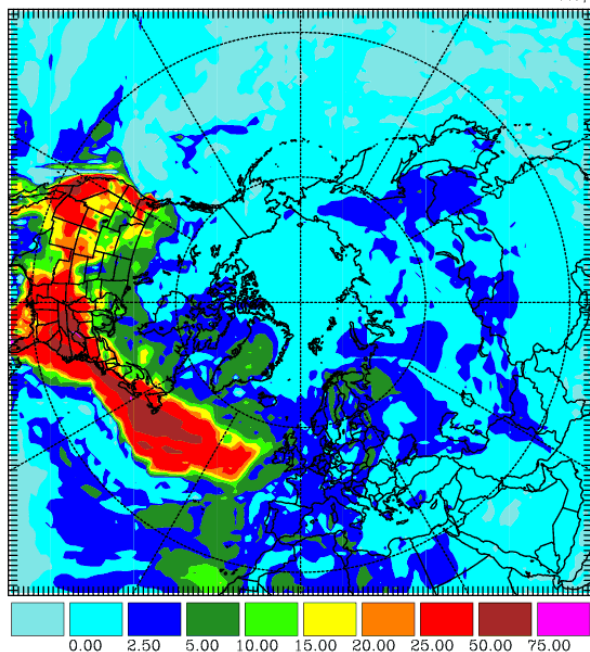
Während der ersten August-Hälfte 2001 kam es in mehreren Schüben zu Transport von Nordamerika nach Europa. Diese Phase stellt die – besonders bodennah – ausgeprägteste Interkontinentaltransportepisode des Untersuchungszeitraums dar. Nicht nur bei Ozon sondern auch bei den Partikeln lässt sich ein deutlicher Effekt nachweisen.

**1. August 2001****3. August 2001****6. August 2001****8. August 2001**

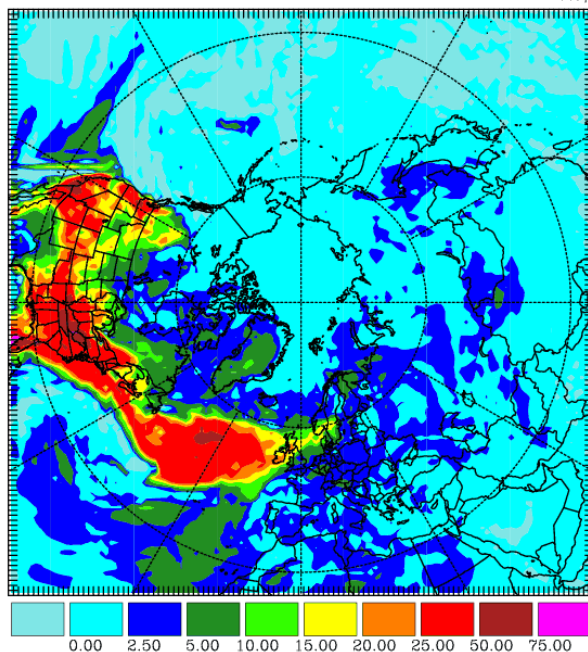
**Abbildung A1.1-A1.4: Tagesmaximum des „Nordamerika-Effektes“ beim bodennahen Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] – Differenz Basislauf – Reduktions-Experiment Nordamerika**



