

Endbericht

Aktionsplan für Sofortmaßnahmen gemäß § 15 Ozon-Gesetz

- Meteorologisch chemische Modellrechnungen -

Im Auftrag von

Magistrat der Stadt Wien

Magistratsabteilung 22 - Umweltschutz

Ebendorferstraße 4, 1082 Wien

Amt der niederösterreichischen Landesregierung

Gruppe Raumordnung, Umwelt und Verkehr, Abteilung Umweltrecht

Landhausplatz 1, 3109 St. Pölten

Amt der burgenländischen Landesregierung

Abt. 5 - Anlagenrecht, Umweltschutz und Verkehr, Hauptreferat III - Natur- und Umweltschutz

Europaplatz 1, 7001 Eisenstadt



Bernd C. Krüger
Department Wasser - Atmosphäre - Umwelt
Institut für Meteorologie
Universität für Bodenkultur Wien

Jänner 2004

EINLEITUNG	3
BESCHREIBUNG DER MODELLE	5
GITTERSTRUKTUR DES MODELLSYSTEMS	5
METEOROLOGISCHE EINGABEDATEN	9
DAS METEOROLOGISCHE MODELL MM5	9
EMISSIONEN	10
<i>Anthropogene Emissionen</i>	10
<i>Biogene Emissionen</i>	12
ANFANGS- UND RANDKONZENTRATIONEN	12
PHOTOLYSEGESCHWINDIGKEITEN	12
DAS CHEMIE-TRANSPORTMODELL CAMX	13
<i>Chemische Mechanismen</i>	14
MODELLLÄUFE	14
VALIDIERUNG DER MODELLRECHNUNGEN	16
METEOROLOGISCHE BEDINGUNGEN WÄHREND DER EPISODE	16
DER VERLAUF DER SCHADSTOFFKONZENTRATIONEN WÄHREND DER EPISODE	19
SCATTER-PLOTS	22
STATISTISCHE BERECHNUNGEN	22
UNTERSUCHUNGEN ZU DEN QUELLEN DES OZONS	25
ZUR UNTERSCHIEDUNG VON NO _x - UND VOC-KONTROLLIETEN REGIMEN	25
DIE EINTEILUNG IN QUELLGEBIETE	26
OSAT-ERGEBNISSE FÜR GROBRÄUMIGEN SCHADSTOFFTRANSPORT	29
OSAT-ERGEBNISSE FÜR KLEINRÄUMIGEN SCHADSTOFFTRANSPORT	34
UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DES MODELLRANDES	38
ZUSAMMENFASSUNG DER OSAT-ERGEBNISSE	41
BERECHNUNGEN MIT EMISSIONSSZENARIEN	42
VERWENDETE EMISSIONSSZENARIEN	42
VERGLEICH DER EMISSIONSSZENARIEN AN EINZELNEN STATIONEN	43
VERGLEICH DER EMISSIONSSZENARIEN IM GESAMTEN GEBIET	47
VERGLEICH DER EMISSIONSSZENARIEN IM GESAMTEN GEBIET, TEIL 2	50
TAGESZEITLICH EINGESCHRÄNKTE EMISSIONSREDUKTIONEN	51
VERGLEICH DER EMISSIONSSZENARIORECHNUNGEN MIT OSAT	53
DISKUSSION DER ERGEBNISSE	55
AUSWIRKUNGEN VON EMISSIONSREDUKTIONEN IM OZONÜBERWACHUNGSGEBIET	55
VERGLEICH MIT ANDEREN STUDIEN	56
WEITERE MÖGLICHE UNTERSUCHUNGEN	57
ZUSAMMENFASSUNG	58
LITERATUR	59

Einleitung

Die langanhaltende Hitzewelle des Sommers 2003 führte zu einer sehr hohen Ozonbelastung in Österreich. Noch nie seit Beginn der flächendeckenden Messung im Jahr 1990 wurde die Informationsschwelle (Einstundenmittelwerte über $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) so oft überschritten (UBA, 2003). Unter anderem war der Nordosten Österreichs besonders betroffen. Die Alarmschwelle (Einstundenmittelwert über $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wurde an fünf Tagen und damit auch außergewöhnlich häufig überschritten. Alle Überschreitungen der Alarmschwelle traten im Ozonüberwachungsgebiet 1 (Wien, Niederösterreich, nördliches Burgenland) auf.

Am 1. Juli 2003 trat außerdem eine Novelle des Ozongesetzes in Kraft (Bundesgesetzblatt, 2003). Diese setzt u.a. die Schwellen- und Zielwerte einer EU-Richtlinie (EU, 2002) in österreichisches Recht um. Die Vorwarnstufe ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über drei Stunden) und Warnstufen (300 bzw. $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für drei Stunden) des alten Ozongesetzes traten damit außer Kraft. Sie wurden durch die Informations- und die Alarmschwelle abgelöst. Sind diese überschritten, wird die Bevölkerung über die Medien darüber informiert. Die Informationsschwelle wird bei einer einstündigen Ozonkonzentration von mehr als $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, die Alarmschwelle wird bei einer einstündigen Ozonkonzentration von mehr als $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht.

In § 15 Abs. 1 der Novelle des Ozongesetzes heißt es: „(1) Der Landeshauptmann hat einen Aktionsplan für Sofortmaßnahmen zu erstellen, wenn das Risiko einer Überschreitung der Alarmschwelle gemäß Anlage 1 für mindestens drei aufeinander folgende Stunden besteht und ein nennenswertes Potential zur Verringerung dieses Risikos oder zur Verringerung der Dauer oder des Ausmaßes einer Überschreitung der Alarmschwelle gegeben ist. Erstreckt sich das Ozon-Überwachungsgebiet über das Gebiet mehrerer Länder, so ist der Aktionsplan von den betroffenen Landeshauptmännern gemeinsam zu erstellen. Die Erstellung eines Aktionsplanes kann entfallen, wenn nachgewiesen wird, dass die Maßnahmen gemäß Abs. 1a kein nennenswertes Potential besitzen, um das Risiko, die Dauer bzw. das Ausmaß der Überschreitung der Alarmschwelle zu reduzieren.“

Aus diesem Grund haben das Amt der Wiener Landesregierung, das Amt der niederösterreichischen Landesregierung und das Amt der burgenländischen Landesregierung die Studie "Aktionsplan für Sofortmaßnahmen gemäß § 15 OzonG" in Auftrag gegeben. Dieser Bericht beschreibt hierzu Untersuchungen mit Hilfe von Modellrechnungen zu der Fragestellung in welchem Ausmaß zu Zeiten erhöhter Ozonkonzentrationen im österreichischen Ozonüberwachungsgebiet 1 kurzfristige regionale Emissionseinschränkungen zu einer Reduzierung des Ozons beitragen würden.

Am Institut für Meteorologie und Physik der Universität für Bodenkultur Wien wurde in den vergangenen Jahren in vom Magistrat der Stadt Wien (MA22) finanzierten Projekten ein Eulersches Modellsystem aufgebaut, dessen Grundbestandteile das mesoskalige Meteorologiemodell MM5 sowie das Photochemie- und Transportmodell CAMx sind (Krüger und Schmittner, 2001; Krüger und Schmittner, 2002). Für Nordostösterreich berechnet diese Modellsystem flächige Ergebnisse mit einer

räumlichen Auflösung von 3 km. Dieses Modellsystem wurde in der vorliegenden Studie genutzt.

Die Untersuchungen fanden an einer beispielhaften Episode im Juni 2000 statt. In diesem Zeitraum traten im Ozonüberwachungsgebiet 1 mehrfach Überschreitungen der Informationsschwelle von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf. Am 20. 6. 2000 geschah dies im nördlichen Niederösterreich, am 21. 6. 2000 im südlichen Niederösterreich und dem Burgenland und am 22. 6. 2000 vor allem westlich von Wien zwischen den Stationen Lobau und Kittsee. Eine Episode aus dem Jahre 2003, in dem höhere Überschreitungen beobachtet wurden, konnten noch nicht bearbeitet werden. Wegen der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit war es nicht möglich, die nötige Datenbasis zu beschaffen.

Es wurden Referenzläufe ausgeführt, mit denen die Situation während der Episoden dargestellt wird. Die Rechnungen erfolgen mit 4 genesteten Gitter von 81 km (Europa) bis 3 km (Nordostösterreich) Auflösung und zwei verschiedenen Chemiemechanismen (SAPRC99 und CBM-IV). Die Validierung der Ergebnisse geschah durch Vergleich mit Messungen.

Mit Hilfe der Option OSAT (Ozone Source Apportionment Technology) im Modell CAMx lässt sich die Herkunft der Ozonvorläufersubstanzen für im Modell gebildetes Ozon direkt berechnen. Diese Technik wurde zur quantitativen Identifizierung von Quellgebieten der Vorläufersubstanzen für das Ozon im Ozonüberwachungsgebiet 1 angewandt und der Anteil der relevanten Quellgruppen an den Vorläufern für das Ozon wurde bestimmt. Diese Ergebnisse können direkt zur Abschätzung der Wirkung von Emissionsreduktionen genutzt werden. Außerdem wurden mit dem Modellsystem die Auswirkungen verschiedener Emissionsszenarien berechnet.

Die Auswirkungen von Emissionsreduktionsmaßnahmen auf die Ozonbelastung in Nordostösterreich wurde bereits von Schneider (1999) mit Hilfe eines Lagrange-Trajektorien-Säulenmodells untersucht. Die Wirkung von großräumigen und kleinräumigen Emissionsminderungsmaßnahmen auf das bodennahe Ozon in hochsommerlichen Ozonepisoden wurde auch in einer Studie in Deutschland untersucht (Motz et al., 1997). Hierzu wurden zwei verschiedene Eulersche Modellsysteme in drei Modellregionen eingesetzt. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie wurden mit den genannten früheren Untersuchungen verglichen. Sie zeigen vergleichbare Ergebnisse.

Beschreibung der Modelle

Am Institut für Meteorologie und Physik der Universität für Bodenkultur Wien (IMP/BOKU) wurde in den vergangenen Jahren ein Eulersches Modellsystem aufgebaut, mit dem verschiedene Untersuchungen zur Luftqualität im Raum Wien ausgeführt wurden. Verschiedene mehrtägige Episoden wurden modelliert, in denen sowohl hohe Konzentrationen an primären Schadstoffen im Untersuchungsgebiet (NO_x , CO) im Winter (Krüger und Schmittner, 2001) als auch die Bildung des sekundären Luftschadstoffs Ozon im Sommer (Krüger und Schmittner, 2002) untersucht wurden. Dieses Modellsystem wurde auch für die vorliegende Studie benutzt.

Die beiden Hauptbestandteile des verwendeten Modellsystems sind das mesoskalige Meteorologiemodell MM5 (Pennsylvania State University/ National Center for Atmospheric Research [PSU/NCAR]) sowie das Chemie-Transport-Modell CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions). Für den Betrieb des Modellsystems werden zusätzlich eine Vielzahl von Prä- und Postprozessoren benötigt, die im folgenden Text beschrieben werden. Außerdem wird in diesem Abschnitt auf die verwendeten Eingabedaten eingegangen. Eine schematische Darstellung des Datenflusses der Programme findet sich in den Abbildungen 1 (MM5) und 2 (CAMx).

Die beiden Hauptprogramme sind frei verfügbare Software und können mit den Quellcodes bei ihren Autoren erhalten werden. MM5 (sowie die Präprozessoren Terrain, Regridder, Little_r und Interp) stammen vom National Center for Atmospheric Research / Mesoscale and Microscale Meteorology (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>) in Boulder/Colorado. CAMx (sowie die Präprozessoren zur Umwandlung der MM5-Ausgabe und zur Photolyseberechnung mit TUV - Tropospheric Ultraviolet-Visible radiation model - sowie einige Postprozessoren) stellt die ENVIRON International Corporation in Novato/Californien (<http://www.camx.com/index.html>) zur Verfügung. Die anderen Programme zur Vor- und Nachbereitung der Daten wurden am IMP erstellt.

Viele Abbildungen in diesem Bericht zur grafischen Darstellung der flächenhaften Verteilung von Spurengasen wurden mit dem Programm PAVE (Package for Analysis and Visualization of Environmental data) angefertigt. Dieses Programm ist beim MCNC / North Carolina Supercomputing Center - Environmental Modeling Center (<http://www.emc.mcnc.org/index.html>) erhältlich.

Gitterstruktur des Modellsystems

Das Modellsystem rechnet mit genesteten Gittern, wobei das äußerste Gitter mit 81 km Auflösung den größten Teil Europas einschließlich der britischen Inseln, Gibaltars, Griechenlands und der skandinavischen Hauptstädte, das innerste Nest mit 3 km Auflösung den größten Teil des Ozonüberwachungsgebiets 1 umfasst. Optional kann auch mit einem weiteren Nest für die Stadtgebiete von Wien oder von Bratislava gerechnet werden. Dies wurde aber in der vorliegenden Studie nicht angewandt.

Es wurde eine Lambert-konforme Projektion gewählt, mit der beide Modelle (MM5 und CAMx) rechnen können. Abbildung 3 zeigt die geografische Ausdehnung der MM5-Nester und Tabelle 1 gibt die Dimensionen der einzelnen Gitter im Modellsystem an.

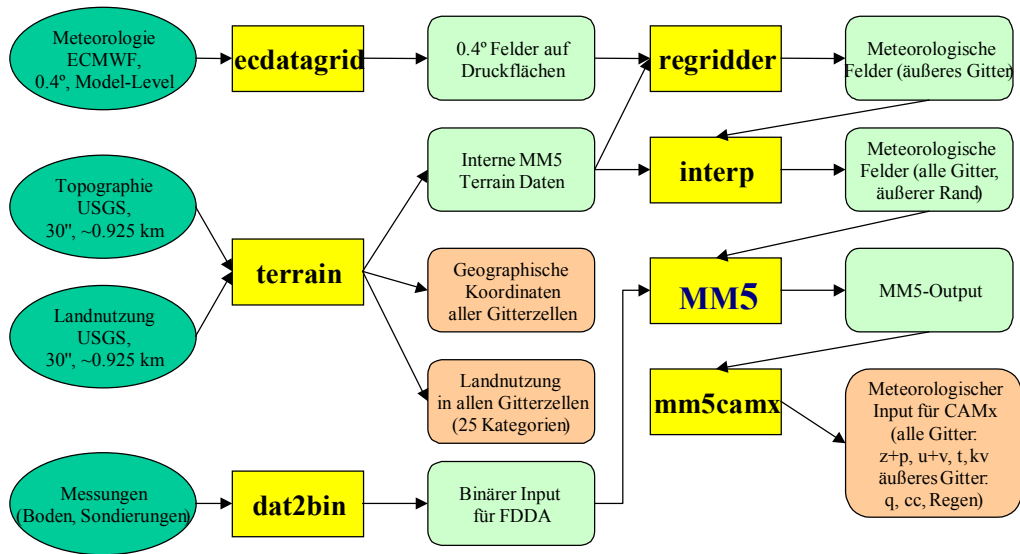


Abb. 1: Datenfluss für das mesoskalige meteorologische Modell MM5.

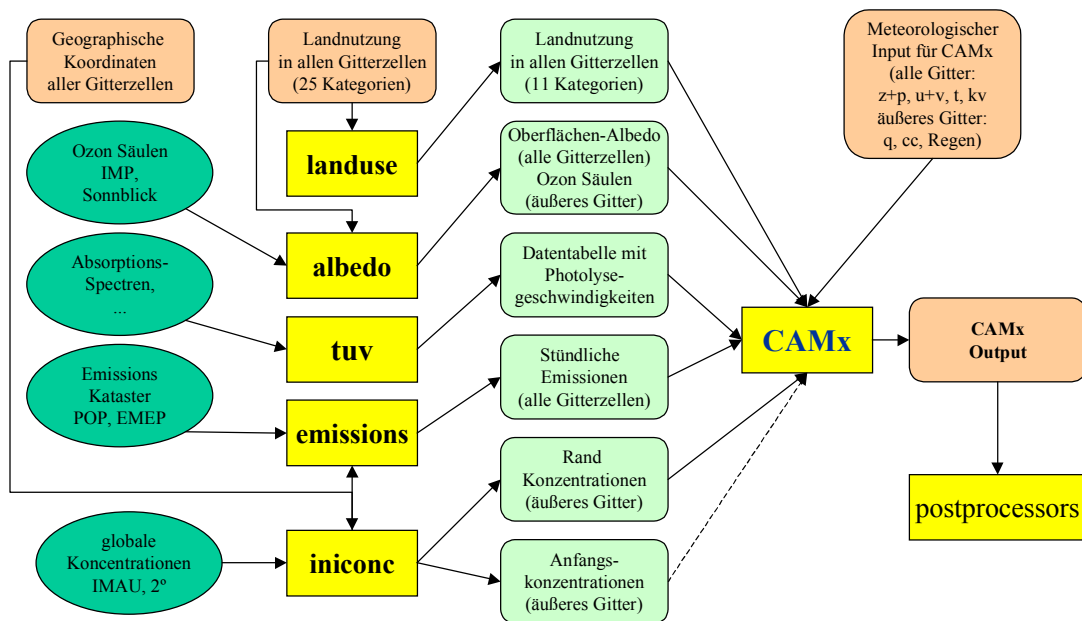


Abb. 2: Datenfluss für das Chemie-Transport-Modell CAMx.

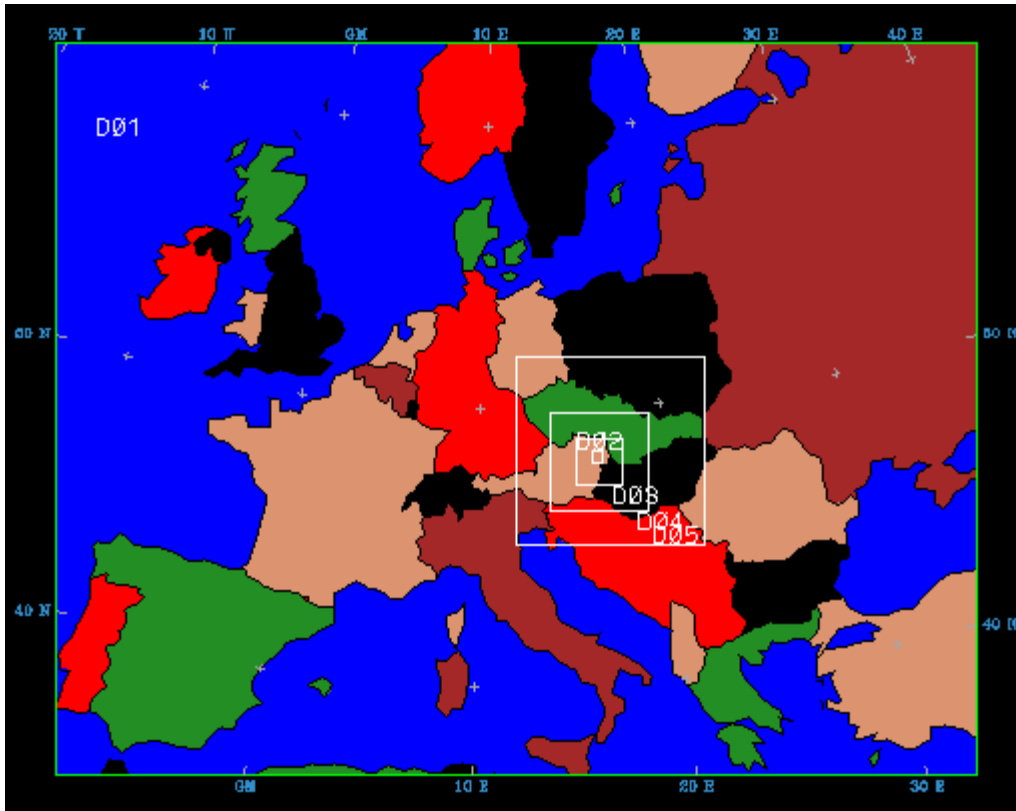


Abb. 3: Nestingstruktur des verwendeten MM5-Modells.

Tabelle 1: Dimensionen der einzelnen Gitter im Modellsystem.

<i>Modell</i>	<i>Gitter</i>	<i>Auflösung</i>	<i>Gitterzellen</i>	<i>Dimension</i>
MM5	1	81 km × 81 km	44 × 35	3564 km × 2835 km
CAMx (input)	1	81 km × 81 km	44 × 35	3564 km × 2835 km
CAMx (output)	1	81 km × 81 km	42 × 33	3402 km × 2673 km
MM5	2	27 km × 27 km	27 × 27	729 km × 729 km
CAMx (input)	2	27 km × 27 km	23 × 23	621 km × 621 km
CAMx (output)	2	27 km × 27 km	21 × 21	567 km × 567 km
MM5	3	9 km × 9 km	42 × 42	378 km × 378 km
CAMx (input)	3	9 km × 9 km	38 × 38	342 km × 342 km
CAMx (output)	3	9 km × 9 km	36 × 36	324 km × 324 km
MM5	4	3 km × 3 km	60 × 60	180 km × 180 km
CAMx (input)	4	3 km × 3 km	56 × 56	168 km × 168 km
CAMx (output)	4	3 km × 3 km	54 × 54	162 km × 162 km

Das MM5 rechnet mit 31 Schichten vom Boden bis 100 hPa. Im Programm CAMx wurde die Zahl der Schichten auf 15 reduziert, die bis zu einer Höhe von 10 km hinaufreichen. Einzelne MM5-Schichten wurden zu einer CAMx-Schicht zusammengefasst. Tabelle 2 zeigt die Höhenauflösung von CAMx. Die vom Chemietransportmodell CAMx berechneten Schadstoffkonzentrationen stellen Mittelwerte der einzelnen Gitterzellen dar.

Für die Topografie wird der Datensatz GTOPO30 vom EROS Data Center des U.S. Geological Survey verwendet. Die Daten liegen global mit einer räumlichen Auflösung von 30 arc sec vor. Das entspricht etwa 0.9 km. Die Daten für die Landnutzung stammen ebenfalls vom U.S. Geological Survey und haben gleichfalls eine räumliche Auflösung von 30 arc sec. Die Datensätze sind leicht zugänglich und können unmittelbar vom MM5-Präprozessor TERRAIN eingelesen werden. Dieses Programm wurde in der Weise modifiziert, dass es zusätzlich Daten ausgibt, die für die CAMx-Präprozessoren benötigt werden (Landnutzung und Lage der Gitterzellen in den einzelnen Modellgittern).

Tabelle 2: Höhenauflösung im CAMx-Modell.

<i>CAMx-Schicht</i>	<i>MM5-σ-Schicht</i>	<i>Höhe über Grund¹</i>	<i>Druck¹ / hPa</i>
1	1	36 m	995
2	2	72 m	990
3	3	110 m	985
4	4	145 m	980
5	5-6	290 m	970
6	7-8	500 m	950
7	9-10	820 m	920
8	11-12	1.2 km	880
9	13-14	1.5 km	850
10	15-16	2.0 km	800
11	17-18	2.9 km	740
12	19-20	4.0 km	650
13	21-22	5.1 km	570
14	23-25	7.1 km	450
15	26-28	10 km	330

¹ mittlerer Wert der Schichtobergrenze

Meteorologische Eingabedaten

Die Rechnungen werden mit meteorologischen Feldern vom European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF, 1995) angetrieben. Es wurde hierfür eine räumliche Auflösung von 1 Grad (etwa 100 bis 111 km) gewählt. Diese Daten liegen in dreistündigem Abstand vor.

Bei den beschriebenen Rechnungen mit MM5 wurden außerdem Windmessungen am Boden aus dem TAKLIS-Messnetz in den Bundesländern Wien, Niederösterreich, Burgenland und Steiermark für Stations-FDDA (siehe unten) benutzt. Alle diese Daten wurden aus dem Archiv der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik beschafft.

Das meteorologische Modell MM5

Für die Rechnungen zu diesem Projekt wurde die Version 3-5-3 (27. August 2002) des mesoskaligen meteorologischen Modells MM5 (Grell et al., 1994) verwendet. Das Modell ist nicht-hydrostatisch und erlaubt eine Vielzahl von Optionen für die zur Verfügung stehenden Berechnungsmethoden und Parameterisierungen. Für die im Zuge dieser Studie durchgeführten Modellrechnungen gelten die folgenden Bedingungen:

- Die Parameterisierungen zur Behandlung der atmosphärischen Grenzschicht und der Bodentemperatur wurde die Option "Eta PBL" mit dem Mellor-Yamada-Schema gewählt (Janjic, 1990 und Janjic, 1994), das die **turbulente kinetische Energie** (TKE) mitberechnet. Dies erlaubt eine entsprechende Berechnung des vertikalen Diffusionskoeffizienten in der Grenzschicht mit dem Folgeprogramm Mm5camx für die Transportrechnungen mit CAMx.
- Das Modell MM5 ermöglicht zwei Methoden zur vierdimensionalen Datenassimilation (FDDA). Mit der Option Gitter-FDDA wird die Rechnung in Richtung auf vorgegebene meteorologische Datenfelder gelenkt. Dies ist sowohl mit den dreidimensionalen Analysen als auch mit Bodenwerten möglich. Mit der Option Stations-FDDA können meteorologische Messwerte vorgegeben werden. In der atmosphärischen Grenzschicht ist Stations-FDDA aber nur mit Windmessungen, nicht mit Temperatur- und Feuchtemessungen möglich.

Bei den für dieses Projekt ausgeführten Rechnungen wurde Gitter-FDDA für das äußere Gitter und Stations-FDDA für das innere Gitter 4 (3 km) angewandt. Hierzu wurden die vorliegenden Daten von der ZAMG durch geeignete Programme in das benötigte binäre Format umgewandelt.

Die MM5-Ausgabedateien müssen für die Benutzung mit dem Chemie-Transport-Modell CAMx umformatiert werden. Dies geschieht mit dem Programm MM5CAMx.

Der Hauptunterschied zwischen den beiden Formaten ist, dass vom MM5 der Wind für die Eckpunkte der Gitterzellen eines sogenannten Arakawa B Gitters berechnet und ausgegeben wird. CAMx benötigt hingegen Daten auf einem Arakawa C Gitter mit den Windinformationen jeweils in der Mitte der Grenzflächen zwischen den Gitterzellen. Die weiteren Werte (Druck, Temperatur, Feuchte, ...) liegen bei beiden Gittern in der Mitte der Gitterzellen. Das Programm MM5CAMx berechnet außerdem einen Diffusionskoeffizienten, der für den vertikalen Austausch im Transportmodell benötigt wird. Aus verschiedenen möglichen Optionen wurde hier in Anlehnung an

Tests in früheren Studien eine Berechnung gewählt, die die turbulente kinetische Energie (TKE) verwendet.

Emissionen

Das Modell CAMx benötigt für jede Gitterzelle in jedem Nest Emissionen. In dieser Studie wurden aus dem Emissionskataster stündliche Werte disaggregiert.

