

TEXTE

85/2013

# Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon (Sommermog)

Ermittlung und Bewertung der Effekte von lokalen und regionalen Emissionsminderungsstrategien auf bodennahe Ozonkonzentrationen in hochsommerlichen Episoden



UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 104 02 812/01  
UBA-FB 99-133/0

**Aktionsprogramm und Maßnahmenplan  
Ozon (Sommermog)  
Ermittlung und Bewertung der Effekte von  
lokalen und überregionalen  
Emissionsminderungsstrategien auf  
bodennahe Ozonkonzentrationen in  
hochsommerlichen Episoden**

von

**G. Motz, A. Hartmann, E. Plinke**  
Prognos AG

**R. Stern, B. Scherer, J. Fath, E. Reimer**  
IfM-CALGRID/REM3)

**M. Memmersheimer, J. Tippke, A. Ebel**  
RIU-EURAD

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

**UMWELTBUNDESAMT**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktionsprogramm-massnahmenplan-ozon-sommersmog-0> verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	Prognos AG Berlin Goethestr. 85 10623 Berlin
Abschlussdatum:	Dezember 1997
Erstveröffentlichung:	1998
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: <a href="mailto:info@umweltbundesamt.de">info@umweltbundesamt.de</a> Internet: <a href="http://www.umweltbundesamt.de">http://www.umweltbundesamt.de</a> <a href="http://fuer-mensch-und-umwelt.de/">http://fuer-mensch-und-umwelt.de/</a>
Redaktion:	Fachgebiet II 4.2 Beurteilung der Luftqualität

Dessau-Roßlau, Oktober 2013

**INHALTSVERZEICHNIS**

**Seite**

**I. Zielsetzung und Rahmenbedingungen**

**1. Zielsetzung, Untersuchungsprogramm und Berichtswesen**

- 1.1 Zielsetzung und Untersuchungsprogramm ..... 1-1
- 1.2 Untersuchungsteam, Berichtswesen und Dokumentation ..... 1-5

**2. Grundlegende Rahmenbedingungen**

- 2.1 Abgrenzung der groß- und der kleinräumigen Untersuchungsgebiete..... 2-1
- 2.2 Bestimmung der Untersuchungszeiträume (Ozonepisoden 1990 und 1994)..... 2-5
- 2.3 Ermittlung und Aufbereitung der Eingabedaten (Inputdatenbasen) für die photochemischen Ausbreitungsrechnungen ..... 2-7
- 2.4 Emissionsminderungsmaßnahmen und Szenarien ..... 2-13
- 2.5 Auswahl der photochemischen Ausbreitungsmodelle ..... 2-22

**II. Großräumige Wirkungsanalysen (Phase A)**

**3. Emissionsseitige Wirkungen von großräumigen, dauerhaften und temporären Minderungsmaßnahmen auf die Ozon-Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC**

- 3.1 Vorgehensweise und Informationsgrundlagen..... 3-1
- 3.2 Dauerhafte, langfristig wirksame Emissionsminderungsmaßnahmen und Szenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005" ..... 3-6
- 3.3 Temporäre, episodenbezogene Emissionsminderungsmaßnahmen und Szenarien ..... 3-11
  - 3.3.1 Verkehrsbezogene Maßnahmen..... 3-11
  - 3.3.2 Wirkungen von temporären verkehrsbezogenen Maßnahmen auf die Emissionen bei der Kraftstoffverteilung ..... 3-22
  - 3.3.3 Temporäre Maßnahmen im Bereich von stationären Quellen ..... 3-23
  - 3.3.4 Temporäre Emissionsminderungs-Szenarien ..... 3-25

<b>4.</b>	<b>Immissionsseitige Wirkungen von großräumigen, dauerhaften und temporären Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozonkonzentrationen in hochsommerlichen Ozonepisoden in Deutschland</b>	
4.1	Kurzbeschreibung der photochemischen Ausbreitungsmodelle "EURAD" und REM3" .....	4-1
4.2	Wetterlagen und Ozonkonzentrationen in den Ozonepisoden Sommer 1990 und Sommer 1994 .....	4-7
4.2.1	Festlegung der Basisjahre und Untersuchungszeiträume .....	4-7
4.2.2	Ozonepisode Sommer 1994 (25.07 - 10.08.1994) .....	4-8
4.2.3	Ozonepisode Sommer 1990 (23.07. - 08.08.1990) .....	4-12
4.2.4	Vergleich der Ozonepisoden Sommer 1990 und Sommer 1994 .....	4-16
4.3	Ermittlung der Wirkungen von dauerhaften, langfristig wirksamen Minderungsmaßnahmen durch Simulationsrechnungen für die Ozonepisode vom 25.07. - 10.08.1990 .....	4-17
4.3.1	Simulation der Oxidationbildung während des Zeitraums vom 25.07. - 10.08.1990 (Basislauf) .....	4-17
4.3.2	Auswirkungen dauerhafter, langfristig wirksamer Maßnahmen auf die Oxidantienkonzentrationen in der Episode 25.07. - 10.08.1990 .....	4-27
4.4	Ermittlung der Wirkungen von temporären Minderungsmaßnahmen durch Simulationsrechnungen für die Ozonepisode Sommer 1994 .....	4-41
4.4.1	Simulation der Oxidationbildung während des Zeitraums vom 23.07.-08.08.1994 (Basislauf) .....	4-41
4.4.2	Auswirkungen temporärer Maßnahmen auf die Ozonkonzentrationen in der Episode 23.07.-08.08.1994 .....	4-51
4.4.3	Auswirkungen von frühzeitigeren Einleitungen von temporären Maßnahmen .....	4-73
4.4.4	Überprüfung der Ergebnisse der Modellrechnungen mit temporären Minderungsmaßnahmen durch zusätzliche Rechenläufe für die Ozonepisode 1990 .....	4-76
4.5	Ermittlung der Effekte des "typischen" Wochenendgangs der Emissionen auf die bodennahen Ozonkonzentrationen .....	4-78

<b>III. Kleinräumige Wirkungsanalysen (Phase B)</b>
---

<b>5.</b>	<b>Struktur- und Emissionsdaten der drei ausgewählten Modellregionen Rhein-Main-Neckar, Dresden und Berlin-Brandenburg .....</b>	<b>5-1</b>
<b>6.</b>	<b>Emissionsseitige Wirkungen von lokalen, regionalen und überregionalen Emissionsminderungsmaßnahmen in den Modellregionen</b>	
6.1	Grundlagen .....	6-1
6.2	Ergebnisse der kleinräumigen, emissionsseitigen Wirkungsanalysen .....	6-1

<b>7.</b>	<b>Wirkungen von lokalen, regionalen und überregionalen Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozon-Spitzenkonzentrationen in den Modellregionen</b>	
7.1	Vorbemerkungen .....	7-1
7.2	Wirkungen von Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozonkonzentrationen in der Modellregion "Rhein-Main-Neckar" .....	7-3
7.2.1	Modellgebiet und Untersuchungszeitraum .....	7-3
7.2.2	Modellsystem CALGRID/REM3 .....	7-6
7.2.3	Basislauf .....	7-8
7.2.4	Auswirkungen der Emissionsminderungs-Maßnahmen auf die Oxidantienkonzentrationen .....	7-21
7.2.5	Zusammenfassung und Bewertung.....	7-52
7.3	Wirkungen von Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozonkonzentrationen in der Modellregion "Dresden " .....	7-60
7.3.1	Modellgebiet und Untersuchungszeitraum .....	7-60
7.3.2	Das Modellsystem EURAD.....	7-63
7.3.3	Basislauf .....	7-66
7.3.4	Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die verschiedenen Emissionsszenarien .....	7-83
7.3.5	Zusammenfassung .....	7-109
7.4	Wirkungen von Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozonkonzentrationen in der Modellregion "Berlin-Brandenburg" .....	7-111
7.4.1	Modellgebiet und Untersuchungszeitraum .....	7-111
7.4.2	Modellsystem CALGRID/REM3 .....	7-113
7.4.3	Basisdaten .....	7-115
7.4.4	Basislauf .....	7-124
7.4.5	Auswirkungen der Emissionsminderungs-Maßnahmen auf die Oxidantienkonzentrationen .....	7-151
7.4.6	Vergleichende Bewertung der kleinräumigen CALGRID-Anwendungen Rhein-Main und Berlin-Brandenburg sowie der großräumigen REM3-Anwendung .....	7-184
7.4.7	Zusammenfassung und Bewertung .....	7-189

<b>IV. Gesamtbewertung der Effektivität von Minderungsstrategien</b>
--

<b>8.</b>	<b>Auswirkungen und Effektivität von dauerhaften und von temporären Emissionsminderungsmaßnahmen zur Bekämpfung von hohen bodennahen Ozonkonzentrationen</b>	
8.1	Synopse der groß- und kleinräumigen Wirkungsanalysen .....	8-1
8.2	Gesamtfazit .....	8-12

**LITERATURVERZEICHNIS** ..... Lit - 1 bis Lit - 11

**VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN**

**Seite**

Abb. 1-1: Untersuchungsprogramm des F&E-Vorhabens "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon" des Umweltbundesamtes ..... 1-2

Abb. 2-1a/b: Abgrenzung und räumliche Feinauflösung des großräumigen Untersuchungsgebietes der Modellsysteme REM3 und EURAD ..... 2-2/2-3

Abb. 2-2: Räumliche Abgrenzung der Modellregionen für die kleinräumigen Analysen ..... 2-4

Abb. 2-3: Großräumige Emissionsdaten: Basisdaten und Modellinputdaten ..... 2-9

Abb. 2-4: Bestimmung der kurz- und langfristigen Emissionsminderungs-Szenarien ..... 2-14

Abb. 3-1: Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in Europa in den Szenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005" ..... 3-8

Abb. 3-2: Entwicklung der VOC-Emissionen in Europa in den Szenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005" ..... 3-8

Abb. 3-3: Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen 1990-2005 in Deutschland im Trend- und Reduktionsszenario ..... 3-9

Abb. 3-4: Entwicklung der VOC-Emissionen 1990-2005 in Deutschland im Trend- und Reduktionsszenario ..... 3-9

Abb. 3-5: Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in Deutschland im Vergleich zu ausgewählten Ländergruppen ..... 3-10

Abb. 3-6: Entwicklung der VOC-Emissionen in Deutschland im Vergleich zu ausgewählten Ländergruppen ..... 3-10

Abb. 3-7: Prognos-Straßenverkehrsemissionsmodell: Ablaufstruktur und Inputparameter .... 3-14

Abb. 3.8: Verteilung der ozonrelevanten Emissionen des Straßenverkehrs auf die Straßenkategorien in Deutschland 1990 und 1994 ..... 3-16

Abb. 3.9: Anteile der Fahrzeugkategorien an den ozonrelevanten Emissionen des Straßenverkehrs 1990 und 1994 ..... 3-17

Abb. 3.10: Reduktionswirkungen von Tempolimits auf die abgasgebundenen Emissionen des Straßenverkehrs bei hoher Befolgungsquote (80%) im Bezugsjahr 1994 ..... 3-19

Abb. 3.11: Reduktionswirkungen von Fahrverboten auf die Emissionen des Straßenverkehrs im Bezugsjahr 1994 ..... 3-21

Abb. 3-12: Reduktionswirkungen von temporären Maßnahmen bei den Emissionen der stationären Quellen ..... 3-24

Abb. 3-13: NO<sub>x</sub>-Reduktion bei den Temporärszenarien T-1 bis T-6 (bezogen auf die hochsommerliche Emissionssituation in Deutschland 1994) ..... 3-27

Abb. 3-14:	VOC-Reduktion bei den Temporärszenarien T-1 bis T-6 (bezogen auf die hochsommerliche Emissionssituation in Deutschland 1994) .....	3-27
Abb. 4-1.1:	REM3 - Modellaufbau im Überblick .....	4-2
Abb. 4-1.2:	REM3 - Ablaufdiagramm des meteorologischen Datenanalysesystems .....	4-3
Abb. 4-1.3:	EURAD - Modellsystem im Überblick .....	4-5
Abb. 4-1.4:	EURAD - Flußdiagramm des Meteorologie-Modells MM5 .....	4-6
Abb. 4-2.1:	Entwicklung der Ozon-Tagesmaximalwerte an der Meßstation Mainz-Kastel im Sommer 1994 (01.06.-31.08.1994) .....	4-8
Abb. 4-2.2:	Ozonkonzentrationen an der Meßstation Viernheim (Hessen) im Zeitraum vom 23.07. bis zum 08.08.1994 .....	4-11
Abb. 4-2.3:	Ozonkonzentrationen an der Meßstation Lindenberg (Brandenburg) im Zeitraum vom 23.07. bis zum 08.08.1994 .....	4-12
Abb. 4-2.4:	Entwicklung der Ozon-Tagesmittelwerte an der Meßstation Viernheim im Sommer 1990 (01.06.-31.08.1990) .....	4-13
Abb. 4-2.5:	Ozonkonzentrationen an der Meßstation Chorweiler (NRW) im Zeitraum vom 25.07. bis zum 10.08.1994 .....	4-15
Abb. 4-2.6:	Ozonkonzentrationen an der Meßstation Berlin-Frohnau im Zeitraum vom 25.07. bis zum 10.08.1994 .....	4-15
Abb. 4-3.1:	Mit REM3 berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 3.8.1990, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet .....	4-19
Abb. 4-3.2:	Mit REM3 berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 4.8.1990, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet .....	4-20
Abb. 4-3.3:	Mit EURED berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 3.8.1990, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet .....	4-21
Abb. 4-3.4:	Mit EURAD berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 4.8.1990, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet .....	4-22
Abb. 4-3.5:	Lage der Meßstationen für die Zeitreihenanalysen .....	4-24
Abb. 4-3.6:	EURAD - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Dortmund, Essen-Bredeney und Eifel-Lammersd. mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1990 .....	4-25
Abb. 4-3.7:	REM3 - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Dortmund und Essen-Bredeney mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1990 .....	4-26
Abb. 4-3.8:	Mit REM3 für das Szenario "Trend 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 4.8. und am 5.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Auszug für den Bereich Deutschland und benachbarte Räume) .....	4-29
Abb. 4-3.9:	Mit REM3 für das Szenario "Trend 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 4.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet) .....	4-30

Abb. 4-3.10:	Mit EURAD für das Szenario "Trend 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonkonzentration am 4.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (14.00 GMT, gesamtes Modellgebiet) .....	4-31
Abb. 4-3.11:	Mit REM3 für das Szenario "Reduktion 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonkonzentration am 4.8. und 5.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14.00 bis 15.00 UTC, Bereich Deutschland und benachbarte Räume) .....	4-32
Abb. 4-3.12:	Mit EURAD für das Szenario "Reduktion 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonkonzentration am 4.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (14.00 GMT, Bereich gesamtes Modellgebiet) .....	4-33
Abb. 4-3.13:	Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Dortmund" vom 22.7. bis 10.8.1990; Basislauf und Szenariorechnungen "Trend und Reduktion 2005"; Absolutwerte und prozentuale Veränderungen .....	4-35
Abb. 4-3.14:	Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Deuselbach (Rh.-Pf.)" vom 22.7. bis 10.8.1990; Basislauf und Szenariorechnungen "Trend und Reduktion 2005"; Absolutwerte und prozentuale Veränderungen.....	4-36
Abb. 4-3.15:	Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Kollumerwaard" vom 22.7. bis 10.8.1990; Basislauf und Szenariorechnungen "Trend und "Reduktion 2005"; Absolutwerte und prozentuale Veränderungen .....	4-37
Abb. 4-4.1:	Mit REM3 berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 27.07. und am 28.07.1994, (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Bereich Deutschland und benachbarte Räume) .....	4-43
Abb. 4-4.2:	Mit EURAD berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 27.07.1994, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet .....	4-44
Abb. 4-4.3:	Mit EURAD berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 28.07.1994, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet .....	4-45
Abb. 4-4.4:	EURAD - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Lindenberg, Kyritz und Zingstmit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1994 .....	4-47
Abb. 4-4.5:	EURAD - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Eifel-Lammersdorf, Essen-Bredeney und Unna mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1994 .....	4-48
Abb. 4-4.6:	REM3 - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Angermünde und Lindenberg mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1994 .....	4-49
Abb. 4-4.7:	REM3 - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Viernheim und Darmstadt mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1994 .....	4-50
Abb. 4-4.8:	Mit REM3 für das Szenario "T-1 Bundesweites Tempolimt" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Auszug für den Bereich Deutschland und benachbarte Räume) .....	4-54

Abb. 4-4.9:	Mit REM3 für das Szenario "T-2 Innerörtl. Fahrverbote in ausgewählten Ballungsräumen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, (Auszug Deutschland) .....	4-55
Abb. 4-4.10:	Mit REM3 für das Szenario "T-3 Tempolimits plus Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, (Auszug Deutschland) .....	4-56
Abb. 4-4.11:	Mit REM3 für das Szenario "T-4 Tempolimits plus Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, (Auszug Deutschland) .....	4-57
Abb. 4-4.12:	Mit REM3 für das Szenario "T-5 Bundesweites Fahrverbot" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, (Auszug Deutschland) .....	4-58
Abb. 4-4.13:	Mit REM3 für das Szenario "T-6 Bundesweites Fahrverbot plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, (Auszug Deutschland) .....	4-59
Abb. 4-4.14:	Mit EURAD für das Szenario "T-1 Bundesweites Tempolimit" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC) .....	4-60
Abb. 4-4.15:	Mit EURAD für das Szenario "T-2 Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC) .....	4-61
Abb. 4-4.16:	Mit EURAD für das Szenario "T-3 Tempolimits plus Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC) .....	4-62
Abb. 4-4.17:	Mit EURAD für das Szenario "T-4 Tempolimits plus Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC) .....	4-63
Abb. 4-4.18:	Mit EURAD für das Szenario "T-5 Bundesweites Fahrverbot" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 04.08.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC) .....	4-64
Abb. 4-4.19:	Mit EURAD für das Szenario "T-6 Bundesweites Fahrverbot plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 04.08.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC) .....	4-65

Abb. 4-4.20:	Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Lindenberg" vom 27.7. bis 6.8.1994; gemessener Ozonverlauf und Basislauf in Absolutwerten und und prozentuale Veränderungen der Szenario-rechnungen "temporäre Minderungsszenarien T-1 bis T-5" .....	4-67
Abb. 4-4.21:	Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Berlin-Heiligensee" vom 27.7. bis 6.8.1994; gemessener Ozonverlauf und Basislauf in Absolutwerten und und prozentuale Veränderungen der Szenario-rechnungen "temporäre Minderungsszenarien T-1 bis T-5" .....	4-68
Abb. 4-4.22:	Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Wiesbaden" vom 27.7. bis 6.8.1994; gemessener Ozonverlauf und Basislauf in Absolutwerten und und prozentuale Veränderungen der Szenario-rechnungen "temporäre Minderungsszenarien T-1 bis T-5" .....	4-69
Abb. 4-4.23:	Mit REM3 für die frühzeitigere Maßnahmeneinleitung im Falle des Szenarios T-4 berechnete prozentuale Änderung der bodennahen Ozonverteilung im Vergleich zum Basislauf (Tage: 27.07. und 28.07.1994; jeweils 15.00 UTC) .....	4-74
Abb. 4-4.24:	Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Station Meinerzhagen" für den 3. und 4.Aug. 1990; gemessener und berechneter Ozonverlauf im Basislauf; Szenariorechnungen T-1 und T-5 jeweils mit Einlei-tung der Maßnahmen am 3.8. und am 1.8. (48 Stunden früher) .....	4-77
Abb. 5-1:	Tagesgang der NO <sub>x</sub> -Emissionen in der Modellregion Rhein-Main-Neckar in der Episode vom 23.07.-08.08.1994 .....	5-4
Abb. 5-2:	Tagesgang der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Rhein-Main-Neckar in der Episode vom 23.07.-08.08.1994 .....	5-4
Abb. 5-3:	Tagesgang der NO <sub>x</sub> -Emissionen in der Modellregion Dresden in der Episode vom 23.07.-08.08.1994 .....	5-5
Abb. 5-4:	Tagesgang der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Dresden in der Episode vom 23.07.-08.08.1994 .....	5-5
Abb. 5-5:	Tagesgang der NO <sub>x</sub> -Emissionen in der Modellregion Berlin-Brandenburg in der Episode vom 23.07.-08.08.1994 .....	5-6
Abb. 5-6:	Tagesgang der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Berlin-Brandenburg in der Episode vom 23.07.-08.08.1994 .....	5-6
Abb. 5-7:	Räumliche Verteilung der NO <sub>x</sub> -Emissionen in der Modellregion Rhein-Main-Neckar am 05.08.1994 von 12-13 Uhr .....	5-7
Abb. 5-8:	Räumliche Verteilung der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Rhein-Main-Neckar am 05.08.1994 von 12-13 Uhr .....	5-7
Abb. 5-9:	Räumliche Verteilung der NO <sub>x</sub> -Emissionen in der Modellregion Dresden am 05.08.1994 von 12-13 Uhr .....	5-8
Abb. 5-10:	Räumliche Verteilung der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Dresden am 05.08.1994 von 12-13 Uhr .....	5-8
Abb. 5-11:	Räumliche Verteilung der NO <sub>x</sub> -Emissionen in der Modellregion Berlin-Brandenburg am 05.08.1994 von 12-13 Uhr .....	5-9

Abb. 5-12:	Räumliche Verteilung der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Berlin-Brandenburg am 05.08.1994 von 12-13 Uhr .....	5-9
Abb. 6-1:	Emissionsminderungs-Szenarien in den Modellregionen .....	6-8
Abb. 7.2-1:	Untersuchungsgebiet Rhein-Main-Neckar - 3-dim. Darstellung mit dem 4km x 4km Rechengitter; 2-dim. Darstellung mit den topographischen Höhenlinien .....	7-4
Abb. 7.2-2:	Gitter für das TRAMPER-Analyseverfahren und das REM3-Modell (Gitterweite 0,5°Länge und 0,25°Breite) .....	7-5
Abb. 7.2-3:	Das CALGRID-Modellsystem .....	7-7
Abb. 7.2-4:	Anthropogene Kohlenwasserstoffemissionen der Flächenquellen in t/a im 4x4km <sup>2</sup> -Raster .....	7-10
Abb. 7.2-5:	NO <sub>x</sub> -Emissionen der Flächenquellen in t/a im 4x4km <sup>2</sup> -Raster .....	7-10
Abb.7.2-6:	Temperaturverlauf an einem Gitterpunkt im Dreieck Mainz, Wiesbaden, Frankfurt-Höchst .....	7-12
Abb.7.2-7:	Interpoliertes Bodenwindfeld und Messungen am 26.7.1994 .....	7-13
Abb. 7.2-8:	Berechnete O <sub>3</sub> -Konzentration in ppb am 4.8.94, Stundenmittel 16-17 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Windfeld und Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (260-580m) mit Windfeld .....	7-16
Abb. 7.2-9:	Berechnete NO <sub>2</sub> -Konzentration in ppb am 4.8.94, Stundenmittel 16-17 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Windfeld und Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (260-580m) mit Windfeld .....	7-17
Abb. 7.2-10:	Süd-Nord-Vertikalschnitt der berechneten Ozonverteilung (oberes Bild) bzw. der berechneten NO-Verteilung durch das Modellgebiet Berlin-Brandenburg .....	7-18
Abb. 7.2-11:	Gemessener Ozon-Konzentrationsverlauf vom 24.7. bis 6.8.1994 an der Station Wiesbaden-Süd und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechende Gitterbox. Alle Angaben in ppm. ....	7-20
Abb. 7.2-12:	Berechnete O <sub>3</sub> -Konzentration der Bodenschicht in ppb am 27. Juli 1994, Stundenmittel 16-17 Uhr MEZ, mit Windfeld in der Bodenschicht .....	7-22
Abb. 7.2-13:	Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Tempolimit" (Szenario S-1) am 26.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-26
Abb. 7.2-14:	Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Tempolimit" (Szenario S-1) am 27.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-26
Abb. 7.2-15:	Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Fahrverbot Pkw" (Szenario S-2) am 26.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-28
Abb. 7.2-16:	Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Fahrverbot Pkw" (Szenario S-2) am 27.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-28
Abb. 7.2-17:	Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Tempolimit und Fahrverbot" (Szenario S-4a) am 26.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-30
Abb. 7.2-18:	Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Tempolimit und Fahrverbot " (Szenario S-4a) am 27.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-30

Abb. 7.2-19: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Fahrverbote und Tempolimits in der Region plus Fahrverbote für nicht schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern " (Szenario S-4b) am 26.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-32
Abb. 7.2-20: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Szenario S-4b" am 27.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-32
Abb. 7.2-21: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus-NO <sub>x</sub> " (Szenario S-6) am 26.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-34
Abb. 7.2-22: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus-NO <sub>x</sub> " (Szenario S-6) am 27.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-34
Abb. 7.2-23: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus-VOC" (Szenario S-7) am 26.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-36
Abb. 7.2-24: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus-VOC" (Szenario S-7) am 27.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-36
Abb. 7.2-25: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max" (Szenario S-8a) am 26.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-38
Abb. 7.2-26: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max" (Szenario S-8a) am 27.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-38
Abb. 7.2-27: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Kombi-Max" (Szenario S-8b) am 26.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-39
Abb. 7.2-28: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Trend-2005" (Szenario S-10) am 26.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-42
Abb. 7.2-29: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Trend-2005" (Szenario S-10) am 27.7.94, 16-17 Uhr. ....	7-42
Abb. 7.3-1: Untersuchungsgebiet Dresden sowie die drei ineinander verschachtelten Gitter Nest O (NO) Nest 1 (N1) und Nest 2 (N2 = Untersuchungsgebiet Dresden) .....	7-62
Abb. 7.3-2: Aufbau des EURAD-Modellsystems .....	7-65
Abb. 7.3-3: Ozonkonzentrationen (in ppbV) in der bodennahen Modellschicht im Nest O (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 28.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 29.Juli 1994, 16 UTC. ....	7-69
Abb. 7.3-4: Ozonkonzentrationen (in ppbV) in der bodennahen Modellschicht im Nest O (0-70m). Oben links: 30.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 31.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 1. Aug. 1994, 16 UTC, unten rechts: 2. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-70
Abb. 7.3-5: Ozonkonzentrationen (in ppbV) in der bodennahen Modellschicht im Nest 1 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 28.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 29.Juli 1994, 16 UTC. ....	7-71
Abb. 7.3-6: Ozonkonzentrationen (in ppbV) in der bodennahen Modellschicht im Nest O (0-70m). Links: 31.Juli 1994, 16 UTC, rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-72
Abb. 7.3-7: Vergleich "Messung - Modellsimulation" für Ozon im Nest O für die Stationen Bassum, Meinerzhagen, Deuselbach und Brotjackelriegel .....	7-73

Abb. 7.3-8:	Vergleich "Messung - Modellsimulation" für Ozon im Nest 1 für die Stationen Leizig-Mitte, Melpitz, Lehmühle und Carlsfeld .....	7-76
Abb. 7.3-9:	Ozonkonzentrationen (in ppbV) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 28.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 29.Juli 1994, 16 UTC. ....	7-78
Abb. 7.3-10:	Lage der Meßstationen im Nest 2 .....	7-80
Abb. 7.3-11:	Vergleich "Messung - Modellsimulation" für Ozon im Nest 2 für die Stationen Dresden-Postplatz, Pirna und Radebeul-Wahnsdorf .....	7-81
Abb. 7.3-12:	Szenario S-4b: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 1 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 30.Juli 1994, 16 UTC. ....	7-86
Abb. 7.3-13:	Szenario S-8b: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 1 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 30.Juli 1994, 16 UTC. ....	7-87
Abb. 7.3-14:	Szenario S-9: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 1 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 30.Juli 1994, 16 UTC. ....	7-88
Abb. 7.3-15:	Szenario S-1: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-93
Abb. 7.3-16:	Szenario S-2: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-94
Abb. 7.3-17:	Szenario S-4b: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-95
Abb. 7.3-18:	Szenario S-7: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-96
Abb. 7.3-19:	Szenario S-8a: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-97

Abb. 7.3-20:	Szenario S-8b: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-98
Abb. 7.3-21:	Szenario S-9: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-99
Abb. 7.3-22:	Szenario Trend 2005: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 1 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-100
Abb. 7.3-23:	Szenario Trend 2005: Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. ....	7-101
Abb. 7.4-1:	Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg .....	7-112
Abb. 7.4-2:	Das CALGRID-Modellsystem .....	7-114
Abb. 7.4-3:	Anthropogene Kohlenwasserstoffemissionen der Flächenquellen in t/a im 2kmx2km-Raster der Region Berlin-Brandenburg .....	7-117
Abb. 7.4-4:	NO <sub>x</sub> -Emissionen der Flächenquellen in t/a im 2kmx2km-Raster der Region Berlin-Brandenburg .....	7-117
Abb. 7.4-5:	Gitter für das TRAMPER-Analyseverfahren und das REM3-Modell - Gitterweite 0,5°Länge und 0,25°Breite - sowie das CALGRID-Raster des Untersuchungsgebietes Berlin-Brandenburg .....	7-123
Abb. 7.4-6:	Berechnete NO <sub>2</sub> -Konzentration in ppb am 25.07.94, Stundenmittel 15-16 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Windfeld und Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (200-400m) mit Flugzeugmessungen und Windfeld .....	7-127
Abb. 7.4-7:	Berechnete O <sub>3</sub> -Konzentration in ppb am 25.07.94, Stundenmittel 15-16 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Windfeld und Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (200-400m) mit Flugzeugmessungen und Windfeld .....	7-128
Abb. 7.4-8:	West-Ost-Vertikalschnitt der berechneten Ozonverteilung durch das Modellgebiet Berlin-Brandenburg. Berechnete Konzentrationen in ppb am 25.7.94, Stundenmittel 13-14 Uhr MEZ vom Boden bis zur Modellobergrenze sowie O <sub>3</sub> -Bodenkonzentrationen entlang des Schnitts .....	7-129
Abb. 7.4-9:	Berechnete O <sub>3</sub> -Konzentration in ppb am 26.07.94, Stundenmittel 15-16 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (200-400m) mit Flugzeugmessungen und Windfeld .....	7-131
Abb. 7.4-10:	Berechnete O <sub>3</sub> -Konzentration in ppb am 27.07.94, Stundenmittel 15-16 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (200-400m) .....	7-134

Abb. 7.4-11: Berechnete O <sub>3</sub> -Konzentration in ppb am 27.07.94, Stundenmittel 17-18 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m). Oberes Bild: 5. Modellschicht (200-400m) .....	7-135
Abb. 7.4-12: In der Gittersäule über dem Ort mit den Koordinaten RW5400/HW5785 berechnete O <sub>3</sub> -Konzentration von 0 Uhr am 27.7.94 bis 0 Uhr am 28.7.94 in allen Rechenneiveaus .....	7-136
Abb. 7.4-13: Süd-Nord-Vertikalschnitt der berechneten Ozonverteilung durch das Modellgebiet; Isolinien: berechnete Konzentrationen in ppb am 27.7.94, Stundenmittel 17-18 Uhr MEZ vom Boden bis zur Modellobergrenze; zusätzlich: O <sub>3</sub> -Bodenkonzentrationen entlang des Schnitts .....	7-136
Abb. 7.4-14: Berechnete O <sub>3</sub> - und NO <sub>2</sub> -Bodenkonzentrationen in ppb am 28. Juli 1994, Stundenmittel 17-18 Uhr MEZ; mit Bodenmessungen .....	7-141
Abb. 7.4-15: Berechnete und gemessene Ozon-, NO <sub>2</sub> - und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Fernsehurm Frohnau und gerechneter Verlauf für die 4. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm. ....	7-144
Abb. 7.4-16: Berechnete und gemessene Ozon-, NO <sub>2</sub> - und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Heiligensee und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm. ....	7-145
Abb. 7.4-17: Berechnete und gemessene Ozon-, NO <sub>2</sub> - und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Wedding und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm. ....	7-146
Abb. 7.4-18: Berechnete und gemessene Ozon-, NO <sub>2</sub> - und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Charlottenburg und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm. ....	7-147
Abb. 7.4-19: Berechnete und gemessene Ozon-, NO <sub>2</sub> - und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Grunewald und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm. ....	7-148
Abb. 7.4-20: Berechnete und gemessene Ozon-, NO <sub>2</sub> - und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Friedrichshagen und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm. ....	7-149
Abb. 7.4-21: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Tempolimit" (Szenario S-1) am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-161
Abb. 7.4-22: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme " Regio-Tempolimit" (Szenario S-1) am 26.7.94, 16-17 Uhr .....	7-161
Abb. 7.4-23: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme " Regio-Tempolimit" (Szenario S-1) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-162
Abb. 7.4-24: Prozentuale Änderung der NO <sub>2</sub> -Konzentrationen am Boden für die temporäre Maßnahme " Regio-Tempolimit" (Szenario S-1) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-162
Abb. 7.4-25: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Fahrverbot" (S-2) am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-163
Abb. 7.4-26: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Fahrverbot" (S-2) am 26.7.94, 16-17 Uhr .....	7-163

Abb. 7.4-27: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Fahrverbot" (S-2) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-164
Abb. 7.4-28: Prozentuale Änderung der NO <sub>2</sub> -Konzentrationen am Boden für die temporäre Maßnahme "Regio-Fahrverbot" (S-2) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-164
Abb. 7.4-29: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Straßenverkehr" (S-4a) am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-165
Abb. 7.4-30: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Straßenverkehr" (S-4a) am 26.7.94, 16-17 Uhr .....	7-165
Abb. 7.4-31: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Straßenverkehr" (S-4a) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-166
Abb. 7.4-32: Prozentuale Änderung der NO <sub>2</sub> -Konzentrationen am Boden für die temporäre Maßnahme "Regio-Straßenverkehr" (S-4a) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-166
Abb. 7.4-33: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Kombi-Straßenverkehr: Regio plus umliegende Bundesländer" (S-4b) am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-167
Abb. 7.4-34: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Kombi-Straßenverkehr: Regio + uml. Bundesländer" (S-4b) am 26.7.94, 16-17 Uhr .....	7-167
Abb. 7.4-35: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Kombi-Straßenverkehr: Regio + uml. Bundesländer" (S-4b) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-168
Abb. 7.4-36: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus NO <sub>x</sub> " (S-6) am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-168
Abb. 7.4-37: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus NO <sub>x</sub> " (S-6) am 26.7.94, 16-17 Uhr .....	7-169
Abb. 7.4-38: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus NO <sub>x</sub> " (S-6) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-169
Abb. 7.4-39: Prozentuale Änderung der NO <sub>2</sub> -Konzentrationen am Boden für die temporäre Maßnahme "Focus NO <sub>x</sub> " (S-6) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-170
Abb. 7.4-40: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus VOC" (S-7) am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-170
Abb. 7.4-41: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus VOC" (S-7) am 26.7.94, 16-17 Uhr .....	7-171
Abb. 7.4-42: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus VOC" (S-7) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-171
Abb. 7.4-43: Absolute Änderung der NO <sub>2</sub> -Konzentrationen am Boden für die temporäre Maßnahme "Focus NO" (oben) und "Focus VOC" (unten) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-172
Abb. 7.4-44: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max " (S-8a) am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-173

Abb. 7.4-45: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max " (S-8a) am 26.7.94, 16-17 Uhr .....	7-173
Abb. 7.4-46: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max " (S-8a) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-174
Abb. 7.4-47: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max plus Fahrverbot in umliegenden Bundesländern" (S-8b) am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-174
Abb. 7.4-48: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max plus Fahrverbot in umliegenden Bundesländern" (S-8b) am 26.7.94, 16-17 Uhr .....	7-175
Abb. 7.4-49: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max plus Fahrverbot in umliegenden Bundesländern" (S-8b) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-175
Abb. 7.4-50: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Sommerbenzin" (S-9) am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-176
Abb. 7.4-51: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Sommerbenzin" (S-9) am 26.7.94, 16-17 Uhr .....	7-176
Abb. 7.4-52: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Sommerbenzin" (S-9) am 27.7.94, 16-17 Uhr .....	7-177
Abb. 7.4-53: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Trend-2005" am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-177
Abb. 7.4-54: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Trend-2005" am 25.7.94, 16-17 Uhr .....	7-178
Abb. 7.4-55: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Trend-2005" am 26.7.94, 16-17 Uhr .....	7-178
Abb. 8-1: Wirkungen von lokalen/regionalen und überregionalen Emissionsminderungsmaßnahmen auf die lokalen Ozon-Spitzenkonzentrationen in den Modellregionen .....	8-10

**VERZEICHNIS DER TABELLEN**

**Seite**

Tab. 2.1	Stoffliche und sektorale Differenzierung der Emissionsdatenbasen der kleinräumigen Modellregionen .....	2-12
Tab. 2.2:	Großräumige, überregionale Emissionsminderungs-Szenarien im Überblick .....	2-18
Tab. 2.3:	Kleinräumige Emissionsminderungs-Szenarien im Überblick .....	2-21
Tab. 3.1:	Überblick über die untersuchten NO <sub>x</sub> - und VOC-Minderungsmaßnahmen im Langfristszenario "Trend 2005" .....	3-2
Tab. 3.2:	Überblick über die untersuchten NO <sub>x</sub> - und VOC-Minderungsmaßnahmen im Langfristszenario "Reduktion 2005" .....	3-3
Tab. 3.3:	Überblick über die NO <sub>x</sub> - und VOC-Minderungsmaßnahmen in den kurzfristigen Szenarien "Temporäre Maßnahmen" .....	3-4
Tab. 3.4:	Die untersuchten Tempolimitvarianten .....	3-12
Tab. 3.5:	Die untersuchten Fahrverbotsvarianten .....	3-13
Tab. 3.6:	Reduktionswirkungen von temporären verkehrsbezogenen Massnahmen auf die Emissionen aus Tankstellen im Jahr 1994 .....	3-22
Tab. 3.7:	Anthropogene Ozon-Vorläuferemissionen NO <sub>x</sub> und VOC im Jahre 1994 und episodenzugehörige Auswirkungen der temporären Emissionsminderungsszenarien T-1 bis T-6 .....	3-28
Tab. 4.1:	REM3 - Analyse der Minderungswirkungen der Emissionsszenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005" auf der Basis der berechneten Gitterstundenüberschreitungen für die Episode 1990 .....	4-39
Tab. 4.2:	EURAD - Analyse der Minderungswirkungen der Emissionsszenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005" auf der Basis der berechneten Gitterstundenüberschreitungen für die Episode 1990 .....	4-40
Tab. 4.3:	Analyse der Minderungswirkungen der temporären Emissionsszenarien "T-1 bis T-6" auf der Basis der berechneten Gitterstundenüberschreitungen der Schwellenwerte 120, 180 und 240 µg/cbm für die Episode 1994 (Ergebnisse von REM3 und EURAD) .....	4-70
Tab. 4.4:	EURAD - Analyse der Minderungswirkungen der temporären Emissionsszenarien "T-1 bis T-6" auf der Basis der berechneten Gitterstundenüberschreitungen für die Episode 1994 (O <sub>3</sub> -Angaben in ppb) .....	4-71
Tab. 4.5:	REM3 - Analyse der Minderungswirkungen der temporären Emissionsszenarien "T-1 bis T-6" auf der Basis der berechneten Gitterstundenüberschreitungen für die Episode 1994 (O <sub>3</sub> -Angaben in ppb) .....	4-72
Tab. 4.6:	REM3 - Veränderung der Überschreitungshäufigkeit infolge frühzeitiger Maßnahmen von Szenario T-4 in der Teilepisode 27.07.-28.07.1994 .....	4-75
Tab. 4.7:	REM3 - Veränderung der Überschreitungshäufigkeit infolge frühzeitiger Maßnahmen von Szenario T-1 in der Teilepisode 03.08.-05.08.1990 .....	4-76

Tab. 4.8:	REM3 - Veränderung der Überschreitungshäufigkeit infolge frühzeitiger Maßnahmen-schaltung von Szenario T-5 in der Teilepisode 03.08-05.08.1990 .....	4-76
Tab. 5.1:	Ausgewählte Strukturmerkmale der Modellregionen .....	5-2
Tab. 6.1:	Kleinräumige, regionale und überregionale Emissionsminderungs-Szenarien in den Modellregionen .....	6-7
Tab. 7.2.1:	Anthropogene Jahresemissionen 1994 nach Verursachergruppen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main-Neckar .....	7-9
Tab. 7.2.2:	NO <sub>x</sub> - und VOC-Reduktionen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main-Neckar für unterschiedliche Emissionsminderungs-Szenarien (Reduktionen bezogen auf die episodenspezifischen Emissionen .....	7-23
Tab. 7.2.3:	Emissionsminderungen im Szenario 10 "Trend 2005" im Untersuchungsgebiet und im gesamten Modellgebiet des REM3 .....	7-24
Tab. 7.2.4:	Gitterstundenanalyse der O <sub>3</sub> -Konzentrationen für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien .....	7-49
Tab. 7.2.5:	Gitterstundenanalyse der O <sub>x</sub> -Konzentrationen für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien .....	7-50
Tab. 7.2.6:	Gitterstundenanalyse der NO <sub>2</sub> -Konzentrationen für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien .....	7-51
Tab. 7.2.7:	Emissionsminderungen und maximale Auswirkungen auf die O <sub>3</sub> -Konzentrationen bei den verschiedenen Minderungsszenarien in den Modellregionen Rhein-Main-Neckar .....	7-59
Tab. 7.3.1:	Gitterkonfiguration für die verschiedenen EURAD-Modellgebiete N0, N1 und N2 (Raum Dresden) .....	7-61
Tab. 7.3.2:	Durchgeführte Modellsimulationen, Bedeutung der Kürzel und Wirksamkeitszeitraum der verschiedenen Szenarien .....	7-63
Tab. 7.3.3:	Gitterstunden des bodennahen Ozons im Zeitraum 26.7. - 29.7.1994 für den Basislauf und die Szenarien S4b, S8b, S9 und S10 für den im N1-Gebiet liegenden Teil Deutschlands. Angegeben ist die Anzahl der Gitterstunden, an denen Deutschland ein bestimmter Ozonwert überschritten wird .....	7-104
Tab. 7.3.4:	Relative Gitterstundenänderung des bodennahen Ozons im Zeitraum 26.7. bis 29.7.1994 für die Szenarien S4b, S8b, S9 und S10 für den im N1-Gebiet liegenden Teil Deutschlands. Angegeben ist die prozentuale Änderung der Gitterstunden bezüglich des Basisfalls, an denen ein bestimmter Ozonwert überschritten wird .....	7-105
Tab. 7.3.5:	Gitterstunden des bodennahen Ozons im Zeitraum 26.7. - 29.7.1994 für den Basislauf und die Szenarien S1, S2, S4b, S7, S8a, S8b, S9 und S10 für den im Nest 2 liegenden Teil Deutschlands. Angegeben ist die Anzahl der Gitterstunden, an denen ein bestimmter Ozonwert überschritten wird .....	7-107

Tab. 7.3.6:	Relative Gitterstundenänderung des bodennahen Ozons im Zeitraum 26.7. bis 29.7.1994 für die Szenarien S1, S2, S4b, S7, S8a, S8b, S9 und S10 für den im N2-Gebiet liegenden Teil Deutschlands. Angegeben ist die prozentuale Änderung der Gitterstunden bezüglich des Basisfalls, an denen ein bestimmter Ozonwert überschritten wird .....	7-108
Tab. 7.4.1:	Anthropogene Jahresemissionen im Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg ...	7-118
Tab. 7.4.2:	VOC und NO <sub>x</sub> -Emissionen im Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg in t/d für Montag, 25.07.1994 (Gesamtsumme und prozentuale Anteile der einzelnen Verursachergruppen) .....	7-119
Tab. 7.4.3:	Prozentualer Anteil der Modellspezies des SAPRC-Mechanismus an den Gesamtkohlenwasserstoffen (Mittelwert für Montag, den 25.07.94) .....	7-120
Tab. 7.4.4:	Landnutzungsklassen und prozentuale Anteile der einzelnen Klassen an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes .....	7-121
Tab. 7.4.5:	NO <sub>x</sub> - und VOC-Reduktionen (gerundet auf volle %) im Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg für unterschiedliche Emissionsminderungsszenarien (Reduktionen bezogen auf die episodenspezifischen Emissionen vom 25.07. bis 06.08.1994 .....	7-150
Tab. 7.4.6:	Prozentuale Anteile der Überschreitungshäufigkeiten von Gitterstundenschwellwerten im Basislauf und in den Szenario-Rechnungen .....	7-182
Tab. 7.4.7:	Gitterstunden-Analysen der Szenario-Simulationsrechnungen basierend auf O <sub>x</sub> -Konzentrationen .....	7-183
Tab. 7.4.8:	Vergleich der Wirkungen von Minderungsmaßnahmen in den kleinräumigen Untersuchungsgebieten Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg und im großräumigen Untersuchungsgebiet Deutschland .....	7-184
Tab. 7.4.9:	NO <sub>x</sub> - und VOC-Reduktionen bei den verschiedenen Minderungszeanrien den Modellregionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg sowie Änderungen der Gitterstunden-Überschreitungshäufigkeiten von Ozon-Konzentrationsschwellwerten .....	7-187
Tab 7.4.10:	Maximale prozentuale nachmittägliche Ozonänderung (Abnahme und Zunahme) innerhalb des Zeitraums vom 25.7.1994 bis zum 6.8.1994 in den Untersuchungsregionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg .....	7-188
Tab. 7.4.11:	Nachmittägliche mittlere gemessene und berechnete Ozonkonzentration in ca. 400m bis 500m Höhe im Luv und im Lee von Berlin (entlang der Flugrouten) sowie der daraus ermittelte Ozonanstieg .....	7-190
Tab. 8.1:	Kleinräumige, regionale und überregionale Emissionsminderungs-Szenarien in den Modellregionen .....	8-3
Tab. 8.2:	Großräumige, überregionale Emissionsminderungs-Szenarien .....	8-4
Tab. 8.3:	Effekte der Emissionsminderungs-Szenarien in den Modellregionen auf Emissionen und auf regionale Ozon-Spitzenkonzentrationen .....	8-11

## I. Zielsetzung und Rahmenbedingungen

## 1. Zielsetzung, Untersuchungsprogramm und Berichtswesen

### 1.1 Zielsetzung und Untersuchungsprogramm im Überblick

(1) In hochsommerlichen Episoden treten in weiten Teilen Deutschlands stark erhöhte Konzentrationen von bodennahem Ozon auf. Die damit verbundenen Risiken für die menschliche Gesundheit und für Ökosysteme rückten in den 80er Jahren und insbesondere anfangs der 90er Jahre zunehmend ins Blickfeld der Luftreinhaltepolitik von Bund, Ländern und Kommunen. In öffentlichen Diskussionen wurden vielfach Forderungen nach Bekämpfungsmaßnahmen auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene erhoben und auch verschiedene Einzelmaßnahmen wie Tempolimits, innerstädtische Fahrverbote oder Produktionsbeschränkungen vorgeschlagen.

Über die Wirksamkeit der diskutierten Minderungsstrategien herrschte allerdings verbreitet Unklarheit. Untersuchungen über die Auswirkungen von möglichen Minderungsmaßnahmen, wie z.B. temporäre Verkehrsbeschränkungen oder spezifische stoff- oder sektorbezogene Maßnahmen auf der lokalen, regionalen oder großräumigen Ebene zur Absenkung der anthropogenen Emissionen der Ozon-Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC<sup>1</sup>, waren bis dahin nicht durchgeführt worden.

(2) Vor diesem Hintergrund wurde die **Zielsetzung** der vorliegenden Untersuchung "**Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon**" im Auftrag des Umweltbundesamtes<sup>2</sup> wie folgt definiert:

**"Ermittlung und Bewertung der Wirkungen von  
großräumigen und von kleinräumigen Emissionsminderungs-Maßnahmen  
auf die bodennahen Ozonkonzentrationen in hochsommerlichen Ozonepisoden."**

Damit soll einerseits ein gezielter Beitrag zur Schließung von Wissenslücken hinsichtlich der Wirkungen von Ozon-Minderungsstrategien geleistet werden. Zum anderen sollen - angesichts der politischen Diskussionen im Vorfeld von Ozongesetzgebungen auf Bundes- und Landesebene - die Entscheidungsgrundlagen für bundeseinheitliche Vorgehensweisen bei der Bekämpfung von hohen bodennahen Ozonbelastungen verbessert werden.

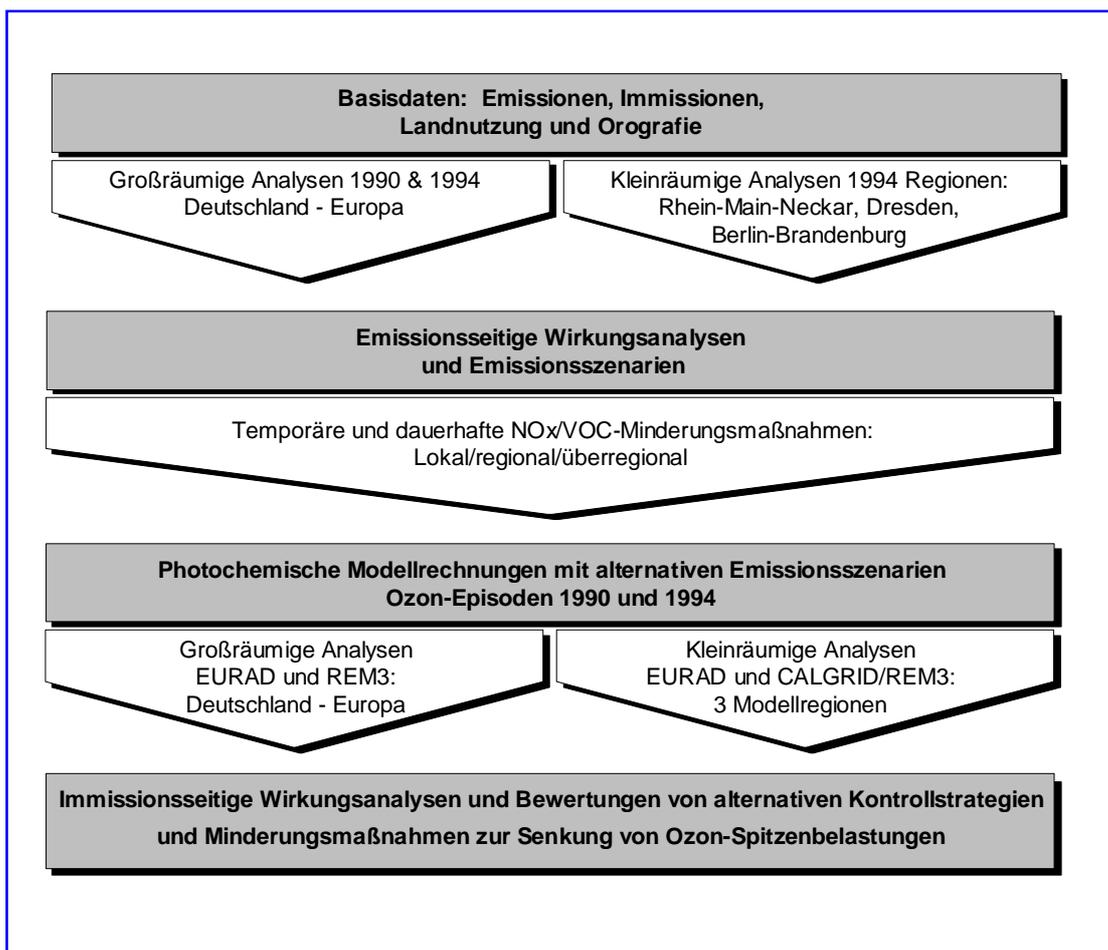
<sup>1</sup> Flüchtige organische Verbindungen (VOC = volatile organic compounds), wobei hier die Methanemissionen unberücksichtigt bleiben, da sie für die Ozonbildung nicht relevant sind.

<sup>2</sup> UFOPLAN-Vorhaben Nr. 104 02 812/01

(3) Zur Ermittlungen der immissionsseitigen Wirkungen werden im Rahmen dieser Untersuchung sowohl großräumige als auch kleinräumige Ozon-Ausbreitungsrechnungen mit dafür geeigneten komplexen Modellen in entsprechender meso- bzw. feinskaliger räumlicher Auflösung durchgeführt. Die zu untersuchenden Emissionsminderungsmaßnahmen umfassen ein breites Spektrum, welches von temporären, episodenzugehörigen Maßnahmen bis hin zu langfristigen, dauerhaft wirksamen Maßnahmen auf der lokalen, regionalen, nationalen und europaweiten Ebene reicht. Die vor der Durchführung der immissionsseitigen Ozon-Modellrechnungen erforderlichen Abschätzungen der emissionsseitigen Effekte dieser Maßnahmen werden - soweit möglich und insbesondere für den Emittentensektor "Straßenverkehr" - ebenfalls modellgestützt vorgenommen.

(4) Zur Erreichung der Zielsetzung ist das Untersuchungsprogramm in vier Hauptabschnitte gegliedert:

**Abb. 1-1: Untersuchungsprogramm des F&E-Vorhabens "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon (Sommersmog)" des Umweltbundesamtes**



Deweiteren ist das Untersuchungsprogramm hinsichtlich der zeitlichen Abfolge in zwei Stufen unterteilt:

**Stufe A:** Emissions- und immissionsseitige Wirkungsanalysen auf der **großräumigen** (bundes-/europaweiten) Ebene mit Hilfe von mesoskaligen photochemischen Ausbreitungsrechnungen;

**Stufe B:** Vertiefende emissions- und immissionsseitige Wirkungsanalysen auf der **kleinräumigen** (regionalen/lokalen) Ebene in drei ausgewählten Modellregionen<sup>3</sup> mit Hilfe von kleinräumigen photochemischen Ausbreitungsrechnungen in hoher räumlicher Feinauflösung.

Diese **Stufengliederung** trägt dem Erfordernis Rechnung, die immissionsseitigen Wirkungen zunächst auf der großräumigen Ebene und mithilfe von großräumigen photochemischen Ausbreitungsrechnungen abzuschätzen (**Stufe A**). Danach - und aufbauend auf den Ergebnissen der Stufe A - erfolgt die Abschätzung der immissionsseitigen Wirkungen auf der kleinräumigen Ebene (**Stufe B**).

(5) Die **vier thematisch/inhaltlichen Hauptabschnitte** bzw. **Sektionen** (vgl. Abb. 1) beinhalten folgende Aufgabenstellungen und Arbeitsleistungen:

**Sektion I: Eingabedatensätze (Inputdaten) für die photochemischen Ausbreitungsrechnungen**

Ermittlung und Aufbereitung der Eingabedaten (räumlich, zeitlich, stofflich und sektoral hochaufgelöste Inputdatensätze für die Ozon-Vorläuferemissionen  $\text{NO}_x$  und VOC, für Landnutzungen und Orografie) als Basis für die groß- und kleinräumigen photochemischen Ausbreitungsrechnungen

**Sektion II: Emissionsminderungsstrategien und emissionsseitige Wirkungsanalysen**

Ermittlung und Bewertung der Effekte von temporären und von dauerhaften Minderungsmaßnahmen und -strategien (Szenarien) und emissionsseitige Wirkungsanalysen bezogen auf die OZON-Vorläufersubstanzen  $\text{NO}_x$  und VOC

**Sektion III: Groß- und kleinräumige Ozon-Simulationsrechnungen mit Hilfe von photochemischen Ausbreitungsmodellen**

Immissionsseitige, groß- und kleinräumige Simulationsrechnungen mit den Minderungsdaten der einzelnen temporären und dauerhaften (langfristigen)

---

<sup>3</sup> Großraum Rhein-Main-Neckar (Frankfurt), Großraum Dresden und Großraum Berlin-Brandenburg

Emissions-Szenarien mit Hilfe von photochemischen Ausbreitungsmodellen für die Ozonepisoden Sommer 1990 und Sommer 1994

**Sektion IV: Immissionsseitige Wirkungsanalysen und Bewertungen der Effektivität von temporären und von langfristigen (dauerhaften) Emissionsminderungs-Strategien**

(6) Im Vergleich zu bis dahin durchgeführten Forschungsvorhaben weist die vorliegende Untersuchung eine Reihe von **besonderen Merkmalen** auf:

- Den immissionsseitigen Simulationsrechnungen sind **umfassende emissionsseitige Wirkungsanalysen** für ein breites Spektrum von potentiellen Minderungsmaßnahmen vorgeschaltet. Damit werden die NO<sub>x</sub>- und VOC-Minderungsraten von **realen, handlungsorientierten Kontrollstrategien** (Tempolimits, Fahrverbote, Grenzwertverschärfungen usw.) differenziert ermittelt. Der Grund für diese umfangreichen emissionsseitigen Analysen liegt darin, daß im Rahmen dieses Vorhabens die photochemischen Simulationsrechnungen nicht - wie bis dahin üblich - auf der Basis von pauschalen Minderungsraten durchgeführt werden sollen. Vielmehr werden den Ausbreitungrechnungen nunmehr konkrete Minderungsraten bezogen auf verschiedene Einzelmaßnahmen und auf Maßnahmenbündel (Szenarien) in hoher sektoraler, zeitlicher, stofflicher und räumlicher Auflösung vorgegeben.
- Die photochemischen Simulationsrechnungen werden für **mehrere Untersuchungsgebiete** mit unterschiedlicher räumlicher Ausdehnung (Europa-Deutschland und 3 Modellregionen) in großräumiger und in lokal/urbaner Auflösung (im Dekameter-Bereich bzw. im Meter-Bereich) durchgeführt und miteinander verglichen. Damit soll einerseits der Einfluß potentieller Skaleneffekte auf die Ergebnisse der Simulationsrechnungen offengelegt und berücksichtigt werden. Zum anderen sollen die Effekte unterschiedlicher räumlicher Dimensionierungen der Minderungsstrategien sowie die Einflüsse unterschiedlicher regionaler Emissionsstrukturen untersucht werden.
- Zwecks Validierung und besserer Absicherung der Untersuchungsbefunde werden **zwei verschiedene photochemische Modellsysteme** - EURAD und REM3/CALGRID - eingesetzt. Bei beiden handelt es sich um komplexe dreidimensionale Euler'sche Modellsysteme, mit denen die Bildung, der Transport und die Entfernung von Oxidantien (und anderen reaktiven Substanzen) in der planetarischen Grenzschicht (REM3) bzw. in der Troposphäre (EURAD) simuliert wird. Zudem werden bei den großräumigen Analysen **zwei hochsommerliche Ozonepisoden** aus den Jahren **1990 und 1994** mit jeweils **14-tägiger Dauer** untersucht.

## 1.2 Untersuchungsteam, Berichtswesen und Dokumentation

(1) Die Dokumentation der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse des vorliegenden UFOPLAN Vorhabens Nr. 104 02 812/01 trägt dem Umstand Rechnung, daß das Gesamtergebnis der Untersuchung aus einer größeren Zahl von Teilvorhaben bzw. Arbeitspaketen, zu denen verschiedene Bearbeiter beigetragen haben, hervorgeht. Dabei war innerhalb des Bearbeitungsteams die Aufgabenteilung und die Bearbeitung der einzelnen Teilvorhaben wie verteilt:

### **Prognos AG, Berlin/Basel:**

- Projektleitung
- Großräumige emissionsseitige Wirkungsanalysen
- Kleinräumige emissionsseitige Wirkungsanalysen
- Inputdatenbasen der 3 Modellregionen (Emissionen, Landnutzung, Orografie)

### **Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin:**

- Großräumige photochemische Simulationsrechnungen mit REM3
- Kleinräumige photochemische Modellrechnungen für die Modellregionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg mit CALGRID/REM3
- Großräumige Emissionsdatenbasen 1990 und 1994

### **Rheinisches Institut für Umweltforschung, Universität zu Köln:**

- Großräumige photochemische Simulationsrechnungen mit EURAD
- Kleinräumige photochemische Modellrechnungen für die Modellregion Dresden mit EURAD
- Großräumige Emissionsdatenbasen 1990 und 1994

### **TNO Institute for Environmental Sciences, Delft - Niederlande:**

- Großräumige Emissionsdatenbasis 1990.

(2) Da jedes einzelne Teilvorhaben des gesamten Untersuchungsprogramms als ein in sich geschlossenes Projekt konzipiert ist, erfolgt auch eine entsprechende Dokumentation, in der die Ergebnisse der Teilvorhaben in gesonderten Berichten dargestellt werden. Das Berichtswesen ist daher relativ umfangreich. Es umfaßt insgesamt 15 Berichte. Sie sind im einzelnen in der folgenden Übersicht stichwortartig aufgeführt.

Aufgrund dieser sehr ausführlichen Dokumentation aller einzelnen Teilvorhaben wird im vorliegenden zusammenfassenden Gesamtbericht an verschiedenen Stellen auf die detaillierte Erläuterung von Datengrundlagen, methodischem Vorgehen usw. bewußt verzichtet. Es wird statt dessen auf die Ausführungen in den einschlägigen Einzelberichten verwiesen.

(3) Trägermedium der Dokumentation wird eine **CD-ROM** sein. Damit wird dem Interessenten eine Einsichtnahme in alle Berichte am Bildschirm und ein den individuellen Anforderungen entsprechender Ausdruck der Dokumente ermöglicht. Auf der CD-ROM werden alle Berichte im PDF-Format mit Internet-Programm und Lese-Software enthalten sein. Die CD-ROM wird voraussichtlich ab Februar 1998 verfügbar sein.

(4) Für die breitere interessierte Öffentlichkeit wird desweiteren im **Internet** eine entsprechend aufbereitete Information über das Vorhaben enthalten sein (ab Januar 1997). Diese Internet-Präsentation auf der Homepage des Umweltbundesamtes wird auch eine Zugriffsmöglichkeit auf die Langfassung des Gesamtberichtes sowie auf die Kurzfassung (deutsch und englisch) enthalten.

### Übersicht über die Dokumentation des F&E-Vorhabens

<b>I.</b>	<b>Gesamtbericht</b>	1	Langfassung
		2a/b	Kurzfassung (deutsch und englisch)
<b>II.</b>	<b>Einzelberichte der Teilvorhaben</b>		(Kurztitel)
	3		Großräumige Emissionsdaten 1990 (TV A-1; Bearbeitung: TNO-NL)
	4		Großräumige emissionsseitige Wirkungsanalysen und Emissionsszenarien 1990 und 1994 (TV A-2; Bearbeitung: Prognos AG)
	5		REM3: Großräumige Ozon-Ausbreitungsrechnungen 1990 und 1994 (TV A-3; Bearbeitung: IfM, FU Berlin)
	6		EURAD: Großräumige Ozon-Ausbreitungsrechnungen 1990 und 1994 (TV A-4; Bearbeitung: RIU, Univ. Köln)
	7		REM3: Wochenendeffekt der Emissionen auf bodennahe Ozon-Konzentrationen (TV A-5; Bearbeitung: IfM, FU Berlin)
	8		Inputdatenbasis 1994 und Emissionsszenarien für die Modellregion Rhein-Main-Neckar (TV B-1a; Bearbeitung: Prognos AG)
	9		Inputdatenbasis 1994 und Emissionsszenarien für die Modellregion Dresden (TV B-1b; Bearbeitung: Prognos AG)
	10		Inputdatenbasis 1994 und Emissionsszenarien für die Modellregion Berlin-Brandenburg (TV B-1c; Bearbeitung: Prognos AG)
	11		CALGRID/REM3: Ozon-Ausbreitungsrechnungen 1994 für die Modellregion Rhein-Main-Neckar (TV B-2a; Bearbeitung: IfM, FU Berlin)
	12		EURAD: Ozon-Ausbreitungsrechnungen 1994 für die Modellregion Dresden (TV B-2b; Bearbeitung: RIU, Univ. Köln)
	13		CALGRID/REM3: Ozon-Ausbreitungsrechnungen 1994 für die Modellregion Berlin-Brandenburg (TV B-2c; Bearbeitung: IfM, FU Berlin)
<b>III.</b>	<b>Verfügbarkeit von I und II:</b>		<b>CD-ROM</b>
	<b>Verfügbarkeit von I:</b>		<b>Internet, Homepage des Umweltbundesamtes</b>

## **2. Grundlegende Rahmenbedingungen**

### **2.1 Abgrenzung der Untersuchungsgebiete**

#### **a) Großräumige Analysen**

(1) Als Untersuchungsgebiet für die großräumigen photochemischen Ausbreitungsrechnungen wurde - ausgehend von vorherigen Untersuchungen - das sog. PHOXA-Gebiet festgelegt. Es umfaßt West-, Mittel- und Osteuropa. Die Ausdehnung nach Längen- und Breitengraden reicht von 10°West bis 30°Ost und von 42°Nord bis 66°Nord.

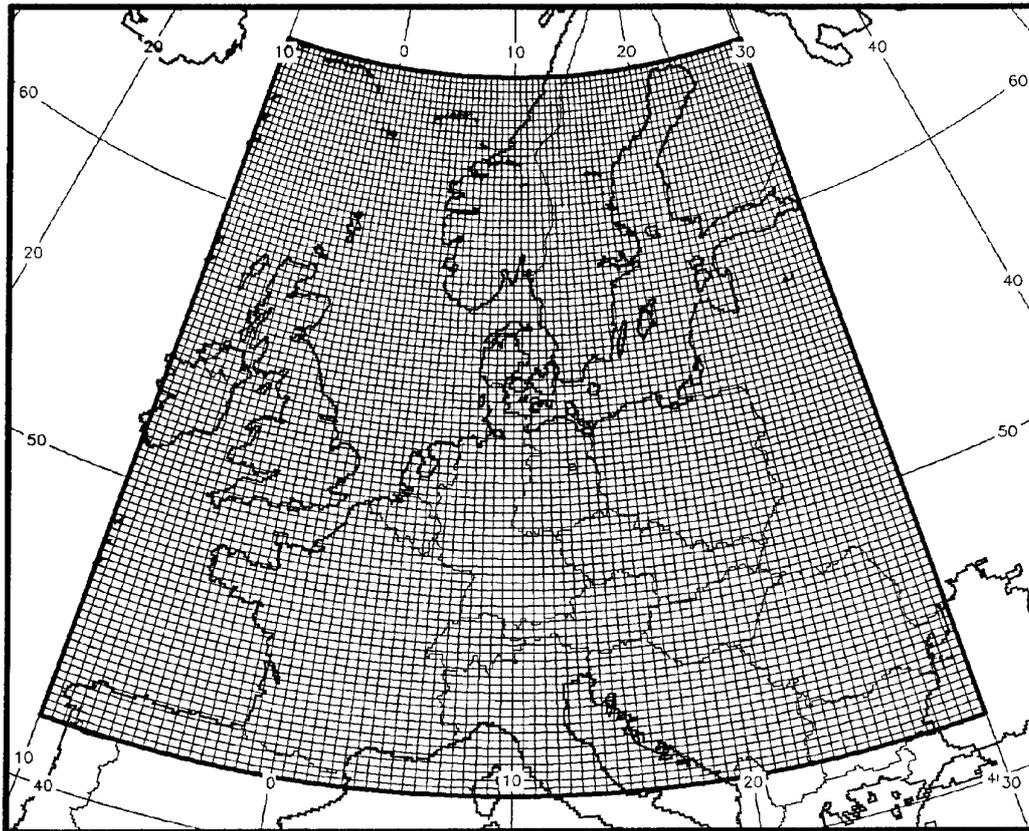
(2) Aufgrund dieser großräumigen Gebietsfestlegung ist zu erwarten, daß einerseits Randeffekte an den Grenzen dieses Gebietes keinen Einfluß auf den primär interessierenden zentralen Bereich von Deutschland ausüben werden, und daß andererseits alle für den Bereich Deutschland in Frage kommenden grenzüberschreitenden Einflüsse erfasst werden.

(3) Die räumliche Auflösung (geografisches Raster) beträgt im Falle des eingesetzten Modellsystems REM3 0,5°Breite und 0,25°Länge; das entspricht einer Gitterfläche von im Durchschnitt rd. 30km\*30km und damit einer für derartig großräumige Modellrechnungen sehr hohen Anzahl von 7.680 Gitterzellen (80\*96). Beim Modellsystem EURAD ist die räumliche Auflösung ebenfalls sehr hoch; die Gitterflächen betragen 36km\*36km (bei insgesamt 3.600 Gitterzellen).

(4) Die Lage der Untersuchungsräume der beiden Modellsysteme sowie das jeweilige räumliche Raster sind in der folgenden Abb. 2-1 dargestellt.

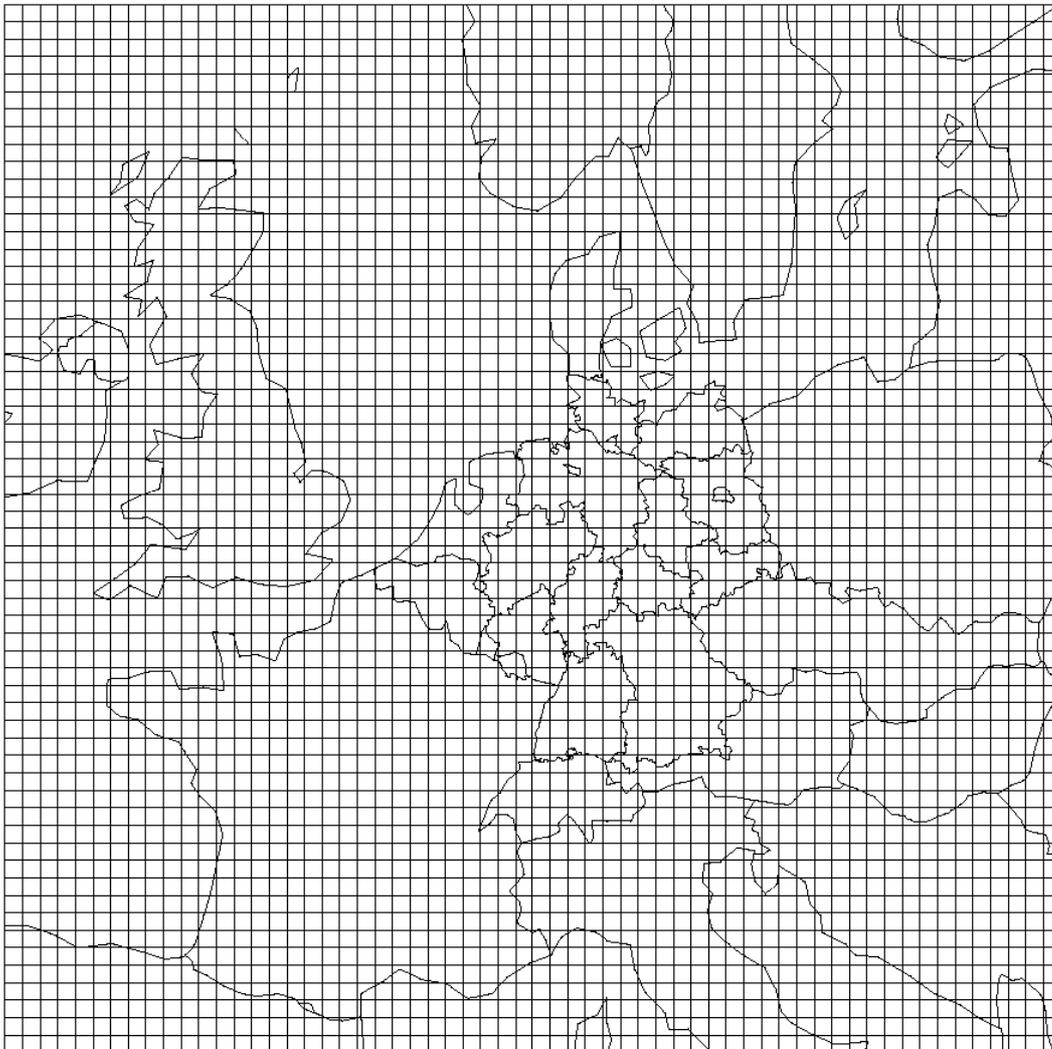
**Abb. 2-1: Abgrenzung und räumliche Feinauflösung des großräumigen Untersuchungsgebietes der Modellsysteme REM3 und EURAD**

- a) Großräumiges Untersuchungsgebiet REM 3:  
 Auflösung des geographischen Rasters: 0,5°Länge und 0,25°Breite (Gitterzellen=7680)



STEREOGRAPHIC PROJECTION  
 60 DEGREE NORTH

- b) Großräumiges Untersuchungsgebiet EURAD:  
Auflösung des geographischen Raster = 36km x 36 km (Gitterzellen=3600)



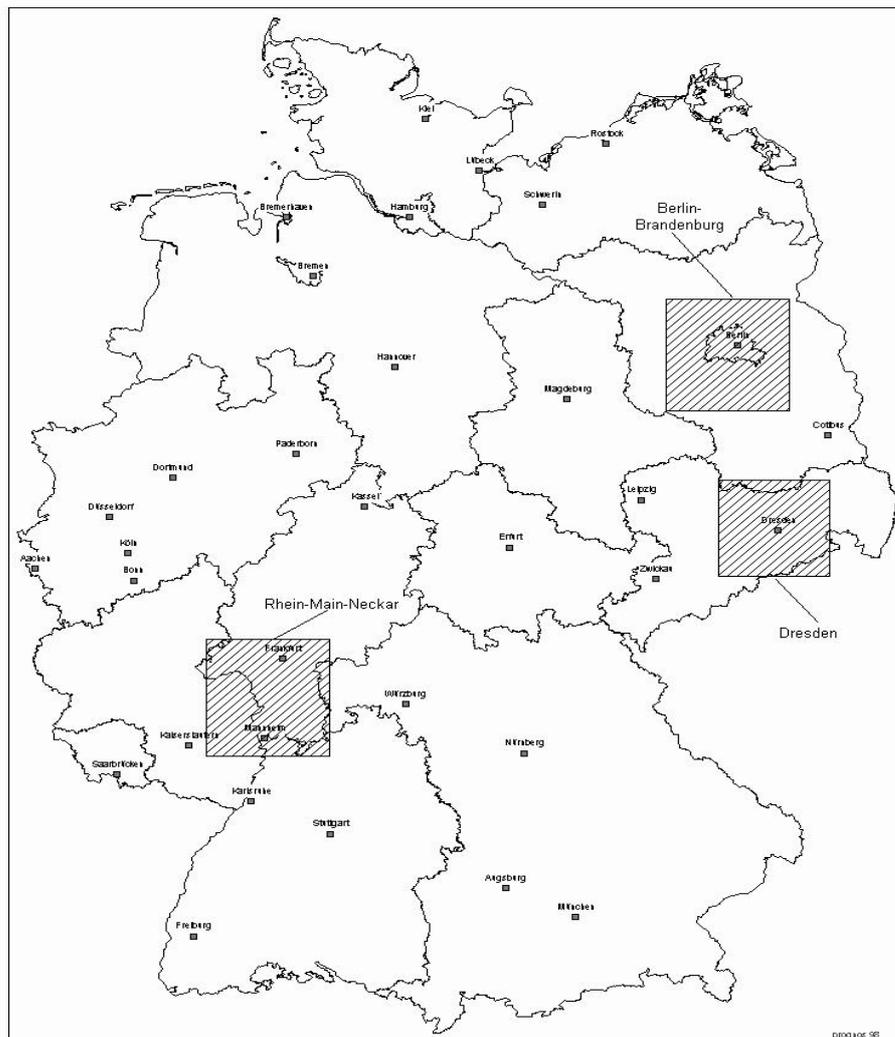
**b) Kleinräumige Analysen**

(1) Im Rahmen der vorbereitenden Untersuchungen (Projektdefinitionsphase) wurden mithilfe der sog. Cluster-Analyse drei Modellregionen, welche als geeignet und von der lufthygienischen Situation her als interessant zu bewerten sind, für die Durchführung der kleinräumigen Wirkungsanalysen bestimmt. Es sind dies die Großräume:

- Rhein-Main-Neckar (Großraum Frankfurt)
- Dresden, und
- Berlin-Brandenburg.

(2) Die Lage und grobe räumliche Abgrenzung der Modellregionen ist in Abb. 2-2 dargestellt. Die räumliche Ausdehnung der drei Regionen liegt im Bereich von 7.500 bis 11.000 qkm. Nähere Informationen hierzu enthalten die Berichte zu den Teilvorhaben "Inputdatenbasis 1994 der Modellregion .....".

Abb. 2-2: Räumliche Abgrenzung der Modellregionen für die kleinräumigen Analysen



(3) Die feinträumliche Auflösung, die den Analysen in den drei Modellregionen zugrunde liegt, ist unterschiedlich. Im Falle der Region Rhein-Main-Neckar wurde aufgrund der Vorarbeiten in der Projektdefinitionsphase eine feinträumliche Auflösung des Untersuchungsgebietes im Maßstab von 4km x 4km gewählt. Im Falle der Region Berlin-Brandenburg wurde eine feinere Auflösung im Maßstab von 2km x 2km gewählt. Im Falle der Region Dresden erfolgte aus modelltechnischen Gründen eine Einteilung des Rasters in ein 3km x 3km Gitter.

## 2.2 Bestimmung der Untersuchungszeiträume (Ozonepisoden 1990 und 1994)

(1) Aufgrund der in der Vorstudie<sup>1</sup> zu diesem F&E-Vorhaben durchgeführten Analysen wurde zunächst eine **zweiwöchige Ozonepisode** aus dem **Sommer 1990 (25.07. - 10.08.1990)** als Zeitraum für die Modellrechnungen festgelegt. Dieser zweiwöchige Zeitraum ist durch das Auftreten von sehr hohen O<sub>3</sub>-Konzentrationen in weiten Teilen Deutschlands gekennzeichnet.

Bezüglich der damit für das großräumige Untersuchungsgebiet benötigten Emissionsdaten für das Jahr 1990 lagen zu Untersuchungsbeginn lediglich für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland differenzierte Angaben zu den Luftschadstoffemissionen vor, allerdings nur gesamthaft für Sektoren und ohne räumliche Disaggregation. Es konnte allerdings erwartet werden, daß für die übrigen Staaten auf die (kurz vor dem Abschluß stehenden) Arbeiten des europäischen Programms CORINAIR-1990 zugegriffen werden kann. Mit CORINAIR-1990 wären aktuelle, räumlich hoch aufgelöste und sektoral differenzierte, sowie insbesondere auch methodisch für alle Teilnehmerstaaten einheitlich erarbeitete europaweite Emissionsdaten bei den Modellrechnungen einsetzbar. Dies war bei allen bisherigen Vorhaben, in denen großräumige photochemische Simulationsrechnungen durchgeführt wurden, nicht der Fall gewesen.

(2) Im Verlauf der Arbeiten für das Teilvorhaben "emissionsseitige Wirkungsanalysen" wurde zunehmend deutlicher, daß die Abschätzungen der Minderungseffekte von langfristig wirksamen, dauerhaften Maßnahmen sehr wohl auf der Basis des Bezugsjahres 1990 durchführbar sind, daß aber bei den temporären Minderungsmaßnahmen die mangelnde Aktualität des Bezugsjahres 1990 einen gravierenden Nachteil darstellt. Im wichtigsten Emittentensektor Straßenverkehr haben gerade im Zeitraum ab 1990 erhebliche emissionsrelevante Verschiebungen der Zusammensetzung der Fahrzeugbestände stattgefunden. Der Anteil der Pkw mit geregelterm 3-Wege-Katalisator ist von 25% in 1990 auf 45% in 1994 angestiegen. Hinzu kommt, daß die Fahrleistungsanteile von G-Kat-Fahrzeugen deutlich über denen der anderen Kategorien liegen. Die Simulation von temporären, straßenverkehrsbezogenen Maßnahmen würde folglich in einem Bezugsjahr 1990 auf völlig andere emissionsseitige Minderungspotentiale zugreifen als späteren, aktuelleren Jahren.

Aus diesem Grunde wurde in Absprache mit dem Umweltbundesamt beschlossen, die Wirkungsanalysen für die temporären, episodenbezogenen Maßnahmen auf der Basis einer

---

<sup>1</sup> Motz, G., Plinke E.: Aktionsprogramm Ozon (Sommersmog) - Projektdefinitionsphase, Methoden zur Bewertung von regionalen Minderungsmaßnahmen mit dem Ziel einer bundeseinheitlichen Vorgehensweise, UBA - F&E-Vorhaben 104 02 673, Prognos AG, Berlin/Basel 1993

möglichst **aktuellen**, und damit zusätzlichen zweiten **Episode** durchzuführen. Ausgewählt wurde dazu der **zweiwöchige Zeitraum vom 23.07. bis 08.08.1994**. Ähnlich wie die erste Episode in 1990 ist auch diese Episode in 1994 durch das Auftreten hoher nachmittäglicher Ozon-Spitzenkonzentrationen in weiten Teilen Deutschlands gekennzeichnet. In diesem Zeitraum wurden im übrigen auch im Bundesland Hessen aufgrund von Grenzwertüberschreitungen insgesamt dreimal die in der Hessischen Ozonverordnung vorgesehenen Tempolimits auf Autobahnen angeordnet.

(3) Als Rahmenbedingungen wurden somit **zwei Ozonepisoden** für die jeweiligen emissions- und immissionsseitigen Wirkungsanalysen festgelegt:

- a) **Episode 1990** (25.07.-10.08.1990): Analysen der langfristigen großräumigen Minderungsszenarien (Szenarien Trend-2005 und Reduktion-2005, s. unten)
- b) **Episode 1994** (23.07.-08.08.1994): Analysen der temporären groß- und kleinräumigen Minderungsmaßnahmen und -szenarien sowie der langfristigen kleinräumigen Minderungsszenarien.

## 2.3 Ermittlung und Aufbereitung der Eingabedaten (Inputdatenbasen) für die photochemischen Ausbreitungsrechnungen

(1) Die Durchführung von photochemischen Ausbreitungsrechnungen setzt die Verfügbarkeit von modelladäquaten Inputdaten aus folgenden Bereichen voraus:

- **Emissionen der Ozon-Vorläufersubstanzen Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und (nicht-methane) Kohlenwasserstoffe (NMVOC)** für das betreffende Jahr, das zu untersuchende Gebiet, differenziert nach den modellseitig vorgegebenen Emittentengruppen und in der modellseitig vorgegebenen räumlichen Auflösung (pro Gitterfläche) sowie differenziert nach der Quelhöhe (als Punkt- und Flächenquellen);

Die letztendlich für die Modellierungen erforderlichen stündlichen Emissionen werden i.d.R. im Ausbreitungsmodell selbst, ausgehend von den Jahreswerten mit Hilfe von gruppenspezifischen Monats-, Tages-, Stunden- und Temperaturfaktoren abgeleitet. Die biogenen Emissionen werden i.d.R. vollständig modellintern mit Hilfe von Landnutzungsdaten und entsprechenden Emissionsfaktoren berechnet.

- **Landnutzung** nach Kategorien in der modellseitig vorgegebenen räumlichen Differenzierung;
- **Orografie** in der modellseitig vorgegebenen räumlichen Differenzierung;
- **Meteorologische Daten** (Wind, Temperatur, relative Feuchte, Wolkenbedeckungsgrad, Niederschlag usw.).

### a) Großräumige Emissionsdatenbasen 1990 und 1994

(2) Als Untersuchungsgebiet für die großräumigen photochemischen Ausbreitungsrechnungen wurde - wie oben ausgeführt - das sog. PHOXA-Gebiet festgelegt. Es umfaßt West-, Mittel- und Osteuropa (Ausdehnung nach Längen- und Breitengraden: 10°West-30°Ost und 42°Nord-66°Nord).

(3) Für dieses Gebiet standen zu Beginn der Arbeiten aus früheren Untersuchungen unmittelbar nur die Informationen zu den geophysikalischen Daten (Landnutzung und Orografie) abrufbar zur Verfügung.

Bei den Emissionsdaten lagen zu Beginn der Untersuchung für das PHOXA-Gebiet (und in der PHOXA-gemäßen Differenzierung) lediglich die Daten aus dem Programm CORINAIR-85 sowie die im Rahmen von EMEP jährlich fortgeschrieben Summendaten pro Land vor. Hinzu

kam eine im Auftrag des Umweltbundesamtes im Jahre 1991/92 erarbeitete Fortschreibung der Daten von CORINAIR-85 auf das Jahr 1990.<sup>2</sup> Um sicherzustellen, daß im Rahmen dieses Vorhabens die Emissionsdaten für das Bezugsjahr 1990 auf einer europaweit einheitlichen Basis beruhen, wurde zu Beginn der Arbeiten seitens des auftraggebenden Umweltbundesamt festgelegt, daß bei der Erstellung der modellbezogenen Emissionsdatenbasen die verfügbaren Informationen aus dem Programm **CORINAIR-1990** zugrunde zu legen sind. Für Deutschland wurden im übrigen die Gesamtsummen, differenziert nach Schadstoffen und nach Hauptsektoren, vom Umweltbundesamt an das CORINAIR-1990-Programm geliefert.