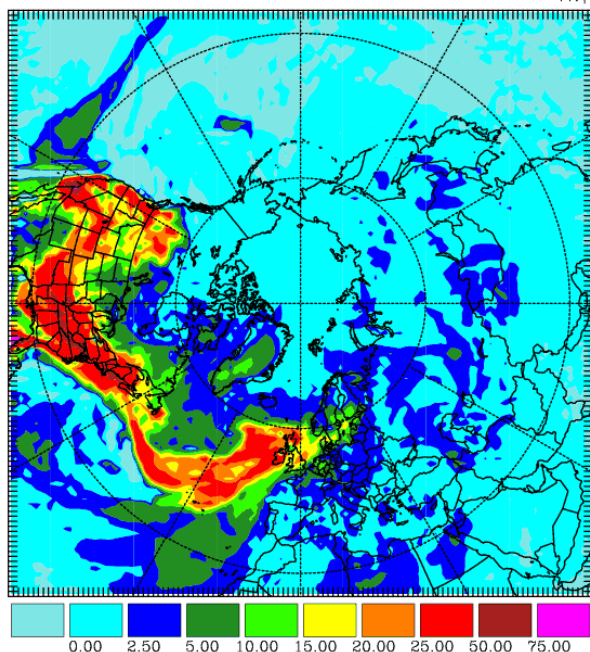
10. August 2001



11. August 2001



12. August 2001



13. August 2001

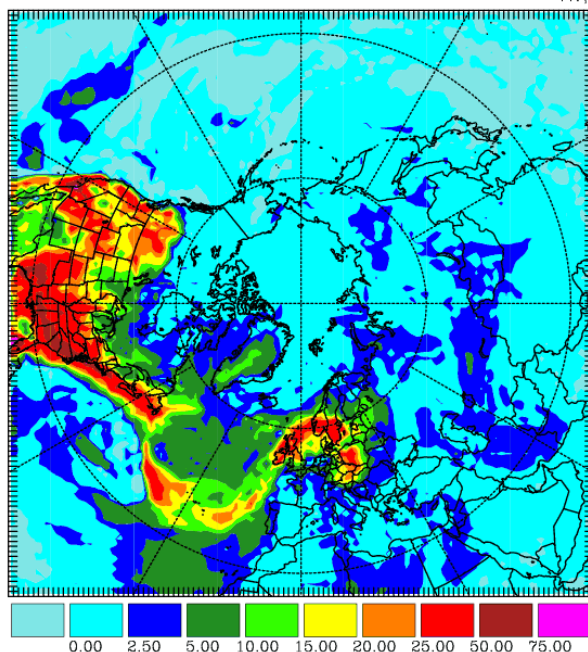
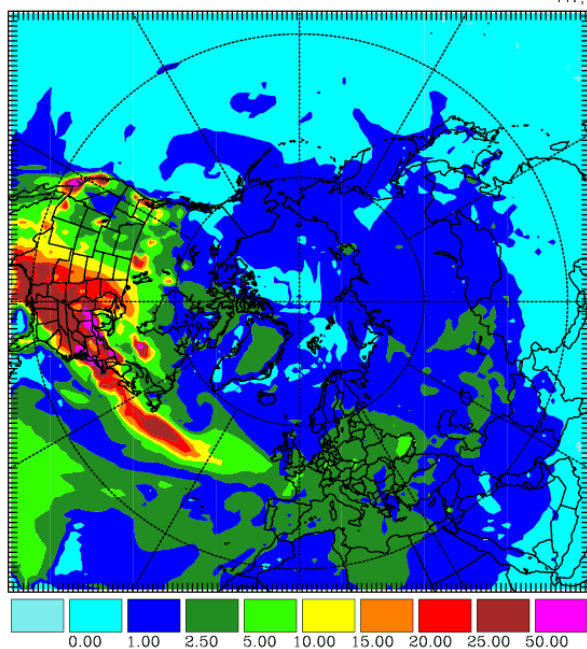
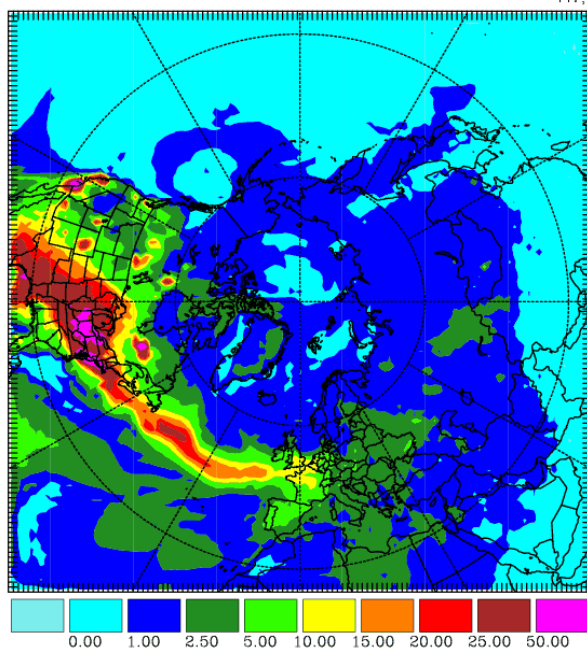


Abbildung A1.5-A1.8: Tagesmaximum des „Nordamerika-Effektes“ beim bodennahen Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] – Differenz Basislauf – Reduktions-Experiment Nordamerika

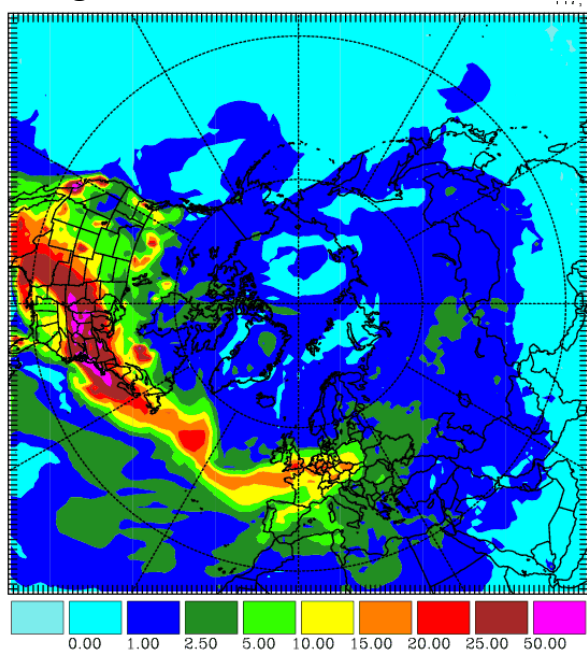
#### 4. August 2001



#### 5. August 2001



#### 6. August 2001



#### 7. August 2001

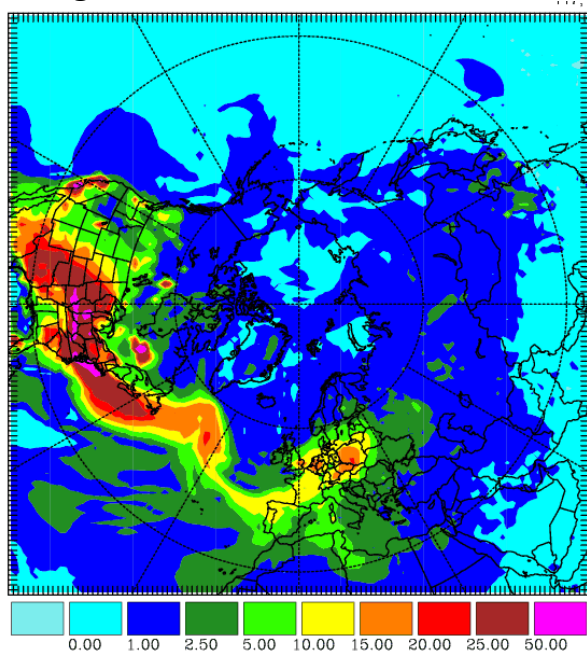
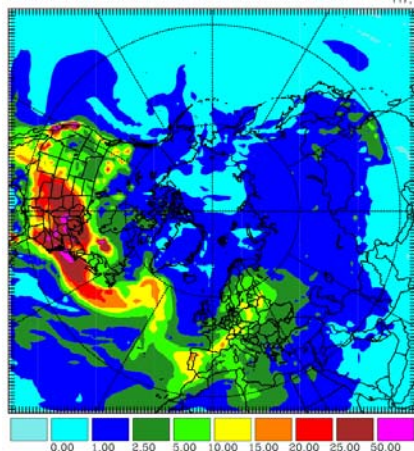


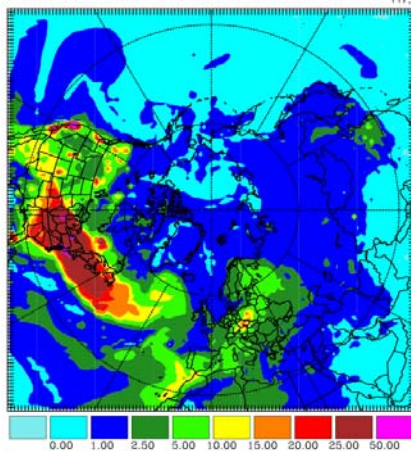
Abbildung A1.9-A1.12: Tagesmaximum des „Nordamerika-Effektes“ beim bodennahen  $PM_{10}$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] – Differenz Basislauf – Reduktions-Experiment Nordamerika