Anthropogene Emissionen

Grundlage für die Berechnung anthropogener Emissionen ist der Emissionskataster für die Länder Österreich, Tschechische Republik, Slowakei und Ungarn, der für das Pannonische Ozon Projekt (POP) im Jahre 1995 erstellt wurde (Winiwarter and Zueger, 1996). Die räumliche Auflösung beträgt 5 km × 5 km. Am IMP wurde dieser Kataster für die Verwendung mit dem Lagrange'schen Chemie-Trajektorienmodell IMPO (Wotawa et al., 1998) mit einer Datenbank für europäische Emissionen basierend auf EMEP-Daten erweitert, die auf Grund von Bevölkerungsdichten auf eine räumliche Auflösung von 6 km × 6 km verfeinert wurde. Tages-, Wochen- und Jahrgänge der Emissionen sind für alle Emissionen vorhanden..

Entsprechend den Verursachergruppen müssen die Kohlenwasserstoffe in die einzelnen Komponenten des jeweils benutzten Chemiemechanismus aufgeteilt werden. Dieses Splitting ist für die beiden in dieser Studie verwendeten Chemiemechanismen (siehe unten) unterschiedlich. Tabelle 3 zeigt, welche Spezies in den beiden Mechanismen emittiert werden.

Tabelle 3: Emissionen für den CBM-IV und den SAPRC99 Mechanismus.

	<i>CBM-IV Emissionen</i>	<i>SAPRC99 Emissionen</i>
<i>anorganisch anthropogen</i>	NO₂, NO, CO	NO₂, NO, CO, SO₂
<i>organisch anthropogen</i>	PAR (Alkan-Gruppen)	ALK1, ALK2, ALK3, ALK4, ALK5 (Alkane unterschiedlicher Reaktivität)
	ETH (Ethen)	ETHE (Ethen)
	OLE (Alken-Gruppen)	OLE1, OLE2 (Olefine unterschiedlicher Reaktivität)
	TOL, XYL (Aromaten unterschiedlicher Reaktivität)	ARO1, ARO2 (Aromaten unterschiedlicher Reaktivität)
	FORM, ALD2 (Aldehyde, Ketone)	HCHO, CCHO, RCHO, MEK (Aldehyde, Ketone)
<i>biogen</i>	ISOP (Isopren)	ISOP (Isopren)
	OLE+8*PAR (Terpene)	TERP (Terpene)
	NO₂, NO	NO₂, NO

NO₂-Emissionen

SAPRC99 from POP inventory by camxemis, BCK, Feb.06,2003

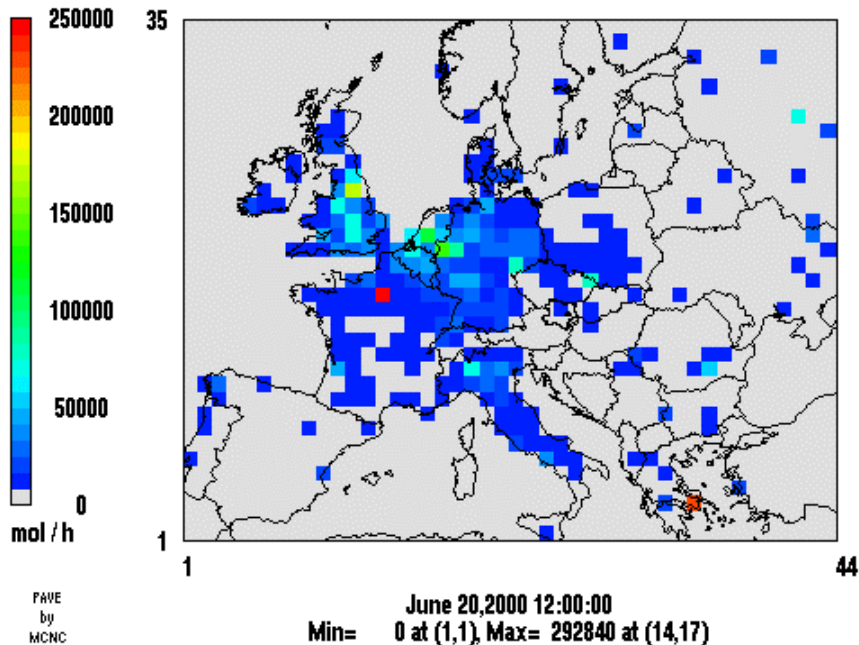


Abb. 4: NO₂-Emissionen am 20. 6. 2000 zwischen 12:00 und 13:00 Uhr MEZ im äußeren Gitter. Die Zahlen in mol/h beziehen sich jeweils auf eine Gitterzelle von 81 km × 81 km Größe.

NO₂-Emissionen

SAPRC99 from POP inventory by camxemis, BCK, Feb.06,2003

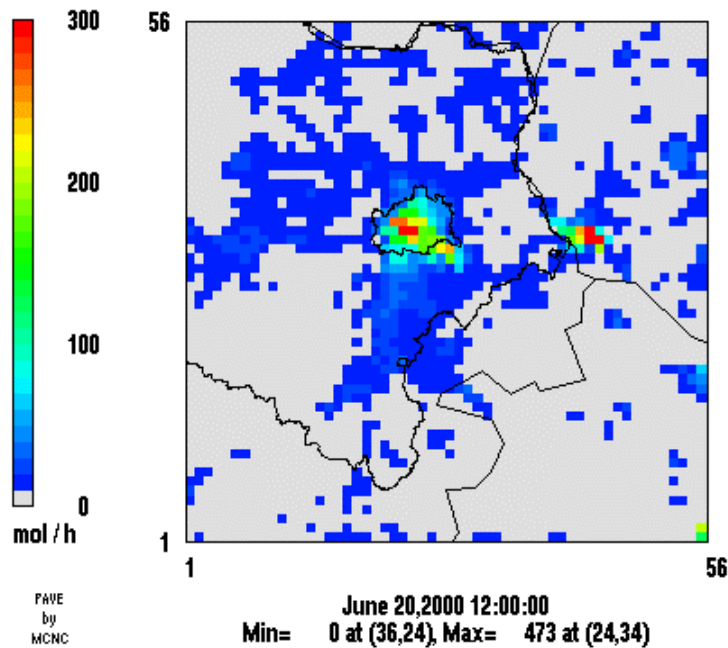


Abb. 5: NO₂-Emissionen am 20. 6. 2000 zwischen 12:00 und 13:00 Uhr MEZ im inneren Gitter. Die Zahlen in mol/h beziehen sich jeweils auf eine Gitterzelle von 3 km × 3 km Größe.

Der Präprozessor für CAMx erstellt für alle Gitterzellen der vier Modellgitter die stündlichen Emissionsdaten. Als Beispiel sind die Emissionen von NO₂ im äußeren Gitter und im inneren Nest zu einem Zeitpunkt in Abbildung 4 bzw. Abbildung 5 dargestellt.

Biogene Emissionen

Neben den anthropogenen Emissionen spielen auch biogene Emissionen für die Bildung von sekundären Schadstoffen eine große Rolle. Für Österreich wird geschätzt, dass etwa ein Drittel der gesamten Kohlenwasserstoffemissionen natürlichen Ursprungs sind (Winiwarter und Fister, 1999).

Im Modellsystem erfolgt die Berechnung der biogenen organischen Emissionen von Isopren und Terpenen mit einem Algorithmus von Guenther et al. (1993). Die biogenen Emissionen von NO und NO₂ werden in Anlehnung an Williams et al. (1987) und Stohl et al. (1996) berechnet. Für die Berechnungen sind die aktuelle Temperatur und die Intensität der Globalstrahlung notwendig, die mit einem speziellen Postprozessor aus dem MM5-Output extrahiert werden. Für die ebenfalls notwendige Landnutzung werden wiederum die Daten vom USGS mit einer Auflösung von 30 arc sec benutzt.

Anfangs- und Randkonzentrationen

Als Anfangskonzentrationen der chemischen Spezies für die Berechnungen dienten Konzentrationsfelder, die mit dem Modell in früheren Rechnungen erstellt worden waren. Dabei wurde ein Tag ausgewählt, an dem die meteorologische Situation über Europa ähnlich war wie am ersten Tag der berechneten Episode (16. 6. 2000). Die in dieser Studie vorgestellten Ergebnisse zeigen (siehe Kapitel über OSAT-Berechnungen), dass die Anfangskonzentrationen im Hauptuntersuchungsgebiet (Raum Wien) nur an den beiden ersten Tagen der Episode einen nennenswerten Einfluss haben.

Als Randkonzentrationen für den Rand des äußeren Gitters wurden Konzentrationen verwendet, die vom Institute for Marine and Atmospheric Research (IMAU) an der Universität Utrecht (Niederlande) zur Verfügung gestellt worden. Sie waren mit einem globalen Chemie-Transportmodell, das auf dem globalen Modell ECHAM aufbaut (Roelofs, and Lelieveld, 2000) berechnet worden.

Photolysegeschwindigkeiten

Die vom Chemiemodell CAMx benötigten Photolysegeschwindigkeiten müssen in einer zuvor berechneten Tabelle bereitgestellt werden, in der für jede Photolysereaktion die Werte für verschiedene solare Zenitwinkel, Höhen über Grund, UV-Albedo des Bodens, atmosphärische Trübung und Gesamtozonsäulen berechnet wurden. Zur Erstellung dieser Tabelle wird von ENVIRON ein Programm bereitgestellt, das auf dem Programm TUV aufbaut. TUV (Madronich and Flocke, 1998) ist auch bei den Autoren erhältlich (<http://www.acd.ucar.edu/TUV>). Dieses Programm erstellt wahlweise Daten für den CBM-IV und den SAPRC99 Mechanismus.

Da Photolysereaktionen hauptsächlich durch UV-Absorption initiiert werden, ist die Gesamtozonsäule für die Berechnung wichtig. In den ausgeführten Rechnungen wurde für das gesamte Modellgebiet ein (sich täglich ändernder) gerundeter, einziger

Wert für die Gesamtozonsäule benutzt. Dieser wurde für die geografischen Koordinaten von Wien der Datenbank des Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) entnommen. An diesem Institut wird aus GOME Satellitendaten mit Hilfe eines Modells täglich global die Ozonsäule vorhergesagt. Die Daten sind seit November 1999 im Internet verfügbar (http://www.knmi.nl/gome_fd/). Die benutzten Daten sind in Tabelle 4 angegeben.

Das Chemie-Transportmodell CAMx

Das Chemie-Transport-Modell CAMx berechnet die Verteilung der chemischen Spezies in den Gitterzellen. Hierbei werden die Emissionen, die chemischen Reaktionen, die Deposition, der Transport und der Eintrag von außen berücksichtigt. In dieser Arbeit wurde die Version 4.02 (Juni 2003) benutzt, die gegenüber früheren Version verschiedene Verbesserungen enthält.

Für die Rechnungen gibt es verschiedene Optionen:

- Zwei-Wege-Nesting. Dieses wurde benutzt und auf alle Gitter angewendet.
- Zwei Transportalgorithmen für horizontale Advektion stehen zur Auswahl. Neben den in dieser Arbeit verwendeten Methode von Bott (1989) steht noch die Piecewise Parabolic Method (PPM) von Colella und Woodward (1984) zur Verfügung.
- Verschiedene Chemiemechanismen (siehe unten)
- Berechnung von Teilchenkonzentrationen (PM) wurde für die beschriebenen Rechnungen nicht benutzt.
- Ozone Source Apportionment Technology (OSAT) und ähnliche Methoden. Hiermit lässt sich für berechnete Ozonkonzentrationen die Herkunft der Vorläufersubstanzen angeben. Außerdem sind Aussagen zur NO_x/VOC-Kontrolle möglich. Diese Techniken wurden für die untersuchten Episoden intensiv angewendet.

Tabelle 4: Ozongesamtsäulen in DU für Wien während der berechneten Episode.

	KNMI	<i>Modell</i>
16.6.2000	336	340
17.6.2000	370	370
18.6.2000	342	340
19.6.2000	316	320
20.6.2000	322	320
21.6.2000	318	320
22.6.2000	313	310
23.6.2000	307	310
24.6.2000	336	340
25.6.2000	327	330

Tabelle 5: Vergleich der beiden Chemiemechanismen.

	<i>CBM-IV</i>	<i>SAPRC99</i>
Spezies	33	56
Reaktionen	96	211
Photolysen	13	31

Chemische Mechanismen

Im Programm CAMx sind verschiedene chemische Mechanismen implementiert. In dieser Studie wurde sowohl der CBM-IV Mechanismus (Gery et al., 1989), vor allem für die Berechnungen mit den Analysetechniken zu den Ozonquellen (siehe unten), als auch der SAPRC99 Mechanismus (Carter, 2000) verwendet. Tabelle 5 vergleicht den Umfang dieser verschiedenen chemischen Mechanismen.

Der CBM-IV Mechanismus mit einer aktualisierten Isopren-Chemie (Carter, 1996) ist der einfachere der beiden Mechanismen und erfordert weniger Rechenzeit. Für diesen Mechanismus sind die Analysetechniken zur Identifizierung der Ozonquellen (OSAT, siehe unten) implementiert. Die geringe Zahl an chemischen Spezies wird in CBM-IV dadurch erreicht, dass Kohlenwasserstoffe entsprechend ihren funktionellen Gruppen in Teilspezies aufgespalten werden und diese an den chemischen Reaktionen teilnehmen. Teilspezies sind z. B. PAR für einen gesättigten Baustein einer Kohlenstoffkette (also z. B. CH₃- oder -CH₂-) oder OLE für den Bereich einer Kohlenstoff-Doppelbindung (z. B. -CH=CH-).

Der SAPRC99 Mechanismus ist neueren Datums. In ihm geschieht das Lumping der Kohlenwasserstoffe dadurch, dass Verbindungen mit ähnlichen chemischen Reaktionen und ähnlicher Reaktivität zu Einzelverbindungen zusammengefasst werden. Dies führt jedoch trotzdem zu einer größeren Anzahl von Spezies als bei CBM-IV. So enthält der Mechanismus z. B. fünf verschiedene gesättigte Alkane mit unterschiedlicher Kohlenstoff-Kettenlänge.

Modellläufe

Mit den beschriebenen Modellen wurden die meteorologischen Bedingungen sowie die Schadstoffverteilung und -entwicklung in der Episode zwischen dem 16. und 25. Juni 2000 berechnet. Das MM5 wurde am ersten Tag der Episode um 0:00 Uhr (UTC) mit den Analysen des ECMWF gestartet und kontinuierlich bis zum Ende der Episode gerechnet. Hierbei wurden dreistündige ECMWF-Felder für Gitter-FDDA und einstündige Messwerte für Stations-FDDA berücksichtigt. Die Ausgabe der meteorologischen Felder erfolgte stündlich.

Die stündlichen MM5-Ergebnisse dienten als Eingabe für die verschiedenen Modellläufe mit CAMx. Die CAMx-Ausgabe erfolgte ebenfalls stündlich. In einzelnen wurden mit CAMx Läufe mit den beiden Chemiemechanismen, mit der OSAT-Technik und mit verschiedenen Emissionsszenarien, jeweils über die gesamte betrachtete Episode ausgeführt.

Tabelle 6: Benötigte Rechenzeit für die Modellierung eines Tages.

	<i>Rechenzeit</i>
Präprozessoren	< 10 min
MM5 (Gitter 1-4)	~7 h
CAMx (CBM-IV, Bott., Gitter 1-4)	~ 1 h
CAMx (SAPRC99, Bott., Gitter 1-4)	~ 4 h
CAMx + OSAT (CBM-IV, Bott, Gitter 1-4)	~ 5 h
Postprozessoren	beliebig

Alle Rechnungen erfolgten auf einer PC-basierten Workstation des IMP unter dem Betriebssystem LINUX. Alle Programme waren mit den Compilern der Firma Portland Group Inc. compiliert. Die benötigten Rechenzeiten sind in Tabelle 6 aufgeführt. Für die grafische Aufarbeitung der Ergebnisse wurden die in Binär-Dateien vorliegenden Modellergebnisse zur Verwendung mit der Plotsoftware entsprechend umgewandelt.

Validierung der Modellrechnungen

Meteorologische Bedingungen während der Episode

Die Episode vom 16. bis 25. Juni 2000 wurde meteorologisch dadurch bestimmt, dass sich ein Keil des Azorenhochs zunächst über Europa nach Osten ausbreitete und sich gegen Ende der Episode wieder zurückzog. Im Raum Wien führte dies ab dem 16. Juni zu hochsommerlichem Schönwetter. Eine Kaltfront wanderte in dieser Zeit langsam von den britischen Inseln in Richtung Südosten und führte mit ihrem Eintreffen im Wiener Raum am 23. Juni zu einer Beendigung der Schönwetterperiode. Abbildung 6 zeigt die Höhe der 500 hPa Druckfläche an verschiedenen Tagen während der beschriebenen Zeit. Die Darstellungen wurden mit den MM5-Ergebnissen für das äußere Gitter erstellt.

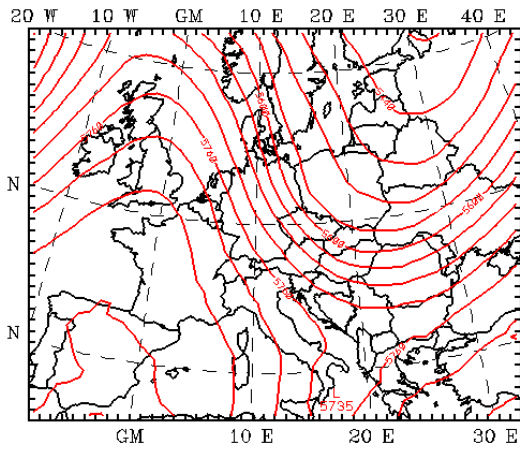
Die Abbildungen 7 und 8 zeigen den Vergleich meteorologischer Messungen mit den Ergebnissen des Modells MM5 für die betrachtete Episode. In Abb. 7 sind die Mittelwerte der fünf Wiener Stationen Hohe Warte, Innere Stadt, Donaufeld, Unterlaa und Pumpwerk Donauinsel dargestellt. Für Abb. 8 wurden vier Stationen im Norden des Gitters 4 herangezogen (Langenlebar, Leiser Berge, Retz/Windmühle und Stockerau).

In Nordostösterreich stiegen in dieser Episode die täglichen Temperaturmaxima bis zum 22. 6. jeden Tag an. Ab dem 23. 6. wurden nach dem Eintreffen der Kaltfront wieder niedrigere Temperaturen gemessen. Die Windgeschwindigkeiten lagen am 16. und 17. 6. sowie ab dem 23. 6. oberhalb von 4 m/s. An diesen Tagen herrschte Wind aus nordwestlicher bzw. westlicher Richtung vor. Zwischen dem 18. 6. und dem 22. 6. waren die Windgeschwindigkeiten niedriger. Der Wind drehte zunächst auf östliche bzw. südöstliche Richtungen. Am 21. 6. herrschte tagsüber Wind aus Nordwest und am 22. 6. drehte der Wind auf Westen.

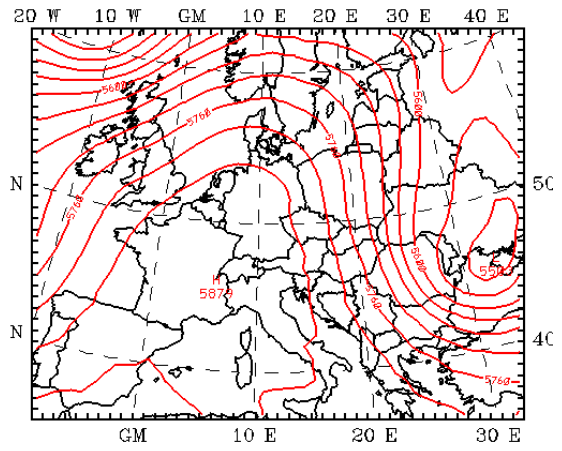
Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen können im Modell MM5 mit Hilfe der vierdimensionalen Datenassimilation an vorhandene Messwerte angepasst werden. Diese Option wurde in den Rechnungen für die Modellierung des Gitters 4 benutzt, wobei aus den vorhandenen Stationsmessungen nur diejenigen ausgewählt wurden, die in den Messwerten keine deutliche tageszeitliche Periodizität zeigten, welche möglicherweise durch lokale orographische Gegebenheiten verursacht wird. In den Bereichen Wien und Nord-Niederösterreich wurden die oben genannten Stationen ausgewählt. Im Vergleich mit früheren Rechnungen (Krüger und Schmittner, 2002) wurde in dieser Arbeit ein höherer Nudging-Koeffizient bei den Rechnungen benutzt. Daher stimmen die Ergebnisse der Rechnungen sehr gut mit den Messergebnissen überein.

Auch der Verlauf der Temperatur wird vom Modell gut wiedergegeben. Bei den Stationen nördlich von Wien liegt jedoch das berechnete Temperaturmaximum an manchen Tagen niedriger als die Messwerte. An den Wiener Messstationen ist das nicht der Fall. Zu niedrige Temperaturen können sich in verschiedener Weise auf die berechneten Schadstoffkonzentrationen auswirken. Die Geschwindigkeit vieler chemischer Reaktionen wird etwas abgesenkt und die Emission der biogenen Kohlenwasserstoffe wird erniedrigt. Außerdem könnte eine zu niedrige Temperatur auch Auswirkungen auf den vertikalen Diffusionskoeffizienten haben, der im Modell aus der turbulenten kinetischen Energie (TKE) berechnet wird. Dies würde dann die Durchmischung, bzw. die Verdünnung der Emissionen verfälschen.

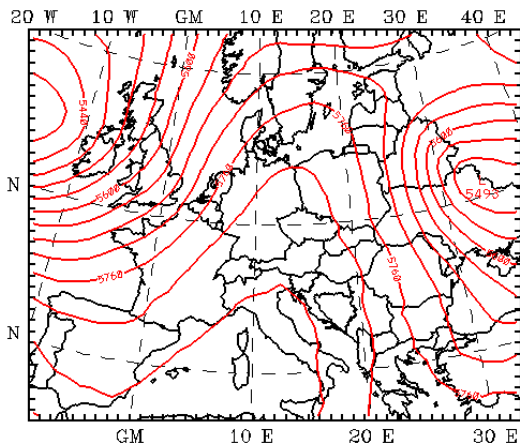
17. Juni 2000, 0:00 Uhr UT



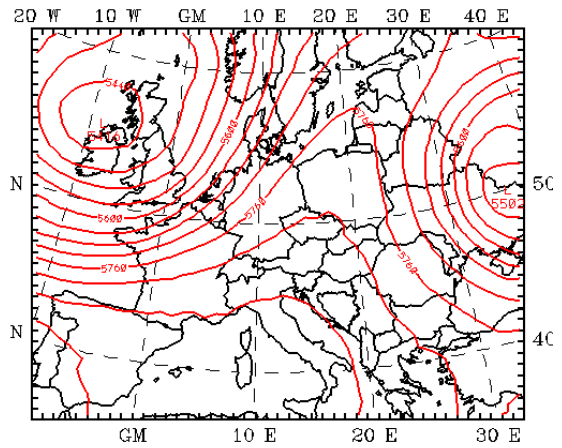
19. Juni 2000, 0:00 Uhr UT



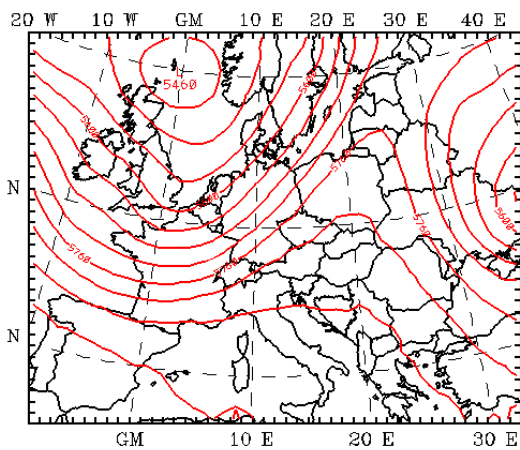
21. Juni 2000, 0:00 Uhr UT



22. Juni 2000, 0:00 Uhr UT



23. Juni 2000, 0:00 Uhr UT



25. Juni 2000, 0:00 Uhr UT

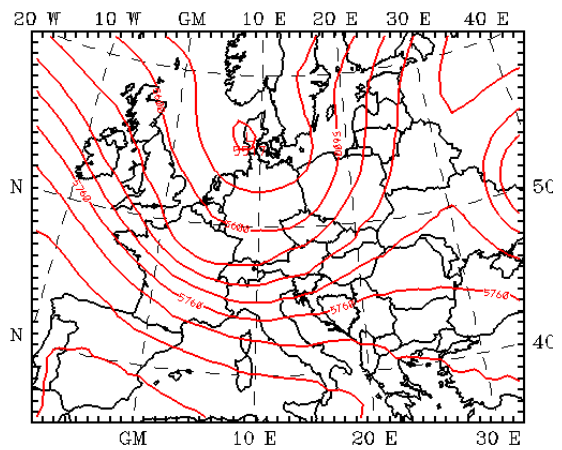


Abb. 6: 500 hPa geopotentielle Fläche an sechs Tagen während der betrachteten Episode (aus MM5-Ergebnissen).

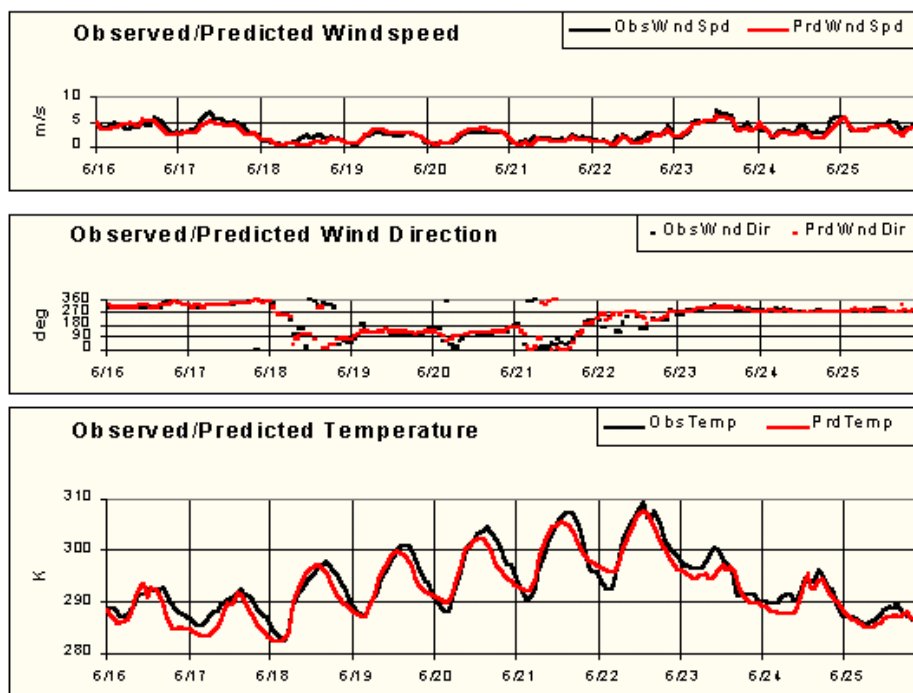


Abb. 7: Vergleich der meteorologischen Modellierung mit Messwerten für fünf Wiener Stationen.