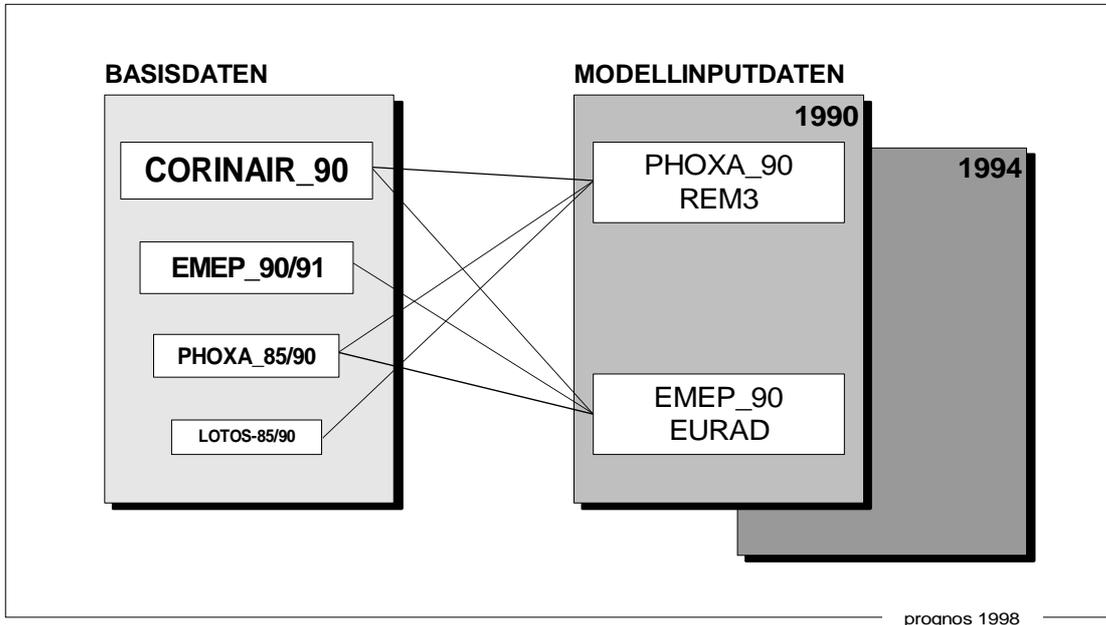
(5) Aufgrund dieser Ausgangslage wurden im Rahmen der Arbeiten von Sektion I folgende Teilvorhaben durchgeführt:

- a) Erarbeitung einer **Emissions-Inputdatenbasis** für das **Bezugsjahr 1990** mit folgender Spezifizierung:
  - Berücksichtigung aller aus dem Programm CORINAIR-1990 verfügbaren Informationen und weitestmögliche Abstimmung auf die Daten aus CORINAIR-1990;
  - Strukturierung und Detaillierung gemäß den spezifischen Anforderungen der einzusetzenden photochemischen Ausbreitungsmodelle;
  - Aktualisierung der für die Umsetzung in episodenzugehörigen, zeitlich hochaufgelösten Inputdaten verwendeten Zeit- und Temperaturfunktionen;
  - Aktualisierung der für die Berechnung der episodenzugehörigen biogenen Emissionen verwendeten Emissionsfaktoren;
  - Abstimmung von großräumigen und kleinräumigen Emissionsdatenbasen 1990 für die räumlichen Bereiche der 3 ausgewählten Modellregionen (Großräume Frankfurt, Dresden, Berlin);
- b) Erarbeitung einer **Emissions-Datenbasis** für das **Bezugsjahr 1994** durch Fortschreibung der großräumigen Emissionsdatenbasis 1990 auf das Jahr 1994<sup>3</sup>
  - für Deutschland (unter besonderer Berücksichtigung der hierzu im Umweltbundesamt vorliegenden Daten und Informationen);
  - für die übrigen Länder im großräumigen Untersuchungsgebiet.

<sup>2</sup> Axenfeld et al., PHOXA-Emissionsdatenbasis 1990, F&E-Vorhaben 10402592 des Umweltbundesamtes, Dornier GmbH, Friedrichshafen 1992

<sup>3</sup> Alle in der Stufe A (für die großräumigen Analysen) verwendeten Emissionsdaten beruhen auf dem Stand der Kenntnis von 1994/1995. Die Ende 1995/Anfang 1996 vom UBA vorgelegten neuen Emissionsabschätzungen für den Bereich des Straßenverkehrs konnten in der Stufe A dieses Vorhabens noch nicht berücksichtigt werden.

Abb. 2-3: Großräumige Emissionsdaten - Basisdaten und Modellinputdaten



**b) Kleinräumige Emissionsdatenbasen 1994 der Modellregionen**

(1) Die kleinräumigen Emissionsdatenbasen für die drei Modellregionen Rhein-Main-Neckar, Dresden und Berlin-Brandenburg wurden in enger Zusammenarbeit mit den betroffenen Bundesländern Hessen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Sachsen, Berlin und Brandenburg erstellt. Dabei wurden von den jeweiligen Ländern vor allem vorhandene Daten aus Emissionskatastern, aus Emissionserklärungen und aus sonstigen Emissionsberechnungen und -abschätzungen sowie aus dem Bereich der amtlichen Statistik aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Ausgehend von diesen "Rohdaten", ergänzt um eigene Abschätzungen für fehlende räumliche und/oder sektorale Informationen sowie um erforderliche Aktualisierungen, wurden dann die Emissionsdatenbasen erarbeitet. (Über die Datengrundlagen und das Vorgehen informieren im einzelnen die Berichte zu den entsprechenden Teilvorhaben.)

(2) Die Informationsdichte und -struktur der kleinräumigen Emissionsdatenbasen muß den Anforderungen der zur Anwendung kommenden photochemischen Ausbreitungsmodellen Rechnung tragen. Die Datenbasen für die drei Modellregionen wurden daher in folgender Differenzierung erstellt:

- **Zeitliche** Auflösung der Emissionen in 1-Stunden-Werte;
- **Räumliche** Auflösung der Emissionen in folgenden Rastern:  
4x4-km für Rhein-Main; 3x3-km für Dresden; 2x2-km für Berlin-Brandenburg;
- **Stoffliche** Differenzierung nach den Ozon-Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub>, NMVOC, SO<sub>x</sub> und CO;
- **Quellenspezifische** Differenzierung
  - a) nach einzelnen anthropogenen Emittentenbereichen und -gruppen (16 anthropogene Gruppen im Falle von Rhein-Main und je 19 anthropogene Gruppen im Falle von Dresden und Berlin-Brandenburg) sowie nach biogenen VOC-Emissionen aus Laub- und Nadelwäldern.
  - b) nach den Kategorien Punktquellen und Flächenquellen (Emissionshöhen).

(3) In **methodischer** Hinsicht wurden zunächst jeweils räumliche hochaufgelöste Berechnungen und Abschätzungen der Jahresemissionen nach Quellen und Stoffen vorgenommen. In einem zweiten Schritt wurden dann die stoffspezifischen Jahresdaten der einzelnen Quellen (Emittentengruppen) mithilfe entsprechender Modelle in zeitlich hochaufgelöste Emissionsdaten (1-Stundenwerte) für die Episode 1994 überführt. Für diesen Schritt werden sog. Aktivitätskennziffern benötigt. Sie liegen unmittelbar nur für wenige Emittentengruppen vor (z.B. den Straßenverkehr). Für die anderen Emittentengruppen wurden Modelle gebildet, welche die saisonalen, wochentäglichen, tageszeitlichen und - soweit relevant - auch die temperaturabhängigen Einflußparameter beinhalten und zu Faktoren für die zeitliche Disaggregation von Jahressummen zu 1-Stundenwerten verarbeiten.

(4) Die Emissionsdatenbasen der drei Modellregionen wurden sukzessive in folgender Reihenfolge erarbeitet: Rhein-Main-Neckar, Dresden, Berlin-Brandenburg. Nach Abschluß der Arbeiten für die Modellregion Rhein-Main-Neckar wurde aufgrund von Erkenntnissen aus parallelen Vorhaben im Umweltbundesamtes beschlossen, auch den Bereich der Emissionen aus denjenigen sog. "offroad"-Aktivitäten in die Berechnungen einzubeziehen, der bislang nicht berücksichtigt wurde (Bau- und Landmaschinen, Sportboote, Rasenmäher usw.; bereits berücksichtigt waren bis dahin die Binnenschifffahrt und der bodennahe Luftverkehr) Dies führte zu einer entsprechenden Erweiterung der Anzahl der betrachteten Emittentengruppen im Falle der Regionen Dresden und Berlin-Brandenburg. Wie die Ergebnisse der Abschätzungen für diese beiden Regionen zeigen, ist allerdings der Beitrag der "offroad"-Emissionen aus den o.g. Einzelbereichen sehr gering und fällt - wie nachträgliche Abschätzungen zeigen - im Falle der Region Rhein-Main-Neckar praktisch nicht ins Gewicht.

(5) Letztendlich wurden die Emissionsdatenbasen der drei Modellregionen in der nachfolgenden Tab. 2.1 aufgeführten **stofflichen** und **quellenspezifischen Differenzierung nach Sektoren und Gruppen** erarbeitet. Dabei weisen die Regionen im Einzelfall noch eine Reihe

von Besonderheiten auf (vgl. hierzu auch die ausführliche Darstellung in den gesonderten Teilberichten).

(6) Die **Orographie- und Landnutzungsdaten** für die drei Modellregionen dienen der Modellierung der meteorologischen Abläufe in den Modellgebieten (Windfelder, Strahlung usw.). Beide Datenbasen wurden auf der Grundlage von Datenmaterialien der Landesvermessungsämter sowie von regionalstatistischem Datenmaterial in der räumlichen Auflösung von zunächst 1km x 1km erarbeitet und anschließend auf das jeweilige Raster der Modellregion aggregiert. Bei der Landnutzung werden folgende Kategorien unterschieden:

- Bebauung (bebaute Siedlungsflächen, Verkehrsflächen usw.)
- Ackerland und sonstige landwirtschaftliche Nutzflächen
- Wiesen/Weiden (Dauergrünland)
- Wasserflächen
- Feuchtgebiete
- Wälder.

**Tab. 2.1: Stoffliche und sektorale Differenzierung der Emissionsdatenbasen der kleinräumigen Modellregionen**

Emittentengruppe	Ozon-Vorläuferstoffe			
	NOx	CO	SOx	NMVOc
Straßenverkehr - Abgase Pkw	X	X	X	X
Straßenverkehr - Abgase Lkw	X	X	X	X
Straßenverkehr - Tankatmung				X
Straßenverkehr - Heiß/Warmabstellen				X
Straßenverkehr - Kraftstofftankwanddiffusion				X
Lagerung von Mineralölerzeugnissen				X
Verteilung von Mineralölerzeugnissen (Tankstellen)				X
Industrielle Punktquellen	X	X	X	X
Sonst. industrielle Feuerungsanlagen	X	X	X	X
Kleinfeuerungsanlagen	X	X	X	X
Gewerbl. Lösemittelanwendungen/Prozesse				X
Flughäfen Layer 1: 0 - 100 m Layer 2: 100 - 300 m Layer 3: 300 - 1.000 m	X	X	X	X
Binnenschifffahrt Gewerblich Privat	X	X	X	X
Schienenverkehr	X	X	X	X
Off-road - gewerblich	X	X	X	X
Off-road - privat	X	X	X	X
Biogene Quellen				X

## 2.4 Emissionsminderungsmaßnahmen und Szenarien

(1) Die Konzeption der Emissionsminderungs-Szenarien, deren Effekte auf die Ozon-Konzentrationen in hochsommerlichen Ozonepisoden im Rahmen dieses Vorhabens untersucht werden, basiert auf umfangreichen Vorarbeiten, welche im Rahmen der Vorstudie zu diesem Vorhaben<sup>4</sup> durchgeführt wurden. Sie enthalten

- detaillierte Bestandsaufnahmen der derzeitigen Emissionssituationen bei Ozon-Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC;
- detaillierte Bestandsaufnahmen von in der Umsetzung befindlichen emissionsmindernden Maßnahmen sowie von darüber hinausgehenden technisch-organisatorisch erschließbaren Minderungspotentialen nach Emittentengruppen.

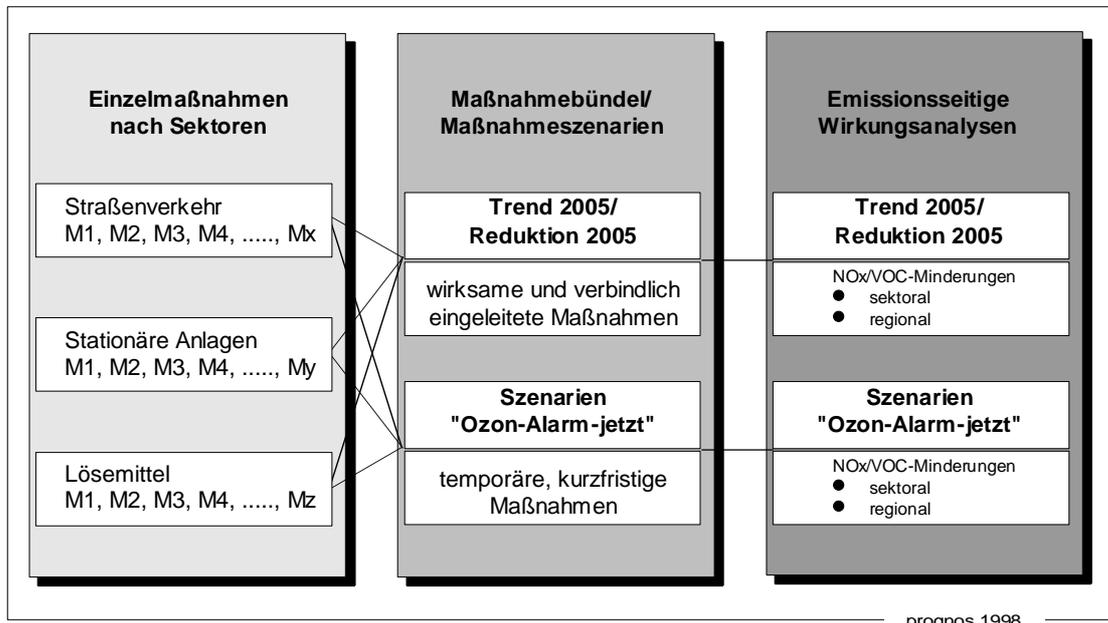
(2) Aufbauend auf diesen Vorarbeiten wurden im Rahmen des **Teilvorhabens "Emissionsseitige Wirkungsanalysen und Szenarien"** folgende Arbeiten durchgeführt:

- Aus der Vielzahl der in Frage kommenden Einzelmaßnahmen wurden die **relevanten** bzw. geeigneten **Einzelmaßnahmen** ausgewählt.
- Die ausgewählten Einzelmaßnahmen wurden zu **Szenarien** zusammengefasst, wobei die Bildung der Szenarien vor dem Hintergrund derjenigen Fragenkomplexe erfolgte, welche als relevant für die Handlungsoptionen im Rahmen der Luftreinhalteplanung auf der lokalen, regionalen und nationalen Ebene anzusehen sind.
- Als **Kriterien** für die **Auswahl und Bündelung** wurden der derzeitige umweltpolitische Handlungsrahmen sowie die Beachtung der technischen Möglichkeiten und der wirtschaftlichen Zumutbarkeit angelegt. Abstrakte, politikferne oder pauschale Ansätze (wie z.B. "Einstellung des gesamten Kfz-Verkehrs", "Abschaltung aller fossil gefeuerten Kraftwerke") werden nicht untersucht.

---

<sup>4</sup> Motz, G., Plinke, E.: Projektdefinitionsphase, aaO.

Abb. 2-3: Bestimmung der kurz- und langfristigen Emissionsminderungsszenarien



### Großräumige Emissionsszenarien

(3) Die auf dieser Basis für die großräumigen Wirkungsanalysen gebildeten Emissionsminderungs-Szenarien sind **zwei Hauptgruppen** zugeordnet und lassen sich wie folgt charakterisieren:

#### A. Langfristig wirksame Maßnahmenbündel

##### Szenario "Trend 2005":

In diesem Szenario sind diejenigen Reduktionen der Emissionen von Ozon-Vorläufer-substanzen abgeschätzt und zusammengefaßt, welche in Zukunft (im Jahre 2005) durch bereits eingeleitete emissionsmindernde Maßnahmen voraussichtlich erreicht sein werden. Hierzu zählen insb. die EU-Abgasgrenzwerte für Kfz und die BImSchV- und TA Luft-Bestimmungen für stationäre Anlagen. Das Jahr 2005 wurde als Zieljahr gewählt, weil anzunehmen ist, daß bis dahin die eingeleiteten Maßnahmen weitestgehend umgesetzt bzw. wirksam sein werden.

### Szenario "Reduktion 2005":

In diesem Szenario sind diejenigen Minderungspotentiale abgeschätzt und zusammengefaßt, welche über die bereits eingeleiteten Maßnahmen hinaus durch Ausschöpfung zusätzlich vorhandener Minderungspotentiale erreicht werden können. Es handelt sich dabei um bekannte technisch-organisatorische Optionen (in den Bereichen Kfz, industrielle Produktion, Lösemittelanwendung) unter Beachtung der Kriterien der wirtschaftlichen Zumutbarkeit und der umweltpolitischen Umsetzbarkeit.

**Bezugsjahr** dieser beiden langfristigen Szenarien ist das Jahr **1990**. In den Szenarien werden die Veränderungen der Emissionen der beiden Ozon-Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC ausgewiesen, und zwar differenziert nach Emittentengruppen. Besonders kennzeichnend ist für beide Szenarien, daß bei einer Reihe von Maßnahmen die volle Wirksamkeit erst im Zieljahr erreicht wird (insb. im Bereich Straßenverkehr), wobei dann - im Gegensatz zu den temporären Maßnahmen - die **Wirkung aller Maßnahmen dauerhaft** und nicht nur episodenzugeordnet ist (s. unten Kap. 3.2).

### B. Temporäre, kurzfristig wirksame Maßnahmen- und Maßnahmenbündel

Temporärmaßnahmen sind hier definiert als kurzzeitige, während eines begrenzten Zeitraums in Ozonepisoden durchgeführte Maßnahmen, die sowohl bundesweit als auch regional begrenzt vorgenommen werden können. Es wurden sechs temporäre Minderungsszenarien gebildet und im Hinblick auf die potentiellen emissions- und immissionsseitigen Minderungseffekte untersucht (s. unten Kap. 3.3 und Kap. 4):

#### Szenario T-1 "Tempolimits":

Geschwindigkeitsbeschränkungen für Pkw und Lkw auf Bundesautobahnen und auf sonstigen außerörtlichen Straßen.

Im Rahmen der emissionsseitigen Wirkungsanalysen wurden insgesamt 5 verschiedene Ausgestaltungen von Tempolimits detailliert untersucht. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Geschwindigkeit und der betroffenen Fahrzeugkategorien. Zusätzlich wurde bei 2 Varianten auch die zugrundeliegende Befolgungsrate variiert.

Im Rahmen der photochemischen Ausbreitungsrechnungen wurden die Wirkungen einer bundesweiten Tempolimit-Variante mit folgenden Spezifikationen untersucht: auf

Autobahnen 80km/h für Pkw und 60km/h für Lkw, auf sonstigen außerörtlichen Straßen 60km/h, Befolgungsrate von 80%.

**Szenario T-2 "Fahrverbote in Ballungsräumen":**

Betroffen sind die innerörtlichen Straßennetze in Städten > 250.000 Einwohner und Einwohnerdichten > 1.000 EW/qkm; die Verbote betreffen nicht-schadstoffarme Pkw und schwere Lkw/Busse älter als 60 Monate.

Diese besondere Variante eines nach Räumen und Fahrzeugtypen differenzierenden Fahrverbotes ist eine von insgesamt 4 Fahrverbots-Varianten, welche im Rahmen der emissionsseitigen Wirkungsanalysen untersucht wurden.

**Szenario T-3 "Bundesweites Tempolimit und Fahrverbote in Ballungsräumen":**

Bei diesem Szenario sind die Wirkungen der beiden temporären Maßnahmen T1 und T2 verknüpft. Außerhalb der Ballungsräume entsprechen die Emissionsminderungen denjenigen von T1. Innerhalb der Ballungsräume ergeben sich höhere Minderungsraten als bei T2.

**Szenario T-4 "Bundesweites Tempolimit, Fahrverbote in Ballungsräumen und freiwillige Reduktion bei stationären Anlagen / beim Lösemittelverbrauch":**

In diesem Szenario werden zusätzlich zu den verkehrsbezogenen Maßnahmen des Szenario T3 auch Minderungen in den Bereichen stationäre Anlagen sowie Lösemittelverbrauch aufgrund von freiwilligen Reduktionen unterstellt.

**Szenario T-5 "Bundesweites Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw":**

Dieses Szenario enthält ein flächendeckendes, bundesweites Fahrverbot für Pkw (Otto-motor) ohne 3-Wege-Kat sowie für nicht-schadstoffarme Diesel-Pkw auf allen Straßenkategorien.

**Szenario T-6 "Bundesweites Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw und freiwillige Reduktionen bei stationären Anlagen und beim Lösemittelverbrauch":**

Bei diesem Szenario wird das verkehrsbezogene Szenario T5 ergänzt um Minderungen in den Bereichen stationäre Anlagen sowie Lösemittelverbrauch aufgrund von freiwilligen Reduktionen.

Bezugszeitraum der sechs temporären, großräumigen Emissionsminderungs-Szenarien ist die Ozonepisode Sommer 1994. Ebenso wie bei den langfristigen, großräumigen Szenarien werden die Veränderungen der Emissionen der beiden Ozon-Vorläufersubstanzen  $\text{NO}_x$  und VOC differenziert nach Emittentengruppen ausgewiesen (s. unten).

Im Gegensatz zu den langfristigen Szenarien, deren Wirksamkeit während des ganzen Jahres gegeben ist, tritt die emissionsmindernde Wirkung bei den temporären Maßnahmen erst mit dem Ergreifen der Maßnahme ein. Für die immissionsseitigen Simulationsrechnungen mit Hilfe der photochemischen Ausbreitungsmodelle wurde dazu festgelegt, daß während der Ozonepisode 1994 die temporären Maßnahmen am 27. Juli 1994 (0.00 Uhr) wirksam werden und dann bis zum Ende der Episode (6. August 1994) in Kraft bleiben. Der 27. Juli wurde gewählt, weil an diesem Tage in Hessen der erste von drei Ozonalarmen in der Episode Sommer 1994 ausgelöst wurde.

Um die möglichen Effekte von frühzeitigeren Auslösungen von temporären Maßnahmen (bspw. aufgrund von prognostizierten Grenzwertüberschreitungen) zu untersuchen, wurden zusätzliche Rechenläufe für das Szenario T4 mit einer um 48 Stunden vorgezogen Auslösung der Maßnahmen durchgeführt.

Desweiteren wurden schließlich noch - zur Absicherung der Ergebnisse aus den Rechenläufen für die Episode 1994 - zusätzliche Ausbreitungssimulationen mit den beiden Szenarien T1 (Tempolimits) und T5 (bundesweite Fahrverbote) für die Ozonepisode 1990 gerechnet.

Tab. 2.2: Großräumige, überregionale Emissionsminderungs-Szenarien im Überblick

<b>D-1</b>	<b>Trend-2005</b>	Reduktionen der Emissionen von Ozon-Vorläufersubstanzen, welche dauerhaft durch eingeleitete emissionsmindernde Maßnahmen bis zum Jahr 2005 erreicht sein werden (EU - Richtlinien, BImSchG, TA Luft usw.)
<b>D-2</b>	<b>Reduktion-2005</b>	Trend-2005 zuzüglich Maßnahmen zur Ausschöpfung weitergehender Minderungspotentiale in den Bereichen Verkehrs-, Industrie-, Lösemittlemissionen
<b>T-1</b>	<b>Bundesweite Tempolimits</b>	Bundesweite Tempolimits (80km/h-Pkw und 60km/h-Lkw auf Autobahnen sowie 60km/h auf sonstigen außerörtlichen Straßen; 80% Befolgungsrate)
<b>T-2</b>	<b>Fahrverbote in Ballungsräumen</b>	Fahrverbote auf innerörtlichen Straßennetzen in Städten mit mehr als 250.000 Einwohnern
<b>T-3</b>	<b>T-1 plus T-2</b>	Kombination der temporären Maßnahmen T1 und T2
<b>T-4</b>	<b>T-3 plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen</b>	T-3 plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen und beim Lösemittelverbrauch aufgrund von Appellen
<b>T-5</b>	<b>Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw</b>	Flächendeckendes, bundesweites Fahrverbot für Pkw ohne geregelten 3-Wege-Katalysator und für nicht-schadstoffarme Diesel-Pkw
<b>T-6</b>	<b>T-5 plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen</b>	T-5 plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen und beim Lösemittelverbrauch aufgrund von Appellen

### Kleinräumige Emissionsszenarien

(1) Im Rahmen der oben dargestellten großräumigen Emissionsszenarien werden für die einzelnen Emittentengruppen jeweils spezifische pauschale Minderungsquoten berechnet, die dann in die Emissionsdatenbasis für die großräumigen photochemischen Simulationsrechnungen übertragen werden. Bei den kleinräumigen Modellrechnungen liegen demgegenüber sehr viel detailliertere Informationen zu den Emissionsstrukturen im Modellgebiet vor. Die emissionsseitigen Wirkungsanalysen können daher einen größeren Detaillierungsgrad aufweisen: auf der Ebene der Subsektoren und in hoher räumlicher Auflösung.

(2) Als Grundlage wurde dabei auf die schon zur Erstellung der Emissionsdatenbasis für den Basisfall verwendeten Berechnungsverfahren und -methoden zurückgegriffen. Die emissionsseitigen Wirkungsuntersuchungen erfolgen dabei in zwei Teilschritten:

1. Die zu betrachtenden Einzelmaßnahmen bei den einzelnen Emittentensektoren werden definiert und die emissionsmindernden Effekte auf der Ebene der Subsektoren bestimmt.
2. Darauf aufbauend werden die Einzelmaßnahmen zu Maßnahmenbündeln, den sog. Szenarien, zusammengesetzt und die emissionsseitigen Wirkungen der Szenarien ermittelt.

(3) In der folgenden Tab. 2.3 sind die untersuchten Minderungsmaßnahmen bzw. -szenarien im Überblick aufgeführt und schlagwortartig beschrieben. Es wurden insgesamt 10 verschiedene Minderungsszenarien gebildet. (Ausführlichere Erläuterungen enthalten die entsprechenden Teilberichte.)

(4) Bei der Bildung der einzelnen Szenarien für die kleinräumigen Wirkungsanalysen waren eine Reihe von besonderen Aspekten, die einerseits auf dem methodischen Gesamtkonzept und andererseits auf dem umweltpolitischen Hintergrund basieren, zu beachten und zugrundezulegen:

- a) Die im Rahmen der großräumigen Analysen (Stufe A) untersuchten Szenarien sind auch - soweit sinnvoll - im Rahmen der kleinräumigen Analysen (Stufe B ) zu betrachten. Dadurch soll sichergestellt werden, daß einerseits allfällige Einflüsse von Skalierungseffekten auf die Analyseergebnisse sichtbar gemacht werden. Desweiteren sollen dadurch die Effekte von unterschiedlichen räumlichen Dimensionierungen der Minderungsmaßnahmen aufgezeigt werden. Gerade dieser letztere Gesichtspunkt erwies sich im weiteren Verlauf der Arbeiten als besonders wichtig.

Aus diesem Grunde sind bei den kleinräumigen Analysen die Szenarien S-1 (Tempolimit), S-2 (Fahrverbote für nicht-schadstoffarme Pkw), S-10 (Trend 2005) und S-4a+ (zeitlich vorgezogene Maßnahmen einleitung) in gleicher Weise definiert wie die dazu korrespondierenden Szenarien in der Stufe A.

- b) Die regionalen Besonderheiten bei den Emittentenstrukturen sowie insbesondere auch die jeweiligen konzeptionellen Ansätze von regionalen Minderungsstrategien auf der Ebene der betroffenen Bundesländer, Regionen und Kommunen gaben Anlaß, speziell hierauf aufbauende Szenarien zu definieren. Diesem Aspekt tragen vor allem folgende Szenarien Rechnung: S-4a (Regio-Straßenverkehr), S-6 (Focus Regio-NOx), S-7 (Focus Regio-VOC) und S-8a (Focus Regio-NOx+VOC). Das Kürzel "Regio" bedeutet, daß die Maßnahmen ausschließlich innerhalb der Untersuchungsregion ergriffen werden.
- c) Aufgrund von Erkenntnissen aus anderen, zeitparallelen Untersuchungen<sup>5</sup> sowie auch mit Blick auf das im Jahre 1995 in Kraft getretene Bundes-Ozongesetz galt ein besonderes Augenmerk der Fragestellung, inwieweit eine räumliche Ausweitung des Maßnahmengebietes (über die untersuchte Modellregion hinaus) einen positiven Einfluß auf die Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen hat. Dieser Fragestellung tragen die beiden Szenarien S-4b und S-8b Rechnung. Bei diesen Szenarien werden, ergänzend zu den regionalen Maßnahmen der Szenarien S-4a und S-8a, auch Minderungsmaßnahmen in den angrenzenden Bundesländern unterstellt. Das Kürzel "Kombi" signalisiert, daß beim jeweiligen Szenario Minderungsmaßnahmen sowohl innerhalb der Untersuchungsregion als auch in angrenzenden Regionen (Bundesländern) ergriffen werden.
- d) Aufgrund der in anderen, zeitparallelen Vorhaben zum Thema "Reformulierte Kraftstoffe" erreichten Erkenntnisse über die bei geänderten Kraftstoffkompositionen ebenfalls veränderten NOx- und VOC-Emissionen aus dem Straßenverkehr (inkl. Kraftstoffumschlag) wurde als gesonderte Kombi-Maßnahme auch das Szenario S-9 ("Sommerbenzin") definiert und untersucht. Dabei wird unterstellt, daß diese Maßnahme nicht nur regional sondern überregional geschaltet sein würde.

---

<sup>5</sup> Zu erwähnen sind hier insbesondere die Erkenntnisse, welche aus dem Modellversuch Neckarsulm/Heilbronn gewonnen wurden

**Tab. 2.3 Kleinräumige Emissionsminderungs-Szenarien im Überblick**

Nr.	Kurzbezeichnung	Maßnahmen	Betroffene Emissionsquellen	Räumlicher und zeitlicher Bezug
S-1	Regio-Tempolimit	Scharfes Tempolimit in der Region	Pkw-/Lkw-Straßenverkehr	Modellregion Temporär
S-2	Regio-Pkw-Fahrverbot	Fahrverbot für nicht schadstoffarme (nsa) Pkw in der Region	Pkw-Straßenverkehr Tankstellen	Modellregion Temporär
S-4a	Regio-Straßenverkehr	Scharfes Tempolimit plus Fahrverbot für nsa-Pkw + Lkw in der Region (S-1 plus S-2)	Pkw-/Lkw-Straßenverkehr Tankstellen	Modellregion Temporär
S-4b	Kombi-Straßenverkehr -Max	S-4a plus Fahrverbot für nsa-Pkw in umliegenden Bundesländern	Pkw-/Lkw-Straßenverkehr Tankstellen	Modellregion umliegende BL Temporär
S-6	Regio-Focus NOx	Tempolimits, Fahrverbote, Stilllegung größerer Einzel-emissionsquellen, Appelle	Pkw-/Lkw-Straßenverkehr Tankstellen Ind./gew. Feuerungsanlagen	Modellregion Temporär
S-7	Regio-Focus VOC	Fahrverbote nsa-Pkw, Stilllegung größerer VOC-Emissionsquellen, Appelle an Gewerbe/Haushalte	Pkw-Straßenverkehr Tankstellen Feuerungsanlagen Haushalte/Gewerbe	Modellregion Temporär
S-8a	Regio-Max NOx/VOC	S-6 plus S-7	S-6 plus S-7	Modellregion Temporär
S-8b	Kombi-Max NOx/VOC	S-8a plus Fahrverbote in umliegenden Bundesländern	S-8a plus Straßenverkehr in den umliegenden Bundesländern	Modellregion umliegende Bundesl. Temporär
S-9	Sommerbenzin	Reformulierte Kraftstoffe für Otto- u. Dieselmotoren	Kfz-Verkehr Tankstellen	Modellregion umliegend Bundesl. Dauerhaft
S-10	Trend 2005	Umsetzung aller eingeleiteten Maßnahmen in Deutschland und Europa	Alle Emittentengruppen	Modellregion Deutschland/Europa Dauerhaft -ganzjährig
S-4a+	Vorzeitige Inkraftsetzung	Vorgezogene Einleitung von S-4a um 48 h	wie S-4a	Modellregion Temporär

## 2.5 Auswahl der photochemischen Ausbreitungsmodelle

(1) Für photochemische Simulationsrechnungen stehen in Europa seit den 80er Jahren eine Reihe von Modellsystemen zur Verfügung. Die Auswahl der für dieses Vorhaben einzusetzenden Modellinstrumente wurde zunächst im Rahmen der Projektdefinitionsphase vorbereitet. Der seinerzeitigen Auswahl lagen eine Reihe von Kriterien zugrunde, deren wichtigste nachstehend nochmals stichwortartig benannt werden:

- Entwicklungsstand und empirische Erprobtheit des Modellinstrumentariums
- Lösung der Schnittstellenproblematik bei der Einbettung/Ankoppelung von kleinräumigen Modellrechnungen an die großräumigen Rechnungen
- Differenziertheit im Bereich der sektoralen Aufgliederung der O<sub>3</sub>-Vorläuferemissionen zwecks Bewertung von "emittentenscharfen" Minderungsstrategien
- Operationalität und Kosteneffizienz des Modellinstrumentariums
- Expertise des Modellanwenders.

(2) Die Bewertung der seinerzeit verfügbaren Modelle mündete in dem Vorschlag, die Modellsysteme RTM III (großräumig) und Urban Airshed Modell (kleinräumig) einzusetzen. Das Modellsystem RTM III (Dr. Stern / FU Berlin) ist in Europa im Rahmen verschiedener PHOXA-Vorhaben sehr erfolgreich eingesetzt und weiterentwickelt worden; das UAM ist insb. in den USA in verschiedenen EPA-Vorhaben verwendet worden.

(3) Im Frühstadium der Arbeiten zu Stufe A der vorliegenden Hauptuntersuchung kamen weitere Kriterien und Aspekte bezüglich der einzusetzenden Modellsysteme hinzu:

1. Bei mehreren Modellen haben im Laufe der letzten Jahre erhebliche Weiterentwicklungen stattgefunden, wodurch sich die Bezugsbasis der Bewertungen aus neuerer Sicht teilweise sehr verändert darstellte.
2. Die Diskussionen im Vorfeld der Ozon-Gesetzgebung gaben Anlaß, eine möglichst hohe Absicherung und Belastbarkeit der in diesem Vorhaben durchzuführenden modellgestützten Abschätzungen der Wirkungen von Emissionsminderungsmaßnahmen auf die hochsommerlichen Ozon-Konzentrationen zu erreichen.

(4) Vor diesem Hintergrund wurde in Absprache mit dem Auftraggeber beschlossen, die **großräumigen** photochemischen Simulationsrechnungen wie ursprünglich geplant mit einem

sondern mit Hilfe von **zwei Modellsystemen** in paralleler Anwendung (und mit abgeglichenen Inputdatensätzen) durchzuführen. Zum Einsatz kamen die beiden Modellsysteme

- **REM3:** (Dr. Stern / FU Berlin; REM3 ist die Weiterentwicklung von RTM III)
- **EURAD:** (Prof. Dr. Ebel / Universität zu Köln)

Diese beiden Modellsysteme sind unten (Kap. 4.1) sowie insbesondere in den entsprechenden Teilberichten<sup>6</sup> näher beschrieben. Bei beiden handelt es sich um komplexe dreidimensionale EULER'sche Ausbreitungsmodelle, mit denen großräumig (europaweit) und mit einer verglws. hohen räumlichen Auflösung (Rasterflächen mit den Kantenlängen von 30km resp. 36km) die Simulation der Bildung, des Transports und der Immission/Deposition von Photooxidantien in der planetarischen Grenzschicht bzw. in der Troposphäre durchgeführt wird.

Das Modellsystem **EURAD** (hervorgegangen aus einem US-Modell und weiterentwickelt im Rahmen des EUREKA-Umweltprojektes EUROTRAC) kann für Simulationsrechnungen auf der regionalen Skala europaweit ebenso eingesetzt werden wie zur Simulation von Prozessen im lokalen Bereich mit einer Ausdehnung von einigen Kilometern. Durch modellinternes Einbettungsverfahren ("nesting") können integrierte groß- und kleinräumige Rechnungen mit einem System durchgeführt werden.

Das Modellsystem **REM3** (**R**egional **E**ulerian **M**odel with **3** chemistry schemes) verfügt über die Besonderheit des optionalen Betriebs mit 3 verschiedenen chemischen Mechanismen (SAPRC, Harvell und CBM-IV). Hinsichtlich der Koppelung mit kleinräumigen Rechnungen besteht volle Kompatibilität zu den Modellen UAM und CALGRID

(5) Ebenfalls in Absprache mit dem Auftraggeber wurde für die **Stufe B** des Vorhabens beschlossen, die **kleinräumigen** photochemischen Simulationsrechnungen mit Hilfe von **zwei Modellsystemen** wie folgt durchzuführen:

- **CALGRID/ REM3** für die Modellregionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg
- **EURAD** für die Modellregion Dresden

<sup>6</sup> siehe hierzu die Teilberichte zur Untersuchungsstufe A (großräumige Wirkungsanalysen:

- a) Stern R., Fath J., Reimer E.: Bewertung der Effektivität von Ozonminderungsstrategien mit Hilfe des photochemischen Ausbreitungsmodells REM3, Inst. f. Meteorologie der FU Berlin, im Auftrag der Prognos AG, Berlin 1995
- b) Memmesheimer M. et al.: Bewertung der Effektivität von Ozonminderungsstrategien mit Hilfe des photochemischen Ausbreitungsmodells EURAD, Rhein. Inst. f. Umweltforschung an der Universität zu Köln, im Auftrag der Prognos AG, Köln 1995

Das Modellsystem **CALGRID** ist eine in den USA erarbeitete Weiterentwicklung des UAM. Es handelt sich dabei um ein dreidimensionales, räumlich hochauflösendes photochemisches Transportmodell mit Modulen für den Transport, die Diffusion, die Deposition und die photochemischen Reaktionen. Bei CALGRID werden die immissionsseitigen Randbedingungen für das Modellgebiet vom großräumigen Transportmodell REM3 bereitgestellt. Beim Einsatz des Modellsystems **EURAD** für kleinräumige Simulationsrechnungen werden modelltechnisch drei Skalenbereiche realisiert und im sog. Nesting-Verfahren miteinander verknüpft. Nähere, detaillierte Beschreibungen dieser beiden Modellsysteme (Strukturen und Eigenschaften wie vertikale Schichtungen, Chemiemechanismen, Meteorologiemodule, Nesting-Verfahren usw.) enthalten die Teilberichte zu den photochemischen Simulationsrechnungen für die Modellregionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg für das Modellsystem CALGRID und der Teilbericht zu den photochemischen Simulationsrechnungen für die Modellregionen Dresden für das Modellsystem EURAD.

## **II. Großräumige Wirkungsanalysen (Phase A)**

### **3. Emissionsseitige Wirkungen von großräumigen, dauerhaften und temporären Minderungsmaßnahmen auf die Ozon-Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC**

#### **3.1 Vorgehensweise und Informationsgrundlagen**

(1) Im Rahmen des Gesamtvorhabens stellen die emissionsseitigen Minderungsszenarien und Wirkungsanalysen gewissermaßen das "Bindeglied" dar zwischen der umweltpolitischen Ebene, auf der konkrete Maßnahmen zur Emissionsminderung festgelegt werden, und den modellgestützten Ozon-Ausbreitungsrechnungen, mit deren Hilfe die Auswirkungen der mit den Maßnahmen erreichten Emissionsminderungen auf die Immissionsbelastung durch Photooxidantien simuliert werden.

(2) Die zentralen Aufgaben des hierfür konzipierten Leistungspaketes sind:

- Auswahl von Emissionsminderungsmaßnahmen und Bündelung zu Szenarien (Szenariodefinitionen)
- Ermittlung der mit diesen Maßnahmenbündeln zu erreichenden Reduktionen der Emissionen der Ozonvorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC (Wirkungsanalysen).

(3) Die Auswahl der Maßnahmen und Szenarien basiert auf folgenden Informationsgrundlagen:

- Vorarbeiten im Rahmen der Studie zur Projektdefinitionsphase (Vorstudie),
- Auswertungen der relevanten Studien zum Thema NO<sub>x</sub>- und VOC-Minderungen,
- Umweltpolitische Ansätze und Initiativen zur NO<sub>x</sub>- und VOC-Minderung im nationalen und internationalen Rahmen,
- Relevante Vorarbeiten und interne Arbeitspapiere des Umweltbundesamtes, wobei im Verlauf der Untersuchung die verschiedenen Einzelmaßnahmen und die Szenarien mit Fachleuten im Umweltbundesamt diskutiert und abgestimmt wurden.

Die Bündelung von Einzelmaßnahmen zu Szenarien erfolgt unter der Vorgabe, daß diese einen realistischen Bezug zum umweltpolitischen Handlungsrahmen aufweisen, an den realen technischen Gegebenheiten orientiert sind und den Kriterien der wirtschaftlichen Zumutbarkeit genügen.

(4) Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungshorizonte werden die Maßnahmen in zwei Hauptgruppen gegliedert:

**1. Langfristig wirksame Maßnahmen:**

Bei dieser Gruppe handelt es sich im Falle des Szenarios "Trend 2005" um **bereits eingeleitete Maßnahmen sowie** um solche **Maßnahmen, deren Umsetzung absehbar** ist. Grundlage sind die nationalen Regelungen im Rahmen des BImSchG (TA Luft, relevante BImSchV) sowie die EU-weiten Regelungen (Abgasgrenzwerte, Direktiven) und die Zielvorgaben der NO<sub>x</sub>- und VOC-Protokolle der ECE. - Im Falle des Szenarios "Reduktion 2005" kommen zu diesen Maßnahmen noch die durch die Ausschöpfung von zusätzlich vorhandenen Minderungspotentialen erreichbaren Reduktionen hinzu. In den Tabellen 3.1 und 3.2 sind die hierunter zählenden Maßnahmen stichwortartig aufgeführt.

**Tab. 3.1:** Überblick der untersuchten NO<sub>x</sub>- und VOC-Minderungsmaßnahmen im Langfrist-Szenario "Trend 2005"

Region	Maßnahmen		
	Verkehr (NO <sub>x</sub> + VOC)	Lösemittel	Feuerungsanlagen (NO <sub>x</sub> )
<b>Deutschland</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EU-Abgasgrenzwerte, Stufe 2: PKW-Otto (G-Kat), PKW-Diesel, Krafträder, LKW/Busse</li> <li>• 20. und 21. BImSchV (Kraftstoffverteilg.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TA Luft (4. BImSchV)</li> <li>• 2. BImSchV</li> <li>• Umweltzeichen</li> <li>• EU-Lösemittelrichtlinie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GFAVO</li> <li>• 17. BImSchV</li> <li>• TA Luft (4. BImSchV)</li> <li>• 1. BImSchV</li> <li>• UZ für kleine Öl- und Gasbrenner</li> </ul>
<b>Europäische Union (EUR 12)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EU-Abgasgrenzwerte, Stufe 2: PKW-Otto (G-Kat), PKW-Diesel, Krafträder, LKW/Busse</li> <li>• "Stage I - Direktive" (Kraftstoffverteilung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EU-Lösemittelrichtlinie</li> <li>• (EU-Umweltzeichen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EU-Großfeuerungsanlagendirektive</li> <li>• strengere nationale Richtlinien (B, DK, NL, I)</li> </ul>
<b>Übrige Länder</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VOC- und NO<sub>x</sub>-Protokolle der ECE (Zielwerte für Gesamtemissionen)</li> <li>• nationale Richtlinien für stationäre Anlagen (A, SF, S, CH, u.a.) u. Verkehr</li> </ul>		

**Tab. 3.2:** Überblick über die NO<sub>x</sub>- und VOC-Minderungsmaßnahmen im Szenario "Reduktion 2005" (zusätzliche Maßnahmen gegenüber Trendszenario)

Region	Maßnahmen		
	Verkehr (NO <sub>x</sub> + VOC)	Lösemittel	Feuerungsanlagen (NO <sub>x</sub> )
<b>Deutschland</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abgas: Grenzwertverschärfung wie EUR-12</li> <li>• Abgabe auf Alt-Kfz (Pkw, Lkw)</li> <li>• Verdunstung/Verteilung:               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Benzinzusammensetzung</li> <li>– Verschärfung der 21. BImSchV</li> </ul> </li> <li>• fahrleistungsbeeinflussende Maßnahmen:               <p><i>Personenverkehr<sup>1</sup>:</i> Verteuerung d. Straßenverkehrs, Ausbau ÖPNV und Schienenverkehr, u.a.m.</p> <p><i>Güterverkehr<sup>2</sup>:</i> Verteuerung Lkw, Ausbau und Attraktivierung Schienenverkehr, Kraftstoffverbrauchsred. Lkw, u.a.m.</p> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• produktbezogene Massnahmen:               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Vorschriften/Verbote bzgl. LM-gehalt</li> <li>– VOC-Lenkungsabgabe</li> <li>– weitere Umweltzeichen</li> </ul> </li> <li>• Grenzwertverschärfung entsprechend "Stand der Technik" (Anlagen nach 4. BImSchV)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grenzwertverschärfungen (13. BImSchV- und TA Luft-Anlagen)</li> </ul>
<b>Europäische Union (EUR 12)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abgas: Grenzwertverschärfung ab 1998:               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Benzin-PKW (California-Norm LEV<sup>3</sup>)</li> <li>– Diesel-PKW (California-Norm LEV)</li> <li>– LKW/Busse (EU-Grenzwert Stufe 3<sup>4</sup>)</li> <li>– Motorräder (EU-Grenzwert Stufe 3)</li> </ul> </li> <li>• Abgabe auf Alt-Kfz</li> <li>• Verdunstung/Verteilung:               <ul style="list-style-type: none"> <li>– "Stage II"-Direktive</li> <li>– Änderung d. Benzinzusammensetzung</li> </ul> </li> <li>• Inspektionsprogramme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• produktbezogene Regelungen (Grenzwerte LM-Gehalt, LM-Verbote, LM-Lenkungsabgabe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grenzwertverschärfungen Großfeuerungsanlagen EU-weit analog GFAVO</li> </ul>
<b>Übrige Länder</b>	keine zusätzlichen Maßnahmen gegenüber dem Trendszenario		

1 Gemäß Prognos: "Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der verkehrlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005", im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Basel 1991.

2 Gemäß DIW, IFEU, IVU/HACON: "Verminderung der Luft- und Lärmbelastungen im Güterverkehr 2010", UBA-Forschungsvorhaben 104 05 962, Berlin 1994; Übersicht über Maßnahmen im einzelnen: S. 116 - 123.

3 LEV = "Low Emission Vehicle"

4 Gemäß dem deutschen Vorschlag.

**2. Kurzfristig wirksame Maßnahmen:**

Bei dieser Gruppe handelt es sich um episodenzugehörige, temporäre Maßnahmen. Sie werden beim Eintritt des Auslösekriteriums (Überschreitung eines bestimmten O<sub>3</sub>-Konzentrationsschwellenwertes) eingeleitet und während eines begrenzten Zeitraums in Ozonepisoden durchgeführt. Das Schwergewicht der hier untersuchten temporären Maßnahmen liegt auf dem Straßenverkehrssektor (Tempolimits und Fahrverbote). Bei den stationären Anlagen werden die Effekte von freiwilligen Reduktionen analysiert.

**Tab. 3.3:** Überblick über die untersuchten NO<sub>x</sub>- und VOC-Minderungsmaßnahmen in den kurzfristigen Szenarien "Temporäre Maßnahmen"

Region	Maßnahmen		
	Verkehr (NO <sub>x</sub> + VOC)	Lösemittel	Feuerungsanlagen (NO <sub>x</sub> )
<b>Deutschland</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempolimits (Pkw/Lkw) auf Autobahn u. Landstraße</li> <li>• Fahrbeschränkungen für Pkw ohne Kat. und ältere schwere Lkw</li> <li>• Informationskampagnen als flankierende Maßnahme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appelle zum Verzicht auf die Verwendung LM-haltiger Produkte</li> <li>• Informationskampagnen (flankierend)</li> <li>• temporäre Produktionseinschränkungen von Großemittenten (freiwillige Vereinbarungen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• flächendeckende Vereinbarungen mit Betreibern von Großfeuerungsanlagen bzgl. temporärem Produktionsverzicht</li> </ul>
<b>Übrige Länder</b>	keine		

(5) Bezüglich der Methodik ist anzumerken, daß die Abschätzung der Effekte der einzelnen Minderungsmaßnahmen die Berücksichtigung einer Vielzahl von einzelnen Einflußparametern erfordert. Desweiteren ist bei der Bildung von Minderungsszenarien zu beachten, daß die Einzeleffekte i.d.R. nicht einfach zu einem Gesamteffekt addiert werden können, da zwischen den Einzelmaßnahmen häufig wechselseitige Abhängigkeiten bestehen und auch teilweise auf das gleiche Minderungspotential zugegriffen wird. Bei der Ermittlung der emissionsseitigen Minderungseffekte von Einzelmaßnahmen und Szenarien handelt es sich somit um eine komplexe Aufgabe, die vielfach die Verwendung modellgestützter Ansätze erforderlich macht.

Die Abschätzung der Minderungseffekte im Verkehrsbereich wurde im Rahmen dieser Untersuchung modellgestützt mit Hilfe des Prognos-Straßenverkehrsemissionsmodell durchgeführt. In den übrigen Emittentenbereichen wurde soweit als möglich auf vorliegende neuere Studien zur NO<sub>x</sub>- und VOC-Minderung zurückgegriffen, deren Ergebnisse häufig ebenfalls auf modellgestützten Vorgehensweisen beruhen.

(6) In diesem Abschnitt zur Stufe A des Gesamtvorhabens werden die Ergebnisse für den Bereich der großräumigen, überregionalen Maßnahmen dargestellt. Darunter werden hier bundesweite Wirkungen für die nationalen und europaweite Wirkungen für die EU-weiten Maßnahmen verstanden. In einem Falle werden auch die Wirkungen von lediglich auf regionaler Ebene wirksamen Maßnahmen untersucht, und zwar im Falle des temporären Fahrverbots in ausgewählten Ballungsräumen (s. unten).

### 3.2 Dauerhafte, langfristig wirksame Emissionsminderungsmaßnahmen und Szenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005"

(1) Die Erläuterungen zur Methodik, den zugrundeliegenden Annahmen und den Ergebnissen für einzelne Emittentensektoren und Länder sind im gesondert vorgelegten Bericht zu diesem Teilvorhaben ausführlich dargestellt<sup>5</sup>. Es erfolgt an dieser Stelle eine überblicksartige Zusammenfassung der Ergebnisse.

#### A. Szenario "Trend 2005"

Dieses Trendszenario dient im wesentlichen der Beantwortung der **Fragestellung**, welche Reduktionen der Emissionen der Ozon-Vorläufersubstanzen werden voraussichtlich durch die bereits beschlossenen Minderungsmaßnahmen in Deutschland und in den anderen europäischen Ländern des Untersuchungsgebietes erreicht werden. Zielhorizont ist das Jahr 2005. Referenzjahr ist das Jahr 1990.

Für Deutschland wurden die Abschätzungen im Bereich Verkehr mit Hilfe des Prognos-Straßenverkehrsemissionsmodells durchgeführt, ergänzt um die Befunde aus der Prognos-Studie "Entwicklung der Emissionen von Luftschadstoffen und CO<sub>2</sub> durch den Verkehr in Ost- und Westdeutschland bis 2010 (1992), einer neueren Studie für den Straßengüterverkehr im Auftrag des Umweltbundesamtes (DIW, IFEU, IVU/HACON 1994) sowie einer Reihe weiterer einschlägiger Studien. Im Bereich Lösemittel basieren die Abschätzungen auf Auswertungen einer neueren Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Rentz 1992), den Ergebnissen der Arbeiten der VOC-Kommission in Baden-Württemberg (1993) sowie auf Angaben der EU-Kommission hinsichtlich der geplanten EU-Lösemittelrichtlinie. Bei den Feuerungsanlagen und für den Bereich der Kraftstoffverteilung stützen sich die Abschätzungen auf Ausarbeitungen des Umweltbundesamtes (1994).

Die **Ergebnisse der Abschätzungen** sind in den Abb. 3-1 und 3-2 für das gesamte großräumige Untersuchungsgebiet und in den Abb. 3-3 und 3-4 für Deutschland, gegliedert nach Emittentensektoren, dargestellt:

- Im **gesamten Untersuchungsgebiet** werden sich danach im Zeitraum 1990-2005 die **NO<sub>x</sub>-Emissionen** um **-19%** und die **VOC-Emissionen** um **-28%** verringern.

---

<sup>5</sup> Plinke, E. Hartmann A., Motz G., Großräumige Emissionsminderungsmaßnahmen und Szenarien - Anlagenband Teilvorhaben A-2 des UBA - F&E-Vorhabens "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon (Sommermog), Untersuchung der Prognos AG, Berlin/Basel, 1995

- Für den Bereich **Deutschland** ergeben die Berechnungen im Zeitraum 1990-2005 Minderungsraten bei den **NO<sub>x</sub>-Emissionen** von **-37%** und bei den **VOC-Emissionen** von **-42%**. Auf die innerhalb Deutschlands gegebenen regionalen Unterschiede, insb. zwischen den alten und neuen Bundesländern, wird im ausführlichen Bericht zu diesem Teilvorhaben näher eingegangen. Gleiches gilt für die regionalen Unterschiede innerhalb des gesamten europäischen Untersuchungsraums.

## B. Szenario "Reduktion 2005"

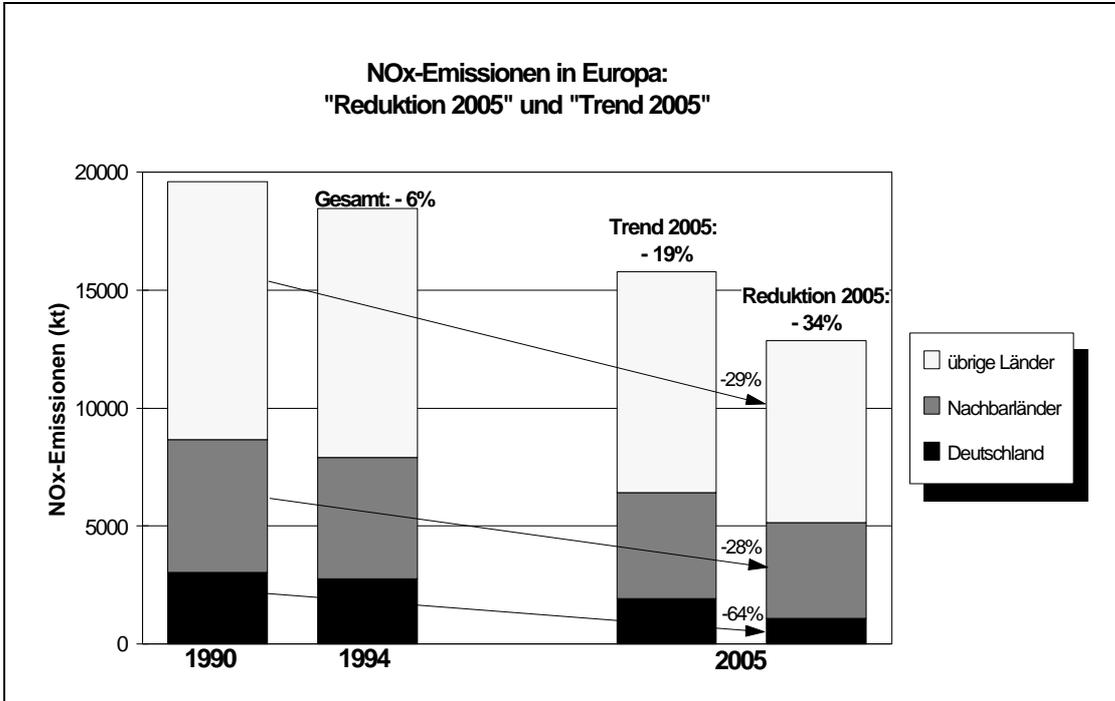
Das Reduktionsszenario dient der Beantwortung der **Fragestellung**, welche Reduktionen der Emissionen der Ozon-Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC können über die bereits eingeleiteten Minderungsmaßnahmen hinaus durch Ausschöpfung weiterer vorhandener Emissionsminderungspotentiale in Deutschland und in den anderen europäischen Ländern des Untersuchungsgebietes erreicht werden. Zielhorizont ist das Jahr 2005. Referenzjahr ist das Jahr 1990. Einen Überblick über die untersuchten zusätzlichen Maßnahmen gegenüber dem Trendszenario enthält Tab. 3.2 (s. oben).

Die **Ergebnisse der Abschätzungen** sind in den Abb. 3-1 und 3-2 für das gesamte großräumige Untersuchungsgebiet und in den Abb. 3-3 und 3-4 für Deutschland, gegliedert nach Emittentensektoren, dargestellt:

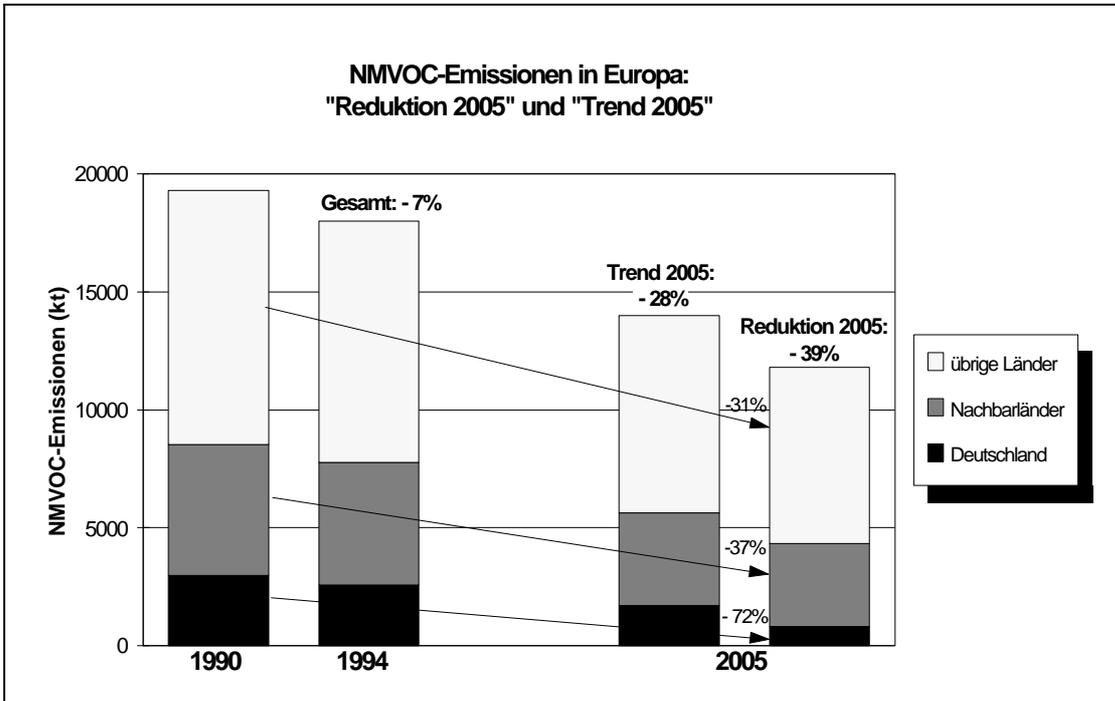
- Im **gesamten Untersuchungsgebiet** werden sich danach im Reduktionsszenario im Zeitraum 1990-2005 die **NO<sub>x</sub>-Emissionen** um **-34%** und die **VOC-Emissionen** um **-39%** verringern.
- Für den Bereich **Deutschland** ergeben die Berechnungen im Zeitraum 1990-2005 Minderungsraten bei den **NO<sub>x</sub>-Emissionen** von **-64%** und bei den **VOC-Emissionen** von **-72%**. Auf die erheblichen die regionalen Unterschiede innerhalb des gesamten europäischen Untersuchungsraums sowie auch innerhalb Deutschlands wird im ausführlichen Bericht zu diesem Teilvorhaben näher eingegangen.

(2) In diesem Zusammenhang ist im übrigen nochmals darauf hinzuweisen, daß die Emissionsdatenbasis für 1990 auf der einheitlichen Basis des Programms CORINAIR-1990 beruht. Die nationalen Emissionsdaten 1990 stammen dabei aus UBA-Angaben mit Stand von 1994/95. Die Ende 1995/Anfang 1996 vom UBA vorgelegten neuen nationalen Emissionsabschätzungen für den Bereich des Straßenverkehrs für den Zeitraum 1980-2010 konnten in der Stufe A dieses Vorhabens noch nicht berücksichtigt werden.

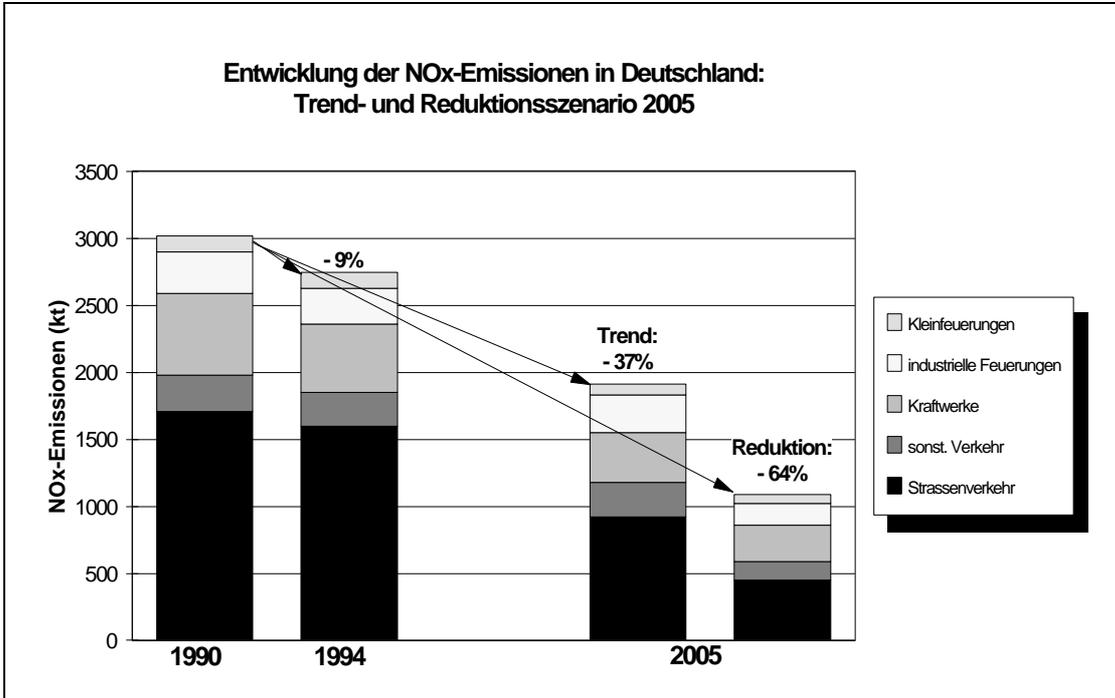
**Abb. 3-1:** Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in Europa in den Szenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005"



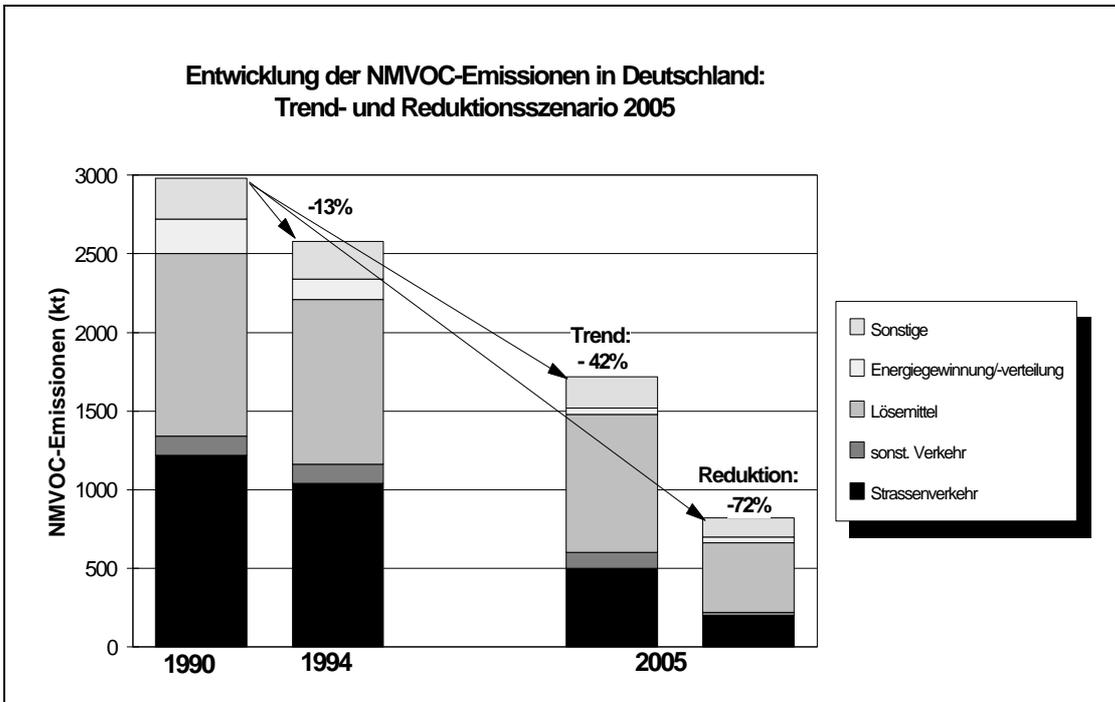
**Abb. 3-2:** Entwicklung der VOC-Emissionen in Europa in den Szenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005"



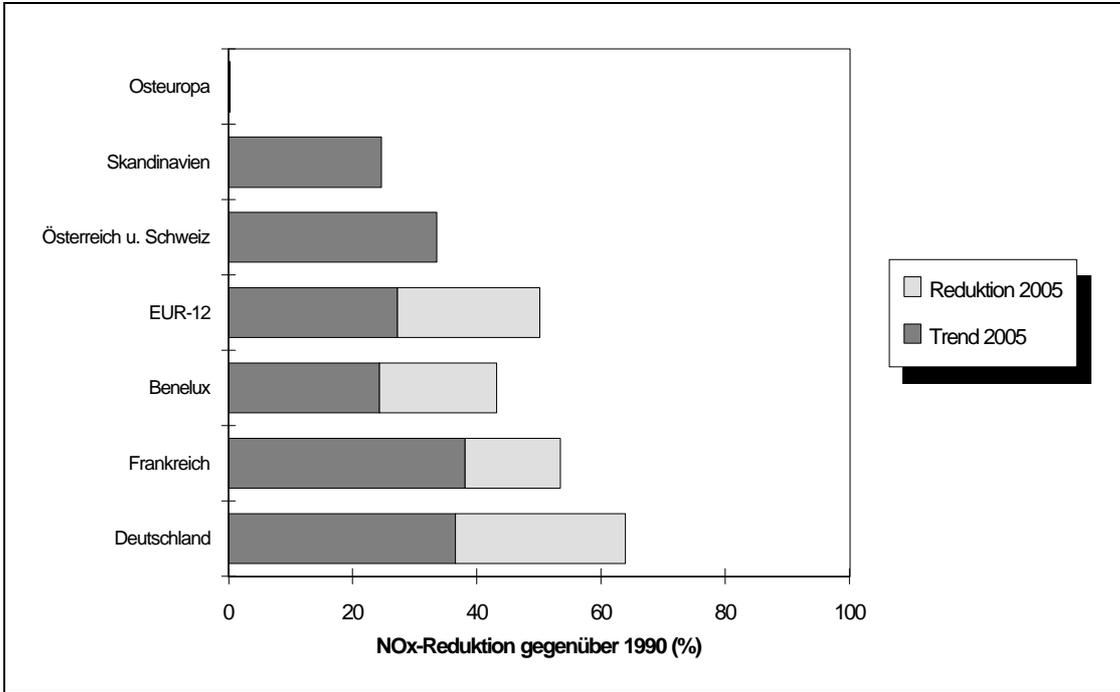
**Abb. 3-3:** Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in Deutschland in Trend- und Reduktionsszenario



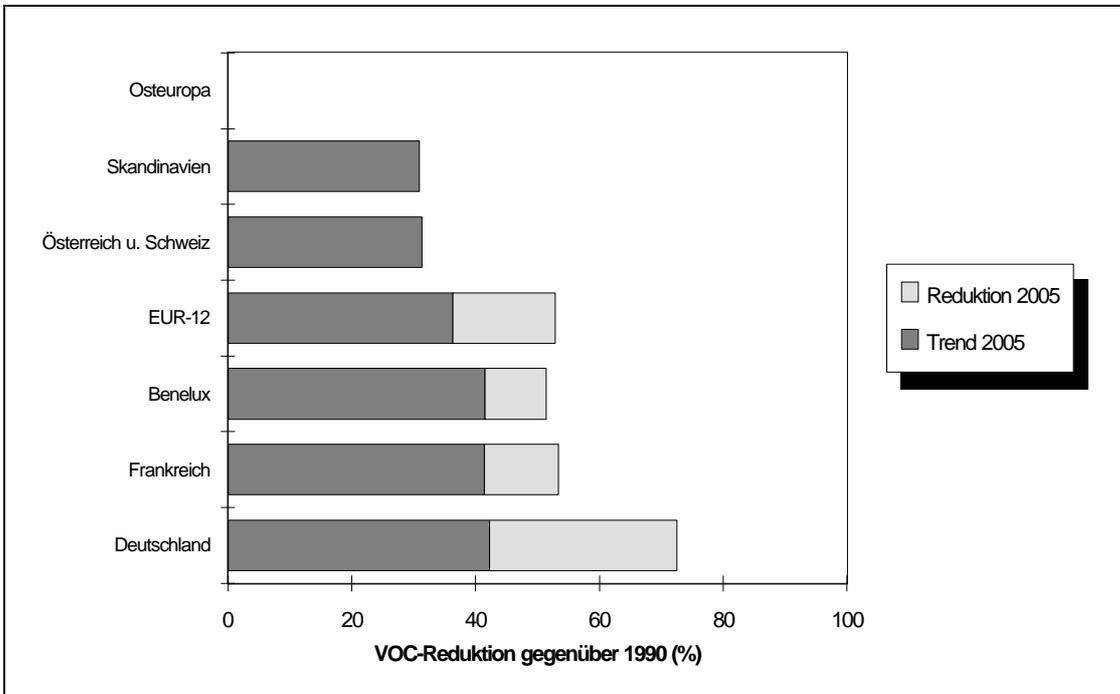
**Abb. 3-4:** Entwicklung der VOC-Emissionen in Deutschland in Trend- und Reduktionsszenario



**Abb. 3-5:** Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in Deutschland im Vergleich zu ausgewählten Ländergruppen



**Abb. 3-6:** Entwicklung der VOC-Emissionen in Deutschland im Vergleich zu ausgewählten Ländergruppen



### 3.3 Temporäre, episodenzugehörige Emissionsminderungsmaßnahmen und Szenarien

(1) Der Stellenwert von Temporärmaßnahmen innerhalb einer Gesamtstrategie "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon" zur Reduzierung des Sommersmogs kann bestehen in

- einer "Übergangslösung" bis zum vollen Greifen von langfristig angelegten, nachhaltigen Minderungsstrategien,
- als "Ergänzung" zu den Langfristmaßnahmen, falls durch die eingeleiteten langfristigen Maßnahmen auch bei voller Wirksamkeit keine ausreichende Absenkung der hochsommerlichen Ozonspitzenkonzentrationen erreicht werden kann ("Aufsatteln" von Temporärmaßnahmen).

(2) Die Besonderheit von temporären Maßnahmen im Vergleich zu den langfristigen, nachhaltigen Maßnahmen besteht vor allem darin, daß sowohl das "Timing" (Zeitpunkt der Einleitung) als auch die Dauer der Maßnahmen und die regionale Ausdehnung eine wichtige Rolle spielen. Die Festlegung des Einleitungszeitpunktes, der Dauer der Maßnahme(n) und der regionalen Ausdehnung kommt daher ein wichtiger Stellenwert zu. Dementsprechend wird in der vorliegenden Untersuchung im Rahmen der emissionsseitigen und der immissionsseitigen Wirkungsanalysen auch untersucht, inwieweit Veränderungen dieser zeitlichen und räumlichen Rahmenbedingungen die Wirkungsintensität beeinflussen.

#### 3.3.1 Verkehrsbezogene Maßnahmen

(1) Es wurden folgende temporäre Maßnahmen im Bereich des Straßenverkehrs untersucht :

1. **Tempolimits:** Verschiedene Varianten der Geschwindigkeitsbeschränkungen, differenziert nach dem maximal zulässigen Tempo, betroffenen Straßentypen, betroffenen Kfz-Kategorien und unterschiedlichen Befolgungsraten)
2. **Fahrzeugspezifische Fahrverbote:**  
Für bestimmte Fahrzeugtypen (ohne Abgasreinigungs-konzept)
3. **Örtliche Fahrverbote:** Sperrung von bestimmten Netzabschnitten (Ballungsräume, Innenstädte) für den Kfz-Individualverkehr.

(2) Da i.d.R. pro Maßnahmentyp eine Vielzahl möglicher Ausgestaltungen gegeben ist (insb. beim Tempolimit), wurden vorab eine begrenzte Anzahl von zu untersuchenden Varianten festgelegt. Die Auswahl konzentrierte sich dabei insbesondere auf die Varianten, die in der aktuellen Diskussion zum Thema Sommersmog (im Frühjahr 1995) benannt wurden. Die untersuchten Varianten sind in den folgenden Tabellen 3.4 und 3.5 kurz beschrieben.

**Tab. 3.4:** Die untersuchten Tempolimitvarianten

Variantenbezeichnung	Ausgestaltung der Variante
T-1	Tempolimit 120 km/h auf Bundesautobahnen (BAB) für Pkw; Tempolimit 90 km/h auf den sonstigen außerörtlichen Straßen (AO) für Pkw
T-2	Tempolimit 90 km/h auf Bundesautobahnen für Pkw; Tempolimit 80 km/h auf den sonstigen außerörtlichen Straßen für Pkw
T-3	Tempolimit 80 km/h auf Bundesautobahnen für Pkw; Tempolimit 60 km/h auf den sonstigen außerörtlichen Straßen für Pkw und Lkw
T-4	Tempolimit 80 km/h für Pkw und 60 km/h für Lkw auf Bundesautobahnen; Tempolimit 60 km/h auf den sonstigen außerörtlichen Straßen für Pkw und Lkw
T-5	Tempolimit 60 km/h für Pkw und Lkw auf Bundesautobahnen; Tempolimit 60 km/h auf den sonstigen außerörtlichen Straßen für Pkw und Lkw

prognos'95

(3) Die teilweise sehr vielschichtigen Wirkungszusammenhänge von Maßnahmen im Verkehrsbereich bedingen, daß für emissionsseitige Wirkungsanalysen auch entsprechend komplexe Verkehrs-Emissionsmodelle einzusetzen sind. Ein solches - bei Prognos entwickeltes und in verschiedenen Anwendungen validiertes - Straßenverkehrs-Emissionsmodell (STEP-Modell) steht aus vorangegangenen Untersuchungen zur Verfügung. Die Grundstruktur dieses Modells (Segmentierung und Ablauf) ist in Abb. 3-7 dargestellt.

(2) In dem STEP-Modell werden eine Vielzahl von verschiedenen Kenngrößen des Straßenverkehrs zusammengeführt. Unter anderem werden folgende Kenngrößen (Input-daten) bei der Berechnung der Emissionsmengen im Modell verarbeitet:

- Zusammensetzung der Fahrzeugbestände (nach 13 Fahrzeugtypen differenziert),
- Fahrzeugalter nach Fahrzeugtypen,
- Fahrzeugbestände nach Abgasreinigungskonzepten,
- Fahrleistungen nach Fahrzeug- und Straßentypen
- Verkehrsleistung nach Nutzungsarten
- Geschwindigkeitsverteilung nach Straßen- und Fahrzeugtypen
- Emissionsfaktoren und Kraftstoffverbrauchsfaktoren nach Geschwindigkeiten, Straßentypen und Abgasreinigungskonzepten.

**Tab. 3.5:** Die untersuchten Fahrverbotsvarianten

Variantenbezeichnung	Ausgestaltung der Variante
F-1	Fahrverbot für Pkw (Ottomotor) ohne 3-Wege-Kat und nichtschadstoffarme Diesel-Pkw auf Innerortsstraßen in ausgewählten Ballungsräumen Deutschlands (mehr als 250.000 Einwohnern und einer Bevölkerungsdichte von mehr als 1000 EW/km <sup>2</sup> (Ballungsraumkonzept))
F-2	wie F-1; zusätzlich mit Fahrverbot für Lkw vor EURO I
F-3	Bundesweites Fahrverbot für Pkw (Ottomotor) ohne 3-Wege-Kat und nicht-schadstoffarme Diesel-Pkw auf allen Straßenkategorien; Ausnahmen für den Transit
F-4	Bundesweites Fahrverbot für Pkw (Ottomotor) ohne 3-Wege-Kat und nicht-schadstoffarme Diesel-Pkw sowie für Lkw vor EURO I auf allen Straßenkategorien; Ausnahmen für den Transit

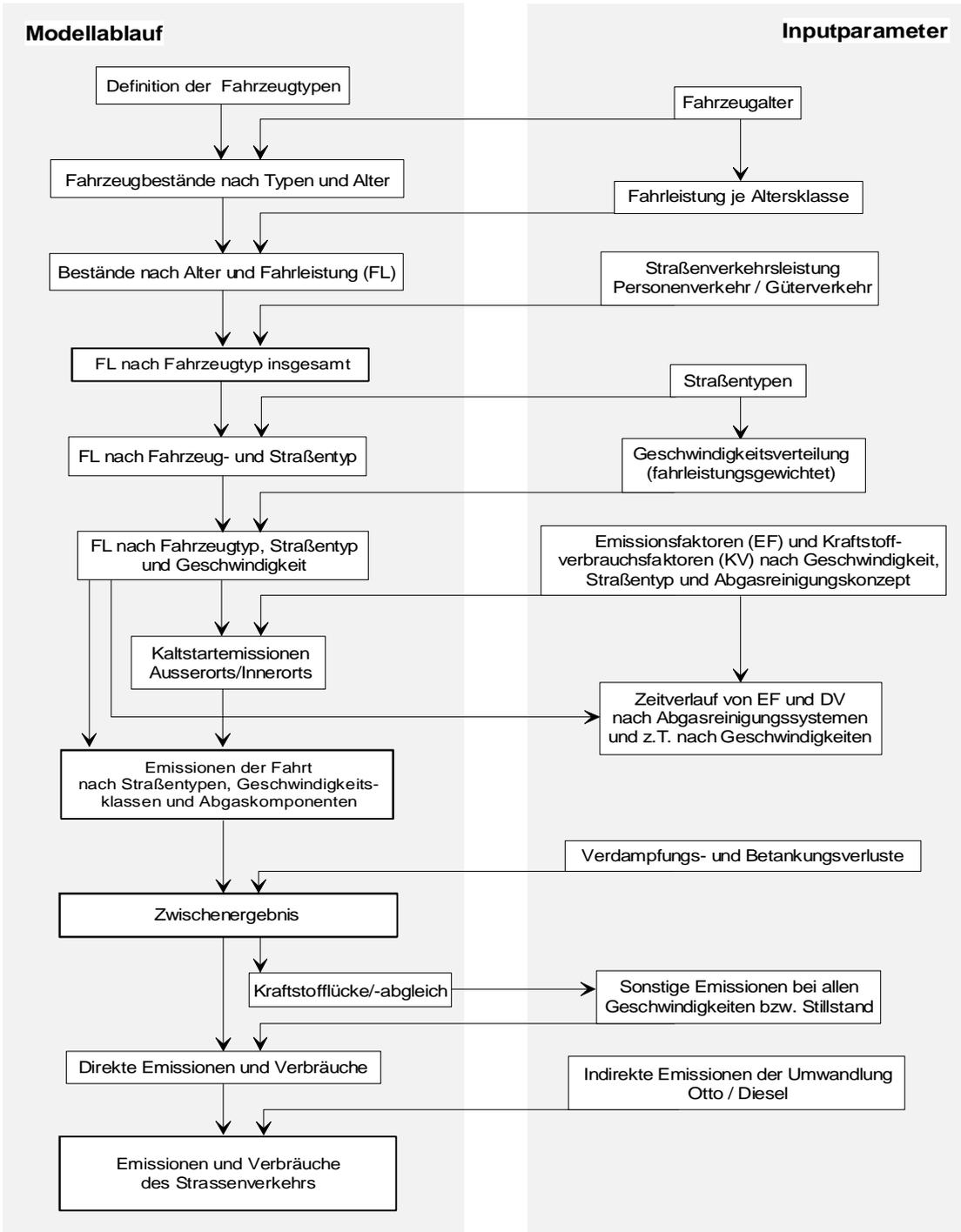
prognos'95

(3) Durch die gezielte Variation der genannten Faktoren lassen sich die Wirkungen von verkehrsbezogenen Maßnahmen simulieren und die emissionsseitigen Reduktionseffekte somit berechnen.

Da die kontinuierliche zunehmende Durchdringung des Kfz-Bestandes mit 3-Wege-Kat das jeweils gegebene Minderungspotential von Jahr zu Jahr verändert, wurden die Simulationsrechnungen auf einen möglichst aktuellen Bezugszeitraum, das Jahr 1994, ausgerichtet. Dazu wurden im Rahmen von Vorarbeiten gesonderte eigene Abschätzungen von verkehrsstrukturellen Basisdaten für das Jahr 1994 vorgenommen.

Abb. 3-7:

**Strassenverkehrs-Emissionsmodell der Prognos  
– Ablauf und Inputparameter –**



(4) Die Ergebnisse der modellgestützten Abschätzungen der Wirkungen von temporären, straßenverkehrsbezogenen Maßnahmen auf die  $\text{NO}_x$ - und VOC-Emissionen des Emittentensektors Straßenverkehr sind nachstehend in den beiden Abb. 3-10 und 3-11 zusammenfassend dargestellt. Diese Ergebnisse werden wie folgt interpretiert:

### 1. Interpretation der Ergebnisse für Geschwindigkeitsbeschränkungen (Tempolimits)

Die angegebenen Minderungsraten beziehen sich auf die Emissionen des Straßenverkehrs. Ein Bezug auf die gesamten anthropogenen Emissionen gelangt folglich zu entsprechend niedrigeren Reduktionsraten. Ein Bezug auf die Gesamtheit aller ozonrelevanten anthropogenen und biogenen Emissionen ergibt bei den VOCs nochmals niedrigere Reduktionsraten, wobei dann auch das tageszeitliche Emissionsprofil (insb. der biogenen Emissionen) zu berücksichtigen ist.

Wie sich bei den Berechnungen für die Tempolimits gezeigt hat, reduzieren Tempolimits vor allem die  **$\text{NO}_x$ -Emissionen** des Straßenverkehrs. Zur Herabsetzung der abgasgebundenen **VOC-Emissionen** eignen sich Tempolimits jedoch nicht. Die sich ergebende VOC-Emissionsreduktion (z.B. bei der Tempolimitvariante 5 von -2 %) kann im Rahmen der modellgestützten Berechnungen nicht als signifikante Veränderung bezeichnet werden. Die nur geringfügige Variation der VOC-Emissionsraten im Geschwindigkeitsbereich von über 60 km/h ist durch die **geringe Abhängigkeit der VOC-Emissionsrate (g/km) von der gefahrenen Geschwindigkeit** im Geschwindigkeitsbereich von über 60 km/h bei dem betrachteten Fahrzeugkollektiv zu erklären.