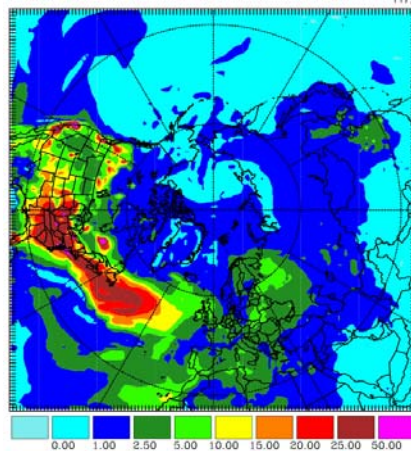
8. August 2001



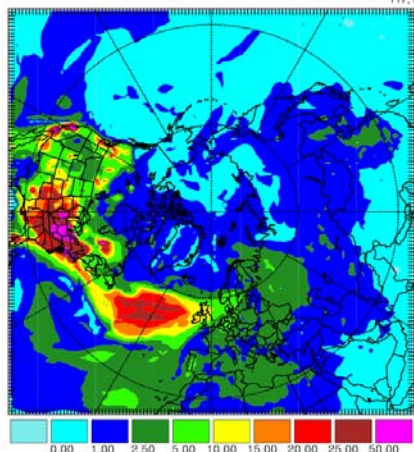
9. August 2001



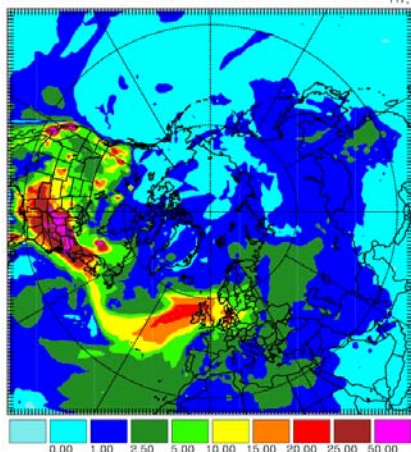
10. August 2001



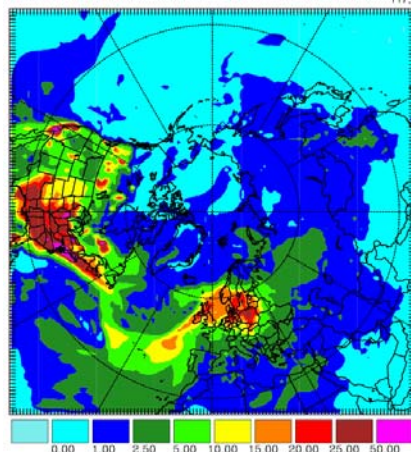
11. August 2001



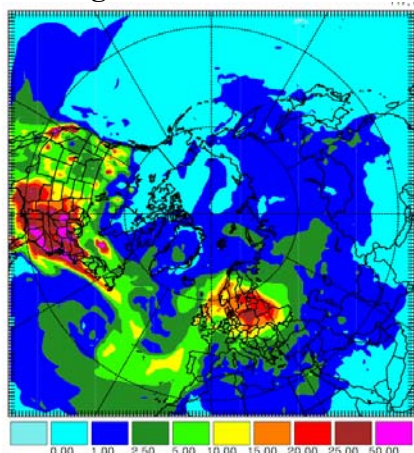
12. August 2001



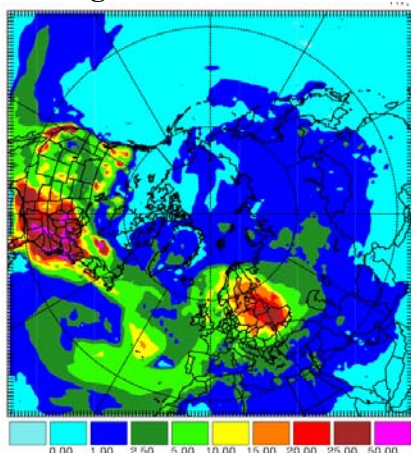
13. August 2001



14. August 2001



15. August 2001



16. August 2001

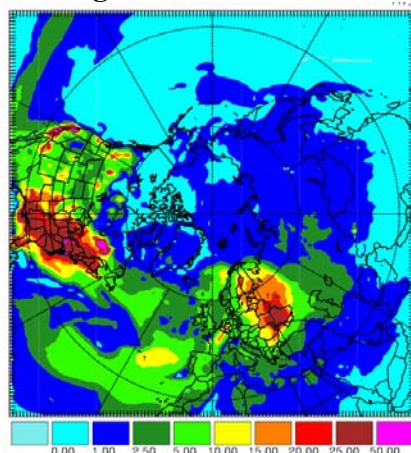


Abbildung A1.13-A1.21: Tagesmaximum des „Nordamerika-Effektes“ beim bodennahen  $PM_{10}$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] – Differenz Basislauf – Reduktions-Experiment Nordamerika

## Anhang 2: **Juni 2001**

Die Episode um den 20. Juni 2001 setzt sich aus einer Kette von Transport-Ereignissen zusammen die bis in den Juli reichen (vergleiche Abbildung 2.13 ff).

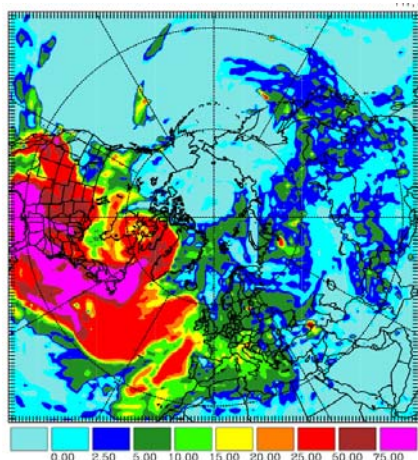
Die Episode wurde für den Bereich der oberen Troposphäre/unteren Stratosphäre im Rahmen verschiedener Projekte intensiv untersucht (vgl. Abbildung 2.5 sowie Roloefs et al [2003] und Trickl et al. [2005])

Im Gegensatz zur Episode im August 2001 findet der Spurenstoff-Transport nach Europa im Wesentlichen in der freien Troposphäre statt. Die Erhöhung der bodennahen Konzentration von Ozon über Europa wird am 20. Juni wesentlich durch vertikale Mischung verursacht.