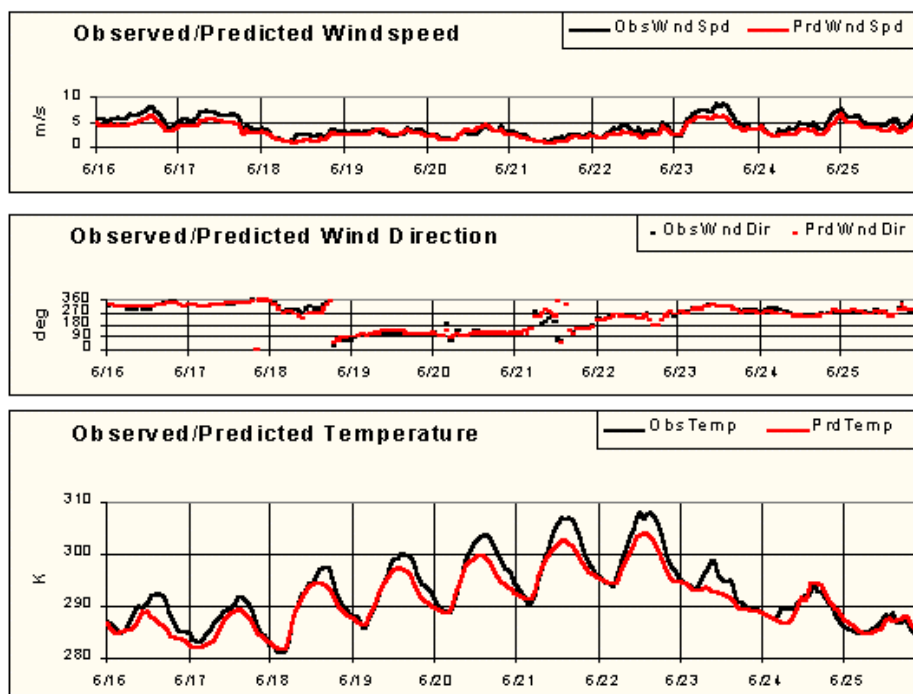


Abb. 8: Vergleich der meteorologischen Modellierung mit Messwerten für vier Stationen im Norden des Gitters 4.

Der generelle Verlauf der Temperatur wird jedoch an allen Stationen richtig modelliert. Daher wird die Wiedergabe der meteorologischen Bedingungen im Modell als zufriedenstellend angesehen.

Der Verlauf der Schadstoffkonzentrationen während der Episode

In Abbildung 9 ist der Verlauf des Ozon-Volumenmischungsverhältnisses an den Stationen Kittsee, Pillersdorf und Krems während der betrachteten Episode dargestellt. Gleichzeitig sind die Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem CBM-IV Mechanismus und dem SAPRC99 Mechanismus für die entsprechenden Gitterzellen des Gitters 4 (3 km) eingezeichnet. Der Wert der Informationsschwelle von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ist durch die Linie bei 90 ppbv angedeutet.

Die Messungen zeigen während dieser Episode bis zum 22. Juni einen täglichen Anstieg der Ozonmaxima. Am 20. Juni wird in Krems und am 21. und 22. Juni wird in Kittsee und in Pillersdorf der Wert der Informationsschwelle überschritten. Die Werte in Kittsee überschritten am 22. Juni 2000 sogar die ältere Vorwarnstufe I ($> 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in drei Stunden). Mit dem Eintreffen der Kaltfront am 23. Juni nehmen die Ozonwerte wieder deutlich ab.

Der SAPRC99 Mechanismus berechnet meist etwas höhere Werte in den täglichen Ozonmaxima als der CBM-IV Mechanismus. Beide Mechanismen zeigen aber einen ziemlich ähnlichen Verlauf. Am 21. und 22. Juni wird die Überschreitung der Informationsschwelle in Kittsee und Pillersdorf zumindest in den SAPRC99-Rechnungen richtig vorhergesagt. Für den 19. und besonders den 20. Juni, den Tagen, an denen Südostwind herrschte, ist die berechnete Konzentration jedoch deutlich niedriger als in der Messung. Als Grund wird angenommen, dass die Vorbelastung der Luft bei dieser Windrichtung nicht richtig modelliert wird. Die Ursache könnten Fehler in den Emissionen in Südosteuropa sein.

Am Vergleich der Modellergebnisse mit den Messungen an der Station Krems fällt auf, dass die nachts auftretenden Ozonminima an den meisten Tagen vom Modell nicht richtig wiedergegeben werden. Dieses Ergebnis ist in den Modellrechnungen typisch für kleinere Städte und tritt z. B. auch an den Stationen Tulln und Stockerau auf. Die niedrigen Werte in der Nacht werden dadurch verursacht, dass lokale Emissionen von NO_x durch die Reaktion von NO mit Ozon das Ozon abbauen. Diese Emissionen werden jedoch im Modell vom Emissionskataster mit 5 km horizontaler Auflösung über eine größere Fläche verteilt und damit verdünnt. Daher kann das Modell diesen Effekt in kleineren Städten nicht so gut modellieren wie im größeren urbanen Gebiet von Wien. Bessere Ergebnisse der Modellierung bei Nacht wären an diesen Stationen mit einem höher aufgelösten Emissionskataster zu erwarten, der die höheren Emissionen innerhalb von Ortschaften detailliert darstellt.

Abbildung 10 zeigt für die Wiener Station Hohe Warte entsprechende Darstellungen für die Luftschadstoffe Ozon, NO_2 und NO. An den meisten Tagen stimmt hier die CBM-IV Rechnung besser mit den Ozonmessungen überein als die SAPRC99 Rechnung. Am 19. und 20. Juni sind die berechneten Werte für Ozon ebenfalls zu niedrig. Die nächtlichen Minima werden vom Modell aber besser wiedergegeben als in Krems.

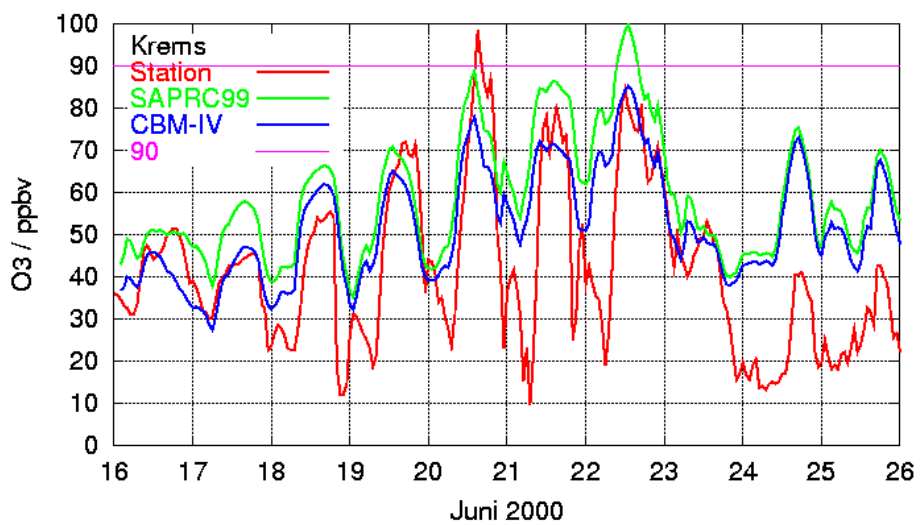
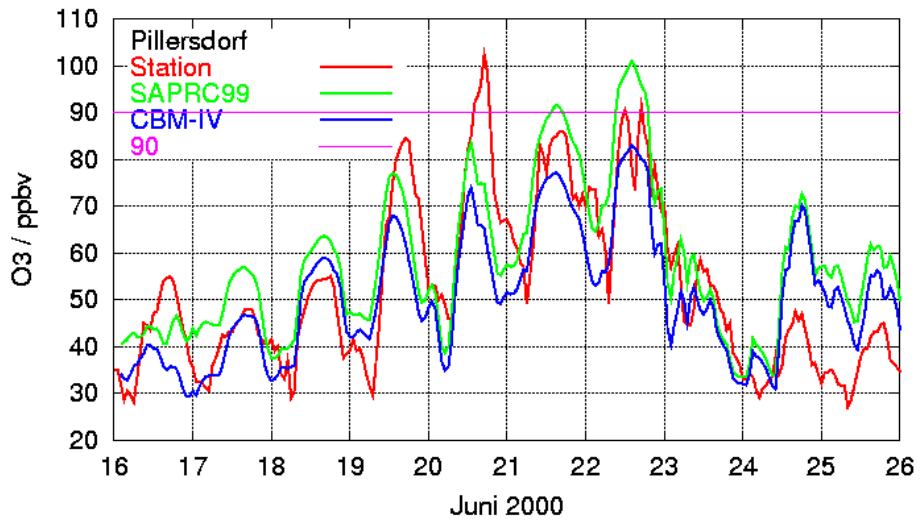
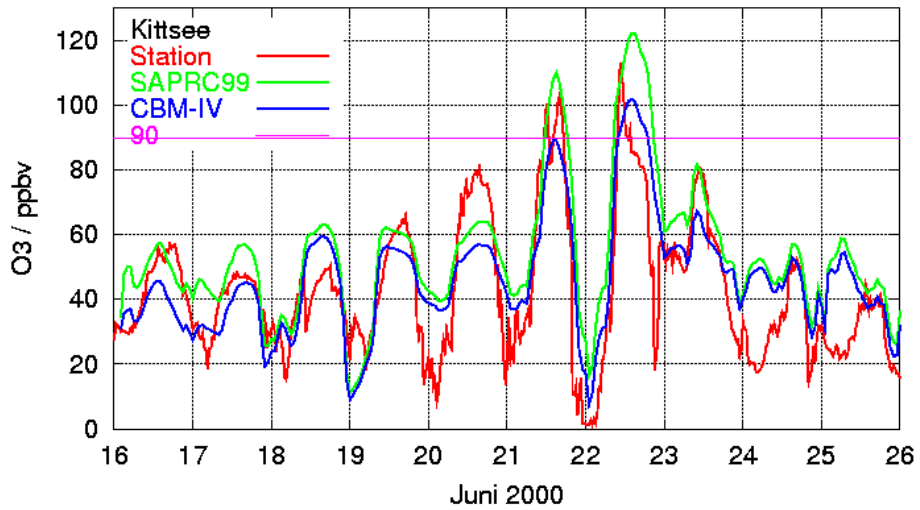


Abb. 9: Stündliches Volumenmischungsverhältnis von Ozon, an den Stationen Kitsee, Pillersdorf und Krems. Jeweils gemessene Werte und Modellrechnungen mit dem CBM-IV und dem SAPRC99 Chemiemechanismus.

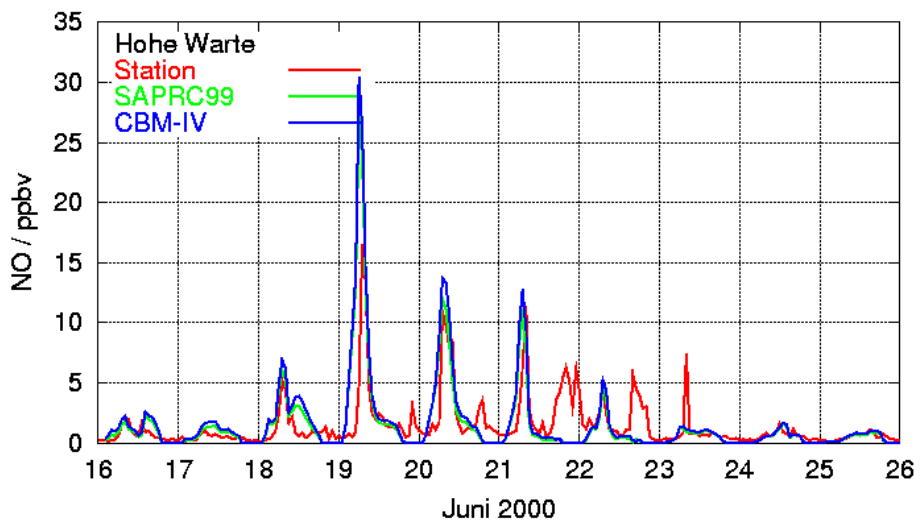
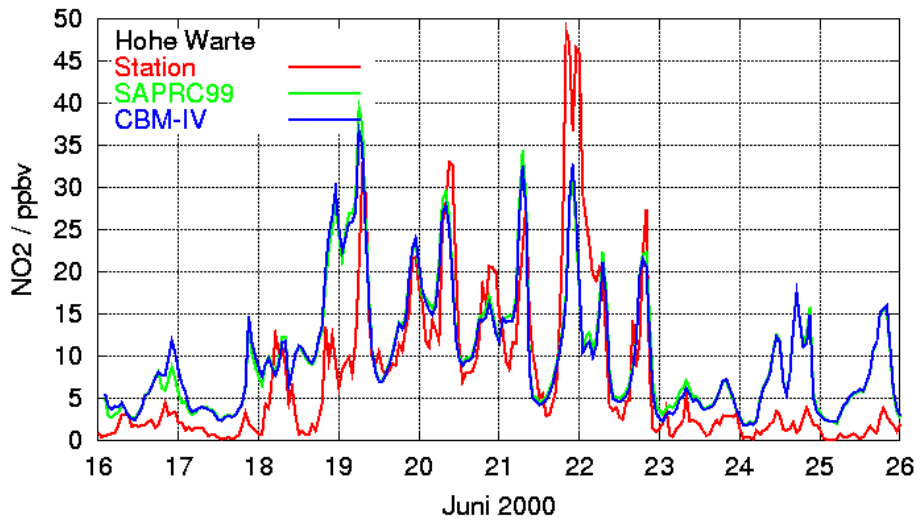
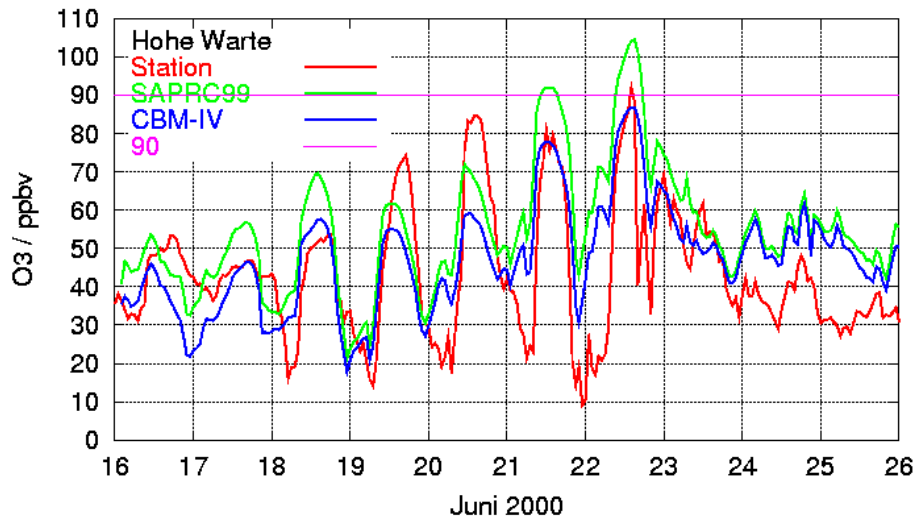


Abb. 10: Stündliche Volumenmischungsverhältnisse von Ozon, NO₂ und NO an der Station Hohe Warte. Jeweils gemessene Werte und Modellrechnungen mit dem CBM-IV und dem SAPRC99 Chemiemechanismus.

Der Vergleich der Zeitreihen der primären Luftschadstoffe NO_2 und NO in Wien zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung zwischen Modell und Messung. Beide Chemiemechanismen zeigen fast gleiche Ergebnisse. Die Lage der Konzentrationsspitzen wird überwiegend gut modelliert. Da die Konzentration der primären Schadstoffe aber stärker von lokalen Emissionen abhängt als die Ozonkonzentration, kann eine genauere Übereinstimmung nicht erwartet werden.

Scatter-Plots

Die Übereinstimmung von Messung und Modell lässt sich auch mit sogenannten Scatterplots vergleichen, bei denen die berechneten Werte gegen die gemessenen aufgetragen werden. Abbildung 11 zeigt derartige Darstellungen für eine Reihe von Stationen und die Rechnungen mit den beiden Chemiemechanismen. Die Modellergebnisse wurden jeweils dem Nest 4 (3 km) entnommen. Neben den Werten sind die Linie mit 1:1 Übereinstimmung und Linien mit einer Abweichung von jeweils einem Faktor 2 eingezeichnet.

An der ländlichen Station Pillersdorf ist die Übereinstimmung sehr gut. Dies gilt besonders für den CBM-IV Mechanismus auch für die entlegene Station Forsthof.

Die anderen Stationen zeigen eine stärkere Streuung. Die größten Abweichungen zwischen Messung und Modell treten jedoch im Bereich niedriger Konzentrationen auf, während sich bei den für die Beurteilung der Luftgüte wichtigeren hohen Konzentrationen die Verteilung überwiegend im Bereich der 1:1 Linie bewegt. Die schlechte Übereinstimmung bei niedrigen Messwerten tritt vor allem nachts auf. Im vorangegangenen Abschnitt war am Beispiel Krems bereits erklärt worden, dass die Ursache lokale NO_x -Emitenten sind, deren hohes NO_x -Konzentrationsniveau mit der räumlichen Auflösung des Modells nicht erfasst wird.

Statistische Berechnungen

Zur Beurteilung der Güte der Modellierung im gesamten Modellgitter 4 wurde die Standardabweichung zwischen den Messungen und den Modellergebnissen für alle zur Verfügung stehenden Stationen in diesem Gitter, die auch Ozon gemessen haben, berechnet. Die Ergebnisse sind für beide benutzten Chemiemechanismen in Tabelle 7 aufgelistet. Es wurde jeweils der Korrelationskoeffizient sowie der Standardfehler der Voraussage $s_{y,x}$ bestimmt.

Da, wie in den Scatterplots gezeigt, bei vielen Stationen die größten Abweichungen bei den nächtlichen niedrigen Ozonwerten auftraten, die für die Beurteilung der Luftgüte von geringem Interesse sind, wurden die Korrelation und der Standardfehler nicht nur jeweils für alle Werte berechnet, sondern auch für diejenigen Werte, bei denen der Ozonmesswert oberhalb von 40 ppbv lag. Die so berechneten Werte sind ein besseres Maß für die Güte des Modells, wenn dieses zur Luftgütebeurteilung eingesetzt werden soll.

Bis auf wenige Ausnahmen liegt der Korrelationskoeffizient bei allen Stationen und für beide Chemiemechanismen zwischen 0.6 und 0.8, der Standardfehler variiert um den Wert 10 ppbv. Der SAPRC99 Mechanismus zeigt eine etwas bessere Korrelation, dafür aber auch einen geringfügig höheren Fehler. Werden nur die Zeiten betrachtet, an denen der Ozonmesswert über 40 ppbv liegt, wird die Korrelation an vielen Stationen deutlich besser und der Standardfehler meist ein wenig kleiner.

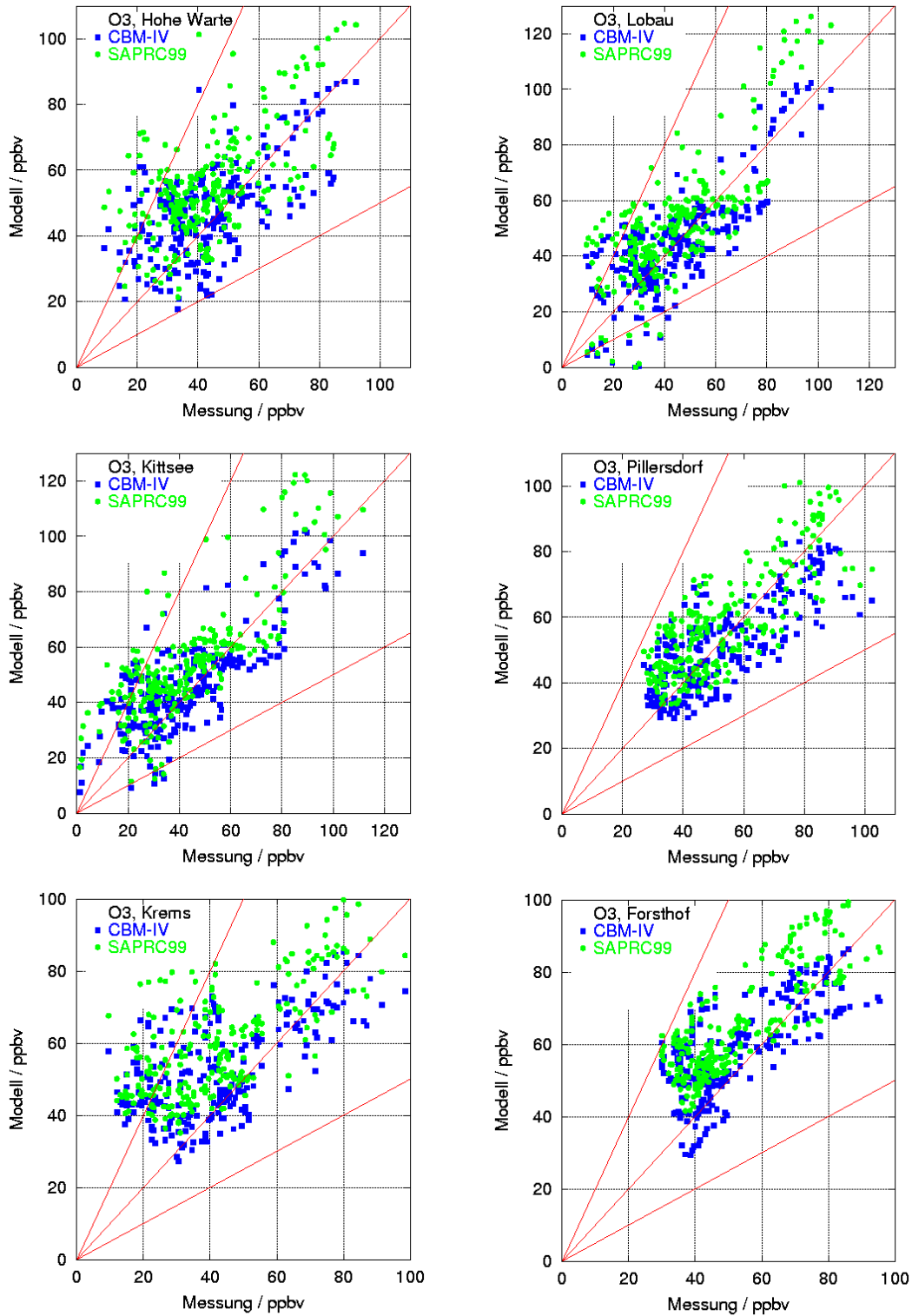


Abb. 11: Vergleich des gemessenen und berechneten O₃-Volumenmischungsverhältnisses an den Luftgütemessstellen Stephansdom, Lobau, Kittsee, Pillersdorf, Krems und Forstthof für beide benutzten Chemiemechanismen.

Tab. 7: Korrelationskoeffizient und Standardfehler der berechneten Ozonwerte im Vergleich mit Messwerten.

<i>O3</i>	<i>CBM-IV (alle)</i>		<i>CBM-IV (>40)</i>		<i>SAPRC99 (alle)</i>		<i>SAPRC99 (>40)</i>	
	<i>r</i>	<i>S_{v,x}</i>	<i>r</i>	<i>S_{v,x}</i>	<i>r</i>	<i>S_{v,x}</i>	<i>r</i>	<i>S_{v,x}</i>
Illmitz	0.59	11.7	0.72	10.7	0.64	13.2	0.75	11.8
Kittsee	0.79	11.1	0.81	10.2	0.8	12.7	0.81	12.1
Oberwart	0.46	11.1	0.77	8.4	0.58	11.2	0.78	8.7
Bad Voeslau	0.65	9.1	0.7	9.1	0.75	8.8	0.75	9.1
Biedermannsdorf	0.48	11.6	0.69	9.6	0.53	12.6	0.74	10.1
Dunkelsteinerwald	0.73	8.6	0.69	8.6	0.8	8.5	0.74	9
Forsthof	0.74	8.9	0.8	8	0.82	8.2	0.84	8.1
Gänsersdorf	0.74	10.1	0.8	9.2	0.75	11.8	0.8	11.1
Hainburg	0.76	10.6	0.81	9.9	0.79	12	0.81	12.1
Irnfritz	0.63	9.9	0.7	9.1	0.72	10.1	0.75	9.8
Klosterneuburg	0.66	10.1	0.69	10.6	0.72	10.7	0.72	11.4
Krems	0.62	10.3	0.69	9.3	0.68	10.7	0.72	10.1
Mistelbach	0.77	8.5	0.76	8.6	0.79	9.6	0.76	10.4
Mödling	0.62	9.7	0.73	8.6	0.69	10	0.78	8.9
Pillersdorf	0.77	8.6	0.73	9	0.8	9.7	0.75	10.4
Schwechat	0.73	12.8	0.84	8.7	0.75	14.6	0.83	10.8
Stixneusiedl	0.79	11.1	0.83	10	0.82	12.5	0.82	12.3
Stockerau	0.6	11.2	0.66	10.7	0.64	12.4	0.68	12.5
St. Pölten	0.58	11.4	0.74	10.4	0.65	11.9	0.77	10.4
Streithofen	0.71	9.4	0.7	9.4	0.76	9.5	0.73	10.1
Ternitz	0.53	10.9	0.54	11.6	0.67	10.3	0.63	11.1
Tulln	0.6	10.6	0.73	9.6	0.64	11.8	0.75	10.7
Wiesmath	0.68	9.2	0.77	8.3	0.78	8.5	0.84	7.7
Wiener Neustadt	0.56	10.1	0.65	9.9	0.67	10.1	0.71	9.8
Wolkersdorf	0.72	9.4	0.77	8.9	0.76	10.4	0.75	11
Hermannskogel	0.64	10.3	0.71	9.9	0.72	10.6	0.74	11.1
Hohe Warte	0.6	11.2	0.63	11.8	0.63	12.6	0.64	13.5
Laaer Berg	0.63	13.1	0.74	9	0.66	14.6	0.75	11.2
Lobau	0.78	11.8	0.82	10.3	0.79	13.9	0.81	13.2
Stephansdom	0.7	11.2	0.79	8.8	0.7	13.1	0.79	10.8
Mittelwert	0.66	10.5	0.73	9.5	0.72	11.2	0.76	10.6

Bei der Beurteilung dieser statistischen Größen muss berücksichtigt werden, dass in die Berechnung nicht nur der Fehler der Rechnung sondern auch der Fehler der Messwerte eingeht, der auf der Präzision und der Abweichung der Messinstrumente beruht. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Messung die Werte an Punkten repräsentiert während das Modell den Mittelwert über die Fläche der jeweiligen Gitterzelle berechnet (9 km² im Fall von Gitter 4).

Untersuchungen zu den Quellen des Ozons

Das Modell CAMx bietet verschiedene Möglichkeiten an, die Herkunft des während des Modelllaufs gebildeten Ozons zu analysieren. In dieser Studie wurden die Techniken OSAT (Ozone Source Apportionment Technology) und GOAT (Geographic Ozone Assessment Technology) angewandt.