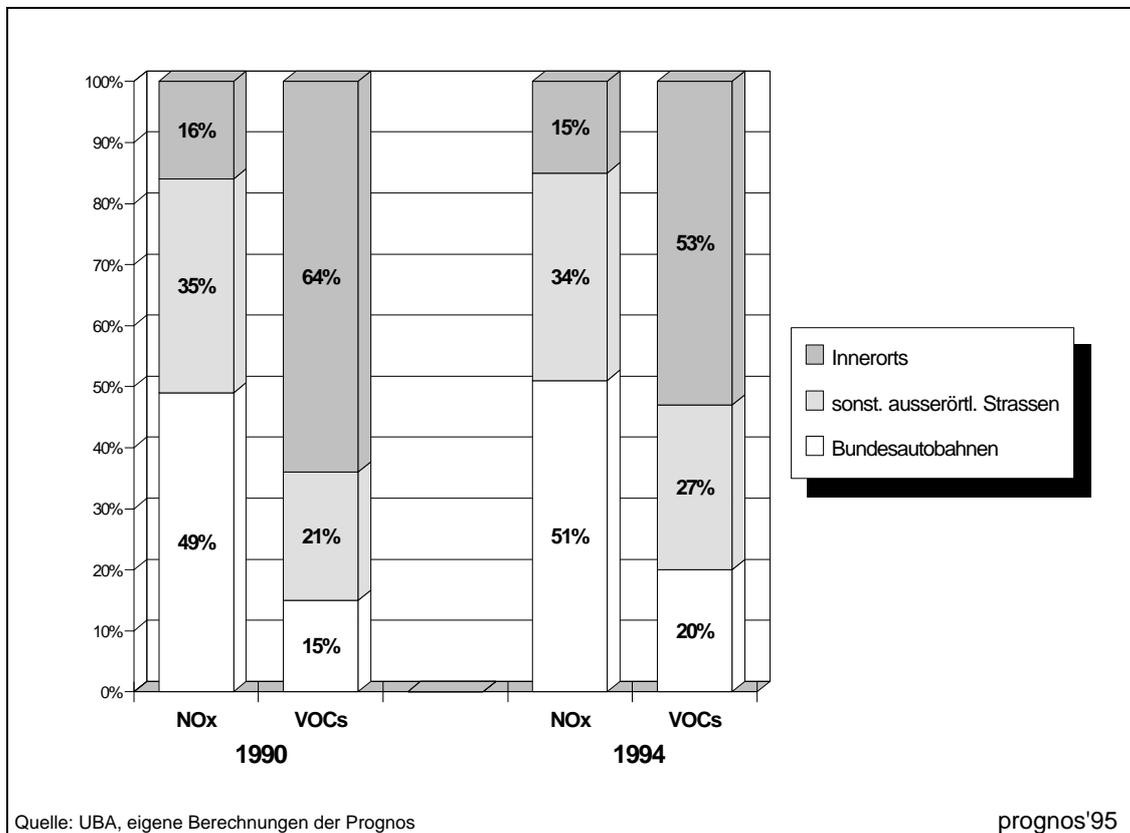
Ein weiterer Grund, warum sich durch Tempolimits auf Autobahnen und außerörtlichen Straßen **insgesamt** gesehen keine merklichen Minderungen der VOC-Gesamtemissionen ergeben, liegt darin, daß die VOC-Emissionen des Straßenverkehrs zu einem sehr hohen Anteil durch **Verdunstung des Kraftstoffs** und während der **Kaltstarts** der Fahrzeuge sowie bei langsamen Fahrgeschwindigkeiten, somit vor allem in den Siedlungsbereichen, freigesetzt werden. Diese Emissionen entziehen sich der Beeinflussung durch Tempolimits auf Bundesautobahnen und sonstigen außerörtlichen Straßen.

Hohe Reduktionspotentiale bei den VOCs sind primär durch Verminderung der Anzahl der Fahrten bzw. durch eine Reduktion der Fahrleistung zu erreichen (d.h. durch Varianten der Fahrverbote). Zur Verdeutlichung des Sachverhalts sind in Abb. 3-8 die Anteile der verschiedenen Straßenkategorien an den verschiedenen ozonrelevanten Emissionen des gesamten Straßenverkehrs bezogen auf 1990 und 1994 dargestellt.

Es ist festzustellen, daß in den beiden Jahren jeweils **deutlich mehr als 50 % der VOC-Emissionen des Straßenverkehrs auf innerörtlichen bzw. im innerörtlichen Bereich Straßen emittiert wurden.**

Die VOC-Emissionen des Straßenverkehrs aus **Verdunstungen** (ca. 25-30% der gesamten VOC-Emissionen des Straßenverkehrs) lassen sich im übrigen generell mit Tempolimits nicht reduzieren.

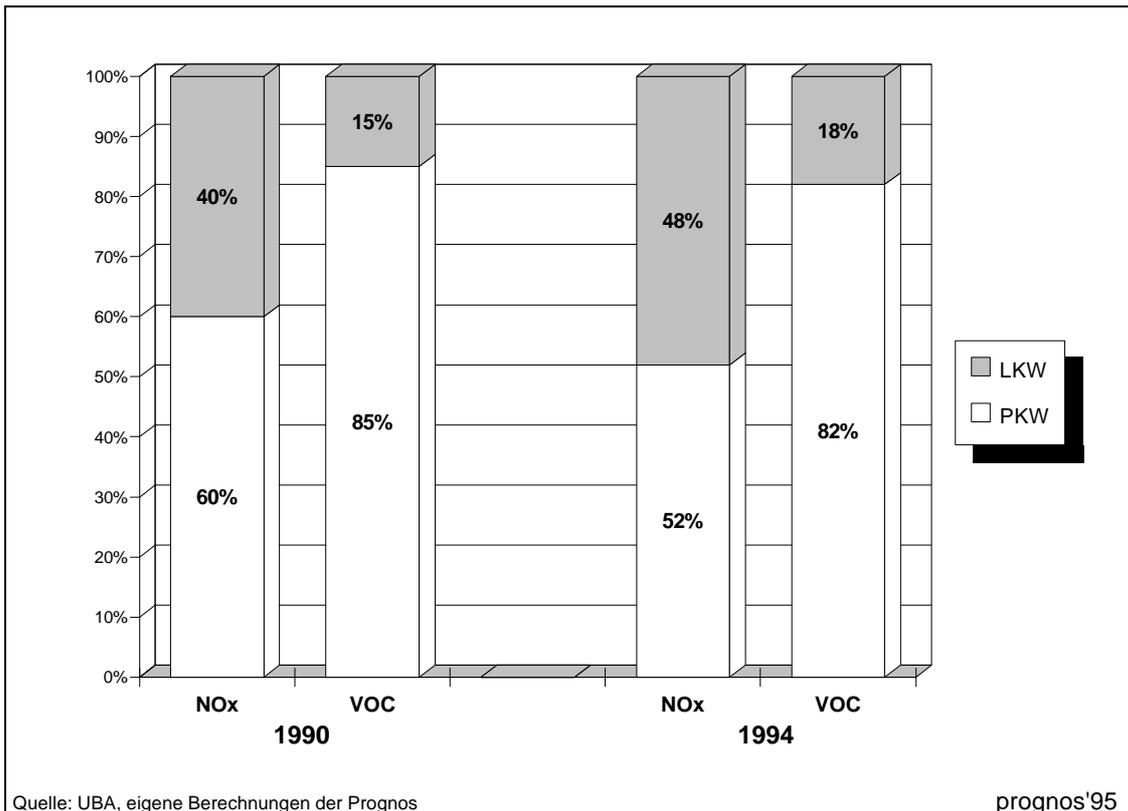
**Abb. 3-8:** Verteilung der ozonrelevanten Emissionen des Straßenverkehrs auf die Straßenkategorien in Deutschland 1990 und 1994



Eine weitere Schlussfolgerung, die aus dem Vergleich der Tempolimit-Varianten abgeleitet werden kann, ist die Aussage, daß durch die **Einbeziehung des schweren Nutzfahrzeugverkehrs** bei den Tempolimits (Höchstgeschwindigkeit gleich oder kleiner 80 km/h) relativ hohe NO<sub>x</sub>-Reduktionsraten zu erzielen sind. Dies ist durch den Umstand zu erklären, daß beladene schwere Lkw über 80 km/h quasi mit Vollast fahren und hierbei relativ hohe Mengen NO<sub>x</sub> emittieren. Bei Tempolimits im Bereich von 80 km/h oder deutlich darunter

ter verlassen diese Fahrzeuge den Vollastbereich und setzen somit deutlich weniger dieses Schadstoffs frei.

**Abb. 3-9:** Anteile der Fahrzeugkategorien an den ozonrelevanten Emissionen des Straßenverkehrs 1990 und 1994



Die Abschöpfung dieses NO<sub>x</sub>-Reduktionspotentials bei den Nutzfahrzeugen durch Tempolimits wirkt sich merklich auf die NO<sub>x</sub>-Gesamtemissionen des Straßenverkehrs aus, da der Nutzfahrzeugsektor insgesamt einen bedeutenden Anteil an diesen Emissionen (48% im Jahr 1994), insbesondere auf Fernstraßen, freisetzt (siehe Abb. 3-9).

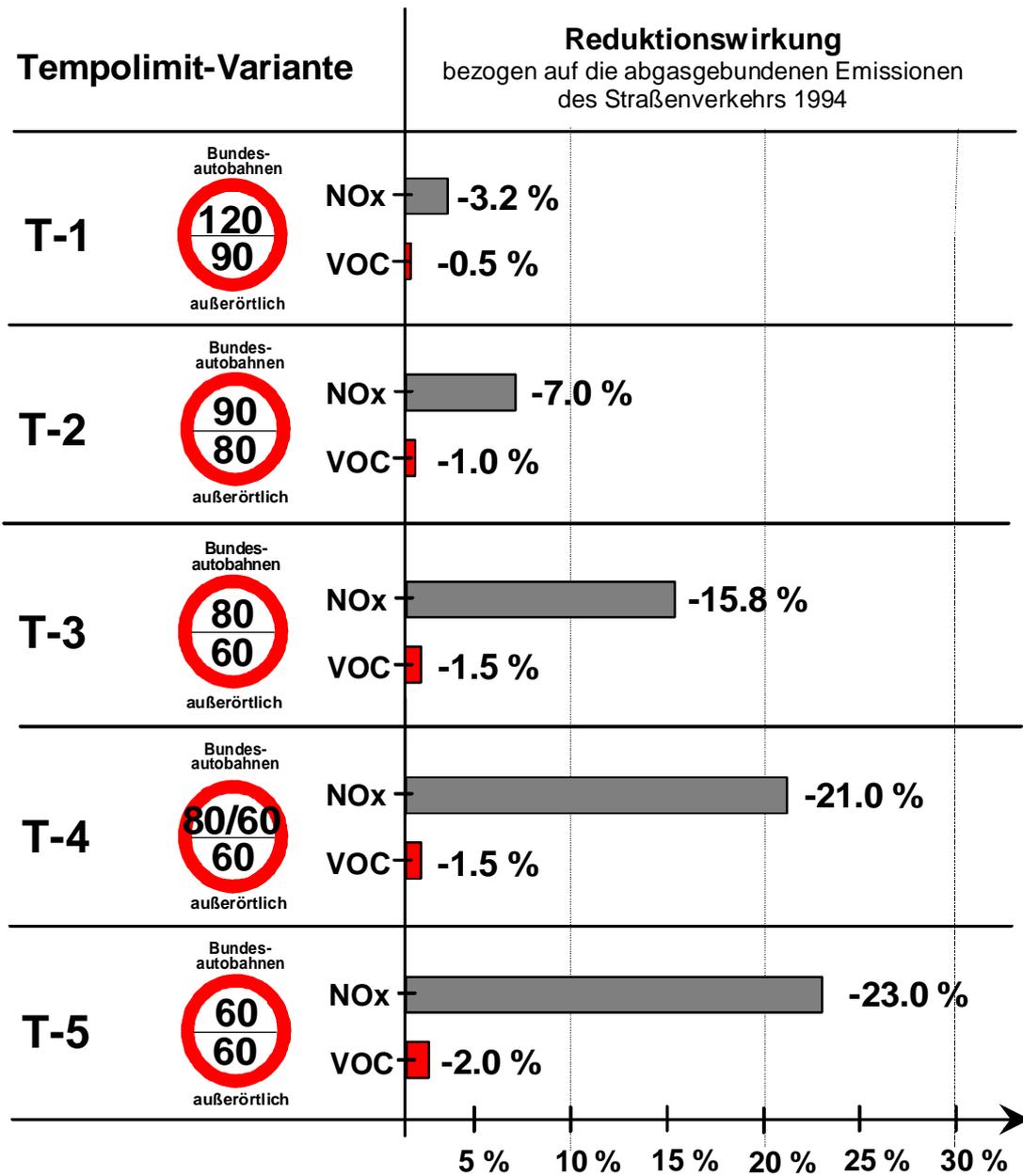
(20) Abschließend zu den Reduktionswirkungen von temporären Tempolimits ist festzuhalten:

- Um Tempolimits auf Bundesautobahnen und sonstigen außerörtlichen Straßen möglichst effektiv (im Hinblick auf die NO<sub>x</sub>-Minderungsrate) auszugestalten, sind "scharfe" Geschwindigkeitsbeschränkungen anzustreben. Die Einbeziehung der Lkws kann einen beachtlichen Beitrag zum NO<sub>x</sub>-Emissionsreduktionspotential der Tempolimits leisten.

- Es ist allerdings zu bedenken, daß die zu erreichenden Reduktionsraten bei Tempolimits relativ beschränkt sind. Selbst bei scharfen Tempolimit-Varianten können lediglich maximal rund ein Viertel der NO<sub>x</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs vermieden werden, und die VOC-Emissionen werden kaum tangiert.

In Abb. 3-10 sind die Reduktionsraten der 5 Tempolimit-Varianten noch einmal im Überblick für das **Bezugsjahr 1994** zusammengefasst.

Ab. 3-10: Reduktionswirkungen von Tempolimits auf die abgasgebundenen Emissionen des Straßenverkehrs bei hoher Befolgungsquote (80%) im Bezugsjahr 1994



## 2. Interpretation der Ergebnisse für Fahrverbote

Die vorstehenden Anmerkungen zur Bezugsbasis der dargestellten Reduktionsraten gelten analog (unterschiedliche Minderungsraten je nach Bezug auf Straßenverkehrsemissionen, auf alle anthropogene Emissionen, auf alle ozonrelevanten anthropogenen und biogenen Emissionen).

Die Abschätzung der Emissionsreduktionseffekte zeigt deutlich, daß temporäre Fahrverbote für nicht-schadstoffarme Kfz hohe Minderungspotentiale im jeweiligen Bezugsgebiet der Maßnahme besitzen. Durch den Vergleich der einzelnen Varianten können folgende Aussagen abgeleitet werden:

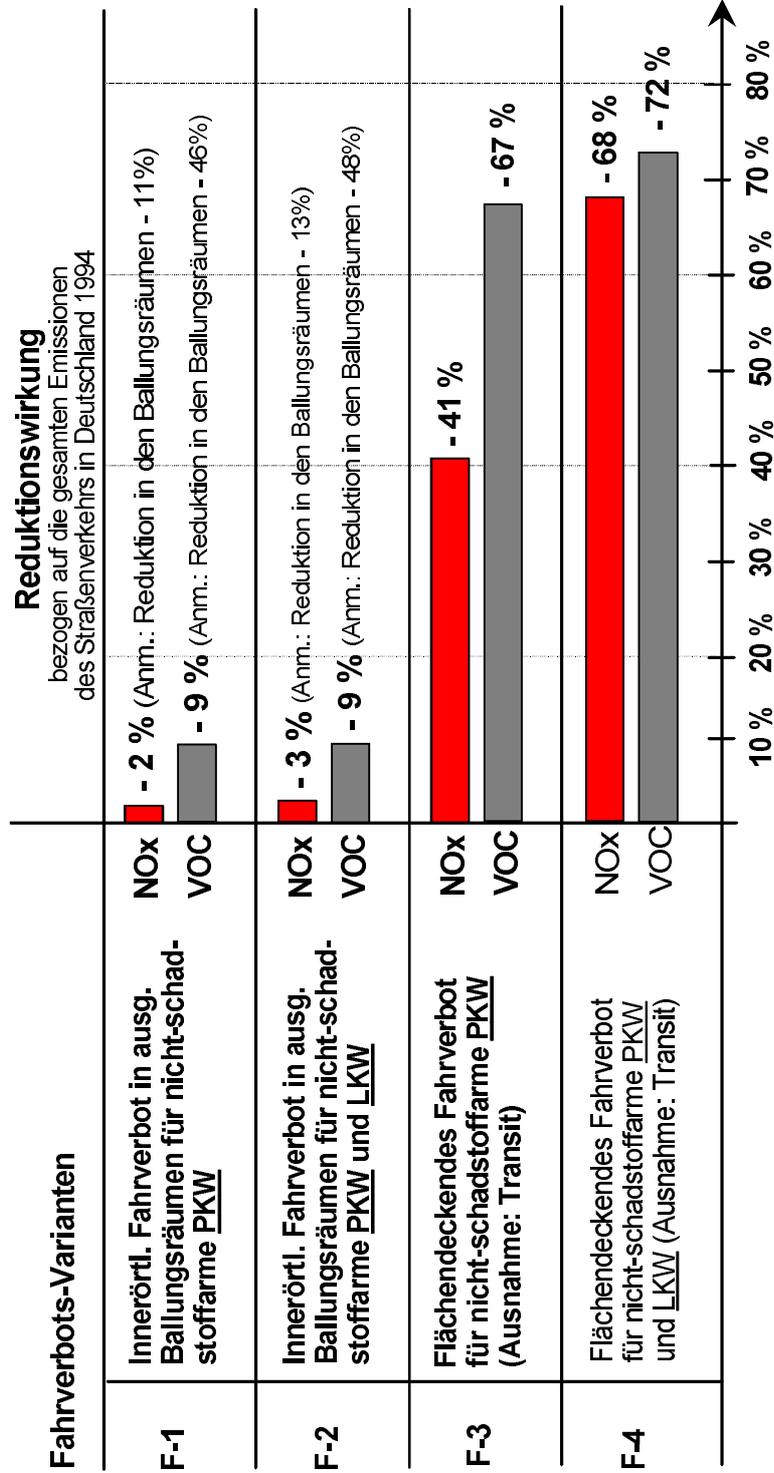
- Mittels **ballungsraumbezogenen** fahrzeugspezifischen Fahrverboten für innerörtliche Bereiche sind vor allem **hohe lokale VOC-Emissionsreduktionen** zu erzielen. Da die Lkw innerorts nur einen sehr geringen Beitrag zu den ozonrelevanten Emissionen leisten, fällt die Einbeziehung des nicht-schadstoffarmen Anteils dieser Fahrzeuggruppe in das ballungsraumbezogene innerörtliche Fahrverbot kaum ins Gewicht.
- Die **ballungsraumbezogenen** Fahrverbots-Varianten bringen zwar lokal hohe Reduktionen, **bundesweit** gesehen ist hingegen der emissionsseitige **Effekt weitaus geringer**. Da die Bildung bodennahen Ozons kein rein lokales Problem ist, sondern auch eine regionale und überregionale Dimension aufweist, ist der emissionsseitige Effekt der Fahrverbote in Ballungsräumen eher anhand der grossräumigen Wirkungstiefe zu bewerten.
- **Flächendeckende** Fahrverbote für nicht-schadstoffarme Pkw können, eine hohe Befolgungsquote und wenige Ausnahmeregelungen vorausgesetzt, **erhebliche Emissionsminderungen im Sektor Verkehr** sowohl bei den **Stickoxiden als auch den VOCs** erzielen. Durch eine Einbeziehung nicht-schadstoffarmer Lkw wären zwar weitere Minderungen insbesondere bei den Stickoxiden möglich, die Verhältnismäßigkeit einer derartigen Ausgestaltung ist allerdings für den Fall konsequenter Umsetzung ohne großzügige Ausnahmen äußerst fraglich.

In Abb. 3-11 sind die Minderungsquoten der vier Fahrverbots-Varianten, bezogen auf den Straßenverkehr in Deutschland 1994, zusammenfassend dargelegt.

Abb. 3-11:



  
**Reduktionswirkungen von Fahrverboten auf die Emissionen des Straßenverkehrs 1994**



prognos<sup>95</sup>

Anm.: Auch Reduktionseffekte im Bereich "Verteilung von Mineralerzeug.

### 3.3.2 Wirkungen von temporären verkehrsbezogenen Maßnahmen auf die Emissionen bei der Kraftstoffverteilung

(1) Die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebene Wirkungsanalyse bezog sich jeweils nur auf den Emittentensektor Straßenverkehr. Bei den beschriebenen Maßnahmengruppen "Tempolimits" und "Fahrverboten" treten allerdings auch Wirkungen bei einer anderen Emittentengruppe auf:

- Die in die Betrachtung einbezogenen verkehrlichen Maßnahmen reduzieren den Kraftstoffverbrauch des Straßenverkehrs. Ein niedrigerer Verbrauch führt zu weniger Kraftstoffabsatz an den Tankstellen. Hieraus resultieren **VOC-Emissionsreduktionen** bei der Emittentengruppe "Verteilung von Mineralölerzeugnissen" (an Tankstellen).

(2) Anhand der vom STEP-Modell berechneten maßnahmenspezifischen Kraftstoffverbrauchsreduktionen wurden auch Abschätzungen über die Effekte bei den Tankstellenemissionen (VOCs) vorgenommen. Die Ergebnisse der Abschätzungen sind in Tab. 3.6 dokumentiert.

Tab. 3.6: Reduktionswirkungen von temporären verkehrsbezogenen Maßnahmen auf die Emissionen aus Tankstellen im Jahr 1994

Verkehrsbezogene Temporärmaßnahmen	Emissionsreduktion bezogen auf die Emissionen von Tankstellen im Jahr 1994
<b>Tempolimit-Varianten</b>	
- Variante 1 (120 BAB; 90 AO)	- 3%
- Variante 2 (90 BAB; 80 AO)	- 7%
- Variante 3 (80 BAB; 60 AO)	- 7%
- Variante 4 (80 Pkw + 60 Lkw BAB; 60 AO)	- 7%
- Variante 5 (60 BAB; 60 AO)	- 7%
<b>Fahrverbot-Varianten</b>	
- Variante 1 (Pkw; Ballungsräume)	- 12 % (Reduktion nur im Ballungsraum)
- Variante 1 (Pkw + Lkw; Ballungsräume)	- 12 % (Reduktion nur im Ballungsraum)
- Variante 1 (Pkw; flächendeckend)	- 20 %
- Variante 1 (Pkw + Lkw; flächendeckend)	- 20 %

prognos'95

### 3.3.3 Temporärmaßnahmen im Bereich von stationären Quellen

(1) Für den Bereich der stationären Quellen ergeben die durchgeführten Untersuchungen, daß die Wirksamkeit im Vergleich zu Maßnahmen im Verkehr generell eingeschränkt ist, und zwar aus folgenden Gründen:

- Als Temporärmaßnahmen kommen bei den stationären Anlagen vor allem nur Produktionseinschränkungen und gegebenenfalls organisatorische Umstellungen<sup>6</sup> in Frage. Da die **Flexibilität für Produktionsverlagerungen meist gering** ist<sup>7</sup>, sind solche Maßnahmen in vielen Fällen mit hohen Kosten verbunden.
- Für temporäre Produktionseinschränkungen gibt es z.Zt. **keine rechtliche Handhabe**<sup>8</sup>, d.h. es kommen nur Maßnahmen auf freiwilliger Basis in Frage, deren Wirksamkeit im Vergleich zu "Zwangsmaßnahmen" vor allem auch aufgrund der hohen Kosten naturgemäß gering ist. Angesichts der Tatsache, daß der Verkehr aufgrund seiner höheren Emissionsbeiträge im Zentrum des öffentlichen Interesses steht<sup>9</sup>, erscheint die Durchsetzung entsprechender gesetzlicher Regelungen oder Maßnahmen derzeit eher unwahrscheinlich.
- Sowohl im Bereich Lösemittelverwendung als auch bei den Feuerungen sind die größeren Anlagen schon weitgehend durch die eingeleiteten Maßnahmen (insbes. GFAVO, TA Luft) reglementiert. Die Relevanz der größeren Anlagen für den Gesamtausstoß an NO<sub>x</sub> und VOC nimmt somit ab (mit regionalen Unterschieden). Im Gegenzug gewinnt der **Anteil kleinerer Emittenten** (kleinere industrielle Anlagen, Gewerbebetriebe, Haushalte) an den Gesamtemissionen an Gewicht. Da die Einflußmöglichkeiten zur Durchführung von zeitlich begrenzten Maßnahmen bei diesen kleineren, weit gestreuten Emissionsquellen noch eingeschränkter sind als bei Großanlagen, reduziert sich damit realistischweise auch die Wirksamkeit von Temporärmaßnahmen insgesamt.

<sup>6</sup> Ein Beispiel für solche organisatorischen Maßnahmen stellen die Umstellungen, die in einer Lackerei während des Modellversuchs Heilbronn durchgeführt wurden, dar: Durch Umstellung der Produktionsplanung wurde erreicht, daß die Lackierung von Chargen mit besonders hohen VOC-Emissionen aus der Ozonepisode auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden konnte. Stattdessen wurden Chargen vorgezogen, bei denen Lacke mit geringeren Lösemittelgehalten verwendet werden.

<sup>7</sup> Dies gilt insbesondere für den Fall der flächendeckenden Temporärmaßnahmen (Szenario G3): So kann z.B. der Stromproduktionsausfall bei temporärer Abschaltung *eines* Kohlekraftwerkes durch den Einsatz anderer Kraftwerke ausgeglichen werden. Dies ist aber nicht mehr möglich, wenn aufgrund eines koordinierten Vorgehens in mehreren Regionen der BRD Kohlekraftwerke gleichzeitig abgeschaltet werden sollen. Bei Industriefeuerungen zur Prozeßwärme-/dampferzeugung und bei vielen Lösemittelanwendungen in größeren Anlagen (z.B. Lackierung, Metallentfettung, Druckereien) ist die Flexibilität für Produktionsverlagerungen generell geringer als bei Kraftwerken, da eine direkte Koppelung mit dem Produktionsablauf besteht, d.h. produktionseinschränkende Maßnahmen bei den VOC- und/oder NO<sub>x</sub>-emittierenden Anlagen sind nur möglich bei Einschränkung der Gesamtproduktion.

<sup>8</sup> Erforderlich wäre eine entsprechende Ergänzung der "Sommersmogverordnung".

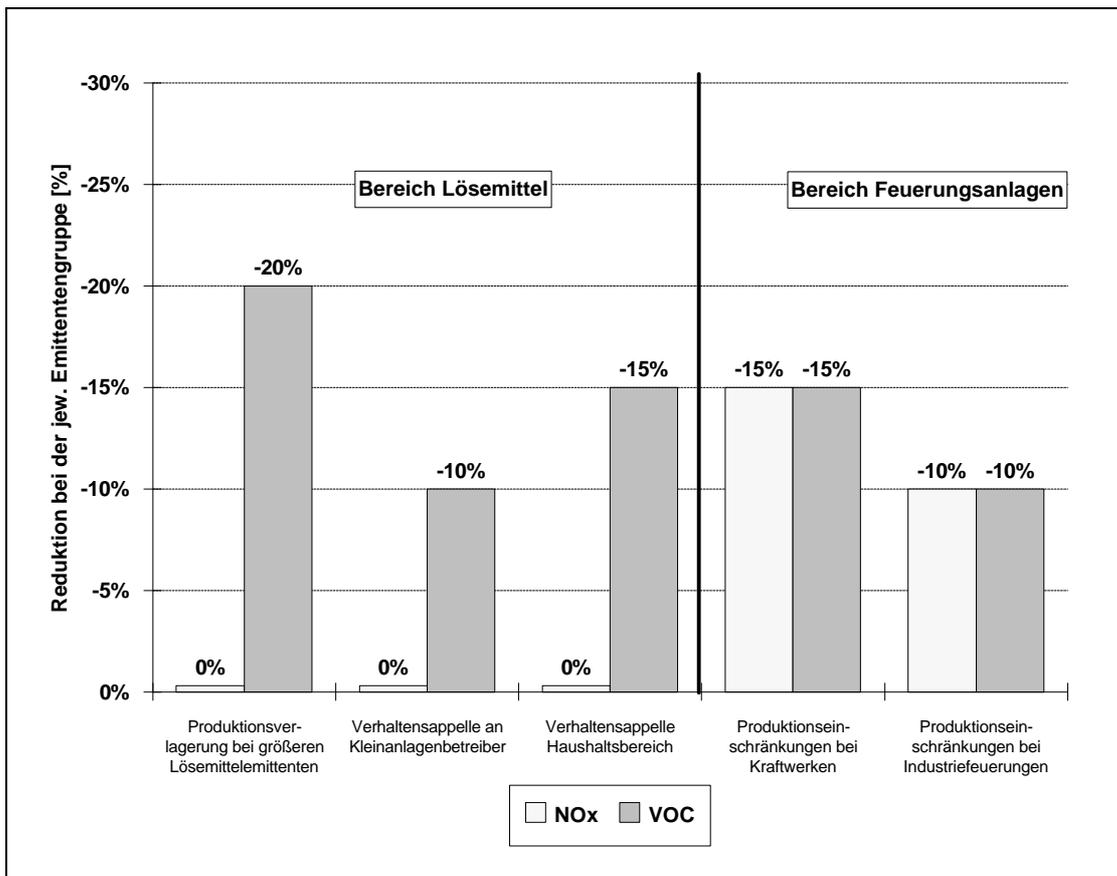
<sup>9</sup> Hier sind insbesondere die Initiativen aus den Bundesländern zur Durchführung von verkehrsbeschränkenden Maßnahmen in Ozonepisoden zu nennen.

Die möglichen Maßnahmen beschränken sich vorwiegend auf **Informationskampagnen und Appelle**, deren Wirksamkeit als eher gering eingeschätzt werden muß.

- Im **Bereich Lösemittel** ist der Anteil größerer Anlagen am gesamten VOC-Ausstoß im Gegensatz zu  $\text{NO}_x$  ohnehin relativ gering (größere regionale Unterschiede sind allerdings wahrscheinlich). Es dominieren **viele Kleinemittenten** (Gewerbe, Handwerk, Haushalte) mit den genannten geringen Einflußmöglichkeiten zur Durchsetzung von Emissionsminderungsmaßnahmen.

(2) Die Ergebnisse der Abschätzungen der erreichbaren Minderungsraten sind in der nachstehenden Grafik zusammenfassend dargestellt. Sie liegen im Bereich der Feuerungsanlagen bei den  $\text{NO}_x$ - und VOC-Emissionen zwischen -15% und -20%; im Bereich der Lösemitteln liegen die Minderungsraten der VOC-Emissionen je nach Quellgruppe zwischen -10% und -20%.

Abb. 3-12: Reduktionswirkungen von temporären Maßnahmen bei den Emissionen der stationären Quellen



### 3.3.4 Temporäre Emissionsminderungs-Szenarien

(1) Die Analysen der immissionsseitigen Wirkungen von temporären Minderungsmaßnahmen werden im Rahmen dieser Untersuchung mit Hilfe der photochemischen Ausbreitungsmodelle EURAD und REM3 durchgeführt (s. Kap. 4). Da die dazu erforderlichen Simulationsläufe aus Kostengründen nur eine begrenzte Anzahl von Rechenläufen mit verschiedenen Emissionsinputs gestatten, wurden die voranstehend diskutierten temporären Maßnahmen zu einer begrenzten Anzahl von Szenarien zusammengefaßt.

(2) Die Szenariobildung erfolgte zu Beginn des Jahres 1995 in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt sowie den Modellanwendern. Als Kriterien wurden neben den emissionsseitigen Wirkungen vor allem die in der aktuellen politischen Diskussion, im Vorfeld des Gesetzgebungsverfahrens zur neuen Ozon-Verordnung des Bundes, erörterten Maßnahmen zugrundegelegt. Dies führte u.a. dazu, daß die oben dargestellten "milden" Tempolimits wegen der nur sehr geringen emissionsmindernden Effekte nicht berücksichtigt wurden, und daß andererseits zwei Fahrverbotsvarianten mit unterschiedlichen räumlichen Bezügen in den Szenarien enthalten sind.

(3) Es wurden insgesamt sechs großräumige, episodenzugehörige temporäre Emissionsminderungs-Szenarien wie folgt definiert:

T1: Bundesweites Tempolimit auf Autobahnen (BAB) und auf sonstigen außerörtlichen Straßen (AO) mit den Spezifikationen:

BAB:	80km/h für Pkw und 60km/h für Lkw
AO:	60 km/h für Pkw und Lkw
Befolgungsrate:	80%

T2: Fahrverbote auf innerörtlichen Straßen in ausgewählten Ballungsräumen:  
Ballungsräume mit mehr als 250.000 Einwohner und mehr als 1.000 EW/qkm:  
Großräume Hamburg, Bremen, Berlin, Hannover, Rhein-Ruhr, Rhein-Main,  
Rhein-Neckar, Nürnberg, München, Leipzig, Dresden

T3: Bundesweites Tempolimit plus Fahrverbote (innerörtlich) in ausgewählten Ballungsräumen (Kombination von T1 und T2)

T4: Bundesweites Tempolimit plus Fahrverbote (innerörtlich) in ausgewählten Ballungsräumen plus freiwillige Reduktionen im Bereich der stationären Quellen / Lösemittel

T5: Bundesweites Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw mit den Spezifikationen:  
Verbote für Pkw ohne 3-Wege-Kat und für Lkw älter als 60 Monate auf allen Straßenkategorien

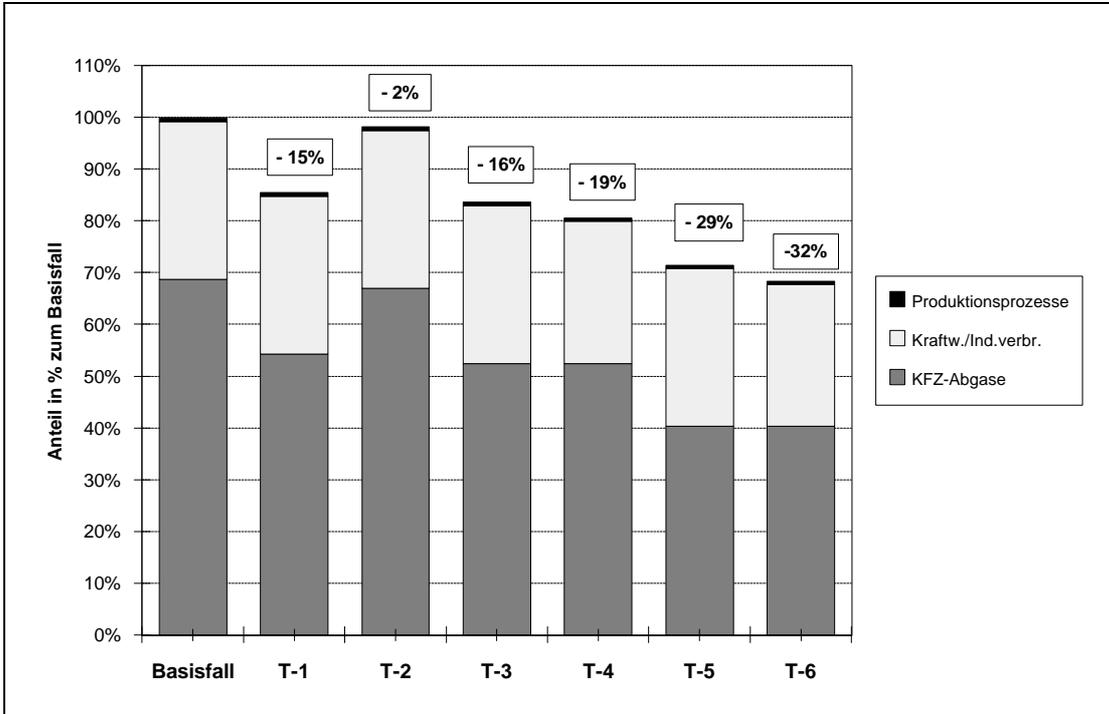
T6: Bundesweites Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw plus freiwillige Reduktionen im Bereich der stationären Quellen.

(4) Die emissionsseitigen NO<sub>x</sub>- und VOC-Minderungseffekte sind in der folgenden tabellarischen Übersicht (Tab. 3.7) für alle sechs Szenarien zusammenfassend dargestellt. Ausgewiesen sind dabei in der Tabelle sowohl die Minderungsraten bezogen auf die einzelnen, von den Maßnahmen tangierten Emittentenbereiche (sog. Verursacherguppen gemäß der Systematik, die im Modell REM3 verwendet wird) als auch nach den beiden Hauptgruppen "Verkehr" und "stationäre Quellen" sowie für die Gesamtheit der anthropogenen Quellen. Einen zusammenfassenden grafischen Überblick vermitteln die Abb. 3-13 und 3-14.

Die geringsten Minderungsraten, bezogen auf die Gesamtsummen, ergeben sich beim Szenario T2 mit rd. -2% bei den Stickoxiden und rd. -5% bei den (nicht-methanen) Kohlenwasserstoffen. Die höchsten Minderungsraten werden beim Szenario T6 mit -32% bei NO<sub>x</sub> und -39% bei VOC erreicht.

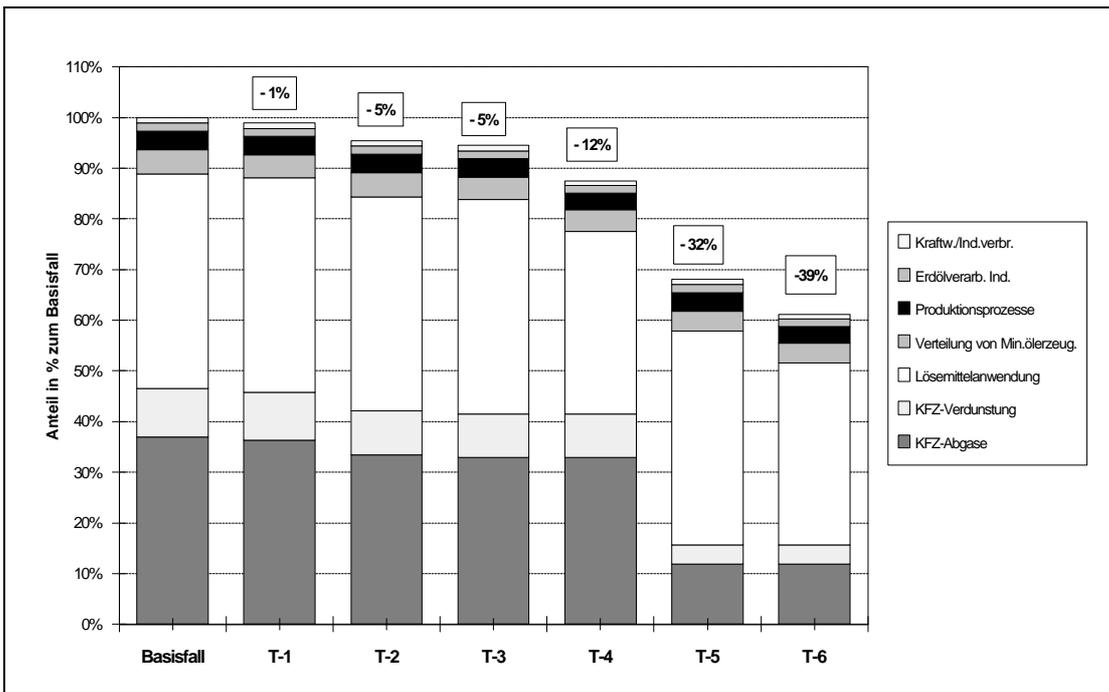
(5) In diesem Zusammenhang ist der oben bereits gegebene Hinweis zu wiederholen, daß die Emissionsdatenbasis auf der einheitlichen Basis des Programms CORINAIR-1990 und dessen Fortschreibung für 1994 durch Prognos im Rahmen dieses Vorhabens beruht. Die nationalen Emissionsdaten 1990 stammen dabei aus UBA-Angaben mit Stand von 1994/95. Die Ende 1995/Anfang 1996 vom UBA vorgelegten neuen nationalen Emissionsabschätzungen für den Bereich des Straßenverkehrs für den Zeitraum 1980-2010 konnten in der Stufe A dieses Vorhabens noch nicht berücksichtigt werden.

**Abb. 3-13:** NO<sub>x</sub>-Reduktionen bei den Temporärszenarien T-1 bis T-6 (bezogen auf die hochsommerliche Emissionssituation in Deutschland 1994)



prognos 1995

**Abb. 3-14:** VOC-Reduktionen bei den Temporärszenarien T-1 bis T-6 (bezogen auf die hochsommerliche Emissionssituation in Deutschland 1994)



prognos 1995

**Tab. 3.7: Anthropogene Ozon-Vorläuferemissionen NOx und VOC im Jahre 1994 und episodenbezogene Auswirkungen von temporären Emissionsminderungs-Szenarien**

<b>NOx-Emissionen</b>		NOx-1994 in 1.000 t	Struktur Jahr	Struktur Episode	Szen. I Tempo- limits (TL) T1	Szen. II F-Verbote (FV) Ballungsräume T2	Szen. III TL + FV i. Ball.-räumen. T3 (= T1 + T2)	Szen. IV TL+FV-Blr + frw. Redukt. T4	Szen. V Bundesw. FV n.sch.arme Pkw T5	Szen. VI Bundesw. FV + frw. Redukt. T6
Verursacherguppe		(Stand der Kenntnis 1994/95)								
1	Kfz-Benzin	754.4	27.6%	28.8%	-17.0%	-5.0%	-22.2%	-22.2%	-85.0%	-85.0%
2	Kfz-Diesel	1047.7	38.3%	40.0%	-24.0%	-0.8%	-24.8%	-24.8%	-10.0%	-10.0%
3	Kfz-Verdunstung	0.0	0.0%	0.0%						
1-3	Kfz-Gesamt	1802.1	65.9%	68.7%	-21.1%	-2.6%	-23.7%	-23.7%	-41.4%	-41.4%
4	Vert. foss. Brennst.	2.0	0.1%	0.1%				0.0%		0.0%
5	Lösemittelverbrauch	0.0	0.0%	0.0%						
6	Kraftw./Ind.verbr.	799.2	29.2%	30.5%				-10.0%		-10.0%
7	Haushalte/Kleinverbr.	113.0	4.1%							
8	Produktionsprozesse	18.4	0.7%	0.7%				-10.0%		-10.0%
9	Erdölverarb. Ind.	0.1	0.0%	0.0%				-10.0%		-10.0%
4-9	Stationäre Quellen	932.7	34.1%	31.3%				-8.8%		-8.8%
1-9	Summe Gesamtjahr	2734.8	100.0%							
Summe Episode		2621.8		100.0%	-14.5%	-1.8%	-16.3%	-19.4%	-28.5%	-31.6%

<b>VOC-Emissionen</b>		VOC-1994 in 1.000 t	Struktur Jahr	Struktur Episode	Szen. I Tempo- limits (TL) T1	Szen. II F-Verbote (FV) Ballungsräume T2	Szen. III TL + FV i. Ball.-räumen. T3 (= T1 + T2)	Szen. IV TL+FV-Blr + frw. Redukt. T4	Szen. V Bundesw. FV n.sch.arme Pkw T5	Szen. VI Bundesw. FV + frw. Redukt. T6
Verursacherguppe		(Stand der Kenntnis 1994/95)								
1	Kfz-Benzin	735.4	28.3%	29.4%	-2.0%	-11.0%	-13.0%	-13.0%	-85.0%	-85.0%
2	Kfz-Diesel	190.2	7.3%	7.6%	-1.0%	-3.8%	-2.8%	-2.8%	-10.0%	-10.0%
3	Kfz-Verdunstung	238.7	9.2%	9.5%		-10.0%	-10.0%	-10.0%	-60.0%	-60.0%
1-3	Kfz-Gesamt	1164.3	44.9%	46.5%	-1.4%	-9.6%	-10.7%	-10.7%	-67.6%	-67.6%
4	Vert. foss. Brennst.	120.8	4.7%	4.8%	-7.0%	-2.4%	-9.4%	-9.4%	-20.0%	-20.0%
5	Lösemittelverbrauch	1058.8	40.8%	42.3%				-15.0%		-15.0%
6	Kraftw./Ind.verbr.	26.0	1.0%	1.0%				-10.0%		-10.0%
7	Haushalte/Kleinverbr.	93.1	3.6%							
8	Produktionsprozesse	91.5	3.5%	3.7%				-10.0%		-10.0%
9	Erdölverarb. Ind.	40.5	1.6%	1.6%				-10.0%		-10.0%
4-9	Stationäre Quellen	1430.7	55.1%	53.5%	-0.6%	-0.2%	-0.8%	-13.0%	-1.7%	-13.9%
1-9	Summe Gesamtjahr	2595.0	100.0%							
Summe Episode		2501.9		100.0%	-1.0%	-4.6%	-5.4%	-12.4%	-32.4%	-39.4%

Anm.: Die Emissionsdatenbasis beruht auf UBA-Angaben für 1990 und Prognos-Fortschreibungen für 1994 mit Stand der Kenntnis 1994/95

Prognos'95

## 4. Immissionsseitige Wirkungen von großräumigen, dauerhaften und temporären Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozon-Konzentrationen in hochsommerlichen Ozonepisoden

### 4.1 Kurzbeschreibung der photochemischen Ausbreitungsmodelle "EURAD" und REM3"

#### a) REM3 (R. Stern / Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin)

(1) Das Modellsystem REM3 (Regional Eulerian Model with 3 chemistry schemes) ist ein großräumiges dreidimensionales EULERSches photochemisches Ausbreitungsmodell zur Simulation der Bildung, des Transports und der Entfernung von Oxidantien in der Planetarischen Grenzschicht. REM3 ist die Weiterentwicklung von RTM III, das im Rahmen des deutsch-niederländischen PHOXA-Programms mehrfach erfolgreich getestet und für Simulationsrechnungen eingesetzt wurde.

(2) Die Struktur des Modellsystems REM3 ist im einzelnen im Bericht des Auftragnehmers, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, beschrieben. Einen zusammenfassenden Überblick vermittelt die Abb. 4-1.1. Die folgenden Ausführungen zur Modellstruktur sind Auszüge aus dem ausführlichen Bericht des Modellierers.<sup>1</sup>

REM3 enthält - im Gegensatz zu anderen vergleichbaren Modellen - die Besonderheit des optionalen Betriebs mit drei verschiedenen chemischen Mechanismen (SAPRC, Harwell und CBM-IV). Eine weitere, für die vorliegende Untersuchung relevante Besonderheit, ist die für großräumige Modelle vergleichsweise sehr hohe räumliche Auflösung mit einer Gitterweite von 0,5° Länge und 0,25° Breite (entspricht im Bereich Deutschland ca. 30km\*30km).

Das Modell unterscheidet inputseitig nach 9 verschiedenen Emittentengruppen, denen dann im Bereich der Kohlenwasserstoffe jeweils spezifische VOC-Splits zugeordnet werden. Die zeitliche Umlegung der emissionsseitigen Inputdaten auf Stundenwerte sowie die Berechnungen der biogenen Emissionen erfolgen modellintern mit Hilfe entsprechender Funktionen. Das Modell arbeitet mit drei horizontalen (prognostischen) Schichten, wobei die untere Schicht vom Boden bis zu 50m Höhe reicht und die vertikale Ausdehnung der beiden oberen Schichten zeitlich und räumlich variabel ist.

---

<sup>1</sup> Stern R., Fath J., Reimer E.: Bewertung der Effektivität von Ozonminderungsstrategien mit Hilfe des photochemischen Ausbreitungsmodells REM3, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, im Auftrag der Prognos AG (Anlagenband Teilvorhaben A-3 / REM3 des F&E-Vorhabens 104 02 812), Berlin 1995

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde modellseitig der Gasphasenmechanismus Carbon Bond IV (CBM IV) verwendet (mit 83 Reaktionsgleichungen und 44 Spezies).

Alle meteorologischen Daten werden mit einem am Meteorologischen Institut der Freien Universität Berlin entwickelten Datenanalyse-System erzeugt, welches die Eingabedaten aus der routinemäßig gemeldeten synoptischen und aerologischen Daten mit Hilfe feinmaschiger numerischer Analysen auf isentropen Flächen ableitet. Die Modellierung der Grenzschicht basiert auf einem semi-empirischen Energiebilanzverfahren, bei dem die mikrophysikalischen Grenzschichtvariablen aus den bodennahen Energieflüssen berechnet werden. Die Bestimmung der Mischungsschichthöhe erfolgt unter Berücksichtigung beobachteter Inversionshöhen. Bei stabiler bis neutraler bodennaher Temperaturschichtung werden Mischungshöhe, Monin-Obukovh-Länge und Schubspannungsgeschwindigkeit nach einem von Nieustadt und Tennekes entwickelten Iterationsverfahren berechnet. In einer labilen Grenzschicht erfolgt die Bestimmung der Mischungshöhenschicht dynamisch unter Vorgabe der beobachteten Temperaturschichtung. Die Analysen werden in einem Koordinatensystem mit einer Gitterweite von 0,5°Länge und 0,25°Breite ausgeführt. Die zeitliche Auflösung beträgt drei Stunden.

Abb. 4-1.1: REM3 - Modellaufbau im Überblick

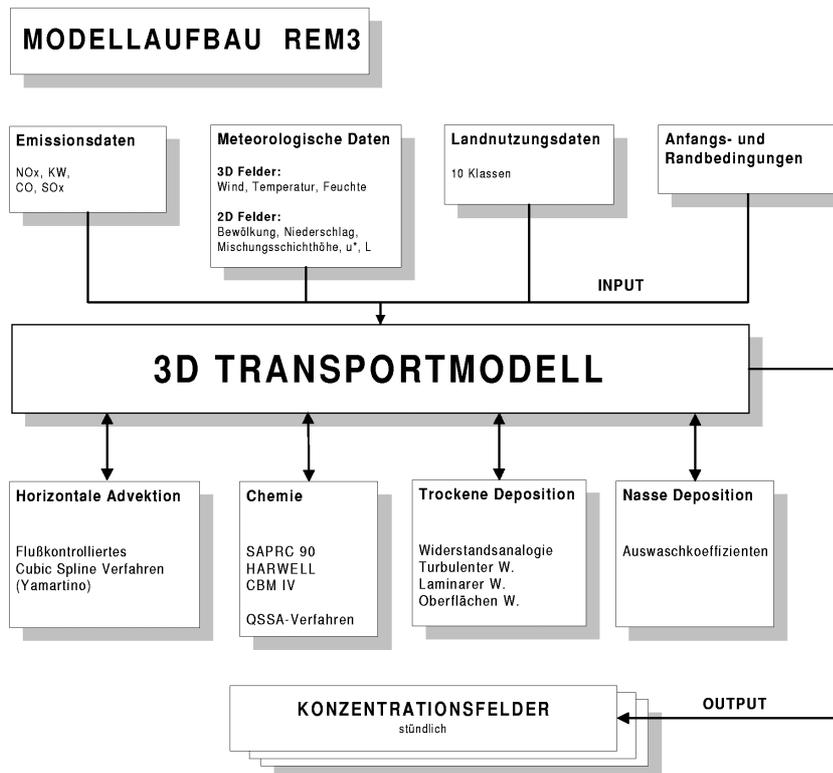
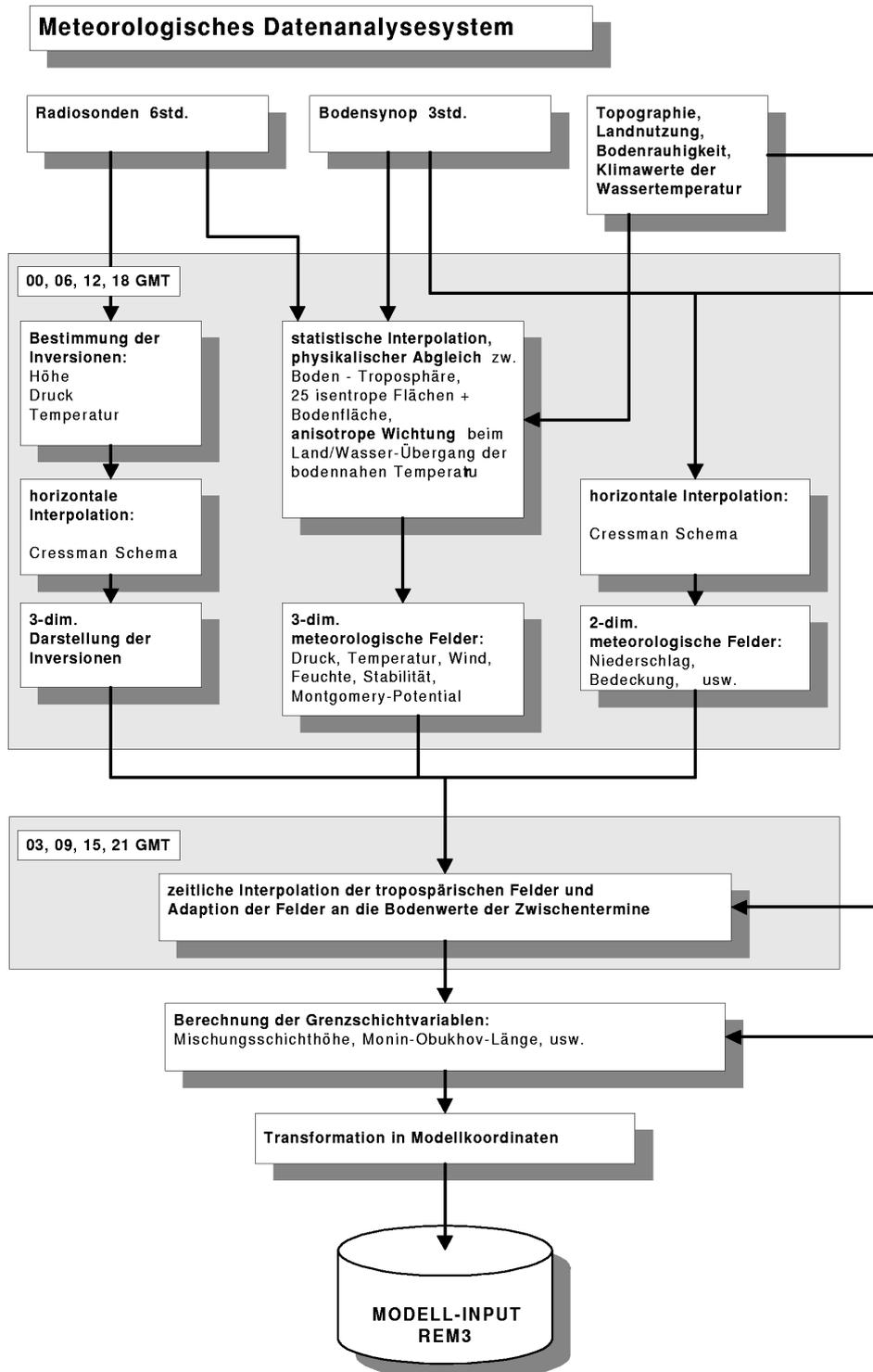


Abb. 4-1.2: Ablaufdiagramm des meteorologischen Datenanalysesystems bei REM3



**b) EURAD** (M. Memmesheimer, A. Ebel et al.; Rheinisches Institut für Umweltforschung an der Universität zu Köln)

(1) Das Modellsystem EURAD ist ebenfalls ein großräumiges dreidimensionales EULER-sches Atmosphärenmodell, mit dessen Hilfe die Simulation der Ausbreitung, chemischen Umsetzung und Deposition von Schadstoffen in der Atmosphäre durchgeführt werden kann. Es wurde im Rahmen des EUREKA-Umweltprojektes EUROTRAC entwickelt, ausgehend von dem US-Modell RADM.

(2) Die Struktur des Modellsystems EURAD ist im Bericht des Auftragnehmers, Förderverein des Rheinischen Instituts für Umweltforschung an der Universität zu Köln, ausführlich beschrieben.<sup>2</sup> Einen zusammenfassenden Überblick über den modularen Systemaufbau mit den drei Hauptmodulen Meteorologie, Emissionen und Chemie-Transport und über das Meteorologie-Modell MM5 vermitteln die Abb. 4-1.3 und 4-1.4. Die folgenden Ausführungen zur Modellstruktur sind Auszüge aus dem ausführlichen Bericht des Modellierers.

Das Modellsystem EURAD weist eine hohe anwendungsseitige Flexibilität auf. Es kann für Simulationen auf der regionalen Skala ebenso eingesetzt werden wie für Simulationen von Prozessen im lokalen Bereich mit nur wenigen Kilometern räumlicher Ausdehnung. Im Rahmen dieses Vorhabens beträgt die gewählte Gitterweite der räumlichen Auflösung des gesamten Untersuchungsgebietes 36km x 36km. Im Vergleich zu anderen Modellen zeichnet sich EURAD noch durch die Besonderheit eines integrierten Einbettungsverfahrens (sog. "nesting") aus. In der Vertikalen umfaßt der Modellbereich die gesamte Troposphäre vom Boden bis 100 hPa, also etwa 16km Höhe. Dieser Bereich arbeitet mit mehreren Schichten, wobei die untere Schicht vom Boden bis zu 50m Höhe reicht und die vertikale Ausdehnung der beiden oberen Schichten zeitlich und räumlich variabel ist.

Das verwendete Chemie-Transportmodell CTM2 berechnet zeitabhängige Spurengaskonzentrationen in der Atmosphäre, in dem es die Kontinuitätsgleichung für diese Gas numerisch löst. Der Gasphasenchemiemechanismus beschreibt die Transformation von 63 Spurenstoffen anhand von ca. 150 Reaktionen.

Im Meteorologiemodul, einem prognostischen mesoskaligen numerischen Modell, werden die meteorologischen Anfangs- und Randbedingungen von den globalen ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecast) Analyse Feldern auf die Standard Druckflächen für das Modellgebiet interpoliert, wobei zusätzlich Informationen aus Radiosondenaufstiegen

<sup>2</sup> Memmesheimer M. et al.: Großräumige Ozon-Modellrechnungen mit verschiedenen Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe des Modellsystems EURAD, Rheinisches Institut für Umweltforschung an der Universität zu Köln, im Auftrag der Prognos AG (Anlagenband Teilvorhaben A-3 / EURAD des F&E-Vorhabens 104 02 812), Köln 1995

genutzt werden. Die meteorologischen Anfangs- und Randfelder werden dann von einem Prozessor auf das spezielle  $\sigma$  System in der Vertikalen interpoliert, womit die benötigten Felder für das meteorologische Vorhersage Modell MM5 bereitgestellt sind.

Abb. 4-1.3: EURAD-Modellsystems im Überblick

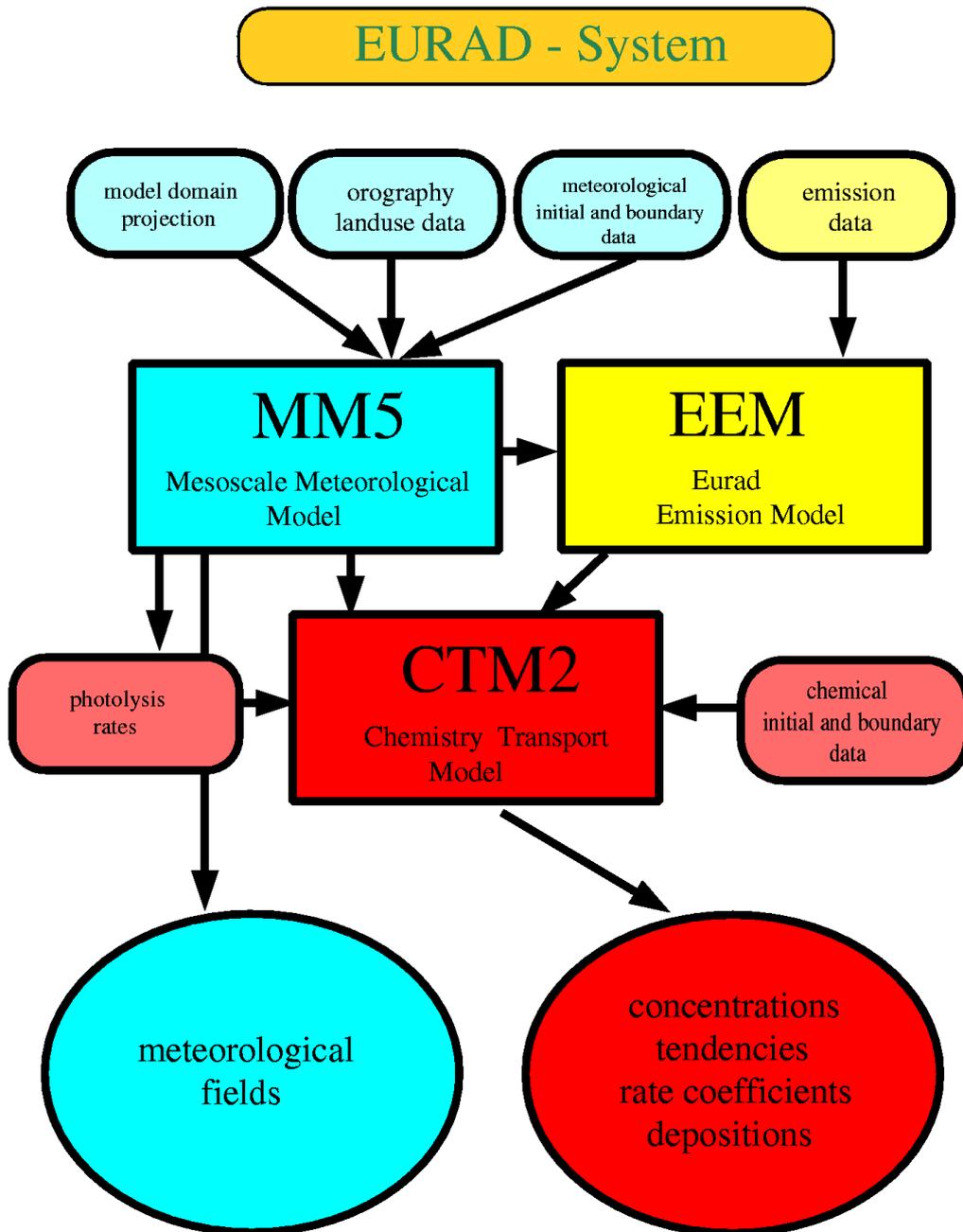
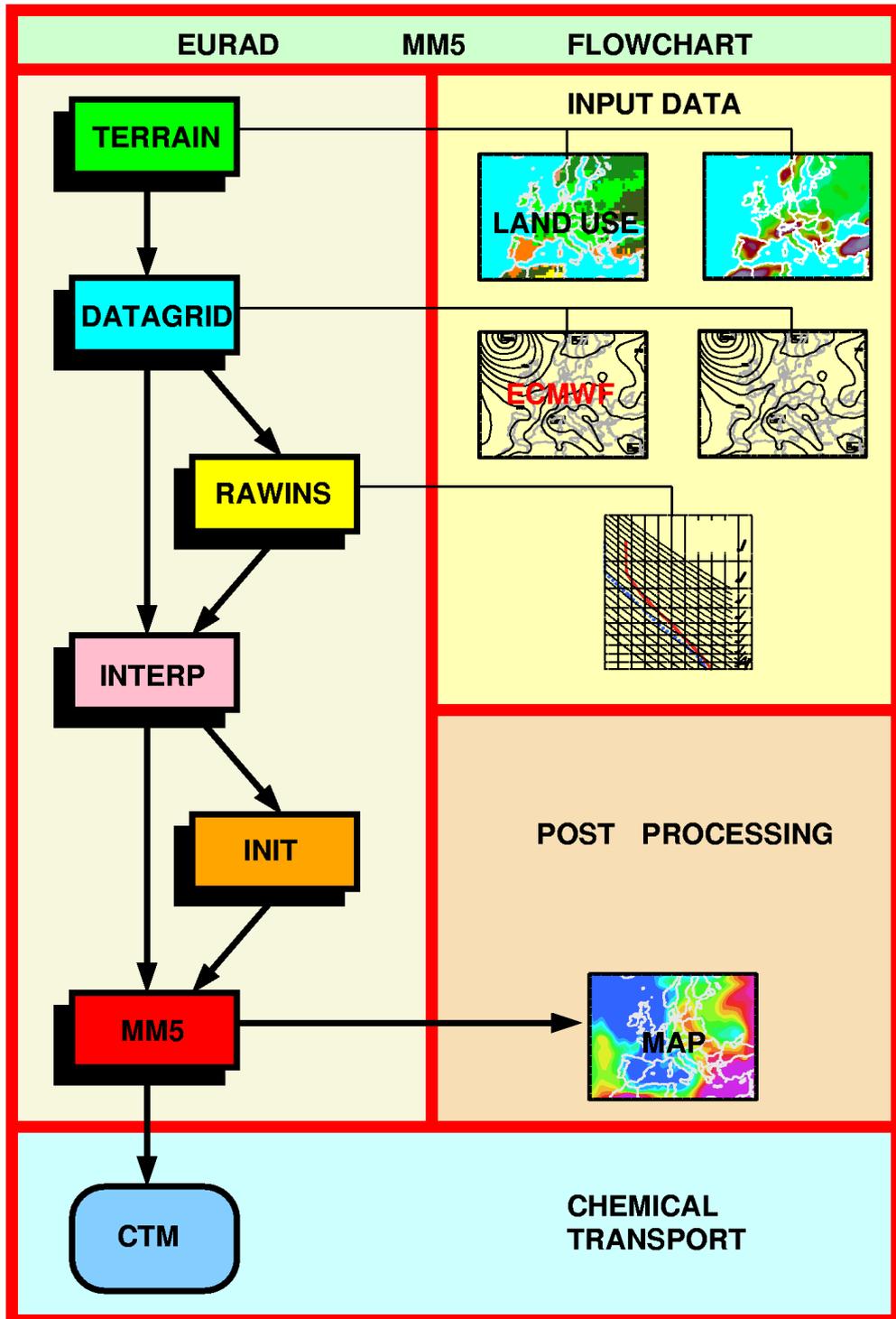


Abb. 4-1.4: EURAD - Flußdiagramm des Meteorologie-Modells MM5



## 4.2 Wetterlagen und Ozonkonzentrationen in den Ozon-episoden Sommer 1990 und Sommer 1994

### 4.2.1 Festlegung der Basisjahre und der Untersuchungszeiträume

(1) Im Rahmen der Anwendung großräumiger Photoxidantien-Modelle in Stufe A des "Aktionsprogramms und Maßnahmenplan Ozon" waren zwei Ozonepisoden, d.h. Zeiträume, in denen in Deutschland erhöhte Konzentrationen bodennahen Ozons beobachtet wurden, zu untersuchen. Zunächst waren die Basisjahre (Jahre in denen die Untersuchungszeiträume liegen) zu bestimmen. Ausgewählt wurden als Jahre der jüngsten Vergangenheit mit hohen hochsommerlichen Ozonkonzentrationen die Jahre **1990** und **1994**:

- Das Jahr **1990** wurde als Basisjahr ausgesucht, da dieses Jahr bezüglich des Dateninputs, insbesondere im Bereich europaweiter Emissionsdaten, als besonders **gut dokumentiert** einzustufen ist. Außerdem liegen für viele nationale und internationale Emissionsminderungsmaßnahmen Abschätzungen zu den mittel- und langfristig zu erwartenden Auswirkungen auf die Emissionsfrachten in Europa mit Bezugsjahr 1990 vor. Das Basisjahr 1990 eignet sich daher besonders als Ausgangspunkt für die Simulation der eher langfristigen Effekte von Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozonsituation in der Bundesrepublik bis zum Jahr 2005.
- Das Jahr **1994** wurde als 2. Basisjahr bestimmt, um - vor dem Hintergrund einer möglichst **aktuellen Emissionssituation** - die Auswirkungen von temporären, kurzfristigen Maßnahmen bewerten zu können. Das Jahr 1990 eignet sich hierfür nur sehr eingeschränkt, da in den letzten 5 Jahren deutliche Veränderungen der Emissionsstrukturen in Europa (insb. durch die Einführung des 3-Wege-Katalysators bei Pkw) und ganz besonders in Deutschland (infolge der Wiedervereinigung) gekommen ist.

(2) Auf Basis von Auswertungen von Meteorologie- und Immissionsdaten und in Abstimmung mit Luftreinhalte- bzw. Modellexperten wurden jeweils ein Untersuchungszeitraum in den beiden o.g. Jahren definiert:

- **Episode Sommer 1994:** 23.07. bis 08.08.1994
- **Episode Sommer 1990:** 25.07. bis 10.08.1990.

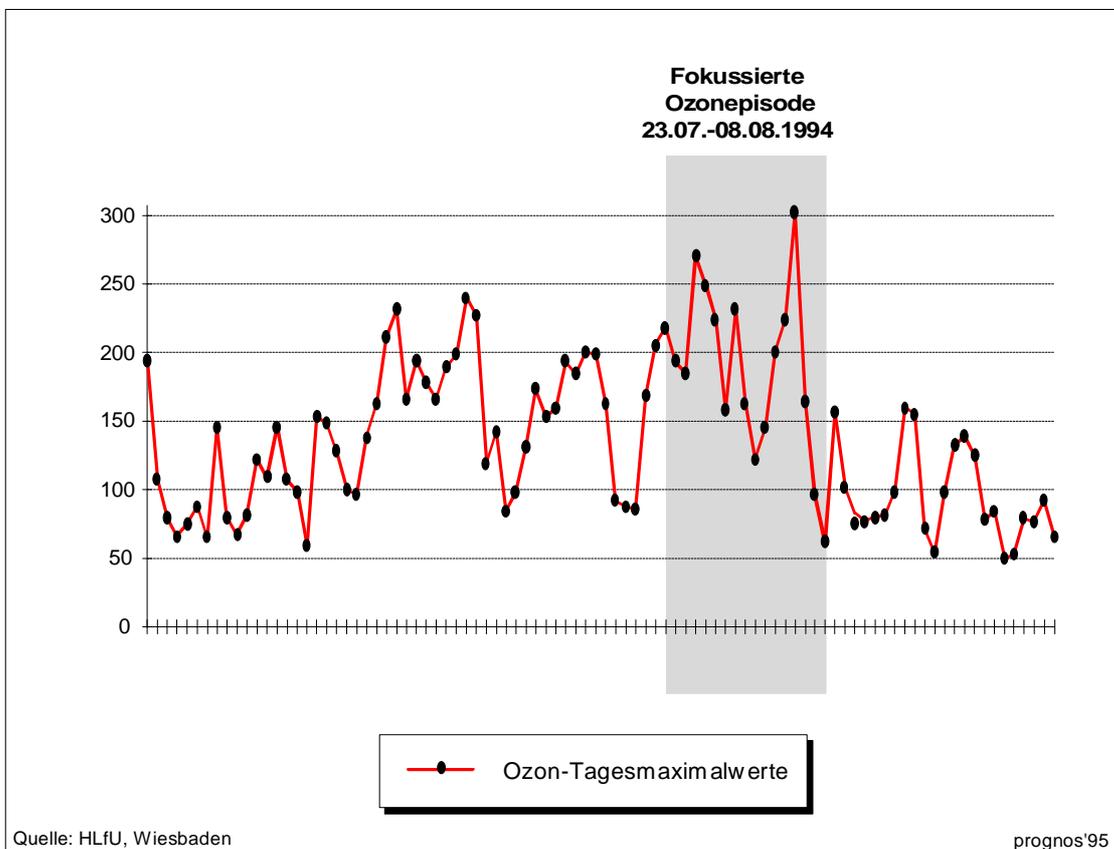
(3) Im folgenden sind die meteorologische Entwicklung und die hiervon stark geprägte Ozonsituation in Deutschland im Verlauf der beiden Episoden beschrieben. Aus den Ausführungen wird deutlich werden, warum die o.g. Episoden besonders geeignete Untersuchungszeiträume darstellen.

#### 4.2.2 Ozonepisode im Sommer 1994

(1) Während der Sommermonate des Jahres 1994 traten infolge langandauernder, stabiler Hochdruckwetterlagen mehrmals Zeiträume mit hohen Konzentrationen bodennahen Ozons über  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in der Bundesrepublik auf. Die Intensität, die Dauer und die regionale Ausdehnung der Perioden mit erhöhter Ozonbelastungen war recht unterschiedlich. Einen beispielhaften Überblick über die Entwicklung der Ozonkonzentrationen im Verlauf des Sommers vermittelt Abb. 4.2-1. Hier sind die an einer in einem Ballungsraum gelegenen Immissionsmeßstation in Westdeutschland (Mainz-Kastel) gemessenen 1-h-Tagesmaxima der Ozonwerte für die Monate Juni bis August abgebildet. Es wird deutlich, daß im Sommer 1994 an der betrachteten Meßstation mehrmals der Ozon-Warnwert der 22. BImSchV von  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (teilweise deutlich) überschritten wurde.

(2) In der letzten Juli- und der ersten Augustwoche lag ein mehrtägiger Zeitraum, in dem besonders häufig hohe Ozonbelastungen verzeichnet wurden. Dies war nicht nur an der betrachteten Meßstation, sondern weiträumig in großen Teilen der Bundesrepublik der Fall.

Abb. 4-2.1: Entwicklung der Ozon-Tagesmaximalwerte an der Meßstation Mainz-Kastel im Sommer 1994 (01.06.-31.08.1994)



Aufgrund der hohen Ozonwerte fiel in diese Episode auch die bundesweit erstmalige Anwendung einer Ozon-Bekämpfungsverordnung im Bundesland Hessen. Die Dynamik der Ozonbildung und die sich ergebenden Ozonwerte wurden im wesentlichen durch das hochsommerliche Wettergeschehen hervorgerufen, das nachfolgend beschrieben ist.

***Meteorologische Entwicklung im Zeitraum vom 23.07.-08.08.1994***

(3) Zu Beginn des Untersuchungszeitraum (23./24. Juli) steht Nordeuropa und Norddeutschland unter dem Einfluß eines Hochdruckgebietes über der Ostsee. An der Südflanke des Hoch strömt trockene, warme Luft aus südöstlichen bzw. östlichen Richtungen in den Norden und Osten Deutschlands. Die Tagestemperaturen steigen hier, unter hoher Sonneneinstrahlung, bis über 30°C an. Süd- und Westdeutschland hingegen wird von feuchterer Luft aus Südwesten beeinflusst, die zu etwas niedrigeren Temperaturen als im übrigen Teil Deutschlands führt.

(4) Am 25. Juli verschiebt sich das Hoch nach Osten. Während die Wettersituation im Norden und Osten noch weitgehend unverändert verbleibt, zieht über den Westen und Südwesten Deutschlands eine schwache mit leichter Bewölkung und Gewittern verbundene Störung. Generell unterliegt Deutschland an diesem Tag schwachen Winden aus südlichen Richtungen. Hinter dem sich weiter nach Osten verlagernden Hoch erfaßt die Störung am 26. Juli auch Ostdeutschland, wobei die Temperaturen ein wenig zurückgehen und der Wind auf westliche Richtungen dreht. Vereinzelt treten Gewitter auf. Westdeutschland liegt inzwischen im Einflußbereich subtropischer Luft, die sich aus westlichen Richtungen bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten und starker Einstrahlung weiter in Deutschland durchsetzt.

(5) Das Wetter an den Folgetage (27. und 28. Juli) ist in ganz Deutschland von den subtropischen Luftmassen bestimmt. Es treten hohe Lufttemperaturen von deutlich über 30°C bei nur geringen Windbewegungen auf. Allerdings zieht über der Nordsee bereits eine schwache Kaltfront auf, die am Nachmittag des 28. Juli Westdeutschland erfaßt.

(6) Am 29. Juli führt die kühlere Meeresluft zu einer kurzfristigen Veränderung der Wettersituation. Während im Westen die Temperaturen infolge des Luftmassenwechsels merklich unter die 30°C-Marke fallen, verbleibt Ostdeutschland jedoch weiterhin im Einfluß der warmen subtropischen Luft. An den Folgetagen (30. und 31. Juli) steigen die Temperaturen in ganz Deutschland wieder über 30°C an.

(7) Die Hitzewelle wird im Westen durch den Durchzug der Kaltfront eines Tiefdruckgebietes am 01. August beendet; Ostdeutschland erreicht die Front erst am 02. August und unterbricht auch hier vorerst die Hitzewelle. Bereits am 3. August leitet jedoch ein über Norddeutschland lagerndes Hoch einen neuen Zeitabschnitt mit hohen Temperaturen und viel

Sonne ein. Unter Zufluß subtropischer Luftmassen steigen die Temperaturen zunächst im Westen und am 4. August auch im Osten wieder signifikant an. Am 04. August werden im Rheinland und am 5. August auch in Ostdeutschland Lufttemperaturen von 35°C bei starker Sonneneinstrahlung gemessen.

(8) Das Ende der extrem warmen Episode wird am Nachmittag/Abend des 5. August eingeleitet. Eine Kaltfront zieht von Nordwesten her nach Deutschland und bereitet einen Luftmassenwechsel vor. Am 6. August hat die Front weite Teile Deutschlands überquert. Die einfließende Meeresluft subpolaren Ursprungs drückt die Temperaturen für einen mehrtägigen Zeitraum unter 25°C.

#### **Ozonkonzentrationen im Zeitraum vom 23.07.-08.08.1994**

(9) Da die meteorologische Entwicklung in West- und Ostdeutschland relativ unterschiedlich ausgeprägt war, bietet sich die exemplarische, vergleichende Diskussion der Ozonverläufe von jeweils einer Immissionsmeßstation im Westen und einer im Osten an.

(10) In Abb. 4-2.2 und Abb. 4-2.3 sind die gemessene Ozonkonzentrationen der Meßstationen Viernheim (Hessen) und Lindenberg (Brandenburg) dargestellt.

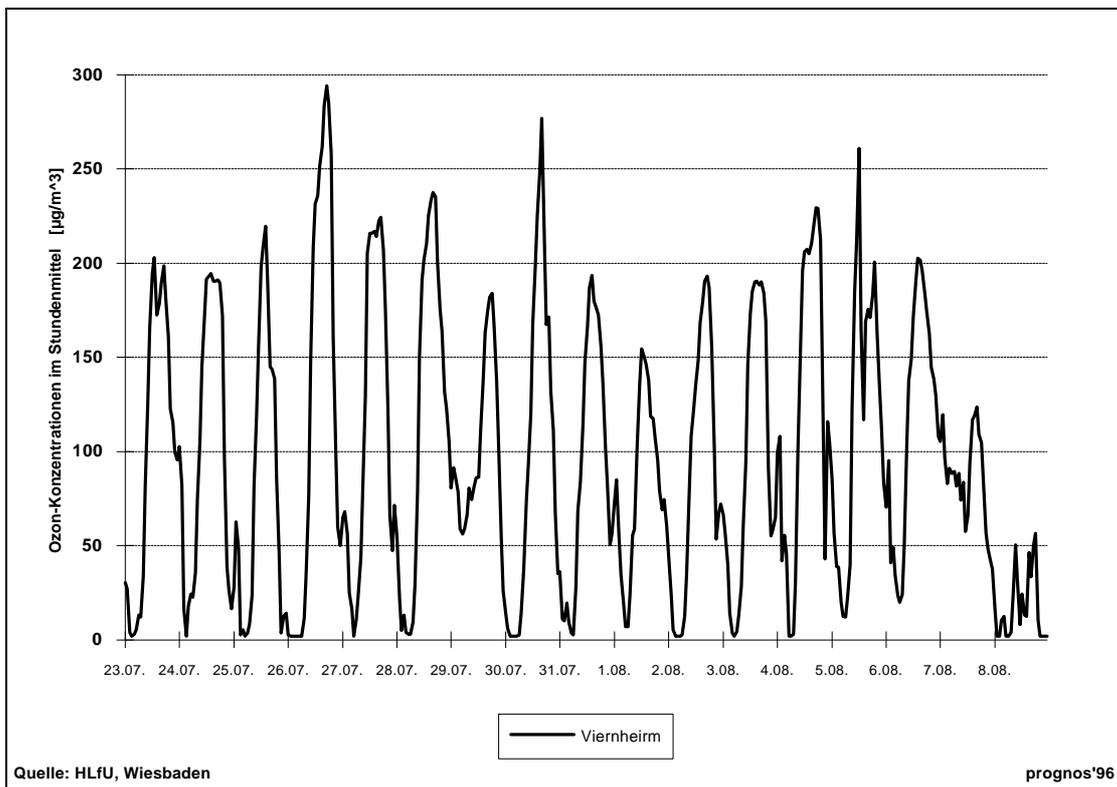
Die Entwicklung der Ozonkonzentrationen an der verkehrsnahen **Station Viernheim** spiegelte sich im hohen Maße das meteorologische Geschehen im Raum Südhessen/Nordbaden wider. Es ist ersichtlich, daß schon zu Beginn des Beobachtungszeitraums (23./24./25.07.) relativ hohe Ozon-Tagesmaxima erreicht wurden. Der Durchzug der Störung über das Gebiet (einhergehend mit Bewölkung und Gewitterzellen) verhindert allerdings noch den drastischen Anstieg der Ozonwerte. Am 26.07. (der Tag der erstmaligen Anwendung einer Ozonverordnung in Hessen) und den beiden darauffolgenden Tagen wird dann bei äußerst geringen Windbewegungen die Ozonkonzentration von 200 µg/m<sup>3</sup> jeweils im Tagesmaxima deutlich überschritten. Die aufziehende Kaltfront macht sich in der Nacht von 28. auf den 29.07. bemerkbar (das in dieser Nacht etwas erhöhte Ozonniveau ist auf Transporteffekte infolge der Windbewegungen zurückzuführen). Durch die einfließende kühlere Meeresluft fällt der Ozon-Maximalwert am 29.07. stark ab (abends wurde der Ozonalarm in Hessen aufgehoben).

Nach Abzug der Kaltfront setzt sich noch einmal das extreme Hochdruckwetter durch und die Ozonwerte überspringen am 30.07. mittags die 250 µg/m<sup>3</sup>-Marke (wieder wird in Hessen Ozonalarm gegeben). Am Folgetag setzt durch eine weitere Kaltfront ein Luftmassenwechsel mit entsprechenden Auswirkungen auf die Ozonwerte ein (Ozonalarm in Hessen aufgehoben).

Das nachfolgende Hoch läßt die Temperaturen und damit auch die Ozonkonzentrationen zwischen 02.08. und 05.08. sukzessive ansteigen. Am 05.08. werden in Südhessen wieder Werte über 250 µg/m<sup>3</sup> gemessen (Auslösung des dritten Ozonalarms). Bereits am Nachmit-

tag des 05.08. wirkt sich die herannahende Kaltluft in Viernheim bei den Ozonkonzentrationen aus. Der einsetzende tiefgreifende Luftmassenwechsel beendet die Ozonepisode in Viernheim im Verlauf des 06.08.

Abb. 4-2.2: Ozonkonzentrationen an der Meßstation Viernheim (Hessen) im Zeitraum vom 23.07. bis zum 08.08.1994

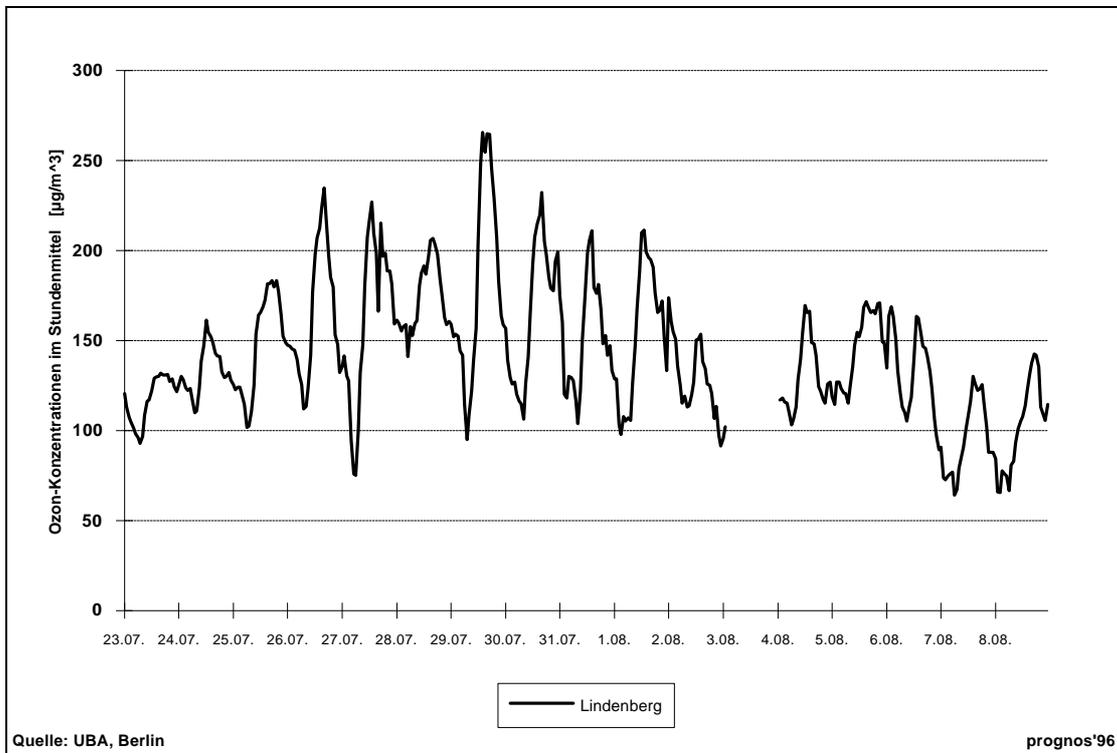


Anhand des Beispiels Lindenberg (Brandenburg), einer Hintergrundstation des UBA-Meßnetzes, läßt sich die Entwicklung der Ozonepisode im Osten Deutschlands gut verfolgen.