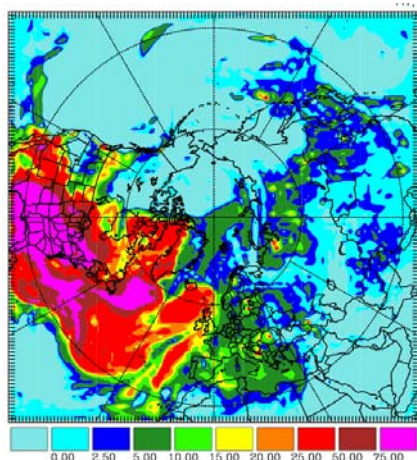
Bei den Partikeln ergibt sich nur ein schwaches Transport-Signal in der Simulation.



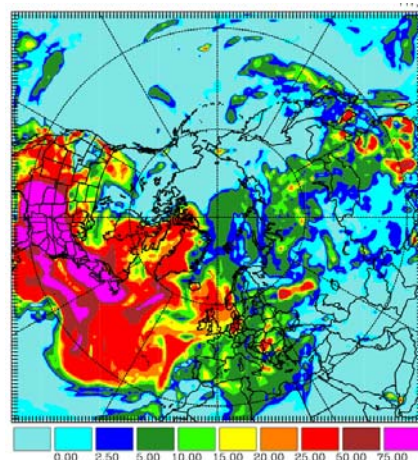
18. Juni 2001



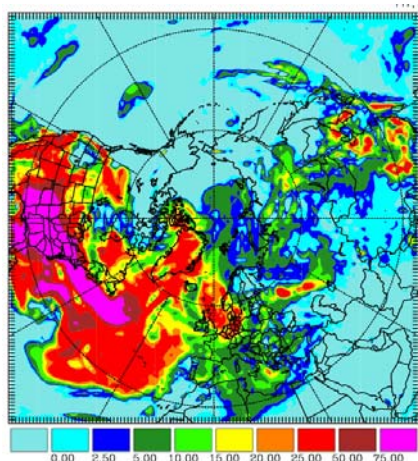
19. Juni 2001



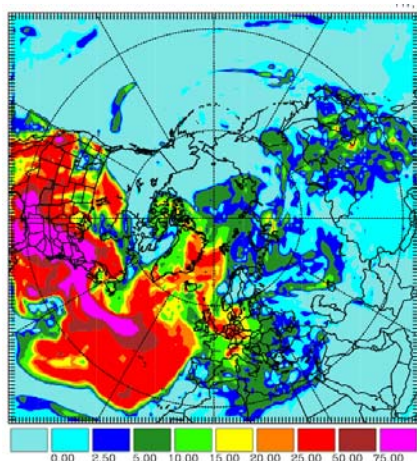
20. Juni 2001



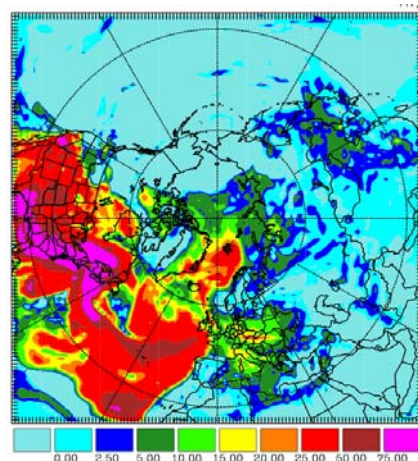
21. Juni 2001



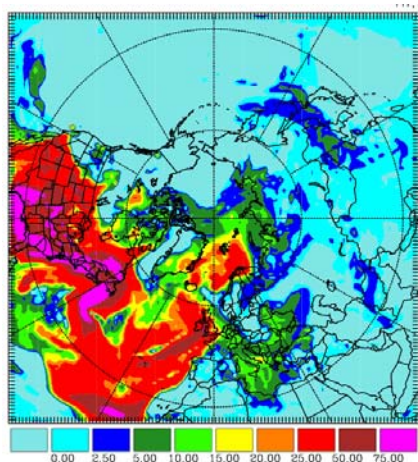
22. Juni 2001



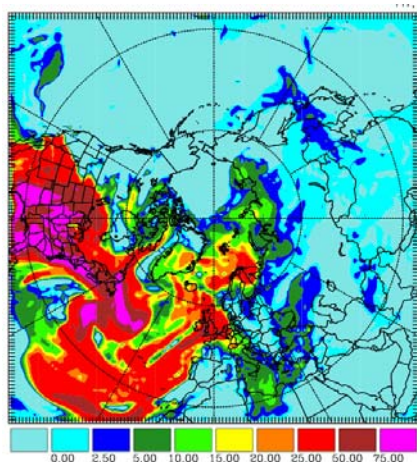
23. Juni 2001



24. Juni 2001



25. Juni 2001



26. Juni 2001

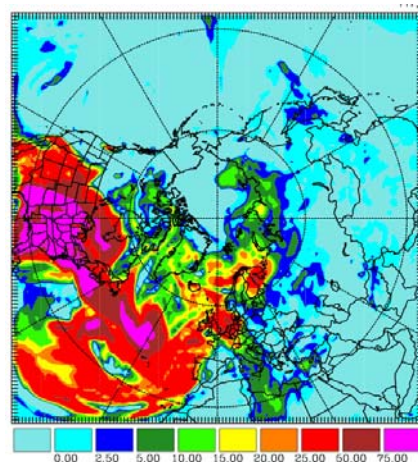
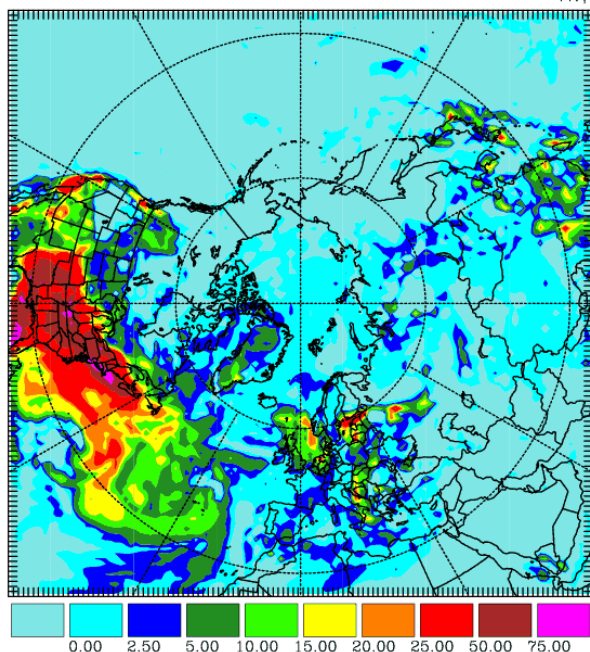
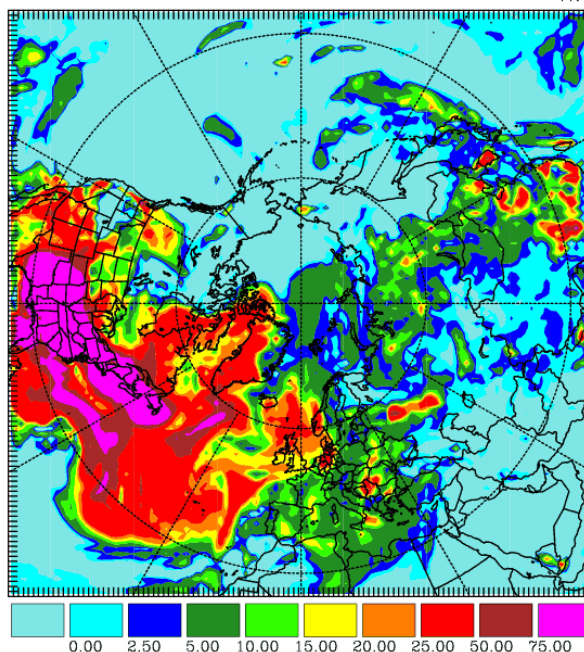
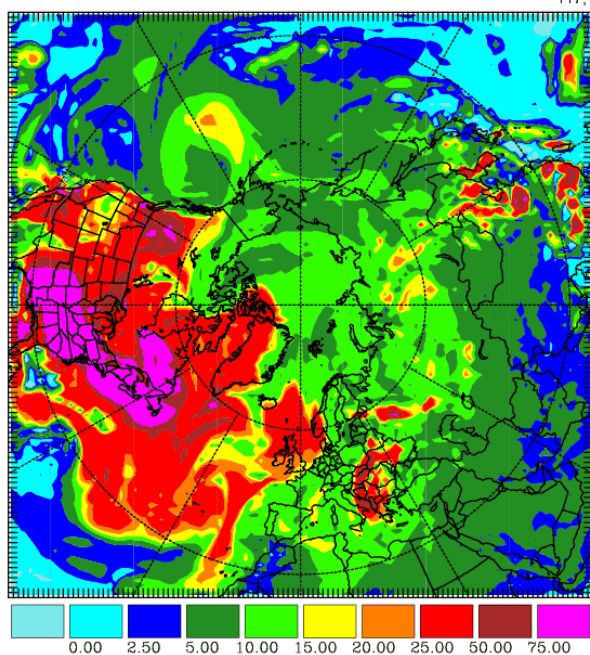
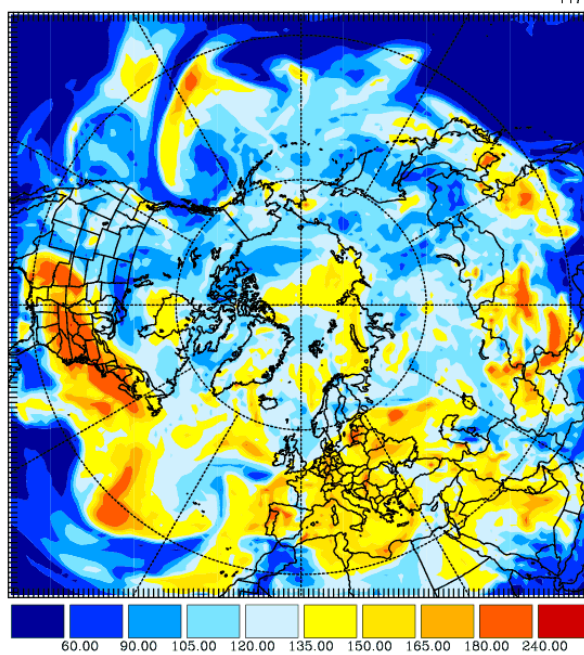


Abbildung A2.1-A2.9: Tagesmaximum des „Nordamerika-Effektes“ bei Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in ca. 1500 m Höhe – Differenz Basislauf – Reduktions-Experiment Nordamerika



**Ozon bodennah – Beitrag Nordamerika****Ozon in ca. 1500 m – Beitrag Nordamerika****CO 1500 m – Beitrag Nordamerika****Ozon 1500 m**

**Abbildung A2.10-A2.13: 20. Juni 2001** – links oben: Tagesmaximum des „Nordamerika-Effektes“ bei Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] bodennah – rechts oben: Tagesmaximum des „Nordamerika-Effektes“ bei Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in ca. 1500 m Höhe – links unten Tagesmaximum des „Nordamerika-Effektes“ bei CO [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in ca. 1500 m Höhe – rechts unten: Maximales 8h-Mittel der Ozon-Konzentration [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in ca. 1500m Höhe

### Anhang 3: **CONTRACE - November 2001**

Im Rahmen des AFO2000 Projektes CONTRACE wurde im November 2001 anhand von Flugzeugmessungen und Modell-Analysen Interkontinentalplumes nachgewiesen (Huntrieser et al., 2005).