Für diese Techniken wird das Modellgebiet in verschiedene Emissionsgebiete eingeteilt. Außerdem werden Zeitabschnitte für die Emissionen festgelegt. Für jedes Emissionsgebiet und jedes Zeitintervall werden dann vom Modell jeweils neue virtuelle Tracer eingeführt, die parallel zu den eigentlichen Tracern transportiert werden. Die virtuellen Tracer zu den Emissionsgebieten stehen für die Ozonvorläufersubstanzen Stickoxide und Kohlenwasserstoffe sowie für das Ozon, das entweder aus den Stickoxiden eines Emissionsgebiets und eines Zeitintervalls oder entsprechend aus den jeweiligen Kohlenwasserstoffen gebildet wurde. Der Transport durch die Ränder des Modells sowie die Anfangskonzentrationen werden berücksichtigt. Die Menge an Tracern ändert sich in jedem Zeitschritt entsprechend den ablaufenden chemischen Reaktionen, den Emissionen und der Deposition.

Die beiden verwendeten Technologien unterscheiden sich wie folgt. Bei der GOAT-Technik wird ungeachtet der Herkunft der Vorläufersubstanzen aufgezeichnet über welchem Emissionsgebiet die chemische Ozonbildung stattfindet. Bei OSAT wird die Mitwirkung von Stickoxiden oder Kohlenwasserstoffen aus einem Quellgebiet an der Ozonbildung für die Bildung der Ozontracer gezählt. Hierbei wird unterschieden, ob die Ozonbildung in einem NO_x - oder einem VOC-kontrollierten Regime abläuft. Die unterschiedliche Reaktivität der Kohlenwasserstoffe geht in einer einfachen Parameterisierung in die Rechnung ein.

Der Output eines Modellruns mit einer der verwendeten Technologien ist durch die vielen zusätzlichen Tracer sehr groß. Alle in diesem Kapitel beschriebenen Rechnungen wurden mit dem CBM-IV Chemiemechanismus und dem Algorithmus von Bott für den horizontalen Transport gerechnet.

Zur Unterscheidung von NO_x - und VOC-kontrollierten Regimen

Die Ozonbildung in der troposphärischen Grenzschicht läuft in der Regel durch das Zusammenspiel zweier chemischer Reaktionszyklen in Gegenwart von Kohlenwasserstoffen und NO_x ab. Zum einen werden Kohlenwasserstoffe (VOC) oder aus ihnen entstandene Reaktionsprodukte durch OH-Radikale oxidiert, wobei nach mehreren Reaktionsschritten organische Peroxyradikale oder HO_2 entstehen. Reagieren diese mit einem Reduktionsmittel bilden sich neben anderen Reaktionsprodukten die OH-Radikale zurück, so dass diese Reaktionen erneut ablaufen können.

Der zweite Zyklus ist die Oxidation von NO zu NO_2 und die anschließende photolytische Zersetzung, wobei neben dem rückgebildeten NO auch Sauerstoffatome entstehen. Diese bilden dann zusammen mit Luftsauerstoff (O_2) das Ozon. Wenn die Oxidation von NO durch die Peroxyradikale oder das HO_2 aus dem ersten Zyklus geschieht, wirken beide Zyklen zusammen und führen zu einer Ozonbildung.

Ozonbildung in einem VOC-kontrollierten Regime bedeutet, dass mehr NO_x vorliegt als durch die bei der Kohlenwasserstoffoxidation entstandenen Peroxide oxidiert

werden kann. In diesem Fall haben Änderungen der NO_x -Konzentration (z.B. durch Emissions-Reduktions-Massnahmen) kaum Einfluss auf die Ozonbildung, während sich Änderungen der Kohlenwasserstoffkonzentration stark auswirken. In der Atmosphäre kommen VOC-kontrollierte Regimes vorwiegend in der Nähe urbaner Gebiete vor, da hier die NO_x -Emissionen höher sind als in anderen Gebieten. OSAT zählt in einem solchen Regime nur die Kohlenwasserstoffe aus den Quellgebieten für die Ozonbildung.

Im umgekehrten Fall der NO_x -Kontrolle, die vorwiegend in ländlichen oder entlegenen Gebieten auftritt, liegen von der Kohlenwasserstoffoxidation mehr Peroxide vor, als für die Oxidation von NO zu NO_2 benötigt wird. Änderungen der NO_x Konzentration können dann die Ozonbildung verändern, während sich Änderungen der Kohlenwasserstoffkonzentration kaum auswirken. In einem derartigen Regime zählt OSAT nur das NO_x aus den Quellgebieten für die Ozonbildung. Die Ergebnisse von OSAT lassen sich daher einfach für eventuelle Reduktionsmaßnahmen zu interpretieren.

Die Aufteilung in die Regimes geschieht im Modell CAMx in Anlehnung an Sillman (1995) entsprechend dem Verhältnis der Produktionsraten von H_2O_2 und HNO_3 . In einem VOC-kontrollierten Regime liegt NO_x im Überschuss vor und die HNO_3 -Produktionsrate P_{HNO_3} ist hoch, während in einem NO_x -kontrollierten Regime auf Grund des Überschusses an Peroxiden, die bei der VOC-Oxidation entstanden sind, die H_2O_2 -Bildungsrate $P_{\text{H}_2\text{O}_2}$ hoch ist. OSAT definiert ein NO_x -kontrolliertes Gebiet, wenn $P_{\text{H}_2\text{O}_2} / P_{\text{HNO}_3} > 0.35$.

In der Untersuchung von Kumar und Lurman (1997) zur OSAT-Technik wird hingegen ein kleinerer Grenzwert zwischen 0.05 und 0.2 empfohlen. Auch Untersuchungen der NO_x /VOC-Kontrolle in verschiedenen Gebieten in Europa (Hammer et al., 2001; Vogel et al., 2001) zeigen für den Indikator $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{HNO}_3]$ etwas geringere Werte als von Sillman (1995) für amerikanische Verhältnisse angegeben. Für eine genauere Untersuchung der NO_x /VOC-Sensitivität im Wiener Raum müssten verschiedene Schwellwerte des Indikators getestet werden und Schwellwerte durch mehrere Modellläufe mit unterschiedlichen Emissionsszenarien bestimmt werden. In dieser Studie wurde jedoch weiterhin der Wert von $P_{\text{H}_2\text{O}_2} / P_{\text{HNO}_3} > 0.35$ benutzt. Ein niedrigerer Wert für $P_{\text{H}_2\text{O}_2} / P_{\text{HNO}_3}$ als Grenze zwischen NO_x - und VOC-kontrolliertem Regime würde zu einer Höherbewertung des NO_x -Anteils führen. Wie weiter unten erläutert, haben die Ergebnisse der OSAT-Technik auf Grund der nichtlinearen Zusammenhänge bei der Ozonbildung nur halbquantitativen Charakter.

Die Einteilung in Quellgebiete

Eine Neuerung der in dieser Studie verwendeten Version 4 von CAMx gegenüber früheren Modellversionen ist, dass die virtuellen Tracer für die OSAT-Technik auch zwischen genesteten Gittern über die Gittergrenzen hinweg transportiert werden. Somit ist es möglich, Tracer, die z. B. im äußersten Nest emittiert wurden, auch im innersten Nest zu identifizieren.

Für die Rechnungen dieser Studie wurde das Modellgebiet in 31 verschiedene Quellgebiete für Ozonvorläufersubstanzen aufgeteilt. Diese Aufteilung ist in den Abbildungen 12 bis 15 dargestellt. In der Modellrechnung werden für Gebiete in denen sich einzelne Nester überlappen nur die Emissionen aus dem besser aufgelösten Nest benutzt.

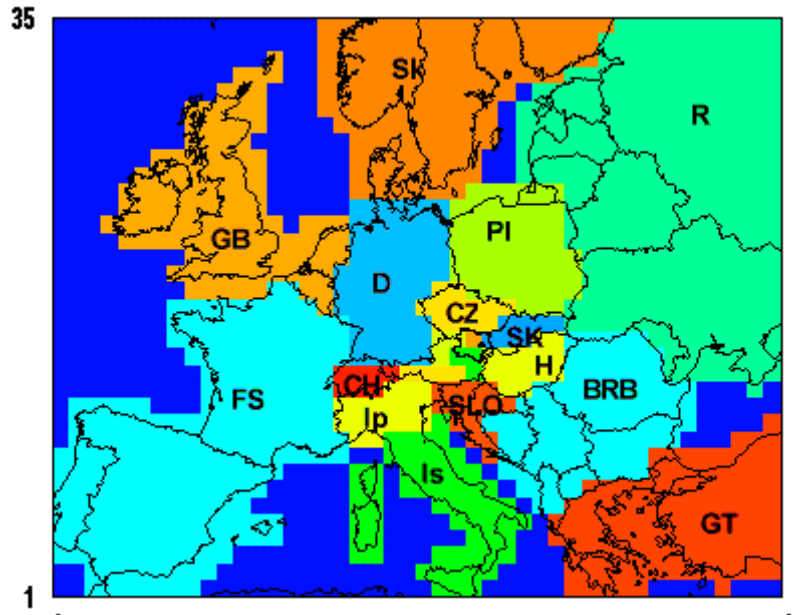


Abb. 12: Einteilung des Modellgitters 1 (81 km Auflösung) in Emissionsquellgebiete. Die Quellgebiete sind in Tabelle 8 aufgelistet.

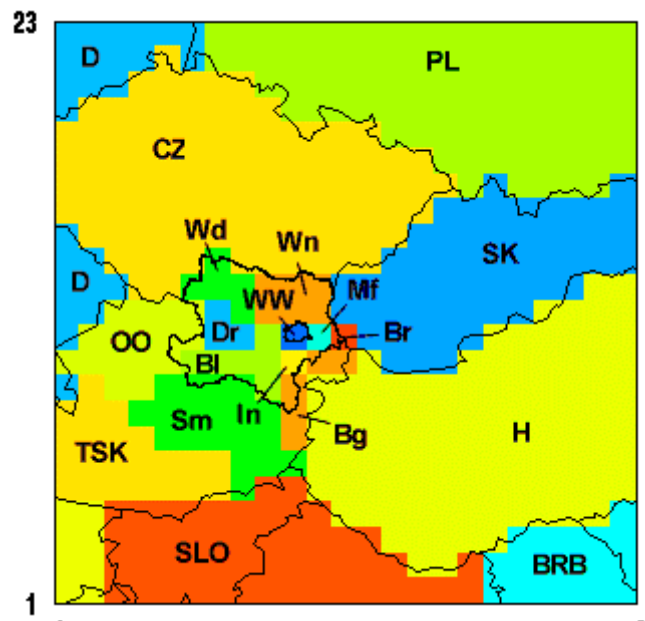


Abb. 13: Einteilung des Modellgitters 2 (27 km Auflösung) in Emissionsquellgebiete. Die Quellgebiete sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Zusätzlich zu den in der Fläche definierten Quellgebieten unterscheidet das Modell auch diejenigen Tracer die bei der Initialisierung des Modells vorhanden waren, sowie diejenigen, die über die fünf Modellränder (nord, ost, süd, west, oben) ins Modellgebiet transportiert werden. Die einzelnen Quellgebiete der beschriebenen Rechnungen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

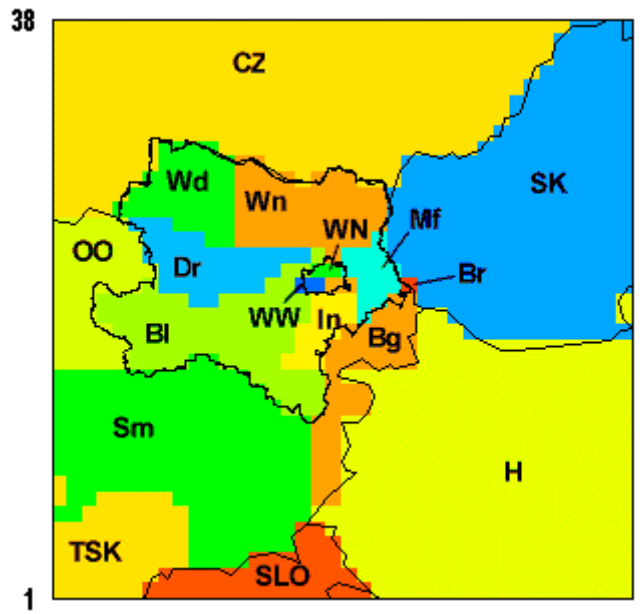


Abb. 14: Einteilung des Modellgitters 3 (9 km Auflösung) in Emissionsquellgebiete. Die Quellgebiete sind in Tabelle 8 aufgelistet.

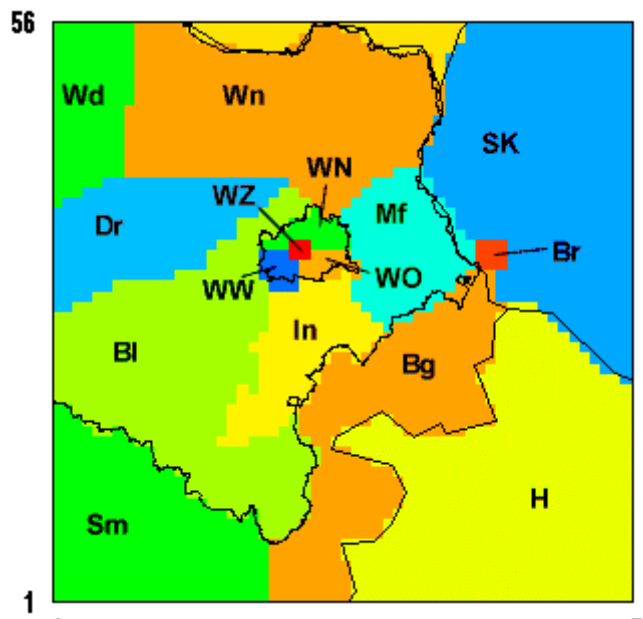


Abb. 15: Einteilung des Modellgitters 4 (3 km Auflösung) in Emissionsquellgebiete. Die Quellgebiete sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Quellregionen der Ozonvorläufersubstanzen für die OSAT-Berechnungen

Quellregion		Quellregion	
WZ	Wien Zentrum	SLO	Slowenien, Kroatien
WN	Wien Nord	D	Deutschland
WW	Wien Südwest	Pl	Polen
WO	Wien Südost	BRB	Bulgarien, Rumänien, Balkan
Wd	Waldviertel	Ip	Norditalien (Poebene)
Wn	Weinviertel	Is	Süditalien
Dr	niederöster. Donauraum	FS	Frankreich, Spanien, Portugal
Bl	niederöster. Bergland	GB	Irland, Großbritannien, Benelux
Mf	Marchfeld	Sk	Skandinavien
In	Industrieviertel, Thermenregion	R	Russld., Baltikum, Wrussld., Ukraine
Bg	Burgenland	GT	Griechenland, Türkei
Sm	Steiermark	W	Wasser
OO	Oberösterreich	nth	nördlicher Rand
TSK	Tirol, Salzburg, Kärnten	est	östlicher Rand
CH	Vorarlberg und Schweiz	sth	südlicher Rand
CZ	Tschechien	wst	westlicher Rand
SK	Slowakei	top	oberer Rand
Br	Bratislava	ini	Anfangsbedingungen
H	Ungarn		

OSAT-Ergebnisse für großräumigen Schadstofftransport

Die Berechnungen mit OSAT liefern eine Fülle von Ergebnissen. Für jede einzelne Zelle der Modellgitter wird stündlich für jedes definierte Quellgebiet angegeben, ob Ozon vorliegt, das aus Vorläufersubstanzen aus diesem Quellgebiet entweder in NO_x- oder in VOC-kontrolliertem Regime gebildet wurde. Für die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse wurden zur besseren Übersicht verschiedene Terme aus den Ergebnissen zusammengefasst. Für einzelne Messstationen, die gleichmäßig über das Ozonüberwachungsgebiet 1 verteilt sind, sind in den Abbildungen 16 bis 18 die Beiträge der Quellgebiete zum Gesamt Ozon in der bodennahen Schicht dargestellt. Die Daten wurden den Ergebnissen des feinsten Gitters (3 km Auflösung) entnommen.

In den Abbildungen 16 bis 18 wird das Bildungsregime für Ozon nicht unterschieden. Alle Ränder des Modells sind zu einer Quellgruppe (rand) zusammengefasst. "init" steht für die Anfangsbedingungen. Eine detaillierte Untersuchung der Beiträge der einzelnen Ränder und der Anfangsbedingungen folgt in einem weiteren Abschnitt.

Die Beiträge der österreichischen Bundesländer des Ozonüberwachungsgebiets 1 sind einzeln aufgeführt (bgld = Burgenland, wien = Wien, noe = Niederösterreich) und am unteren Rand der Abbildungen dargestellt. Die Quellgruppe "aust" umfasst alle weiteren österreichischen Bundesländer mit Ausnahme von Vorarlberg, das in "chvb" mit der Schweiz zusammengefasst ist. Als einzelne Länder sind die Slowakei (slov), Tschechien (tsch), Ungarn (unga), Slowenien und Kroatien (slkr), Deutschland (deut), Polen (poln) und Italien (ital) dargestellt. Die weiteren Quellgruppen ergeben sich mit den Kurzbezeichnungen aus Tabelle 8 zu : sost = BRB + GT, west = FS + GB, skan = Sk, russ = R. "wass" bezeichnet die Wasserflächen und ist ein unbedeutender Beitrag.

In den Abbildungen 16 bis 18 stellt die obere Begrenzungslinie der farbigen Flächen jeweils das für die Stationen berechnete Gesamtozon in der bodennahen Schicht dar. Zu Beginn der Modellrechnung stammt das gesamte Ozon zunächst vollständig aus den Anfangsbedingungen. Dieser Anteil nimmt jedoch rasch ab. Ab dem dritten Modelltag tragen die Anfangsbedingungen jeweils nur noch weniger als 10 ppbv zum Ozon bei. Der Anteil der Ränder nimmt gleichzeitig zu und beträgt im Verlauf der Rechnung meist zwischen 40 ppbv und 50 ppbv.

An den Tagen mit Wind vorwiegend aus südlichen bzw. südöstlichen Richtungen, vor allem am 19. und 20. Juni ist der Anteil des Ozons, das mit Vorläufersubstanzen aus Slowenien / Kroatien sowie Ungarn gebildet wird, höher als an den anderen Tagen. Ab dem 21. Juni, wenn der Wind auf vorwiegend westliche Richtungen gedreht hat, nimmt an allen Stationen der Anteil des mit Vorläufersubstanzen aus Deutschland und Westeuropa gebildeten Ozons stark zu. Ozon, das von Vorläufersubstanzen aus Italien herrührt, ist vor allem zwischen dem 20. und dem 22. Juni zu erkennen. Skandinavien trägt geringfügig am 17. und 18. Juni zum Ozon an den Messstationen bei. Die Beiträge Ost- und Südosteuropas zum Ozon an den Messstationen sind äußerst gering.

Die Beiträge von Wien, Niederösterreich und dem Burgenland zum Gesamtozon sind am unteren Rand der Abbildungen aufgetragen. Sie spielen nur an den Tagen mit geringeren Windgeschwindigkeiten (18. bis 22. Juni) eine Rolle. An den Tagen mit höheren Windgeschwindigkeiten ist die Aufenthaltsdauer der Vorläufersubstanzen aus dem Ozonüberwachungsgebiet 1 in diesem Gebiet zu kurz, als dass sie vor Ort nennenswert Ozon bilden könnten.

Ozon aus Vorläufern aus dem Burgenland tritt an fast allen Stationen erwartungsgemäß nur an den Tagen mit Südostwind auf (19. und 20. Juni). Die eigenen Stationen Eisenstadt und Illmitz zeigen allerdings auch an anderen Tagen einen kleinen Anteil. Ebenso tritt Ozon aus Vorläufern aus Wien in Abhängigkeit von der Windrichtung jeweils im Lee der Stadt auf.

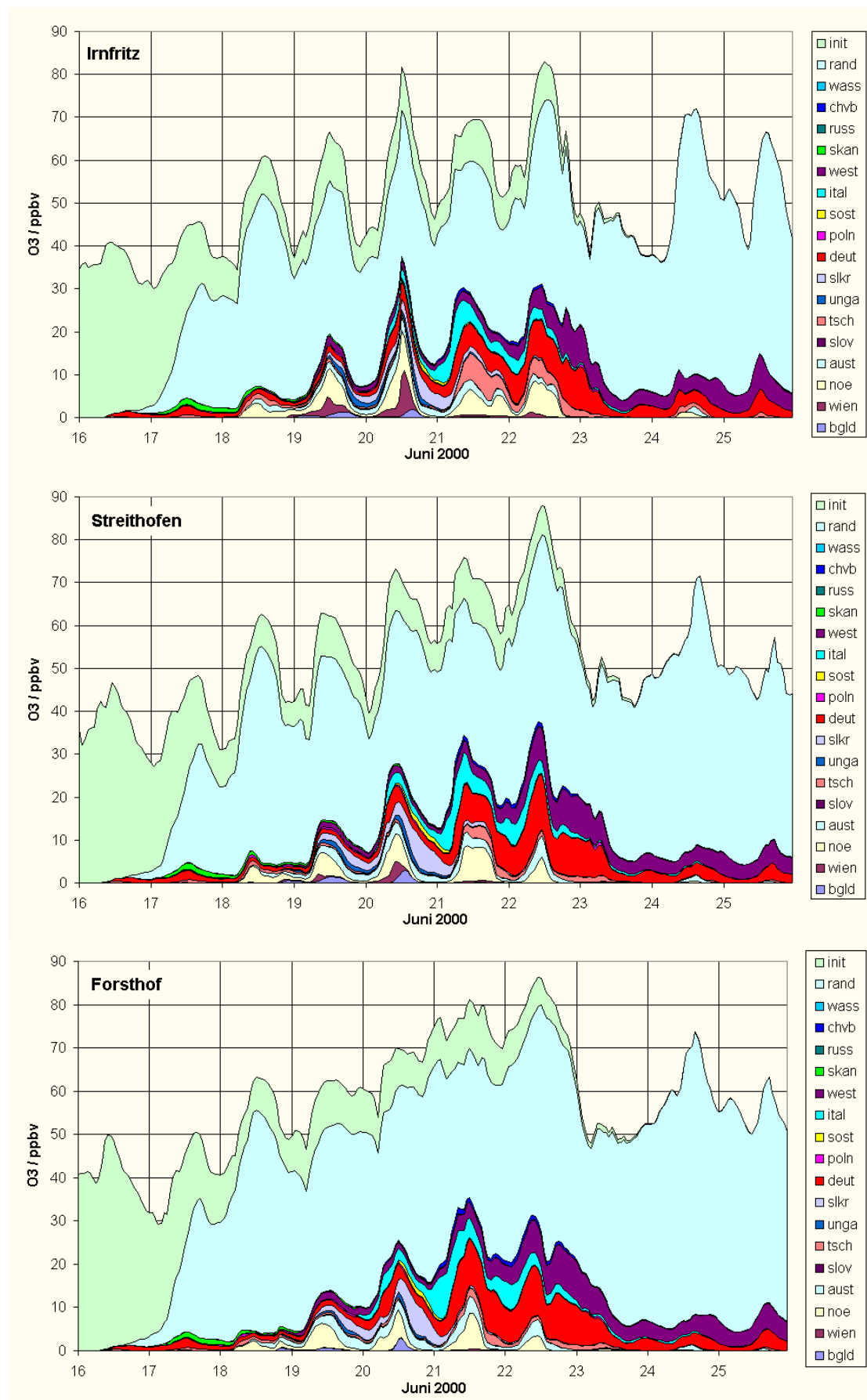


Abb. 16: Großräumige OSAT-Ergebnisse für Irnfritz, Streithofen und Forsthof.

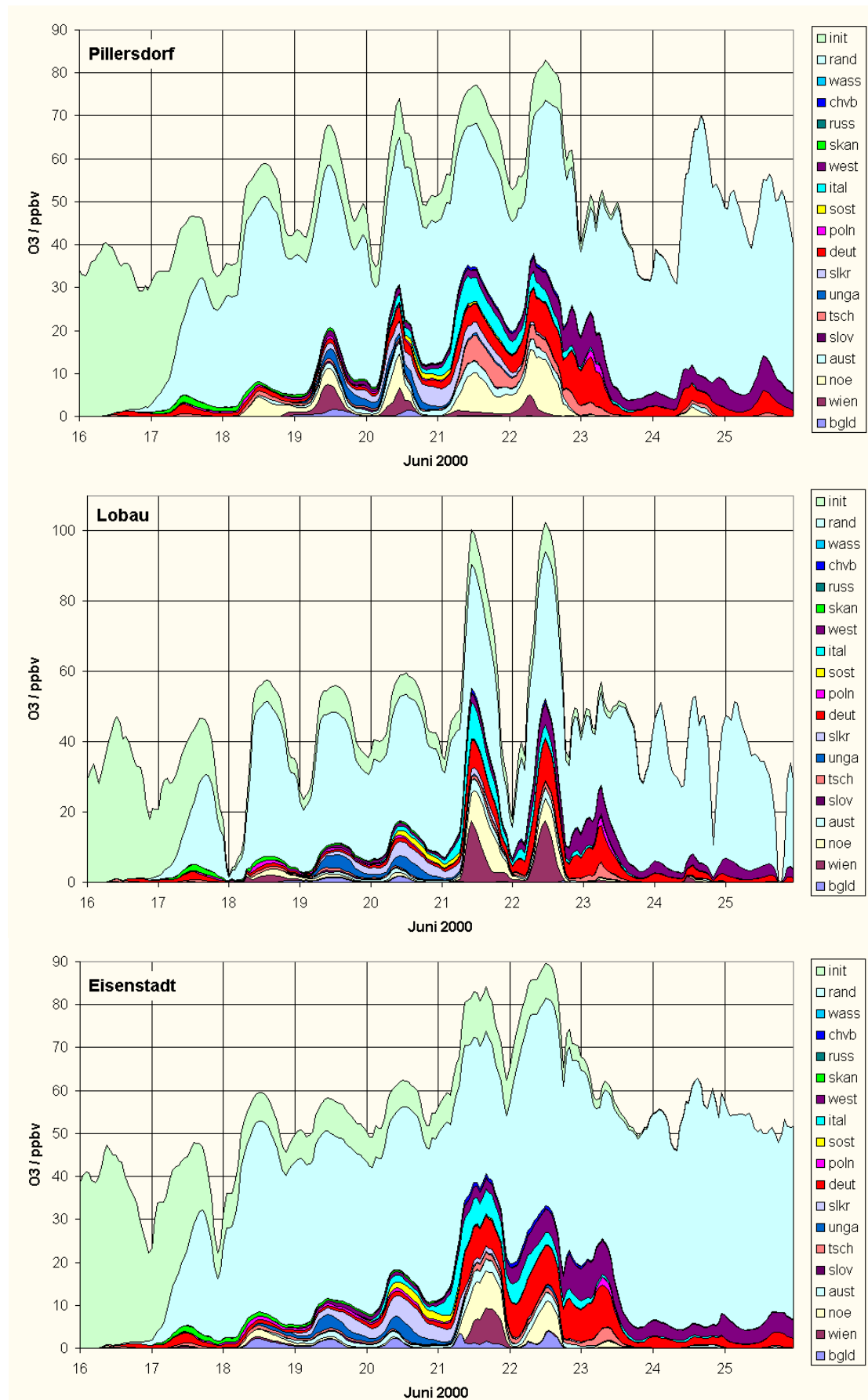


Abb. 17: Großräumige OSAT-Ergebnisse für Pillersdorf, Lobau und Eisenstadt.