Die Ozonwerte steigen zwischen 23.07. und 26.07. unter zunehmenden Lufttemperaturen allmählich an. Die in Westdeutschland durchziehende Front ist im Osten noch ohne Auswirkung. Am 26.07. werden die maximalen Ozonkonzentrationen des ersten Abschnitts der Episode mit Werten um  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erreicht. Die aus Westen am 27.07. auch den Osten überquerende, schon deutlich abgeschwächte Front schlägt sich in nur leicht abfallenden Ozonwerten in Lindenberg nieder. In den Folgetagen (28.07. bis 01.08.) werden jedoch durchgehend jeweils wieder Werte von über  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen.

Ab dem 02. August werden in Lindenberg nur noch relativ geringe Ozonwerte verzeichnet. Die mit der Front eingeflossene Kaltluft drückt merklich auf die Ozonkonzentrationen. Im Gegensatz zu Westdeutschland, kommt es im Osten bis zum Ende des Beobachtungszeitraums nicht mehr zu dem drastischen Anstieg der Lufttemperaturen und damit der Ozonwerte wie beispielsweise in Südhessen.

Abb. 4-2.3: Ozonkonzentrationen an der UBA-Meßstation Lindenberg im Zeitraum vom 23.07. bis zum 08.08.1994

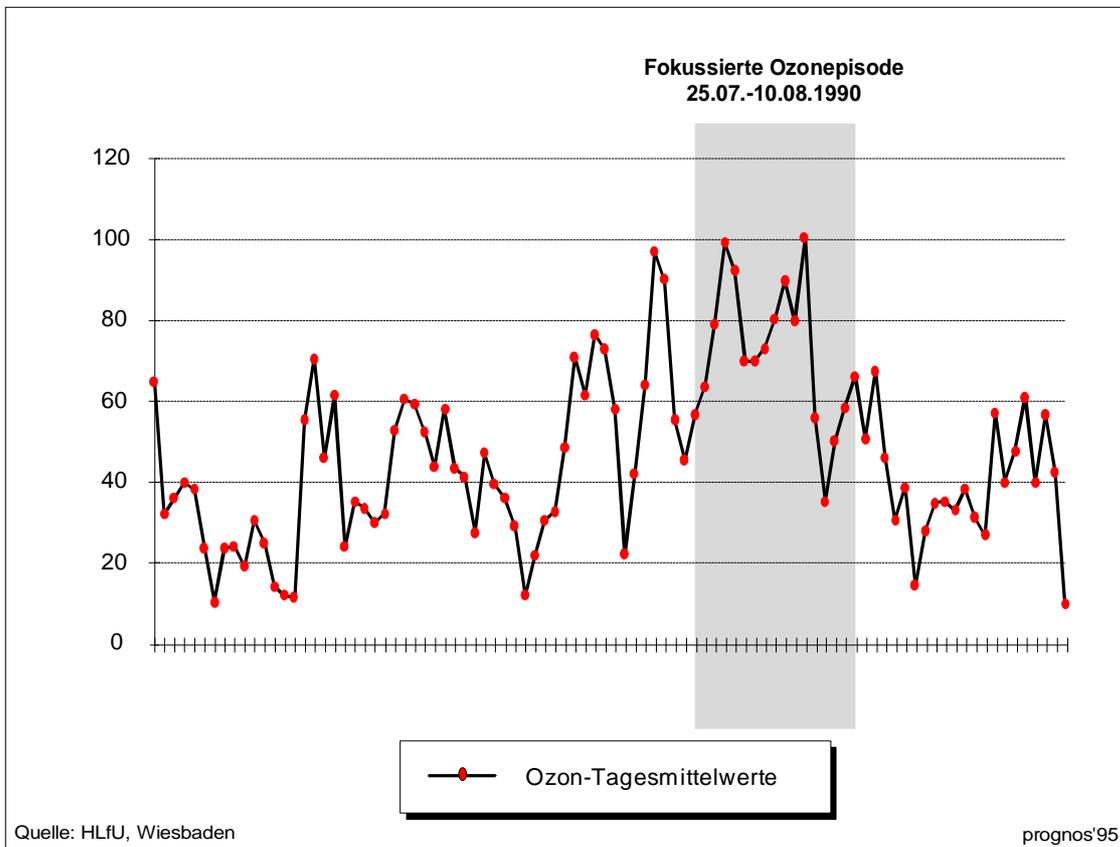


#### 4.2.3 Ozonepisode im Sommer 1990

(1) Der Sommer des Jahres 1990 war in Deutschland insbesondere in den Monaten Juli/August überdurchschnittlich warm und überwiegend trocken. Auch die Sonnenscheindauer lag teilweise deutlich über den langjährigen Mittelwerten. Diese Wetterbedingungen begünstigten die Ozonbildung. Besonders in Südniedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Hessen und dem gesamten südwestdeutschen Raum sowie in Teilen der neuen Bundesländer traten deshalb im Sommer 1990 mehrfach Zeiträume mit erhöhten Konzentrationen bodennahen Ozons auf. Exemplarisch für die Entwicklung der Ozonwerte im Verlauf des Sommer 1990 ist in Abb. 4-2.4 die Entwicklung der Ozon-Tagesmittelwerte für eine Meßstation in Südhessen (Viernheim) dargestellt.

(2) Ende Juli/Anfang August sticht ein Zeitraum in der Zeitreihe hervor, in dessen Verlauf die Ozonmittelwerte signifikant über dem Durchschnitt lagen (25.07.-10.08.1990). In diesem Zeitraum wurde nicht nur in Südhessen, sondern auch im nahezu gesamten Bundesgebiet eine erhöhte Ozonbelastung beobachtet.

Abb. 4-2.4: Entwicklung der Ozon-Tagesmittelwerte an der Meßstation Viernheim im Sommer 1990 (01.06.-31.08.1990)



**Meteorologische Entwicklung im Zeitraum 25.07.-10.08.1990**

(3) Die meteorologische Ausgangssituation am 25. Juli ist durch ein Hochdruckgebiet über der Nordsee und ein Tiefdruckgebiet über dem Baltikum gekennzeichnet. Während in Nordostdeutschland bei stärkerer Bewölkung die Temperaturen noch im Bereich von 20°C liegen, werden im übrigen Deutschland schon merklich höhere Tagestemperaturen gemessen. Die Bewölkung lockert am 26. Juli auch im Norden auf, und die Temperaturen steigen somit weiter an; in Südwestdeutschland werden bereits 30°C bei hoher Sonneneinstrahlung erreicht.

(4) Durch die Verlagerung des Hochs nach Osten gerät Deutschland am 28. Juli in eine südliche Strömung. Die Tagestemperaturen in Deutschland steigen weiträumig über 30°C. Im Südwesten werden vor einer von Westen heranziehenden Front sogar 35°C überschritten. Die zu einem nordatlantischen Tief gehörende Front überquert am Folgetag Deutschland und bringt deutlich kühlere Luft mit dichter Bewölkung und Schauern.

(5) Bereits einen Tag (30. Juli) später bildet sich erneut ein ausgedehnte Hochdruckzone über Westeuropa aus, deren Zentrum sich bis 01. August über die Nordsee verlagert. Bei nahezu wolkenlosem Himmel schnellen die Temperaturen wieder in den Bereich von über 30°C. Das Hoch zieht ab 2. August langsam Richtung Polen. Damit kann am 3. August Festlandsluft nach Deutschland aus Süden einfließen. 30°C werden auch am 4. August bundesweit überschritten; die Maximaltemperaturen liegen im Südwesten bei 35°C.

(6) Das Ende der Schönwetterperiode in Deutschland kündigt sich am 05. August an. Die Front eines skandinavischen Tief wandert südwärts und kühlere Meeresluft strömt in den Norden Deutschlands ein. Während im Südwesten Spitzentemperaturen von rund 38°C gemessen werden, ist die Lufttemperatur in Norddeutschland bereits auf 20°C gesunken. Am 6. August hat die Front mit dem dazugehörigen Wolkenband auch Süddeutschland erfaßt. Es kommt zu Gewittern und bei frischen Winden zu einem tiefgreifenden Luftmassenwechsel im gesamten Bundesgebiet, der die Ozonepisode beendet.

#### ***Ozonkonzentrationen im Zeitraum vom 25.07.-10.08.1990***

(7) Die in Deutschland im Verlauf der Ozonepisode 1990 gemessenen Ozonkonzentrationen lassen sich gut anhand des beschriebene Wettergeschehens interpretieren. Als Beispiele für die Entwicklung der Ozonwerte im Westen und Osten Deutschlands während der Ozonepisode des Sommers 1990 sind in den Abb. 4-2.5 und 4-2.6 die Ozonmeßwerte der Luftmeßstationen Chorweiler (NRW) und Berlin-Frohnau veranschaulicht.

In **Chorweiler** (Station in Nähe von Emissionsschwerpunkten in NRW) führt die sich ausdehnende Hochdruckwetterlage am Anfang der Episode 25.07. bis 28.08. zu massiv ansteigenden Tagesmaxima der Ozonkonzentration. Am Mittag des 28.07. wird ein erster Höhepunkt (knapp 300 µg/m<sup>3</sup>) in Chorweiler verzeichnet. Die vor der sich ankündigenden Front noch einmal extrem ansteigenden Lufttemperaturen sind wesentliche Ursache hierfür.

Das Tief, das am 29.07. das Rheinland überquert, reduziert die Ozon-Tagrisspitze im Vergleich zu Vortag um 60 %. Das sich am 30.07. über Deutschland lagernde sehr stabile Hoch bleibt bis zum 05.08. wetter- und damit ozonkonzentrationsbestimmend. Jeden Tag in diesem Zeitraum werden für Chorweiler Maximalkonzentrationen im Bereich von 200 µg/m<sup>3</sup> ermittelt. Der 04.08. bringt den zweiten Höhepunkt in der Ozonepisode. Bei Temperaturen über 35°C steigen die Ozonkonzentrationen nochmals an 300 µg/m<sup>3</sup> im Maximum heran. Das nahende Tief führt bereits am 05.08. zu einer Entlastung der Ozonsituation in Chorweiler und ab 06.08. zum Ende der Ozonepisode.

Als Beispiel für die Ozonkonzentrationen während der 90er Ozonepisode im Osten Deutschlands wurden die Ozonmeßwerte aus **Berlin-Frohnau** (Meßturm, 324m) ausgewählt.

Abb. 4-2.5: Ozonkonzentrationen an der Meßstation Chorweiler (NRW) im Zeitraum vom 25.07. bis zum 10.08.1990

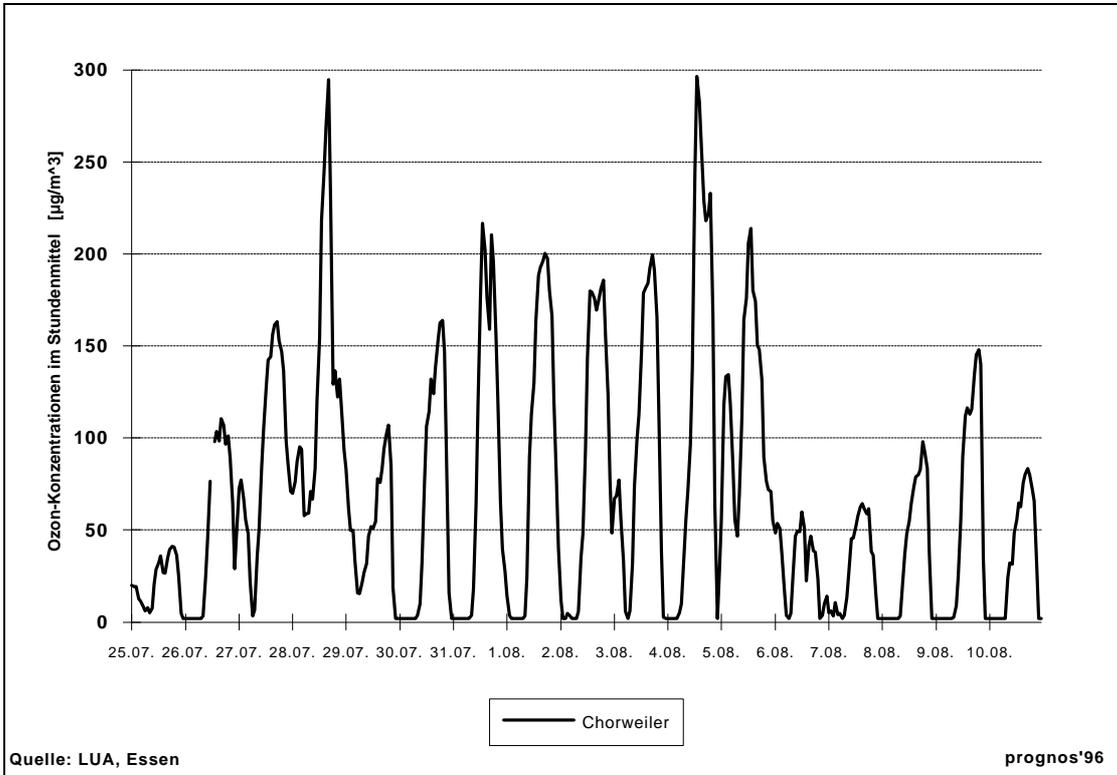
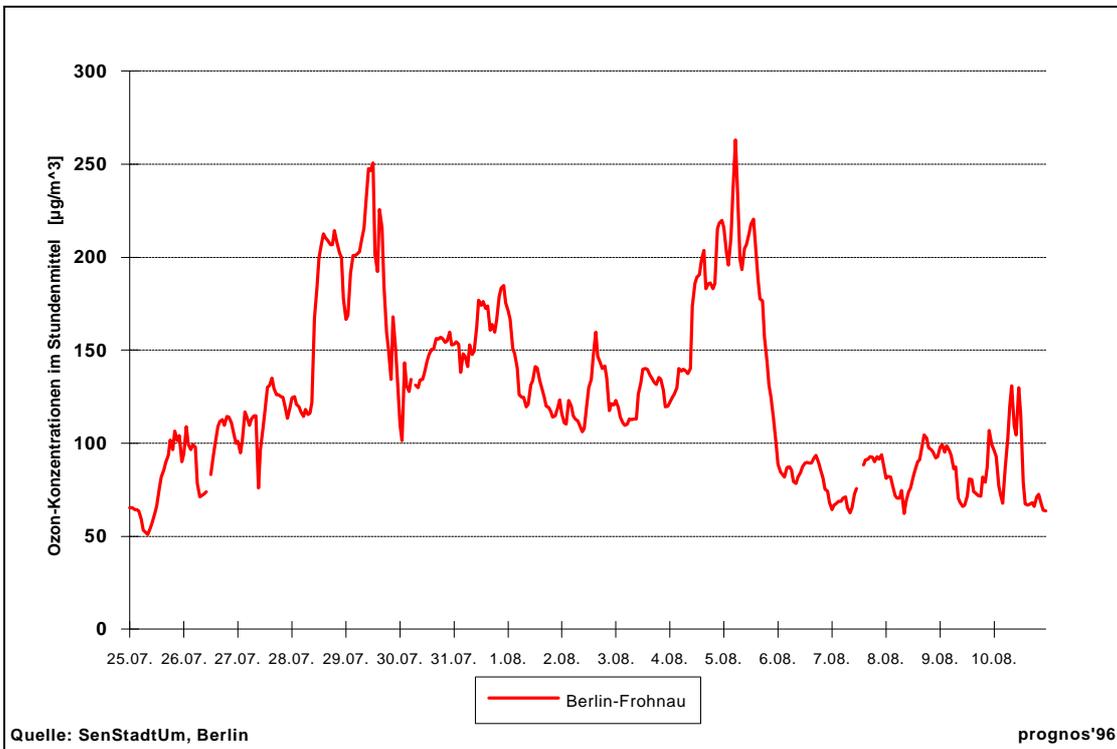


Abb. 4-2.6: Ozonkonzentrationen an der Meßstation Berlin-Frohnau im Zeitraum vom 25.07. bis zum 10.08.1990



Es zeigt sich, daß hier die Ozonwerte zu Beginn der Episode relativ langsam anstiegen. Erst mit dem Drehen der Windrichtung auf Süd bei hohen Lufttemperaturen springen die Werte schlagartig in die Höhe und erreichen am 29.07.  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der Folgerzeitraum ist gekennzeichnet durch ein relativ stabiles erhöhtes Ozonniveau im Bereich von  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Am 04.08. und 05.08. werden nochmals höhere Ozonwerte (über  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), wieder bei südlichem Wind und sehr heißer Luft, registriert. Die Ozonepisode endet in Berlin im Verlauf des 05.08. mit dem einströmen kühler Luftmassen aus Norden.

#### 4.2.4 Die Ozonepisoden des Sommers 1990 und 1994 im Vergleich

(1) Die beiden untersuchten Ozonepisoden weisen nur auf den ersten Blick große Gemeinsamkeiten auf. Die Tatsache, daß die meteorologischen Rahmenbedingungen und die Höhe der beobachteten Ozonkonzentrationen relativ ähnlich waren, kann allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, daß die Abläufe des Wetterschehens und die hieraus resultierenden Strukturen der Ozonbelastung in Deutschland in wesentlichen Punkten recht unterschiedlich waren.

- In der Ozonepisode des Sommers 1990 dehnten sich die Gebiete hoher Ozonbelastung ausgehend von einzelnen Regionen langsam großflächig aus. Der Schwerpunkt der Ozonbelastung war 1990 der Westen und Südwesten der Republik. - Bei der 1994er Episode traten zwar auch in Westdeutschland die höchsten Ozonkonzentrationen auf; diese waren allerdings eher temporär und räumlich eng umgrenzt. Mal zeigte eine Meßstation besonders hohe Werte auf, mal eine andere. Regionale/lokale Einflüsse auf die Ozonbildung spielten 1994 1eine große Rolle.
- Der Verlauf der Ozonkonzentrationen im Sommer 1990 war durch einen Zeitraum relativ stabilen Hochdruckwetters über Deutschland (25.07.-05.08.), unterbrochen nur durch eine eintägige Störung (29.07.), gekennzeichnet. Hierdurch kam es, wie die Entwicklung der Ozonkonzentrationen in Dortmund beispielhaft zeigt (Abb. 4-2.5), zu einem konstanten Aufbau der Ozonwerte im Verlauf der beiden Teilepisoden. - Demgegenüber ist die Episode des Sommers 1994 sehr viel komplexer strukturiert. Die mehrmaligen Frontendurchgänge im Westen und die starke räumliche Differenzierung des Wettergeschehens lassen kein gleichmässiges Aufbauschema erkennen.

(2) Die unterschiedlichen Charakteristika der Episoden sind nicht unwesentlich für die Photoxidantien-Modellrechnungen. Es ist bekannt, daß die Simulation komplexer, regional oder lokal geprägte Wetterverhältnisse, wie sie im Sommer 1994 auftraten, im Rahmen einer Photoxidantien-Modellrechnung sehr viel schwieriger zu bewerkstelligen ist, als die Simulation der eher gleichmäßigen, großflächigen meteorologischen Abläufe der Episode 1990. Dies gilt insbesondere bei der Anwendung von für die großräumige Skala entwickelten Modellen, wie sie in Stufe A der vorliegenden Untersuchung "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon (Sommermog)" zum Einsatz kamen.

### 4.3 Ermittlung der Wirkungen von dauerhaften, langfristig wirksamen Minderungsmaßnahmen durch Simulationsrechnungen für die Ozonepisode vom 25.07. - 10.08.1990

#### 4.3.1 Simulation der Oxidantienbildung während des Zeitraums vom 25.07.-10.08.1990 (Basislauf)

(1) Der Einsatz von modellgestützten photochemischen Ausbreitungen zur immissionsseitigen Bewertung von Einzelmaßnahmen und Minderungsstrategien setzt unabdingbar voraus, daß das Modellsystem nachweisbar in der Lage ist, die wesentlichen Merkmale einer Episode mit erhöhten Oxidantienkonzentrationen zu simulieren. Ein solcher Nachweis erfolgt durch eine **Simulation des Istzustandes** während des ausgewählten Simulationszeitraums (im sog. Basislauf) und dem anschließenden **Vergleich** der Rechenergebnisse des **Basislaufs** mit **vorliegenden Messungen**.

(2) Den folgenden Erläuterungen der mit REM3 und EURAD durchgeführten Basisläufe liegen die berechneten nachmittäglichen Ozonfeldverteilungen sowie die Vergleiche von berechneten und gemessenen Ozon-Zeitverläufen an ausgewählten Stationen zugrunde.

Bei den Feldverteilungen wird hier auszugsweise die Teilepisode vom 3.8. bis zum 5.5.1990 betrachtet. In diesem Zeitraum stiegen die gemessenen O<sub>3</sub>-Konzentrationen vor allem im Westen Deutschlands stark an. Bei den modellseitig simulierten Ozonverteilungen wird das Stundenmittel in der Zeit von 14 bis 15 UTC (16 bis 17 Uhr MESZ) betrachtet.

Für die Vergleiche mit Meßdaten werden die Ozonmessungen aus den Meßnetzen des Umweltbundesamtes sowie der Bundesländer Hessen und Nordrhein-Westfalen herangezogen. Die Zeitreihen beschreiben den gesamten Simulationszeitraum.

#### Modellierte Ozonfeldverteilungen

(3) Die mit dem Modellen simulierten Ozonkonzentrationen sind in den nachfolgenden Abbildungen 4-3.1 bis 4-3.4 der berechneten bodennahen Ozonverteilungen für die beiden Tage 3.8.1990 und 4.8.1990 dargestellt. In den Abbildungen sind die O<sub>3</sub>-Konzentrationen in µg/cbm angegeben. Im folgenden Text werden die O<sub>3</sub>-Konzentrationen in µg/cbm angegeben.

Am 3.8. liegt Deutschland auf der Rückseite eines nach Osten abziehenden Hochs, wodurch die Strömung über Deutschland bei steigenden Temperaturen auf östliche bis südöstliche

Richtungen dreht. Modellseitig werden hohe O<sub>3</sub>-Konzentrationen für den großräumigen Bereich Benelux/Südengland berechnet. Die Werte übersteigen bei REM3 großflächig die 240 µg/cbm-Marke mit Maxima bei 300 µg/cbm. In Deutschland ergibt sich ein von Ost nach West gerichteter Ozongradient von rd. 100 µg/cbm im Osten bis 240 µg/cbm im Westen.

Am 4.8. liegt Westeuropa bereits unter dem Einfluß eines nach Süden ziehenden Frontensystems, auf dessen Vorderseite bei wolkenlosem Himmel sehr warme Luft nach Norden geführt wird. Als Folge des kontinentalen Schadstofftransports werden Ozonkonzentrationen von über 200 µg/cbm bis nach Dänemark modelliert. Für das Ruhrgebiet werden bei REM3 Werte von mehr als 320 µg/cbm berechnet. In Deutschland reicht der Ozongradient nunmehr von rd. 300 µg/cbm (Westen) bis 140 µg/cbm (Osten).

Am 5.8. hat das Frontensystem den größten Teil Deutschlands überquert. Hohe Ozonkonzentrationen werden nur noch für den Süden und äußersten Osten des Landes berechnet. Am 6.8. dominiert eine zyklonale Westströmung, mit ganz oder geschlossener Wolkendecke und kühleren Luftmassen. Die Phase hoher Ozonwerte ist beendet.

Abb. 4-3.1: Mit REM3 berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 3.8.1990, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet

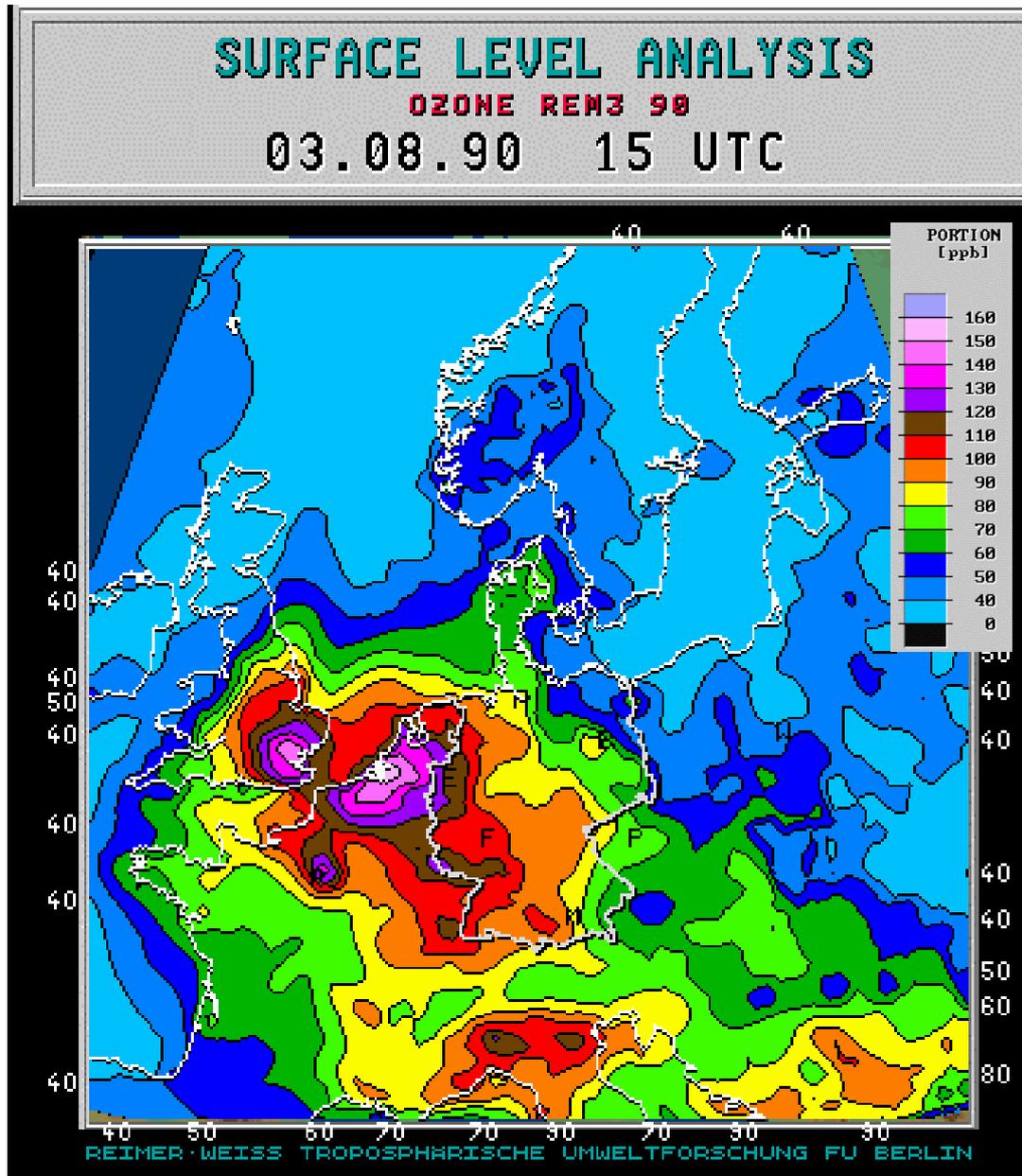


Abb. 4-3.2: Mit REM3 berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 4.8.1990, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet

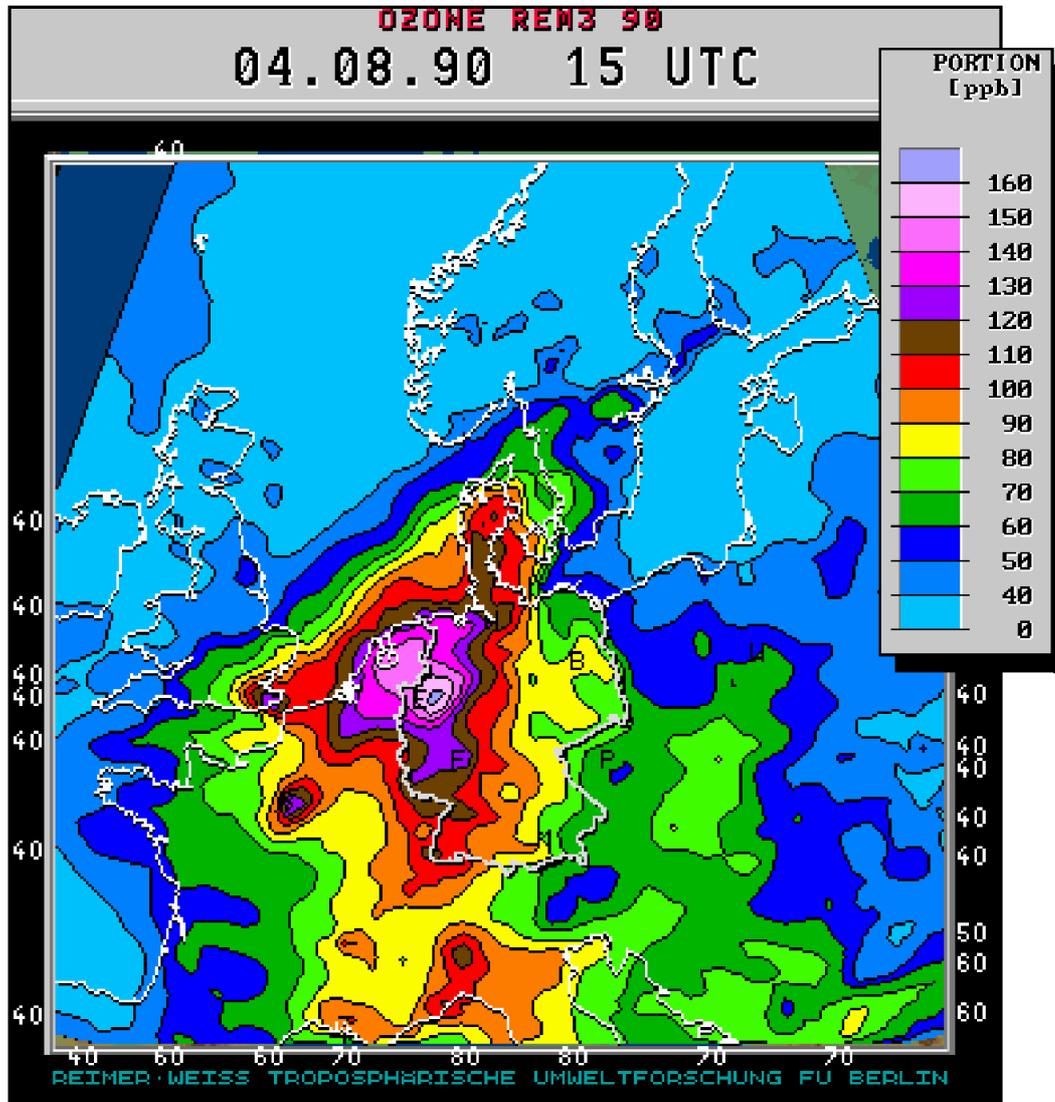


Abb. 4-3.3: Mit EURAD berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 3.8.1990, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet

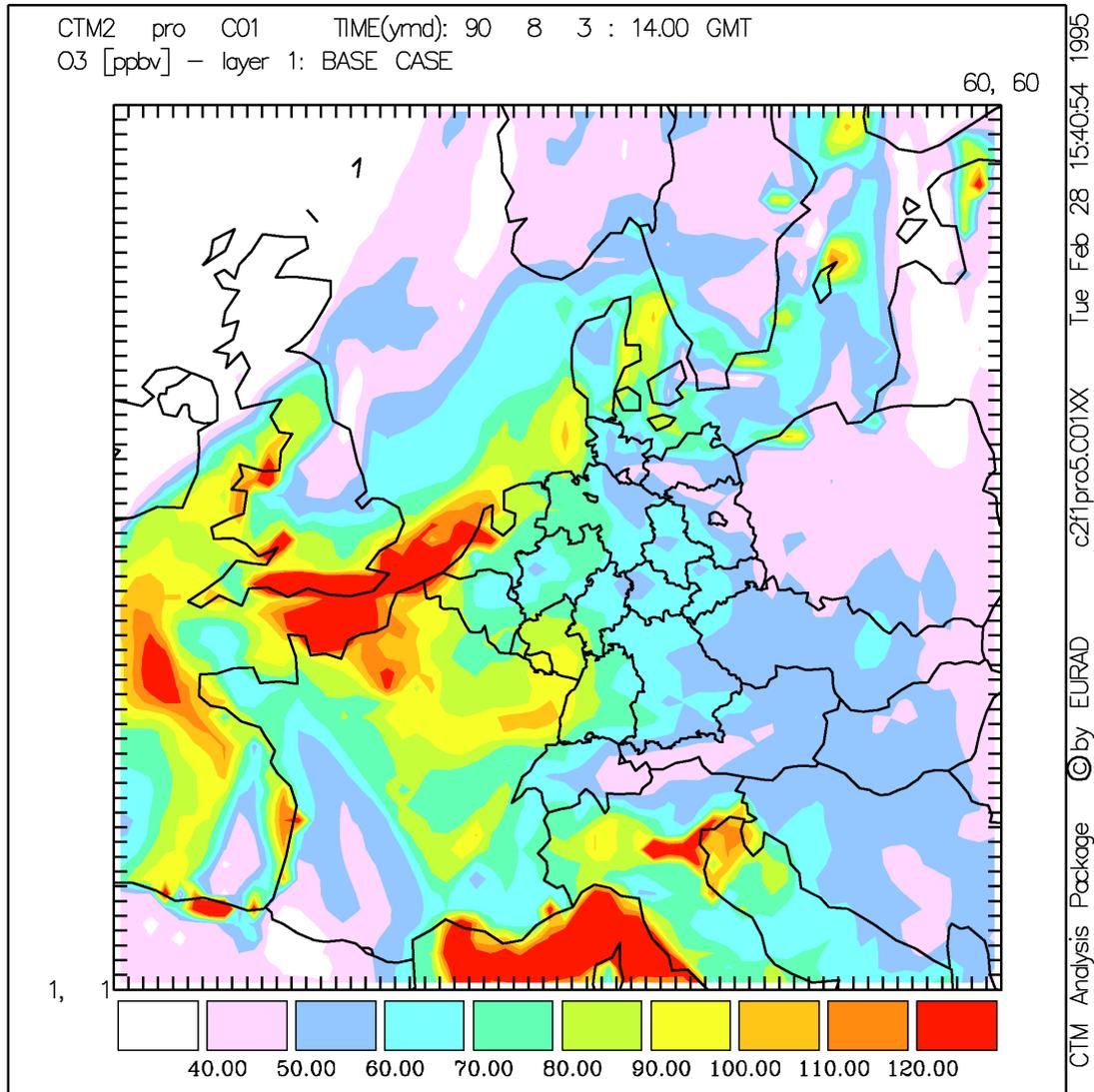
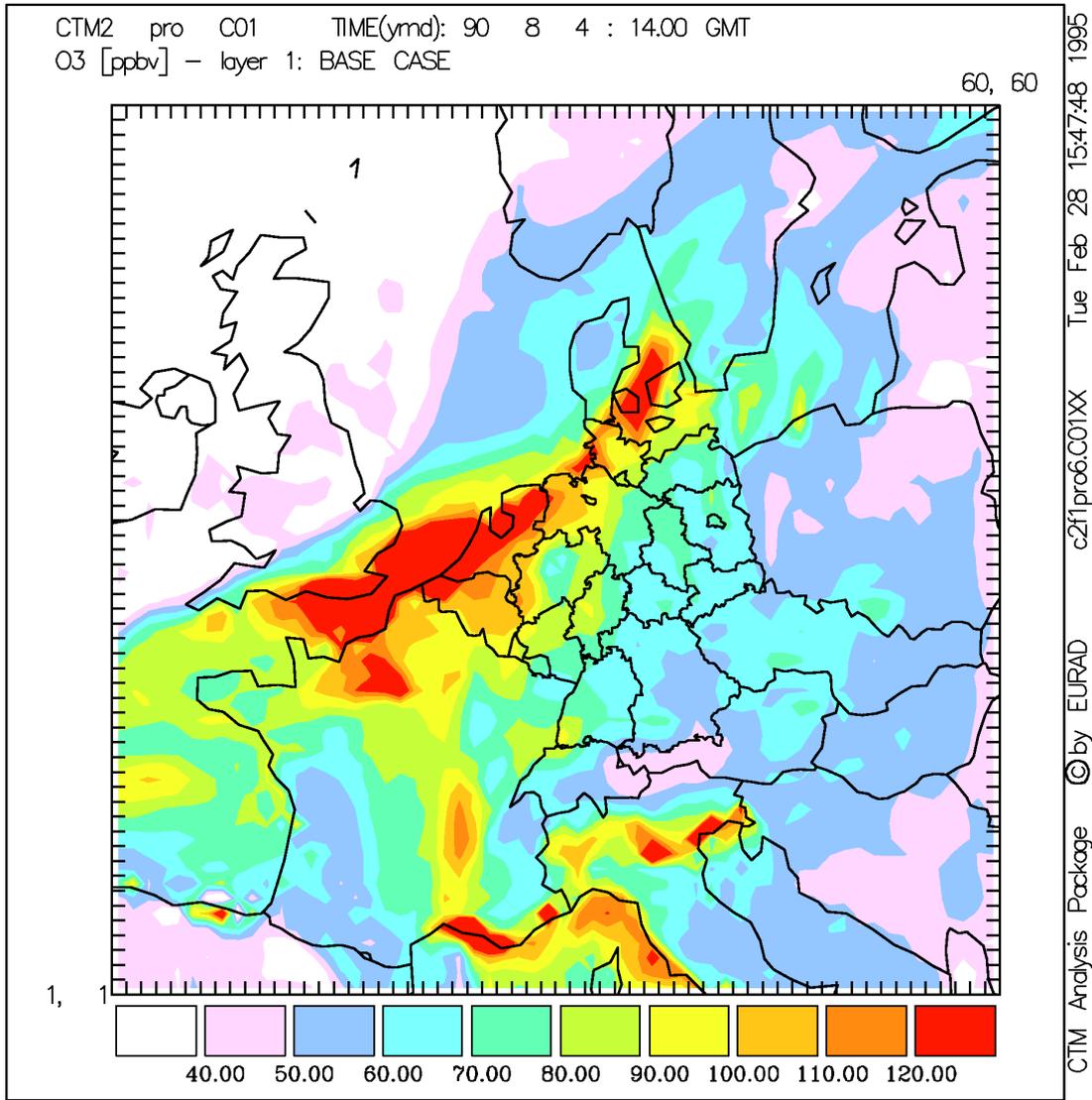


Abb. 4-3.4: Mit EURAD berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 4.8.1990, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet



### Zeitreihenanalysen (Abb. 4-3.6 bis 4-3.7)

(4) Seitens der Modellierer wurden Zeitreihenanalysen für insgesamt 22 Meßstationen durchgeführt. Die Lage der im Bereich von Deutschland berücksichtigten 17 Meßstationen ist in Abb. 4-3.5 dargestellt.

Aus Platzgründen werden hier (auszugsweise) nur einige dieser Analysen wiedergegeben:

- **EURAD-Modellrechnungen:** Vergleiche der gemessenen Werten an den Stationen **Darmstadt**, **Viernheim** und **Grebenu** mit den für die zugehörigen Gitterflächen berechneten Ozonkonzentrationen (Abb. 4-3.6).
- **REM3-Modellrechnungen:** Vergleiche der gemessenen Werten an den Stationen **Dortmund/M.** und **Essen** sowie **Stevenage** und **Sibton** (in Südengland) mit den für die zugehörigen Gitterflächen berechneten Ozonkonzentrationen (Abb. 4-3.7).

(5) Die berechneten und gemessenen Werte in den hier dargestellten Fällen zeigen, daß mit Hilfe der Modelle in der Episode Sommer 1990 gemessenen Ozonkonzentrationen sowohl in der großräumigen Verteilung als auch in der Höhe insgesamt relativ gut reproduziert werden können.

Allerdings sind in einzelnen Regionen bzw. in Teilabschnitten der Episode sowohl gute Übereinstimmungen als auch weniger gute Übereinstimmungen gegeben. Letzteres ist meist dann der Fall, wenn das Wettergeschehen eine größere Komplexität und Dynamik aufweist (z.B. Frontendurchgänge). Desweiteren ist bei den Vergleichen im Rahmen von Zeitreihenanalysen immer zu beachten, daß Vergleiche von Punktmessungen mit berechneten durchschnittlichen Konzentrationen für Gebiete mit einer Ausdehnung von mindestens 30km\*30km aus naheliegenden methodischen Gründen stets problematisch sind.

Abb. 4-3.5: Lage der Meßstationen

### Lage der Meßstationen

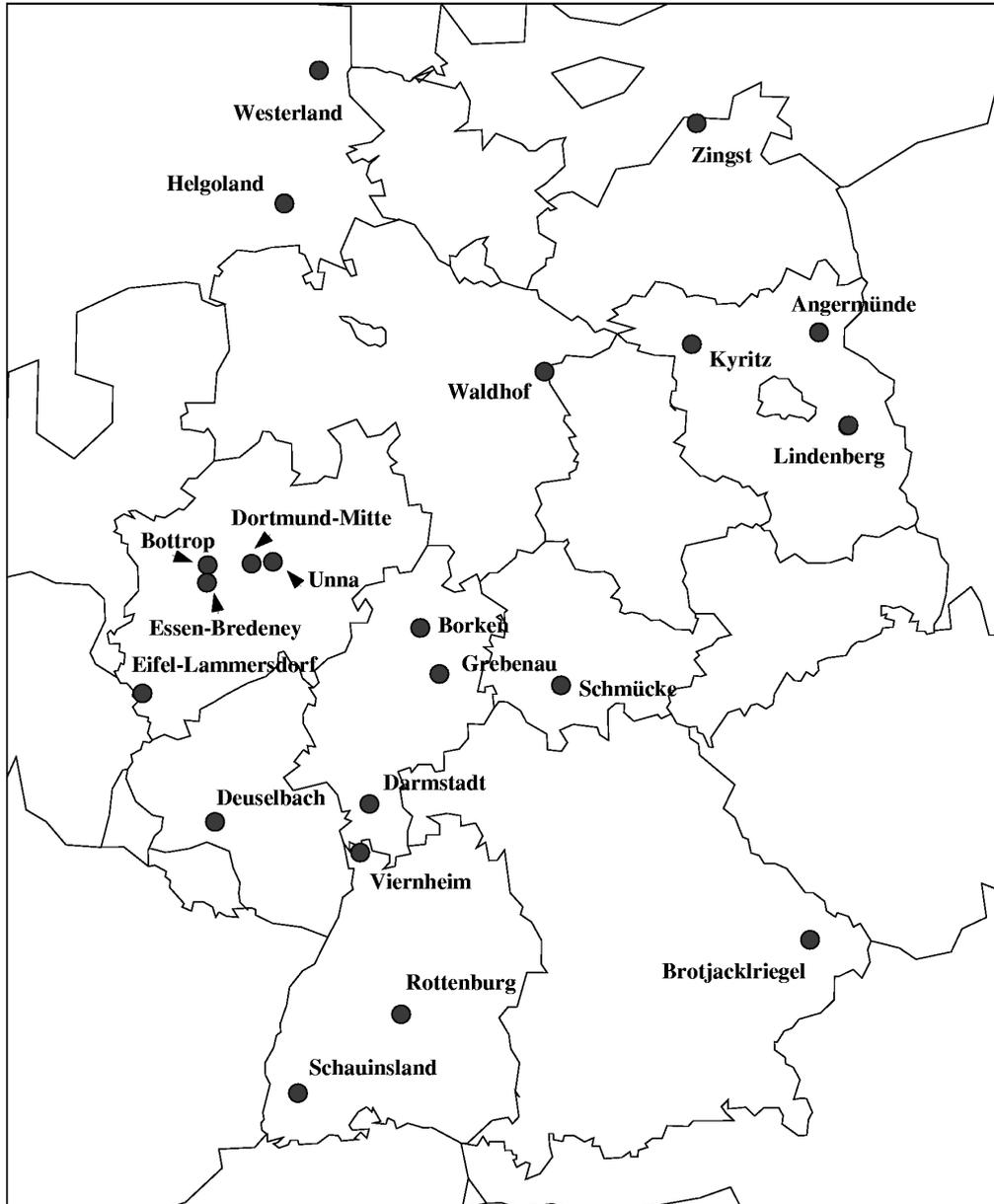
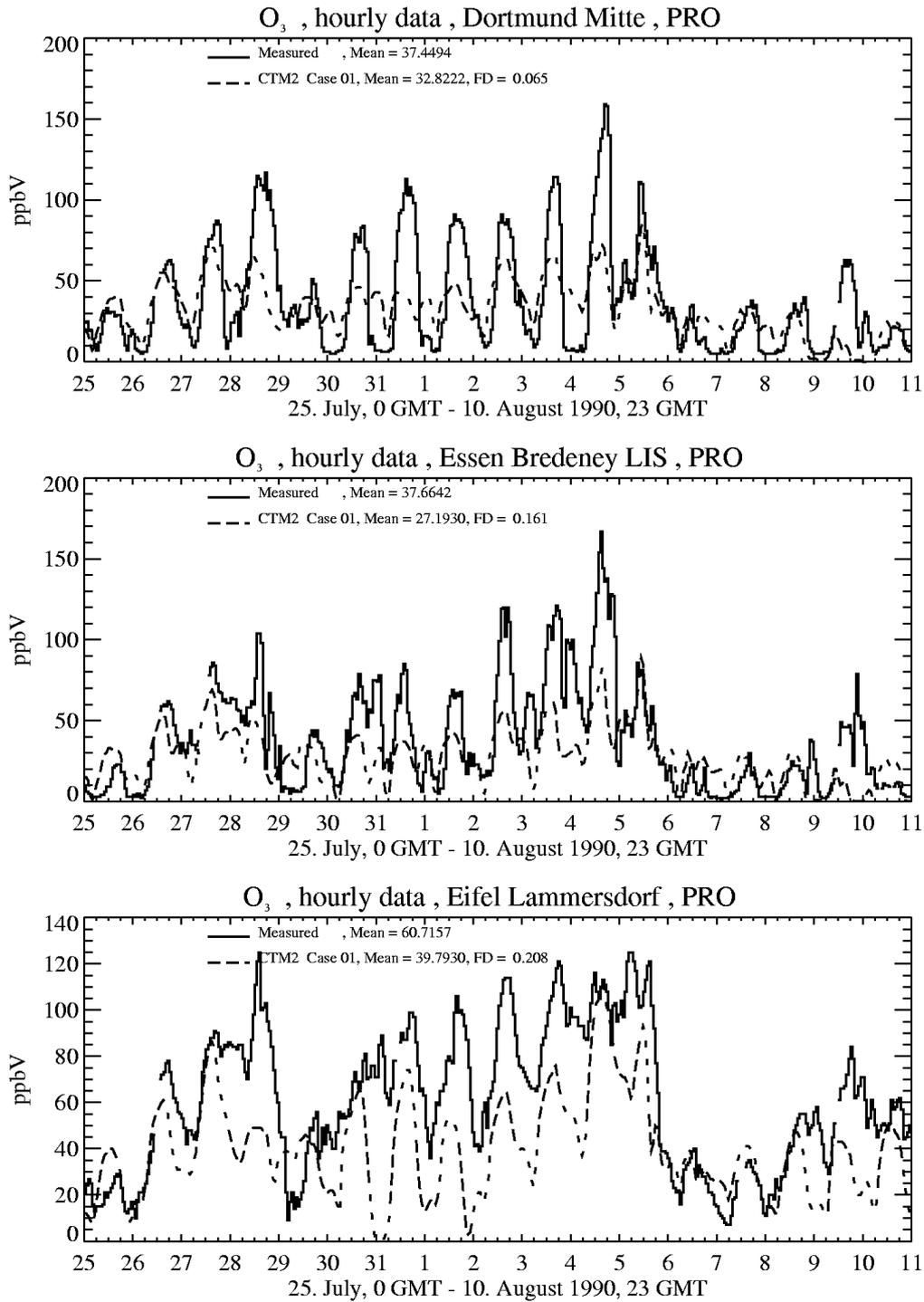


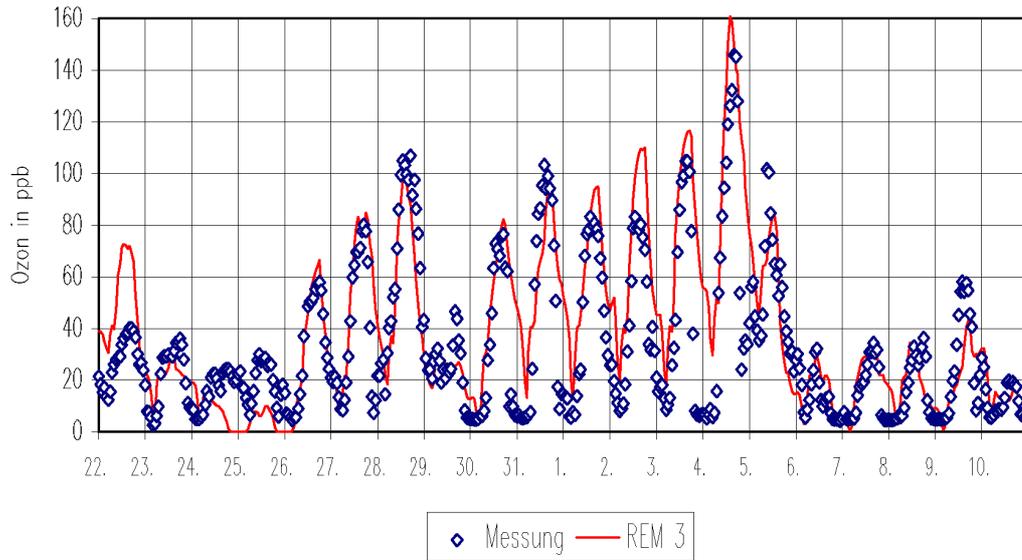
Abb.4-3.6: EURAD - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Dortmund/M., Essen-Bredeneby und Eifel-Lammersdorf mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1990



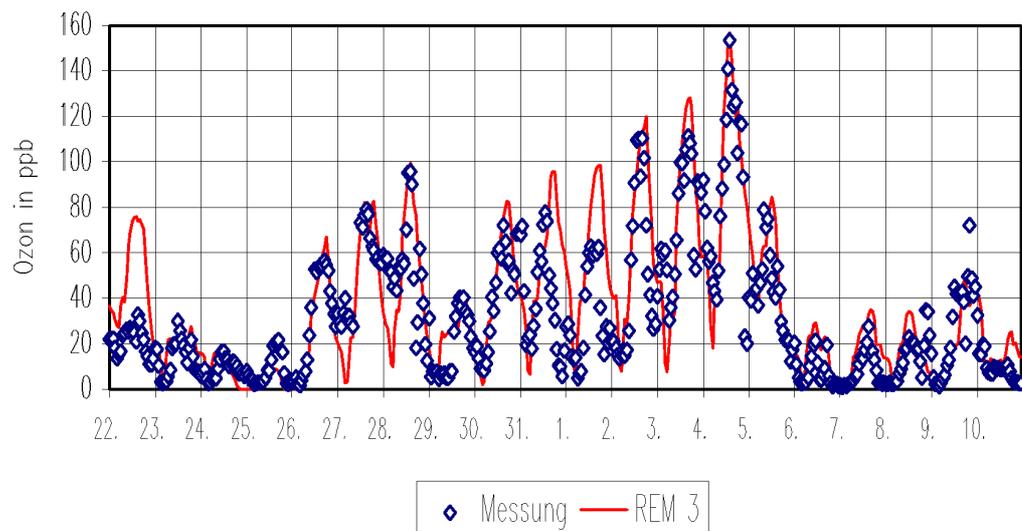
Copyright by EURAD Thu Nov 9 13:26:38 1995

Abb.4-3.7: REM3 - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Dortmund/M. und Essen-Bredeneby mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1990

### Dortmund 90



### Essen 90



#### 4.3.2 Auswirkungen langfristig wirksamer Maßnahmen auf die Oxidantienkonzentrationen in der Episode 25.07.-10.08.1990

(1) Die Ermittlung der Auswirkungen von langfristig wirksamen Minderungsmaßnahmen erfolgt mit beiden Modellen durch Simulationsrechnungen, bei denen ausschließlich die emissionsseitigen Inputdaten der anthropogenen Ozon-Vorläufersubstanzen  $\text{NO}_x$  und VOC variiert werden. Die Variation wird seitens der beiden **Emissionsszenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005"** vorgegeben (siehe oben).

Alle anderen Inputparameter bleiben unverändert, mithin auch die berechneten Emissionen aus biogenen Quellen. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang noch, daß im Rahmen dieses Vorhaben bei beiden Modellen die zugrundeliegende Emissionsdatenbasis 1990 weitgehend identisch ist (gleiche nationale Gesamtsummen, gleiche Aufteilungen auf Hauptgruppen, soweit als möglich abgestimmte regionale Verteilungen).

(2) Die **Darstellung der Ergebnisse** der Berechnungen erfolgt in Form von

- **Flächenbezogenen großräumigen Darstellungen** der **prozentualen Minderungen** der Ozonkonzentrationen an ausgewählten Tagen in der Zeit von 16 bis 17 Uhr MESZ;
- **Zeitreihenanalysen** für **ausgewählte Gitterflächen**, in denen die Ergebnisse der berechneten Konzentrationen im Basislauf mit den Ergebnissen der Berechnungen in den beiden Szenarioläufen "Trend 2005" und "Reduktion 2005" verglichen werden;
- **Gitterstundenanalysen**, in denen die Häufigkeiten der Überschreitungen von bestimmten Schwellwerten ( $180 \mu\text{g}/\text{cbm}$ ;  $240 \mu\text{g}/\text{cbm}$ ) in allen Gitterflächen für den Bereich Deutschland im Basislauf und in den beiden Szenarioläufen verglichen werden.

(3) Seitens der beiden Modellierer wird hierzu ein sehr umfangreiche Dokumentation der Ergebnisse (mit u.a. zahlreichen Farbkarten) vorgelegt. Es erfolgt im diesem Bericht aus Platzgründen nur eine auszugsweise Darstellung.

## Flächenbezogene großräumige Minderungseffekte (Abb. 4-3.8 bis 4-3.12)

Die Ergebnisse der Berechnungen beider Modelle kommen im wesentlichen zu den gleichen Befunden:

### 1. Trendszenario 2005:

Die Minderungen der Ozonkonzentrationen erreichen am 4.8., dem Tag mit sehr hohen gemessenen und berechneten Ozonspitzen, im Westen Deutschlands im Mittel rd. -15%, maximal -20%. Am 5.8. ergeben die Berechnungen für die Regionen mit hohen Ozonkonzentrationen vor dem heranziehenden Frontensystem überwiegend Abnahmen von -20% bis -25%.

Gesamthaft wird festgestellt, daß mit **Maßnahmen gemäß Trendszenario** im Mittel **Abnahmen** bei den **hohen nachmittäglichen Ozonspitzenwerten im Bereich von -15%** zu erwarten wären. Bei 300 µg/cbm wären dies bspw. rd. -45 µg/cbm.

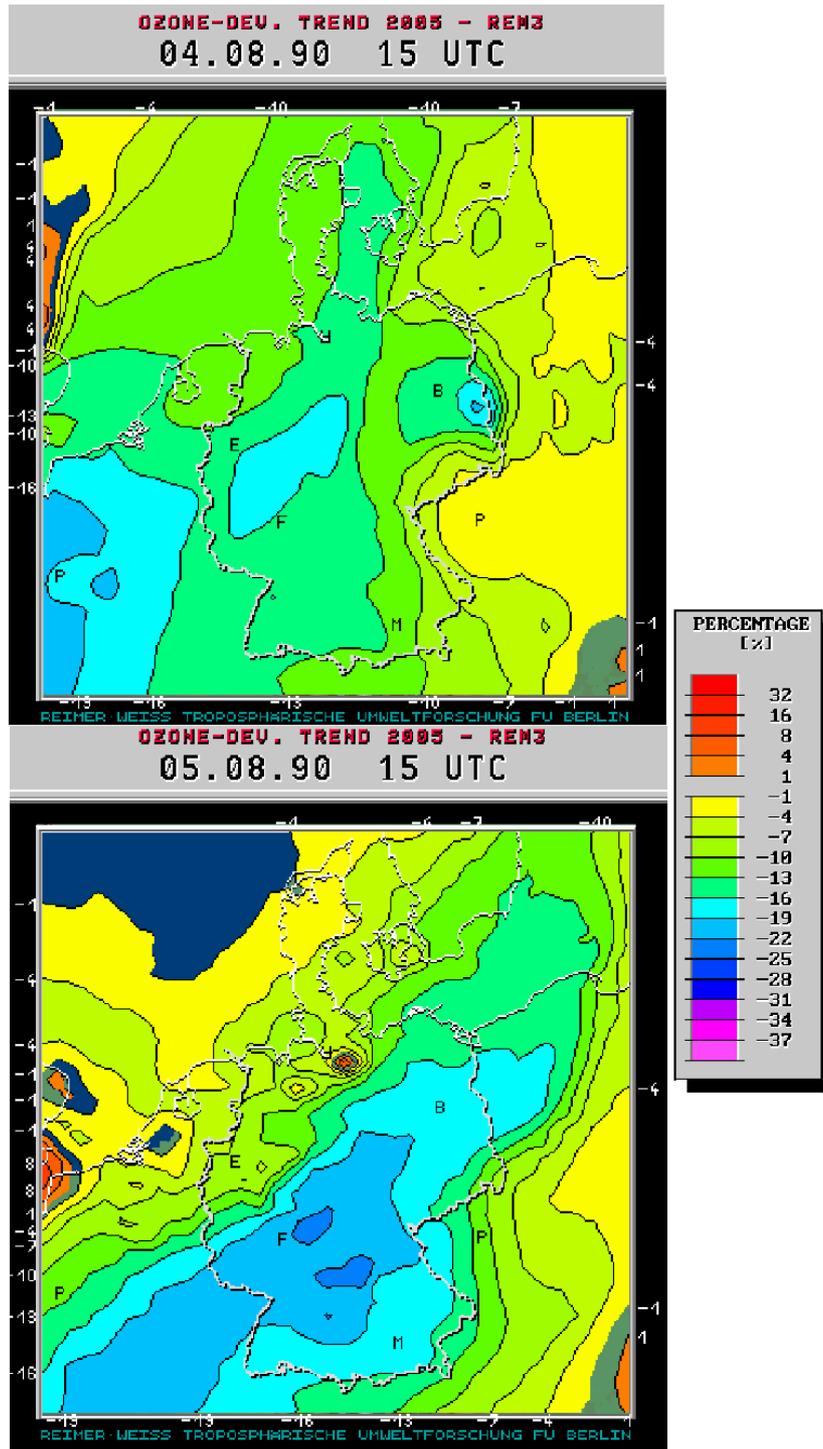
(Berechnete prozentuale Zunahmen wie etwa in England sind vor dem Hintergrund von dort nur noch sehr niedrigen Ausgangskonzentrationen, mit z.T. weit unter 100 µg/cbm, zu sehen.)

### 2. Reduktionsszenario:

Die Minderungen der Ozonkonzentrationen erreichen am 3.8. maximal 30%, am 4.8. maximal -35% und am 5.8. maximal -40%.

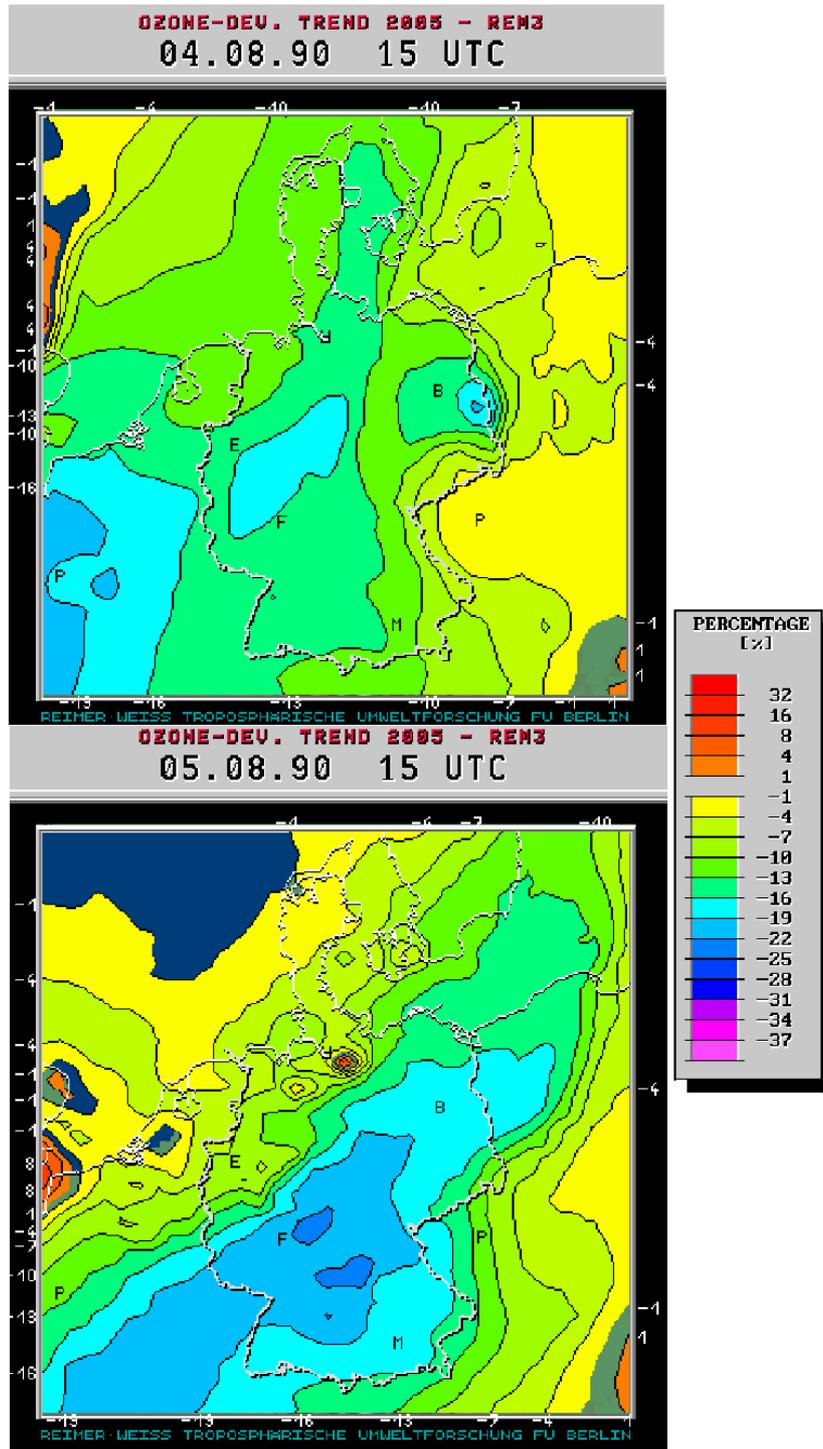
Gesamthaft wird festgestellt, daß mit **Maßnahmen gemäß Reduktionsszenario** die **Minderungsraten** bei den **nachmittäglichen Ozonkonzentrationen im Vergleich zum Trendszenario nochmals um -10%-Punkte bis -15%-Punkte gesteigert** werden könnten, was im groben Mittel einer Absenkung um rd -25% entspricht. Bei 300 µg/cbm wären dies bspw. rd. -75 µg/cbm.

Abb. 4-3.8: Mit REM3 für das Szenario "Trend 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 4.8. und am 5.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Auszug für den Bereich Deutsch-



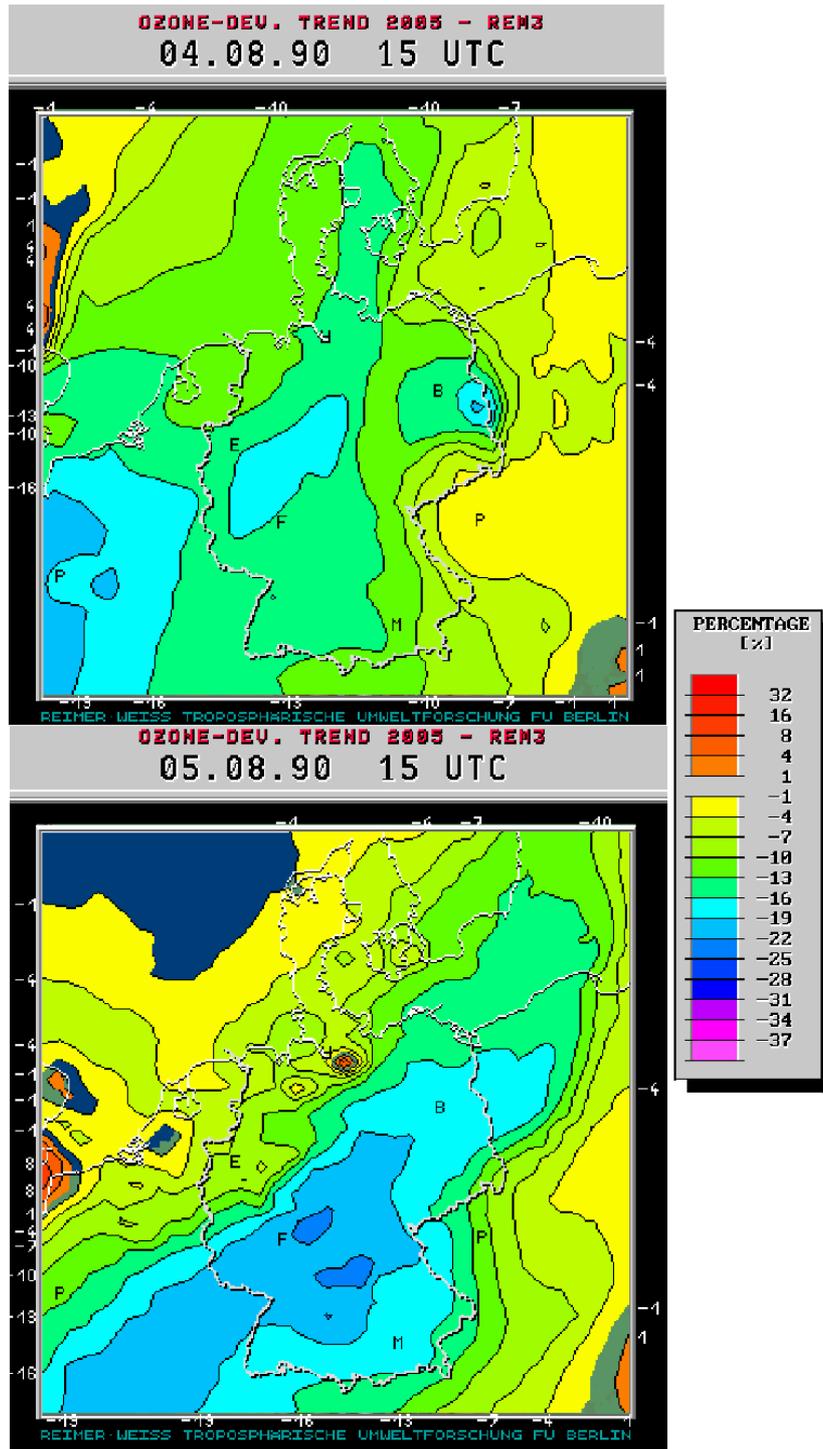
land und benachbarte Räume)

Abb. 4-3.8: Mit REM3 für das Szenario "Trend 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 4.8. und am 5.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Auszug für den Bereich Deutsch-



land und benachbarte Räume)

Abb. 4-3.8: Mit REM3 für das Szenario "Trend 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 4.8. und am 5.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Auszug für den Bereich Deutsch-



land und benachbarte Räume)

Abb. 4-3.9: Mit REM3 für das Szenario "Trend 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 4.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet)

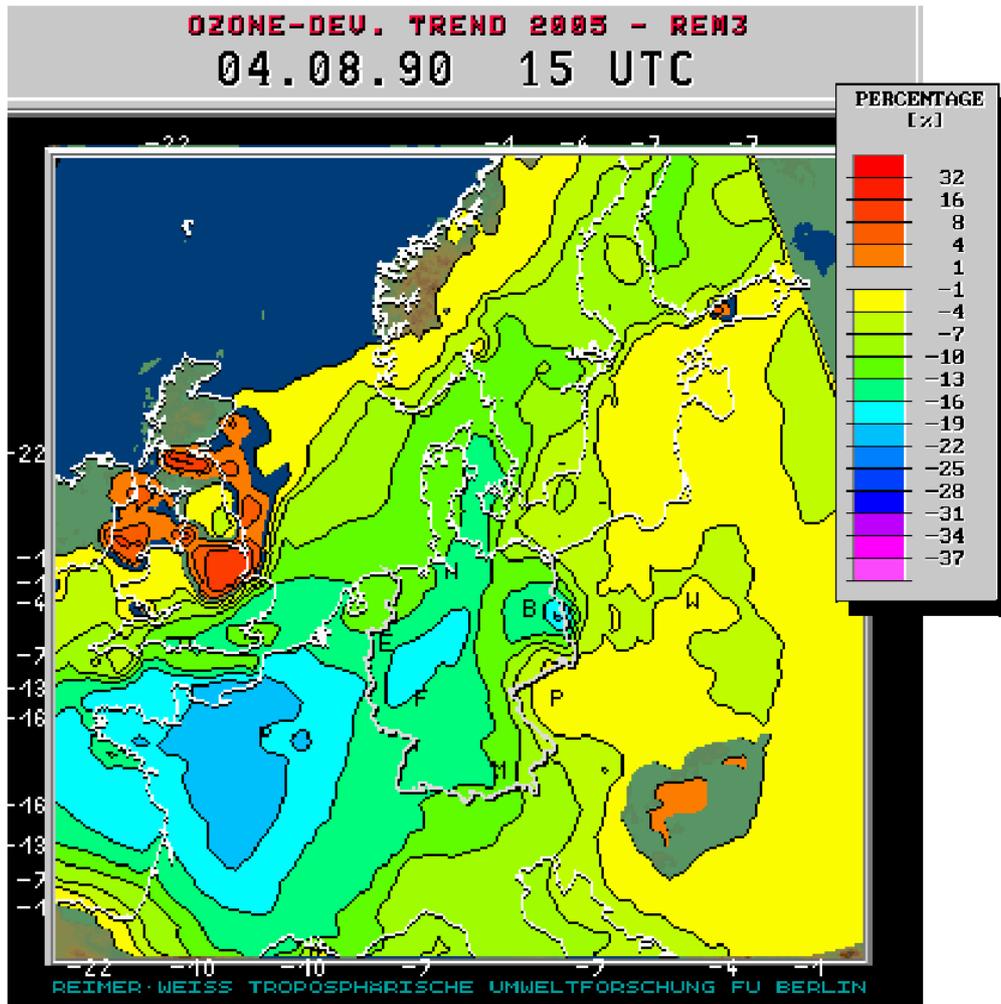


Abb. 4-3.10: Mit EURAD für das Szenario "Trend 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonkonzentration am 4.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (14.00 GMT, gesamtes Modellgebiet)

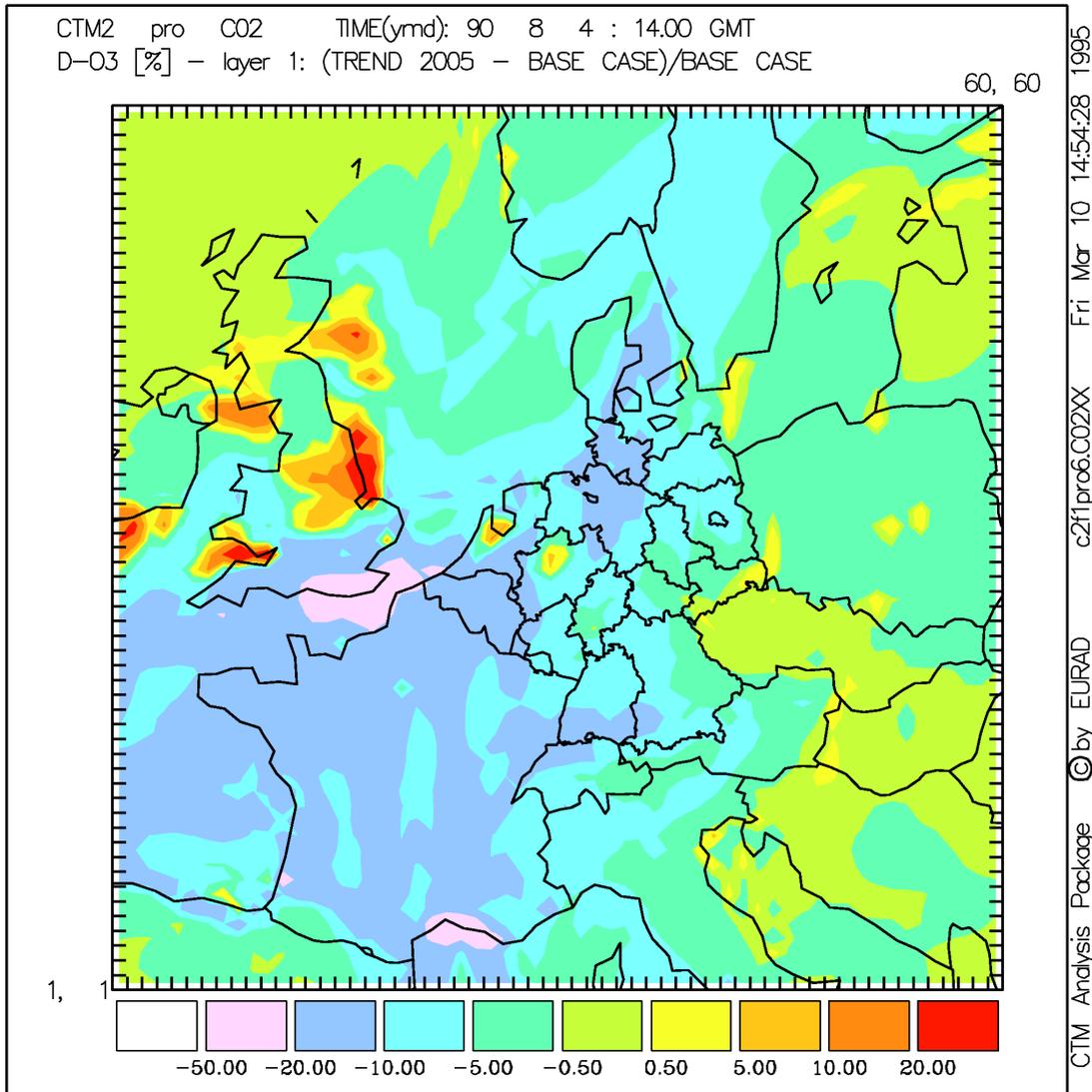
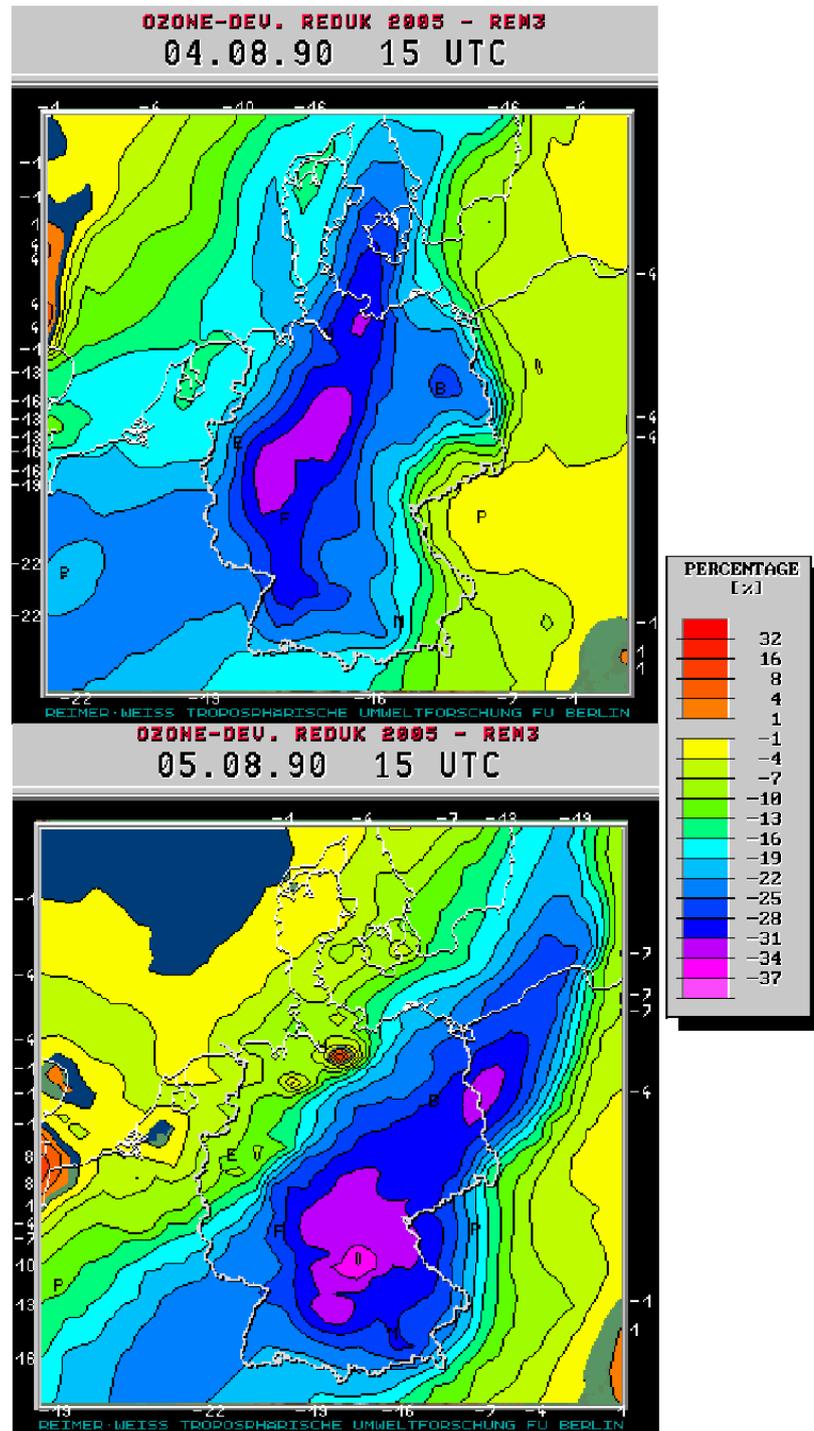
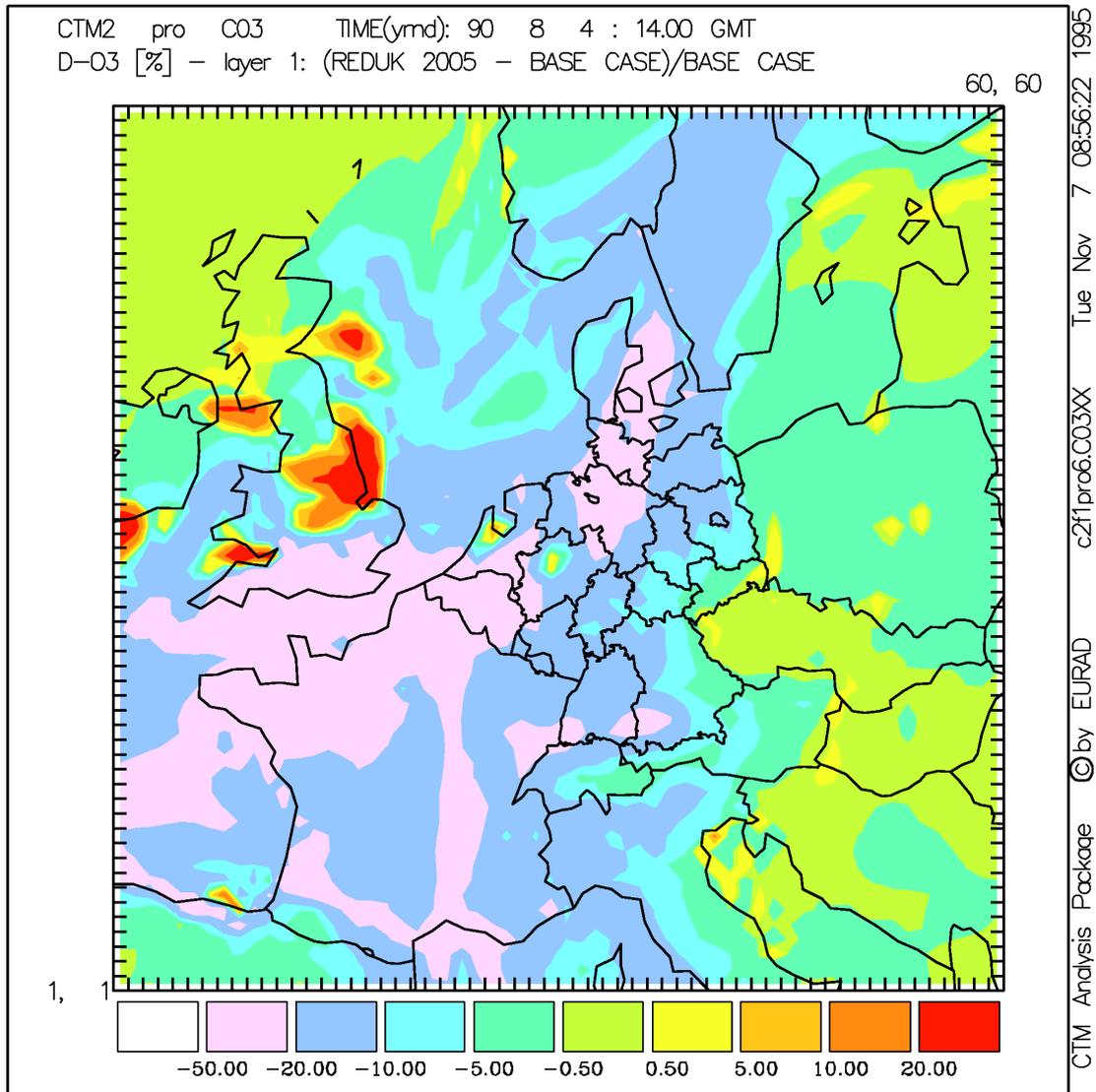


Abb. 4-3.11: Mit REM3 für das Szenario "Reduktion 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonkonzentration am 4.8. und 5.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel 14.00 bis 15.00 UTC, Bereich Deutschland und



benachbarte Räume)

Abb. 4-3.12: Mit EURAD für das Szenario "Reduktion 2005" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonkonzentration am 4.8.1990 im Vergleich zum Basislauf (14.00 GMT; gesamtes Modellgebiet)



## Zeitreihenanalysen

Aus den Ergebnissen der Berechnungen mit dem Modellsystem REM3 sind nachfolgend auszugswise einige Zeitreihenanalysen wiedergegeben. Sie stellen die Ergebnisse für zwei Gitterflächen in Deutschland dar, die von den zugrundeliegenden Emissionsstrukturen sehr unterschiedlich geprägt sind: der städtisch/industriell geprägte Raum Dortmund (NRW) und der ländlich geprägte Raum Deuselbach (Rheinl.-Pfalz). In einer dritten Abbildung werden noch die Berechnungen für das Gebiet der Gitterfläche Kollumerwaard (NL) gezeigt.

Im oberen Bild sind dabei jeweils die Modellrechnungen für den Basislauf (B90) und die beiden Szenarioläufe (T05 und R05) über den gesamten Untersuchungszeitraum dargestellt. Im unteren Bild sind die berechneten prozentualen Veränderungen gegenüber dem Basislauf aufgetragen.

Aus den Abbildungen wird unmittelbar ersichtlich, daß die **Minderungseffekte** an den besonders interessierenden Tagen (2.8. bis 5.8.) beim **Trendszenario** in der **Spitze bis -15%** und beim **Reduktionsszenario bis über -25%** betragen. Desweiteren zeigen diese Analysen, daß die **Effektivität von Minderungsmaßnahmen bei hohen Ozonkonzentrationen größer** ist als bei niedrigeren Konzentrationsniveaus. Seitens des Modellierers wird daraus gefolgert, daß die im Rahmen der Szenarien zu erwartenden **Emissionsminderungen nur in Perioden erhöhter photochemischer Aktivität zu deutlichen Absenkungen der Ozonwerte führen** würden.