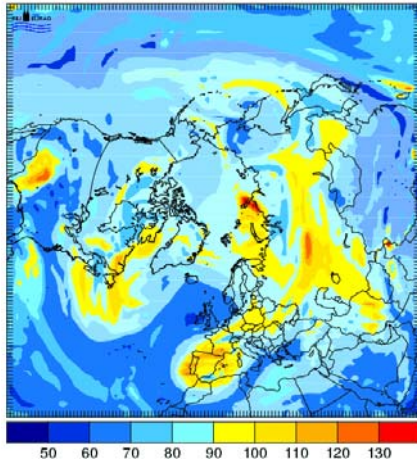
Die Episode liegt im Zeitraum des Basis-Experimentes aber nicht der Reduktionsstudie Nordamerika. Im Wesentlichen wird die freie Troposphäre durch die Schadstoffe beeinflusst.

Der Interkontinental-Plume steigt über dem äußersten Nordosten Nordamerikas auf und erreicht Europa auf einer nördlichen Route. Der Transport verläuft sehr schnell. Die Ozon-Konzentrationen sind erhöht, aber angesichts der Jahreszeit niedriger als während der anderen gezeigten Episoden.

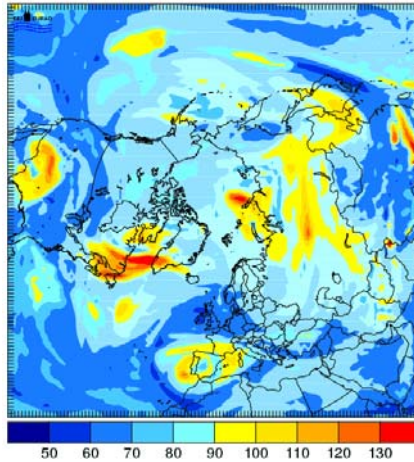
Die Entwicklung des Plumes lässt sich besonders gut anhand der CO-Konzentration in der mittleren Troposphäre zeigen.