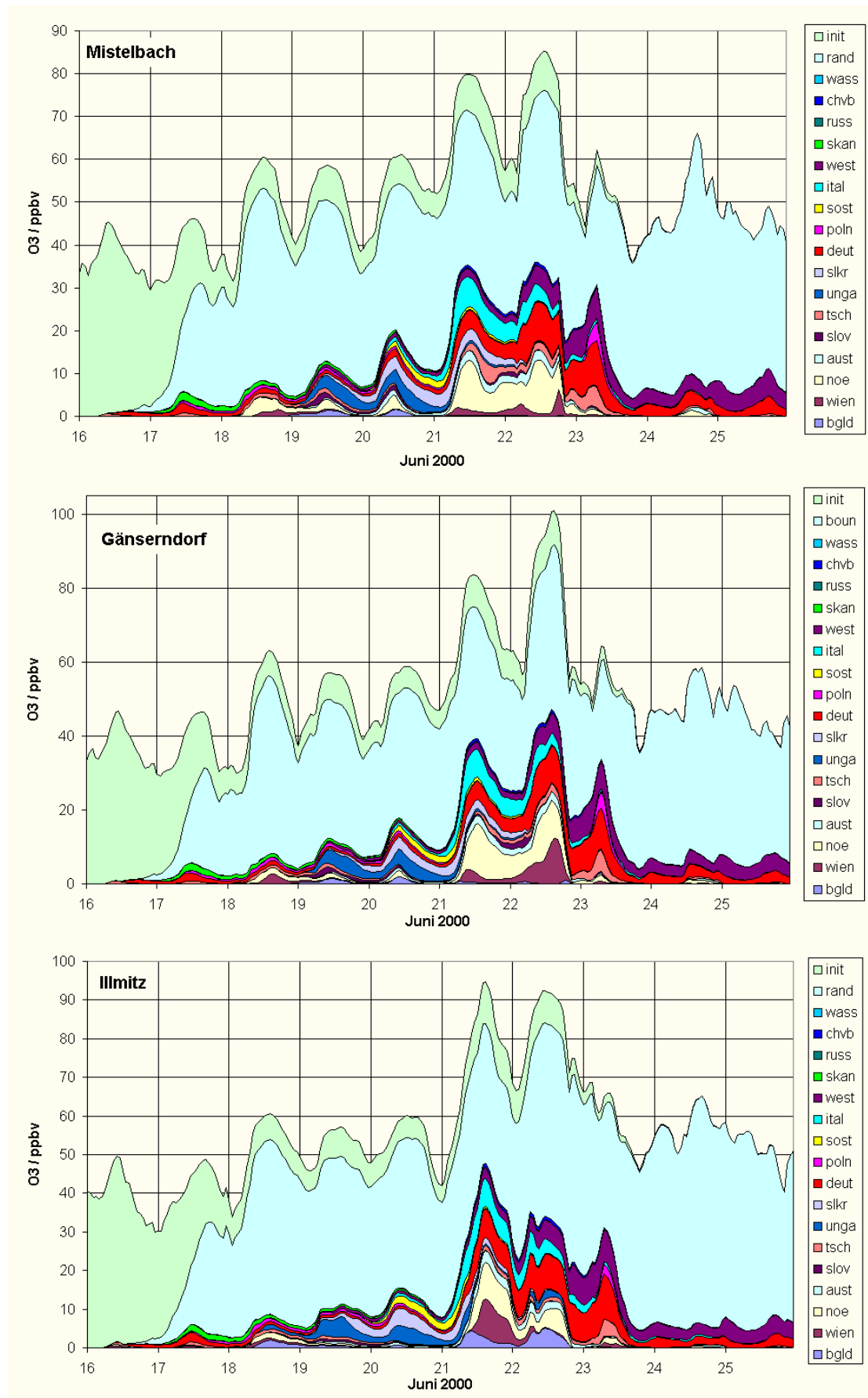


Abb. 18: Großräumige OSAT-Ergebnisse für Mistelbach, Gänserndorf und Illmitz.

OSAT-Ergebnisse für kleinräumigen Schadstofftransport

In den Abbildungen 19 bis 21 sind die Ergebnisse der OSAT-Berechnungen für die Beiträge aus dem Ozonüberwachungsgebiet 1 detaillierter als im vorangegangenen Abschnitt dargestellt, alle anderen Beiträge wurden jedoch weggelassen. Nur die drei Tage vom 20. 6. bis 22. 6. 2000, an denen in der Region Überschreitungen der jetzigen Informationsschwelle von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auftraten, werden gezeigt. Für jedes Quellgebiet wird in den Abbildungen dieses Abschnitts unterschieden, ob das Ozon aus NO_x in einem NO_x -kontrollierten Regime entstanden ist ($_N$), oder ob es von VOC herrührt ($_V$). Die vier Quellgebiete in der Stadt Wien wurden zusammengefasst.

An der im Nordwesten des Gebiets gelegenen Station Irnfritz sind die aufgezeigten Beiträge am 20. 6. mit Südostwind am größten. An diesem Tag trägt Wien mit etwa 10 ppbv zur Hälfte dazu bei. Der Anteil des VOC-kontrollierten Ozons (wien_V) ist für Wien größer als der Anteil des NO_x -kontrollierten Ozons (wien_N). Dieses Ergebnis entspricht der Erwartung, dass in der Nähe eines urbanen Gebietes das Ozonbildungsregime VOC-kontrolliert ist. Am 21. und 22. Juni überwiegen an der Station Irnfritz bei nordwestlichem bzw. westlichem Wind die Beiträge des Waldviertels. In diesem Fall ist der Anteil des NO_x -kontrollierten Ozons (wald_N) größer als der VOC-kontrollierte Anteil (wald_V).

In den Modellgitterzellen um die ebenfalls westlich gelegenen Stationen Streithofen und Forsthof sind am 20. 6. größere Beiträge des Burgenlandes (bgld_) und des Gebiets "Thermenregion und Industrieviertel" (ther_) berechnet worden. An den beiden Folgetagen haben vor allem der Donauraum (dona_) und das Waldviertel (wald_) einen großen Anteil. Für Forsthof sind außerdem die lokalen Emissionen aus dem Gebiet "Niederösterreichisches Bergland" (bnoe_) wichtig, in dem die Station liegt. Einen nennenswerten Anteil der Stadt Wien hat nur Streithofen am 20. 6., welcher wiederum überwiegend VOC-kontrolliert ist.

Um die im Nordwesten des Weinviertels gelegene Station Pillersdorf überwiegt während der drei betrachteten Tage meist der NO_x -kontrollierte Anteil mit lokalen Emissionen aus dem Weinviertel (wein_N). Der VOC-kontrollierte Anteil aus dem Weinviertel (wein_V) ist geringer. Am 20. 6 und 22. 6. tragen Wiener Emissionen stärker zum Ozon bei. Das Waldviertel (wald_) spielt am 21. 6. und 22. 6. und der Donauraum (dona_) am 22. 6. eine Rolle.

An der Station Mistelbach im Nordosten des Weinviertels sind die Ergebnisse ähnlich wie um Pillersdorf. Nur am 20. 6. mit Südostwind ist der Beitrag des Überwachungsgebiets 1 wesentlich geringer. Wien hat an diesem Tag fast keinen Anteil. Dafür ist der Anteil des südlich gelegenen Marchfeldes (mchf_) größer.

Das Gebiet um die Wiener Station Lobau im Südosten des Stadtgebiets wird am 21. 6. und 22. 6. von Ozon dominiert, das in VOC-kontrolliertem Regime mit Wiener VOC-Emissionen gebildet wurde (wien_V). Bei Südostwind am 20. 6. tragen Emissionen aus dem Ozonüberwachungsgebiet 1 fast überhaupt nicht zum Ozon an dieser Station bei.

Um die östlich von Wien gelegene Station Gänserndorf tragen sowohl VOC- als auch NO_x -Emissionen aus Wien, sowie NO_x -Emissionen aus dem benachbarten Weinviertel (wein_N) und dem lokalen Marchfeld (mrch_N) hauptsächlich zum Ozon bei. Der Beitrag am 20. 6. ist vernachlässigbar.

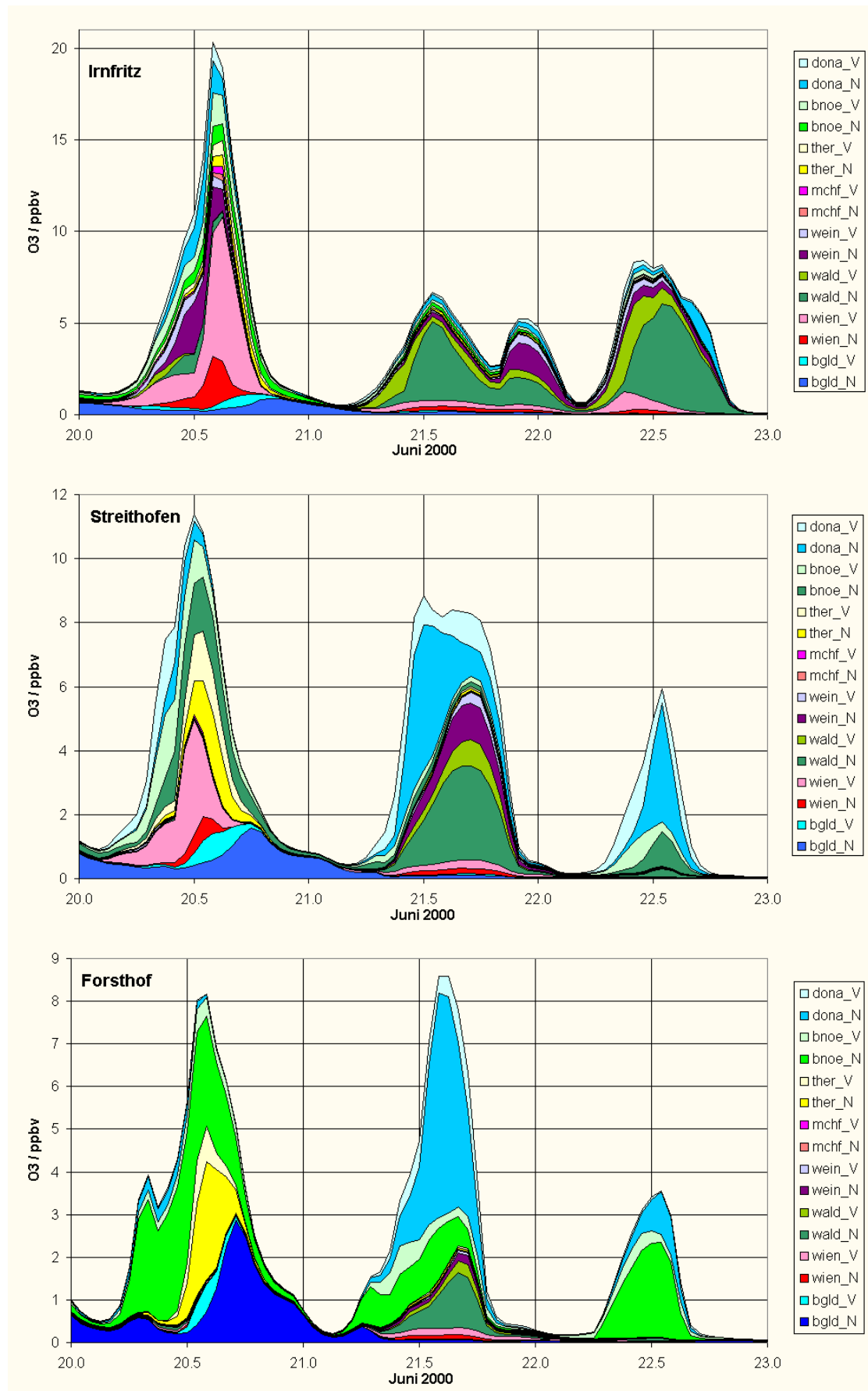


Abb. 19: Kleinräumige OSAT-Ergebnisse für Irnfritz, Streithofen und Forstthof.

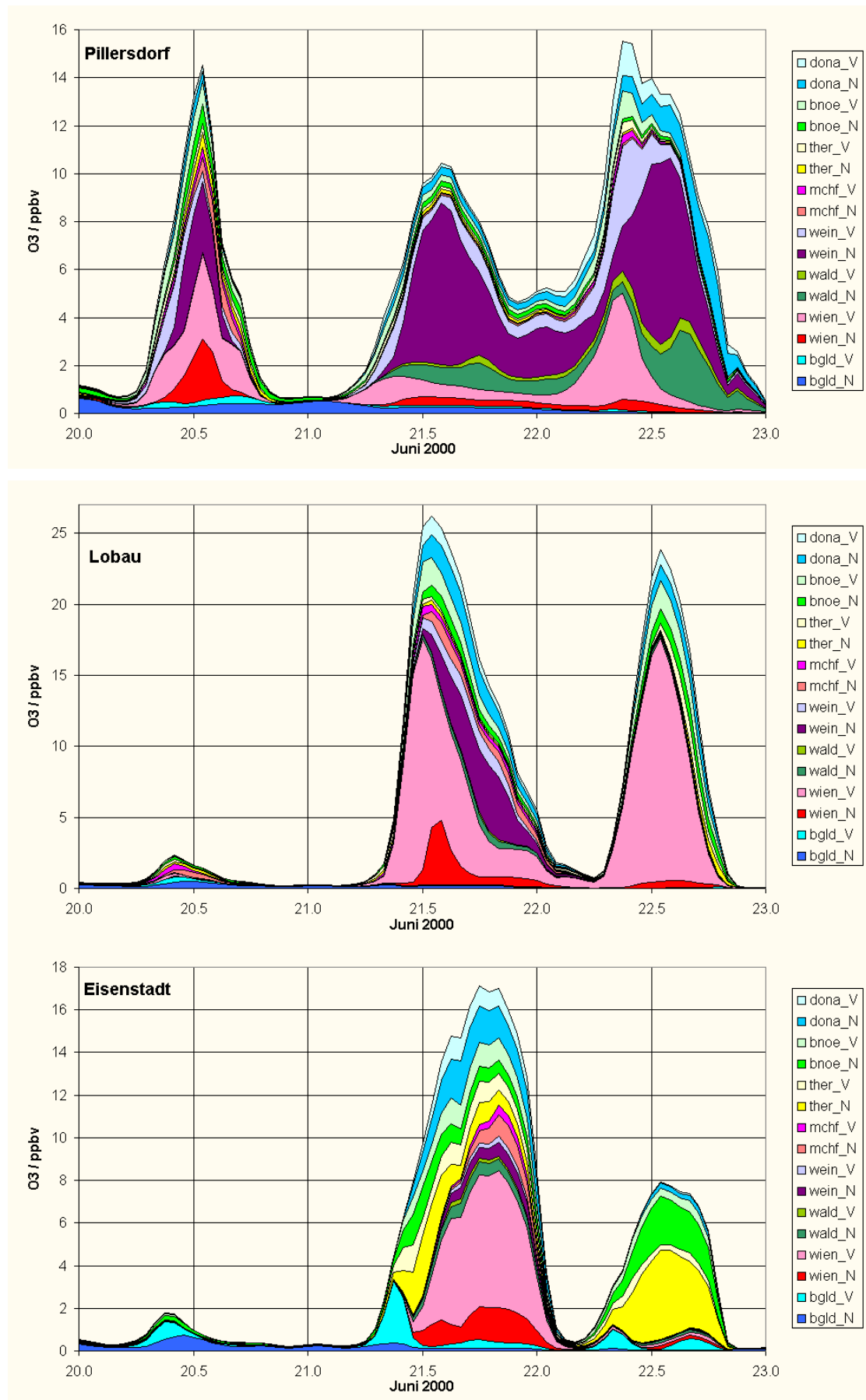


Abb. 20: Kleinräumige OSAT-Ergebnisse für Pillersdorf, Lobau und Eisenstadt.

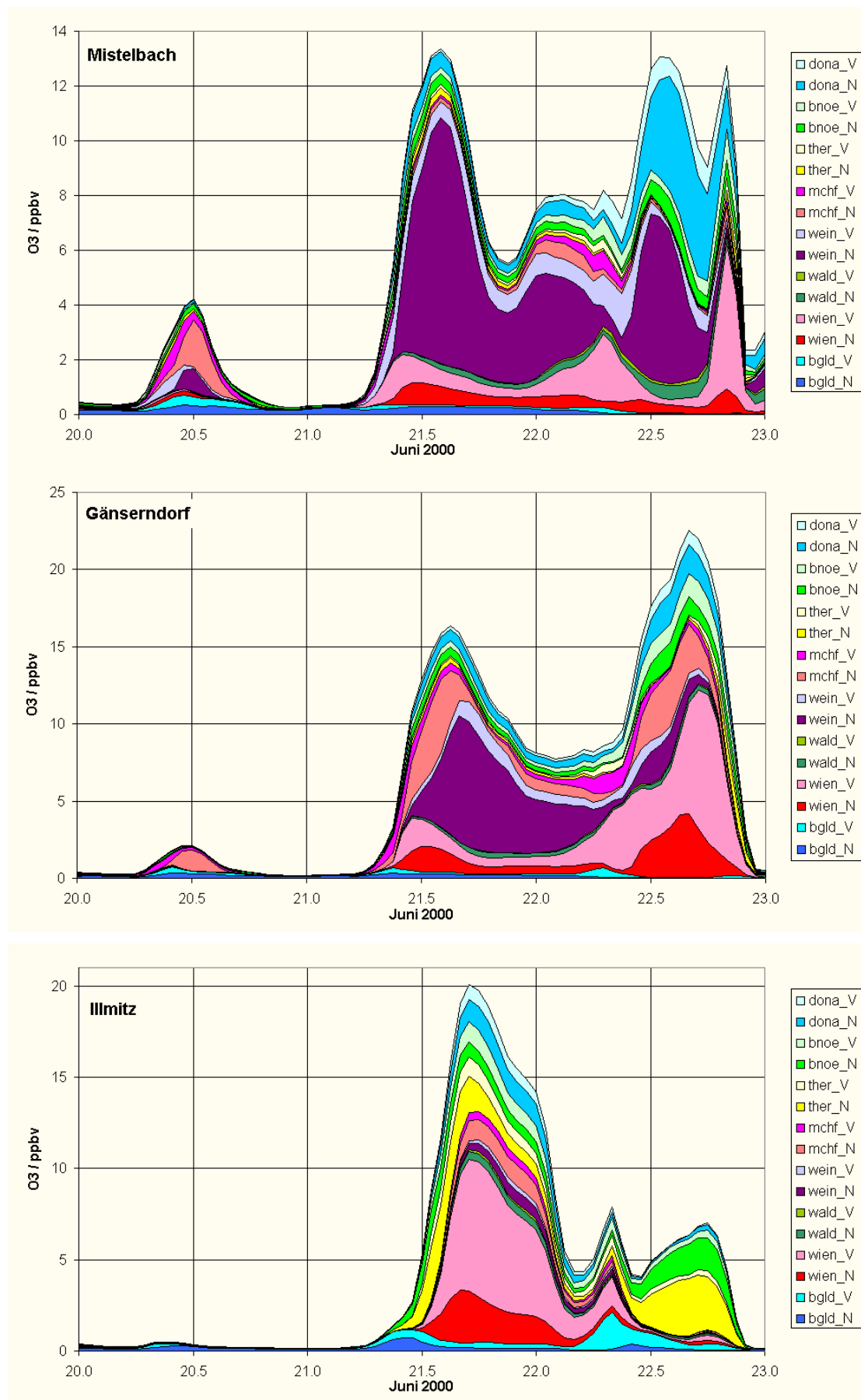


Abb. 21: Kleinräumige OSAT-Ergebnisse für Mistelbach, Gänserndorf und Illmitz.

Um die burgenländische Station Eisenstadt trägt das Überwachungsgebiet 1 ebenfalls nur bei Nordwestwind und Westwind am 21. 6 bzw. 22. 6 zum Ozon bei. Bei Westwind am 22. 6. überwiegen die NO_x -kontrollierten Anteile aus der Thermenregion (ther_N) und dem niederösterreichischen Bergland (nboe_N), während am 21. 6. VOC-kontrolliertes Wiener Ozon (wien_V) den Hauptanteil stellt. VOC-kontrolliertes Ozon aus dem Burgenland zeigt an allem Tagen vormittags einen kleinen Peak, da es lokal gebildet wird. Die Beiträge aus den anderen Quellgebieten, die etwas weiter transportiert werden, haben ihr Maximum zusammen mit dem Maximum des gesamten Ozons am frühen Nachmittag. In der Modellgitterzelle Illmitz im Südosten des betrachteten Gebiets ist die Situation ähnlich wie um Eisenstadt.

Untersuchung des Einflusses des Modellrandes

Es wurde näher untersucht aus welchen Komponenten sich das Ozon zusammensetzt, für das in den bisherigen Ergebnissen als Herkunft der Modellrand des äußeren Gitters bzw. die Anfangsbedingungen angegeben waren. Hierzu wurden die Berechnungen mit OSAT und zusätzliche Berechnungen mit GOAT zusammengefasst. Damit ist es möglich zu unterscheiden, ob Ozon über den Rand ins Modellgebiet transportiert wurde oder ob das Ozon aus über den Rand transportierten Vorläufern entstanden ist. Entsprechend wird das Ozon aus den Anfangsbedingungen aufgeteilt. Wie bei den Quellgebieten wird ebenfalls unterschieden, ob Ozon in einem NO_x -kontrollierten oder einem VOC-kontrollierten Regime entstanden ist.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden für zwei Stationen in der Umgebung von Wien gezeigt. Die erste Station ist Gänserndorf im Osten von Wien, das sich bei der Westwindlage am 22. 6. 2000 in der Abluftfahne von Wien befand. Weiterhin wurde Streithofen im Westen von Wien untersucht, wo am 22. 6. 2000 der Einfluss von Wien gering war. Statt dessen wurde wie schon im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, am 20. 6. 2000 bei Südostwind ein Einfluss von Wien beobachtet.

Abbildung 22 zeigt im oberen Teil den zeitlichen Verlauf des Ozons aus den einzelnen Quellgebieten für Gänserndorf in einer absoluten Darstellung. Der Anteil der einzelnen Quellgebiete am Gesamtozon ist bereits in den Abbildungen 18 und 21 dargestellt. Gegenüber den Abbildungen des vorangegangenen Abschnitts wurden die Quellgebiete jedoch anders eingeteilt. Der Einfluss von Wien sowie von Niederösterreich und dem Burgenland (NoeBgl) ist in der Spitze der Ozonpeaks zu erkennen. Die übrigen definierten Quellgebiete wurden für die Darstellungen in diesem Kapitel in drei Gruppen zusammengefasst (nahe = direkte Nachbarn des Ozonüberwachungsgebiets I, mittel = entferntere Quellgebiete, weit = Quellgebiete am Rand des äußeren Modellgitters).

Das aus den Anfangsbedingungen herrührende Ozon lag zum größten Teil schon als Ozon vor (ini_O3). Nur am ersten Tag der Modellierung werden bis zu 10 ppbv Ozon in VOC-kontrolliertem Regime aus VOC aus den Anfangsbedingungen gebildet (ini_V). Der Anteil des aus NO_x aus den Anfangsbedingungen in NO_x -kontrolliertem Regime gebildeten Ozons liegt unter 2.5 ppbv (ini_N). Während der ersten beiden Tage der Rechnung nimmt der Einfluss der Anfangsbedingungen auf die Modellergebnisse stark ab und beträgt maximal etwa 10 ppbv. Am Ende der Rechnung kann er ganz vernachlässigt werden.

Vor allem Ozon, das über den nördlichen (nth_O3) und westlichen (wst_O3) Rand ins äußere Gitter transportiert wird spielt für das im Ozonüberwachungsgebiet I

gemessene Ozon eine Rolle. Der Anteil des Ozons, das im Modell aus über diese Ränder transportierten Vorläufersubstanzen gebildet wird, ist kleiner, wobei VOC (nth_V und wst_V) eine größere Rolle spielt als NO_x (nth_N und wst_N). Entsprechend der Wetterlage ist in den ersten Tagen der Episode der Einfluss des nördlichen Randes größer und nimmt auch am Ende wieder zu. Der westliche Rand gewinnt bis zum 24. 6. 2000 an Einfluss und nimmt an den zwei letzten Tagen der Episode wieder etwas ab.

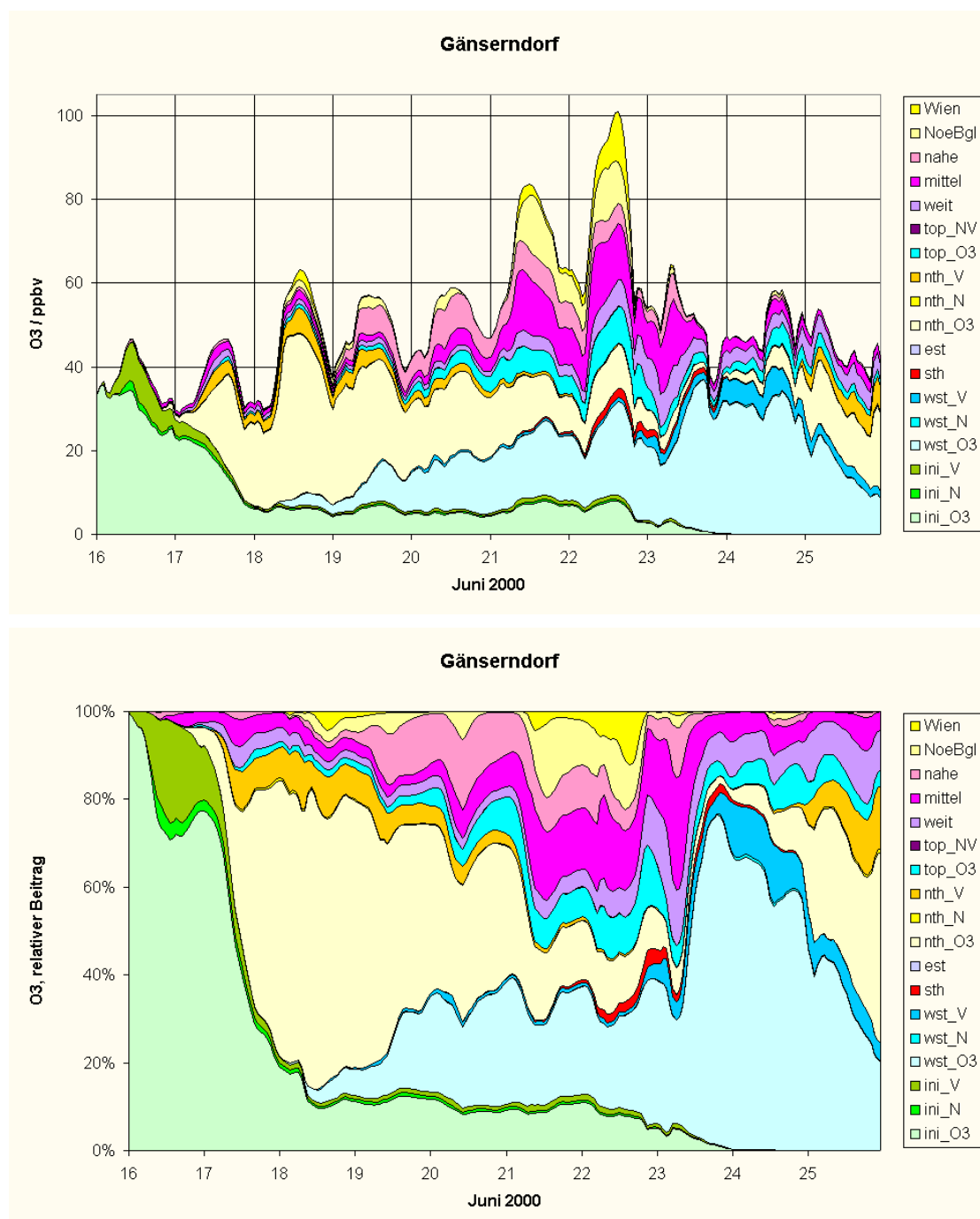


Abb. 22: Zeitlicher Verlauf des Beitrags der einzelnen Quellgebiete zum Ozon um die Station Gänserndorf unter besonderer Berücksichtigung der Rand- und Anfangsbedingungen. Oben: absolute Werte; unten: relative Werte.