Abb. 4-3.13: Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Dortmund" vom 22.7. bis 10.8.1990; Basislauf und Szenariorechnungen "Trend 2005" und "Reduktion 2005";  
 Oberes Bild: Absolutwerte in ppb. Unteres Bild: Prozentuale Veränderungen gegenüber dem Basislauf; Änderungen für Ozon-Konzentrationen kleiner als 40 ppb sind nicht dargestellt (Unterbrechung im Verlauf der Änderungskurven)

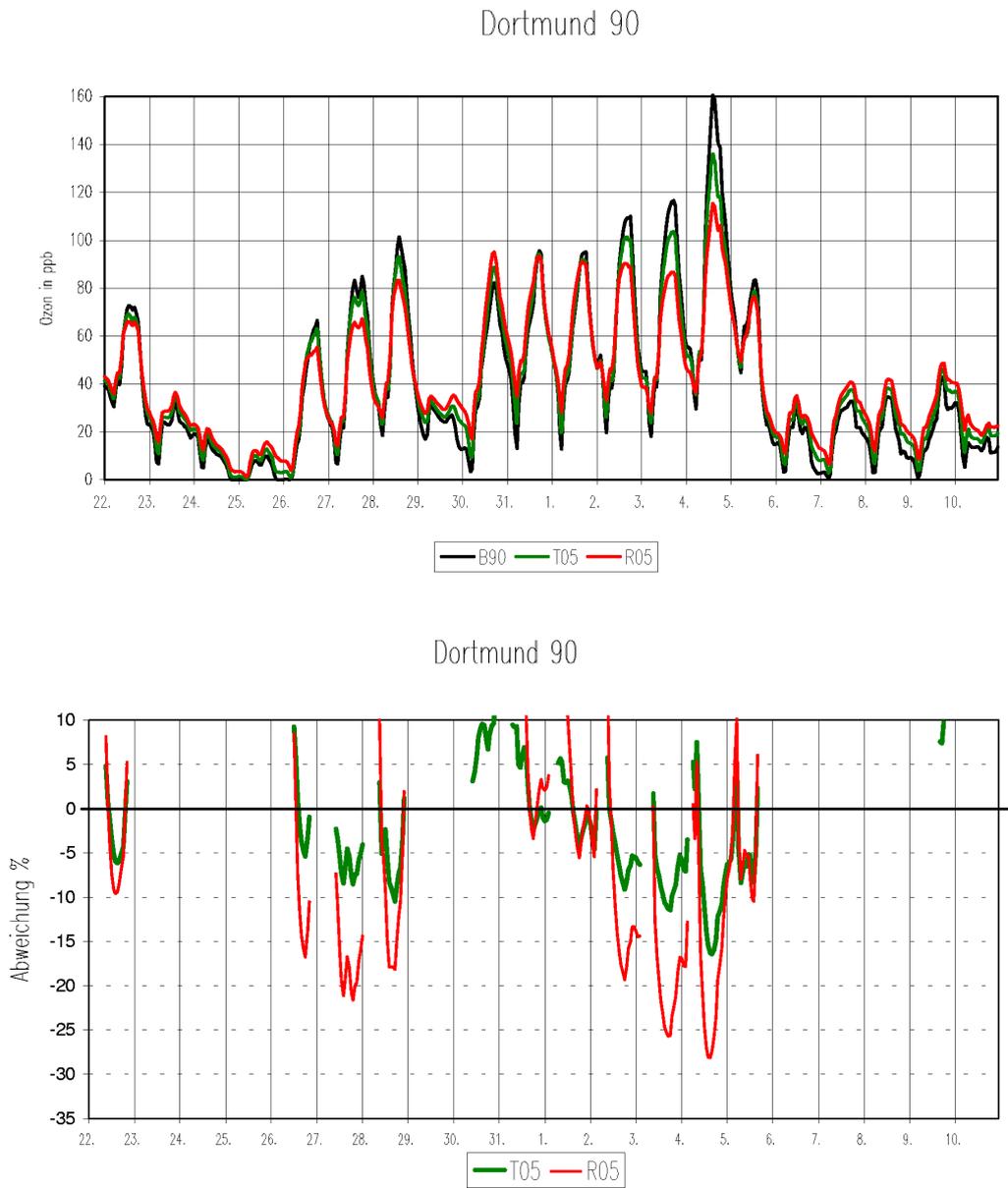
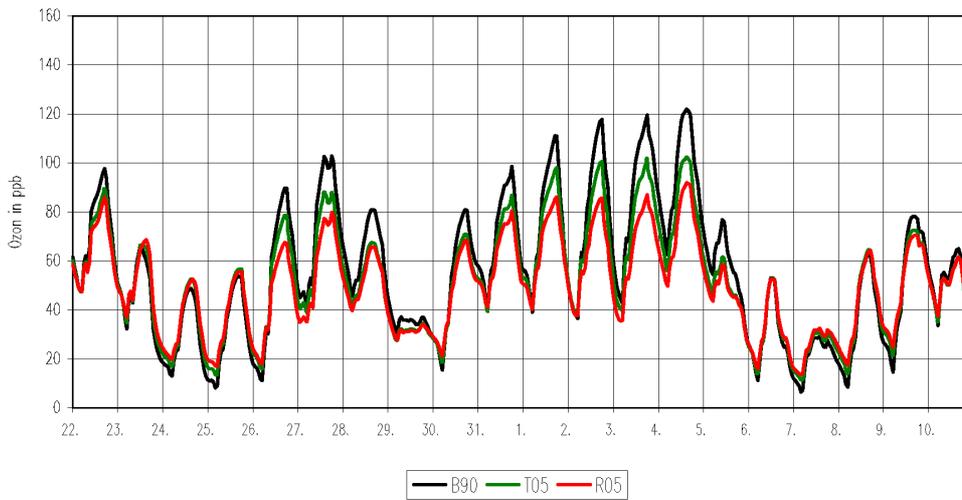


Abb. 4-3.14: Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Deuselbach (Rh.-Pf.)" vom 22.7. bis 10.8.1990; Basislauf und Szenariorechnungen "Trend 2005" und "Reduktion 2005";  
 Oberes Bild: Absolutwerte in ppb. Unteres Bild: Prozentuale Veränderungen gegenüber dem Basislauf; Änderungen für Ozon-Konzentrationen kleiner als 40 ppb sind nicht dargestellt (Unterbrechung im Verlauf der Änderungskurven)

Deuselbach 90



Deuselbach 90

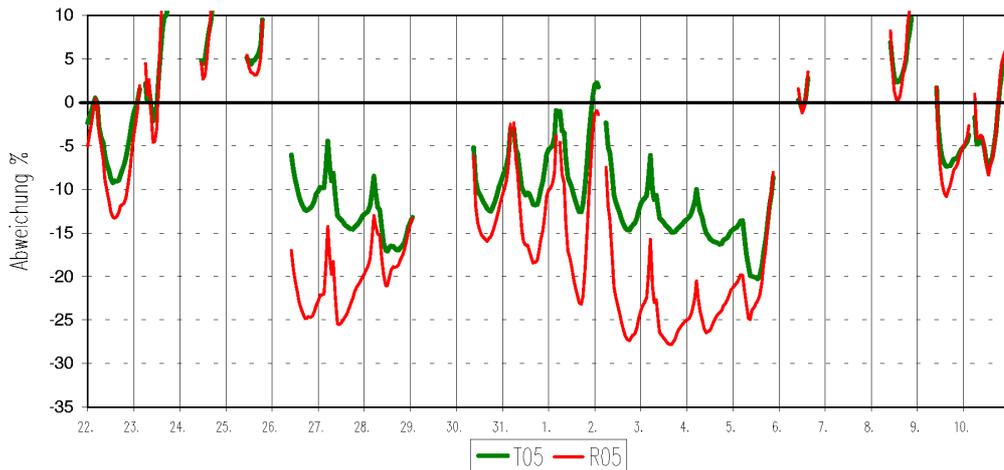
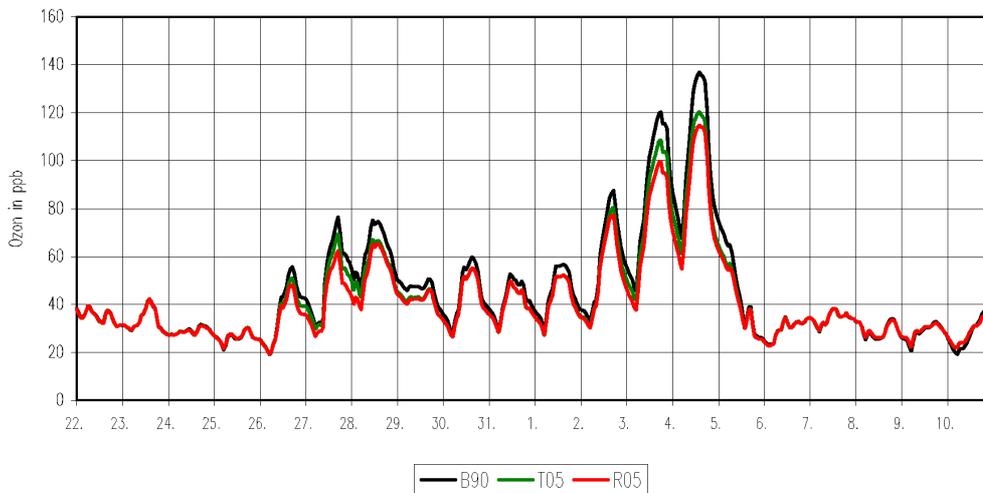


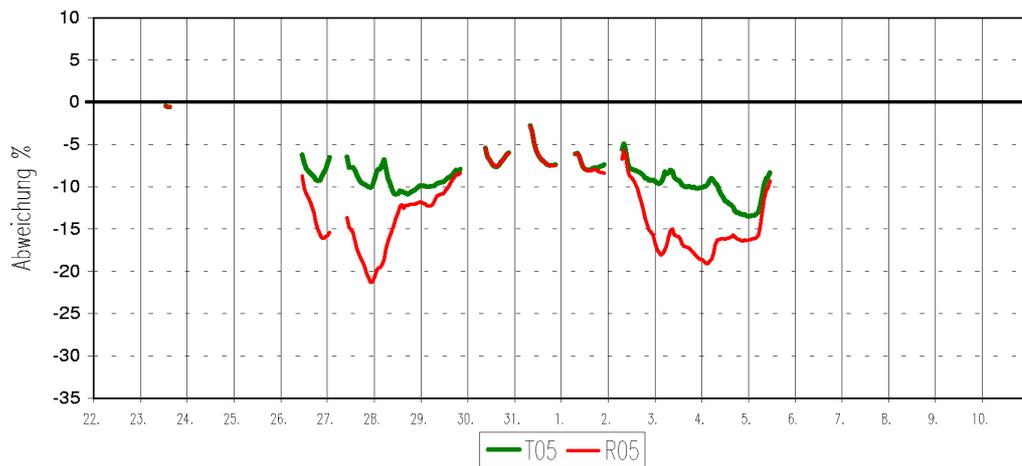
Abb. 4-3.15: Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Kollumerwaard" vom 22.7. bis 10.8.1990; Basislauf und Szenariorechnungen "Trend 2005" und "Reduktion 2005";

Oberes Bild: Absolutwerte in ppb. Unteres Bild: Prozentuale Veränderungen gegenüber dem Basislauf; Änderungen für Ozon-Konzentrationen kleiner als 40 ppb sind nicht dargestellt (Unterbrechung im Verlauf der Änderungskurven)

Kollumerwaard 90



Kollumerwaard 90



### Überschreitungshäufigkeiten von Gitterstundenschwellenwerten (Tab. 4.1 und 4.2)

Bei der Analyse der Überschreitungshäufigkeiten wird untersucht, in welcher Anzahl von Gitterstunden vorgegebene O<sub>3</sub>-Schwellenwerte überschritten werden. Die Anzahl der Gitterstunden gibt dabei an, in wievielen Stunden ein bestimmter Konzentrationsschwellenwert in einer Zelle des horizontalen Modellgitters (in einem Land oder im gesamten Untersuchungsgebiet) überschritten wird. Der Effekt von Minderungsmaßnahmen wird dann bei diesen Analysen anhand der Veränderung der Anzahl von Überschreitungshäufigkeiten eines bestimmten Schwellenwertes in der Szenariorechnung (z.B. Stunden >240 µg/cbm) im Vergleich zum Basislauf ermittelt.

Für den ausgewerteten Zeitraum vom 25.7. bis 10.8.1990 beträgt die maximal mögliche Anzahl von Gitterstunden in einer Zelle 24hx17=408 Gitterstunden/Zelle. Für das Gebiet Deutschland beträgt die Gesamtzahl der ausgewerteten Gitterstunden bei REM3 150.960 und bei EURAD 127.608.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a) Den nachstehenden Tabellen für das Gebiet Deutschland kann entnommen werden, daß bei REM3 der **180 µg/cbm-Schwellenwert** im Basislauf in 9.369 Stunden überschritten wurde. Im **Trendzenario** geht diese Anzahl von Überschreitungsstunden auf nur noch 2.859 Gitterstunden zurück,. Das entspricht einer **Abnahme von knapp -70%**. Im **Reduktionsszenario** werden nur noch 999 Überschreitungsstunden (>180 µg/cbm) modelliert; die **Abnahme** gegenüber dem Basislauf beträgt **-89%**.
- b) Die Auswertung auf der Basis eines **Schwellenwertes von 240 µg/cbm** - das entspricht dem in der Ozon-Verordnung (§ 40a BImSchG) festgelegten Schwellenwert - ergibt bei REM3 im Basislauf 702 Gitterstunden und in den Szenarioläufen **Trend** 195 Gitterstunden (= **-72%**) und **Reduktion** 35 Gitterstunden (= **-95%**).
- c) **Je niedriger** der betrachtete **Schwellenwert**, **desto geringer** sind die **erreichten Minderungsraten**. Bei einem Wert von **120 µg/cbm** (entspricht dem VDI-Grenzwert und dem Schweizerischen Grenzwert) ergeben die emissionsseitigen Reduktionen im Szenario Trend nur noch einen Rückgang der Anzahl der Gitterstundenüberschreitungen von -21% (Reduktion: -44%).
- d) Beim **Vergleich** der Tabellen für EURAD und REM3 fällt auf, daß die errechneten **Minderungsraten** für >180 µg/cbm und >240 µg/cbm bei beiden Modellsystemen in der **gleichen Größenordnung** liegen, wobei die Minderungsraten bei EURAD noch etwas höher liegen als bei REM3.

Tab. 4.1: REM3 - Analyse der Minderungswirkungen der Emissionsszenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005" auf der Basis der berechneten Gitterstundenüberschreitungen für die Episode 1990

Ozon in ppb	REM3 - Gebiet Deutschland			
		Basislauf 1990	Trend 2005	Reduktion 2005
> 60 ppb	GS %	43.566 28,9	34.234 -21,4	24.267 -44,3
> 70 ppb	GS %	29.242 19,4	19.300 -34,0	9.794 -66,5
> 80 ppb	GS %	18.169 18,6	8.443 -53,5	2.899 -84,0
<b>&gt; 90 ppb</b>	<b>GS</b> <b>%</b>	<b>9.369</b> <b>6,2</b>	<b>2.859</b> <b>-69,5</b>	<b>999</b> <b>-89,3</b>
> 100 ppb	GS %	3.961 2,6	1.005 -74,6	425 -89,3
> 110 ppb	GS %	1.628 1,1	427 -73,8	157 -90,4
<b>&gt; 120 ppb</b>	<b>GS</b> <b>%</b>	<b>702</b> <b>0,5</b>	<b>195</b> <b>-72,2</b>	<b>35</b> <b>-95,0</b>
> 130 ppb	GS %	333 0,2	69 -79,3	13 -96,1
> 140 ppb	GS %	170 0,1	21 -87,6	2 -98,8
> 150 ppb	GS %	81 0,05	7 -91,4	1 -98,8

Anm.: Anzahl der Gitterstunden (GS), in denen die angegebenen Ozonkonzentrationen in Deutschland vom 25.07. bis zum 10.08.1990 für den Basislauf und die beiden langfristigen Szenarien Trend 2005 und Reduktion 2005 in der Bodenschicht überschritten werden. Die Prozentangaben beim Basislauf bezeichnen den Anteil der Gitterstunden an der maximal möglichen Anzahl von Gitterstunden, die sich aus der Multiplikation von 408 Stunden (25.7.-10.8.) mit 370 ausgewerteten Zellen des Horizontalgitters in Deutschland ergibt (= 150.960 Gitterstunden). Die Prozentangaben bei den Szenarien bezeichnen die Änderung der entsprechenden Überschreitungshäufigkeit im Vergleich zum Basislauf.

- e) Aus den Tabellen geht desweiteren hervor, daß die beiden Modellsysteme bei den hohen Ozonkonzentrationen (>180 µg/cbm) zu **unterschiedlich hohen Anzahlen der berechneten Überschreitungsstunden** gelangen. Diese Unterschiede werden teilweise durch die unterschiedliche Maschenweite (bei EURAD etwas größer als bei REM3) bedingt. Desweiteren liegen bei EURAD, wie die flächenbezogenen Auswertungen (siehe oben) gezeigt haben, die Modellierungen der hohen O<sub>3</sub>-Spitzenkonzentrationen niveauseitig niedriger als bei REM3. Dieser Umstand trägt

ebenfalls dazu bei, daß die bei EURAD ausgewiesenen Minderungsraten der Gitterstunden-Überschreitungen bei den hohen Schwellwerten um einiges höher ausfallen als bei REM3.

Tab. 4.2: EURAD - Analyse der Minderungswirkungen der Emissionsszenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005" auf der Basis der berechneten Gitterstunden-überschreitungen für die Episode 1990

Ozon in ppb	EURAD - Gebiet Deutschland			
		Basislauf 1990	Trend 2005	Reduktion 2005
> 60 ppb	GS	22.332	14.855	7.356
	%	17,5	-33,5	-67,1
> 70 ppb	GS	9.310	4.160	1.484
	%	7,3	-55,3	-84,1
> 80 ppb	GS	3.279	1.030	313
	%	2,6	-68,6	--0,5
<b>&gt; 90 ppb</b>	<b>GS</b>	<b>1.010</b>	<b>274</b>	<b>65</b>
	<b>%</b>	<b>0,8</b>	<b>-72,9</b>	<b>-93,6</b>
> 100 ppb	GS	344	63	18
	%	0,3	-81,7	-94,8
> 110 ppb	GS	96	22	5
	%	0,1	-77,1	-94,8
<b>&gt; 120 ppb</b>	<b>GS</b>	<b>27</b>	<b>4</b>	<b>3</b>
	<b>%</b>	<b>0,02</b>	<b>-85,2</b>	<b>-88,9</b>
> 130 ppb	GS	7	3	2
	%			

Anm.: Anzahl der Gitterstunden (GS), in denen die angegebenen Ozonkonzentrationen in Deutschland vom 25.07. bis zum 11.08.1990 für den Basislauf und die beiden langfristigen Szenarien Trend 2005 und Reduktion 2005 in der Bodenschicht überschritten werden. Die Prozentangaben beim Basislauf bezeichnen den Anteil der Gitterstunden an der maximal möglichen Anzahl von Gitterstunden von 127.608 im Gebiet Deutschland. Die Prozentangaben bei den Szenarien bezeichnen die Änderung der entsprechenden Überschreitungshäufigkeit im Vergleich zum Basislauf.

#### **4.4 Ermittlung der Wirkungen von temporären Minderungsmaßnahmen durch Simulationsrechnungen für die Ozonepisode 1994**

##### **4.4.1 Simulation der Oxidationbildung während des Zeitraums vom 23.07.-08.08.1994 (Basislauf)**

(1) Wie oben bereits ausgeführt, setzt der Einsatz von modellgestützten photochemischen Ausbreitungsrechnungen zur immissionsseitigen Bewertung von Einzelmaßnahmen und Minderungsstrategien den Nachweis voraus, daß das Modellsystem in der Lage ist, die gemessenen Ozonkonzentrationen in der betrachteten Episode hinreichend genau zu simulieren. Der Nachweis erfolgt durch eine Simulation des Istzustandes während des ausgewählten Simulationszeitraums (im sog. Basislauf) und dem anschließenden Vergleich der Rechenergebnisse des Basislaufs mit vorliegenden Messungen.

(2) Den folgenden Erläuterungen der mit REM3 und EURAD durchgeführten Basisläufe für die Ozonepisode Sommer 1994 liegen die im jeweiligen Basislauf berechneten nachmittäglichen Ozonfeldverteilungen sowie die Vergleiche von berechneten und gemessenen Ozon-Zeitverläufen an ausgewählten Stationen zugrunde. In der Ozonepisode Sommer 1994 wurden vor allem in Hessen und in Ostdeutschland mehrfach hohe Ozonkonzentrationen gemessen.

Bei den Feldverteilungen werden für diese Episode schwerpunktmässig die beiden Tage 27.07. und 28.08.1994 betrachtet. Am 27.07.1994 liegt Mitteleuropa bei schwachen Luftbewegungen unter dem Einfluß subtropischer Luft mit entsprechend hohen Temperaturen. Am 28.07. bleibt Deutschland unter dem Einfluß feucht-heißer Luft subtropischen Ursprungs, wobei eine Kaltfront am späten Nachmittag den westdeutschen Raum erreicht und dort einen gewitterbegleiteten Luftmassenwechsel einleitet. Am 26.07. wird in Hessen am Nachmittag der erste Alarm wegen zu hoher Ozonwerte ausgelöst. (Zum weiteren, vergl. komplexen Verlauf der meteorologischen Bedingungen in dieser Episode siehe Abschnitt 4.2.)

Bei den modellseitig simulierten Ozonverteilungen wird das Stundenmittel in der Zeit von 14 bis 15 UTC (16 bis 17 Uhr MESZ) betrachtet. Für die Vergleiche mit Messungen werden die Ozonmessungen aus den Meßnetzen des Umweltbundesamtes sowie der Bundesländer Hessen und Nordrhein-Westfalen herangezogen. Die Zeitreihen beschreiben den gesamten Simulationszeitraum.

### **Modellierte Ozonfeldverteilungen (Abb. 4-4.1 bis 4-4.3)**

(3) Die mit dem Modellen simulierten Ozonkonzentrationen sind in den nachfolgenden Abbildungen der berechneten bodennahen Ozonverteilungen für die beiden Tage 27.07. und 28.07.1994 dargestellt.

Insbesondere für den 28.07. werden modellseitig bei REM3 hohe O<sub>3</sub>-Konzentrationen für weite Teile Deutschlands berechnet. Besonders hohe Werte werden dabei am 28.07. für das mittlere/südliche Ostdeutschland und für die Leebereiche des Ruhrgebietes berechnet. Niedrigere Werte werden lediglich für den äußersten Norden und den äußersten Süden Deutschlands berechnet. Die modellierten Spitzenwerte erreichen in den erstgenannten Räumen ein Niveau von 220-µg/cbm bis 260-µg/cbm. Am 29.07 kommt es danach in Westdeutschland wegen kühlerer Luft und Bewölkung kaum zur Ozonbildung. In Ostdeutschland werden hingegen nochmals deutlich mehr als 200 µg/cbm Ozon berechnet, mit Maxima bis 280 µg/cbm im östlichen Sachsen.

Abb. 4-4.1: Mit REM3 berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 27.07. und am 28.07.1994, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Bereich Deutschland und benachbarte Räume

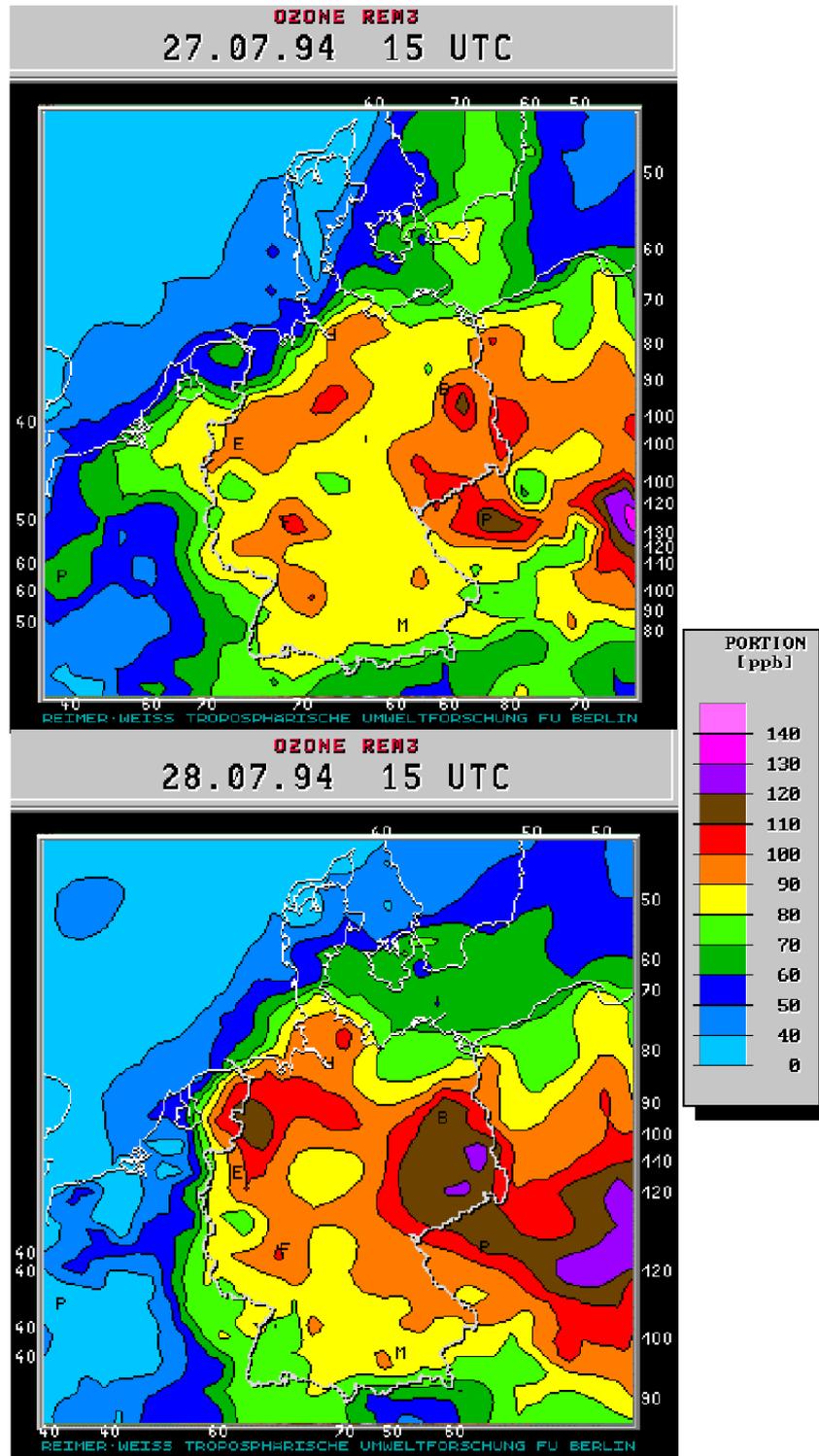


Abb. 4-4.2: Mit EURAD berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 27.07.1994, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet

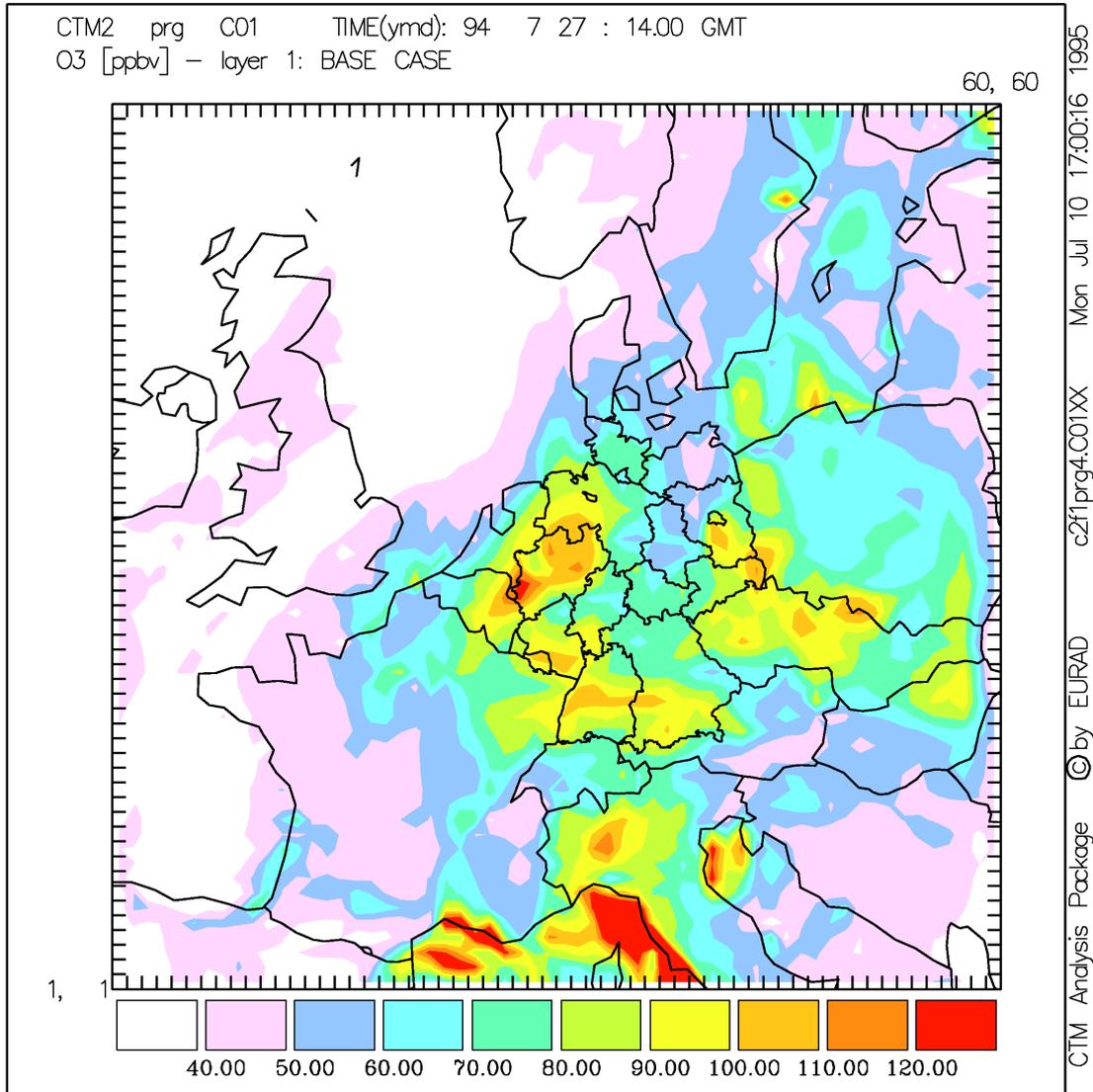
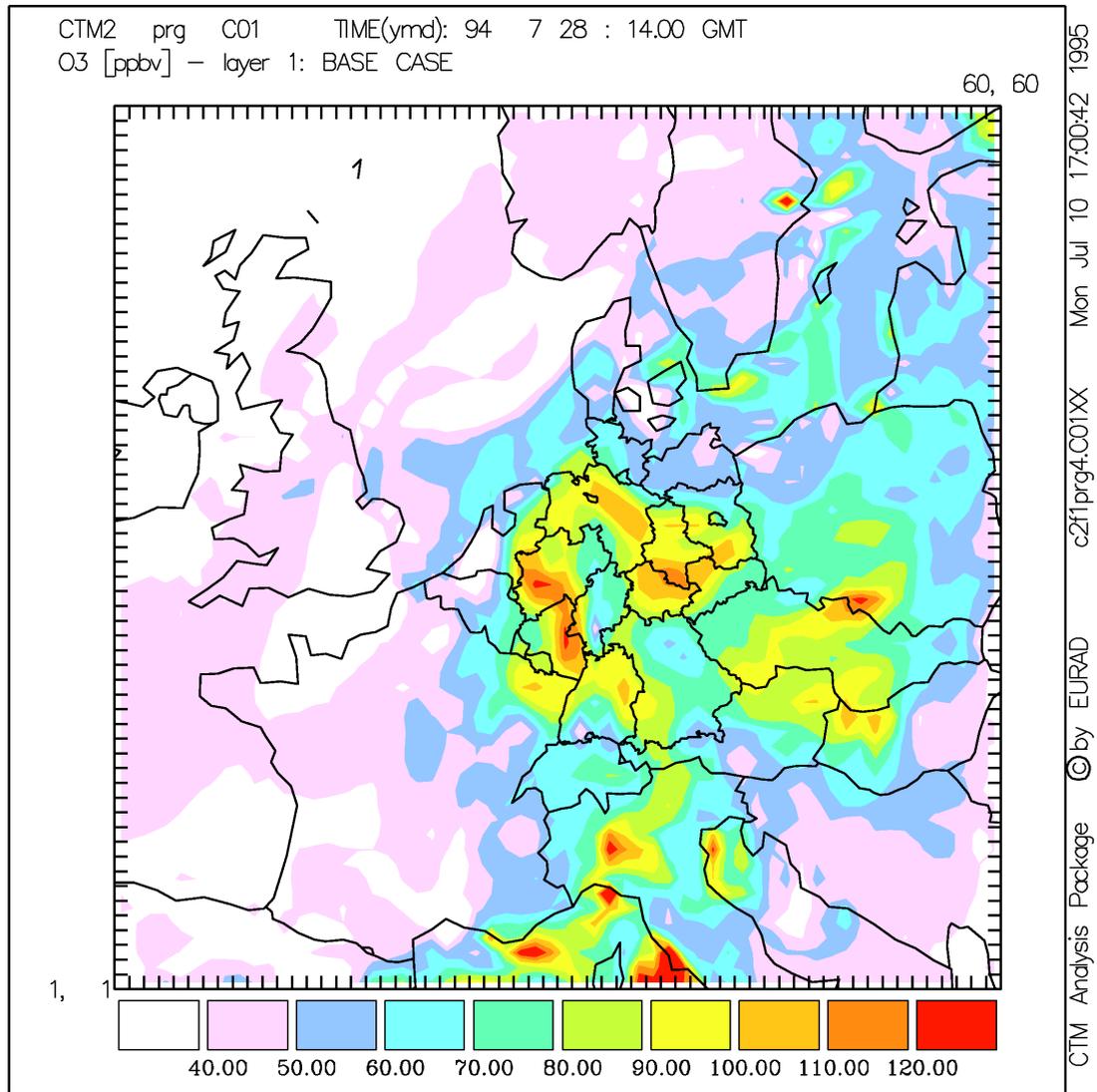


Abb. 4-4.3: Mit EURAD berechnete bodennahe Ozonverteilung in ppb am 28.07.1994, Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet



#### Zeitreihenanalysen (Abb. 4-4.4 bis 4-4.7)

(4) Seitens der Modellierer wurden Zeitreihenanalysen für insgesamt 22 Meßstationen durchgeführt. Die Lage der im Bereich von Deutschland berücksichtigten 17 Meßstationen ist oben in Abb. 4-3.5 dargestellt.

Aus Platzgründen werden hier (auszugsweise) nur einige wenige dieser Analysen wiedergegeben:

- EURAD-Modellrechnungen: Vergleiche der gemessenen Werten an den Stationen Lindenberg, Kyritz, Zingst, Eifel-Lammersdorf, Essen-Bredeney und Unna mit den für die zugehörigen Gitterflächen berechneten Ozonkonzentrationen (Abb. 4-4.4 und 4-4.5).
- REM3-Modellrechnungen: Vergleiche der gemessenen Werten an den Stationen Angermünde, Lindenberg, Viernheim und Darmstadt mit den für die zugehörigen Gitterflächen berechneten Ozonkonzentrationen (Abb. 4-4.6 und 4-4.7).

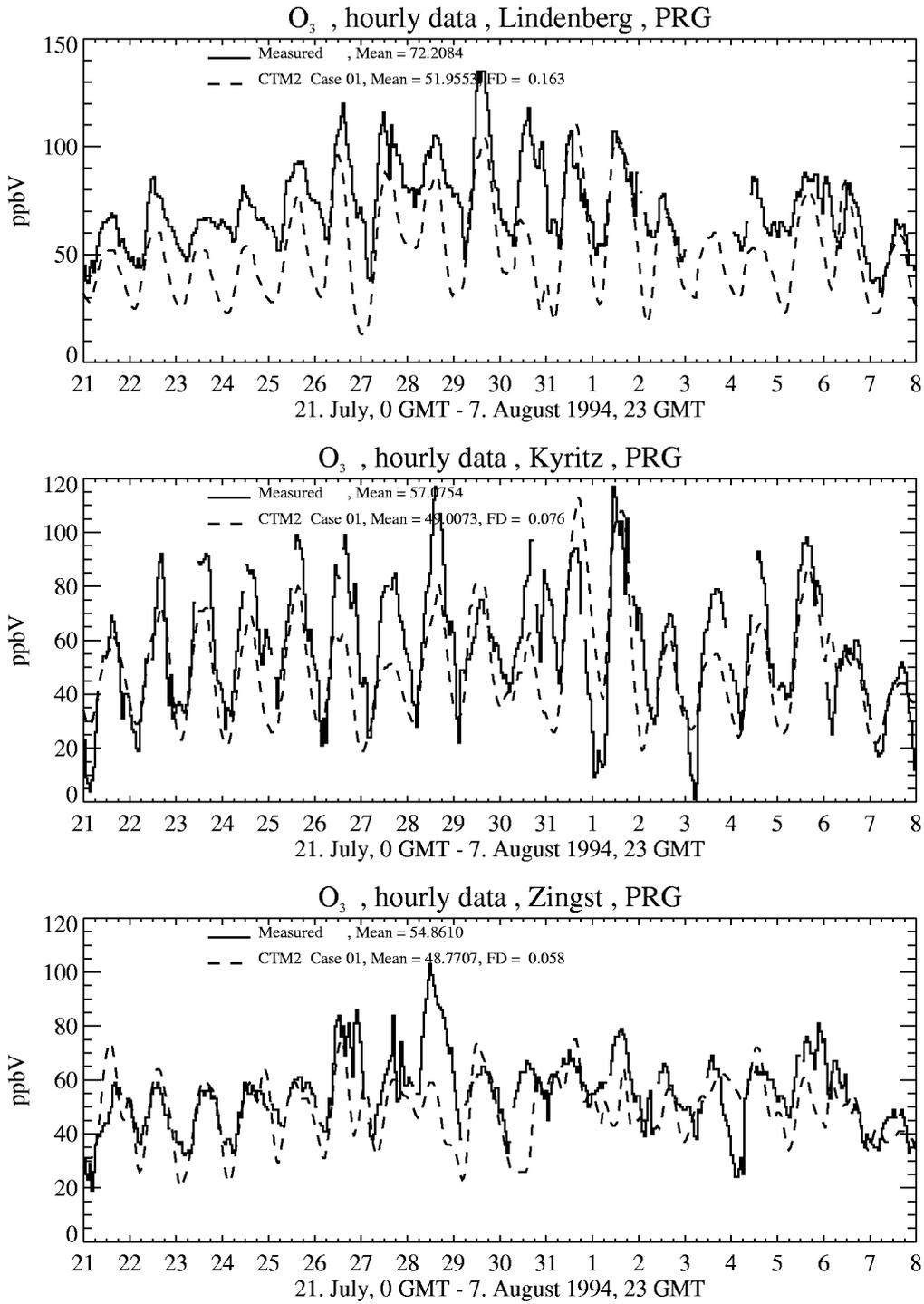
(5) Die berechneten und gemessenen Werte in den hier dargestellten Fällen zeigen, daß mit Hilfe der Modelle die während des gesamten rund 2,5-wöchigen Untersuchungszeitraums gemessenen Ozonkonzentrationen sowohl in der großräumigen Verteilung als auch in der Höhe teilweise sehr gut, teilweise zufriedenstellend und teilweise weniger zufriedenstellend reproduziert werden können.

Ebenso wie bei der Simulation der Episode 1990 sind auch im Falle der Episode 1994 in einzelnen Regionen bzw. in Teilabschnitten der Episode sowohl gute Übereinstimmungen als auch erhebliche Abweichungen festzustellen. Auch hier bestätigt sich, daß die Übereinstimmung mit gemessenen Konzentrationen umso schwieriger erreicht wird, je komplexer das Wettergeschehen und die Dynamik (z.B. Frontendurchgänge). Desweiteren muß auch in diesem Zusammenhang explizit darauf hingewiesen werden, daß Vergleiche von Punktmessungen mit berechneten durchschnittlichen Konzentrationen für Gebiete mit einer Ausdehnung von mindestens 30km \* 30km aus naheliegenden methodischen Gründen stets problematisch und nur begrenzt aussagefähig sind.<sup>3</sup>

---

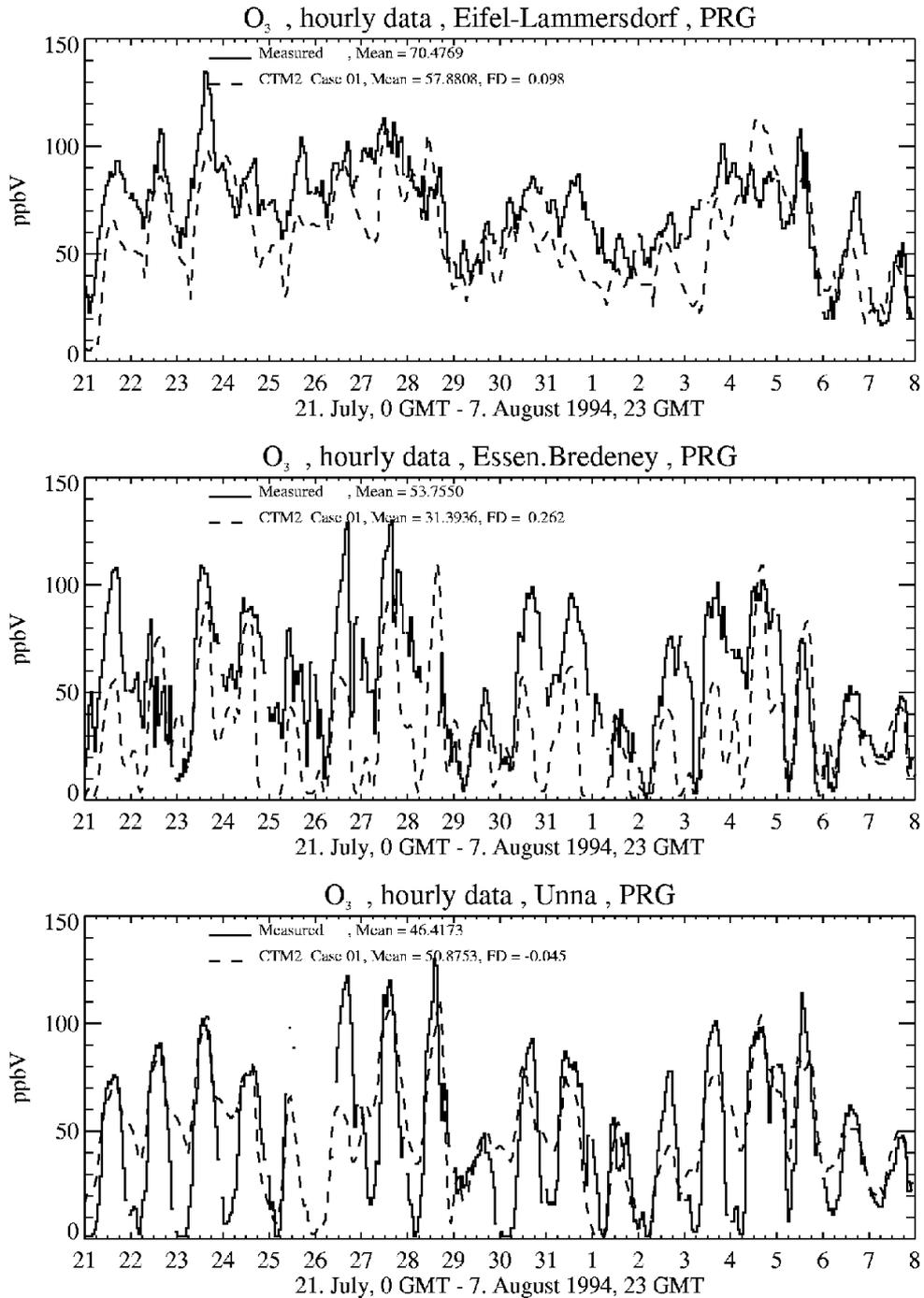
<sup>3</sup> Eine weitere Möglichkeit des Vergleichs zwischen berechneten und gemessenen Ozonkonzentrationen eröffnet möglicherweise die im Umweltbundesamt durchgeführte Interpolation von Meßdaten aus den Meßnetzen der Bundesländer und des UBA. Mit Hilfe dieser Interpolation wird eine bundesweite Ozonfeldverteilung während der einzelnen Tage der Episode für jede Tagesstunde ausgewiesen. Die verwendete Methodik bei dieser Interpolation schränkt allerdings die flächenbezogene Aussagefähigkeit ein. Die Prüfung, inwieweit diese Arbeiten des UBA zur Beurteilung der Qualität von Basisläufen mit großräumigen photochemischen Ausbreitungsmodellen herangezogen werden können, ist derzeit noch nicht abgeschlossen.

Abb.4-4.4: EURAD - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Lindenberg, Kyritz und Zingst mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1994



Copyright by EURAD Wed Nov 8 15:29:01 1995

Abb.4-4.5: EURAD - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Eifel-Lammersdorf, Essen-Bredeney und Unna mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1994



Copyright by EURAD Wed Nov 8 16:13:00 1995

Abb.4-4.6: REM3 - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Angermünde und Lindenberg mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1994

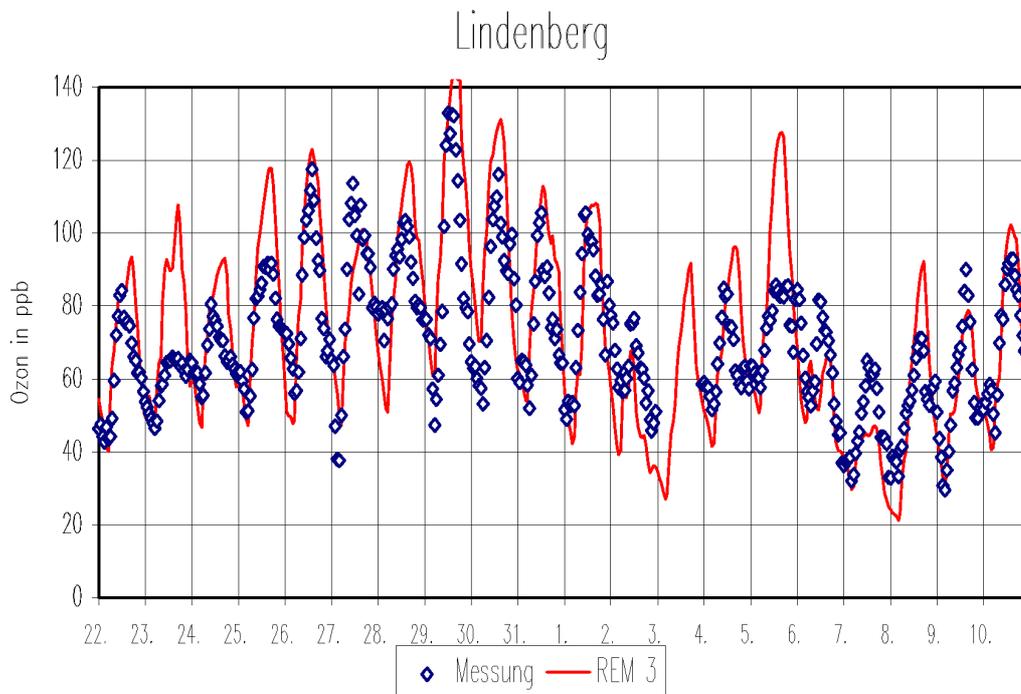
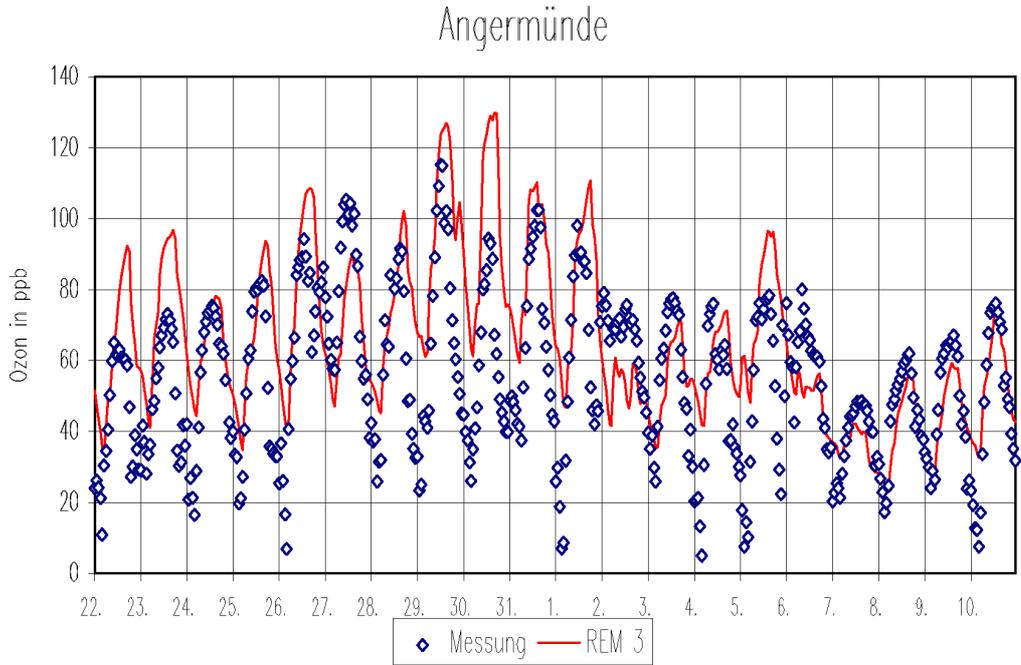
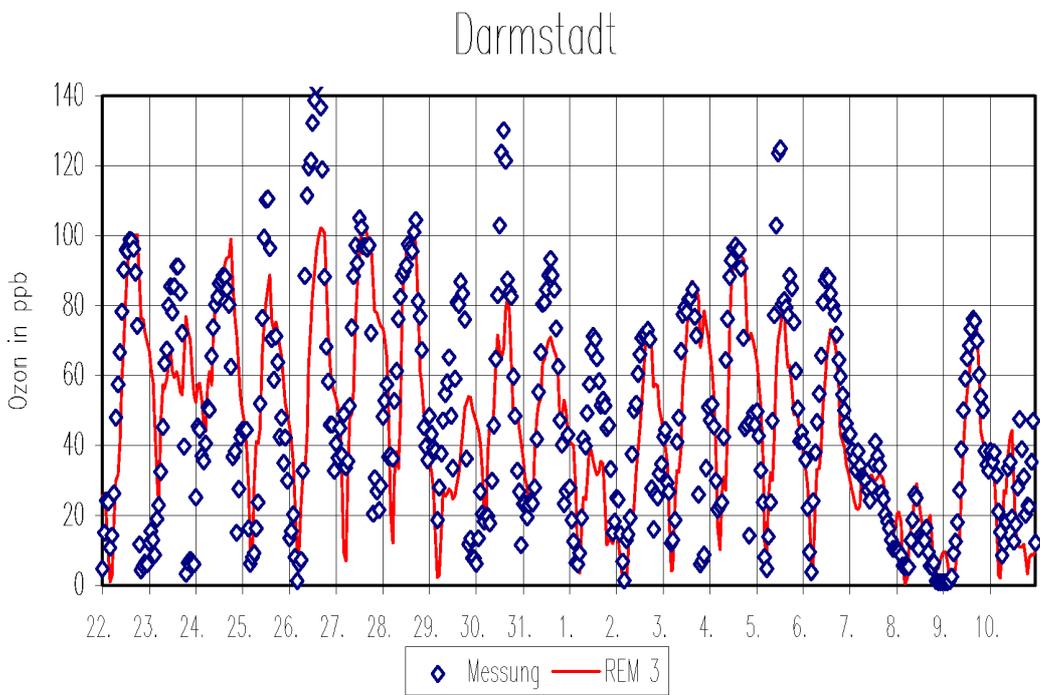
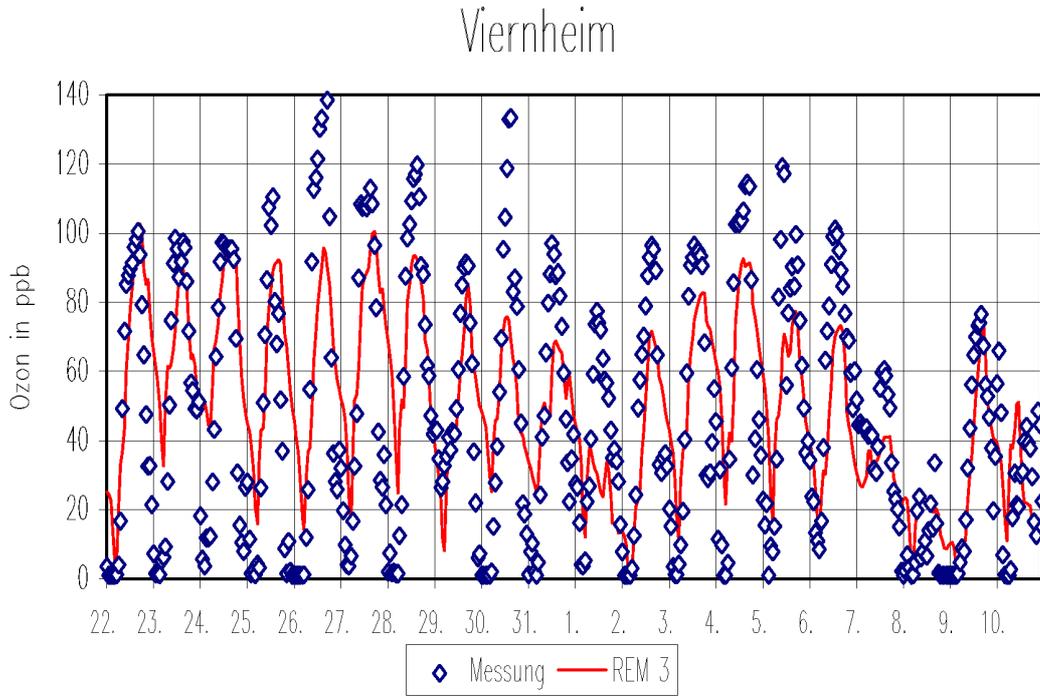


Abb.4-4.7: REM3 - Vergleich von Ozon-Messungen an den Stationen Viernheim und Darmstadt mit modellierten Werten für die entsprechenden Gitterflächen für die Episode 1994



#### 4.4.2 Auswirkungen temporärer Maßnahmen auf die Ozonkonzentrationen in der Episode 23.07.-08.08.1994

(1) Die Ermittlung der Auswirkungen von langfristig wirksamen Minderungsmaßnahmen erfolgt auch für diese Episode mit beiden Modellen durch Simulationsrechnungen, bei denen ausschließlich die emissionsseitigen Inputdaten der anthropogenen Ozon-Vorläufersubstanzen  $\text{NO}_x$  und VOC variiert werden. Die Variation wird seitens der temporären Szenarien T1 - T6 (siehe oben) vorgegeben.

Alle anderen Inputparameter bleiben unverändert, mithin auch die berechneten Emissionen aus biogenen Quellen. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang wiederum, daß im Rahmen dieses Vorhaben bei beiden Modellen die zugrundeliegende Emissionsdatenbasis 1994 weitgehend identisch ist (gleiche nationale Gesamtsummen, gleiche Aufteilungen auf Hauptgruppen, soweit als möglich abgestimmte regionale Verteilungen).

- (2) Die **Darstellung der Ergebnisse** der Berechnungen erfolgt in Form von
- **Flächenbezogenen großräumigen Darstellungen** der **prozentualen Minderungen** der Ozonkonzentrationen an zwei ausgewählten Tagen, 27.07. und 28.08.1994, in der Zeit von 16 bis 17 Uhr MESZ;
  - **Zeitreihenanalysen** für **ausgewählte Gitterflächen**, in denen die Ergebnisse der berechneten Konzentrationen im Basislauf mit den Ergebnissen der Berechnungen in den Szenarioläufen T1 - T6 verglichen werden;
  - **Gitterstundenanalysen**, in denen die Häufigkeiten der Überschreitungen von bestimmten Schwellwerten ( $180 \mu\text{g}/\text{cbm}$ ;  $240 \mu\text{g}/\text{cbm}$ ) in allen Gitterflächen für den Bereich Deutschland im Basislauf und in den beiden Szenarioläufen verglichen werden.

(3) Seitens der beiden Modellierer wird hierzu ein sehr umfangreiche Dokumentation der Ergebnisse (mit u.a. zahlreichen Farbkarten) vorgelegt. Es erfolgt im diesem Bericht aus Platzgründen nur eine auszugsweise Darstellung.

#### **Flächenbezogene großräumige Minderungseffekte (Abb. 4-4.8 bis 4-4.19)**

Die Ergebnisse der Berechnungen beider Modelle kommen bei den berechneten prozentualen Veränderungen der nachmittäglichen bodennahen Ozon-Konzentrationen im wesentlichen zu den gleichen Befunden:

**1. T-1 (Bundesweite Tempolimits: NO<sub>x</sub>=-15% und VOC=-1%)**

Die Minderungen der Ozonkonzentrationen erreichen am ersten Tag nachmittägliche Abnahmen, die unter -5% bleiben, größtenteils sind es -2% bis -4%. Am zweiten Tag sind die Abnahmen etwas höher und reichen bis -6% (vgl. Abb. 4-4.8 und 4-4.14).

**2. T-2 (Innerörtliche Fahrverbote in ausgewählten Ballungsräume: NO<sub>x</sub>=-2% und VOC=-5%, beides bezogen auf das Gebiet Gesamtdeutschland)**

Die emissionsseitigen Minderungen dieser Maßnahme wirken regional sehr unterschiedlich: in den Ballungsräumen sind die Abnahmen der Vorläuferemissionen erheblich; bundesweit bedeutet dies aber lediglich eine sehr geringe Abnahme. Die Berechnungen ergeben nur sehr geringe Minderungen gegenüber den im Basislauf berechneten nachmittäglichen Ozonwerten. Sie erreichen maximal -2% (vgl. Abb. 4-4.9 und 4-4.15).

Zu beachten ist hierbei allerdings, daß die Großräumigkeit der eingesetzten Gittermodelle mit Maschenweiten von 30km bzw. 36km im Grunde nur sehr eingeschränkt Aussagen unterhalb dieser Gitterauflösung erlaubt (das hier untersuchte Fahrverbot trifft zu wenige Zellen des Gitters). Es wird daher gerade bei stärker regional oder gar lokal ausgerichteten Maßnahmen anhand der in Stufe B dieses Forschungsvorhabens vorgesehenen Rechnungen für einzelnene Modellregionen mit weitaus höherer räumlicher Feinauflösung (4km; 2km) zu prüfen sein, ob nicht doch mit derartigen Maßnahmen auch regional differenzierte Minderungseffekte einhergehen.

**3. T-3 (Bundesweite Tempolimits und innerörtliche Fahrverbote in Ballungsräumen: NO<sub>x</sub>=-16% und VOC=-5%)**

Da die Effekte des Szenario T-2 großräumig nur sehr geringfügig berechnet werden, ergeben sich für das Szenario T-3 (Addition von T-1 und T-2) im wesentlichen die beim Szenario T-1 berechneten prozentualen Abnahmen. Lediglich im Südwesten Deutschlands werden leicht höhere Abnahmen mit bis zu -7% erreicht (vgl. Abb. 4-4.10 und 4-4.16).

**4. T-4 (Szenario T-3 plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen: NO<sub>x</sub>=-19% und VOC=-12%)**

Bei diesem Maßnahmenbündel sind die erreichten emissionsseitigen Minderungen, bezogen auf die anthropogenen Quellen, vor allem bei VOC höher als im Szenario T-3. Die mit REM3 berechneten Ozonabnahmen sind sichtbar höher als beim Szenario T-3;

sie erreichen am zweiten Tag in weiten Teilen Deutschlands Werte um -5% bis -8% (vgl. Abb. 4-4.11 und 4-4.17).

**5. T-5 (Bundesweites Fahrverbot: NO<sub>x</sub>=-29% und VOC=-32%)**

Die Berechnungen ergeben für diese temporäre Maßnahme großflächige Minderungseffekte, die im Bereich von -5% bis -10% liegen. Die Effektivität der Maßnahme ist am zweiten Tag höher als am ersten Tag (vgl. Abb. 4-4.12 und 4-4.18).

**6. T-6 (Szenario T-5 plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen:  
NO<sub>x</sub>=-37% und VOC=-39%)**

Im Vergleich zum Szenario T-5 sind die Änderungen der berechneten nachmittäglichen Ozonkonzentrationen am ersten Tag der Maßnahmeneinleitung relativ geringfügig. Am zweiten Tag ergeben sich hingegen deutliche Verstärkungen der Minderungseffekte, wie aus der Gegenüberstellung der Abb. 4-4.12 und 4-4.13 (REM3) ersichtlich. Die mit REM3 berechneten großflächigen Minderungseffekte erreichen in einer Reihe von Gebieten am zweiten Tag Größenordnungen von -12%. Aus den REM3-Farbbildern kann generell gefolgert werden, daß die Berechnungen für den zweiten Tag der Maßnahmeneinleitung eine weiträumige Verstärkung der Minderungseffekte beim Szenario T-6 im Vergleich zu T-5 um rd. 2% bis 4% ergeben.

Abb. 4-4.8: Mit REM3 für das Szenario "T-1 Bundesweites Tempolimt" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Einleitung der Maßnahme am 27.07. = UTC)

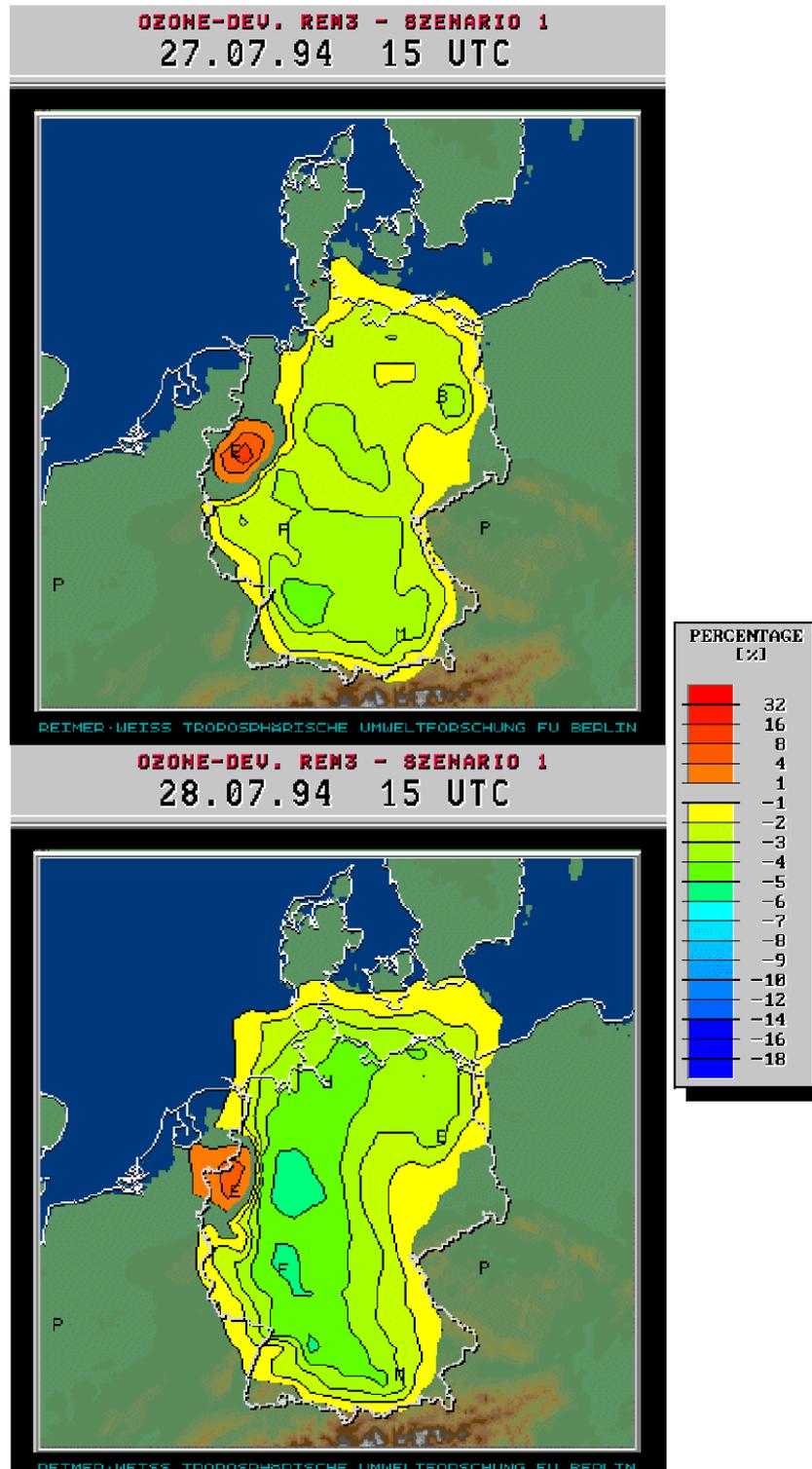


Abb. 4-4.9: Mit REM3 für das Szenario "T-2 Innerörtl. Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC)

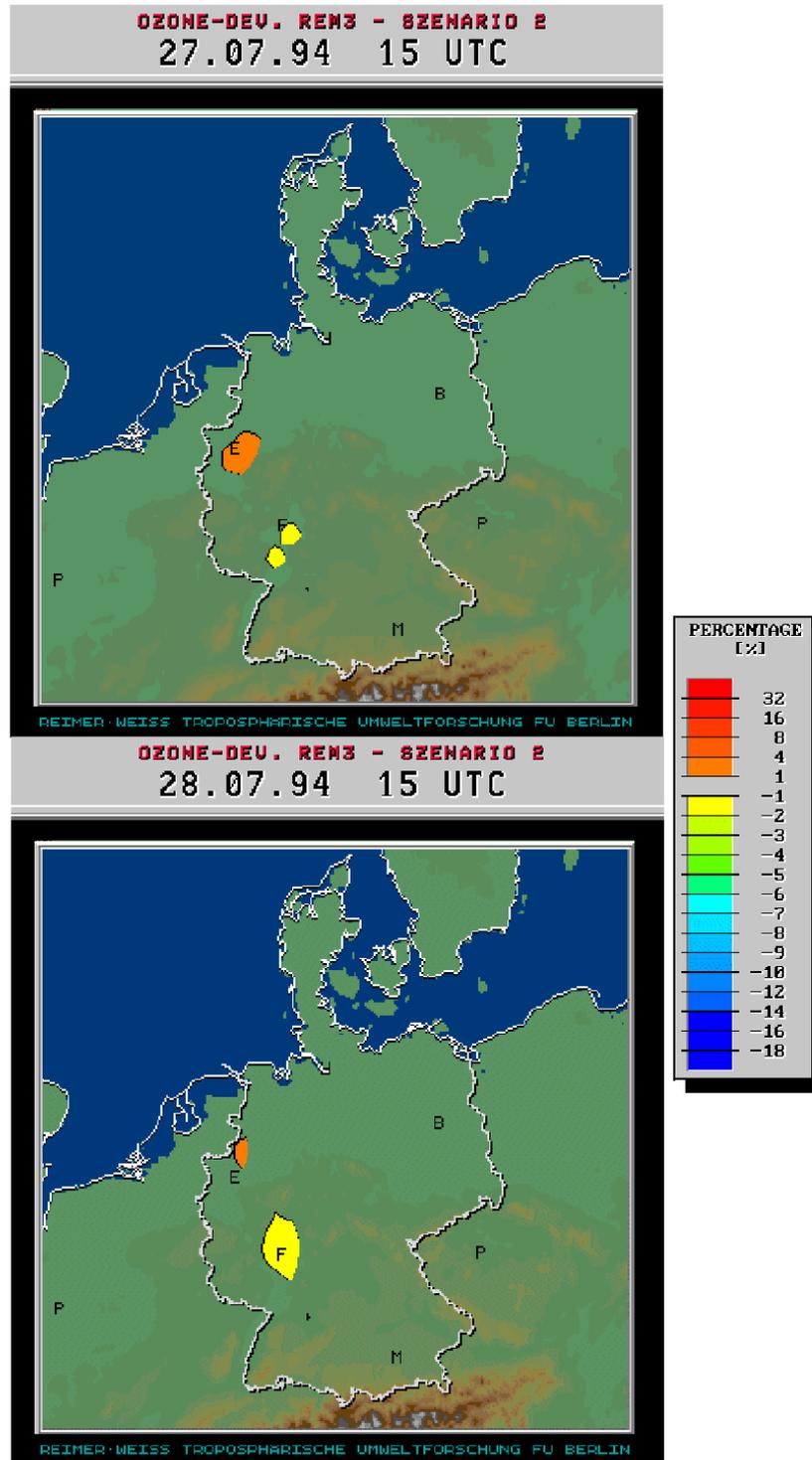


Abb. 4-4.10: Mit REM3 für das Szenario "T-3 Tempolimits plus Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Auszug Bereich Deutschland)

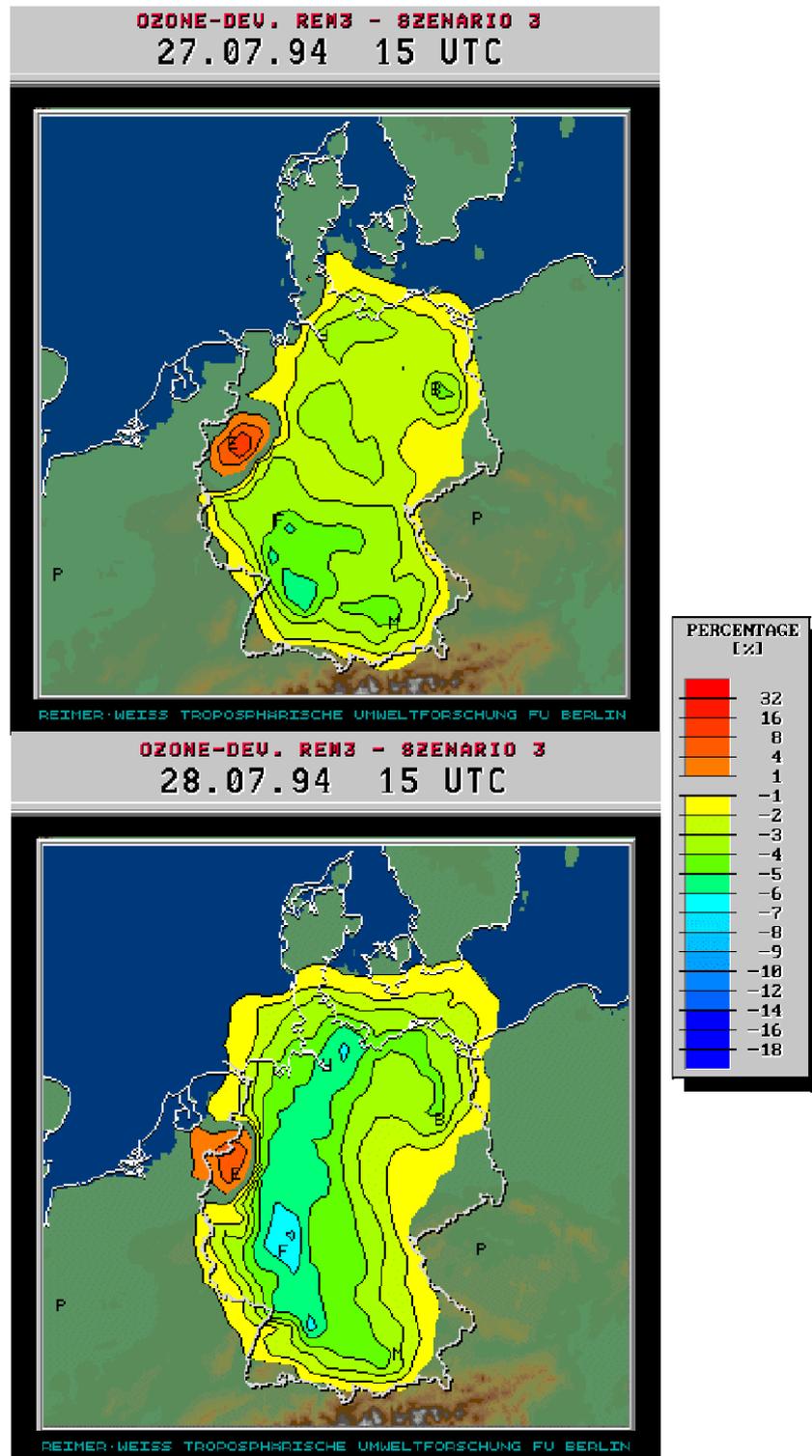


Abb. 4-4.11: Mit REM3 für das Szenario "T-4 Tempolimits plus Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, gesamtes Modellgebiet)

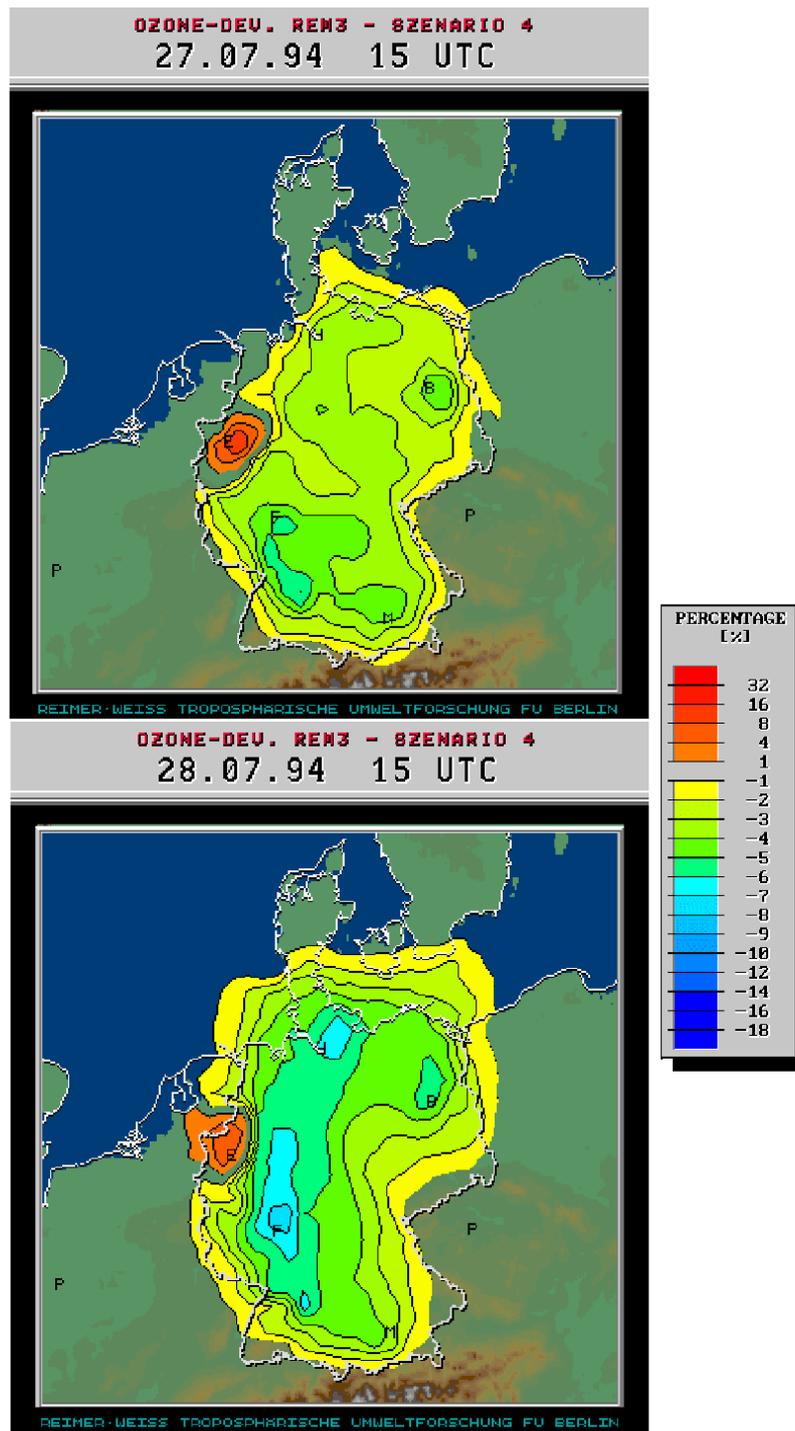


Abb. 4-4.12: Mit REM3 für das Szenario "T-5 Bundesweites Fahrverbot" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Auszug Bereich Deutschland)

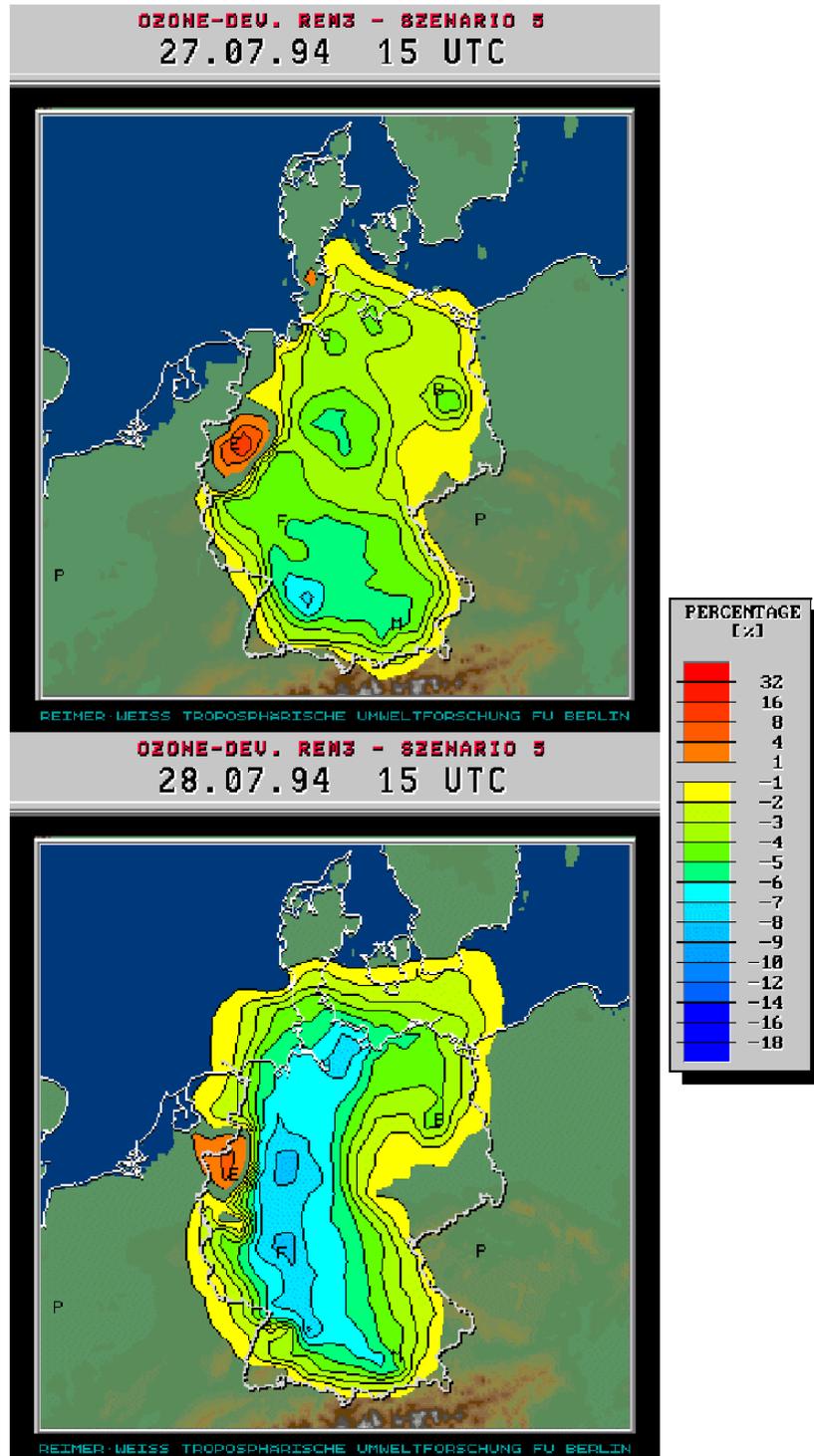


Abb. 4-4.13: Mit REM3 für das Szenario "T-6 Bundesweites Fahrverbot plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 27.07. und am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC, Auszug Bereich Deutschland)

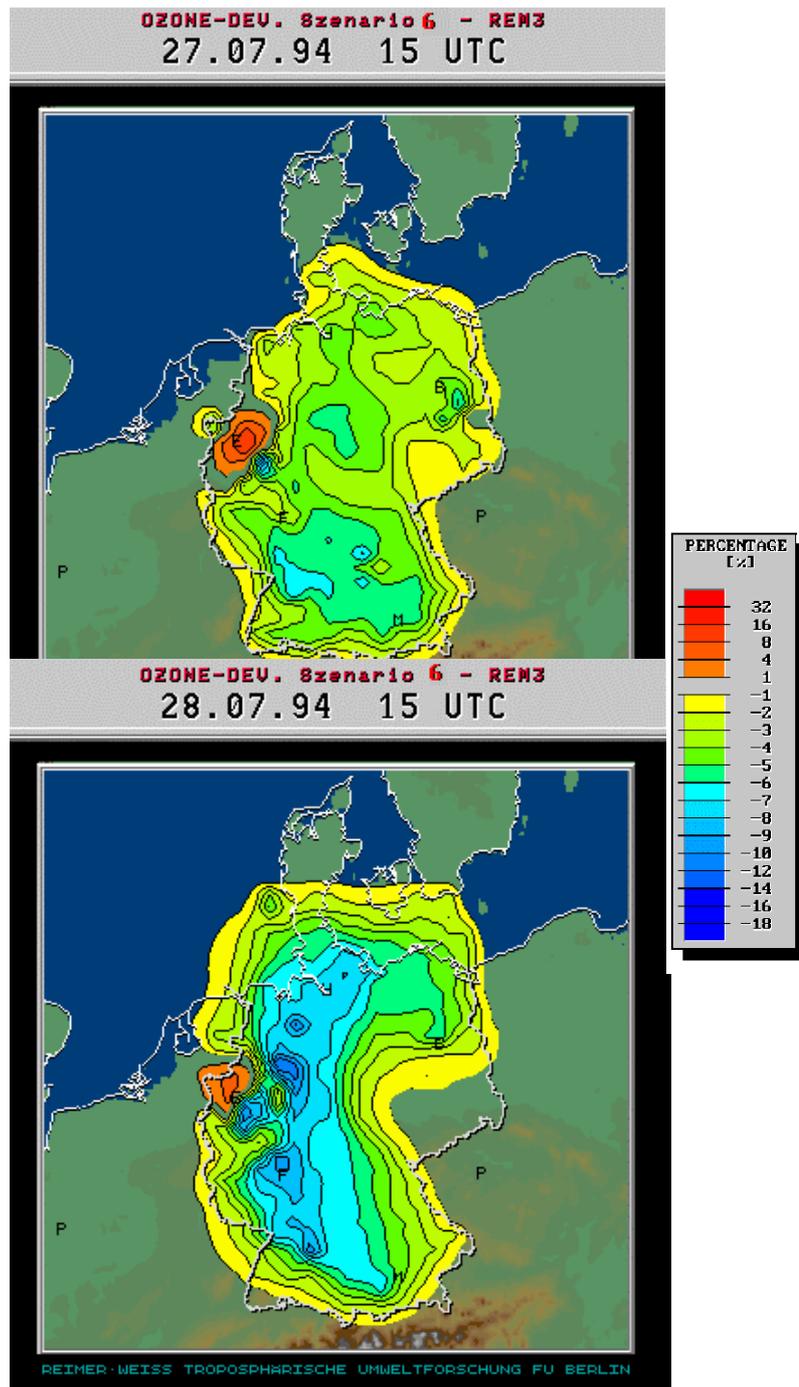


Abb. 4-4.14: Mit EURAD für das Szenario "T-1 Bundesweites Tempolimt" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC)