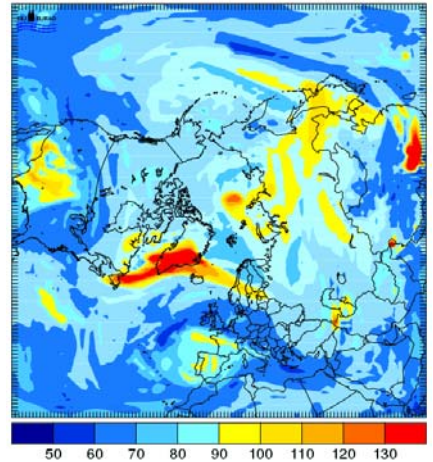
15. November 2001



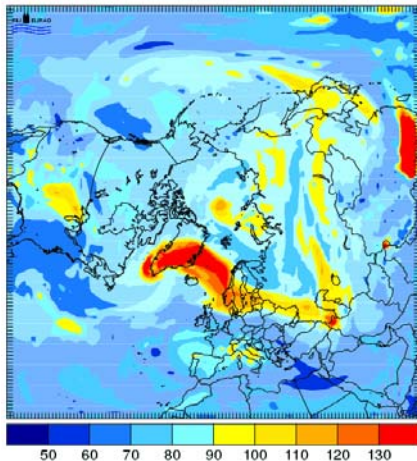
16. November 2001



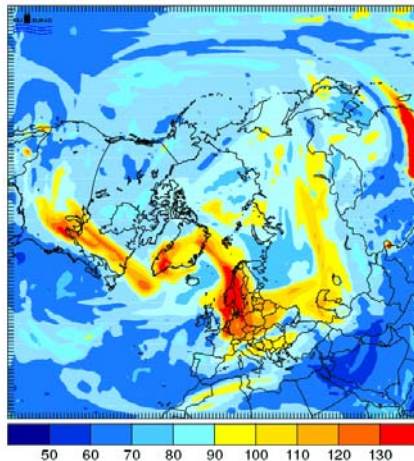
17. November 2001



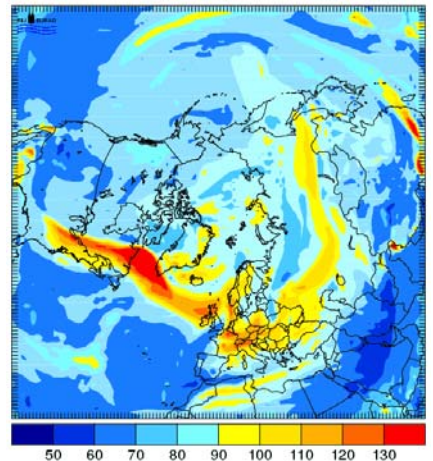
18. November 2001



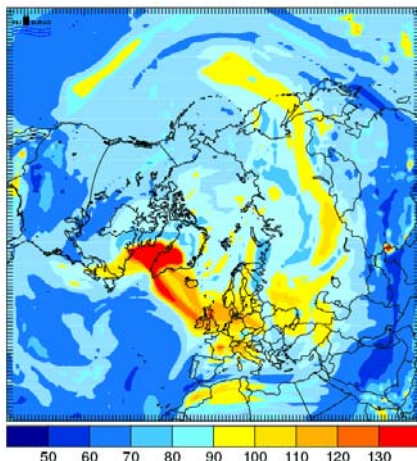
19. November 2001



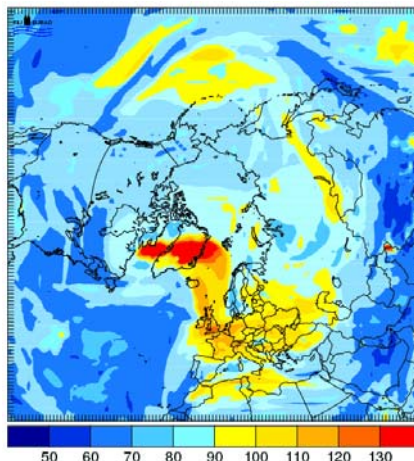
20. November 2001



21. November 2001



22. November 2001



23. November 2001

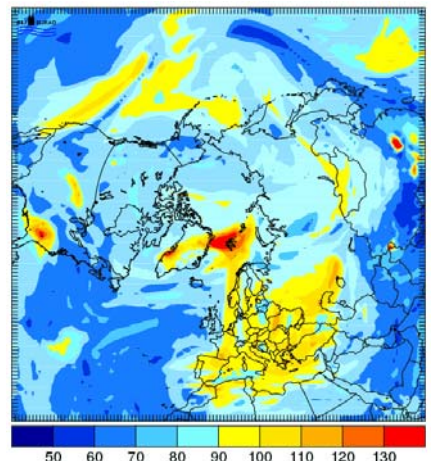
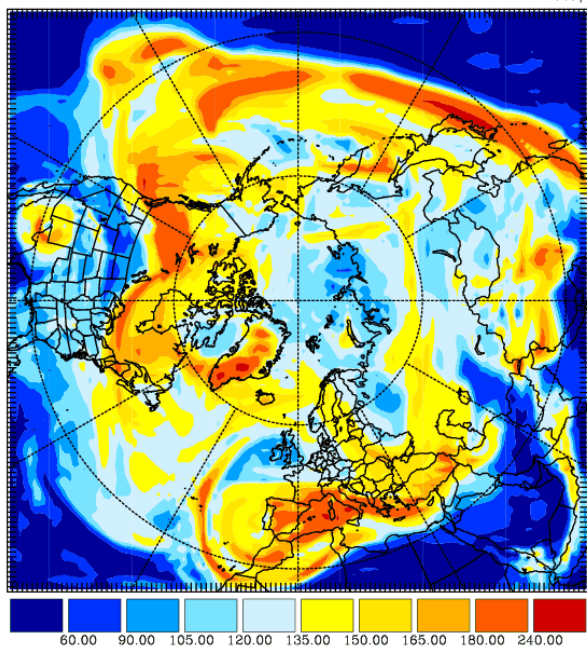


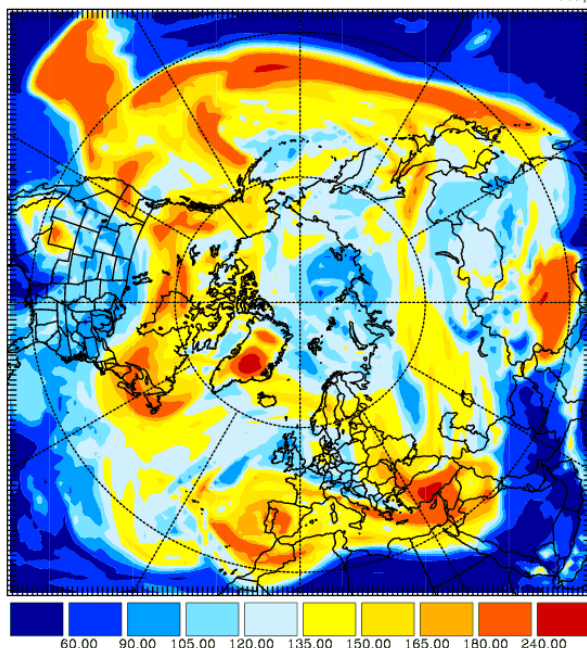
Abbildung A3.1-A3.9: Tagesmaximum CO [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in 500 hPa (ca. 5 km Höhe) – 15. – 23. November 2001.



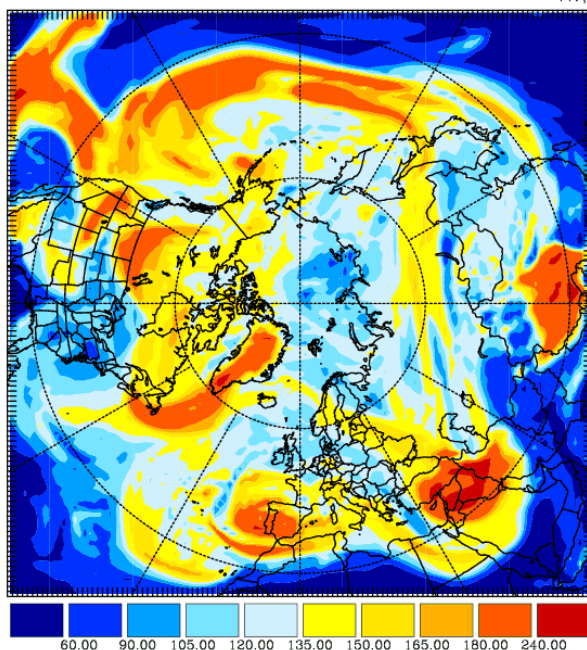
16. November 2001



17. November 2001



18. November 2001



19. November 2001

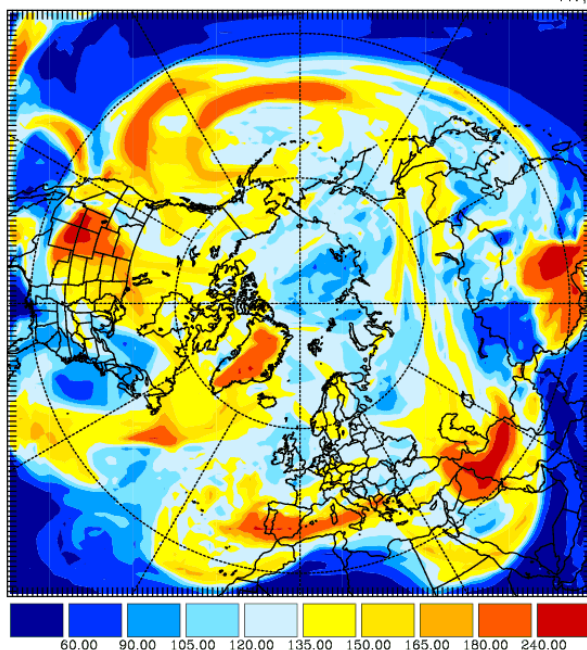
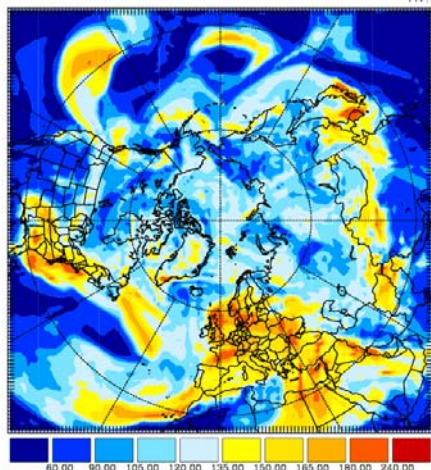


Abbildung A3.10-A3.13: *Maximales 8-Stunden-Mittel Ozon* [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in 500 hPa (ca. 5 km Höhe) – 15. – 23. November 2001.