Der untere Teil von Abbildung 22 zeigt den relativen Anteil, den die einzelnen Quellgruppen zum Ozon um die Station Gänserndorf beitragen. In der wichtigsten Phase der untersuchten Episode zwischen dem 20. und 22. Juni ist der Einfluss der Anfangsbedingungen auf etwa 10 % gesunken. Der Einfluss der Ränder, die für die globale Hintergrundbelastung stehen, beträgt am Anfang und am Ende der Episode bei höheren Windgeschwindigkeiten etwa zwischen 70 und 80 %. Unter niedrigen Windgeschwindigkeiten etwa 50 %.

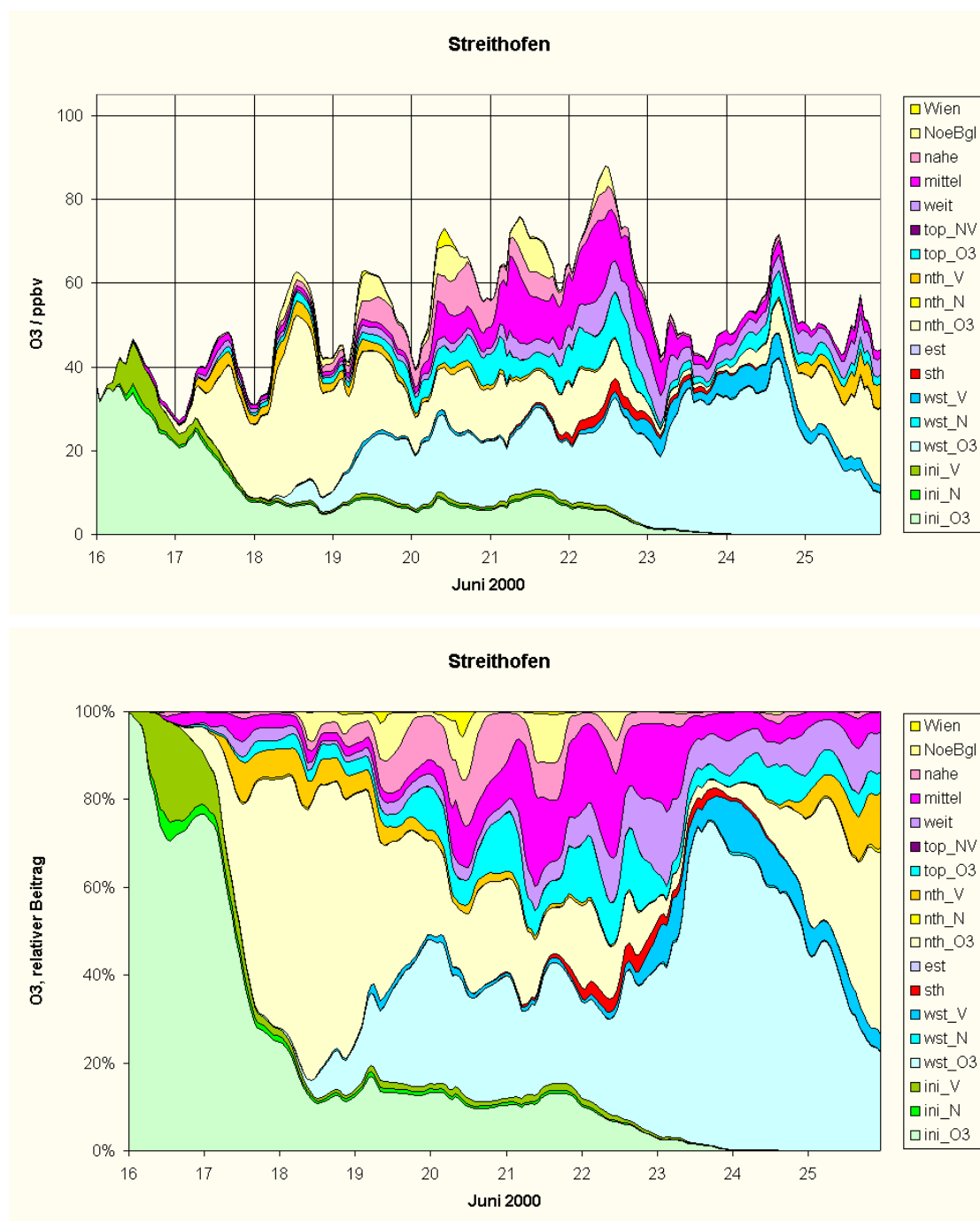


Abb. 23: Zeitlicher Verlauf des Beitrags der einzelnen Quellgebiete zum Ozon um die Station Streithofen unter besonderer Berücksichtigung der Rand- und Anfangsbedingungen. Oben: absolute Werte; unten: relative Werte.

Abbildung 23 zeigt die detaillierte Darstellung der Quellzusammensetzung für die Modellränder für die Station Streithofen. In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, dass die Quellzusammensetzung für die europäischen und österreichischen Quellen dort anders ist, als in Gänserndorf. Die Beiträge der Modellränder und der Anfangsbedingungen sind jedoch sehr ähnlich. Somit kann angenommen werden, dass die für Gänserndorf beschriebenen Beiträge generell für das gesamte Ozonüberwachungsgebiet 1 gelten.

Zusammenfassung der OSAT-Ergebnisse

Die OSAT-Technik liefert (bei der Untersuchung der Modellränder auch in Kombination mit der GOAT-Technik) wertvolle Informationen zur Herkunft des Ozons, das im Ozonüberwachungsgebiet 1 vorkommt. Es zeigt sich, dass der größte Teil des Ozons nicht von Ozonvorläufern aus diesem Gebiet abstammt. Nur ein kleiner Teil wurde nach diesen Ergebnissen aus lokalen Vorläufern gebildet. Nur dieser geringe Anteil könnte auch durch lokale Maßnahmen zur Emissionsreduktion abgesenkt werden.

Den größten Anteil hat das Ozon, das über die Modellränder ins Modellgebiet transportiert wird. Da in der betrachteten Episode der westliche und nördliche Rand überwiegen, handelt es sich hauptsächlich um Ozon, das schon über dem Atlantischen Ozean vorlag und als globaler Hintergrund angesehen werden kann. In Abhängigkeit von der vorherrschenden Windgeschwindigkeit beträgt dessen Anteil bei höheren Windgeschwindigkeiten 70 % bis 80 %. Erhöhte Ozonkonzentrationen treten jedoch vorwiegend in Schönwettersituationen mit niedrigeren Windgeschwindigkeiten auf. In solchen Fällen nimmt der Einfluss anderer Quellgebiete für die Ozonbildung zu. In der untersuchten Episode reduzierte sich dann der Anteil des globalen Hintergrundes an den entsprechenden Tagen bis auf 50 %.

Eine große Rolle spielt auch das Ozon, das aus Vorläufersubstanzen gebildet wurde, die aus Quellgebieten stammen, die außerhalb des Ozonüberwachungsgebiets 1 liegen. Dieses Ozon kann als kontinentaler Hintergrund angesehen werden. Die Vorläufer stammen dann überwiegend aus Gebieten im Luv des Ozonüberwachungsgebiets. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten ist der Anteil dieses kontinentalen Hintergrundes größer als bei stärkerem Wind und kann bis zu 40 % des Gesamtozons ausmachen.

Der Anteil des Ozons, das aus Vorläufern aus lokalen Quellen im Ozonüberwachungsgebiet 1 gebildet wurde, beträgt maximal etwa 20 %. Dieser Beitrag des vorkommenden Ozons kann maximal durch lokale Massnahmen reduziert werden. Die Maxima traten jedoch zu den Zeiten der täglichen Ozonmaxima während der betrachteten Ozonepisode auf. Dies zeigt, dass unter solchen Umständen eine Einflussnahme sich vor allem auf die Ozonspitzen auswirkt.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der OSAT-Technik darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass diese Methode lediglich die Produktion von Ozon berücksichtigt. Der Titrationseffekt, bei dem Ozon in der Nähe starker NO_x -Quellen durch eine verstärkte Reaktion mit NO abgebaut wird, sowie andere nichtlineare Vorgänge in der atmosphärischen Chemie kann von OSAT nicht erfasst werden. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Studie auch Rechnungen mit verschiedenen Emissionsszenarien ausgeführt, die im folgenden beschrieben werden.

Berechnungen mit Emissionsszenarien

Die Berechnungen mit der OSAT-Technologie liefern wertvolle Ergebnisse zur Identifizierung der Quellen von Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung. Sie können jedoch die Nichtlinearität chemischer Vorgänge nur bedingt berücksichtigen. Außerdem bewirken NO_x-Emissionen häufig in der Nähe der Quellen einen lokalen Abbau von Ozon, so dass Reduktionen dieser Emissionen auch eine Zunahme von Ozon zur Folge haben können. Diese Prozesse werden von OSAT nicht berechnet.

Aus diesem Grunde wurde in dieser Studie die untersuchte Episode auch mit verschiedenen Emissionsszenarien im Modell gerechnet und die jeweiligen Ergebnisse miteinander verglichen. Dieser Vergleich liefert Prognosen für eventuelle Ozonreduktionen unter Berücksichtigung der Nichtlinearität und der potenziellen Ozonzunahme. Eine Zuordnung der Effekte zu speziellen Quellgebieten wie bei der OSAT-Technik ist aber wegen des zusätzlichen Rechenaufwandes nicht möglich.

Verwendete Emissionsszenarien

Ziel dieser Studie ist es, das Potenzial von Emissionsreduktionen im Ozonüberwachungsgebiet 1 zu berechnen. Daher wurden bei den meisten Szenarien nur die Emissionen in diesem Gebiet reduziert. Aus programmtechnischen Gründen erfolgte diese Reduktion bei allen Emissionen, die innerhalb des innersten Modellgitters (Gitter 4, 3 km Auflösung) auf österreichischem Gebiet stattfinden. Die Emissionen in allen anderen Gittern und in den Gitterzellen des Gitters 4 über Tschechien, der Slowakei und Ungarn wurden unverändert gelassen. Dies bedeutet, dass Reduktionen auch in einem kleinen Teil der Steiermark (im Südwesten des Gitters 4) erfolgten. Im westlichen Teil von Niederösterreich, der außerhalb des Gitters 4 liegt, blieben die Emissionen hingegen konstant. Lediglich bei dem Emissionsszenario, das die Emissionen in ganz Europa reduziert, wurden alle Gitterzellen berücksichtigt. Tabelle 9 zeigt, welche Emissionsszenarien verwendet wurden.

Tabelle 9 Verwendete Emissionsszenarien.

<i>Szenario</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>chem. Mech.</i>
orig	keine Veränderung	CBM-IV
scen_0	keine Emissionen im OÜG 1	CBM-IV
scen_05	0.5 für NO _x , VOC, CO im OÜG 1	CBM-IV
scen_05N	0.5 für NO _x im OÜG 1	CBM-IV
scen_05V	0.5 für VOC im OÜG 1	CBM-IV
scen_05A	0.5 für Verkehr im OÜG 1	CBM-IV
scen_05M	0.5 für NO _x , VOC, CO im OÜG 1, 0:00 - 12:00	CBM-IV
scen_EU	0.5 für NO _x , VOC, CO in Europa	CBM-IV
orig-S	keine Veränderung	SAPRC99
scen-S_05N	0.5 für NO _x im OÜG 1	SAPRC99
scen-S_05V	0.5 für VOC im OÜG 1	SAPRC99

Tab. 10: Wöchentliche Emissionen im "Ozonüberwachungsgebiet 1" (österreichischer Teil des Modellgitters 4) in Tonnen für die einzelnen Emissionsszenarien.

<i>Szenario</i>	<i>NO_x</i>	<i>VOC</i>	<i>CO</i>
orig, orig-S	1123	1429	4031
scen_0	0	0	0
scen_05	561	715	2016
scen_05N, scen-S_05N	561	1429	4031
scen_05V, scen-S_05V	1123	715	4031
scen_05A	690	1325	3179

Die veränderten Emissionsmengen sind in Tabelle 10 angegeben. Weil für das Modell die Werte zeitlich disaggregiert werden und sich andere Emissionen für Samstag und Sonntag als für Wochentage ergeben, werden in der Tabelle die wöchentlichen Emissionen angegeben. Die Disaggregation bewirkt auch unterschiedliche Emissionen für die einzelnen Monate. So haben die Hausbrandemissionen im Winter ihre höchsten Werte, während die maximalen Verkehrsemissionen im Sommer auftreten. Aus diesem Grunde lassen sich die wöchentlichen Emissionen aus dem Juni in der Tabelle nicht korrekt auf Jahresemissionen extrapolieren. Werden diese Werte auf den Monat Juni übertragen (wöchentliche Emission * 7 / 30), so ergeben sich 4813 t NO_x und 6124 t VOC. Obwohl die Datenbasis des Emissionskatasters aus der Zeit vor 1995 stammt, stimmen diese Werte gut mit neueren Daten aus der Bundesländerinventur des Umweltbundesamtes 2001 überein. Nach AEEG (2003) ergeben sich danach für das Ozonüberwachungsgebiet 1 Juni-Emissionen von 4778 t NO_x und 6612 t VOC.

Für CO ergeben sich in gleicher Weise als Monatsemissionen für Juni 17.276 kt. Dieser Wert liegt um 37 % über den von AEEG (2003) auf Basis 1998 angegebenen 12.633 kt für die monatlichen Juni-Emissionen im Ozonüberwachungsgebiet 1. Eine Überschätzung der aktuellen CO-Emissionen im benutzten Emissionskataster war auch schon in einer früheren Studie mit dem Modellsystem (Krüger und Schmittner, 2001) vermutet worden. Wegen der chemischen Trägheit von CO wird jedoch angenommen, dass diese Ungenauigkeit keinen wesentlichen Einfluss auf die in dieser Studie gesuchten Ergebnisse hat.

Durch die Reduzierung der Verkehrsemissionen auf 50 % im Szenario *scen_05A* werden die NO_x-Emissionen fast auf die Hälfte und die CO-Emissionen etwa um 1/4 verringert während sich die VOC-Emissionen um weniger als 10 % ändern. Das Szenario mit europaweiten Reduktionen ist in Tabelle 10 nicht aufgeführt.

Vergleich der Emissionsszenarien an einzelnen Stationen

Zur Diskussion der Ergebnisse zu den Rechnungen mit Emissionsszenarien werden zunächst diejenigen Szenarien betrachtet, bei denen entweder die NO_x-Emission oder die VOC-Emission im Ozonüberwachungsgebiet 1 jeweils um 50 % reduziert werden. Abbildung 24 zeigt die Differenz zwischen den Berechnungen mit diesen Szenarien und dem Modelllauf mit den unveränderten Emissionen (*orig*) an verschiedenen Stationen. Beide Szenarien waren sowohl mit dem CBM-IV-Mechanismus als auch mit dem SAPRC99-Mechanismus gerechnet worden. Die Abbildung 24 zeigt jedoch,

das in der berechneten Ozonänderung die Unterschiede zwischen den verschiedenen chemischen Mechanismen äußerst gering sind.

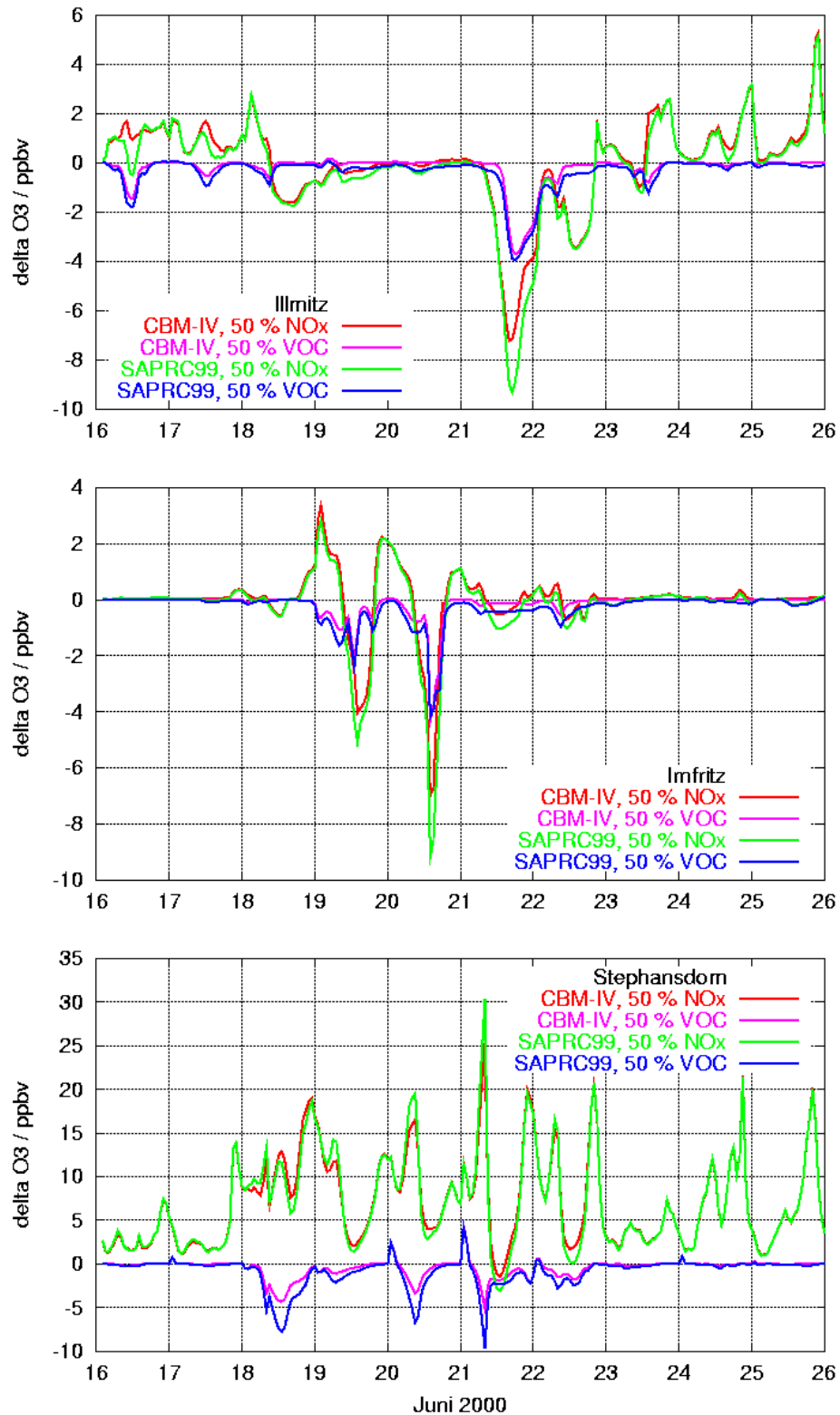


Abb. 24: Änderung der Ozonwerte an den Stationen Illmitz, Imfritz und Stephansdom in den Emissionsszenarios *scen_05N*, *scen_05V*, *scen-S_05N* und *scen-S_05V* im Vergleich mit den unveränderten Emissionen (*orig*).

An der Station Illmitz im Südosten des Ozonüberwachungsgebiets bewirkt die Reduktion der NO_x-Emissionen an den Tagen mit stärkerem Westwind am Anfang und am Ende der betrachteten Episode eine Erhöhung der Ozonwerte zwischen 2 und 4 ppbv. Diese Erhöhung tritt vor allem am Abend und am Morgen auf.

Die Reduktion der VOC-Emissionen bewirkt an diesen Tagen eine geringe Reduktion des Ozons um weniger als 2 ppbv. Diese treten am Tage auf. Am 19. und 20. Juni, an denen Südostwind herrschte, sind in Illmitz fast keine Veränderungen des Ozons zu beobachten, da das Gebiet mit reduzierten Emissionen im Lee der Station liegt. Größere Reduzierungen des Ozons treten hingegen am 21. und am 22. Juni auf. Am 21. Juni lag Illmitz direkt im Lee der Stadt Wien. An diesem Tag ist der Effekt von 50 %igen VOC-Reduktionen mit -4 ppbv größer als an den anderen Tagen, was auf das VOC-kontrollierte Regime in urbanen Gebieten hinweist. NO_x-Reduktion führt zu einer noch größeren Ozonabnahme von etwa -8 ppbv. Auch am 22. 6. nimmt durch NO_x-Reduktion das Ozon um 3 ppbv ab.

An der Station Irnfritz im Nordwesten des betrachteten Gebietes treten wesentliche Änderungen der Ozonkonzentration nur am 19. und 20. Juni auf, also an den Tagen, an denen in Illmitz kein Effekt beobachtet wurde. An den anderen Tagen wird die Station auf Grund der Windrichtung kaum von den Emissionsreduktionen beeinflusst. Lediglich an den windschwachen Tagen 21. und 22. Juni sind geringe Änderungen zu beobachten. Am 19. und 20. Juni hingegen bewirken sowohl Reduktionen von NO_x als auch VOC am Tage eine Abnahme des Ozons. NO_x führt aber nachts zu einer Ozonzunahme.

Die innerstädtische Station Stephansdom zeigt eine andere Charakteristik. Reduktionen der VOC-Emissionen bewirken an den Tagen mit schwächerem Wind vom 18. bis 22. Juni jeweils tagsüber eine Ozonabnahme. Die Reduktion der NO_x-Emissionen erhöht jedoch fast immer das Ozon, wobei die größten Erhöhungen morgens und abends auftreten. Die größte Erhöhung beträgt 30 ppbv am Morgen des 21. Juni. Hier zeigt sich deutlich, dass der Effekt der Ozonzunahme durch Reduktion der NO_x-Emission vor allem in der unmittelbaren Umgebung der Emissionsquellen auftritt, denn an den entfernter liegenden Stationen Illmitz und Irnfritz wurde Ozon durch die Veränderung der NO_x-Emission reduziert, wenn die Station im Lee von Wien lag.

Die absoluten Ozonwerte mit verschiedenen Emissionsszenarien sind für die gleichen Stationen in Abbildung 25 gezeigt. Das Emissionsszenario mit europaweiten Reduktionen von NO_x und VOC um 50 % (*scen_EU*) führt fast immer, und vor allem zu den Zeiten der Ozonspitzen zu den niedrigsten Ozonwerten. Lediglich an der innerstädtischen Station Stephansdom bewirkt dieses Szenario nachts ebenfalls eine Erhöhung des Ozons. Tagsüber wird es dort aber immer reduziert.

Das Szenario ohne Emissionen im Ozonüberwachungsgebiet 1 (*scen_0*) zeigt an der Station Stephansdom einen stark reduzierten Tagesgang des Ozons mit sehr geringen Abnahmen in der Nacht. Damit ähnelt der berechnete Ozonverlauf einem Verlauf, wie er üblicherweise an sehr abgelegenen Stationen gemessen wird. Allerdings ist das Szenario *scen_0* praktisch nicht realisierbar, da es einer Evakuierung der Bevölkerung aus dem Ozonüberwachungsgebiet gleichkommt.

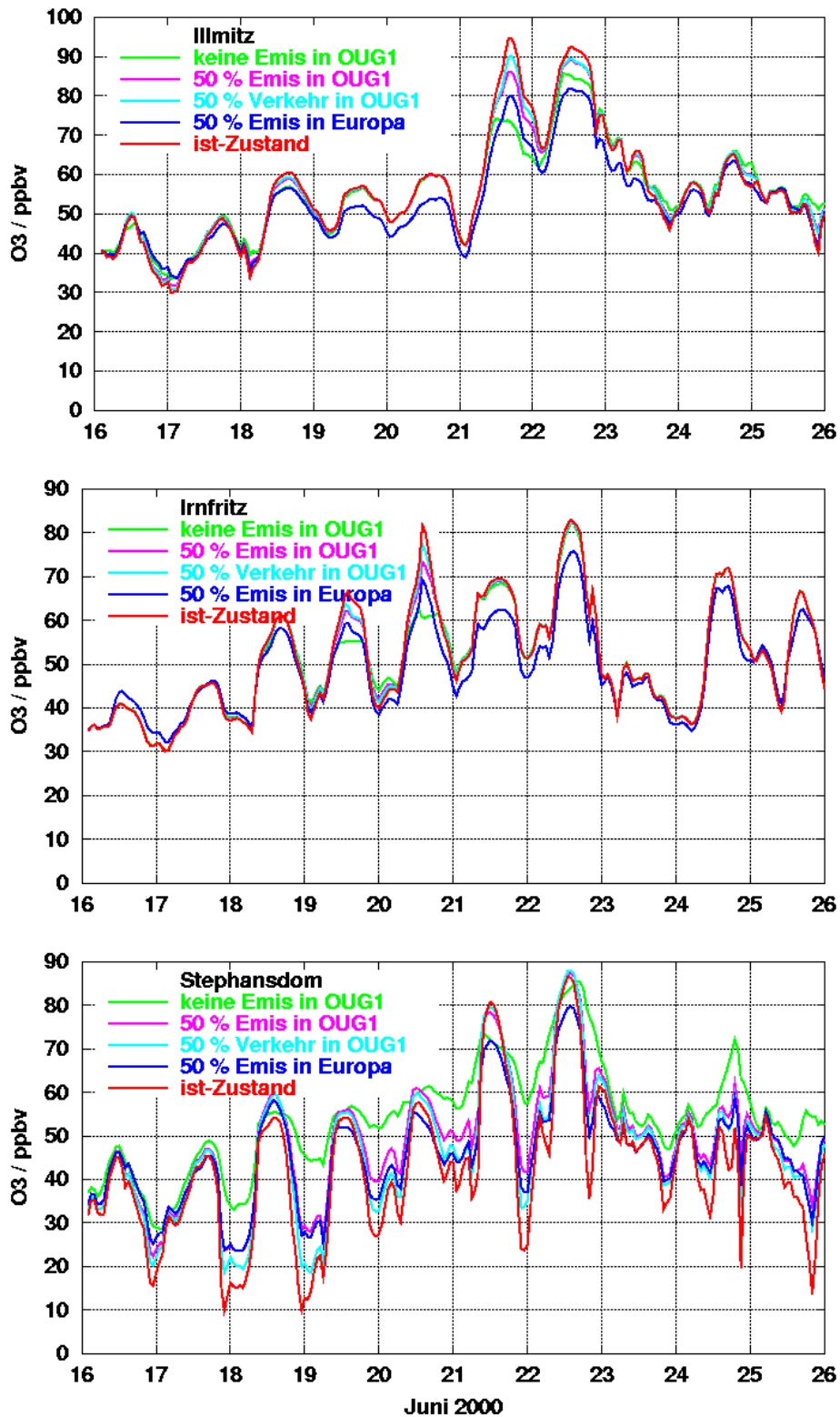


Abb. 25: Vergleich der Volumenmischungsverhältnisse von Ozon an den Stationen Illmitz, Irnfritz und Stephansdom in den Emissionsszenarios *scen_0*, *scen_05*, *scen_05A*, *scen_EU* und *orig*.