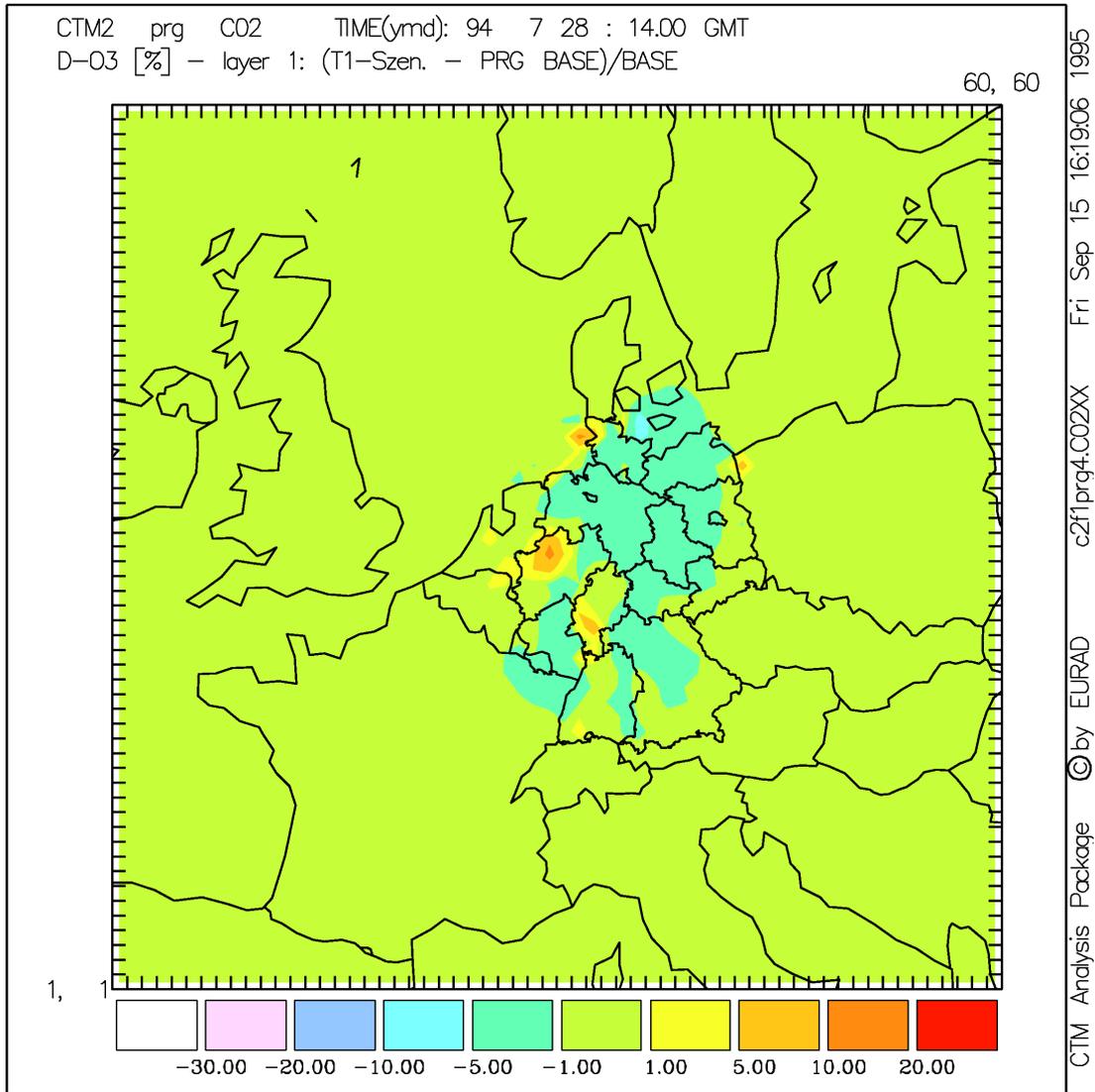


Abb. 4-4.15: Mit EURAD für das Szenario "T-2 Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC)

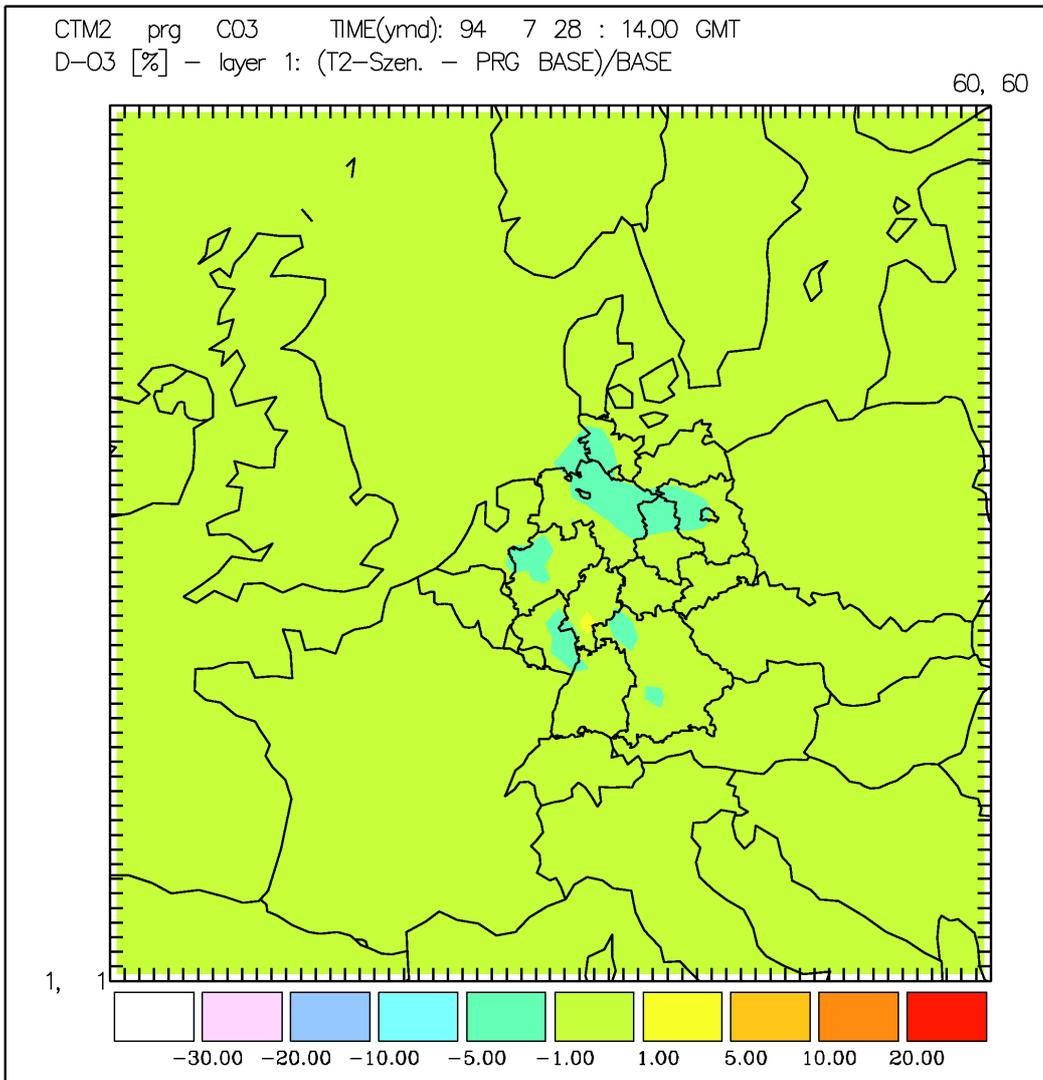


Abb. 4-4.16: Mit EURAD für das Szenario "T-3 Tempolimits plus Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC)

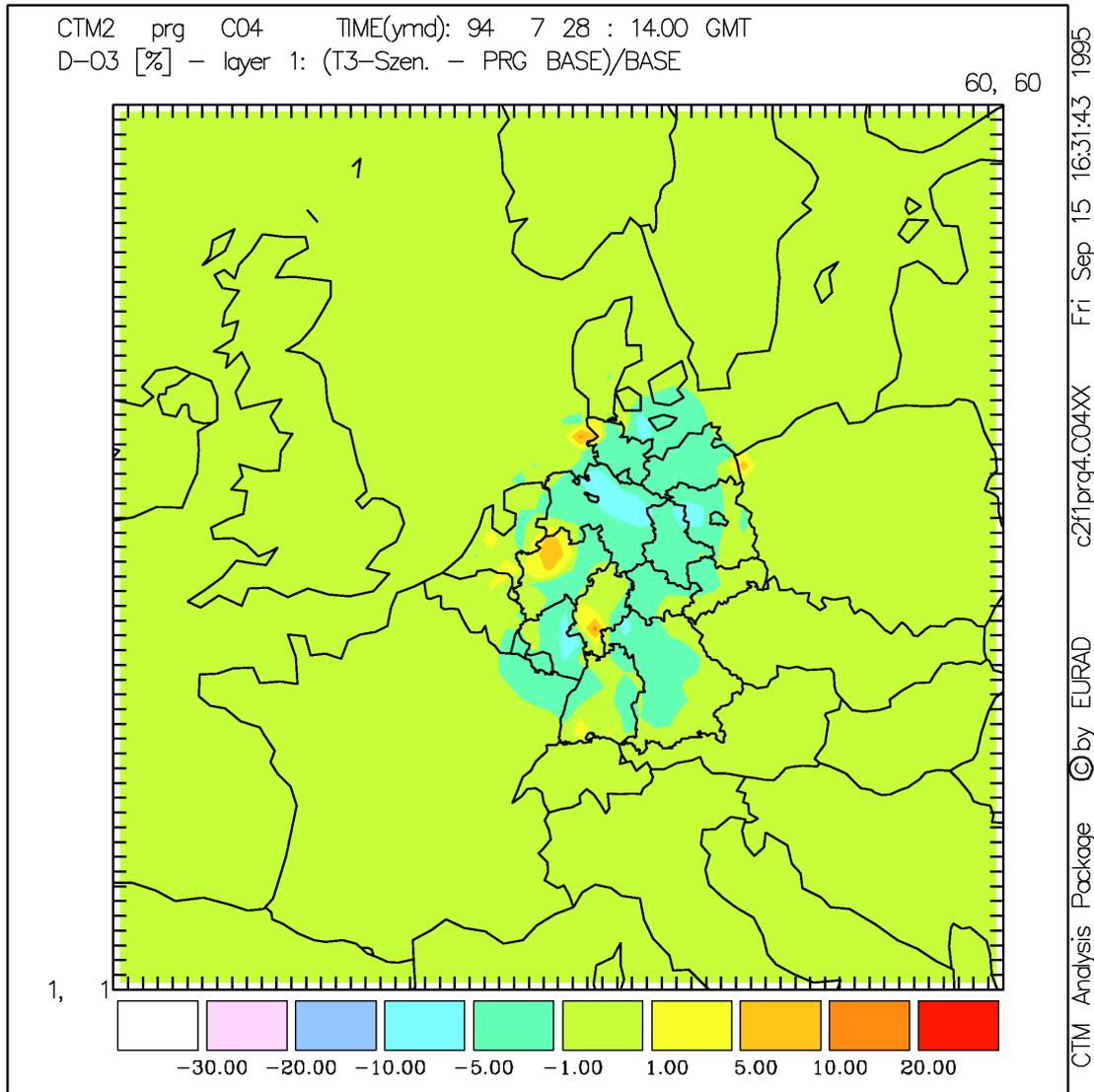


Abb. 4-4.17: Mit EURAD für das Szenario "T-4 Tempolimits plus Fahrverbote in ausgew. Ballungsräumen plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 28.07.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC)

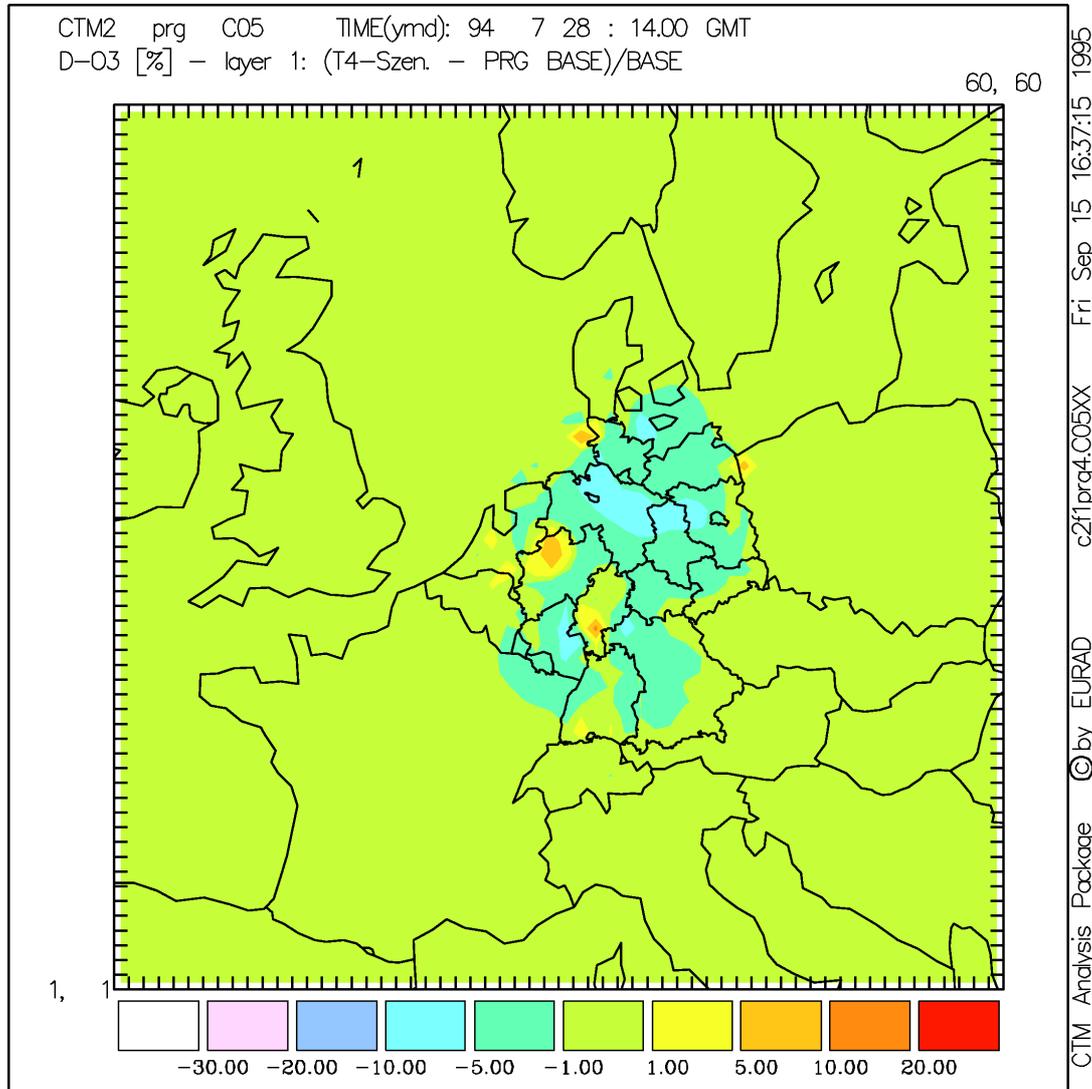


Abb. 4-4.18: Mit EURAD für das Szenario "T-5 Bundesweites Fahrverbot" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 04.08.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC)

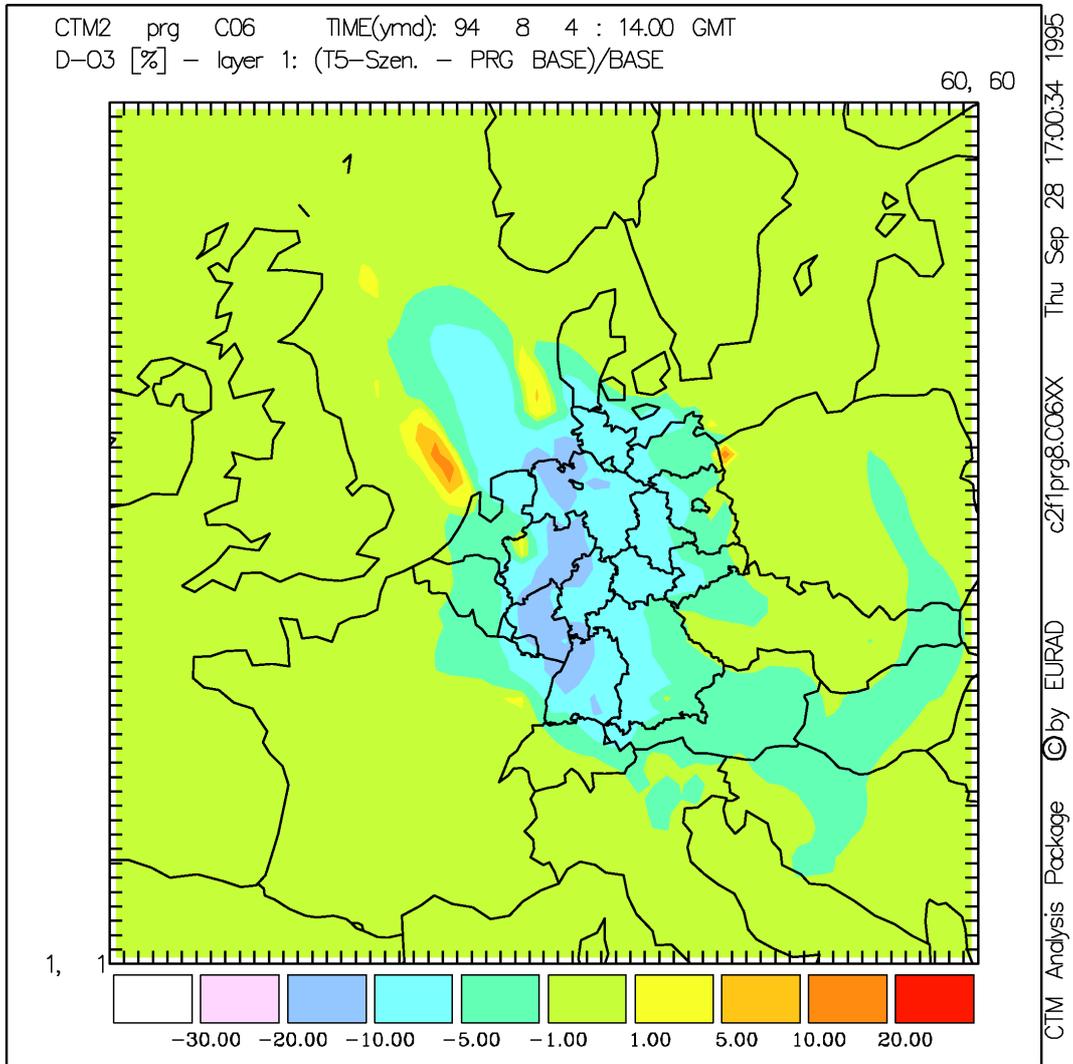
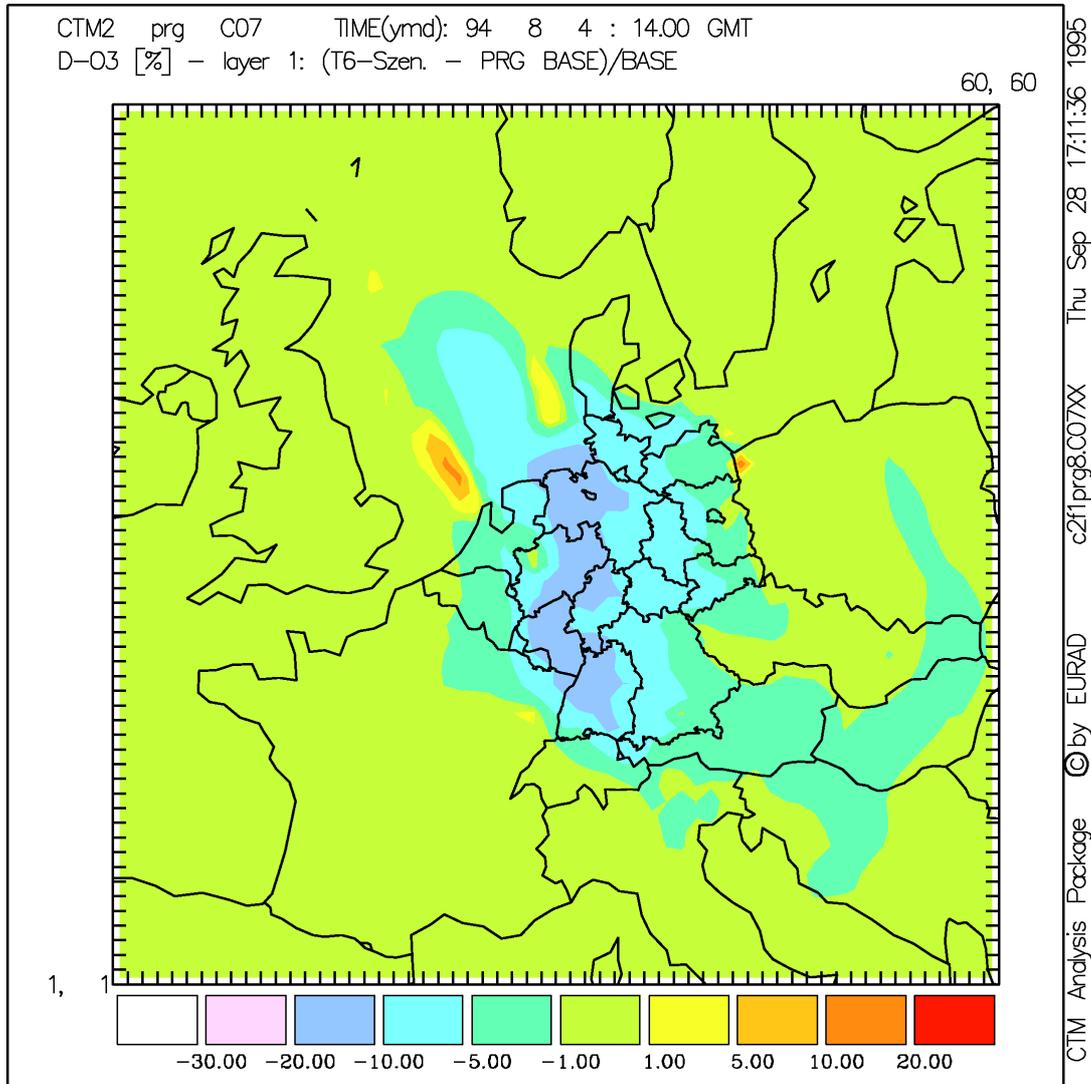


Abb. 4-4.19: Mit EURAD für das Szenario "T-6 Bundesweites Fahrverbot plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen" berechnete prozentuale Veränderung der bodennahen Ozonverteilung am 04.08.1994 im Vergleich zum Basislauf (Stundenmittel von 14 bis 15 UTC)



### **Zeitreihenanalysen (Abb.-4-4.20 bis 4-4.22)**

Aus den Ergebnissen der Berechnungen mit dem Modellsystem REM3 sind nachfolgend auszugsweise einige Zeitreihenanalysen wiedergegeben. Sie stellen die Ergebnisse für drei Gitterflächen in Deutschland dar, die von sehr unterschiedlichen Emissionsstrukturen gekennzeichnet sind: Berlin-Heiligensee, Lindenberg (südöstlich von Berlin) und Wiesbaden. Diese drei Abbildungen sind als beispielhafte Darstellungen zu verstehen. De facto ist wegen der Komplexität der meteorologischen und luftchemischen Prozesse eine wesentlich größere Vielfalt von gemessenen und berechneten Ozonkonzentrationen in den verschiedenen Regionen Deutschlands gegeben. Die ausführlichen Berichte der Modellierer enthalten hierzu umfangreiche Informationen und Dokumentationen.

In den REM3 - Abbildungen sind im oberen Bild jeweils die an den Stationen gemessenen Ozonwerte und die für die 30km \* 30km - Gitterfläche, in der die Station gelegen ist, im Basislauf berechneten Ozonwerte. Im unteren Bild sind die berechneten prozentualen Veränderungen für die temporären Szenarien T-1 bis T-5 aufgetragen.

Aus den Abbildungen wird ersichtlich, daß die berechneten Minderungseffekte je nach Region unterschiedlich ausfallen. In der Gitterzelle Wiesbaden werden bspw. die berechneten nachmittäglichen Ozonspitzen beim Szenario T-5 um -6% bis -10% reduziert. Im Bereich der Gitterzelle Berlin-Heiligensee liegen die Minderungsraten bei -4% bis -6%.

Die Bewertung der Rechenergebnisse seitens des Bearbeiters führen in diesem Zusammenhang explizit aus, daß die durch die untersuchten Maßnahmen erreichbaren Ozonminderungen stark von den meteorologischen Bedingungen abhängen. Ein Ansteigen der Wirksamkeit der Maßnahmen ist nur bei relativ konstanten meteorologischen Bedingungen zu erkennen. Dies ist bei den meisten Stationen am 27. und 28. Juli sowie vom 2. bis 4. August der Fall. Wenn jedoch, wie bspw. im Bereich der Station Berlin-Heiligensee, infolge der Drehung des großräumigen Windfeldes auf östliche Richtungen am 29. Juli dieser Bereich dem Eintrag von Schadstoffen ausgesetzt wird, die nicht den für Deutschland angesetzten Emissionsminderungen unterliegen, so bleiben die Maßnahmen in diesem Bereich ohne Wirkung; die Minderungseffekte werden leeseitig verschoben.

Die für Ballungsgebiete gemessenen und berechneten nächtlichen Ozontiefs (Abfall der Konzentrationen auf Werte um 40 µg/cbm) werden in den Szenariorechnungen um rd. 3% bis 6% erhöht (siehe die Zeitreihenanalyse für die Gitterfläche Wiesbaden). Zu beachten ist, daß solche prozentualen Erhöhungen um bspw. +5% de facto lediglich 2 µg/cbm Ozon mehr ausmachen, und insofern unwesentlich sind. Bei den o.g. Minderungen der nachmittäglichen Ozonspitzen bedeuten -5% hingegen bei einem Wert von 240 µg/cbm eine Absenkung um 12 µg/cbm.

Abb. 4-4.20: Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Lindenberg" vom 27.7. bis 6.8.1994; gemessener Ozonverlauf und Basislauf in Absolutwerten und prozentuale Veränderungen der Szenariorechnungen "temporäre Minderungsszenarien T-1 bis T-5" (Änderungen für Ozon-Konzentrationen kleiner als 40 ppb sind nicht dargestellt (Unterbrechung im Verlauf der Änderungskurven))

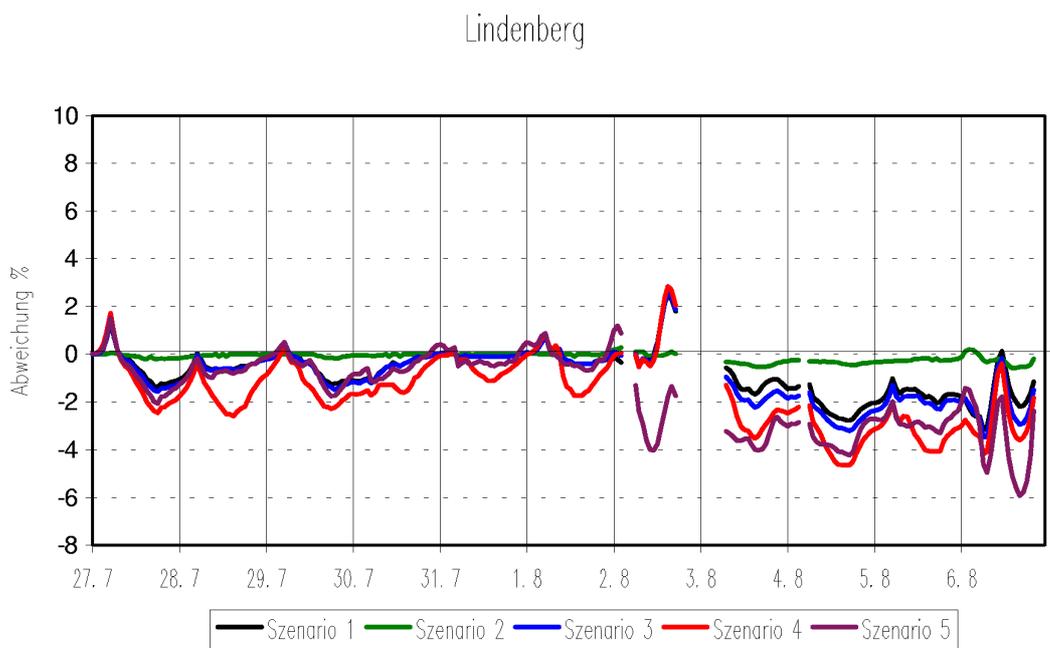
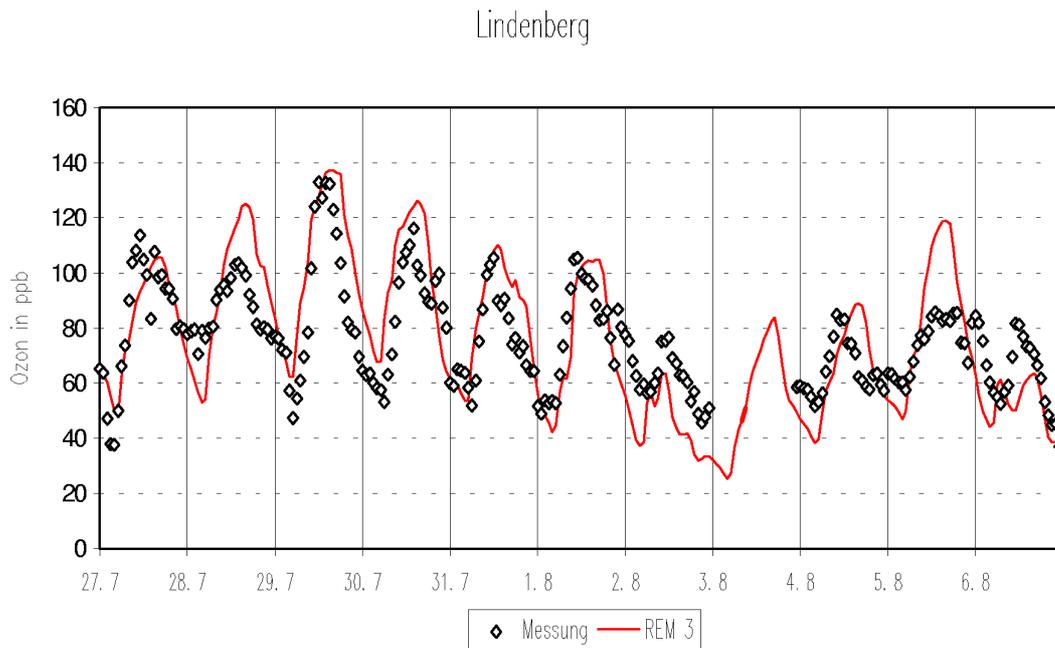


Abb. 4-4.21: Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Berlin-Heiligensee" vom 27.7. bis 6.8.1994; gemessener Ozonverlauf und Basislauf in Absolutwerten und und prozentuale Veränderungen der Szenariorechnungen "temporäre Minderungsszenarien T-1 bis T-5" (Änderungen für Ozonkonzentrationen kleiner als 40 ppb sind nicht dargestellt (Unterbrechung im Verlauf der Änderungskurven))

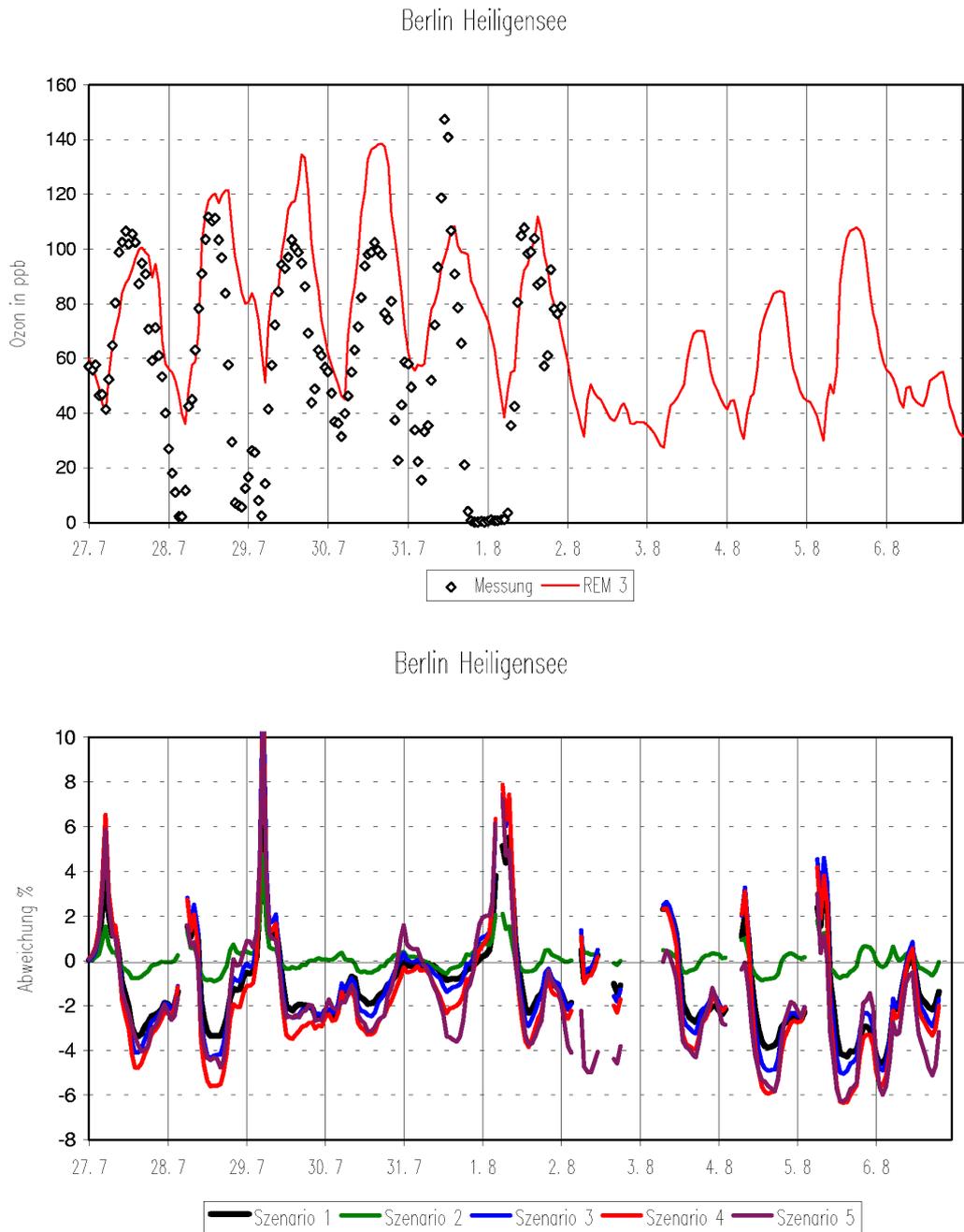
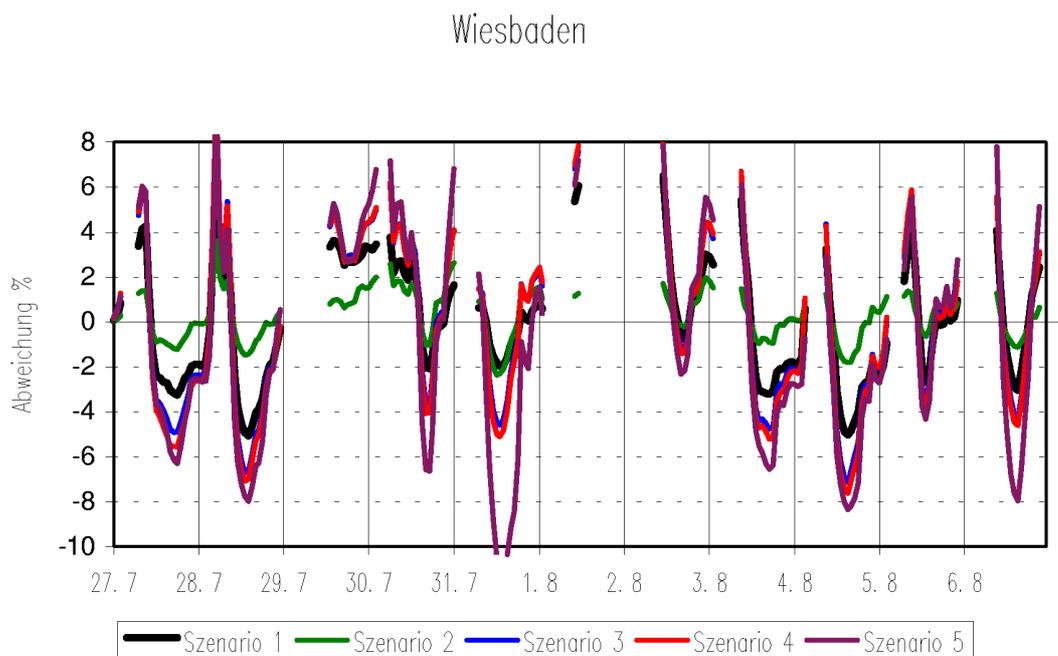
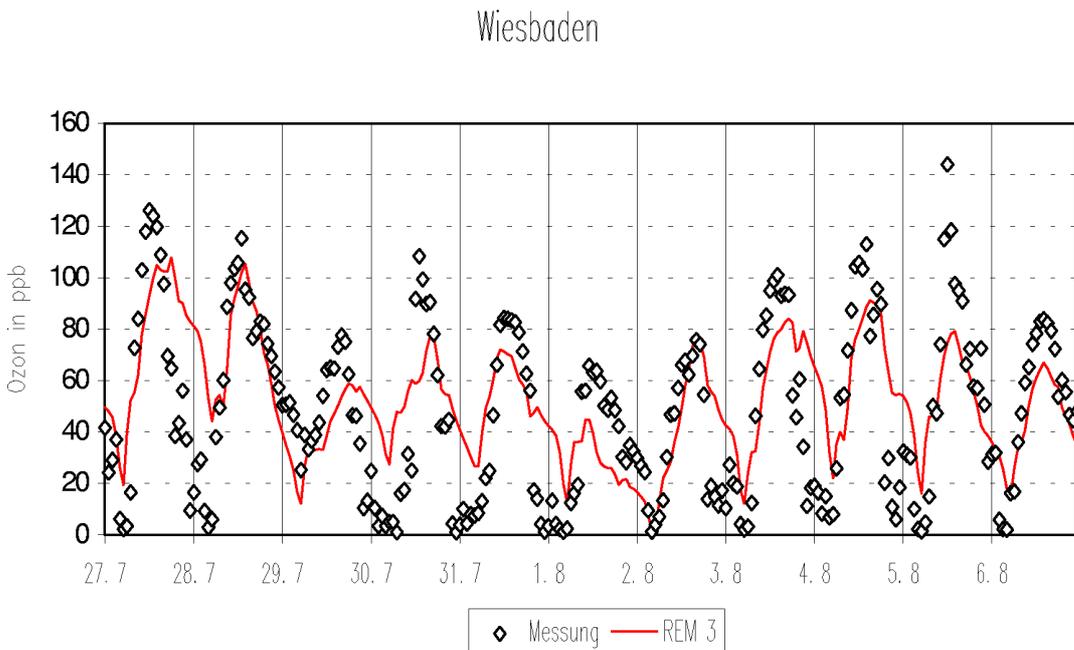


Abb. 4-4.22: Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Wiesbaden" vom 27.7. bis 6.8.1994; gemessener Ozonverlauf und Basislauf in Absolutwerten und und prozentuale Veränderungen der Szenariorechnungen "temporäre Minderungsszenarien T-1 bis T-5" (Änderungen für Ozon-Konzentrationen kleiner als 40 ppb sind nicht dargestellt (Unterbrechung im Verlauf der Änderungskurven))



**Überschreitungshäufigkeiten von Gitterstundenschwellenwerten (Tab. 4.3 bis 4.5)**

Bei der Analyse der sog. Überschreitungshäufigkeiten wird untersucht, in welcher Anzahl von Gitterstunden vorgegebene O<sub>3</sub>-Schwellenwerte überschritten werden. Die Anzahl der Gitterstunden gibt dabei an, in wievielen Stunden ein bestimmter Konzentrationsschwellenwert in einer Zelle des horizontalen Modellgitters überschritten wird. Für den ausgewerteten Zeitraum vom 27.07. bis 08.08.1994 beträgt die maximal mögliche Anzahl von Gitterstunden in einer Zelle 24x17=408 Gitterstunden/Zelle. Für das Gebiet Deutschland beträgt die Gesamtzahl der ausgewerteten Gitterstunden bei REM3 97.680 (Auswertungszeitraum 27.07.-06.08.94) und bei EURAD 89.856 (Auswertungszeitraum 27.07.-08.08.94).

Der Effekt von Minderungsmaßnahmen wird bei diesen Analysen anhand der Veränderung der Anzahl von Überschreitungshäufigkeiten eines bestimmten Schwellenwertes in der Szenariorechnung (z.B. Stunden >240 µg/cbm) im Vergleich zum Basislauf ermittelt.

Den nachstehenden Tabellen für das Gebiet Deutschland kann entnommen werden, daß bei REM3 der Schwellenwert von 180 µg/cbm im Basislauf in 7.679 Stunden überschritten wurde; bei EURAD beträgt die Anzahl der Überschreitungsstunden 5.198. Der Schwellenwert von 240 µg/cbm wird bei REM3 im Basislauf in 573 Stunden überschritten; bei EURAD sind es 391 Stunden. Die berechneten Minderungseffekte für die einzelnen temporären Szenarios ergeben folgende prozentualen Abnahmen:

Tab. 4.3: Analyse der Minderungswirkungen der temporären Emissionsszenarien "T-1 bis T-6" auf der Basis der berechneten Gitterstundenüberschreitungen für die Episode 1994 (Modelle REM3 und EURAD)

Ozon	Gitterstunden	Temporäre Minderungsszenarien					
		T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6
µg/cbm	Basislauf '94 REM3/EURAD	Abweichungen in Prozent gegenüber dem Basislauf					
> 120	43873 / 31054	-3 / -0,1	-0,2 / -1	-4 / -1	-5 / -2	-8 / -6	-10 / -7
> 180	7679 / 5198	-17 / -11	-2 / -5	-19 / -16	-22 / -18	-25 / -33	-28 / -35
> 240	573 / 391	-18 / -28	-1 / -18	-19 / -49	-28 / -54	-21 / -72	-23 / -77

Anm: Den Werten für REM3 und EURAD liegen etwas unterschiedliche Auswertungszeiträume zugrunde, was aber für die Aussagen und Folgerungen ohne Relevanz ist.

Tab. 4.4: EURAD - Analyse der Minderungswirkungen der temporären Emissions-szenarien "T-1 bis T-6" auf der Basis der berechneten Gitterstunden-überschreitungen für die Episode 1994 (O3-Angaben in ppb)

Ozon in ppb	Gitterstunden	EURAD - Modellrechnungen Sommerperiode 1994					
		Temporäre Minderungsszenarien					
	Basislauf '94	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6
		Zeile 1: Gitterstunden insgesamt					
		Zeile 2: Abweichungen in Prozent gegenüber dem Basislauf					
> 60 ppb	GS: 31.054 %: 34,5	31.023 -0,1	30.797 -0,8	30.682 -1,2	30.445 -2,0	29.108 -6,3	28.8237 -7,2
> 70 ppb	19.218 21,4	18.540 -3,5	18.849 -1,9	18.141 -5,6	17.901 -6,9	16.369 -14,8	16.116 -16,1
> 80 ppb	10.392 11,6	9.773 -5,9	10.054 -3,3	9.414 -9,4	9.217 -11,3	8.046 -22,6	7.843 -24,5
> 90 ppb	<b>5.198</b> <b>5,8</b>	<b>4.647</b> <b>-10,6</b>	<b>4.939</b> <b>-5,0</b>	<b>4.388</b> <b>-15,6</b>	<b>4.258</b> <b>-18,1</b>	<b>3.481</b> <b>-33,0</b>	<b>3.353</b> <b>-35,5</b>
> 100 ppb	2.294 2,6	1.948 -15,1	2.099 -8,5	1.791 -21,9	1.697 -26,0	1.335 -41,8	1.263 -44,9
> 110 ppb	915 1,0	791 -13,6	835 -8,7	675 -26,2	631 -31,0	445 -51,4	407 -55,5
> 120 ppb	<b>391</b> <b>0,4</b>	<b>279</b> <b>-28,6</b>	<b>319</b> <b>-18,4</b>	<b>197</b> <b>-49,6</b>	<b>179</b> <b>-54,2</b>	<b>107</b> <b>-72,6</b>	<b>91</b> <b>-76,7</b>
> 130 ppb	105 0,1	66 -37,1	75 -28,6	52 -50,5	50 -52,4	33 -68,6	30 -71,4

Anm.: Anzahl der Gitterstunden (GS), in denen die angegebenen Ozonkonzentrationen in Deutschland vom 27.07. bis zum 08.08.1994 für den Basislauf und die temporären Minderungsszenarien in der Bodenschicht überschritten werden. Die Prozentangaben beim Basislauf bezeichnen den Anteil der Gitterstunden an der maximal möglichen Anzahl von Gitterstunden von 89.856 im Gebiet Deutschland. Die Prozentangaben bei den Szenarien bezeichnen die Änderung der entsprechenden Überschreitungshäufigkeit im Vergleich zum Basislauf.

Ebenso wie bei den Simulationsrechnungen für die Ozonperiode Sommer 1990 ergeben die Modellrechnungen auch für die Episode 1994, daß die Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen bei höheren Ozonkonzentrationen stärker ausgeprägt ist als bei niedrigen Konzentrationen. So werden nach den Modellrechnungen im Falle des Szenario T-5 (bundesweites Fahrverbot) die Anzahl der Überschreitungsstunden des Schwellenwertes von 180 µg/cbm um -25% bis -33% reduziert. Die Minderung der Anzahl der Überschreitungsstunden

des Schwellenwertes von 120 µg/cbm liegt hingegen beim Szenario T-5 nur im Bereich von - 7%. - Die prozentualen Minderungsraten für den Schwellenwert 240 µg/cbm sind angesichts der zugrundeliegenden sehr geringen Stundenzahl mit Vorbehalt zu interpretieren, hier die statistische Grundgesamtheit sehr klein ausfällt.

Tab. 4.5: REM3 - Analyse der Minderungswirkungen der temporären Emissionsszenarien "T-1 bis T-6" auf der Basis der berechneten Gitterstundenüberschreitungen für die Episode 1994 (O3-Angaben in ppb)

Ozon in ppb	Gitterstunden	REM3 - Modellrechnungen Sommerperiode 1994					
		Temporäre Minderungsszenarien					
	Basislauf '94	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6
Zeile 1: Gitterstunden insgesamt							
Zeile 2: Abweichungen in Prozent gegenüber dem Basislauf							
> 60 ppb	GS: 43.873 %: 44,9	42.415 -3,3	43.770 -0,2	42.203 -3,8	41.879 -4,5	40.366 -8,0	39.573 -9,8
> 70 ppb	28.006 28,7	25.955 -7,3	27.845 -0,6	25.640 -8,4	25.294 -9,7	23.940 -14,5	23.300 -16,8
> 80 ppb	16.133 16,5	13.856 -14,1	15.918 -1,3	13.587 -15,8	13.258 -17,8	12.455 -22,8	11.890 -26,3
> 90 ppb	7.679 7,9	6.351 -17,3	7.546 -1,7	6.210 -19,1	5.983 -22,1	5.760 -25,0	5.536 -27,9
> 100 ppb	3.284 3,4	2.782 -15,3	3.239 -1,4	2.731 -16,8	2.577 -21,5	2.583 -21,3	2.506 -23,7
> 110 ppb	1.426 1,5	1.270 -10,9	1.412 -1,0	1.256 -11,9	1.166 -18,2	1.207 -15,4	1.185 -16,9
> 120 ppb	573 0,6	472 -17,6	567 -1,0	464 -19,0	410 -28,4	452 -21,1	443 -22,6
> 130 ppb	125 0,1	100 -20,0	120 -4,0	97 -22,4	88 -29,6	96 -23,2	84 -32,8

Anm.: Anzahl der Gitterstunden (GS), in denen die angegebenen Ozonkonzentrationen in Deutschland vom 27.07. bis zum 06.08.1994 für den Basislauf und die temporären Minderungsszenarien in der Bodenschicht überschritten werden. Die Prozentangaben beim Basislauf bezeichnen den Anteil der Gitterstunden an der maximal möglichen Anzahl von Gitterstunden von 97.680 im Gebiet Deutschland. Die Prozentangaben bei den Szenarien bezeichnen die Änderung der entsprechenden Überschreitungshäufigkeit im Vergleich zum Basislauf.

#### 4.4.3 Auswirkungen von frühzeitigeren Einleitungen von temporären Maßnahmen

(1) Im Verlauf der Diskussionen im Vorfeld der Ozon-Gesetzgebung im Frühjahr 1995 über Art und Wirkungen von temporären Minderungsmaßnahmen wurde mehrfach auch die Frage gestellt, inwieweit die Effektivität einer Maßnahme durch eine frühzeitigere Einleitung gesteigert werden kann. Die Maßnahme(n) würde(n) in diesem Fall noch vor dem Eintritt des Auslösekriteriums ergriffen werden, z.B. aufgrund von entsprechenden Ozonprognosen.

(2) Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde diese Frage aufgegriffen und mit Hilfe zusätzlicher Modellrechnungen mit dem Modellsystem REM3 untersucht. Die dazu zusätzlich durchgeführten Rechenläufe betreffen

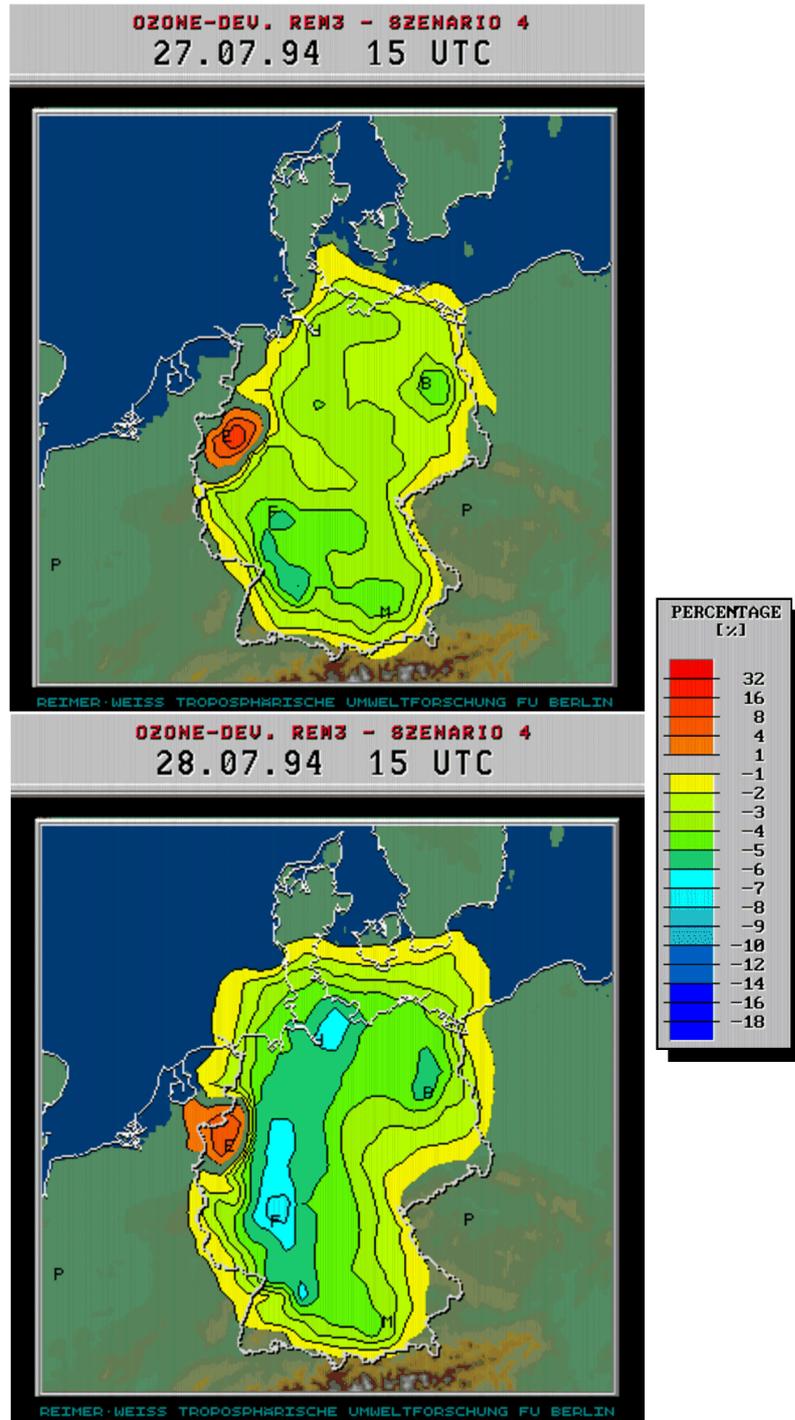
- für den Analysezeitraum Episode Sommer 1994  
Szenario T-1 (bundesweites Tempolimits) und  
Szenario T-4 (bundesweites Tempolimits, innerörtl. Fahrverbote in Ballungsräumen,  
freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen/Lösemitteln)
- für den Analysezeitraum Episode Sommer 1990  
Szenario T-1 (bundesweite Tempolimits) und  
Szenario T-5 (bundesweites Fahrverbot für nicht schadstoffarme Pkw).

Bei diesen zusätzlich durchgeführten Szenario-Rechnungen wurde die **Einschaltung der Maßnahmen jeweils um 48 Stunden vorverlegt**.

(3) Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind nachstehend zunächst für die Episode 1994 für das Szenario T-4 in Form der Gitterstundenanalyse und in Form von flächenbezogenen Auswertungen in komprimierter Form für die beiden Tage 27.07. und 28.07. dargestellt (siehe Abb. 4-4.23 im Vergleich mit Abb. 4-4.11).

Aus den Daten und Farbbildern geht hervor, daß eine **frühere Einleitung** von Maßnahmen **zu stärkeren Abnahmen der Ozonspitzen** führt, und zwar hauptsächlich zu Beginn des Episodenabschnitts mit hohen Ozonkonzentrationen. Bei einer um 48 Stunden vorgezogenen Einleitung liegen die berechneten Überschreitungen bei den Gitterstunden (G) und bei den Flächen (F) deutlich niedriger als im Falle der "normalen" Einleitung.

Abb. 4-4.23: Mit REM3 für die frühzeitigere Maßnahmeneinleitung im Falle des Szenarios T-4 berechnete prozentuale Änderung der bodennahen Ozonverteilung im Vergleich zum Basislauf (Tage: 27.07. und 28.07.1994)



Tab. 4.6: REM3 - Veränderung der Überschreitungshäufigkeit infolge frühzeitiger Maßnahmen-schaltung von Szenario T-4 in der Teilepisode 27.07.-28.07.1994

Szenario 4	Basislauf		Einleitung 25.07.		Einleitung 27.07.	
	G	F	G	F	G	F
O3 > 120 µg/cbm	67,2%	100%	-4,1%	0%	-1,4%	0%
O3 > 180 µg/cbm	19,5%	90,1%	-30,8	-15,5%	-23,0%	-9,4%
O3 > 240 µg/cbm	0,8%	10,4%	-67,9%	-54,9%	-36,7%	-30,4%

(4) Für die Episode 1990 sind in Tab. 4.8 und 4.9 die Ergebnisse der Modellrechnungen für die Szenarien T-1 und T-5 in Form der Gitterstundenanalysen in komprimierter Form für die beiden Tage 3. und 4. August 1990 dargestellt. Auch aus diesen Werten geht hervor, daß die frühere Einleitung von Maßnahmen zu stärkeren Abnahmen der Ozonspitzen führt. Bei einer um 48 Stunden vorgezogenen Einleitung liegen die berechneten Überschreitungen bei den Gitterstunden auch im Falle dieser Episode, die hinsichtlich der Meteorologie eine Reihe von Unterschieden zur Episode 1994 aufweist, deutlich niedriger als im Falle der "normalen" Einleitung nach Eintritt des Auslösekriteriums.

Tab. 4.7: REM3 - Veränderung der Überschreitungshäufigkeit infolge frühzeitiger Maßnahmen-schaltung von Szenario T-1 in der Teilepisode 03.08.-05.08.1990

Szenario 1	Basislauf		Einleitung 1.08.		Einleitung 3.08.	
	G	F	G	F	G	F
O3 > 120 µg/cbm	56,0%	99,5%	-2,4%	-0%	-0,9%	-0%
O3 > 180 µg/cbm	20,6%	71,6%	-12,3%	-4,2%	-8,7%	-3,1%
O3 > 240 µg/cbm	3,6%	30,5%	-23,1%	-18,0	-12,1%	-13,4%

Tab. 4.8: REM3 - Veränderung der Überschreitungshäufigkeit infolge frühzeitiger Maßnahmen-schaltung von Szenario T-5 in der Teilepisode 03.08.-05.08.1990

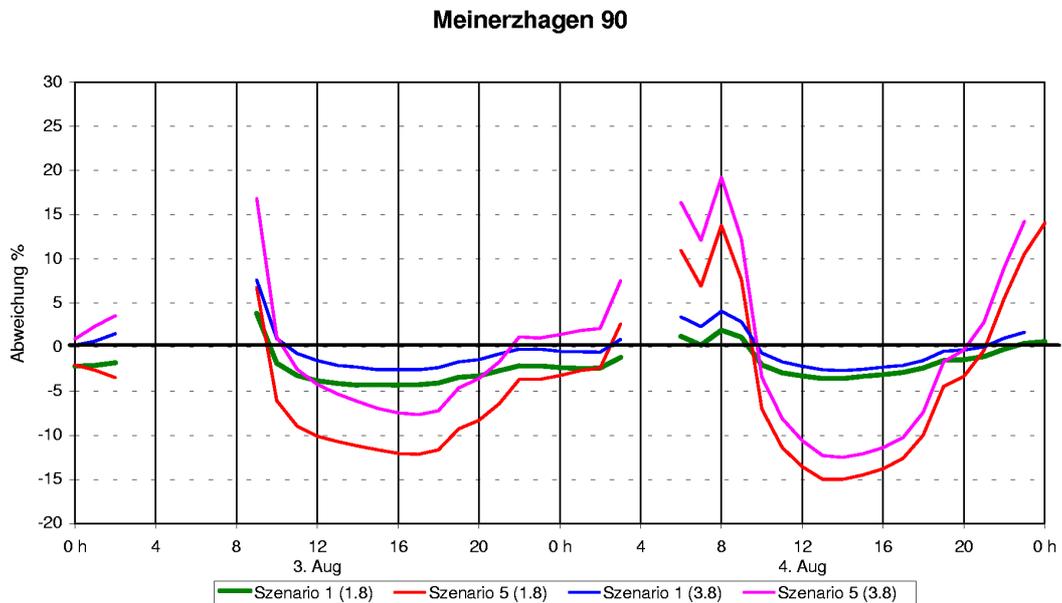
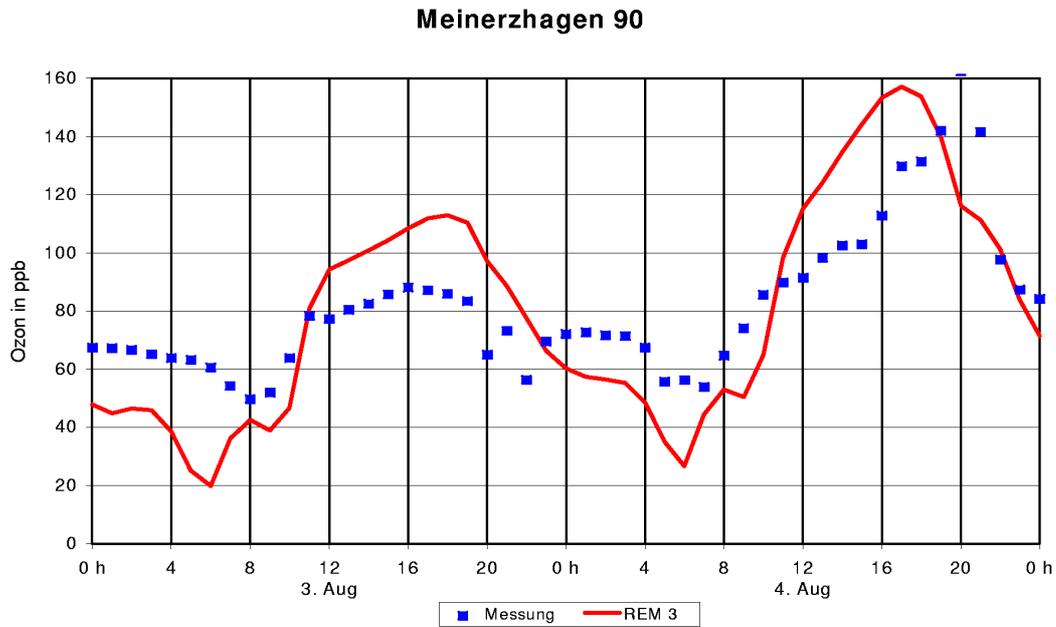
Szenario 5	Basislauf		Einleitung 1.08.		Einleitung 3.08.	
	G	F	G	F	G	F
O3 > 120 µg/cbm	56,0%	99,5%	-5,8%	-0%	-1,9%	-0%
O3 > 180 µg/cbm	20,6%	71,6%	-36,2%	-12,8%	-24,9%	-9,8%
O3 > 240 µg/cbm	3,6%	30,5%	-45,6%	-37,4	-33,8%	-30,5%

#### 4.4.4 Überprüfung der Ergebnisse der Modellrechnungen mit temporären Minderungsmaßnahmen durch zusätzliche Rechenläufe für die Ozonepisode 1990

(1) Zur Absicherung der Aussagen über die immissionsseitigen Wirkungen von temporären Maßnahmen, die mit Hilfe photochemischer Modellrechnungen für Ozonepisode 1994 abgeleitet wurden, sind mit dem Modellsystem REM3 noch zusätzliche Rechenläufe für zwei temporäre Szenarien für die Ozonepisode Sommer 1990 durchgeführt worden. Betrachtet werden das Szenario Tempolimits (T-1) und bundesweite Fahrverbote (T-5). Dabei wird angenommen, daß die Maßnahmen zu Beginn des 03.08.1990 in Kraft treten. Der 3.8. wurde gewählt, da am folgenden Tag im westlichen Deutschland Ozonspitzenkonzentrationen bis zu 320 µg/cbm gemessen (und mit REM3 auch berechnet) wurden.

(2) Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen sind nachfolgend auszugsweise anhand der Zeitreihenanalyse für den Bereich der Station Meinerzhagen dargestellt. Die zugehörigen Gitterstundenanalysen sind in den voranstehenden Tabellen 4.8 und 4.9 enthalten.

Abb. 4-4.24: Mit REM3 berechneter Ozonverlauf in ppb für die Gitterfläche "Station Meinerzhagen" für den 3. und 4. Aug. 1990; gemessener und berechneter Ozonverlauf im Basislauf; Szenariorechnungen T-1 und T-5 jeweils mit Einleitung der Maßnahmen am 3.8. und am 1.8. (48 Stunden früher)



#### 4.5 Ermittlung der Effekte des "typischen" Wochenendgangs der Emissionen auf die bodennahen Ozonkonzentrationen

(1) Die Emissionen des Straßenverkehrs liegen am Wochenende (Samstag/Sonntag) aufgrund des Fahrverbotes für Lkw sowie aufgrund der geringeren berufs- und konsumbezogenen Verkehrsleistungen regelmäßig deutlich niedriger als an den Werktagen (Montag bis Freitag). Die Minderungseffekte betreffen vor allem den NO<sub>x</sub>-Ausstoß. So liegen die berechneten NO<sub>x</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs in den drei Modellregionen in den Spitzenstunden an Samstagen um rd. 33% und an Sonntagen um rd. 45% niedriger als am Werktag. Bei den VOC-Emissionen des Straßenverkehrs liegen die berechneten Minderungseffekte niedriger: am Samstag erreichen sie rd. 20% und am Sonntag rd. 30%.

(2) Es handelt sich folglich bei diesen Minderungseffekten gleichsam um ein großräumiges temporäres Maßnahmenbündel, bestehend aus dem Wochenendfahrverbot für Lkw's und dem Effekt aus dem Bereich von Berufs- und Einkaufsverkehren.

(3) In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde daher im Rahmen von Stufe A dieser Untersuchung das umfangreiche Datenmaterial aus den emissions- und immissionsseitigen Anlaysen genutzt, um auch den Effekt dieses besonderen Maßnahmenbündels, der typischen großräumigen Emissionsminderungen am Wochenende, auf die bodennahen Ozon-Konzentrationen mit Hilfe des photochemischen Modellsystems REM3 zu untersuchen. Die bis dahin vom Umweltbundesamt zu dieser Fragestellung durchgeführten Analysen beruhten im wesentlichen auf Auswertungen der Daten aus dem UBA-Meßnetz. Dabei handelt es sich um punktuelle Immissionsdaten, die einer Vielzahl von besonderen, einzelstandortbezogenen Einflüssen unterliegen können. Rückschlüsse auf die großräumigen, flächigen Ozon-Konzentrationen sind auf dieser Basis nur begrenzt möglich.

(4) Das methodische Vorgehen sowie die Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit dem Modellsystem REM3 sind im gesondert vorliegenden Bericht zu diesem Teilvorhaben ausführlich dargestellt und erläutert.<sup>4</sup> Im vorliegenden Gesamtbericht werden daher das Vorgehen und die Befunde in stark gekürzter Fassung wiedergegeben.

(5) Mit Hilfe des Modellsystems wurden zwei Episoden betrachtet, in denen in nahezu ganz Deutschland hohe Ozonkonzentrationen gemessen wurden. Es sind dies die Zeiträume

---

<sup>4</sup> Stern R.: Untersuchung des Einflusses des Emissionswochengangs auf die Ozon-Konzentrationen mit Hilfe des photochemischen Ausbreitungsmodells REM3, Inst. f. Meteorologie, FU Berlin, Berlin 1997

vom 02.08.-06.08.1990 und vom 02.08.-06.08.1994. Im gesondert vorliegenden Bericht zu diesem Teilvorhaben sind die Ergebnisse wie folgt zusammengefaßt:<sup>5</sup>

(6) Ziel des Teilvorhabens war ein Beitrag zur Frage, welche Auswirkungen der Wochengang der Emissionen der Vorläufersubstanzen Stickoxide und Kohlenwasserstoffe auf den Wochengang der Ozonkonzentrationen hat. Dazu wurde zum einen die vorhandene Literatur ausgewertet, zum anderen eine numerische Untersuchung mit dem photochemischen Ausbreitungsmodell REM3 durchgeführt. Das REM3 (**R**egional **E**ulerian **M**odel with **3** chemistry schemes) ist ein von Stern (1994) entwickeltes großräumiges dreidimensionales photochemischen Ausbreitungsmodell zur Simulation der Bildung, des Transports und der Entfernung von Oxidantien in der planetarischen Grenzschicht. Ausgehend von einem Basislauf wurden die Emissionstagesgänge unter gleichen meteorologischen Bedingungen in drei Szenarioläufen sukzessive jeweils um einen Tag verschoben. M.a.W.: in verschiedenen Modellläufen werden die Emissionstagesgänge bei festgehaltenen meteorologischen Bedingungen so verschoben, daß derselbe Tag einmal mit Werktags-, Samstags- und Sonntagsemissionen modelliert wird. Die immissionsseitigen Unterschiede zwischen den einzelnen Modellläufen sind damit eindeutig auf die veränderten emissionsseitigen Bedingungen zurückführbar. Es wurden zwei verschiedene Episoden in 1990 und 1994 betrachtet:

#### a) Literaturanalyse

Die Literaturlauswertung zeigt, daß es aufgrund der Variabilität der meteorologischen Verhältnisse sowie der von Region zu Region unterschiedlichen Emissionsverhältnisse und Transportregime, deren Einfluß sich nicht vollkommen aus den statistischen Analysen eliminieren läßt, sehr schwierig ist, aus Messungen eine eindeutige Beziehung zwischen dem Wochengang der Emission und den daraus resultierenden Ozonkonzentrationen abzuleiten.

Es zeichnet sich aber ab, daß die Absenkung der Emissionen an den Wochenenden in **emissionsarmen Gebieten** zu einer Abnahme der gemessenen Ozonspitzenwerte führt. In solchen Gebieten werden die Ozonspitzen im wesentlichen durch großräumig gebildetes Ozon, das über den regionalen und überregionalen Transport für eine Erhöhung der Hintergrundkonzentration sorgt, sowie durch die lokale chemische Produktion bestimmt. Bei hoher photochemischer Aktivität bewirkt eine Emissionsminderung, insbesondere eine Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen, immer eine Abnahme der Ozonwerte, da dadurch großräumig die Ozonproduktion vermindert wird.

---

<sup>5</sup> Stern R.: Untersuchung des Einflusses des Emissionswochengangs auf die Ozon-Konzentrationen mit Hilfe des photochemischen Ausbreitungsmodells REM3, Inst. f. Meteorologie, FU Berlin, Berlin 1997, S. 56f

In **Stadtgebieten**, bzw. in allen **emissionsseitig stark stickoxidbelasteten Gebieten**, werden als Auswirkung der Emissionsabsenkung an den Wochenenden Ozonzu- oder Ozonabnahmen beobachtet. Als dritte wesentliche Einflußgröße auf die Höhe der Ozonkonzentrationen kommt dort noch der Titrationseffekt, d.h. der schnelle Abbau von Ozon durch frisch emittiertes Stickstoffmonoxid, zum Tragen. Dieser Effekt wirkt gegenläufig zu den Auswirkungen der Ozonakkumulation in den höheren Schichten (Erhöhung der Hintergrundkonzentration) und der photochemischen Aktivität (lokale Ozonproduktion). Überwiegt der Titrationseffekt, führt eine Absenkung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen auch bei hoher photochemischer Aktivität zu einer Zunahme der Ozonkonzentrationen. Ob die Ozonkonzentrationen in solchen Gebieten bei einer Emissionsminderung zu- oder abnehmen, wird damit eine komplizierte Funktion der lokalen Emissionsverhältnisse, des Einflusses des Ferntransports sowie der Höhe der photochemischen Ozonproduktion. Betrachtet man in stark  $\text{NO}_x$ -belasteten Gebieten die Summe von  $\text{O}_3$  und  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_x$ , d.h. schaltet man den Titrationseffekt aus, so zeigt sich, daß die  $\text{O}_x$ -Konzentrationen weitaus weniger von Emissionsänderungen beeinflusst werden als die  $\text{O}_3$ -Konzentrationen.

#### b) Photochemische Simulationsrechnungen

Dieses Bild ergibt sich auch aus den numerischen Untersuchungen mit dem REM3. In den **meisten Teilen Deutschlands** werden **als Folge des Wochengangs** der Emissionen **am Samstag und insbesondere am Sonntag bei gleichen meteorologischen Bedingungen niedrigere Ozonkonzentrationen berechnet als während der Woche**. Ozonzunahmen treten nur vereinzelt in Gebieten mit hoher  $\text{NO}_x$ -Emissionsdichte auf, und auch nur dann in größerem Ausmaße, wenn die photochemische Aktivität eher gering ist. Generell liegen die berechneten Ozonabnahmen in ländlichen Gebieten am Samstag bezogen auf den Freitag um bis zu 10% niedriger. Am **Sonntag** werden **Abnahmen** im Bereich von **10 bis 25%** berechnet. Dies deckt sich mit den Auswertungen von Bronniman und Neu (1997), die in der Schweiz außerhalb der Stadtgebiete bei hoher photochemischer Aktivität am Wochenende Abnahmen der gemessenen Ozonspitzenwerte um 10 bis 15% ermittelten.

Bei hoher photochemischer Aktivität werden in **Gebieten mit hoher  $\text{NO}_x$ -Emissionsdichte** wie dem Ruhrgebiet für das Wochenende nur geringe **Zu- und Abnahmen der Ozonkonzentrationen berechnet**. Ist die photochemische Aktivität eher niedrig, d.h. erreichen die Ozonmaxima nur mäßige Höhen, überwiegt in den Ballungsgebieten der Einfluß des **Titrationseffekts**. Unter solchen Bedingungen führt die Wochenendreduktion der Emissionen **in Ballungsgebieten mit hohen  $\text{NO}_x$ -Emissionen** zu **Ozonzunahmen**, die bei geringer photochemischer Aktivität und damit vergleichsweise niedrigen Ozonspitzenwerten beträchtlich sein können. Auch diese Ergebnisse decken sich mit Meßauswertungen, die gerade für die Stadtgebiete keine eindeutige Tendenz ausweisen, sondern als Folge der Wochenendabsenkung der Emission sowohl Ozonzu- als auch Ozonabnahmen zeigen.

### **III. Kleinräumige Wirkungsanalysen (Phase B)**

## 5. Struktur- und Emissionsdaten der drei ausgewählten Modellregionen Rhein-Main-Neckar, Dresden und Berlin-Brandenburg

(1) Die kleinräumigen Wirkungsanalysen wurden für drei ausgewählte Modellregionen

- Rhein-Main-Neckar
- Dresden und
- Berlin-Brandenburg

durchgeführt. In allen drei Regionen wurden in der untersuchten Episode (23.7.-8.8.1994) an mehreren Tagen Ozon-Spitzenkonzentrationen von deutlich mehr als 200 µg/m<sup>3</sup> (1h-Wert) gemessen.

(2) Im folgenden wird ein Kurzüberblick über ausgewählte Struktur- und Emissionsdaten der drei Modellregionen präsentiert. Ausführliche Beschreibungen der Basisdaten der drei Modellregionen sind den gesonderte Teilberichten, in denen die Struktur- und Emissionsdatenbasen im Detail erläutert werden, enthalten.<sup>1</sup>

(3) Die **räumliche Ausdehnung** der Modellregionen ist im wesentlichen vergleichbar groß. Sie liegt im Bereich von 7.500 km<sup>2</sup> - bis 11.000 km<sup>2</sup>. Die Siedlungs-, Wirtschafts-, Verkehrs- und topographischen **Strukturen** der drei Regionen sind hingegen sehr verschieden und demzufolge auch deren **Emissionsprofile** (vgl. Tab. 5.1):

— Die **NOx-Emissionen** in der untersuchten 14-tägigen Episode vom 23.07.1994 bis 08.08.1994 erreichen in der Region Rhein-Main-Neckar ein Volumen von knapp 8.000 Tonnen. In der Region Berlin-Brandenburg liegt demgegenüber der NOx-Ausstoß bei rd. 4.700 t und in der Region Dresden bei "nur" rd. 1.500 t.

<sup>1</sup> siehe hierzu die Teilberichte:

- a) Hartmann A., Motz G.: Inputdatenbasis 1994 der Modellregion Rhein-Main: Kleinräumige Emissionen nach Emittentengruppen, Emissionsminderungs-Szenarien, Landnutzung und Orografie, Prognos AG, Berlin/Basel 1997
- b) Hartmann A., Motz G.: Inputdatenbasis 1994 der Modellregion Dresden: Kleinräumige Emissionen nach Emittentengruppen, Emissionsminderungs-Szenarien, Landnutzung und Orografie, Prognos AG, Berlin/Basel 1997
- c) Hartmann A., Motz G.: Inputdatenbasis 1994 der Modellregion Berlin-Brandenburg: Kleinräumige Emissionen nach Emittentengruppen, Emissionsminderungs-Szenarien, Landnutzung und Orografie, Prognos AG, Berlin/Basel 1997

Tab. 5.1: Ausgewählte Strukturmerkmale der Modellregionen

Merkmale	Rhein-Main-Neckar	Dresden	Berlin-Brandenburg
Gesamtfläche	10.080 km <sup>2</sup>	7.600 km <sup>2</sup>	10.800 km <sup>2</sup>
Waldfläche	3.200 km <sup>2</sup>	2.700 km <sup>2</sup>	3.800 km <sup>2</sup>
Einwohner 1994	5,4 Mio.	1,6 Mio.	4,4 Mio.
Kfz-Bestand 1994	2,7 Mio.	0,7 Mio.	1,4 Mio.
Räumliche Auflösung	4 km x 4 km	3 km x 3 km	2 km x 2 km
Anzahl Emittentengruppen	17	20	20
Chemische Komponenten	NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , CO und VOC		
Untersuchungszeitraum	Episode vom 23.7.-8.8.1994		
Emissionsvolumina 1994 (Episode)	Tonnen	Tonnen	Tonnen
- NO <sub>x</sub>	191.960 (7.938)	36.275 (1.457)	122.290 (4.746)
- VOC (inkl. biogene Quellen)	149.340 (8.969)	69.640 (4.324)	168.525 (9.266)
Emissionsanteile in der Episode			
- Straßenverkehr - NO <sub>x</sub>	70%	60%	75%
- Straßenverkehr - VOC	44%	34%	39%
- Biogene VOC	27%	51%	33%
VOC/NO <sub>x</sub> -Verhältnis in der Episode	1,13	2,96	1,95

- Die **NO<sub>x</sub>-Emissionsdichte** liegt somit in der Region Rhein-Main-Neckar deutlich höher als in den beiden anderen Regionen. Sie beträgt das 4,2-fache von Dresden und 1,8-fache von Berlin-Brandenburg.
- Die **VOC-Emissionen aus anthropogenen und biogenen Quellen** liegen im Falle Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg mit rd. 9.000 t im 14-tägigen Untersuchungszeitraum etwa gleich hoch. Im Falle Dresdens hingegen ist der VOC-Ausstoß um rd. 50% niedriger.
- Die **VOC-Emissionsdichte** aus anthropogenen und biogenen Quellen fällt demzufolge im Falle der Regionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg mehr als doppelt so hoch aus wie in der Region Dresden.
- Der **Anteil der VOC-Emissionen aus biogenen Quellen** (Wälder) an den gesamten VOCs in der Episode fällt im Falle Dresdens mit rd. 51% besonders stark ins Gewicht. Aber auch in den Regionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg betragen die Anteile der biogenen VOCs rd. 27% bzw. 33%. Dazu ist anzumerken, daß diese hohen Anteile nur deshalb erreicht werden, weil im hier zugrundeliegenden

14-tägigen (hochsommerlichen) Untersuchungszeitraum besonders hohe Temperaturen vorherrschten. Die Emissionsaktivität der Wälder ist gerade bei hohen Temperaturen sehr ausgeprägt (exponentieller Anstieg); bei niedrigeren Temperaturen sind die Emissionsraten wesentlich gering. Infolgedessen fallen über das gesamte Jahr gesehen die Anteile der biogenen VOC-Emissionen wesentlich niedriger aus als in der hier untersuchten hochsommerlichen Episode.

- Das **Emissionsverhältnis VOC/NOx** ist im Rhein-Main-Raum mit 1,1 nahezu ausgeglichen. Die Regionen Dresden (mit 2,9) und Berlin-Brandenburg (mit 1,9) haben im Vergleich dazu ausgeprägt VOC-betonte Emissionsprofile.

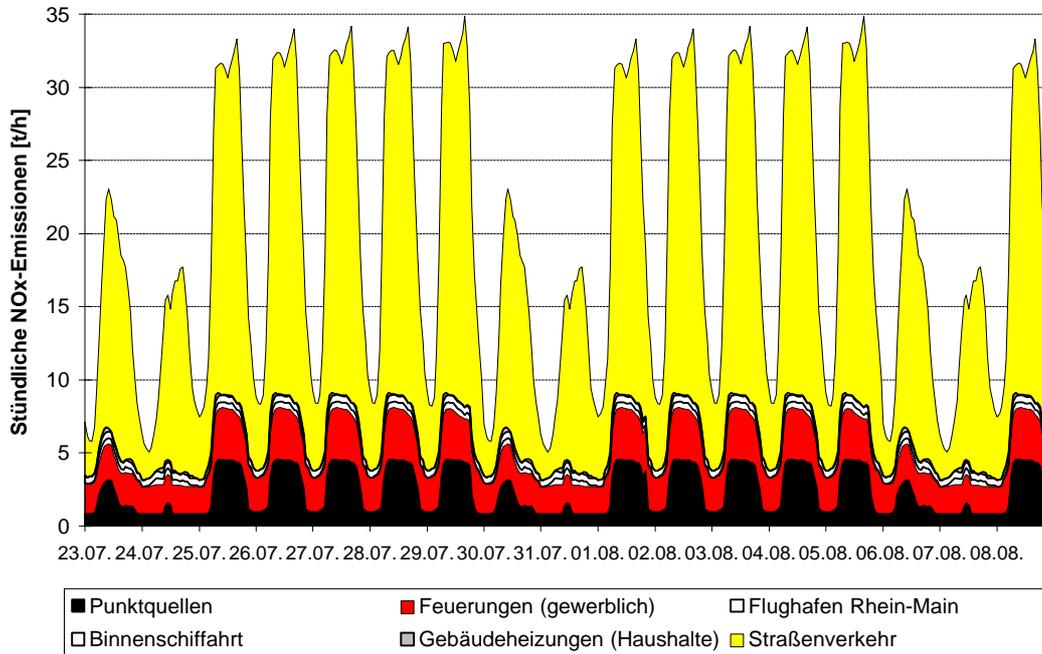
(3) In den folgenden Abbildungen 5-1 bis 5-6 sind für die drei Modellregionen die Ergebnisse der Berechnungen der Emissionen nach Emittentengruppen, nach den Stoffen NOx und VOC sowie in zeitlich hoher Auflösung dargestellt. In den Abbildungen 5-7 bis 5-12 sind beispielhaft die Ergebnisse der Emissionsberechnungen für die Ozon-Vorläufersubstanzen NOx und VOC in hoher räumlicher Auflösung für die Quellengruppe Straßenverkehr für eine exemplarische Stunde dargestellt.

(4) Die Abbildungen 5-1 bis 5-6 zeigen, daß der **Tagesgang der Emissionen** in allen Modellregionen bei **NOx** den typischen, stark vom **Verkehr** geprägt Verlauf ausweist. Deutlich erkennbar sind die ausgeprägten Nachttäler und die Tagesspitzen entsprechend den Verkehrsspitzen sowie das typischerweise reduzierte Emissionsniveau am Wochenende.

Beim **Tagesgang der VOC-Emissionen** ist ebenfalls ein stark verkehrsgeprägter Verlauf gegeben. Wie die Abbildungen zeigen, wird deren Verlauf allerdings noch von demjenigen der temperaturabhängigen biogenen VOC-Emissionen überlagert. Deutlich erkennbar ist in den Abbildungen des Tagesgangs der VOC-Emissionen auch, daß bei den **biogenen Quellen** die Emissionen je nach Temperaturhöhe von Tag zu Tag sehr unterschiedlich ausfallen und daß deren Spitzen regelmäßig am Nachmittag auftreten. Ebenfalls deutlich sichtbar ist der Umstand, daß die biogenen Quellen auch in den Nachtstunden ein relativ hohes Emissionsniveau aufweisen.

(5) Die Abbildungen 5-7 bis 5-12 zeigen die modellierte räumliche Verteilung der NOx- und VOC-Emissionen für die Quellengruppe Straßenverkehr für eine exemplarische Stunde innerhalb der Modellregionen. Erkennbar sind darin die besonderen räumlichen Schwerpunkte der Emissionsaktivitäten, so insbesondere die Hauptverkehrsachsen (Autobahnen) im Falle von NOx und die Siedlungsbereiche im Falle von VOC. (Ausführliche Darstellungen und Erläuterungen für die anderen Quellengruppen sind in den Berichten zu den Teilverhaben "Inputdatenbasen ....." enthalten.)