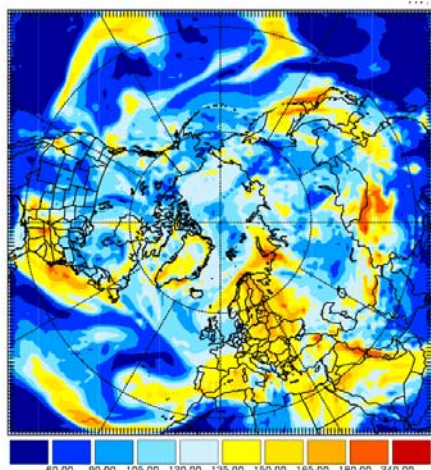


# Anhang 4: Juli 2001

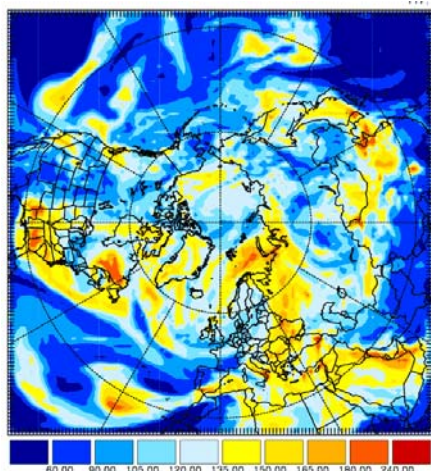
## O3 Gesamt 9. Juli 2001



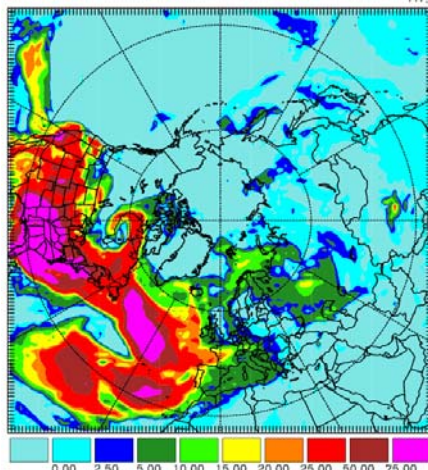
11. Juli 2001



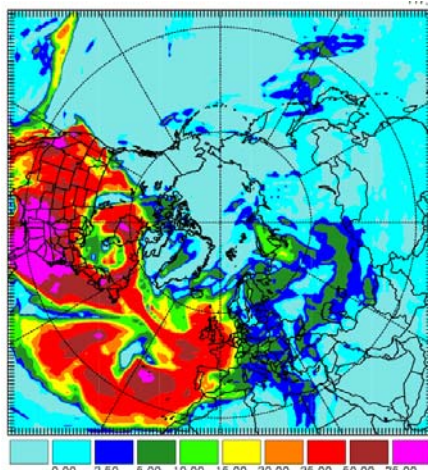
13. Juli 2001



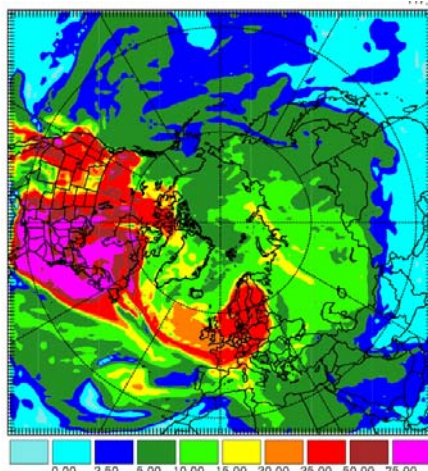
## O3 – Beitrag Nordamerika 9. Juli 2001



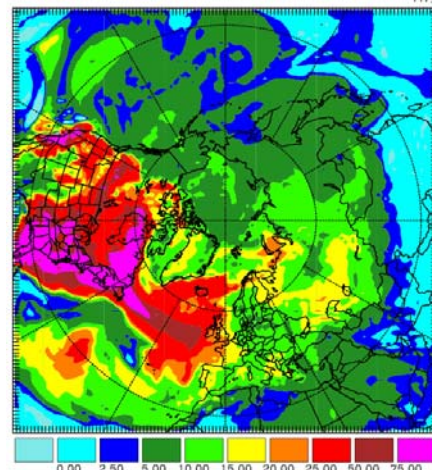
11. Juli 2001



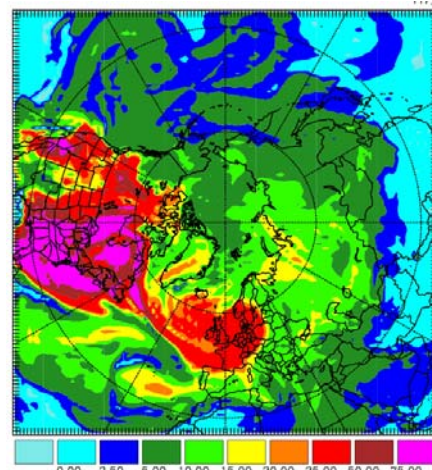
13. Juli 2001



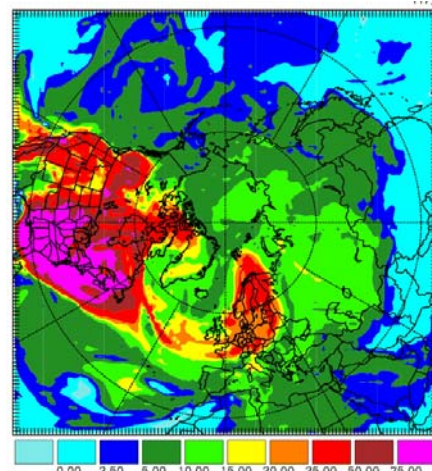
## CO – Beitrag Nordamerika 9. Juli 2001



11. Juli 2001



13. Juli 2001



**Abbildung A4.1-A4.9: 9.-13. Juli 2001** – Links: Maximaler 8h-Mittelwert Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in 1500 m Höhe – Mitte: Tagesmaximum des „Nordamerika-Effektes“ bei Ozon [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in 1500 m Höhe – Rechts: Tagesmaximum des „Nordamerika-Effektes“ bei CO [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] in ca. 1500 m Höhe