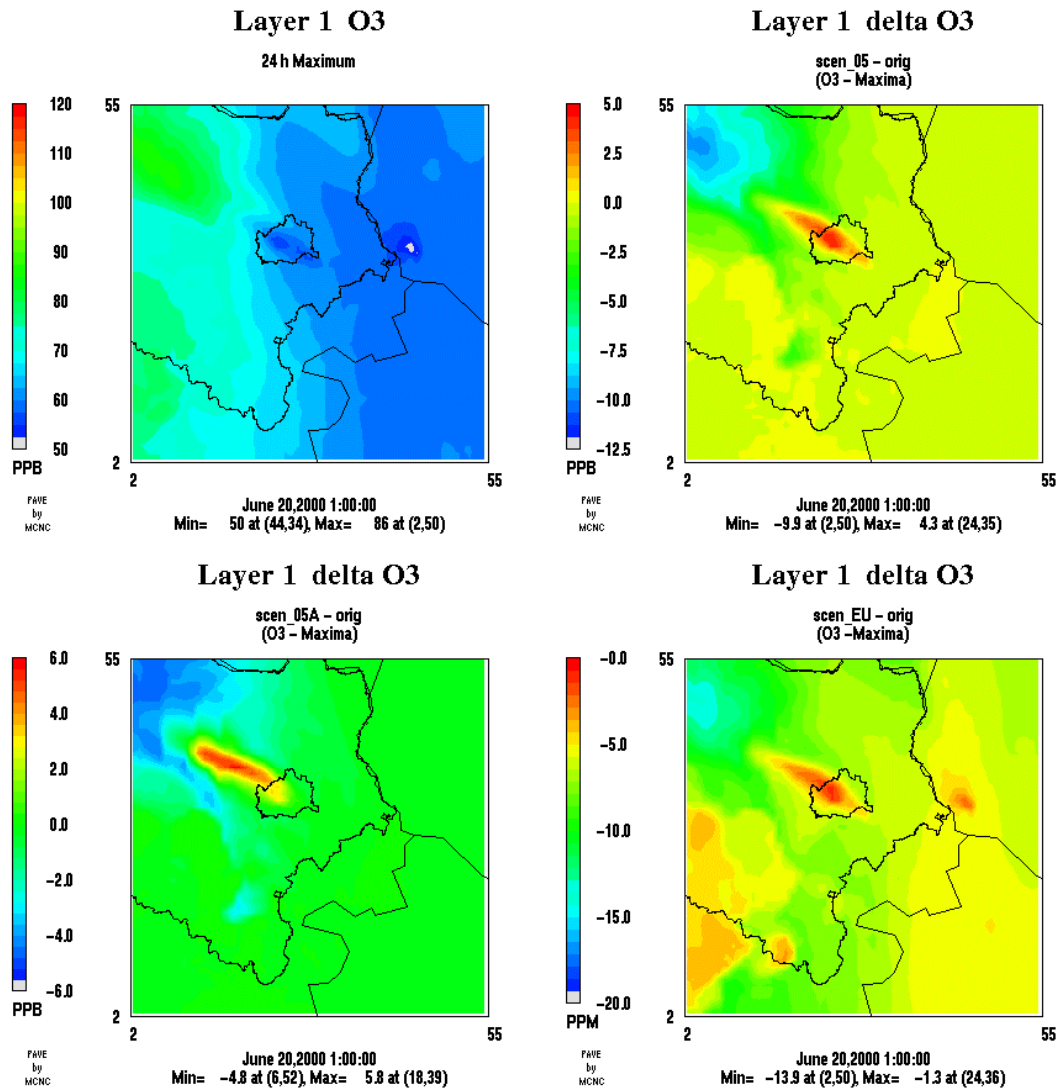


Abb. 26: Vergleich der Ergebnisse der Emissionsszenarioberechnungen für den 20. 6. 2000. Alle Berechnungen mit CBM-IV für Gitter 4 (3 km). Oben links: Maximaler Ozonwert des Tages, berechnet mit den originalen Emissionen. Oben rechts: Differenz der maximalen Tagesozonwerte für das Szenario mit halben NO_x - und VOC-Emissionen (scen_05) zu den Rechnungen mit originalen Emissionen. Unten links: Wie oben rechts mit halben Verkehrsemissionen (scen_05A). Unten rechts: Wie oben rechts mit halben Emissionen in Europa (scen_EU).

Vergleich der Emissionsszenarien im gesamten Gebiet

Wenn die Ergebnisse der Berechnungen mit den verschiedenen Emissionsszenarien über die gesamte Fläche des Ozonüberwachungsgebiets 1 verglichen werden, sind besonders die täglichen Ozonmaxima von Interesse. Die an den drei Tagen mit Überschreitungen der Informationsschwelle jeweils aufgetretenen Ozonmaxima sind in den Abbildungen 26 bis 28 (jeweils oben links) dargestellt. Die Daten stammen aus den Berechnungen für Gitter 4 (3 km) mit dem CBM-IV-Mechanismus und den originalen Emissionsdaten.

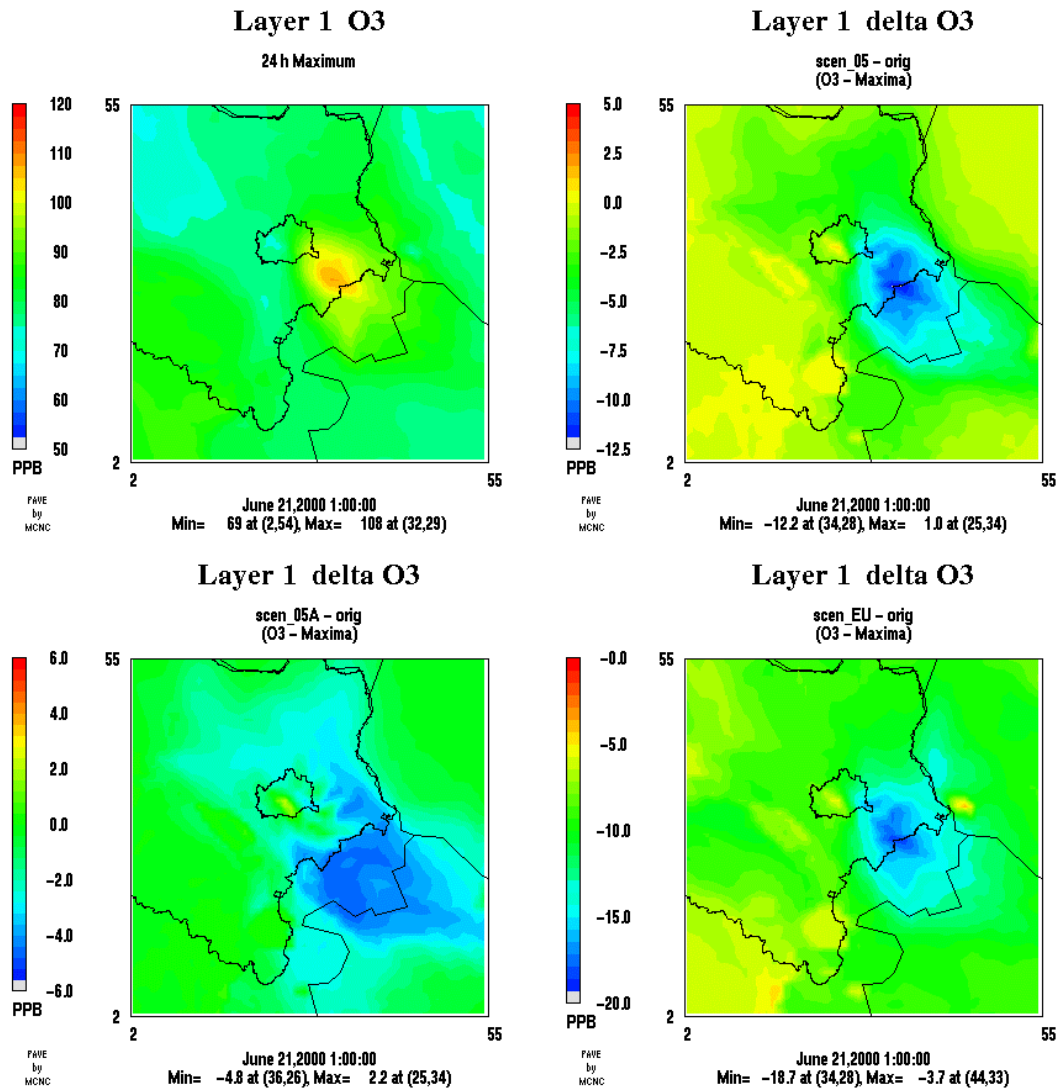


Abb. 27: Wie Abbildung 26, jedoch für den 21. 6. 2000.

Am 20. 6. 2000 tritt das berechnete Ozonmaximum im Nordwesten von Wien auf (Abb. 26). Wie schon im Kapitel über den Vergleich der Rechnungen mit Messungen beschrieben, erreicht das Ozon in der CBM-IV-Rechnung mit maximal 86 ppbv jedoch nicht die Informationsschwelle von etwa 90 ppbv. Am 21. 6. findet sich das Maximum von 108 ppbv südöstlich von Wien (Abb. 27) und am 22. 6. treten, wie schon oben beschreiben, die höchsten Ozonkonzentrationen mit einem Maximum von 114 ppbv östlich von Wien auf (Abb. 28).

Mit dem Emissionsszenario *scen_05*, bei dem die NO_x und die VOC-Emissionen im Ozonüberwachungsgebiet 1 jeweils um 50 % reduziert werden, tritt die stärkste Reduktion der Ozonwerte jeweils an den Orten der Ozonmaxima auf. Am 22.6. ist die Ozonreduktion mit -12.6 ppbv am stärksten, am 20. 6. mit -9.9 ppbv am geringsten. Im Stadtgebiet von Wien nehmen die Ozonmaxima jeweils geringfügig zu. Am 20. 6. ergibt sich sogar ein längeres Gebiet mit einer Ozonzunahme, das sich der

vornehmlichen Windrichtung folgend etwa von Schwechat im Südosten bis ins Tullner Feld erstreckt.

Beim Szenario mit reduzierten Verkehrsemissionen (*scen_05A*) sind die Reduktionen der jeweiligen Ozonmaxima geringer als beim Szenario *scen_05*. Die örtlichen Erhöhungen der Ozonmaxima fallen jedoch geringfügig höher aus. Besonders am 21. 6. ist zu beobachten, dass die Reduktion des Maximums in größerer Entfernung zur Stadt Wien auftritt. Dies lässt sich damit begründen, dass beim Szenario *scen_05A* die Kohlenwasserstoffemissionen kaum reduziert werden, diese aber vor allem die Ozonbildung in der Nähe urbaner Gebiete auf Grund eines VOC-kontrollierten Regimes beeinflussen. Am 22.6. ist das Gebiet stärkerer Ozonreduzierung beim Szenario *scen_05A* mehr nach Süden ausgedehnt als bei *scen_05*. Dies weist bei der an dem Tag vorherrschenden Westwindlage auf einen höheren Anteil der Verkehrsemissionen im Süden von Wien hin.

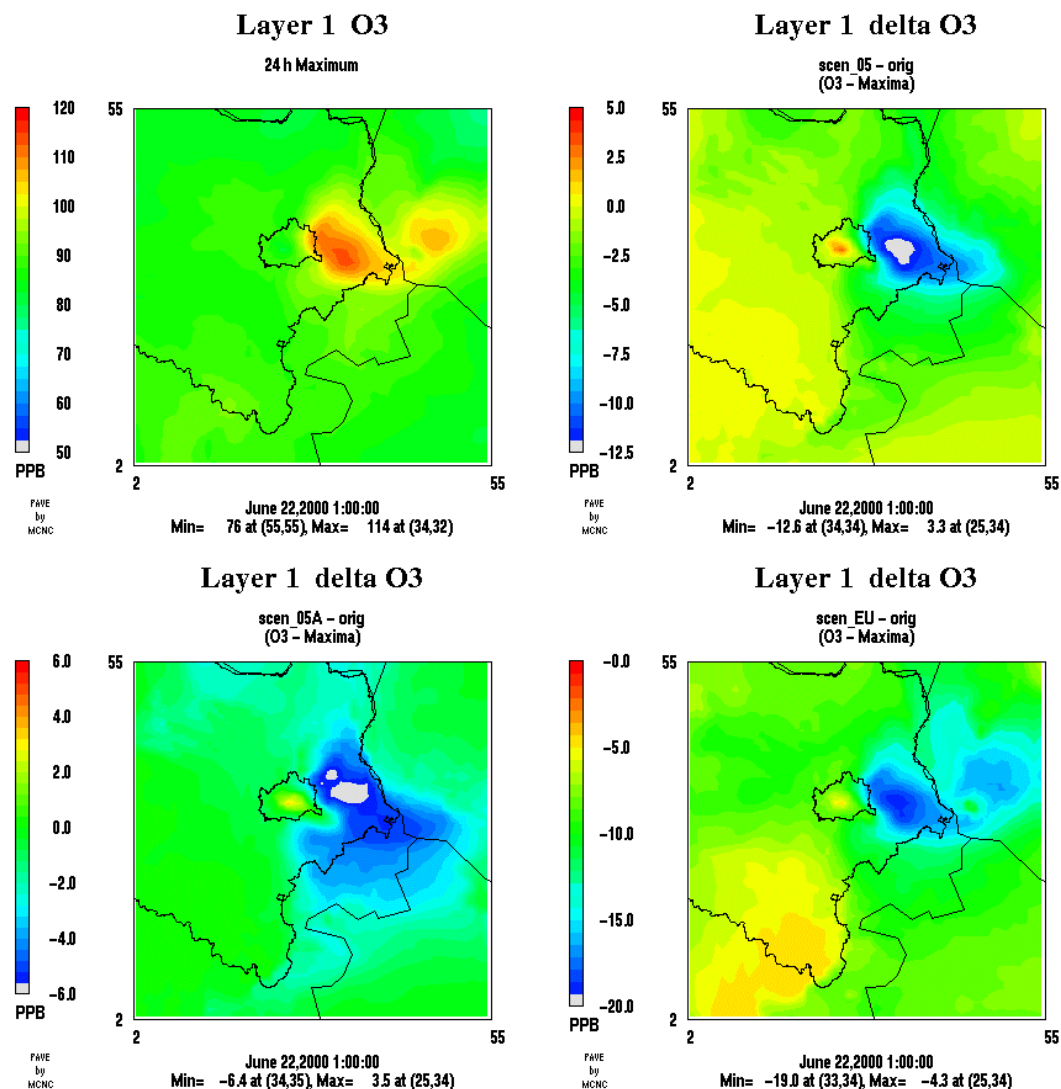


Abb. 28: Wie Abbildung 26, jedoch für den 22. 6. 2000.

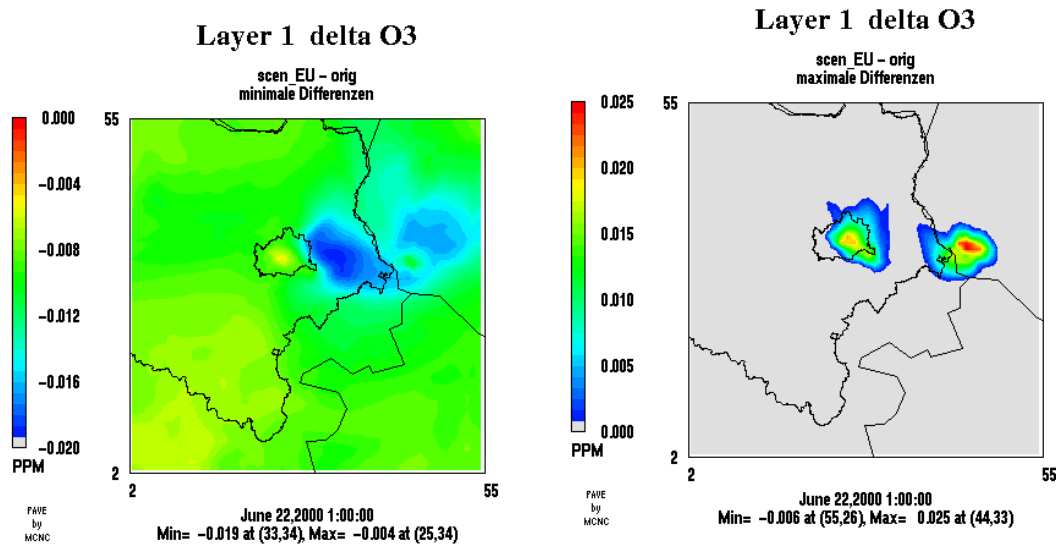


Abb. 29: Minimale und maximale Differenzen zwischen den Szenariorechnungen mit europaweiten Emissionsreduktionen um 50 % und den originalen Emissionen für den 22. 6. 2000.

Am 20. 6. ist bei *scen_05A* ebenfalls ein langgestrecktes Gebiet mit erhöhten Ozonmaxima im Nordwesten von Wien erkennbar. Dieses beginnt jedoch nicht wie bei *scen_05* im Südosten von Wien, wo verstärkt Industrieemissionen zu erwarten sind, sondern in der Wiener Innenstadt. Außerdem erstreckt es sich in diesem Fall etwas weiter nach Nordwesten.

Bei den Berechnungen mit dem Szenario von europaweiten Emissionsreduktionen um 50 % (*scen_EU*) treten im betrachteten Gitter 4 keine Erhöhungen der Ozonmaxima auf. Die Erniedrigungen der Ozonmaxima sind mit maximal 19 ppbv am 22. 6. größer als bei *scen_05*, zeigen aber grundsätzlich die gleiche Struktur. Auffällig ist, dass im Gegensatz zu *scen_05* im Bereich der Stadt Bratislava die Ozonerniedrigungen geringer ausfallen als in der Umgebung. Dies lässt sich damit erklären, dass bei *scen_EU* auch die Emissionen in der Slowakei reduziert werden und ähnlich wie in Wien bei weniger NO_x ein urbaner Effekt mit geringeren Ozonreduzierungen auftritt.

Vergleich der Emissionsszenarien im gesamten Gebiet, Teil 2

Die Abbildung 29 zeigt einen weiteren Vergleich zwischen den Rechnungen mit originalen Emissionen und dem Szenario mit europaweiten Emissionsreduktionen um 50 % für den 22. 6. 2000. Gezeigt sind die während dieses Tages maximal bzw. minimal auftretenden Differenzen zwischen den beiden Rechnungen. Die minimalen Differenzen (Werte < 0) stellen die größten Ozonreduktionen dar. Diese zeigen eine große Ähnlichkeit mit den Differenzen der Ozonmaxima im vorangegangenen Abschnitt. Die Übereinstimmung weist darauf hin, dass die größten Ozonerniedrigungen vorwiegend zu den Zeiten der Ozonmaxima auftreten und dass durch die Emissionsreduktionen das Auftreten der Ozonmaxima zeitlich auch nur unwesentlich verschoben wird.

Die maximalen Differenzen (Werte > 0) zeigen, wo die verminderte Emission (von NO_x) zu einer Reduzierung des Ozonabbaus und damit zu einer Ozonzunahme führt.

Dies tritt vor allem nachts auf und ist auf die Gebiete um die Städte Wien und Bratislava beschränkt.

Tageszeitlich eingeschränkte Emissionsreduktionen

Zusätzlich zu den bisherigen Emissionsszenarien, bei denen ganztägig und über den gesamten Zeitraum der untersuchten Episode die Emissionen reduziert wurden, wurden auch die Auswirkungen des Emissionsszenarios *scen05M* untersucht, bei dem Reduktionen der NO_x-, VOC- und CO Emission um 50 % nur am 21. und 22. Juni in der Zeit zwischen 0:00 Uhr und 12:00 Uhr wirksam waren. Ergebnisse für einige Stationen sind in Abbildung 30 dargestellt.

Am Tage verhalten sich an allen Stationen die mit dem Szenario *scen05M* berechneten Ozonkonzentrationen sehr ähnlich zu denen des Szenarios *scen05*. Lediglich an den Nachmittagen treten vereinzelt geringfügig höhere Konzentrationen auf. Vor allem die Konzentrationsspitzen werden durch das halbtägige Emissionsszenario in ähnlicher Weise reduziert, wie bei einer ganztägigen Emissionseinschränkung. Dies zeigt, dass diejenigen lokalen Emissionen, die zur Bildung der Ozonmaxima beitragen, hauptsächlich am Vormittag emittiert werden. Die nachmittäglichen Emissionen hingegen bewirken lediglich eine leichte Anhebung der Flanke der abklingenden Ozonpeaks.

Selbstverständlich tragen nachmittägliche Emissionen an den Folgetagen zur Ozonbildung bei. Auf Grund des Luftmassenaustausches geschieht dies jedoch üblicherweise nicht mehr in unmittelbarer Nähe zu den Emittenten (in der vorliegenden Untersuchung und an den betrachteten Tagen nicht mehr im Ozonüberwachungsgebiet 1) sondern weiter entfernt und nach stärkerer Verdünnung.

Als weiterer Grund für die geringere Wirkung der nachmittäglichen Emissionen kann angenommen werden, dass die Emissionen in der bodennahen Mischungsschicht besser verdünnt werden können als vormittags, da die Mischungsschichthöhe nachmittags üblicherweise größer ist.

An den vier Stationen außerhalb Wiens ist in Abbildung 30 nachts kaum ein Unterschied zwischen den drei Szenarien zu beobachten. An den beiden Wiener Stationen, an denen die reduzierte NO_x-Emission des Szenarios *scen05* eine Zunahme des Ozons (bzw. eine Reduktion des nächtlichen Ozonabbaus) bewirkt, verhält sich das mit Szenario *scen05M* berechnete Ozon ähnlich zu dem Szenario *orig* mit unveränderten Emissionen.

Für eventuelle Maßnahmen zur Verminderung der Ozonkonzentration im Fall von Grenzwertüberschreitungen kann aus diesen Ergebnissen geschlossen werden, dass auf den Vormittag beschränkte lokale Maßnahmen auf das Gebiet in der Nähe der Emissionsquellen eine sehr ähnliche Wirkung haben, wie ganztägige Emissionseinschränkungen. Möglicherweise lässt sich die Akzeptanz von Emissionsreduktionen dadurch erhöhen, dass sie nur halbtägig verordnet werden.

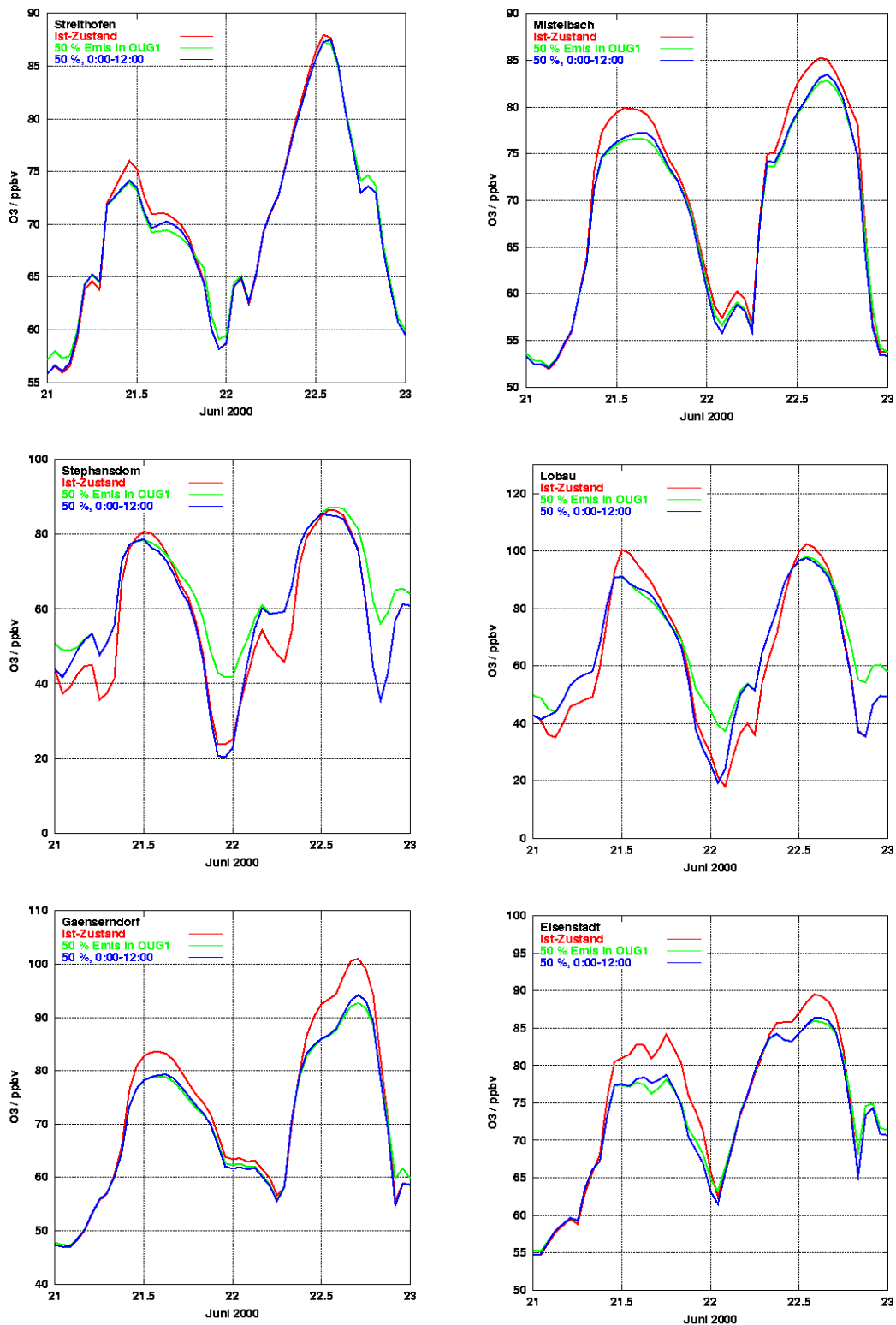


Abb. 30: Volumenmischungsverhältnis von Ozon am 21. und 22. Juni 2000 an sechs Stationen, berechnet mit den Szenarien *orig*, *scen05* und *scen05M*.