**Abb. 5-1: Tagesgang der NOx-Emissionen in der Modellregion Rhein-Main-Neckar in der Episode vom 23.07.-08.08.1994**



**Abb. 5-2: Tagesgang der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Rhein-Main-Neckar in der Episode vom 23.07.-08.08.1994**

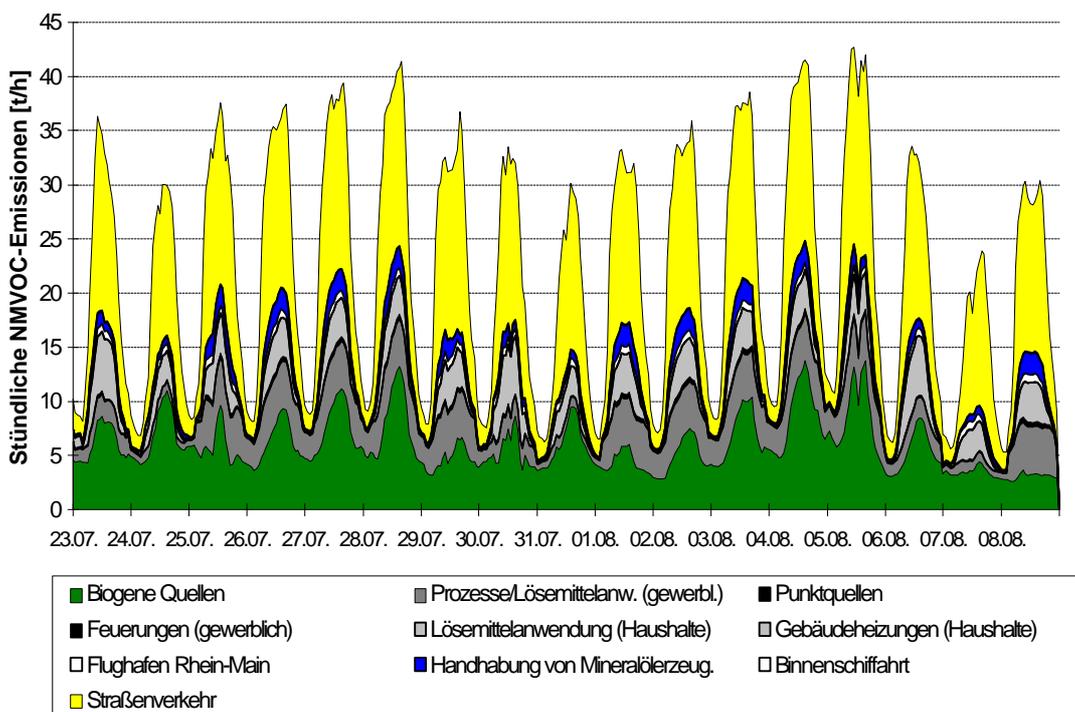


Abb. 5-3: Tagesgang der NOx-Emissionen in der Modellregion Dresden in der Episode vom 23.07.-08.08.1994

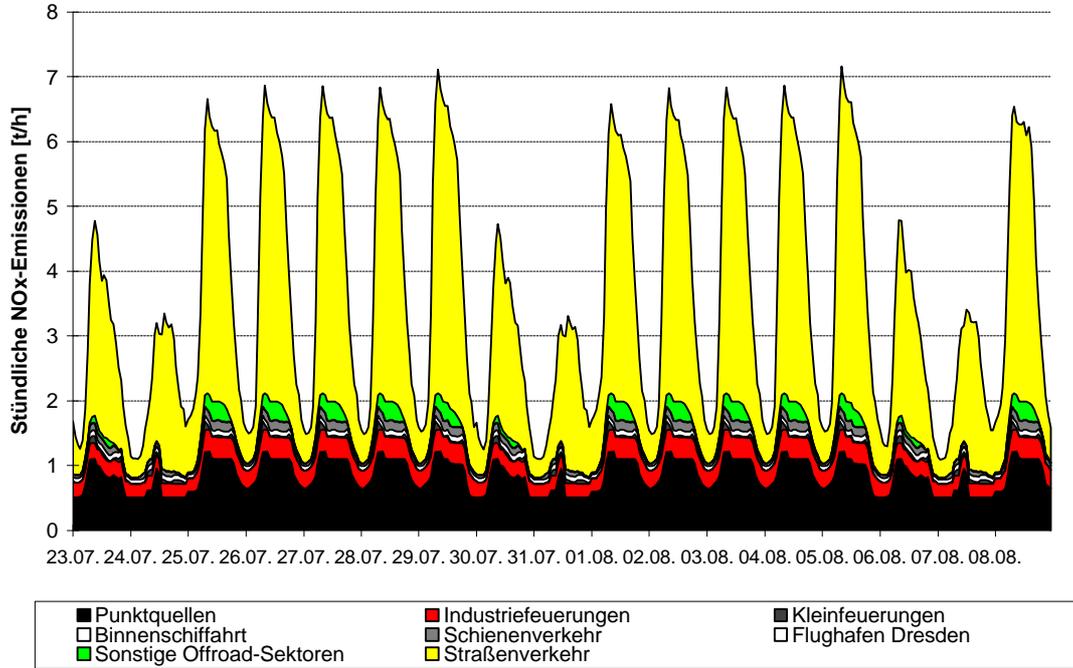
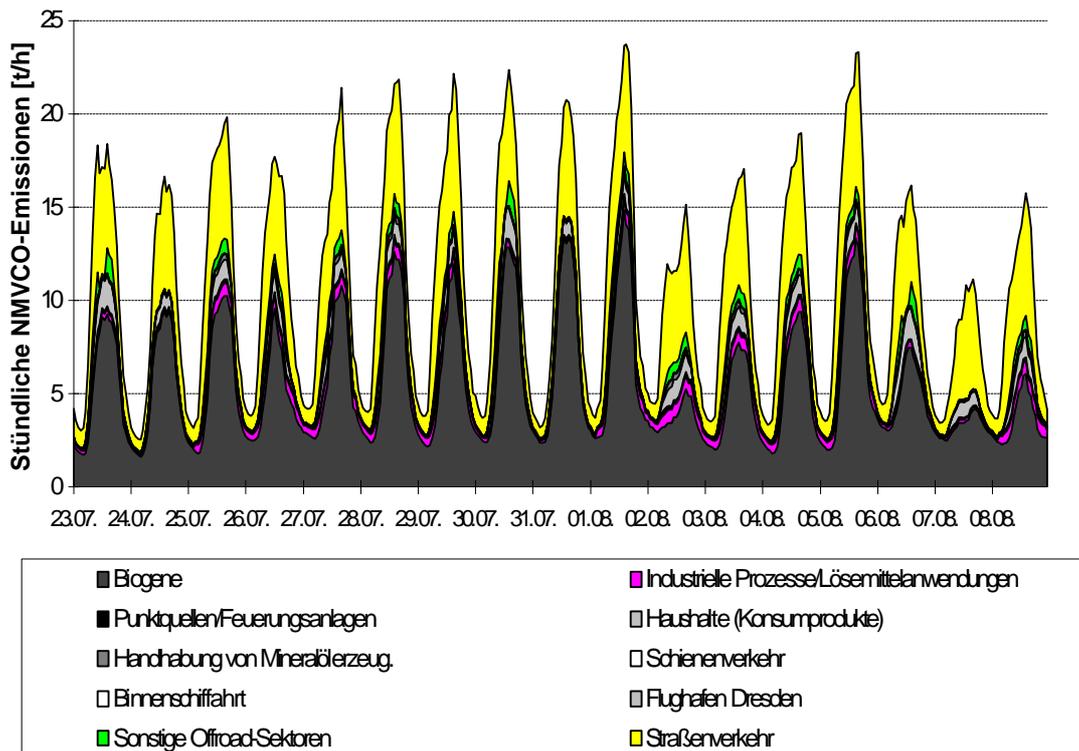
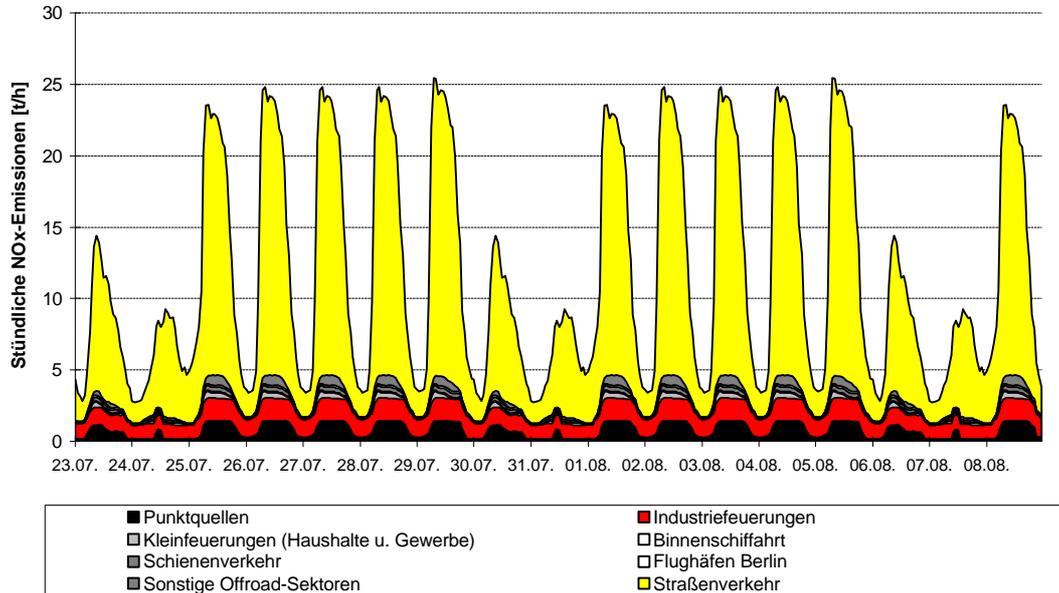


Abb. 5-4: Tagesgang der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Dresden in der Episode vom 23.07.-08.08.1994



**Abb. 5-5: Tagesgang der NOx-Emissionen in der Modellregion Berlin-Brandenburg in der Episode vom 23.07.-08.08.1994**



**Abb. 5-6: Tagesgang der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Berlin-Brandenburg in der Episode vom 23.07.-08.08.1994**

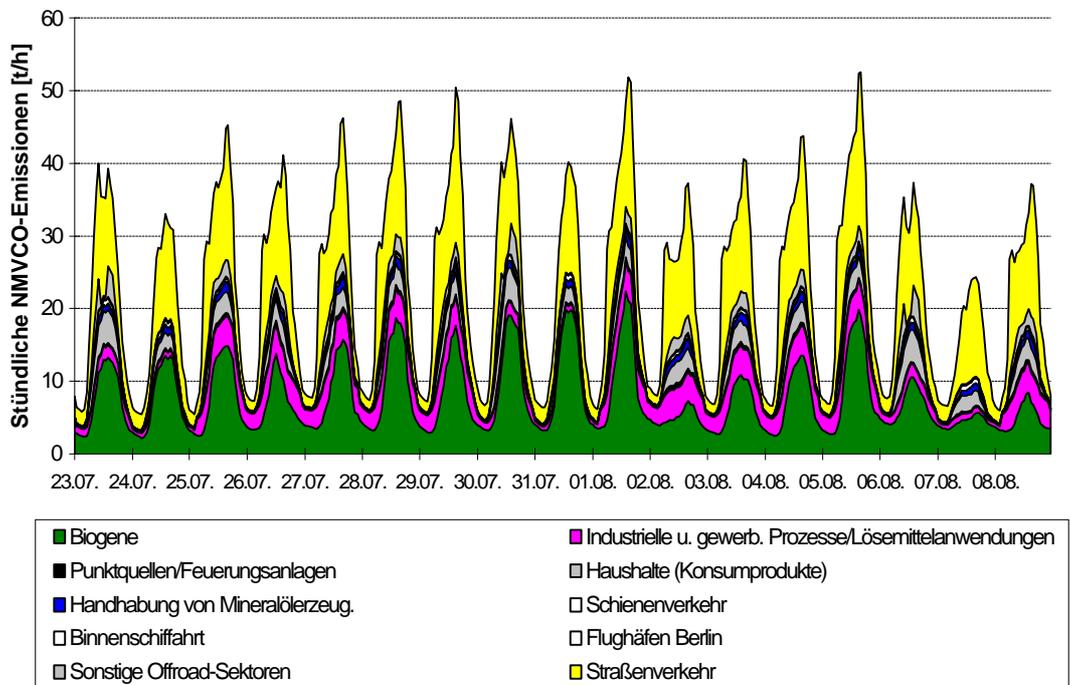


Abb. 5-7: Räumliche Verteilung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in der Modellregion Rhein-Main-Neckar am 05.08.1994 von 12-13 Uhr

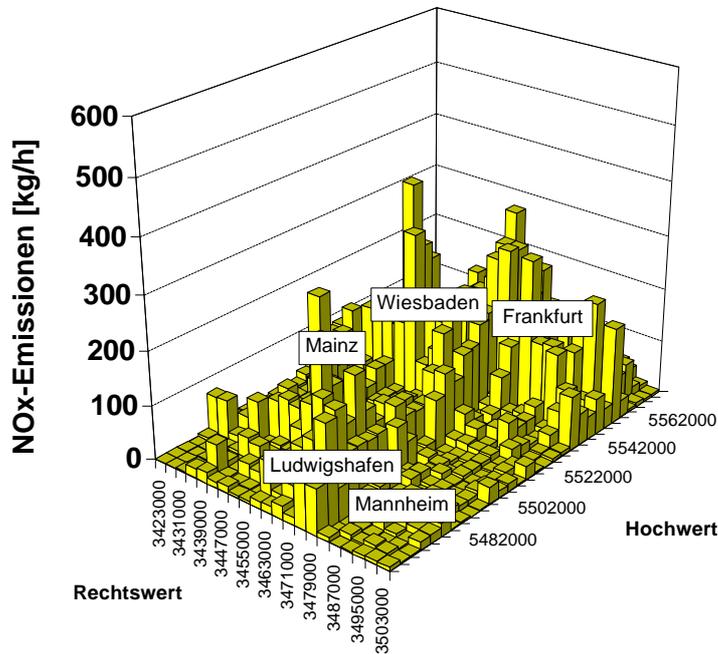


Abb. 5-8: Räumliche Verteilung der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Rhein-Main-Neckar am 05.08.1994 von 12-13 Uhr

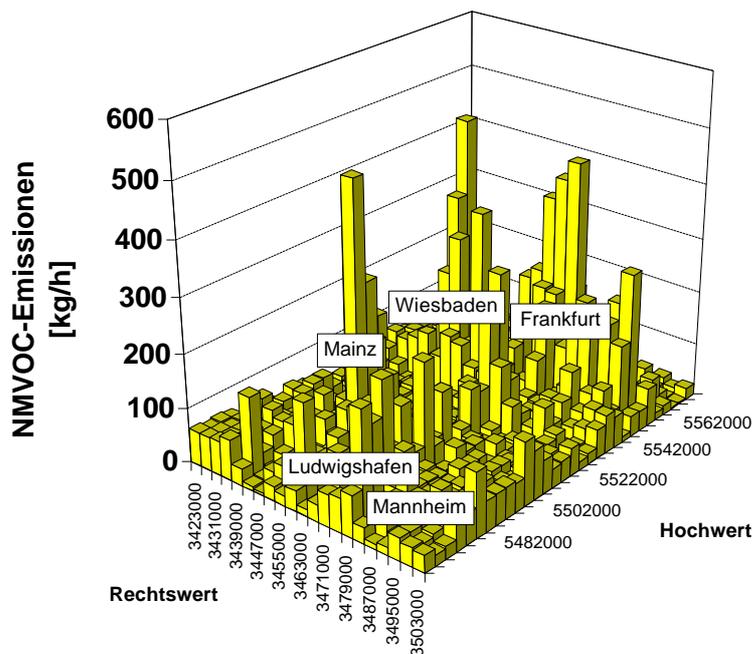


Abb. 5-9: Räumliche Verteilung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in der Modellregion Dresden am 05.08.1994 von 12-13 Uhr

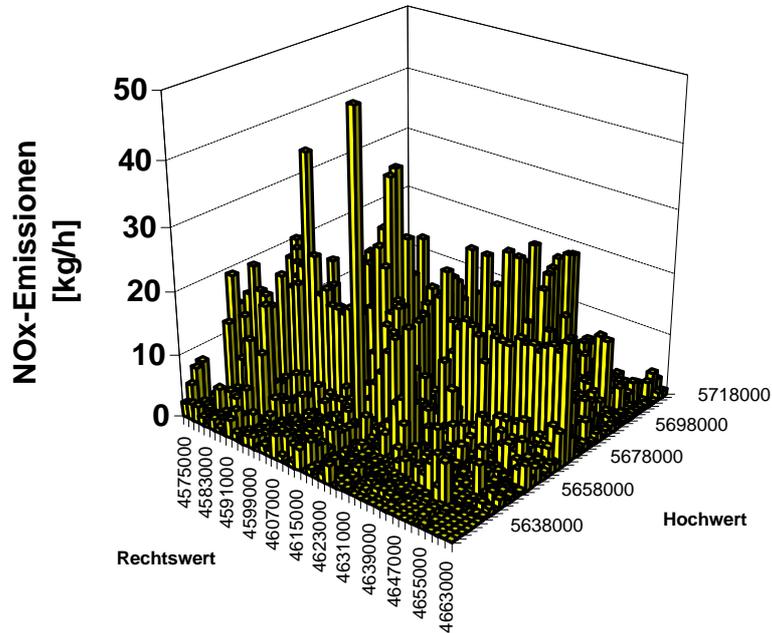


Abb. 5-10: Räumliche Verteilung der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Dresden am 05.08.1994 von 12-13 Uhr

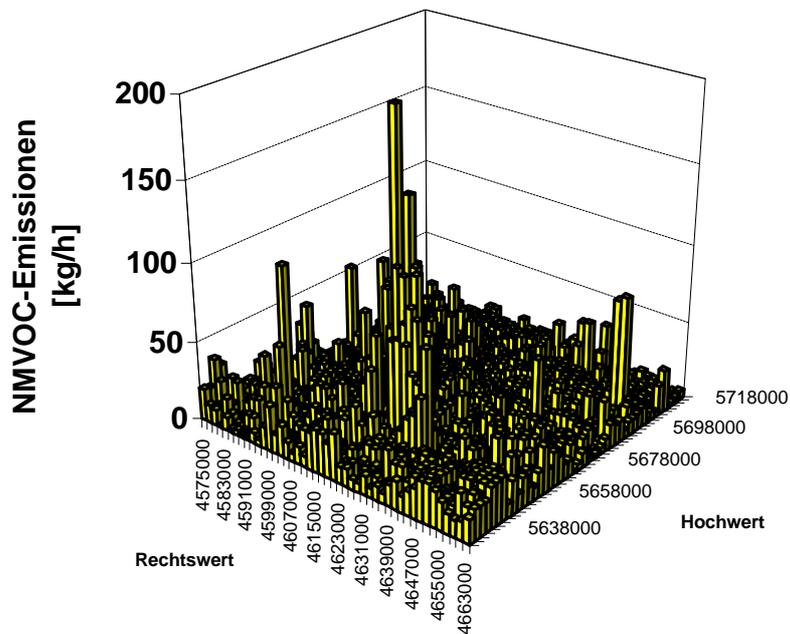


Abb. 5-11: Räumliche Verteilung der NOx-Emissionen in der Modellregion Berlin-Brandenburg am 05.08.1994 von 12-13 Uhr

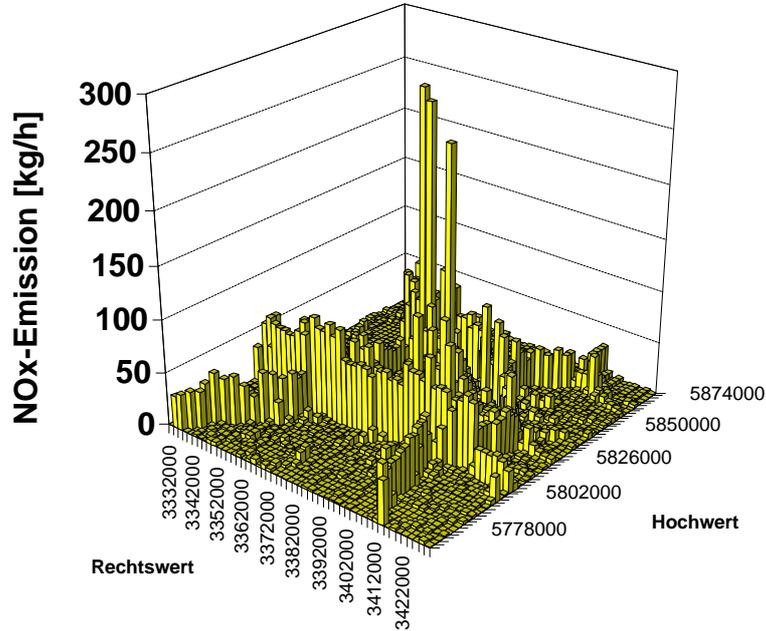
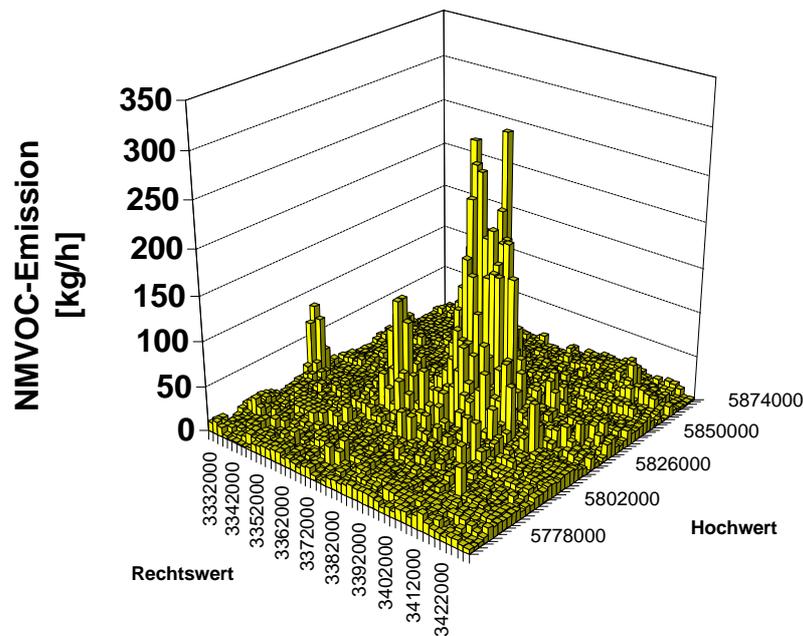


Abb. 5-12: Räumliche Verteilung der NMVOC-Emissionen in der Modellregion Berlin-Brandenburg am 05.08.1994 von 12-13 Uhr



## **6. Emissionsseitige Wirkungen von lokalen, regionalen und überregionalen Emissionsminderungsmaßnahmen in den Modellregionen**

### **6.1 Grundlagen**

(1) Auf die methodischen Grundlagen hinsichtlich der Auswahl der zu untersuchenden Minderungsmaßnahmen, der Abschätzung der damit verbundenen bzw. erreichbaren Minderungseffekte bei den Ozon-Vorläuferemissionen und der Zusammenfassung von Einzelmaßnahmen zu Szenarien wurde oben (in Kapitel 2.2) bereits näher eingegangen.

(2) Analog zur Vorgehensweise in der Untersuchungsstufe A wurde für jede Modellregion zunächst eine Vielzahl von temporären lokalen/regionalen Einzelmaßnahmen evaluiert. Anschließend wurden die aus Untersuchungssicht besonders relevanten Einzelmaßnahmen zu ausgewählten Minderungsszenarien zusammengefaßt wurden. Vorrangige Kriterien bei der Auswahl und Zusammenstellung waren der Bezug zu den Szenarien in der Stufe A, die Berücksichtigung der regionsspezifischen Ansatzpunkte für Minderungsstrategien sowie die zeitliche und räumliche Dimensionierung der Maßnahmen. Über die Vorgehensweise bei der Erstellung der emissionsseitigen Wirkungsanalysen informieren im einzelnen die Berichte zu den Teilvorhaben.

### **6.2 Ergebnisse der kleinräumigen, emissionsseitigen Wirkungsanalysen**

(1) Für die kleinräumigen Wirkungsanalysen wurden letztendlich 11 Maßnahmenbündel (Szenarien) definiert, für die in den drei Modellregionen in gleicher Weise zunächst emissionsseitige und anschließend immissionsseitige Wirkungsanalysen erarbeitet wurden. Über die Inhalte dieser Szenarien wurde bereits oben (in Kap. 2.2) überblicksartig informiert. In der nachstehenden Tab. 6.1 sind diese Inhalte nochmals in Kurzform aufgeführt.

(2) Bei den kleinräumigen Minderungsszenarien erfolgte absprachegemäß eine Fokussierung auf den Bereich der temporären Maßnahmen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf dem Aspekt der räumlichen Ausdehnung (Größe) des Maßnahmegebietes. Desweiteren wurde - unter Berücksichtigung der Ergebnisse der großräumigen immissionsseitigen Wirkungsanalysen - bewußt darauf verzichtet, solche Minderungsmaßnahmen resp. -strategien zu untersuchen, denen nur ein geringes Minderungspotential (im regionalen Gesamtmaßstab) zukommt. Dazu zählen insb. Maßnahmen mit starker lokaler Begrenzung (z.B. Fahrverbote in Stadtzentren) oder mit geringer Eingriffstiefe (z.B. "sanfte" Tempolimits).

(3) Die Ergebnisse der emissionsseitigen Abschätzungen für die kleinräumigen Szenarien S-1 bis S-10 sind in der nachstehenden Tab. 6.1 zusammenfassend dargestellt. Im einzelnen ist dazu anzumerken:

**Szenario S-1: Regio-Tempolimit**

Bei diesem Szenario handelt es sich um ein "scharfes" Tempolimit auf den außerörtlichen Straßen innerhalb der Modellregion. Die Spezifikationen des Tempolimits sind identisch mit denen des großräumigen Tempolimit-Szenario T-1 (s.oben): auf Autobahnen 80km/h für Pkw und 60km/h für Lkw und auf sonstigen außerörtlichen Straßen 60km/h; es wird eine Befolgungsrate von 80% unterstellt.

Die Auswirkungen dieser regionalen verkehrsbezogenen Maßnahme betreffen im wesentlichen nur den NOx-Ausstoß aus Pkw- und Lkw-Abgasen. Die berechneten NOx-Minderungsraten (bezogen auf die gesamten NOx-Emissionen in der Episode) liegen zwischen 11% und 14% (s. Tab.6.1). Die höhere Rate für den Untersuchungsraum Rhein-Main-Neckar (14%) reflektiert den Umstand, daß dort auf das außerörtliche Straßenverkehrsaufkommen ein höherer Emissionsanteil entfällt als in den beiden anderen Regionen. Die VOC-Effekte sind mit rd. 1% ohne Bedeutung.

**Szenario S-2: Regio-Pkw-Fahrverbote**

Bei diesem Szenario handelt es sich um ein Fahrverbot für alle nicht schadstoffgeminderten Pkw auf allen Straßen innerhalb der Modellregion.

Die Auswirkungen dieser regionalen verkehrsbezogenen Maßnahme betreffen die Pkw-Emissionen der betroffenen Fahrzeugkategorie (Abgase, Betriebsverluste usw.) sowie die Emissionen im Bereich des Kraftstoffumschlags (Tankstellen). Die berechneten NOx-Minderungsraten (bezogen auf die gesamten NOx-Emissionen) liegen zwischen 19% und 25%. Die berechneten VOC-Minderungsraten (bezogen auf die gesamten anthropogenen und biogenen VOC-Emissionen) liegen zwischen 25% und 28%.

**Szen. S-4a: Regio-Straßenverkehr**

Bei diesem ebenfalls ausschließlich regionalen Szenario werden zum einen die beiden Szenarien S-1 und S-2 kombiniert (Tempolimit und Pkw-Fahrverbote) und zum anderen auch ein Lkw-Fahrverbot (Fahrzeugtypen vor EURO I) hinzugefügt.

Die Auswirkungen dieses regionalen verkehrsbezogenen Maßnahmenbündels betreffen die Emissionen der betroffenen Fahrzeugkategorien sowie die Emissionen im Bereich des Kraftstoffumschlags (Tankstellen). Die berechneten NO<sub>x</sub>-Minderungsraten (bezogen auf die gesamten NO<sub>x</sub>-Emissionen in der Modellregion) liegen entsprechend höher und erreichen 51% bis 53%. Die berechneten VOC-Minderungsraten (bezogen auf die gesamten anthropogenen und biogenen VOC-Emissionen in der Modellregion) liegen bei gut 30%.

**Szen. S-4b: Kombi-Straßenverkehr-Max (S-4a plus angrenzende Gebiete)**

Bei diesem Szenario betreffen die Minderungsmaßnahmen sowohl die Modellregion als auch angrenzende Gebiete (sog. Kombi-Szenario). Innerhalb der Modellregion kommt das selbe Maßnahmenbündel wie beim Szenario S-4a zur Anwendung. Als angrenzende Gebiete sind die benachbarten Bundesländer definiert. In diesen angrenzenden Gebieten wird als Maßnahme ein flächendeckendes Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw unterstellt. Allerdings wird bei den drei Modellregionen nicht "automatisch" die gesamte Fläche des benachbarten Bundeslandes in Betracht gezogen sondern - je nach Sachlage - der als sinnvoll erscheinende Gebietsteil.<sup>1</sup> (Nähere Angaben hierzu enthalten die Berichte zu den photochemischen Modellrechnungen.)

Die Auswirkungen dieses überregionalen verkehrsbezogenen Maßnahmenbündels betreffen die Emissionen der betroffenen Fahrzeugkategorien sowie die Emissionen im Bereich des Kraftstoffumschlags (Tankstellen) innerhalb der Region und in den betroffenen angrenzenden Gebieten. Die berechneten regionalen NO<sub>x</sub>- und VOC-Minderungsraten entsprechen definitionsgemäß denen im Szenario S-4a. Die berechneten zusätzlichen Minderungseffekte außerhalb der Region, in den betroffenen angrenzenden Räumen, sind je nach Gebietstyp unterschiedlich; sie liegen insgesamt im Bereich von 20% bis 30%.

**Szenario S-6: Regio-Focus NO<sub>x</sub>**

Bei diesem regionalen Szenario zielt das Minderungskonzept darauf ab, im Rahmen eines größeren Maßnahmenbündels alle bedeutenderen NO<sub>x</sub>-Emissionsquellen zu erfassen und zu mindern. Die Maßnahmen betreffen

<sup>1</sup> So wird bspw. im Falle der Modellregion Dresden nicht das gesamte Bundesland Bayern als angrenzendes Gebiet einbezogen, sondern lediglich ein nördliches Teilgebiet davon. Angrenzende ausländische Gebiete, wie Tschechien oder Polen, werden ebenfalls nicht einbezogen.

den Straßenverkehr (Tempolimits und Fahrverbote gemäß Szenario 4-a), alle größeren industriellen NO<sub>x</sub>-Emittenten (temporäre Stilllegung) und den Sektor Kleinf Feuerungsanlagen (Appelle zur Einschränkung).

Die damit einhergehenden regionalen Emissions-Minderungseffekte werden wie folgt berechnet: rd. 66% bis 74% bei NO<sub>x</sub> und rd. 33% bei VOC (jeweils bezogen auf die Gesamtheit der regionalen Emissionen in der Episode).

#### **Szenario S-7: Regio-Focus VOC**

Bei diesem regionalen Szenario handelt es sich ebenfalls um ein größeres Maßnahmenbündel, bei dem alle bedeutenderen VOC-Emissionsquellen erfaßt sind. Die Minderungsmaßnahmen betreffen den Straßenverkehr (Tempolimits und Fahrverbote gemäß Szenario 4-a), alle größeren industriellen VOC-Emittenten (temporäre Stilllegung), den Sektor kleingewerbliche Anlagen und den Sektor Haushalte (Appelle zur Einschränkung der Lösemittelanwendungen).

Die damit einhergehenden regionalen Emissions-Minderungseffekte werden wie folgt berechnet: rd. 30% bis 40% bei VOC und rd. 20% bis 25% bei NO<sub>x</sub> (jeweils bezogen auf die Gesamtheit der regionalen Emissionen in der Episode). Die erreichbaren Minderungen bei den VOCs sind nur wenig höher als im Falle des Szenarios S-6. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei S-6 ohnehin die größeren VOC-Quellen bereits miterfaßt sind, die Effekte der Appelle als sehr gering eingestuft werden und daß der Bereich der biogenen Quellen nicht tangiert ist.

#### **Szen. S-8a: Regio-Max NO<sub>x</sub>/VOC**

Bei diesem regionalen Szenario zielt die Konzeption des Maßnahmenbündels darauf ab, alle bedeutenden regionalen Quellen der Ozon-Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC zu erfassen und zu mindern. Es handelt sich folglich bei diesem Szenario um eine Zusammenfassung aller Maßnahmen aus den beiden regionalen Szenarien NO<sub>x</sub>-Max und VOC-Max .

Die Minderungsmaßnahmen betreffen den Straßenverkehr (Tempolimits und Fahrverbote gemäß Szenario 4-a), alle größeren industriellen Emittenten (temporäre Stilllegungen) und die Emittentensektoren Kleinf Feuerungsanlagen, kleingewerbliche Anlagen und Privathaushalte (Appelle zur Einschränkung der emissionsrelevanten Aktivitäten).

Die damit einhergehenden regionalen Emissions-Minderungseffekte entsprechen denjenigen der Szenarien S-6 und S-7: rd. 66% bis 74% bei NO<sub>x</sub> und rd. 33% bis 40% bei VOC (jeweils bezogen auf die Gesamtheit der regionalen Emissionen in der Episode).

**Szen. S-8b: Kombiszenario--Max (S-8a plus angrenzende Gebiete)**

Bei diesem Szenario betreffen die Minderungsmaßnahmen sowohl die Modellregion als auch angrenzende Gebiete (sog. Kombi-Szenario). Innerhalb der Modellregion kommt das selbe Maßnahmenbündel wie beim Szenario S-8a zur Anwendung. Als angrenzende Gebiete sind die benachbarten Bundesländer definiert, und in diesen angrenzenden Gebieten wird als Maßnahme ein flächendeckendes Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw unterstellt (wie im Szenario S-4b).

Die Auswirkungen dieses überregionalen Maßnahmenbündels sind bei den regionalen NOx- und VOC-Minderungsraten definitionsgemäß identisch mit denen im Szenario S-8a. Die berechneten Minderungseffekte außerhalb der Region, in den betroffenen angrenzenden Räumen, sind je nach Gebietstyp unterschiedlich; sie liegen insgesamt im Bereich von 20% bis 30%.

**Szenario S-9: Sommerbenzin (reformulierte Kraftstoffe)**

Bei diesem Szenario wird davon ausgegangen, daß in den Sommermonaten sowohl in der Modellregion als auch in den angrenzenden Gebieten (Gebietsabgrenzungen wie bei S-4b und S-8b) die chemisch/physikalischen Eigenschaften (Komposition) der an den Tankstellen vertriebenen Kraftstoffe für Otto- und Dieselfahrzeuge gegenüber demjenigen des Jahres 1994 wie folgt verändert wäre: Bei Ottokraftstoffen geänderte Komposition gemäß dem kalifornischen RFGII (RFG = reformulated gasoline) und bei Dieselmotorkraftstoffen gemäß dem UBA-Vorschlag 1995/96.<sup>2</sup>

Der Typus dieses Szenarios ist folglich derjenige eines nicht-temporären, da über längere Zeit und somit dauerhaft wirksamen, Kombi-Szenarios (Region plus angrenzende Gebiete).

Die Maßnahme betrifft die Emissionen des Straßenverkehrs (Abgase, Betriebsverluste, Tankatmung usw.) und im Bereich der Tankstellen. Betroffen sind sowohl die Emissionen innerhalb der Region als auch in den angrenzenden Gebieten. Die berechneten regionalen Emissionsminderungsraten (bezogen auf die gesamten regionalen Emissionen in der Episode) betragen bei den VOCs rd. 6-7% und bei NOx rd. 3%. (Bezogen auf die einzelnen Emittentengruppe bzw. -bereich sind die Raten höher. So werden z.B. für die Pkw-Abgasemissionen Minderungen von rd. 17% abgeschätzt.)

<sup>2</sup> Zitat des Artikel betr. reformulierte Kraftstoffe

**Szen. S-10: Trend 2005**

Bei diesem Szenario handelt es sich das gleiche Szenario wie bei den großräumigen Analysen (s.oben). Der einzige Unterschied liegt darin, daß nunmehr die Episode 1994 den Bezugszeitraum darstellt (und nicht das Jahr 1990).

Der Typus dieses Szenarios ist derjenige eines dauerhaft wirksamen Kombi-Szenarios. Die Minderungsmaßnahmen betreffen sowohl die Modellregion als auch angrenzende Gebiete als auch alle anderen Gebiete in Deutschland. Es sei daran erinnert, daß bei diesem Szenario von der Hypothese ausgegangen wird, daß die eingeleiteten Maßnahmen bereits in der Episode 1994 voll wirksam seien.

Die Auswirkungen dieses Szenarios Trend 2005 betreffen - wie oben im Rahmen der großräumigen Analysen dargestellt - die Emissionen aller Emittentenbereiche. Die berechneten regionalen NO<sub>x</sub>- und VOC-Minderungsraten sind je nach Region unterschiedlich (aufgrund der verschiedenen Strukturen, wie beim Kfz-Bestand, oder der Betroffenheit von den eingeleiteten Maßnahmen). Sie liegen bei NO<sub>x</sub> im Bereich von 21% bis 30% und bei den VOCs zwischen 27% und 31% (jeweils bezogen auf die Gesamtheit der regionalen Emissionen). Hinzu kommen die korrespondierenden Minderungseffekte in den übrigen Teilen Deutschlands, die je nach Region ebenfalls unterschiedlich ausfallen.

**Szen. S-4a+: Vorzeitige Inkraftsetzung der Maßnahmen gemäß dem Szenario S-4a  
Regio-Straßenverkehr**

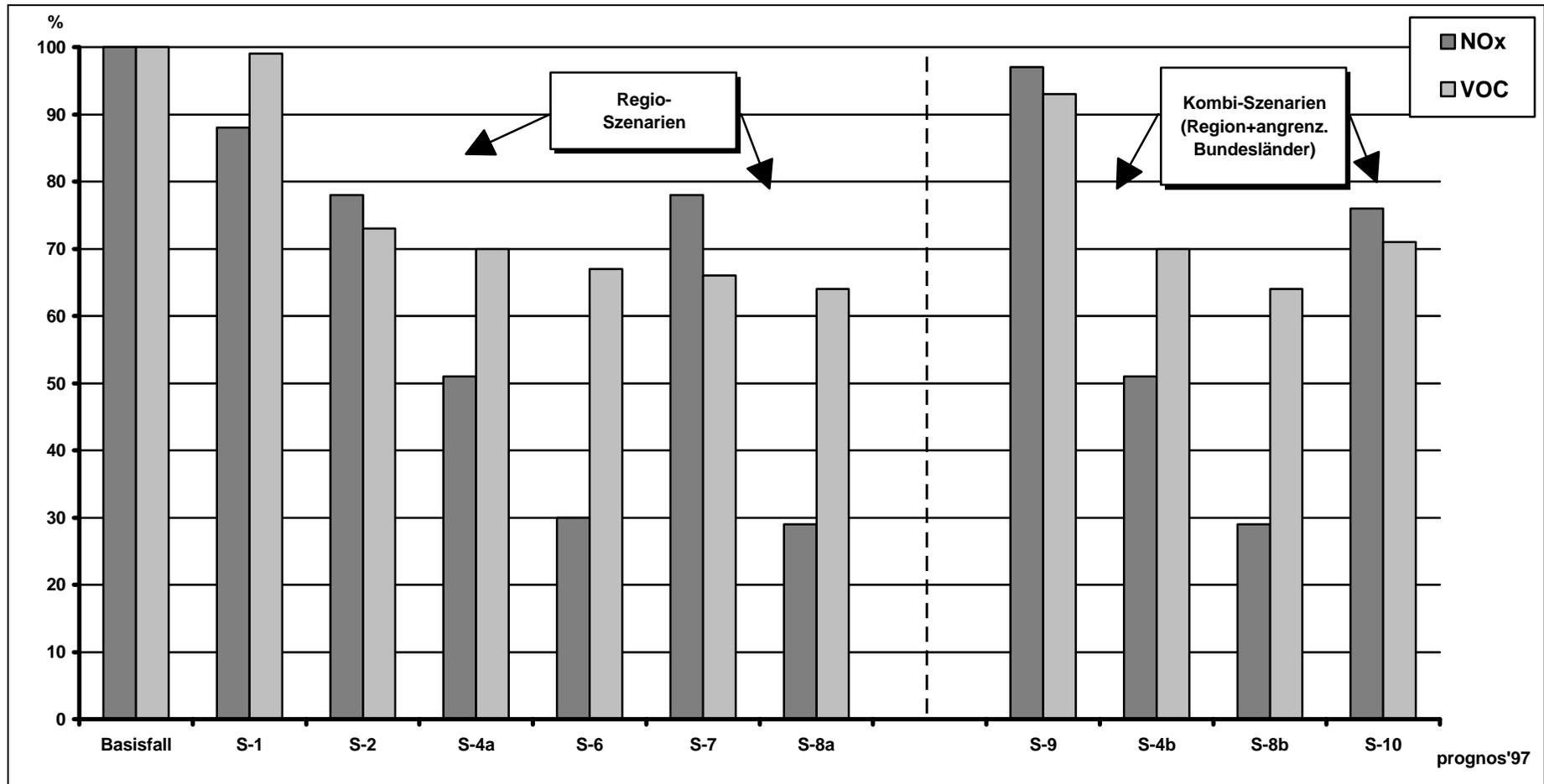
Zur Analyse der immissionsseitigen Auswirkungen einer zeitlich vorgezogenen Einleitung von Maßnahmen wurde der Fall des regionalen verkehrsbezogenen Szenarios 4-a gewählt. Emissionsseitig ergeben sich keine Änderungen. Die photochemischen Simulationsrechnungen mit diesem Szenario wurden für die Modellregion Rhein-Main-Neckar durchgeführt (s. unten).

Tab. 6.1: Kleinräumige, regionale und überregionale Emissionsminderungs-Szenarien in den Modellregionen

Nr.	Kurzbezeichnung	Maßnahmen	Betroffene Emissionsquellen	Räumlicher und zeitlicher Bezug	NOx-Effekte in % in der Modellregion	VOC-Effekte in % in der Modellregion
					Rhein-Main / Dresden / Berlin-Bbg.	
S-1	Regio-Tempolimit	Scharfes Tempolimit in der Region	- Pkw-/Lkw-Straßenverkehr	Modellregion Temporär	-14% / -11% / -10%	-1% / -1% / -1%
S-2	Regio-Pkw-Fahrverbot	Fahrverbot für nicht schadstoff- arme (nsa) Pkw in der Region	- Pkw-Straßenverkehr - Tankstellen	Modellregion Temporär	-25% / -22% / -19%	-27% / -25% / -28%
S-4a	Regio-Straßenverkehr	Scharfes regionales Tempolimit plus Fahrverbot für nsa-Pkw + Lkw in der Region (S-1 plus S-2)	- Pkw-/Lkw-Straßenverkehr - Tankstellen	Modellregion Temporär	-53% / k.B. / -51%	-32% / k.B. / -31%
S-4b	Kombi-Straßenverkehr - Max	S-4a plus Fahrverbot für nsa-Pkw in umlie- genden Bundesländern (uBL)	- Pkw-/Lkw-Straßenverkehr - Tankstellen	Modellregion umliegende BL Temporär	-53% / -43% / -51% plus Effekte in uBL	-32% / -27% / -31% plus Effekte in uBL
S-6	Regio-Focus NOx	Tempolimits, Fahrverbote, Stilllegung größerer Einzel- emissionsquellen, Appelle	- Pkw-/Lkw-Straßenverkehr - Tankstellen - Ind./gew. Feuerungsanl.	Modellregion Temporär	-74% / k.B. / -66%	-33% / k.B. / -33%
S-7	Regio-Focus VOC	Fahrverbote nsa-Pkw, Stilllegung größerer VOC- Emissionsquellen, Appelle an Gewerbe/Haushalte	- Pkw-Straßenverkehr - Tankstellen - Feuerungsanlagen - Haushalte/Gewerbe	Modellregion Temporär	-25% / -22% / -19%	-36% / -30% / -36%
S-8a	Regio-Max NOx/VOC	S-6 plus S-7	- S-6 plus S-7	Modellregion Temporär	-74% / -74% / -66%	-36% / -33% / -40%
S-8b	Kombi-Max NOx/VOC	S-8a plus Fahrverbote in umliegenden Bundesländern	- S-8a plus - Straßenverkehr in uBL	Modellregion umliegende BL Temporär	-74% / -74% / -66% plus Effekte in uBL	-36% / -33% / -40% plus Effekte in uBL
S-9	Sommerbenzin	Reformulierte Kraftstoffe für Otto- u. Dieselmotoren	- Kfz-Verkehr - Tankstellen	Modellregion umliegend BL Dauerhaft	k.B. / -3% / -3% plus Effekte in uBL	k.B. / -6% / -7% plus Effekte in uBL
S-10	Trend 2005	Umsetzung aller eingeleiteten Maßnahmen in Deutschland und Europa	- Alle Emittentengruppen	Modellregion Deutschland/Europa Dauerhaft-ganzjährig	-30% / -22% / -21% plus Effekte in Deutschland/Europa	-31% / -27% / -30% plus Effekte in Deutschland/Europa
S-4a+	Vorzeitige Inkraftsetzung	Vorgezogene Einleitung von S-4a (Regio-Straßenverkehr ) um 48 h	- wie S-4a	Modellregion Temporär	-53% (Rhein-Main)	-32% (Rhein-Main)

k.B. = keine Berechnung

Abb. 6-1: Emissionsminderungs-Szenarien in den Modellregionen  
 Durchschnittliche Reduktionsraten bei NOx und VOC im Vergleich zum Basisfall (Indizes: Basisfall = 100%)



Anm: Zur Erläuterung der Szenarien S-1, S-2, ....., siehe Tabelle 6.1 sowie den Textteil

## **7. Wirkungen von lokalen, regionalen und überregionalen Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozon-Spitzenkonzentrationen in den Modellgebieten**

### **7.1 Vorbemerkungen**

(1) In diesem Kapitel werden in den folgenden Abschnitten die Ergebnisse der photochemischen Ausbreitungsrechnungen für die drei ausgewählten Modellregionen mit den in Kapitel 6 beschriebenen Emissionsminderungsmaßnahmen dargestellt. Wie eingangs schon ausgeführt, sollen mit Hilfe dieser kleinräumigen Wirkungsanalysen eine Reihe von zentralen Fragen des Gesamtvorhabens beantwortet werden:

- Sind die im Rahmen der großräumigen Wirkungsanalysen (in Phase A) erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Effektivität der untersuchten Minderungsmaßnahmen auch dann gültig, wenn das Maßnahmenggebiet nur eine begrenzte Ausdehnung aufweist und die Minderungsmaßnahmen lediglich in regionalem Maßstab zum Einsatz kommen? Welcher Art sind ggfls. die Abweichungen von den großräumigen Wirkungsanalysen, und welche Schlußfolgerungen sind daran zu knüpfen?
- Welchen Einfluß hat die wesentlich höhere räumliche Auflösung der Untersuchungsgebiete bei den kleinräumigen Analysen auf die Ergebnisse der Simulationsrechnungen?
- Werden infolge der höheren Auflösung besondere, räumlich begrenzte Spitzenbelastungen sichtbar, und welche Wirkungen haben die untersuchten Minderungsmaßnahmen auf diese Spitzenkonzentrationen? Welche Erkenntnisse können aus den bei kleinmaßstäblichen Analysen deutlicher sichtbaren leeseitigen Abluffahnen der Ballungsräume gewonnen werden?
- Welche Minderungen von Ozon-Spitzenkonzentrationen können mithilfe von lokalen oder regionalen Kontrollmaßnahmen erreicht werden? Wovon hängt die Effektivität von lediglich lokalen oder regionalen Maßnahmen ab?
- Welchen Einfluß haben die unterschiedlichen Emissionsstrukturen in den drei untersuchten Modellregionen auf die Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen?
- Welche möglichen Vorteile beinhaltet die präzisere räumliche Verortung der Vorläufer-Emissionen aus den sog. Flächenquellen im Vergleich zu dem groberen Raster in der Phase A?

- Wie sind regionale Maßnahmen im Vergleich zu überregionalen Maßnahmen im Hinblick auf die Effektivität bei der Bekämpfung von hohen bodennahen Ozonkonzentrationen zu bewerten?

(2) Die Darstellung der Vorgehensweisen und der Ergebnisse der Analysen für die einzelnen Modellregionen erfolgt in der Reihenfolge der Bearbeitung. Es handelt sich dabei um gekürzte Fassungen der ausführlichen Einzelberichte der Bearbeiter: Institut für Meteorologie, FU Berlin (Modellregionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg) und Rheinisches Institut für Umweltforschung, Univ. Köln (Modellregion Dresden). Die Einzelberichte enthalten eine Fülle von Details, die in den gekürzten Fassungen zwangsläufig nicht sämtlich enthalten sein können. Dem interessierten Leser wird daher empfohlen, die ausführlichen Berichte zu den Teilvorhaben B-2a, B-2b und B-2c einzusehen (s. die Berichtsübersicht in Kap. 1.2).

## **7.2 Wirkungen von Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozonkonzentrationen in der Modellregion "Rhein-Main-Neckar"**

### **7.2.1 Modellgebiet und Simulationszeitraum**

Die Abbildungen 7.2-1 und 7.2.2 zeigt das für die photochemischen Ausbreitungsrechnungen ausgewählte Modellgebiet. Im Zentrum liegt das Rhein-Main-Neckar-Gebiet von Speyer im Süden bis Frankfurt im Norden. Dieses Gebiet wird im Südwesten durch die Höhenzüge des Pfälzer Waldes, im Osten durch die des Odenwalds und im Nordwesten durch den Taunus begrenzt. Die Emissionsgebiete Wiesbaden/Mainz/Frankfurt und Ludwigshafen/Mannheim liegen damit vollständig im Untersuchungsgebiet. Das Gebiet ist emissionsseitig weiterhin geprägt durch zahlreiche Autobahnen, die hauptsächlich von Süd nach Nord, im Ballungsgebiet Rhein/Main aber auch von Ost nach West verlaufen.

Entsprechend der Auflösung des für die Untersuchungen verwendeten Emissionsdatensatzes wird das Gebiet durch ein horizontales Gitter mit der Maschenweite 4 km überdeckt. Bei einer Ost-West-Ausdehnung von 92 km und einer Süd-Nord-Ausdehnung von 128 km ergeben sich damit 23x32 horizontale Gitterboxen. Gitterursprung ist 3415000/5458000 (Rechtswert/Hochwert) im Gauss-Krüger-Koordinatensystem.

In der Vertikalen erfolgt eine Unterteilung der Atmosphäre in 8 Schichten bis zu einer Modellobergrenze von 2800 m. Die unterste Schicht ist 20 m dick. Mit wachsender Höhe nimmt die Schichtdicke zu. Die untersten 1200 m werden dabei in 6 Zellen aufgelöst.

Als Simulationszeitraum wurde der Zeitabschnitt vom 22. Juli 1994 bis zum 6. August 1994 ausgewählt. Die meteorologische Situation während dieser Zeit ist geprägt durch hochsommerliche Verhältnisse über Mitteleuropa mit geringen Luftdruckschwankungen, überwiegend geringer Bewölkung, hoher Einstrahlung und hohen Temperaturen.

Ein sich langsam nach Osten verlagerndes Hochdruckgebiet, dessen Zentrum zu Beginn der Episode über der Nordsee und Skandinavien liegt, und ein Höhentief über Norditalien bestimmen bis Ende Juli 1994 das Wetter im Untersuchungsgebiet. Nach dem Durchzug einiger Störungen kommt die Region wieder unter den Einfluß eine Zwischenhochs. Die gesamte Episode ist im Untersuchungsgebiet durch überwiegend niedrige Windgeschwindigkeiten und Temperaturmaxima von 30°C bis über 35°C geprägt.

Abb. 7.2-1: Untersuchungsgebiet Rhein-Main-Neckar - 3-dim. Darstellung mit dem 4km x 4km Rechengitter; 2-dim. dArstellung mit den topographischen Höhenlinien

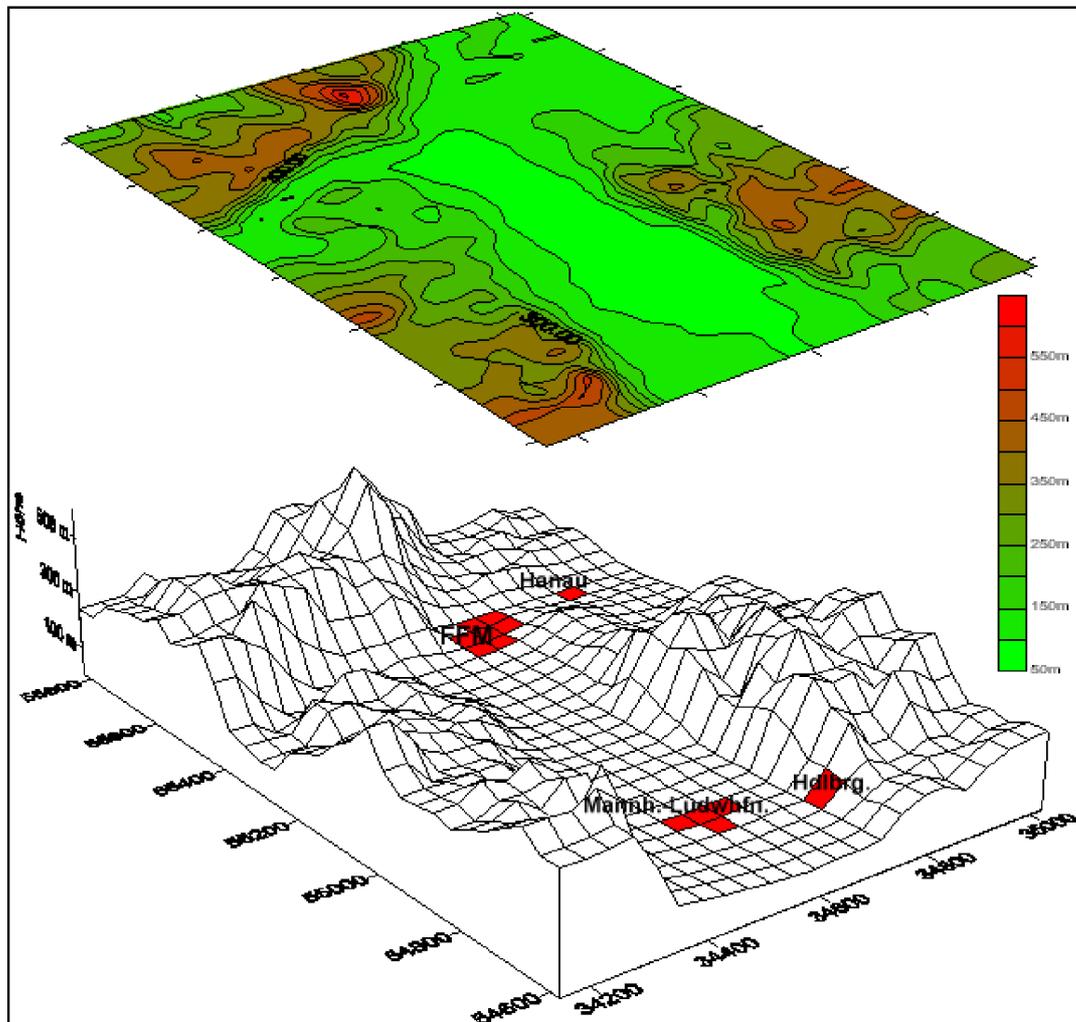
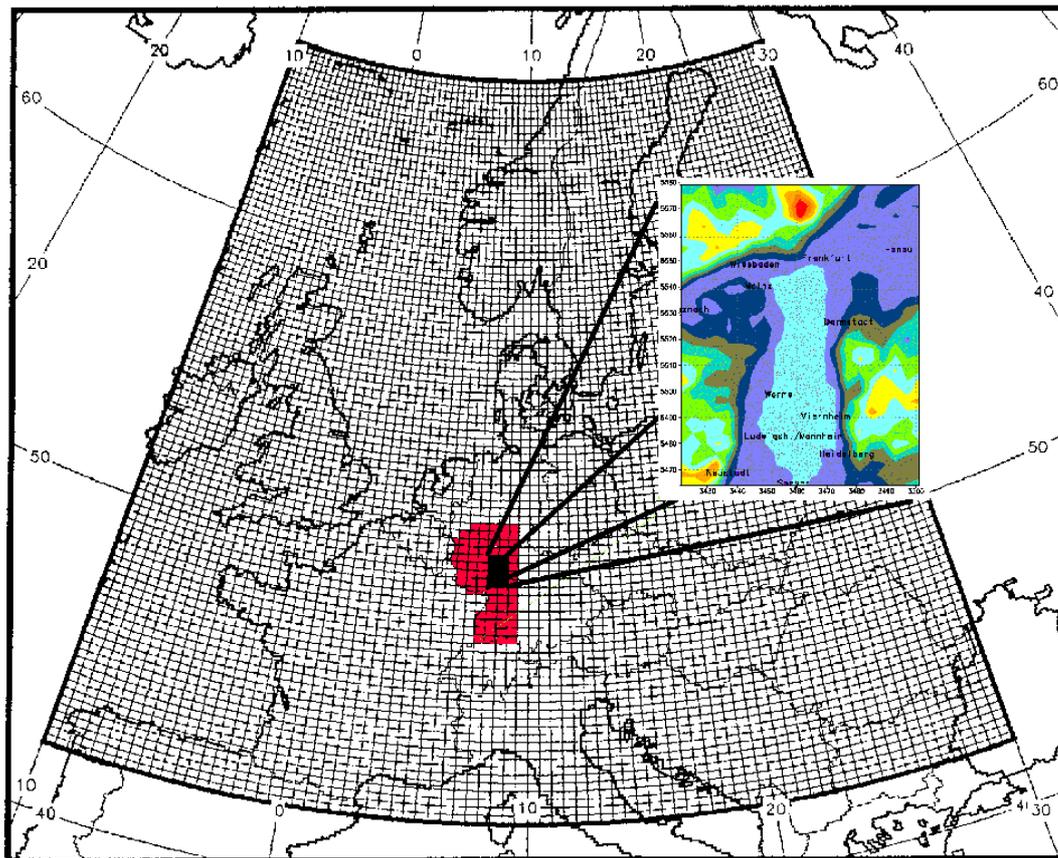


Abb. 7.2-2: Gitter für das TRAMPER-Analyseverfahren und das REM3-Modell (Gitterweite 0,5°Länge und 0,25°Breite); Schwarz markiert das CALGRID-Rechengebiet und rot die Minderungsgebiete für die Szenarien 4b und 8b (s. Text unten)



STEREOGRAPHIC PROJECTION  
60 DEGREE NORTH

### 7.2.2 Modellsystem CALGRID/REM3

Das für die immissionsseitigen Wirkungsanalysen in der Modellregion Rhein-Main-Neckar eingesetzte Modellsystem besteht aus den beiden mesoskaligen Modellen CALMET und CALGRID, dem großräumigen meteorologischen Analysesystem TRAMPER und einem graphischen Aufbereitungssystem auf der Basis von GRADS. Zur Erzeugung der Anfangs- und Randbedingungen wird das großräumige photochemische Transportmodell REM3 verwendet.

CALMET ist der für das Transportmodell CALGRID entwickelte meteorologische Treiber, der auf der Basis von Messungen alle für CALGRID benötigten Daten erzeugt. CALMET verwendet als Eingangsdaten alle verfügbaren meteorologischen Standard-Bodenmessungen, die verfügbaren Vertikalsondierungen sowie Landnutzungsdaten und topographische Daten. Aus diesen Daten berechnet das Modell mit Hilfe von Interpolationsmethoden und Strömungsadaptionalgorithmen unter Verwendung von Grenzschichttheorie alle benötigten Felder.

TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research, Reimer und Scherer, 1992) ist ein großräumiges diagnostisches meteorologisches Analysesystem, das den Antrieb für CALMET liefert. Mit TRAMPER werden ausgehend von der großräumigen Wetterlage im Untersuchungsgebiet Vertikalprofile für alle meteorologischen Parameter erstellt. Diese Vertikalprofile dienen als Stützwerte für das CALMET-Modell, das unter weiterer Einbeziehung lokaler Meßwerte die meteorologischen Felder für CALGRID in der definierten Auflösung berechnet. TRAMPER liefert auch alle zum Betreiben des großräumigen photochemischen Modells REM3 benötigten meteorologischen Daten.

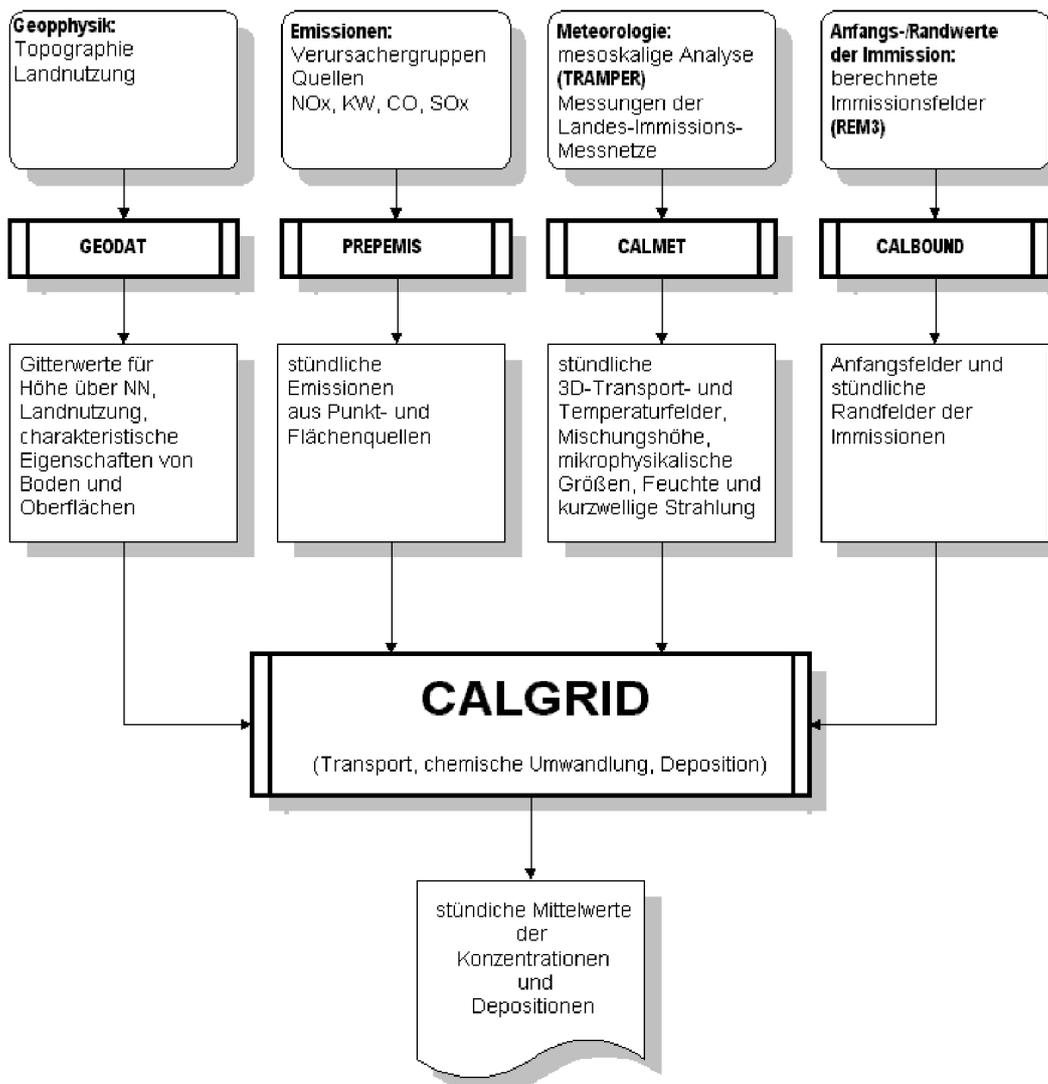
CALGRID ist ein dreidimensionales photochemisches Transportmodell mit Modulen für den horizontalen und vertikalen Transport, die horizontale und vertikale Diffusion, trockene Deposition sowie für die photochemischen Reaktionen. Als photochemischer Mechanismus wird der SAPRC-90-Mechanismus verwendet, eine kompakte Version des am Statewide Air Pollution Research Center (SAPRC) der Universität Kalifornien entwickelten SAPRC-Mechanismus (Carter, 1990).

REM3 (Regional Eulerian Model with 3 chemistry schemes) ist ein von Stern (1994) entwickeltes großräumiges dreidimensionales photochemisches Ausbreitungsmodell zur Simulation der Bildung, des Transports und der Entfernung von Oxidantien in der planetarischen Grenzschicht. Das Modell enthält drei verschiedene photochemische Reaktionsmechanismen, von denen einer der ebenfalls im CALGRID-Modell integrierte SAPRC-90-Mechanismus ist. REM3 arbeitet mit dem Konzept der dynamischen Schichten, die in Abhängigkeit der lokalen meteorologischen Verhältnisse expandieren oder kontrahieren. Der Ausbreitungsraum wird dazu in drei Schichten aufgeteilt. Das REM3 ist eines der beiden Modelle, die im Teil A des FE-Vorhabens 104 02 812 zum Einsatz gekommen sind (Stern et al., 1995; Motz et al., 1996).

Die gesamte graphische Auswertung wird mit einem auf GRADS (Grid Analysis and Display System) beruhenden Analysesystem vorgenommen. GRADS wurde am Center for Ocean - Land - Atmosphere Interactions der Universität von Maryland entwickelt ( Doty, 1995).

Die beiden Modelle CALMET und CALGRID werden in den nächsten beiden Kapiteln näher beschrieben. Für die anderen Modelle sei auf die angegebene Literatur verwiesen. Die Abbildung 7.2-3 gibt einen schematischen Überblick zum Aufbau des Modellsystems.

Abb. 7.2-3: Das CALGRID-Modellsystem



### 7.2.3 Basislauf

#### a) Meteorologische Daten und Immissionsdaten

Das Untersuchungsgebiet Rhein-Main-Neckar umfaßt Teile der drei Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg. Alle drei Länder unterhalten jeweils ein Immissionsmessnetz, das um meteorologische Messungen wie Wind, Temperatur, Feuchte und Globalstrahlung erweitert ist. Innerhalb und um die Untersuchungsregion werden 34 Stationen mit meteorologischer Instrumentation betrieben. Diese Daten wurden von den Ländern für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt. Da die Messorte nach Kriterien der Luftgüteüberwachung ausgewählt sind, geben einige dieser Stationen erhebliche lokale Eigenschaften der Messgrößen wieder und entsprechen möglicherweise auch nicht den WMO-Kriterien für eine synoptische Station. Da das Messnetz aber relativ dicht ist, spiegeln sich die wesentlichen klimatologischen Eigenschaften der Region mit Sicherheit in den Messungen wider. (Nähere Angaben hierzu enthält der gesonderte Bericht).

Aus den Immissionsmessnetzen der drei Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg werden die halbstündigen Messungen von Ozon ( $O_3$ ) und Stickoxiden ( $NO$ ,  $NO_2$ ) zur Verifikation der Ergebnisse herangezogen.

#### b) Emissionsdaten

Die für die hier präsentierten Ausbreitungsrechnungen verwendeten Emissionsdaten wurden von der Prognos AG (Hartmann und Motz, 1996) überwiegend als Flächenquellen mit einer Maschenweite von 4 km bereitgestellt. Lediglich die Emissionen von Kraftwerken und großen Industrieanlagen stehen als Punktquellen zur Verfügung. Details zur Erhebungsmethode können in dem Bericht von Prognos gefunden werden.

Die Emissionsdaten umfassen die Stoffe  $NO_x$ ,  $SO_x$ , CO und Kohlenwasserstoffe (VOC, volatile organic compounds) unterteilt nach einer Anzahl Verursachergruppen. Die Tab. 7.2.1 zeigt die verwendeten Verursachergruppen mit den dazugehörigen Jahresemissionen im Untersuchungsgebiet. Die Emissionen des Kfz-Verkehrs stellen bei den Stickoxiden und den anthropogenen Kohlenwasserstoffen mit ca. 60% den Hauptanteil an den Gesamtemissionen im Untersuchungsgebiet. Die Abbildungen 7.2-4 und 7.2-5 zeigen die flächenhafte Verteilung der Stickoxid- bzw. der Kohlenwasserstoffemissionen. In den Abbildungen werden nur die Emissionen der Flächenquellen betrachtet.

Biogene Emissionen werden von Prognos für die Verursachergruppen "Konifere Emittenten", "Isopren-Emittenten" und "Nicht-Isopren-Emittenten" für eine Referenztemperatur von 30°C zur Verfügung gestellt.

Tab. 7.2.1: Anthropogene Jahresemissionen 1994 nach Verursacherguppen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main-Neckar

Verursacherguppe	NOX (t/a)	VOC (t/a)	CO (t/a)	SOX (t/a)
Auspuffemissionen PKW	59830	39890	312540	1554
Auspuffemissionen LKW	63193	11612	12258	3993
Verdunstungen aus Abstellvorgängen Kfz	-	20419	-	-
Verdunstungen aus Tankatmung Kfz	-	4967	-	-
Verdunstungen aus Motorsystem (running losses)	-	1198	-	-
Umschlag/Lagerung von Mineralölprodukten	-	2686	-	-
Verteilung von Kraftstoffen	-	4067	-	-
Industrie/Kleingewerbe: Prozesse/Lösemittelanwendung	-	25039	37147	-
Industrielle Feuerungen	24840	1311	4867	25014
Kleingewerbl. Feuerungen	5721	542	949	8644
Lösemittel Haushalte	-	14597	-	-
Warmwasser Haushalte	931	276	6111	1032
Flugzeugemissionen bis 100m	607	4123	6522	489
Flugzeugemissionen zw. 100m und 300 m	460	71	237	39
Flugzeugemissionen zw. 300m und 1000m	1428	148	420	68
Binnenschifffahrt	4081	754	1125	207
Punktquellen	37905	2729	4441	28461
<b>Summe</b>	<b>198.996</b>	<b>134.429</b>	<b>386.618</b>	<b>69.501</b>

Abb. 7.2-4: Anthropogene Kohlenwasserstoffemissionen der Flächenquellen in t/a im 4x4km<sup>2</sup>-Raster der Untersuchungsregion Rhein-Main-Neckar

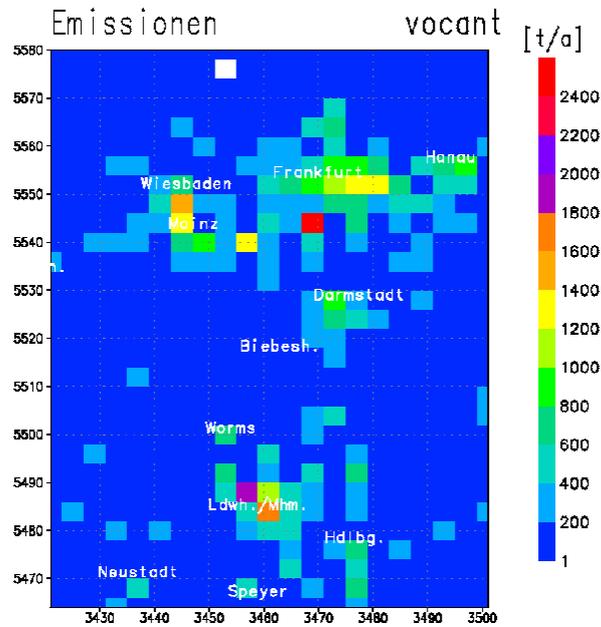
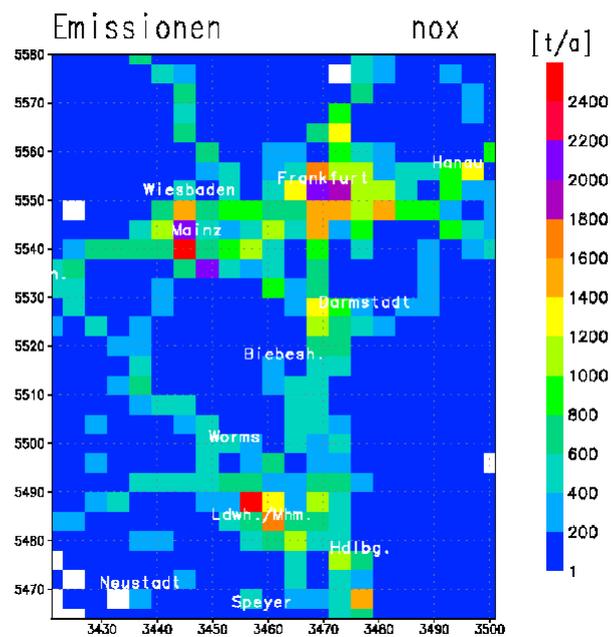


Abb. 7.2-5: NOx-Emissionen der Flächenquellen in t/a im 4x4km<sup>2</sup>-Raster

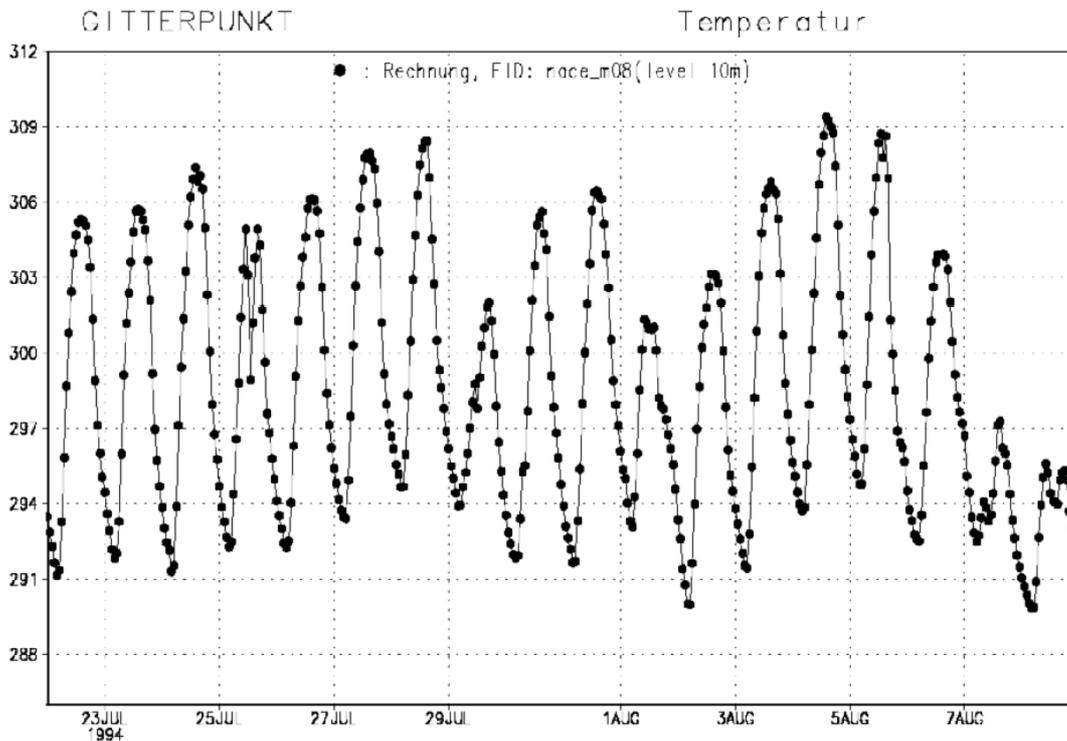


### c) Ausgewählte Ergebnisse des Basislaufs

Beispielhaft für die Entwicklung im gesamtem Untersuchungsgebiet zeigt die Abbildung 11 den Temperaturverlauf über die gesamte Episode an einem Gitterpunkt im Dreieck zwischen Mainz, Wiesbaden und Frankfurt-Höchst. Die Phasen hoher Ozonkonzentration werden jeweils durch einen Temperaturanstieg gekennzeichnet. Deutlich ist auch der kurzfristige Einbruch im Temperaturverlauf am 25. Juli beim Durchzug des Niederschlagsgebietes zu erkennen. Zweimal, am 30. Juli und 1. August, bleibt der Tageshöchstwert unter 30°C. Das Temperaturmaximum wird in diesem Gebiet am 4. August erreicht. Die starke Amplitude von ca. 14-15°C zwischen nächtlichem Minimum und Tageshöchstwert kennzeichnet typische Strahlungstage mit hoher Sonnenscheindauer und geringem Bedeckungsgrad.

Die großräumige Strömung über dem Untersuchungsgebiet im 700 hPa Niveau wird durch die Strömung in den beiden oberen Schichten des Modellgitters (1600-2800 m ü.G.) repräsentiert. Die Abbildung 7.2-6 zeigt ihre Richtung und Geschwindigkeit, gemittelt über die vier Ränder des Modellgebietes. Man erkennt die anfängliche Winddrehung von Ost nach West mit zunehmender Windgeschwindigkeit (von ca. 2 auf 5 m/s), danach den "Zusammenbruch" der Strömung am 27. Juli. Mit einer erneuten Zunahme der Windgeschwindigkeit erfolgt eine leichte Drehung bis SSW. Auch am 3. und 4. August sinkt die Windgeschwindigkeit wieder unter 3 m/s bei gleichzeitigem Anstieg der Temperatur. Die mittlere Windgeschwindigkeit über der Modellregion ist über die gesamte Episode also recht gering. Trotz dieser niedrigen Transportgeschwindigkeiten wird das gesamte Modellgebiet von ca. 100 km Ausdehnung an den meisten Tagen mehrmals täglich durchlüftet. Nur am 27. Juli herrschen so schwache Winde mit wechselnden Richtungen vor, daß an diesem Tag mit einem sehr geringen Austausch in der Region gerechnet werden kann.

Abb.7.2-6: Temperaturverlauf an einem Gitterpunkt im Dreieck Mainz, Wiesbaden, Frankfurt-Höchst

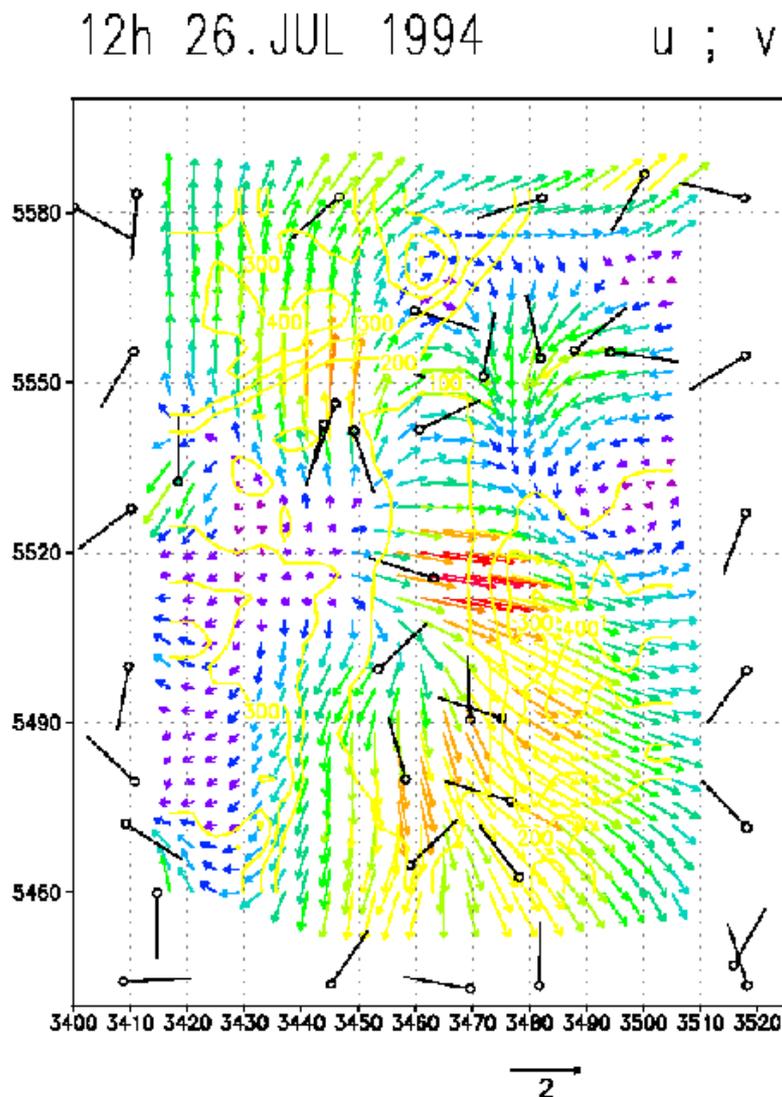


Die Messungen (Abbildungen hierzu im gesonderten Bereich) zeigen eine starke Variation der bodennahen Windfelder an mehreren Stationen im Oberrheingraben. Dabei fällt auf, daß die Messungen in Viernheim, Raunheim und Mainz-Mombach eine vergleichbare Geschwindigkeitsskala aufweisen, Worms und Biebesheim hingegen davon abweichen. Da Biebesheim die einzige Station mit hohen gemessenen Windgeschwindigkeiten in dieser Gegend ist, liegen für diesen Bereich die berechneten (interpolierten) Werte generell niedriger als die gemessenen. Alle Stationen weisen einen ausgeprägten Tagesgang der Windgeschwindigkeit auf, der in Mainz-Mombach offensichtlich weitgehend von größerskaligen Ereignissen entkoppelt ist und in Worms die geringste Amplitude zeigt. Alle Stationen zeigen auch eine eigene Variation in der Windrichtung, wobei Viernheim zwei Schwerpunkte um Nord und West aufweist und Raunheim am deutlichsten den großräumigen Trend widerspiegelt.

Die Abbildung 7.2-7 zeigt beispielhaft für den ausgewählten Tage vom 26. Juli 1994 die interpolierten Bodenwindfelder in 10 m Höhe um 12 Uhr MEZ. Die Strömungsfelder sind an

den Gitterpunkten als Vektoren, die jeweiligen Messwerte hingegen als meteorologische Windfahnen dargestellt, mit Fahnen für 2,5 und 5 m/s. Die Darstellung enthalten alle relevanten Messwerte, einschließlich der Bodenwerte aus der mesoskaligen Analyse, die die Randwertbildung für den Übergang vom großräumigen zum kleinräumigen Strömungsfeld in der Region forcieren. Zur Interpolation werden auch Messungen außerhalb des Modellgitters herangezogen, um die Strömung im Randbereich zu modifizieren und randnahe innere Stationen mit einer realistischeren bodennahen Strömung zu belegen.

Abb.7.2-7: Interpoliertes Bodenwindfeld und Messungen am 26.7.1994



Das CALGRID-Modell wird auf den Zeitraum vom 22. Juli 1994 bis zum 7. August 1994 in dem in der Abbildung 7.2-2 gezeigten Gebiet mit einer horizontalen Gitterauflösung von 4 km angewandt. Die Oxidantienberechnungen werden am 22. Juli 1994, 0 Uhr mit für alle Spezies aus den Berechnungen des REM3 unter Verwendung des SAPRC-90-Mechanismus abgeleiteten Anfangskonzentrationfeldern gestartet. Die diesen Anfangsfeldern zugrundeliegenden REM3-Berechnungen wurden bereits am 18. Juli 1994 aufgesetzt, um ein Einschwingen des REM3 auf die meteorologische und emissionsseitige Situation zu gewährleisten. Die Bereitstellung der CALGRID-Randbedingungen aus den REM3-Berechnungen erfolgt stündlich für den gesamten Simulationszeitraum.

Der Basislauf wird im gesonderten Bericht ausführlich anhand von berechneten nachmittäglichen Oxidantienfeldverteilungen und des Vergleichs berechneter und gemessener Zeitreihen an ausgewählten Stationen im Untersuchungsgebiet diskutiert. Bei den Feldverteilungen werden die nachmittäglichen Ozonkonzentrationen am 26. 27. und 30. Juli 1994 sowie am 4. August 1994 diskutiert. An all diesen Tagen wurden im Untersuchungsgebiet erhöhte Ozonkonzentrationen gemessen. Diese hohen Konzentrationen führten am 26. Juli, am 30. Juli und am 5. August 1994 zur Auslösung eines Ozonalarms gemäß der Hessischen Ozonverordnung von 1993 (siehe Hartmann et al., 1995). - In diesem Abschnitt wird lediglich eine gekürzte Darstellung der Ergebnisse für den 4.8.1994 gegeben.

Am **4. August** wird das Untersuchungsgebiet am Boden aus südöstlicher, in der Höhe aus südlicher Richtung angeströmt. Bei sehr hohen Temperaturen und wolkenlosem Himmel kommt es vor allem nördlich des Rhein-Main-Ballungsgebiets zu hoher Ozonbildung (Abb. 7.2-8). Am nördlichen Ausströmrand werden dabei am Boden mehr als 140 ppb Ozon, in der Höhe mehr als 150 ppb Ozon berechnet. Das im Modellgebiet gebildete Ozon setzt dabei auf einen relativ hohen Sockel von ca. 100 ppb auf, der entsprechend den Berechnungen des REM3 am Nachmittag über den südlichen und östlichen Rand in das Gebiet transportiert wird.

Die berechnete NO<sub>2</sub>-Konzentrationsverteilung hat entsprechend der vorherrschenden Windrichtung eine von Süd nach Nord gerichtete Orientierung mit hohen Konzentrationen vom Ballungsraum Ludwigshafen/Mannheim über Darmstadt bis nach Frankfurt (Abb. 7.2-9). Die stark befahrenen Nord-Süd-Autobahnen zeichnen sich wegen ihrer parallelen Ausrichtung zum Wind deutlich in den Konzentrationsfeldern ab. Die berechneten Spitzenwerte von über 20 ppb liegen im Raum Frankfurt.