Vergleich der Emissionsszenariorechnungen mit OSAT

Die Ergebnisse der Rechnungen mit den Emissionsszenarios lassen sich nicht direkt mit den OSAT-Ergebnissen vergleichen, da beide Methoden von unterschiedlichen Voraussetzungen ausgehen und unterschiedliche Aussagen liefern. Da bei der OSAT-Technik jedoch die Anteile des Ozons berechnet werden, die aus den ursprünglichen Emissionen in den einzelnen Quellgebieten entstehen, ist ein Vergleich des Ozons aus Vorläufern aus dem Ozonüberwachungsgebiet 1 mit der Differenz zwischen dem Szenario mit den ursprünglichen Emissionen (*orig*) und dem Szenario ohne Emissionen (*scen_0*) im Ozonüberwachungsgebiet 1 möglich.

Für diesen Vergleich wurde zunächst aus den OSAT-Ergebnissen über den gesamten Zeitraum der berechneten Episode der Mittelwert aller Beiträge der Quellgebiete in den Ländern Burgenland, Niederösterreich und Wien zur Ozonbildung gebildet. Unter NO_x-Kontrolle und unter VOC-Kontrolle gebildetes Ozon wurden addiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 31 mit den Ergebnissen von Gitter 2 (27 km Auflösung) dargestellt. Die höchsten Werte ergeben sich östlich von Wien sowie im nördlichen Weinviertel. Südwestlich von Niederösterreich ist der Einfluss sehr gering, was bei den Windrichtungen in der betrachteten Episode auch zu erwarten ist.

Die Szenariorechnungen berücksichtigen im Gegensatz zur OSAT-Technik auch die Reduktion von Ozon durch erhöhte NO_x-Konzentrationen. Um die beiden Methoden besser vergleichen zu können, wurden aus den Ergebnissen der Szenariorechnungen nur die Zeiten zwischen 9:00 Uhr und 18:00 Uhr herangezogen, da in diesem Zeitraum vornehmlich die Ozonbildung stattfindet, während der Ozonabbau durch NO vor allem nachts abläuft. Es wurden mit den Szenarien *orig* und *scen_0* die Mittelwerte der Ozonkonzentration aus den genannten Tageszeiten über die gesamte Episode gebildet und die Differenz dieser Werte in Abbildung 31 wiedergegeben. Die gezeigten Werte stellen somit ebenfalls das Ozon dar, das mit den Vorläuferstoffen aus dem Ozonüberwachungsgebiet 1 entstanden ist.

Die Übereinstimmung der beiden Rechnungen ist erstaunlich gut. Unterschiede ergeben sich vor allem im Stadtgebiet von Wien, wo die Szenariorechnungen auch mit den betrachteten Tagwerten eine Reduzierung des Ozons auf Grund der NO_x-Emission ergeben, was mit der OSAT-Technik nicht berechnet werden kann. Die Maximalwerte unterscheiden sich jedoch weder in der Lage noch in der Größe (2.7 ppbv mit OSAT, 2.4 ppbv mit Emissionsszenarios) wesentlich. Der mit OSAT berechnete Maximalwert ist etwas höher, jedoch berechnet OSAT auch den theoretisch höchsten Einfluss eines Quellgebiets ohne Reduktion von Ozon durch NO_x. Der geringe Effekt im Südwesten des Modellgitters und die generelle Form der einzelnen Konturen stimmen ebenfalls gut überein.

Ein weiterer Grund für die etwas höheren Werte bei OSAT könnte sein, dass bei dieser Methode auch der Einfluss biogener Kohlenwasserstoffe aus den jeweiligen Quellgebieten berücksichtigt wird. Im Gegensatz dazu wurden bei den Emissionsszenarios die biogenen Emissionen nicht reduziert. Auffällig an beiden Abbildungen (31 und 32) ist, dass die Regionen, in denen die Emissionen aus dem Ozonüberwachungsgebiet 1 ihren größten Einfluss haben, in diesem Gebiet selbst liegen. Dies zeigt, dass eventuelle Emissionsreduktionen sich auch direkt in den Regionen auswirken, in denen reduziert wird.

OSAT: O3 (Bgl + Noe + Wien)

Layer 1, Mittelwert 16.6 - 25.6.2000

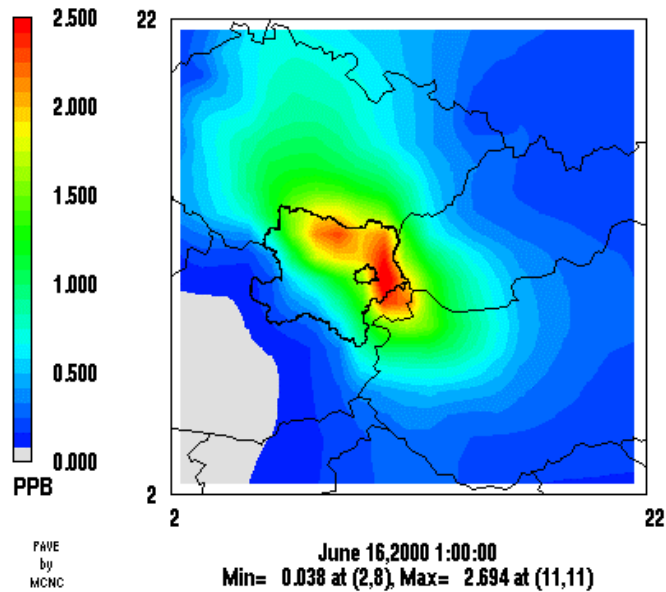


Abb. 31: Mittelwert über 240 Stunden (16.6. - 25.6) aller mit OSAT berechneten Beiträge zum Ozon (O3_NOx und O3_VOC) aus den Quellgebieten im Ozonüberwachungsgebiet 1 (nördliches Burgenland, Niederösterreich und Wien).

O3 (orig) - O3 (scen0)

Layer 1, Mittelwerte 16.6 - 25.6.2000

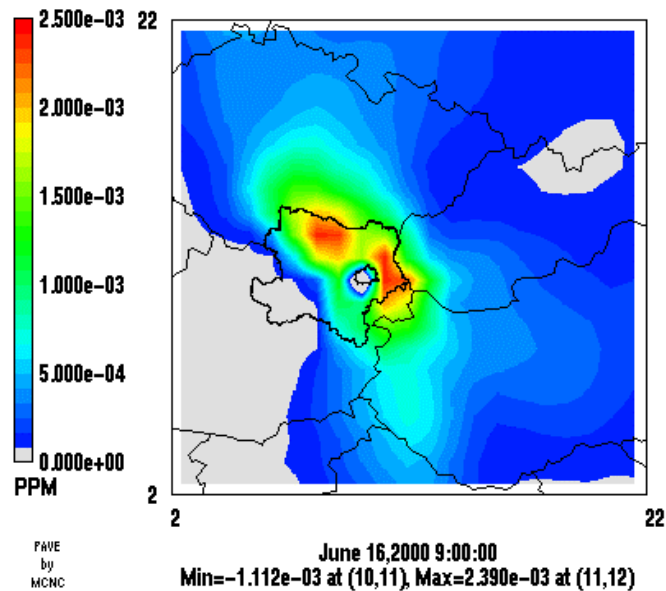


Abb. 32: Differenz der Mittelwerte (jeweils vom 16.6. bis 25.6.2000 mit den stündlichen Mittelwerten zwischen 9:00 und 18:00, 9 Stunden) des berechneten Ozons aus den Emissionsszenarios orig = unveränderte Emissionen und scen0 = keine Emissionen im Ozonüberwachungsgebiet 1.

Diskussion der Ergebnisse

Auswirkungen von Emissionsreduktionen im Ozonüberwachungsgebiet

Die Ergebnisse der verschiedenen Modellrechnungen lassen folgende Schlussfolgerungen über die Wirksamkeit von kurzfristigen lokalen Maßnahmen zur Reduktion der Ozonkonzentration zu:

Sowohl die Untersuchungen mit der OSAT-Technik als auch die Ergebnisse der Rechnungen mit den Emissionsszenarien zeigen, dass Maßnahmen zur Emissionsreduktion im Ozonüberwachungsgebiet 1 das Ozon nur geringfügig reduzieren können. Das im Ozonüberwachungsgebiet vorkommende Ozon wird zum größten Teil nicht aus Vorläufersubstanzen gebildet, die aus diesem Gebiet stammen. Hauptsächlich stammt es aus der globalen Hintergrundbelastung. Ein weiterer wesentlicher Anteil ist der europäische kontinentale Hintergrund, der mit Vorläufern aus dem restlichen Europa gebildet wird und in das betrachtete Gebiet transportiert wird.

Die prozentuale Zusammensetzung der Ozonquellen ist hauptsächlich von der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit abhängig. Bei höheren Windgeschwindigkeiten nimmt der Anteil des globalen Hintergrundes zu, während bei schwachem Wind auf Grund des geringeren Luftmassenaustausches der Einfluss lokaler Emissionen ansteigt. Die Quellen der Ozonvorläufersubstanzen liegen naturgemäß meist (außer nach Winddrehungen) im Luv der Messstelle. Dies gilt einerseits für die europäische Skala, so dass bei westlichem Wind Deutschland und Westeuropa wesentlich zum Ozon in Nordostösterreich beitragen, bei Südostwind hingegen der Anteil aus Ungarn und Slowenien/Kroatien zunimmt. Andererseits gilt es auch auf der lokalen Skala, so dass z. B. Ozon aus Vorläufern mit Ursprung in Wien hauptsächlich im Lee der Stadt auftritt.

Reduktionen von Stickoxiden oder von Kohlenwasserstoffen im Ozonüberwachungsgebiet 1 haben eine unterschiedliche Wirkung. Die Modellrechnungen zeigten, dass erwartungsgemäß der Nahbereich der Stadt Wien häufig ein VOC-kontrolliertes Regime darstellt, während der Rest des Gebietes hauptsächlich NO_x-kontrolliert ist. Dies bedeutet, dass Maßnahmen zur Reduktion von Kohlenwasserstoffemissionen vor allem in Wien und der nächsten Umgebung wirksam sind und sich auf andere Gebiete nur auswirken, wenn diese im Lee von Wien liegen.

Dies zeigt sich einerseits in den OSAT-Ergebnissen, in denen innerhalb des Ozonüberwachungsgebiets 1 der Anteil des mit VOC aus Wien gebildeten Ozons meist höher ist als der Anteil des mit NO_x aus Wien gebildeten Ozons. Andererseits wird in den Ergebnissen mit dem Szenario, bei dem nur VOC reduziert wurden, das Ozon auch an den entfernten Stationen Illmitz und Irnfritz nur in den Leesituationen reduziert.

Die Reduktion der Emission von Stickoxiden, ist für das weitere Umland wirksamer. Im Nahbereich von Wien selbst bewirkt NO eine Titration von Ozon, also eine Reduzierung der Konzentration. Aus diesem Grund steigt dort bei einer Herabsetzung der NO_x-Emission die Ozonkonzentration an. Auf Grund der Titrationsreaktion sind in Ballungsräumen die Ozonwerte jedoch normalerweise geringer als im Umland, so dass auch eine geringfügige Zunahme des Ozons häufig nicht zu einer Überschreitung

von Schwellwerten führt. Außerdem wirkt sich der Titrationseffekt vor allem nachts aus, wenn keine Ozonspitzenwerte auftreten.

Auch bei geringen Windgeschwindigkeiten, wie sie üblicherweise im Falle von erhöhten Ozonkonzentrationen vorkommen, ist in der untersuchten Episode der Luftmassenaustausch so effektiv, dass lokale Emissionen nur am Tage der Emission in der Nähe ihrer Quellen Ozonbildung bewirken. Dies ergibt sich aus den Berechnungen mit der OSAT-Technik. Kurzfristige Massnahmen zur Emissionsreduzierung brauchen daher keine längere Vorlaufzeit um ihre Wirkung zu zeigen.

Vielmehr ergaben die Berechnungen mit dem Szenario *scen05M*, bei dem Emissionsreduktionen nur in der Zeit zwischen 0:00 Uhr und 12:00 Uhr vorgenommen wurden, ähnliche Ergebnisse wie mit einer gleichen, aber ganztägigen Reduktion. Hieraus ergeben sich neue Möglichkeiten für einen Maßnahmenplan zur Ozonreduzierung, da bei einer halbtägigen Maßnahme die Belastung der Bevölkerung geringer ausfällt als bei einer ganztägigen Einschränkung, die Wirkung auf die Ozonkonzentration aber nahezu gleich bleibt.

Auf Grund des Luftmassenaustausches und der chemisch nur am Tage stattfindenden Ozonbildung ergibt sich, dass lokale Maßnahmen besonders am Tage der Maßnahme zur Zeit des Ozonmaximums wirksam sind, so dass vor allem diese reduziert werden. An Folgetagen sind die Emissionen bereits weiter verdünnt und waren im Falle der untersuchten Episode auch aus dem Ozonüberwachungsgebiet 1 heraustransportiert worden. Da Ozonspitzenwerte jedoch meist in meteorologischen Situationen mit niedrigen Windgeschwindigkeiten auftreten, finden die stärksten Ozonreduktionen am Tage der Emissionminderung jedoch meist in der näheren Umgebung statt. In der untersuchten Episode war dies innerhalb des Ozonüberwachungsgebiets 1.

Vergleich mit anderen Studien

In einer Studie des österreichischen Umweltbundesamtes (Schneider, 1999) wurden die Auswirkungen von Emissionsreduktionsmaßnahmen auf die Ozonbelastung in Nordostösterreich mit Hilfe eines Lagrange-Trajektorien-Säulenmodells untersucht. Dieses Modell war im Rahmen des POP-Projekts in den 90er Jahren am Institut für Meteorologie und Physik der BOKU entwickelt worden (Wotawa et al., 1998). In der Studie wurde für eine Reihe beispielhafter Orte während verschiedener Zeitabschnitte mit unterschiedlichen Emissionsszenarien die jeweilige Ozonkonzentration berechnet. Es ergab sich ebenfalls, dass Emissionsreduktionen nur in Österreich geringere Auswirkungen haben als Reduktionen in ganz Europa. Vor allem wurden mit den Reduktionsszenarien die Ozonspitzenwerte abgesenkt. In einzelnen berechneten Fällen, wenn die Trajektorien über Wien verliefen, konnte aus den Ergebnissen interpretiert werden, dass Reduktionen in Wien größere Auswirkungen haben als Reduktionen in anderen österreichischen Gebieten, und dass in diesen Fällen auch die Reduktion der Kohlenwasserstoffemissionen zu einer Ozonerniedrigung führt.

Die Ergebnisse des Trajektorienmodells sind nur auf die wenigen Endpunkte der Trajektorien beschränkt. Der Einfluss bestimmter Emissionsgebiete, wie zum Beispiel der Stadt Wien, konnte nur erkannt werden, wenn die Trajektorie auch das Stadtgebiet überquert hatte. Die Interpretationen der Ergebnisse von Schneider stimmen jedoch zum größten Teil mit den flächigen Ergebnissen der vorliegenden Studie überein.

Die Wirkung von großräumigen und kleinräumigen Emissionsminderungsmaßnahmen auf das bodennahe Ozon in hochsommerlichen Ozonepisoden wurde auch in einer Studie der PROGNOSE AG in Deutschland untersucht (Mutz et al., 1997). Hierzu wurden zwei verschiedene Eulersche Modellsysteme (EURAD und Calgrid/REM3) in drei Modellregionen (Rhein-Main-Neckar, Dresden, und Berlin-Brandenburg) eingesetzt. Die Wirkung von Emissionsminderungsmaßnahmen wurde an Hand konkreter Emissionsszenarien ermittelt. Hierbei ergab sich ebenfalls, dass dauerhafte und großflächige Maßnahmen das Ozonvorkommen wesentlich effektiver reduzieren können, als kurzfristige und lokale Maßnahmen.

Weitere mögliche Untersuchungen

Alle Ergebnisse beziehen sich auf die berechnete Episode im Juni 2000. Diese wurde ausgewählt, weil innerhalb von drei Tagen unterschiedliche Teile des Ozonüberwachungsgebiets 1 durch erhöhte Ozonkonzentrationen belastet waren. In dieser Zeit wurde jedoch nur die Informationsschwelle von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschritten, nicht jedoch die Alarmschwelle von $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Weitere Rechnungen, besonders für den Sommer 2003 mit noch höheren Belastungen könnten die gewonnenen Erkenntnisse festigen.

Überschreitungen der Alarmschwelle treten im Ozonüberwachungsgebiets 1 nur vereinzelt auf. Es kann angenommen werden, dass in einigen Fällen sehr lokale Emissionen dazu beigetragen haben. Solche Emissionsspitzen können mit den verwendeten Emissionskataster von $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ Auflösung jedoch nicht berechnet werden. Dies zeigt für zukünftige Rechnungen die Notwendigkeit eines feineren Emissionskatasters bei dem starke Emittenten als Punktquellen berücksichtigt werden.

Auch eine Aktualisierung der Emissionsdaten wäre wünschenswert, obwohl die benutzten Werte mit neueren NO_x - und VOC-Emissionen recht gut übereinstimmen. Im Fall der CO-Emissionen überschätzt der benutzte Emissionskataster jedoch die gegenwärtige Situation.

Das benutzte Modellsystem eignet sich jedoch nicht nur zur Analyse einer vergangenen Situation wie in der vorliegenden Studie. Vielmehr ist es im Rahmen eines Luftgütemanagements auch für aktuelle Vorhersagen der Ozonsituation geeignet und könnte eingesetzt werden, um vor Eintreten einer Schwellwertüberschreitung die Situation zu erkennen, so dass geeignete Maßnahmen eingeleitet werden können.

Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Auswirkungen von kurzfristigen Maßnahmen zur Emissionsreduktion im Ozonüberwachungsgebiet 1 auf die Ozonkonzentration wurden umfangreiche Rechnungen mit einem Eulerschen Modellsystem ausgeführt. Das Modellsystem besteht aus dem mesoskaligen meteorologischen Vorhersagemodell MM5 und dem Chemie-Transportmodell CAMx. Die Rechnungen befassten sich mit einer beispielhaften Episode aus dem Juni 2000, in der an mehreren Tagen und, abhängig von der vorherrschenden Windrichtung, an verschiedenen Stationen Überschreitungen der Ozoninformationsschwelle von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auftraten.

Die CAMx-Rechnungen wurden mit zwei verschiedenen Chemiemechanismen (CBM-IV und SAPRC99) ausgeführt. Beide zeigten im Vergleich mit Stationsmessungen zufriedenstellende Ergebnisse. Dies galt auch für die meteorologischen Berechnungen mit MM5.

Mit der OSAT-Technik des Modells CAMx wurden die Quellen der Vorläufersubstanzen des Ozons berechnet, das im Untersuchungsgebiet auftritt. Es zeigte sich, dass nur ein kleiner Teil (maximal 20 %) aus dem Ozonüberwachungsgebiet selbst stammt, der globale und der europäische Hintergrund hingegen eine weit größere Rolle spielen. Eine nähere Untersuchung des lokalen Einflusses ergab, dass bei den Wiener Emissionen die Kohlenwasserstoffe einen wesentlichen Anteil an der Ozonbildung haben. Die anderen Gebiete tragen mehr mit NO_x -Emissionen zum Ozon bei.

Berechnungen mit verschiedenen Emissionsszenarien bestätigten die genannten Ergebnisse. Verschiedene Reduktionen von NO_x oder Kohlenwasserstoffen bewirkten nur eine geringe Herabsetzung der maximalen Ozonkonzentration. Effektiver war hingegen eine europaweite Emissionsreduktion. Außerdem konnte mit diesen Rechnungen gezeigt werden, dass im Bereich von Ballungsräumen die Reduktion der NO_x -Emissionen vor allem nachts zu einer Erhöhung der Ozonbelastung führt. Wird die Reduktionsmaßnahme auf den Vormittag beschränkt, ergeben sich ähnliche Auswirkungen auf das Ozonvorkommen wie bei einer ganztägigen Reduktion.

Die berechneten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass lokale Massnahmen nur eine geringe Wirkung auf die Ozonkonzentration zeigen. Sie wirken sich jedoch besonders auf die Maximalkonzentrationen aus und zeigen ihren größten Einfluss in der näheren Umgebung. Daher ist es mit lokalen Massnahmen durchaus möglich, eventuelle Spitzenwerte und Überschreitungen von Schwellwerten zu unterdrücken. Eine nachhaltige Verbesserung der Ozonsituation ist jedoch nur durch langfristige und großflächige Emissionsreduktionen möglich.

Literatur

- AEEG, 2003: G. Schörner, Austrian Environmental Expert Group, Vienna, private Mitteilung im Rahmen des gegenständlichen Projekts.
- Bott A., 1989: A Positive Definite Advection Scheme Obtained by Nonlinear Renormalization of the Advective Fluxes. *Mon. Wea. Rev.* **117**, 1006-1015.
- Bundesgesetzblatt, 2003: 34. Bundesgesetz: Emissionshöchstmengengesetz-Luft, EG-L, sowie Änderung des Ozongesetzes und des Immissionsschutzgesetzes-Luft (NR: GP XXII RV 38 AB 66 S. 14. BR: AB 6787 S. 696.) [CELEX-Nr.: 32001L0081, 32002L0003], Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, ausgegeben am 11. Juni 2003.
- Carter, W. P., 1996: Condensed Atmospheric Photooxidation Mechanisms for Isoprene. *Atmos. Environ.* **30**, 4275-4290.
- Carter W. P. L., 2000: Implementation of the SAPRC-99 Chemical Mechanism into the Model-3 Framework. Report to the United States Environmental Protection Agency.
- Colella P., and P. R. Woodward, 1984: The Piecewise Parabolic Method (PPM) for Gas-dynamical Simulations. *J. Comp. Phys.* **54**, 174-201.
- ECMWF, 1995: European Centre for Medium Range Weather Forecasts, "User guide to ECMWF products 2.1", ECMWF, Reading.
- EU, 2002: Richtlinie 2002/3/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Februar 2002 über den Ozongehalt der Luft, ABl. Nr. L 67/14 vom 9. März 2002.
- Gery M.W., G.Z. Whitten, J.P. Killus, and M.C. Dodge, 1989: A Photochemical Kinetics Mechanism for Urban and Regional Scale Computer Modeling. *J. Geophys. Res.* **94**, 12925-12956.
- Grell G.A., Dudhia J. and Stauffer D.R., 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR technical note TN-398+STR, 122 pp., National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA.
- Guenther, A. B., P. C. Zimmermann, R. Harley, R. K. Monson, and R. Fall, 1993: Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses. *J. Geophys. Res.*, **98**, 12609-12617.
- Janjic, Zavisla I., 1990: The step-mountain coordinate: Physical package. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1429-1443.
- Janjic, Zavisla I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: Further development of the con-vection, viscous sublayer, and turbulent closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927-945.
- Krüger, B. C., J. Kübler, and A. Clappier, 1999: Ozone control strategy calculations for the Geneva area. *Proc. EUROTRAC Symposium '98, Vol 2*, eds.: P. M. Borrell and P. Borrell, Southampton, pp.826-830.
- Krüger B. C. und W. Schmittner, 2001: Modellierung der Schadstoffdynamik im Stadtgebiet von Wien - Entwicklung und Anwendung eines Luftgüte-Simulationsmodells für den Großraum Wien, Bericht an den Magistrat der Stadt Wien, MA 22, Wien
- Krüger B. C. und W. Schmittner, 2002: Modellierung des Transports und der Chemie von Luftschadstoffen in der Region Wien - Weiterentwicklung und Anwendung eines Luftgüte-Simulationsmodells für den Großraum Wien, Bericht an den Magistrat der Stadt Wien, MA 22, Wien.
- Kumar, N. and F. W. Lurmann, 1997: Peer Review Report of ENVIRON's Ozone Source Apportionment Technology and the CAMx Air Quality Models, Revised Final Report STI-996203-1732-RFR to the Ohio Environmental Protection Agency, Columbus, OH.

- Madronich, S. and S. Flocke, 1998: The role of solar radiation in atmospheric chemistry. in Handbook of Environmental Chemistry (P. Boule, ed.), Springer-Verlag, Heidelberg, 1998, pp. 1-26.
- Motz, G., et al. (1997): Ermittlung und Bewertung der Effekte von lokalen, regionalen und überregionalen Emissionsminderungs-Strategien auf bodennahe Ozonkonzentrationen in hochsommerlichen Episoden, Gesamtbericht zur Untersuchung der Prognos AG im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes (Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon (Sommermog) - UFO-Plan Nr. 104 02 812/1), <http://www.umweltdaten.de/ozon/Berichte.htm>
- POP, 1997: Pannonische Ozonprojekt, Endbericht, Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf, Institut für Meteorologie und Physik, BOKU Wien
- Roelofs, G.J. and J. Lelieveld, 2000: Tropospheric ozone simulation with a chemistry-general circulation model: Influence of higher hydrocarbon chemistry, *J. Geophys. Res.* **105** 22697-22712.
- Schneider, J. (1999): Untersuchung über die Auswirkungen von Emissionsreduktionsmaßnahmen auf die Ozonbelastung in Nordostösterreich, Umweltbundesamt Wien, Bericht BE-160, Wien.
- Sillman, S., 1995: The use of NO_y, H₂O₂, and HNO₃ as indicators for ozone-NO_x-hydrocarbon sensitivity in urban locations. *J. of Geophys. Res.*, 100, 14,175-14,188.
- Stohl, A., E. Williams, G. Wotawa und H. Kromp-Kolb, 1996: A European inventory of soil nitric oxide emissions and the effect of these emissions on the photochemical formation of ozone. *Atmospheric Environment* **30**, 3741-3755.
- UBA, 2003: http://www.umweltbundesamt.at/presse/lastnews0/newsarchiv_2003/news031128/
- Williams, E. J., D. D. Parrish, and F. C. Fehsenfeld, 1987: Determination of NO_x emissions from soils. *J. Geophys. Res.* **92**, 2173-2179.
- Winiwarter, W. and J. Zueger, 1996: Pannonisches Ozonprojekt, Teilprojekt Emissionen. Endbericht. Report OEFZS-A-3817, Austrian Research Center, Seibersdorf.
- Winiwarter, W. und G. Fister, 1999: Emissionen aus dem Sektor "Natürliche Quellen" (CORINAIR SNAP Code 11) in Österreich, 1977, Seibersdorf-Report OEFZS-S-0015, Seibersdorf.
- Wotawa G., Stohl A. and Neiningner B., 1998: The urban plume of Vienna: Comparisons between aircraft measurements and photochemical model results. *Atmospheric Environment* **32**, 2479-2489.