Der in Abb. 7.2-10 gezeigte Süd-Nord-Vertikalschnitt verläuft auf der Achse Darmstadt-Frankfurt entlang des Gauß-Krüger-Rechtswerts 3470 durch das Modellgebiet und schneidet das nördlich von Frankfurt berechnete Ozonmaximum. Die an diesem Tage sehr hohe Modellgrenzschicht ist nahezu vollständig durchmischte. Der Ozonanstieg beträgt von Süd nach Nord ca. 50 ppb und baut auf ca. 90 bis 100 ppb Ozon auf, das über den Luv-Rand in das

Untersuchungsgebiet transportiert wird. Dieser Ozonverlauf findet sich auch in der aus den verfügbaren Messungen abgeleiteten Bodenkonzentrationskurve wieder. Auch der starke Ozongradient im Bereich von Frankfurt läßt sich durch die Messungen bestätigen.

Auch der berechnete bodennahe NO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf entlang des Süd-Nord-Schnitts stimmt in der Größenordnung mit den NO<sub>2</sub>-Messungen überein (Abb. 7.2-10, unten). Lediglich die sehr hohen NO<sub>2</sub>-Werte in Darmstadt (Hochwert 5525), wo ca. 100 ppb NO<sub>2</sub> gemessen wurden, werden vom Modell nicht reproduziert. An dieser Stelle muß allerdings betont werden, daß die Messungen keiner Qualitätskontrolle unterworfen wurden, so daß über die Glaubwürdigkeit keine Aussagen getroffen werden können.

Für PAN und auch Formaldehyd werden die Konzentrationsmaxima ebenfalls nördlich von Frankfurt berechnet (siehe gesonderter Bericht). Die berechneten PAN-Maxima betragen knapp 3 ppb, diejenigen von HCHO knapp 5 ppb, wobei wie schon beim Ozon mit einem weiteren Anstieg außerhalb des Modellgebiets gerechnet werden muß.

Abb. 7.2-8: Berechnete O<sub>3</sub>-Konzentration in ppb am 4.8.94, Stundenmittel 16-17 Uhr MEZ.  
 Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Windfeld und Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (260-580m) mit Windfeld.

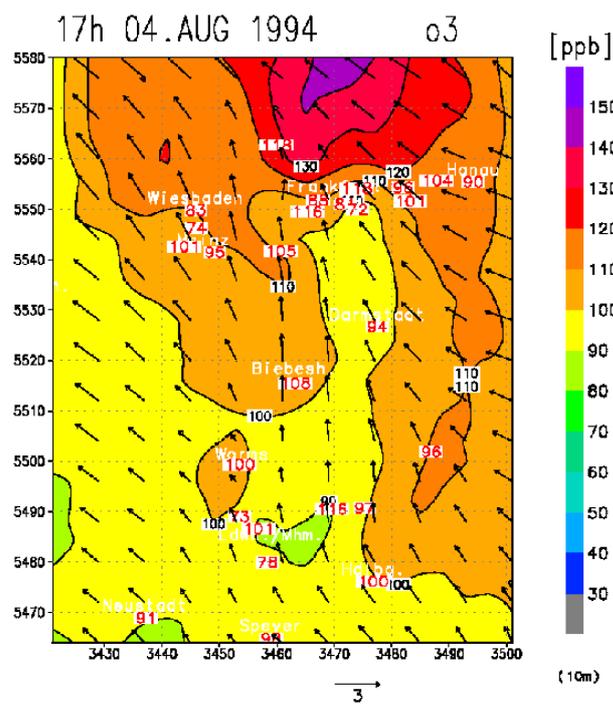
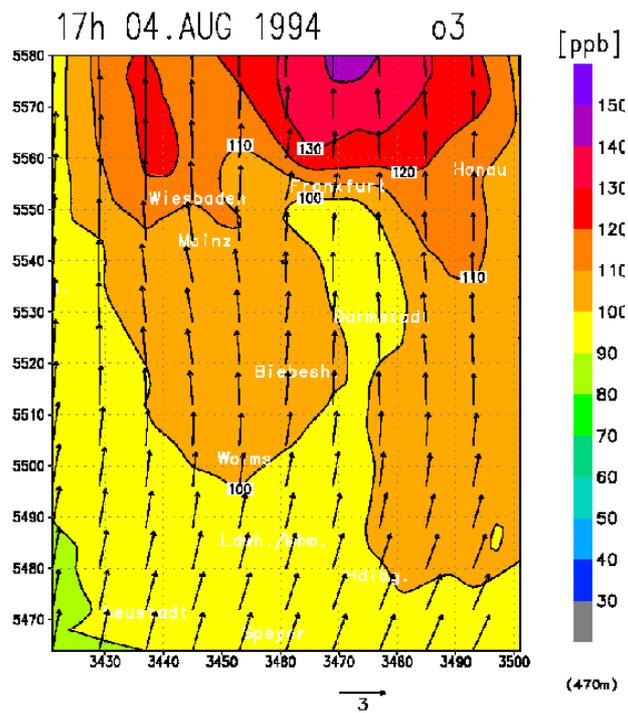


Abb. 7.2-9: Berechnete NO<sub>2</sub>-Konzentration in ppb am 4.8.94, Stundenmittel 16-17 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Windfeld und Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (260-580m) mit Windfeld

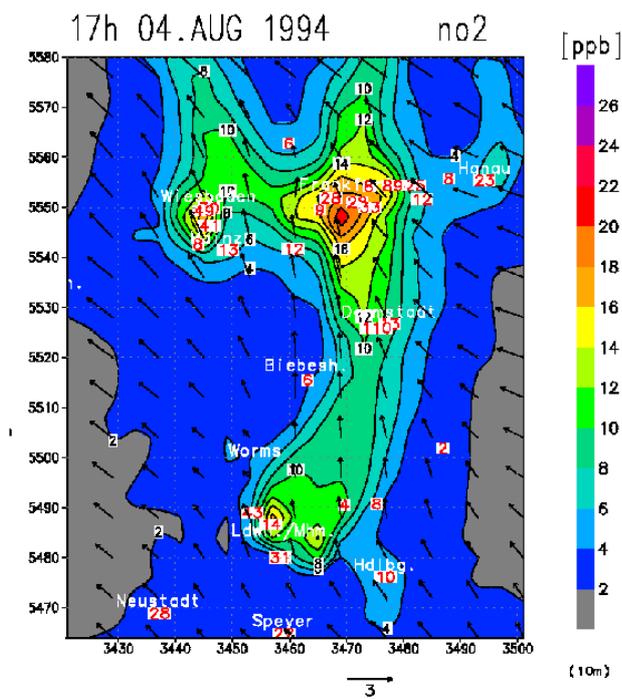
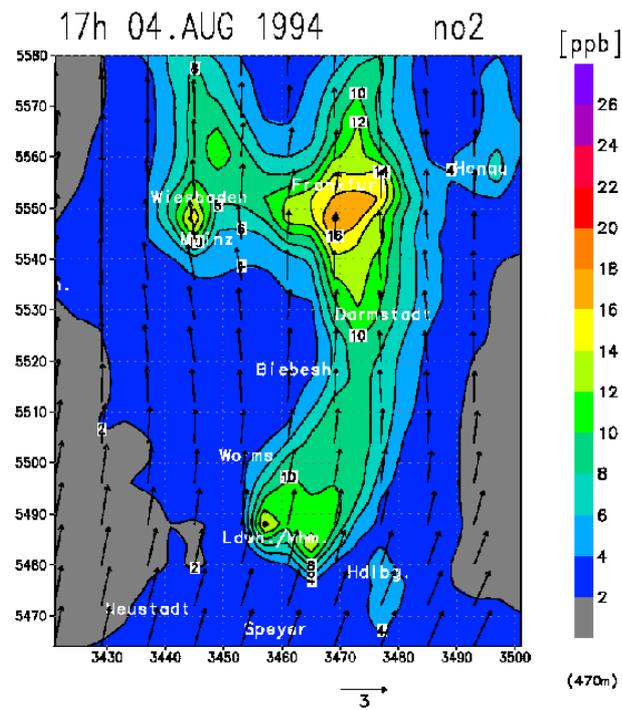
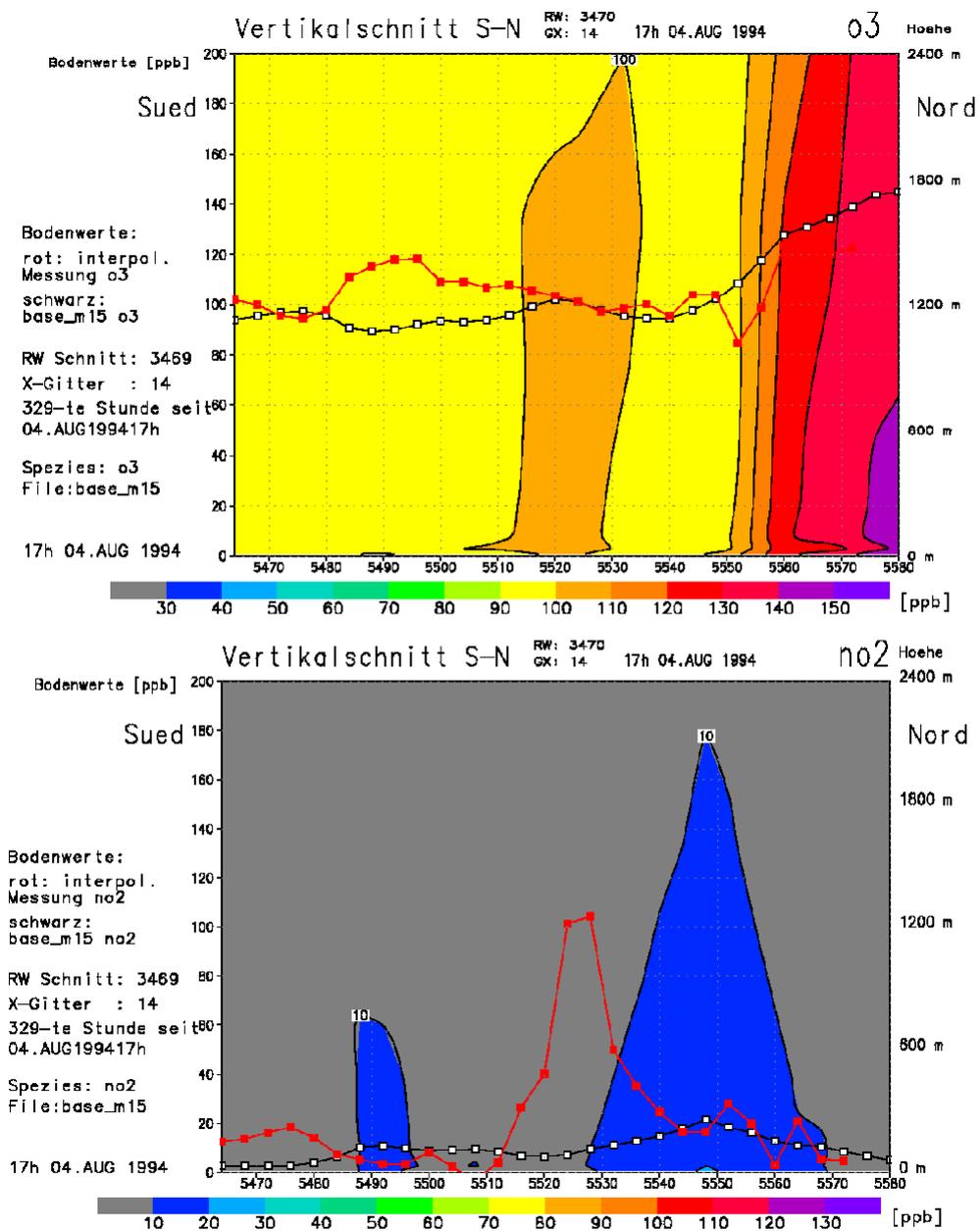


Abb. 7.2-10: Süd-Nord-Vertikalschnitt der berechneten Ozonverteilung (oben) bzw. der berechneten NO<sub>2</sub>-Verteilung (unten) durch das Modellgebiet. Der Schnitt verläuft auf der Achse Darmstadt-Frankfurt entlang des Gauß-Krüger-Rechtswerts 3470). Isolinien: Berechnete Konzentrationen in ppb am 4. August 1994, Stundenmittel 16 bis 17 Uhr MEZ vom Boden bis zu 2400 m Höhe (rechte Skala). Zusätzlich eingetragen sind die berechnete und aus Messungen interpolierte O<sub>3</sub>- bzw. NO<sub>2</sub>-Bodenkonzentration (linke Skala) entlang des Schnitts.



#### d) Zeitreihenanalysen

Die folgenden Abbildungen zeigen für eine ausgewählte Anzahl von Stationen die dort gemessenen und die für die zugehörige Gitterzelle berechneten Konzentrationsverläufe. Bei dem Vergleich ist zu beachten, daß die Messungen punktuelle Werte darstellen während die berechneten Konzentrationen Volumenmittel der betreffenden Bodenzelle (Volumen  $4000 \times 4000 \times 20 \text{ m}^3$ ) sind. Der abgebildete Zeitraum vom 24. Juli bis einschließlich 6. August 1994 umfaßt vollständig die Perioden an denen im Untersuchungsgebiet starke erhöhte Ozonkonzentrationen gemessen wurden:

26.-29. Juli 1994

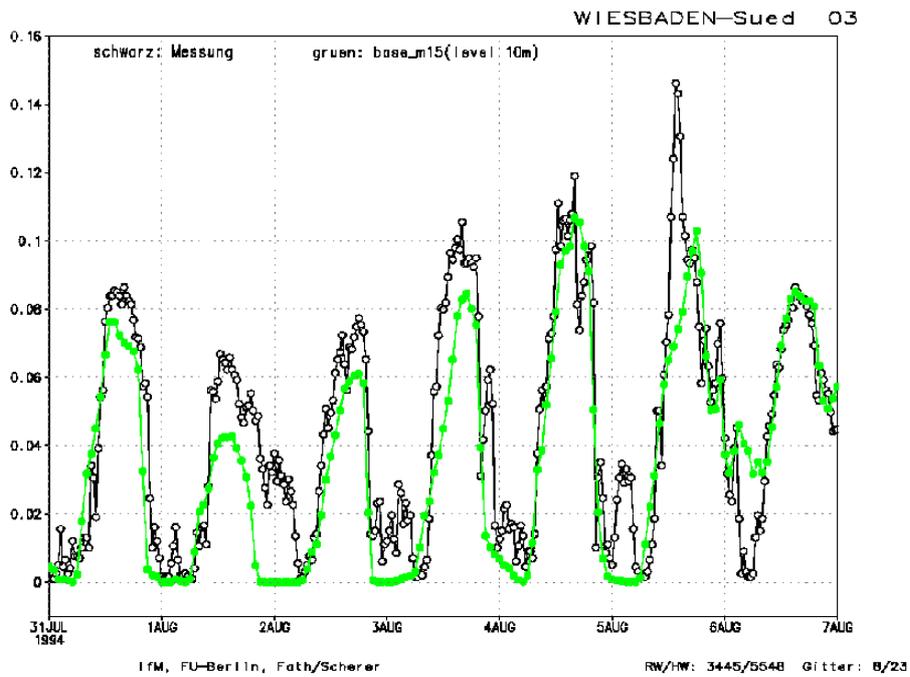
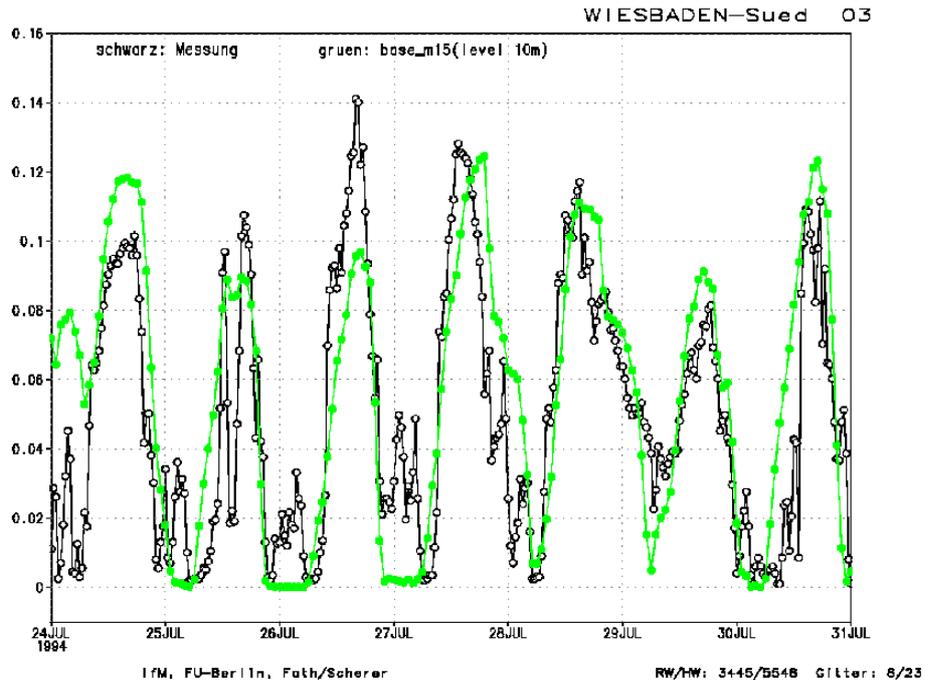
30. Juli 1994

4.-5. August 1994.

In der Abbildung 7.2-11 sind beispielhaft die vom 24. Juli bis 6. August 1994 gemessenen bzw. in der zugehörigen Gitterzelle berechneten Ozonkonzentrationen an der Station Wiesbaden-Süd gezeigt. Ozonkonzentrationen über 100 ppb werden an dieser Station vom 25. bis zum 28. Juli, am 30. Juli und am 3. und 4. August 1994 gemessen. An den meisten dieser Tage ergeben sich auch in den CALGRID-Berechnungen hohe Ozonkonzentrationen. Lediglich die sehr hohen Konzentrationen am 26. Juli und am 5. August werden in der Modellrechnung unterschätzt. Der an der Station Wiesbaden-Süd gemessene Trend ist dagegen großteils gut getroffen: Vom 25. bis einschließlich 28. Juli verharren die Ozonmaxima auf einem recht hohen Niveau, wobei der am 26. Juli gemessene Spitzenwert nicht erreicht wird. Am 29. Juli erfolgt ein leichter Einbruch mit gemessenen und berechneten Ozonmaxima deutlich unter 100 ppb, am 30. Juli liegen die Maxima wieder über 100 ppb. Ab 31. Juli folgt bis zum 2. August eine Periode relativ niedriger Ozonmaxima. Vom 2. August bis zum 5. August steigen die gemessenen Ozonkonzentrationen täglich an. Nach dem gemessenen Maximum am 5. August mit ca. 140 ppb folgt am 6. August mit dem Durchzug einer Front ein deutlicher Einbruch in der Höhe der Ozonkonzentrationen. Der gemessene Ozonanstieg zeigt sich auch in den Gitterwerten der Modellrechnung, die starke Zunahme der gemessenen Ozonmaxima vom 4. auf den 5. August wird aber nicht reproduziert.

Der Durchzug einer Konvergenzzone in Verbindung mit Schauern und Gewittern, die in den frühen Nachmittagsstunden des 25. Juli 1994 den nördlichen Bereich des Untersuchungsgebietes überstreicht, ist im gemessenen Ozonverlauf an allen Stationen im nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes deutlich in dem Einbruch der nachmittäglichen Ozonkonzentrationen zu erkennen (Abb. 7.2-11). In den berechneten Ozonverläufen ist dieser Einbruch nur schwach ausgeprägt, da einerseits das Modell eine gewisse Trägheit besitzt und andererseits die Maschenweite von 4 km keine adäquate Auflösung lokaler Phänomene wie örtlicher Gewitter erlaubt.

Abb. 7.2-11: Gemessener Ozon-Konzentrationsverlauf vom 24.7. bis 6.8.1994 an der Station Wiesbaden-Süd und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm.



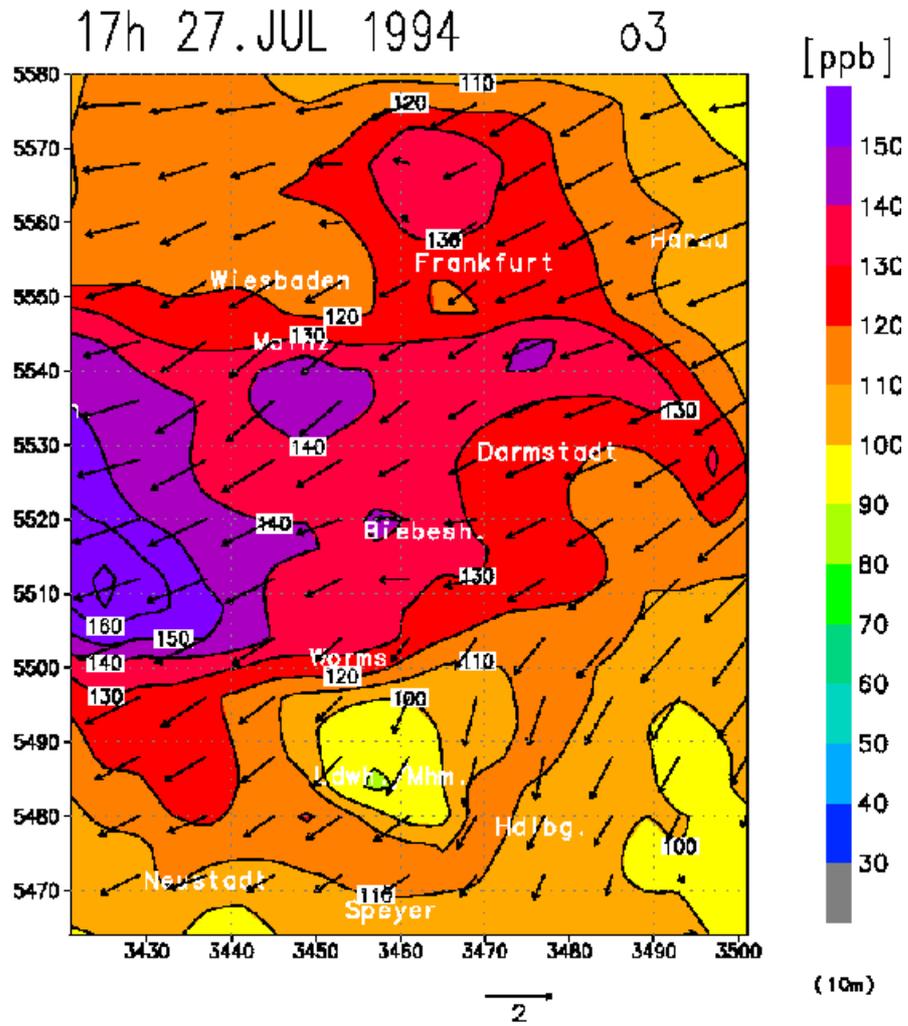
#### **7.2.4 Auswirkungen der Emissionsminderungs-Maßnahmen auf die Oxidantienkonzentrationen**

Die untersuchten Maßnahmen zur kurzfristigen Senkung der Vorläuferemissionen  $\text{NO}_x$  und VOC wurden oben in Kapitel 6 vorgestellt.

Die Auswirkungen der in Tabelle 7.2.2 zusammengestellten temporären Maßnahmen werden anhand der im Kapitel 5 beschriebenen Simulation der Periode hoher Ozonkonzentrationen im Juli/August 1994 untersucht. Für alle temporären Maßnahmen wird angenommen, daß sie zu Beginn des 25. Juli 1994 in Kraft treten und dann bis zum Ende der Simulation am 7. August wirken. Die Einleitung der temporären Maßnahmen des Szenario 4a (Tab. 7.2.2) erfolgt in einem weiteren Rechenlauf erst am 27. Juli 1994. Mit diesem Lauf soll überprüft werden, ob die frühzeitigere Auslösung einer Maßnahme auch in einem relativ kleinen Untersuchungsgebiet, das normalerweise in einigen Stunden durchspült wird, zusätzliche Auswirkungen auf die Ozonkonzentration hat. Die vom REM3 gelieferten Randbedingungen bleiben, wenn nicht anders vermerkt, unverändert. Bei den VOC werden ausschließlich die Emissionen der anthropogenen Kohlenwasserstoffe entsprechend den verschiedenen Szenarien modifiziert.

Die Änderung der Ozonkonzentrationen als Folge der temporären Maßnahmen wird hier verkürzt anhand der berechneten nachmittäglichen Ozonkonzentrationen am dritten Tage nach dem Einleiten der Maßnahme diskutiert, also am 27. Juli 1994. Die Abbildung 7.2-12 zeigt die nachmittäglichen Ozonkonzentrationen (16 bis 17 Uhr MEZ) für den Basislauf, d.h. den Lauf mit den Emissionen des Istzustandes. Die Auswirkungen der einzelnen Szenarien werden anschließend anhand der berechneten prozentualen Änderungen dieser Konzentrationsverteilungen als Folge der Emissionsveränderungen in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Abb. 7.2-12: Berechnete O<sub>3</sub>-Konzentration der Bodenschicht in ppb am 27. Juli 1994, Stundenmittel 16-17 Uhr MEZ, mit Windfeld in der Bodenschicht



Tab. 7.2.2: NOx- und VOC-Reduktionen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main-Neckar für unterschiedliche Emissionsminderungs-Szenarien (Reduktionen bezogen auf die episodenspezifischen Emissionen)

Szenario	NOX	VOC anthropogen	VOC anthropogen und biogen
1 Tempolimit in der Untersuchungsregion	-14%	-1,5%	-1%
2: Fahrverbot für nicht-schadstoffarme PKW in der Untersuchungsregion	-25%	-37%	-27%
4a: Tempolimit und Fahrverbot in der Untersuchungsregion (Pkw+Lkw)	-53%	-45%	-32%
4b: Tempolimit und Fahrverbot in der Untersuchungsregion (U). Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den Bundesländern Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg(UB)	U: -53% UB: -29%	U: -45% UB: -33%	U: -32%
6: Focus NOx in der Untersuchungsregion	-74%	-46%	-33%
7: Focus VOC in der Untersuchungsregion	-25%	-49%	-36%
8a: Focus NOx und Focus VOC in der Untersuchungsregion	-74%	-49%	-36%
8b: Focus NOx und Focus VOC in der Untersuchungsregion (U). Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den Bundesländern Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg (UB)	U: -74% UB: -29%	U: -49% UB: -33%	U: -36%
10 Trend 29005	-30%	-43%	-31%

Tab. 7.2.3: Emissionsminderungen im Szenario 10 "Trend 2005" im Untersuchungsgebiet und im gesamten Modellgebiet des REM3

Land	NOX	VOC
Deutschland	-30%	-34%
Untersuchungsgebiet Rhein-Main-Neckar	-34%	-43%
Belgien	-24%	-34%
Dänemark	-31%	-48%
Frankreich	-31%	-37%
Irland	-27%	-29%
Italien	-18%	-37%
Luxemburg	-27%	-31%
Niederlande	-13%	-29%
Großbritannien	-25%	-34%
Norwegen	-31%	-33%
Schweden	+5%	-29%
Polen	+4%	+5%
ex-Tschechoslowakei	+7%	0%
Österreich	-25%	-28%
Ungarn	+43%	+11%
ex-Sowjetunion	+1%	+16%
Schweiz	-26%	-6%
Finnland	-33%	-22%
Rumänien	0%	0%
Bulgarien	+56%	+47%
ex-Jugoslawien	-6%	0%

**Szenario 1: Tempolimit in der Untersuchungsregion**

Die durch ein Tempolimit erreichte Abnahme der Emissionen wirkt sich kaum auf die Kohlenwasserstoffe aus, da die VOC-Emissionen des Kfz-Verkehrs wenig sensitiv gegenüber einer Änderung der Geschwindigkeit in den höheren Bereichen sind. Die  $\text{NO}_x$ -Minderung eines Tempolimits bewirkt also Ozonzu- und Ozonabnahmen. Ob und in welchem Maße die Ozonkonzentrationen zu oder abnehmen, ist eine komplexe Funktion der Verteilung der Vorläuferkonzentrationen und damit der lokalen Emissionsmassenverhältnisse, der Reaktivität der emittierten Kohlenwasserstoffe und nicht zuletzt der meteorologischen Bedingungen. In  $\text{NO}_x$ -reichen Gebieten führt eine Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen eher zu einer Zunahme der Ozonkonzentrationen, da eine Abnahme des für die photochemischen Reaktionen verfügbaren  $\text{NO}_x$  die Bedeutung der Salpetersäure als Radikalsenke vermindert. Dadurch stehen mehr Radikale zur Oxidation der Kohlenwasserstoffe zur Verfügung, was bei einem genügenden Vorrat von Kohlenwasserstoffen die Ozonproduktion angekurbelt. Die Ozonproduktion ist dann proportional zu der Summe der Reaktionsraten der Radikal-Kohlenwasserstoffreaktionen, d.h. die Ozonproduktionsrate ist durch die Oxidationsrate der Kohlenwasserstoffe limitiert. Dies dürfte der Regelfall in vielen Teilen eines Ballungsgebiets sein. Großräumige Modellrechnungen zeigen (Stern et al., 1995), daß eine  $\text{NO}_x$ -Minderung in einiger Entfernung von den Emissionsgebieten, wo die  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen niedrig sind, zu Ozonabnahmen führt, da in solchen Regionen die Bildung von Peroxiden aus Radikal-Radikal-Reaktionen die wichtigste Senke für die Radikale ist. Eine Minderung des  $\text{NO}_x$ -Angebots führt zu einer schnelleren Beendigung des photochemischen Zyklus und damit zum Ende der Ozonbildung, da die Umwandlung von  $\text{NO}_x$  in Salpetersäure früher abgeschlossen ist. Die Ozonbildung ist in solchen Regionen also  $\text{NO}_x$ -limitiert und nahezu unabhängig von den Kohlenwasserstoffkonzentrationen.

Abb. 7.2-13: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Tempolimit" (Szenario S-1) am 26.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.

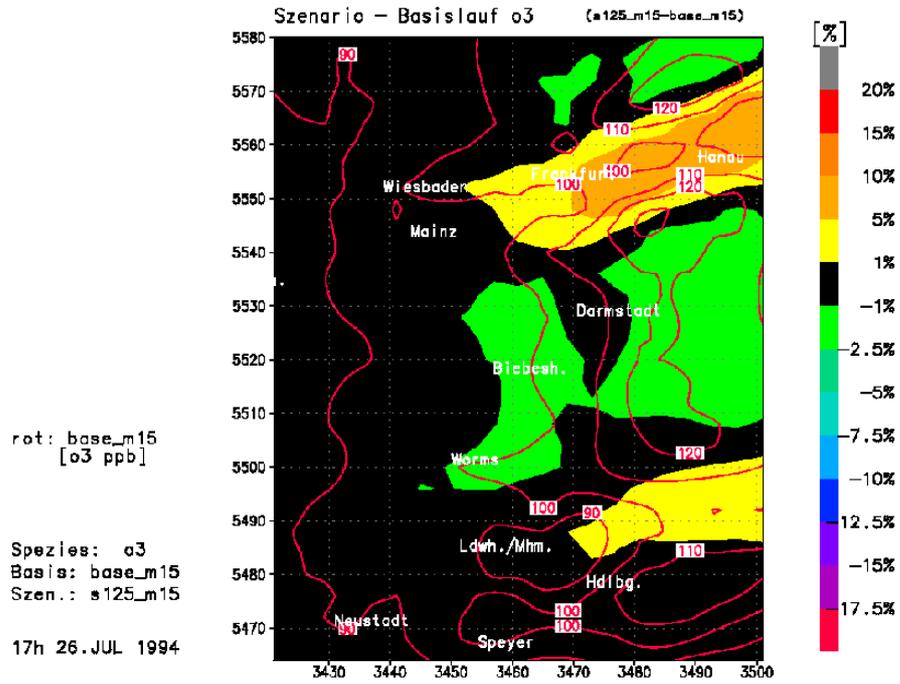
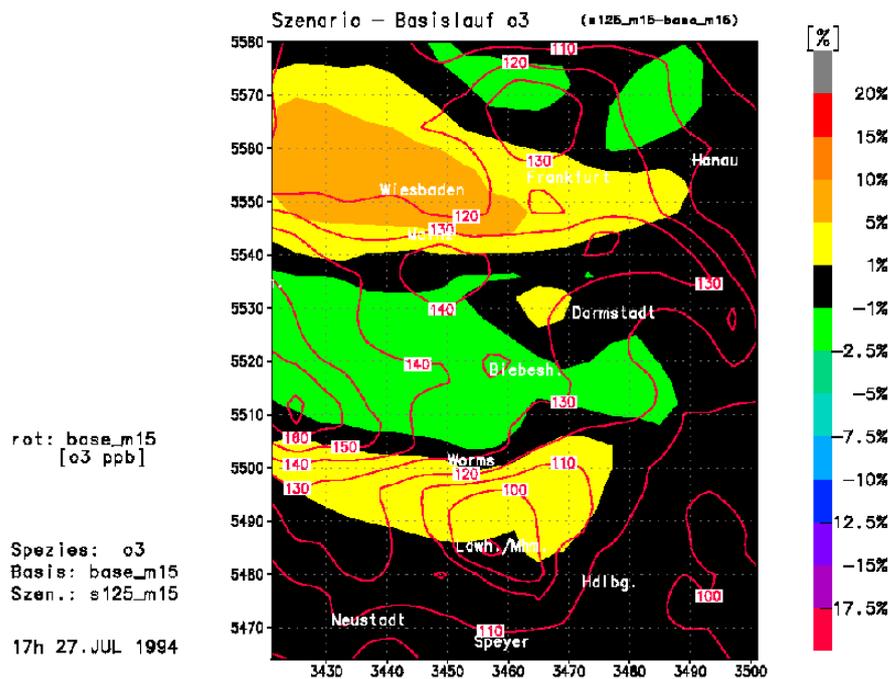


Abb. 7.2-14: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Tempolimit" (Szenario S-1) am 27.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.



**Szenario 2: Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in der Untersuchungsregion**

Im Vergleich zum Szenario "Tempolimit" sind die erreichbaren Ozonabnahmen des Szenarios "Fahrverbot Pkw" also höher und überdecken auch ein größeres Gebiet. Die berechneten Ozonzunahmen sind dagegen geringer. Die größeren Abnahmen sind eine Folge der sehr viel höheren VOC-Minderung bei Szenario 2. Diese erhöhte VOC-Minderung vermindert in  $\text{NO}_x$ -reichen Regimen den Aufbau der Ozonkonzentrationen und schwächt dadurch den negativen Effekt der  $\text{NO}_x$ -Minderung ab. In Gebieten mit geringeren  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen, wo in der Regel die höchsten Ozonkonzentrationen gemessen werden, verstärkt dagegen eine erhöhte  $\text{NO}_x$ -Minderung auch die Ozonabnahme.

Abb. 7.2-15: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Fahrverbot Pkw" (Szenario S-2) am 26.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.

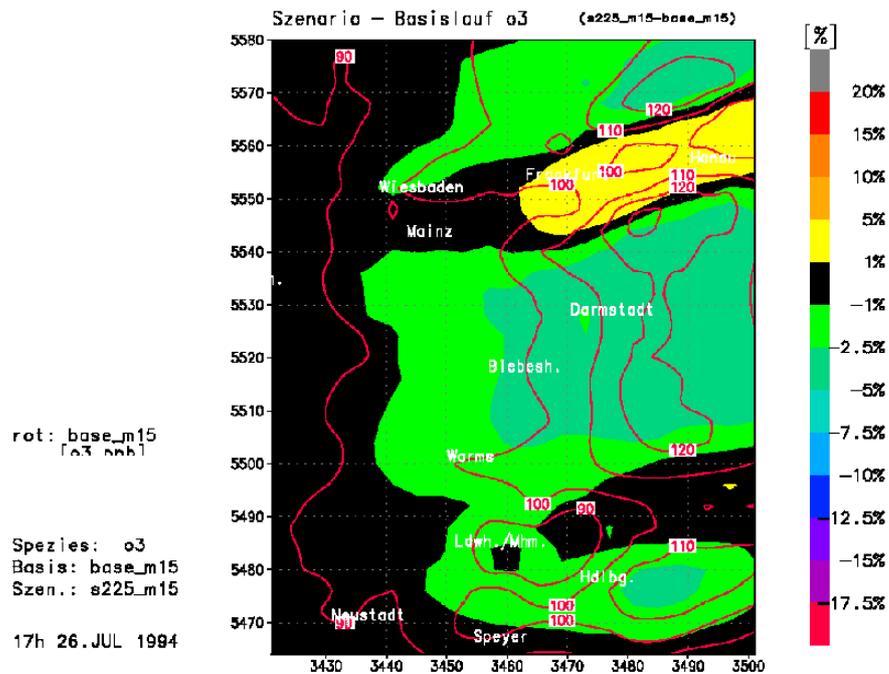
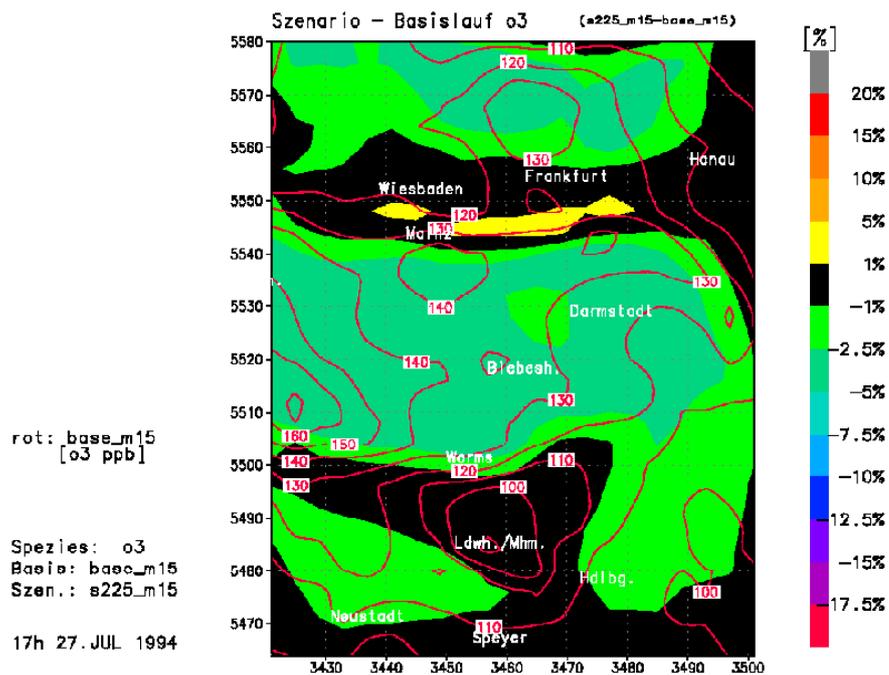


Abb. 7.2-16: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Fahrverbot Pkw" (Szenario S-2) am 27.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.



**Szenario 4a: Tempolimit kombiniert mit Fahrverbot für nicht schadstoffarme Pkw und Lkw in der Untersuchungsregion**

Die berechnete Spannbreite der Ozonänderungen bei diesem Szenario ist relativ groß. Die größten Ozonabnahmen um bis zu 15% werden am 27. Juli, und entsprechend der vorherrschenden Windrichtung am westlichen Rand des Modellgebiets, berechnet. Die Ozonzunahmen im Lee des Ballungsraums Frankfurt/Wiesbaden liegen im Bereich von 10% bis 15%.

Die Auswertungen zeigen, daß die Höhe der bei NO<sub>x</sub>-Minderungen oft berechneten Ozonzunahmen stark von den vorherrschenden meteorologischen Bedingungen abhängt, wobei insbesondere windschwache Bedingungen eine Ozonzunahme in der näheren Umgebung der Maßnahme begünstigen.

Abb. 7.2-17: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Tempolimit und Fahrverbot" (Szenario S-4a) am 26.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O<sub>3</sub>-Konzentrationen des Basislaufs wieder.

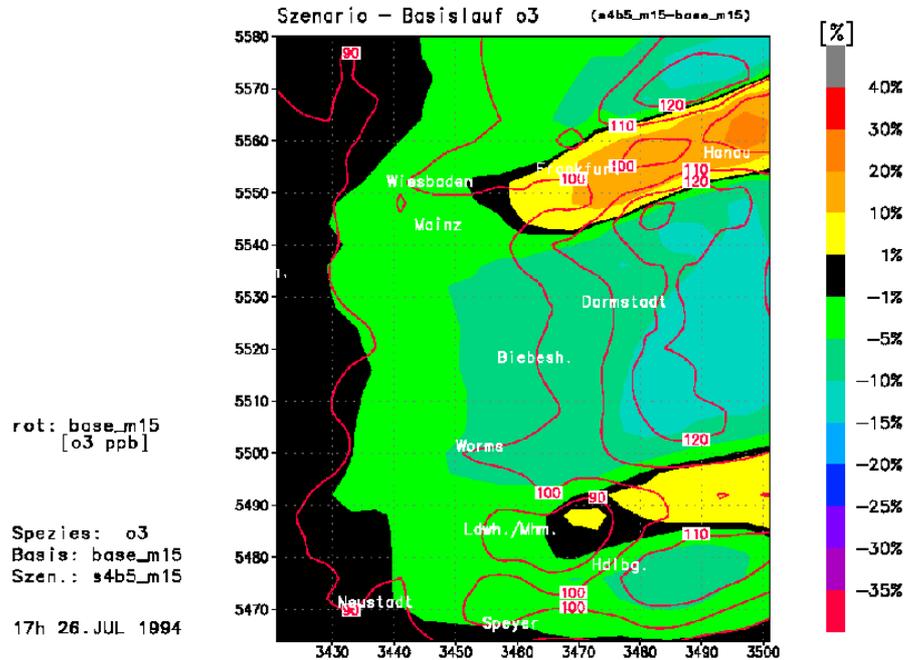
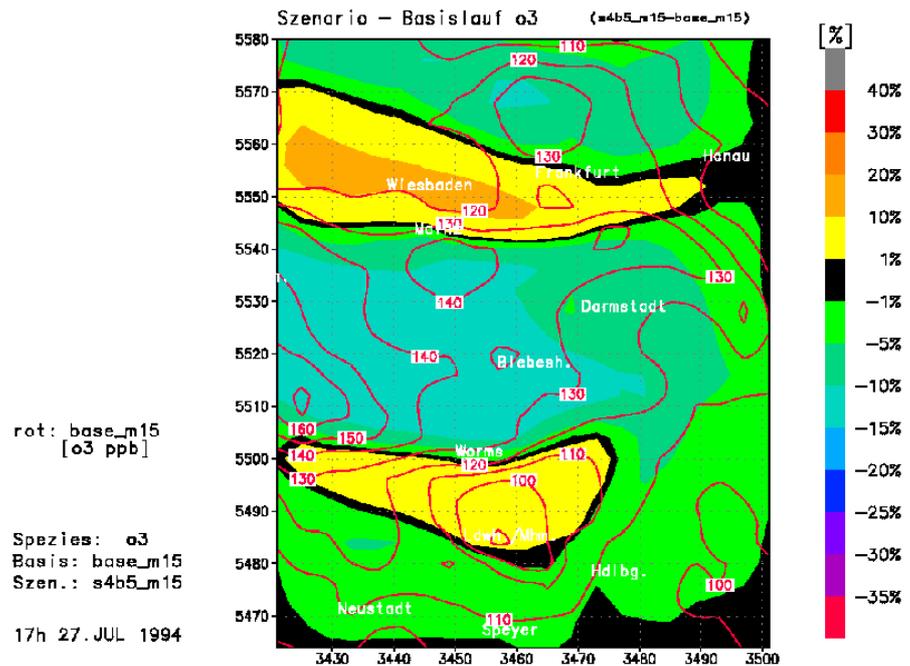


Abb. 7.2-18: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Tempolimit und Fahrverbot" (Szenario S-4a) am 27.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O<sub>3</sub>-Konzentrationen des Basislaufs wieder.



**Szenario 4b: Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw und Lkw und Tempolimit in der Untersuchungsregion kombiniert mit Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern**

Das Fahrverbot außerhalb der Untersuchungsregion verstärkt die durch Szenario 4a in der Untersuchungsregion bewirkten Ozonabnahmen und vermindert die in Gebieten mit hoher NO<sub>x</sub>-Emission berechneten Ozonzunahmen. Im Vergleich zu Szenario 4a steigen die maximalen Ozonabnahmen bei Szenario 4b an den beiden dargestellten Tagen (26. Und 27.7.94) von 15% auf knapp 20%.

Abb. 7.2-19: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Fahrverbote und Tempolimits in der Region plus Fahrverbote für nicht schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern "(Szenario S-4b) am 26.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.

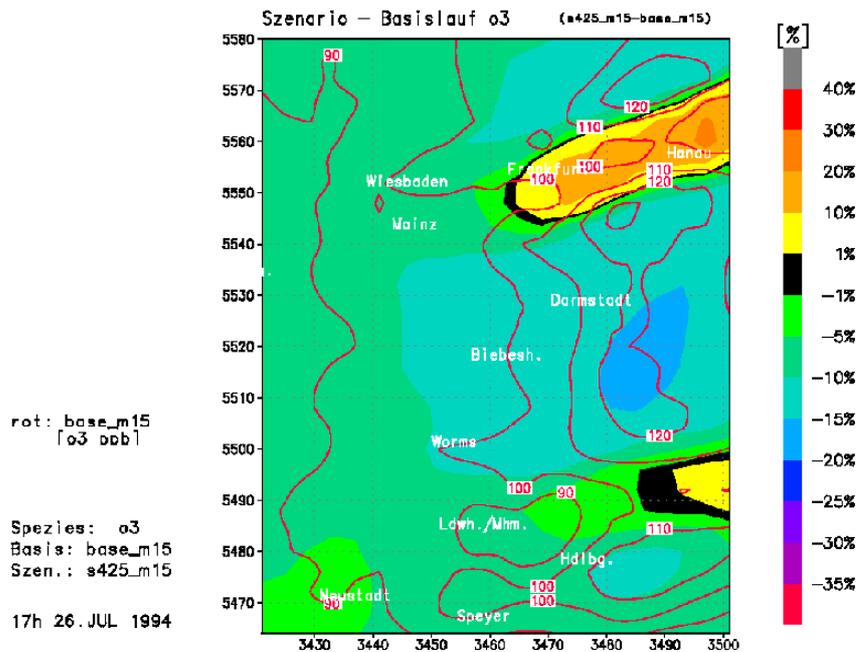
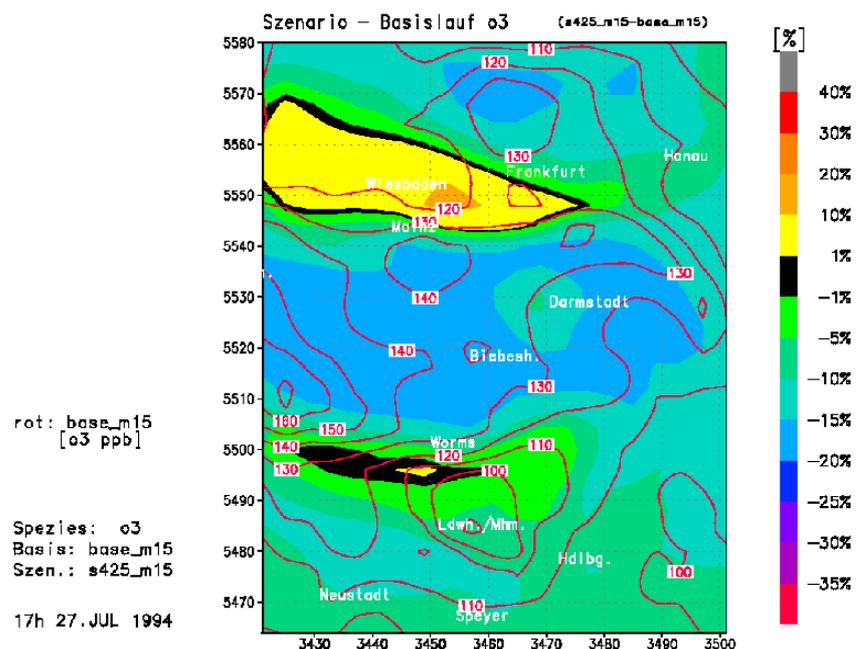


Abb. 7.2-20: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Szenario S-4b" am 27.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.



**Szenario 6: Maximal mögliche Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in der Untersuchungsregion**

Die als Folge der emissionsmindernden Maßnahmen des Szenarios 6 berechneten Ozonabnahmen und auch Ozonzunahmen sind etwas höher als bei Szenario 4a. Am 26. Juli 1994 nehmen die berechneten Ozonmaxima bis zu 15%, am 27. Juli 1994 bis knapp 20% ab.

Abb. 7.2-21: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus-NOx" (Szenario S-6) am 26.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.

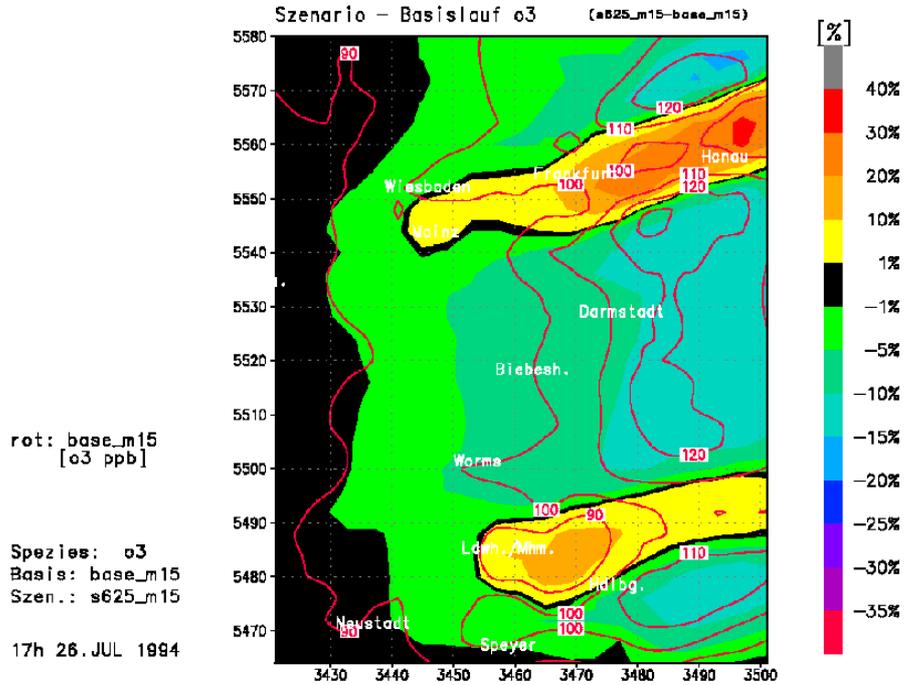
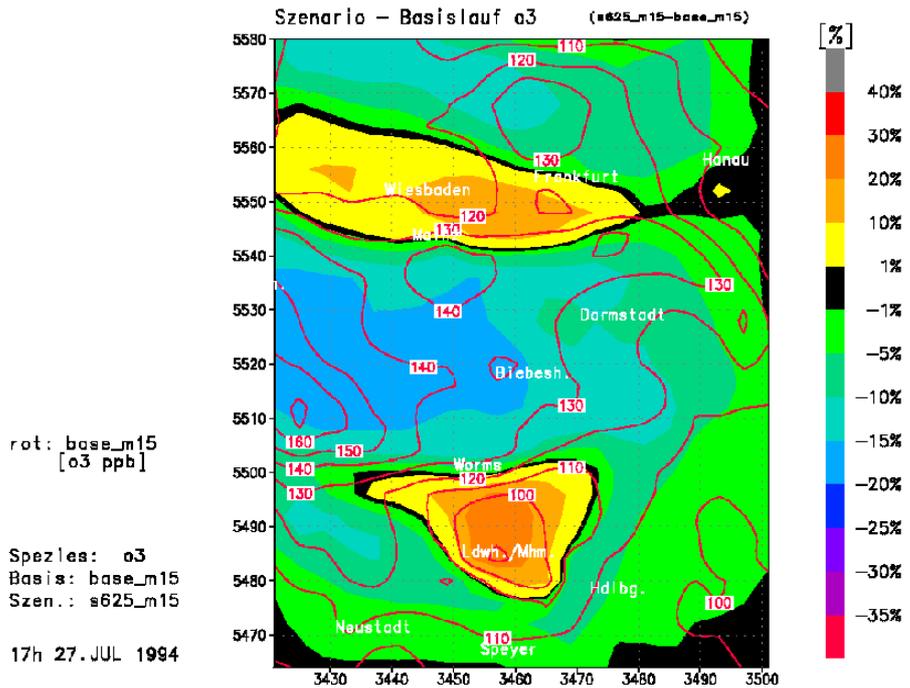


Abb. 7.2-22: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus-NOx" (Szenario S-6) am 27.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.



**Szenario 7: Maximal mögliche Minderung der VOC-Emissionen in der Untersuchungsregion**

Das Szenario "Focus VOC" besteht aus einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw (Szenario 2) und einer Reduzierung der Lösemittelanwendungen. Die dadurch erreichbare Minderung der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen liegt bei 25%, die der Kohlenwasserstoffe bei 36%. Insgesamt sind die Kohlenwasserstoffminderungen also nur geringfügig höher als bei Szenario 2.

Dementsprechend gering sind die Unterschiede in den Ozonveränderungen. Bei beiden Szenarien liegen die berechneten Ozonabnahmen am 25. Juli 1994 unter 5%. Die Ozonzunahmen sind ebenfalls gering und bleiben unter 5%. Auch an den nächsten beiden Tagen sind die berechneten Ozonab- und Ozonzunahmen nur wenig höher.

Abb. 7.2-23: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus-VOC" (Szenario S-7) am 26.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.

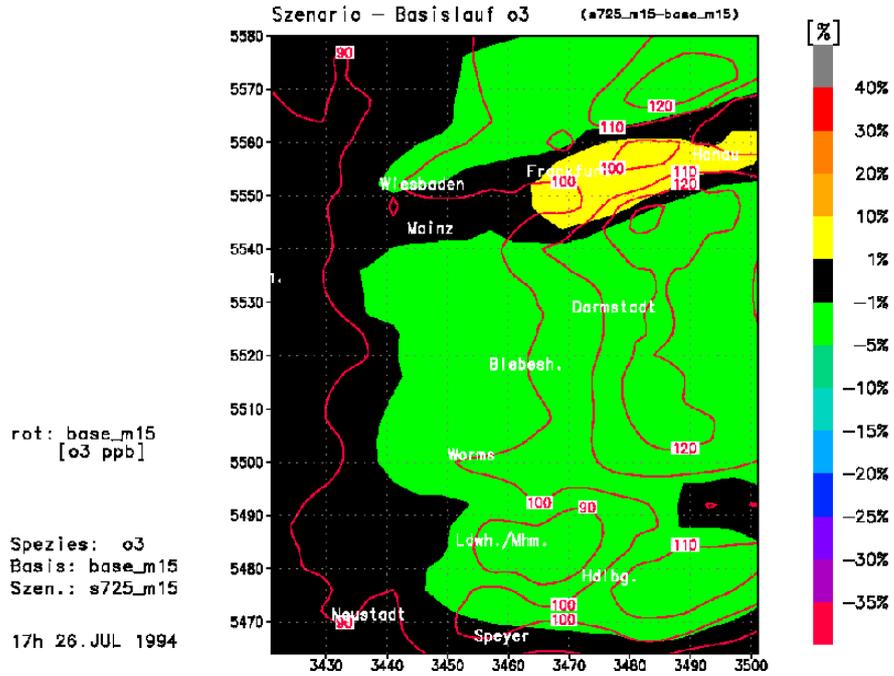
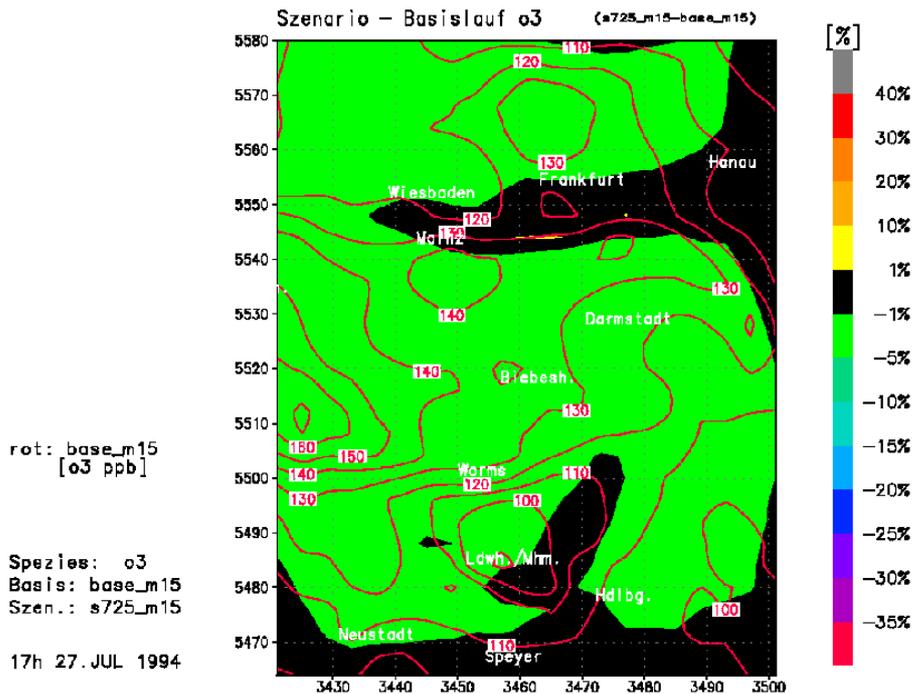


Abb. 7.2-24: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus-VOC" (Szenario S-7) am 27.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.



**Szenario 8a: Maximal mögliche Minderung der NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen in der Untersuchungsregion**

Das Szenario 8a kombiniert das Szenario "Focus VOC" mit dem Szenario "Focus NO<sub>x</sub>". Die Minderung der episodenspezifischen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen erreicht dadurch im Untersuchungsgebiet 74%, die der Kohlenwasserstoffe 36%. Dieses Szenario ist bezüglich der Minderungsraten also nahezu identisch mit dem Szenario 6 "Focus NO<sub>x</sub>".

Die für das Szenario 8a berechneten Ozonveränderungen unterscheiden sich nur geringfügig von denen für das Szenario 6 "Focus NO<sub>x</sub>". Die maximal erreichbaren Ozonabnahmen liegen knapp unter 20%.

Abb. 7.2-25: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Max" (Szenario S-8a) am 26.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.

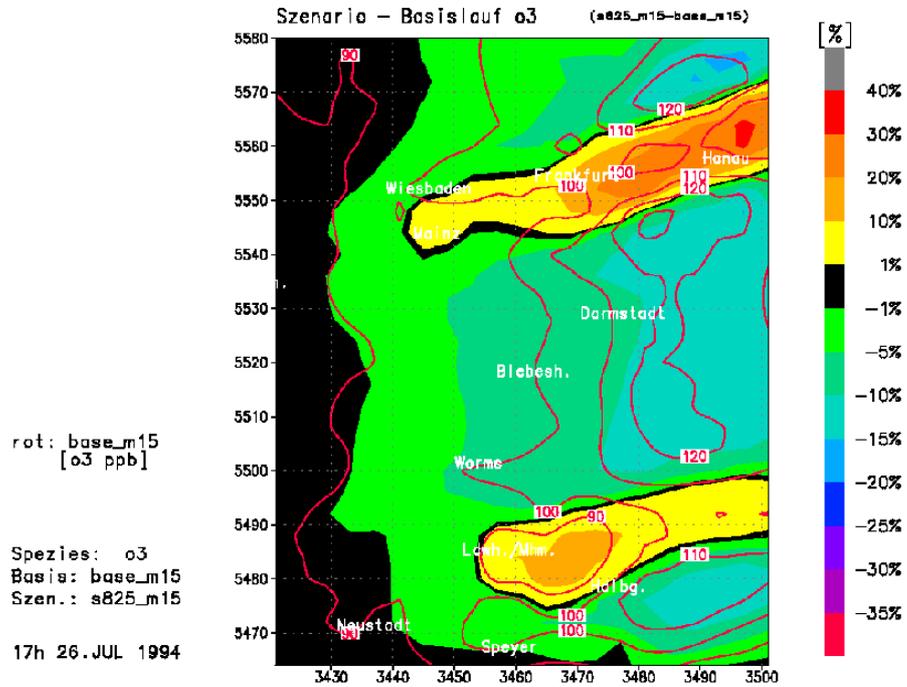
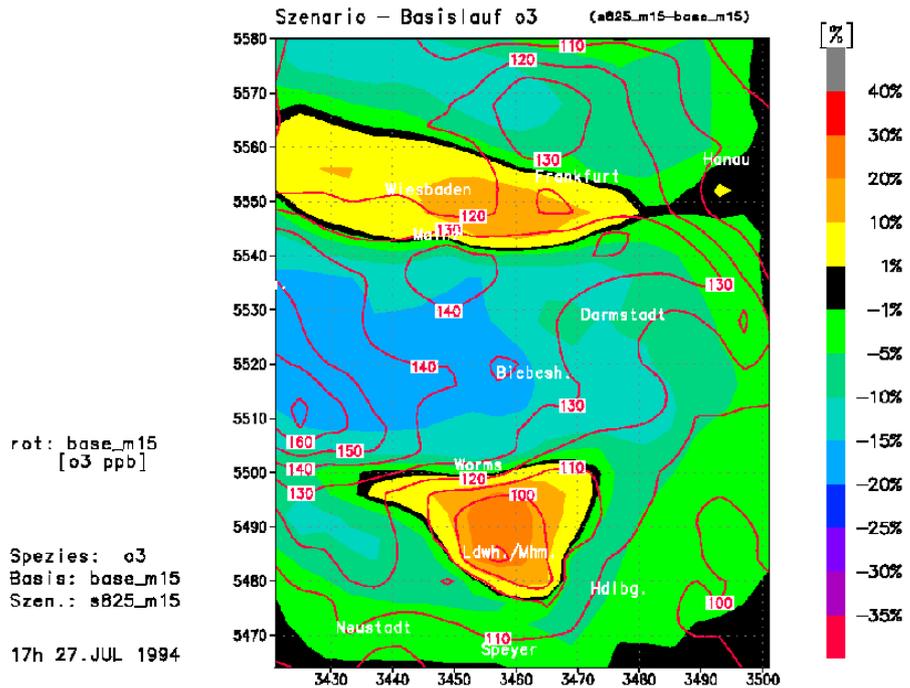


Abb. 7.2-26: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Max" (Szenario S-8a) am 27.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.

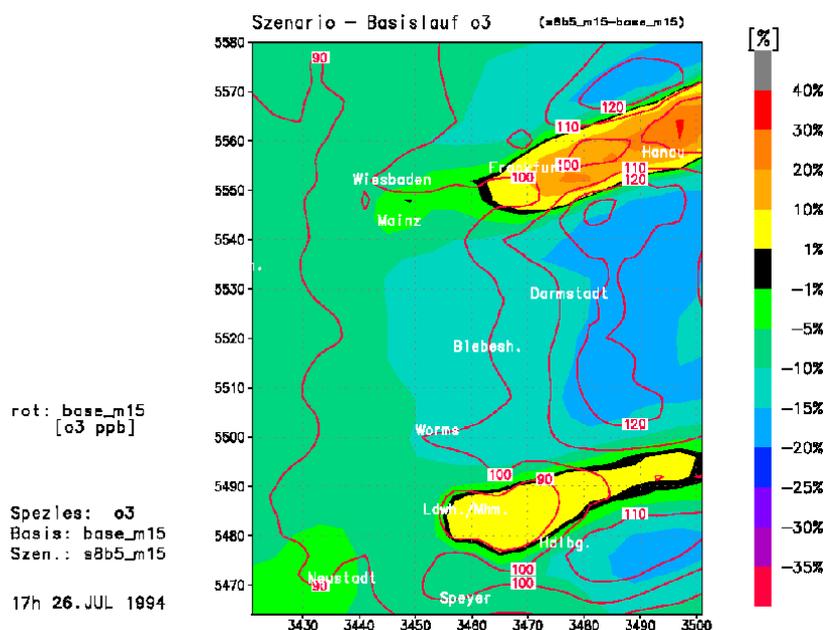


**Szenario 8b: Maximal mögliche Minderung der NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen in der Untersuchungsregion kombiniert mit einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern**

Das Szenario 8b kombiniert das Szenario "Focus VOC+Focus NO<sub>x</sub>" mit einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern. Die Minderung der episodenspezifischen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen erreicht dadurch im Untersuchungsgebiet 74%, die der Kohlenwasserstoffe 36%. Die zusätzliche Maßnahme eines Fahrverbots führt in den Bundesländern außerhalb des Untersuchungsgebiets zu einer Abnahme der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 29% und der anthropogenen VOC-Emissionen um 33%.

Die Abbildungen 7.2-27 zeigt die prozentuale Änderung der nachmittäglichen Ozonkonzentrationen am 27. Juli 1994 als Folge der Emissionsminderung des Szenarios 8b. Die maximalen Ozonabnahmen erreichen am nördlichen Rand des Untersuchungsgebiets die 25%-Marke. Im Großteil des Untersuchungsgebiets liegen sie zwischen 5 und 20%. Ozonzunahmen werden für den Raum Ludwigshafen/Mannheim und einen schmalen Streifen westlich von Frankfurt/Wiesbaden berechnet. Das Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern wirkt sich auf die Ozonkonzentrationen im Untersuchungsgebiet in einer zusätzlichen Ozonabnahme zwischen 5 und 10% aus. Die Ozonzunahmen sind für Szenario 8b an allen Tagen dagegen geringer als für Szenario 8a.

Abb. 7.2-27: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Kombi-Max" (Szenario S-8b) am 26.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O<sub>3</sub>-Konzentrationen des Basislaufs wieder.



#### **Szenario 4a: Zeitversetztes Einleiten der Maßnahme**

Zur Quantifizierung des Zeiteffekts wurde das Szenario 4a neben der bisher diskutierten Einleitung am 25. 7., 0 Uhr auch am 26.7., 0 Uhr, am 26.7., 18 Uhr und am 27. 7., 0 Uhr eingeleitet.

Am Nachmittag des 26. Juli 1994 stellen sich aufgrund der Emissionsminderungen des Szenarios 4a die oben in Abbildung 7.2-17 gezeigten Ozonveränderungen ein, unabhängig davon, ob die Maßnahme am 25. 7., 0 Uhr oder am 26. 7., 0 Uhr eingeleitet wird. Das "Gedächtnis" des Modells reicht in diesem Falle also nicht weiter als ca. 12 Stunden zurück. Die Ozonveränderungen am 27. Juli 1994 zeigen dagegen eine gewisse Abhängigkeit von dem Zeitpunkt der Maßnahmeneinleitung. Die aufgrund des Einleitens der Maßnahme am 26.7., 0 Uhr erreichbare Ozonminderung ist höher als diejenige, die für eine Einleitung am 27. 7., 0 Uhr berechnet wird. Die Auswertungen zeigen, daß es für die Auswirkungen des Szenarios unerheblich ist, ob dieses am 25. 7. 0 Uhr oder am 26.7., 0 Uhr ausgelöst wird. Die maximalen Ozonabnahmen erreichen für beide Einleitungstermine 15%. Dagegen liegen die maximalen Ozonabnahmen bei einer Einleitung der Maßnahme am 26.7., 18 Uhr um 2 bis 4 Prozentpunkte niedriger. Beginnt die Maßnahme erst am 27.7., 0 Uhr, sind die erreichbaren Abnahmen am Nachmittag des 27. Juli noch etwas geringer.

Die Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten liegt in den meteorologischen Bedingungen: am 25. und 26. Juli 1994 herrschen im Untersuchungsgebiet südwestliche Winde zwischen 2 und 5 m/s vor, die das Modellgebiet relativ schnell durchspülen. Deshalb reicht das "Gedächtnis" des Modells für eine Maßnahme am 26. 7. nicht weiter als 12 Stunden zurück. In der Nacht vom 26. 7. auf den 27. 7. bricht die Strömung dagegen zusammen und selbst in der Höhe von ca. 2000 m treten sehr niedrige Windgeschwindigkeiten auf. Der Wind dreht dann von bisher vorwiegend westliche auf östliche Richtungen. Aufgrund der sehr wind-schwachen Verhältnisse und dieser Winddrehung werden die Schadstoffmassen nicht vollständig aus dem Gebiet transportiert, sondern es kommt zu einer teilweisen Rezirkulation. Die Folge ist ein zeitlich verlängertes "Gedächtnis" des Modells und eine frühzeitigere Minderung der Emissionen wirkt sich in einer etwas stärkeren Abnahme der nachmittäglichen Ozonkonzentrationen des 27.7. aus.

#### **Szenario S-10: Trend 2005**

Das Szenario "Trend 2005" umfaßt Maßnahmen in Deutschland und auf EU-Ebene, die bereits eingeleitet sind oder deren Einleitung in Kürze erfolgt. In Deutschland wird für dieses Szenario von 1994 bis 2005 eine Abnahme der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen um 30% und der anthropogenen VOC-Emissionen um 34% angesetzt.

Die Struktur der für das Langfristszenario berechneten Ozonänderung unterscheidet sich gänzlich von derjenigen für die einzelnen temporären Maßnahmen. Im gesamten Untersuchungsgebiet werden Abnahmen der Ozonkonzentrationen berechnet, die zwischen 20 und 30 % liegen. Die größten Ozonänderungen von wiederum knapp 30% werden am westlichen Ausströmrand im Lee von Wiesbaden und am nordöstlichen Einströmrand berechnet. Im engeren Raum Frankfurt-Wiesbaden liegen die Ozonabnahmen dagegen unter 10%. Die starke Ozonabnahme am östlichen Einströmrand ist eine Folge der großräumigen Ozonabsenkung. Diese Absenkung kann sich aber nicht im gesamten Untersuchungsgebiet durchsetzen, sondern wird insbesondere zwischen Frankfurt und Wiesbaden geringer, um dann wieder anzusteigen. Hier wird deutlich, daß auch die lokalen emissionsseitigen und meteorologischen Bedingungen eine große Rolle spielen. Das Ozonminderungspotential einer lokalen Maßnahme wirkt sich also nicht unter allen meteorologischen Bedingungen gleich additiv auf die von der europaweiten Emissionsminderung vorgegebenen Absenkung des großräumigen Ozonhintergrunds aus. Je nach Wetterbedingungen kann eine lokale Maßnahme, die mit einer NO<sub>x</sub>-Minderung verknüpft ist, die großräumige Ozonabsenkung verstärken oder auch abschwächen.

Grundsätzlich zeigt sich, daß die negativen Auswirkungen einer lokalen NO<sub>x</sub>-Kontrolle durch eine großräumige Minderung der Vorläufer entweder sehr stark abgeschwächt oder ganz aufgehoben werden. Dies bedeutet, um so überregionaler eine Maßnahme angesetzt wird, desto sicherer kann man sein, daß die Maßnahme auch lokal, d.h. am Ort der Minderung, zu einer Abnahme der Ozonkonzentrationen führen wird.

Abb. 7.2-28: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Trend-2005" (Szenario S-10) am 26.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.

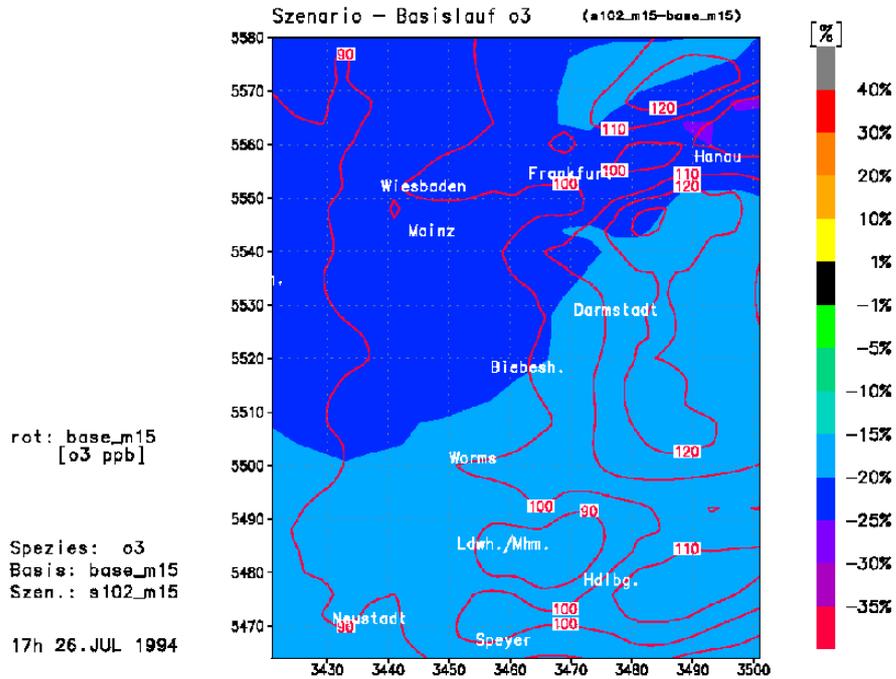
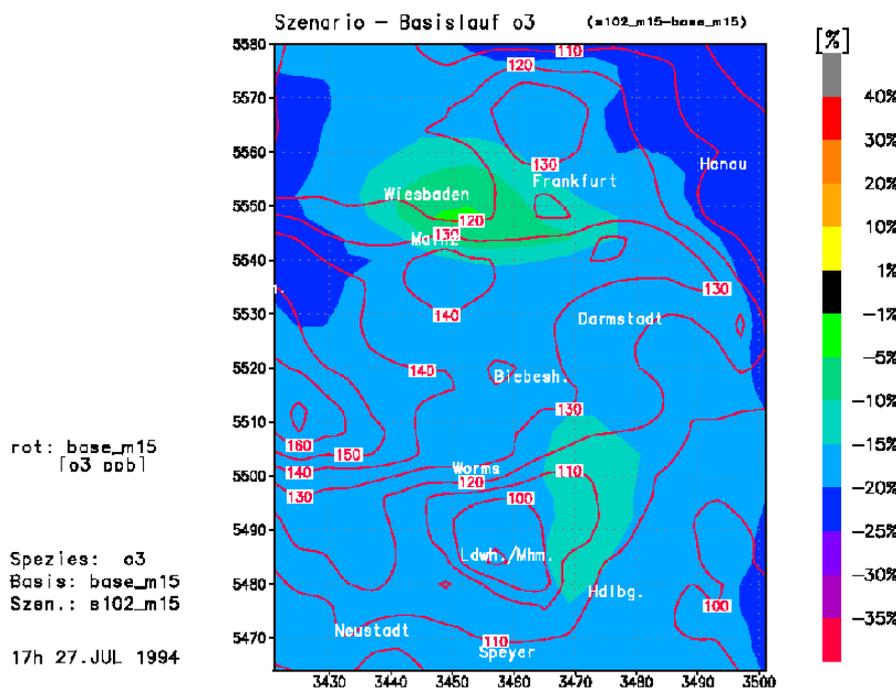


Abb. 7.2-29: Prozentuale Änderung der Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Trend-2005" (Szenario S-10) am 27.7.94, 16-17 Uhr. Die Isolinien geben die O3-Konzentrationen des Basislaufs wieder.



### Wirkungsanalysen auf der Basis von Überschreitungshäufigkeiten

Eine mittlere quantitative Bewertung der Auswirkungen der temporären und dauerhaften, langfristigen Szenarienbetrachtungen auf die Oxidantienkonzentrationen im Untersuchungsgebiet kann mit Hilfe der Überschreitungshäufigkeiten verschiedener Konzentrationsschwellenwerte vorgenommen werden. Die Überschreitungshäufigkeiten werden dabei aus den sog. Gitterstunden ermittelt. Die Anzahl der Gitterstunden gibt an, wieviele Stunden ein gewisser Konzentrationsschwellenwert in den Zellen der Bodenschicht, d.h. der 1. Modellschicht, während des Simulationszeitraums überschritten wird. Die maximal mögliche Anzahl von Gitterstunden in einer Zelle der Bodenschicht entspricht der Anzahl der für die Szenarienkäufe ausgewerteten Simulationsstunden. Sie beträgt für den Zeitraum vom 25. Juli bis zum 6. August also 312 Stunden. Aufsummiert über alle Zellen der Bodenschicht ergeben sich  $312 \times 21 \times 30 = 196.560$  Gitterstunden<sup>1</sup>. Die Tabelle 7.2.4 zeigt die so berechneten Ozon-Überschreitungshäufigkeiten als Prozentanteile von der maximal möglichen Anzahl von Gitterstunden für den Basislauf und die einzelnen Szenarien.

In der Zeit vom 25. Juli bis einschließlich 6. August 1994 werden im Basislauf in 16,7% aller Gitterstunden im Untersuchungsgebiet mehr als 90 ppb Ozon berechnet (Bodenschicht). Die 120 ppb-Grenze wird in 2,1% aller Gitterstunden überschritten. Bei Szenario 1, dem Tempolimit, erhöhen sich die Überschreitungshäufigkeiten relativ zum Basislauf in allen Bereichen. Ursache dieser generellen Erhöhung ist die starke NO<sub>x</sub>-Betonung des Szenarios, die am Ort der Maßnahme eher zu Ozonerhöhungen führt. Auch bei den anderen Szenarien ergeben sich nur für die Bereiche größer 120 ppb durchweg Abnahmen der Überschreitungshäufigkeiten, in den unteren Bereichen werden in unterschiedlichem Ausmaße Zunahmen berechnet. Es muß betont werden, daß die Überschreitungshäufigkeiten über das Untersuchungsgebiet gemittelte Verhältnisse beschreiben. Lokal kommt es auch bei allen temporären Szenarien zu Abnahmen der Ozonkonzentrationen, insbesondere der berechneten Spitzenkonzentrationen. Diese werden aber durch die berechneten Zunahmen im Mittel wieder ausgeglichen. Bei dem Langfristszenario 10 werden dagegen ausschließlich Abnahmen der Überschreitungshäufigkeiten berechnet.

Das **Szenario Trend 2005 (S-10)** ist also mit **Abstand das wirksamste Szenario zur Reduzierung der Überschreitungshäufigkeiten von hohen O<sub>3</sub>-Konzentrationen**. Nach den Modellrechnungen ergibt sich eine Abnahme der Überschreitungshäufigkeit des 90 ppb-Schwellenwerts von ca. 48%, derjenigen des 120 ppb-Schwellenwerts um über 90%.

Daß die **Effizienz** von Maßnahmen bei einer **Erweiterung des Maßnahmensgebiets deutlich erhöht** werden kann, zeigt der Vergleich der Überschreitungshäufigkeiten der Szenarien

---

<sup>1</sup> Die Randzellen werden bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt

4a und 4b, bzw. 8a und 8b. Werden z.B. bei Szenario 8a noch Zunahmen der 100 ppb-Überschreitungshäufigkeit berechnet, so ergibt die Erweiterung des Maßnahmengebiets bei Szenario 8b (Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern und Minderungen im Untersuchungsgebiet wie bei Szenario 8a) bereits eine Abnahme von ca. 29%. Auch in den hohen Bereichen wird die Wirksamkeit der Maßnahme im Gebiet durch die zusätzliche Minderung außerhalb des Gebiets erhöht.

Die Ursache der teilweise deutlichen Ozonerhöhungen liegt in der Struktur des Gittermodells, in dem alle in eine Gitterzelle emittierten Stoffe sofort innerhalb der Gitterzelle homogen verteilt werden. Bei hohen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen in einer Zelle wird dadurch die schnelle Reaktion von frisch emittiertem NO mit Ozon überbetont. Diese Reaktion baut Ozon ab und erhöht insbesondere nachts die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen im Emissionsbereich. Dies ist ein Grund, warum Gittermodelle nachts oft die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen in Gebieten mit einer starken Emissionsstruktur überschätzen. Eine  $\text{NO}_x$ -Reduzierung reduziert die Wirksamkeit dieser Reaktion, es wird weniger Ozon abgebaut und die Abnahme des für die photochemischen Reaktionen verfügbaren  $\text{NO}_x$  vermindert die Bedeutung der Salpetersäure  $\text{HNO}_3$  als Radikalsenke, wodurch mehr Radikale zur Oxidation der Kohlenwasserstoffe zur Verfügung stehen, was wiederum die Ozonproduktion ankurbelt.

In der Realität wird ein solch starker unmittelbarer Ozonabbau, wie er in Gittermodellen in Ballungsgebieten berechnet wird, nur im direkten Einflußbereich starker  $\text{NO}_x$ -Emittenten, wie z.B. in den Abgasfahnen großer Punktquellen oder im direkten Einflußbereich einer Straße beobachtet. In dem hier verwendeten Skalenbereich von  $4 \times 4 \text{ km}^2$  ist die Konzentrationsverteilung in Ballungsgebieten normalerweise inhomogen, da die Zeitskala der turbulenten Vermischung und des Transports zu klein sind, um für eine vollständige Vermischung zu sorgen, wie sie vom Gittermodell vorausgesetzt wird. Eine Minderung an einer  $\text{NO}_x$ -Quelle, dürfte daher nur in unmittelbarer Quellnähe zu einem sofortigen Ozonanstieg führen<sup>2</sup>. Eine homogene Verteilung von Spurenstoffen im Skalenbereich des Modells findet man gewöhnlich nur in emissionsarmen Gebieten.

Ein Weg zur Umgehung dieser modellinherenten Schwäche liegt in der **Betrachtung der Summe aus Ozon und Stickstoffdioxid**. Diese Summe wird als  $\text{O}_x$  bezeichnet. Die Verwendung von  $\text{O}_x$  bedeutet, daß die schnelle Reaktion von NO mit  $\text{O}_3$  quasi ausgeschaltet wird. Szenarien werden dann danach bewertet, wie weit die Emissionsminderung das **Oxidantienpotential  $\text{O}_3 + \text{NO}_2$**  vermindert. Dazu zeigt die Tabelle 7.2.5 die der Tabelle 7.2.4 entsprechende Auswertung der Szenarien bezüglich des Summenstoffes  $\text{O}_x$ .

<sup>2</sup> Abhilfe würde natürlich eine genügend feine Gitterauflösung schaffen. Da diese aber im Dekameterbereich liegen müßte, wären selbst große Supercomputer mit der sich daraus ergebenden immensen Anzahl von Gitterzellen überfordert. Außerdem stehen die Eingangsdaten nicht in solch einer Auflösung zur Verfügung.

Nach Tabelle 7.2.5 werden in der Zeit vom 25. Juli bis einschließlich 6. August 1994 im Basislauf in 26,6% aller Gitterstunden im Untersuchungsgebiet mehr als 90 ppb  $O_x$  berechnet (Bodenschicht). Die 120 ppb-Grenze wird in 4,2% aller Gitterstunden überschritten. Bei Szenario 1, dem Tempolimit, erhöhen sich auch die Überschreitungshäufigkeiten für  $O_x$  relativ zum Basislauf in allen Bereichen. Die Erhöhungen sind jetzt allerdings geringfügig. Trotz Ausschaltung der  $NO-O_3$ -Reaktion wird also in einzelnen Gebieten mehr  $O_x$  produziert als im Basislauf, was darauf hindeutet, daß die Reaktivität des Spurenstoffgemisches durch die Maßnahme zum Teil erhöht wird. Bei den anderen Szenarien ergeben sich für die Bereiche größer 100 ppb jetzt durchweg Abnahmen der Überschreitungshäufigkeiten. Bei dem Langfristszenario 10 und den beiden temporären Szenarien, in denen auch in den umgebenden Bundesländern Minderungen vorgenommen werden (Szenario 4b und 8b), gilt dies für den gesamten dargestellten Bereich.

Auch bei der Betrachtung von  $O_x$  ist das Langfristszenario 10 das wirksamste Szenario zur Reduzierung der Oxidantien-Überschreitungshäufigkeiten. Da ein Großteil der Wirkung dieses Szenarios auf der Reduzierung des großräumigen Hintergrunds beruht, sind die Unterschiede zwischen  $O_3$ -Minderung und  $O_x$ -Minderung sehr viel geringer als bei den anderen Szenarien. Die  $NO-O_3$ -Reaktion beeinflusst die berechneten Ozonkonzentrationen also nur direkt in den Quellgebieten, wo die hohen  $NO$ -Konzentrationen auftreten.

Die Auswirkungen der temporären Maßnahmen auf die  $O_x$ -Überschreitungshäufigkeiten sind unterschiedlich. Bei den Szenarien, die ausschließlich Emissionsminderungen innerhalb des Untersuchungsgebiets beschreiben, nehmen die Überschreitungshäufigkeiten nur für Szenario 7 ("Focus VOC") in allen Bereichen ab. Hier zeigt sich, daß die relativ starke VOC-Minderung dieses Szenarios die mittlere Reaktivität im Modellgebiet herabsetzt. Insgesamt ist die Wirkung des Szenarios 7 aber gering. Für die stark  $NO_x$ -betonten Szenarien 6 und 8a erhöhen sich die Überschreitungshäufigkeiten bis zum 90 ppb- $O_x$ -Schwellenwert. Für  $O_x$ -Werte größer 110 ppb ist deren Wirkung aber deutlich stärker als diejenige des "Focus VOC"-Szenarios.

Die schon angeführte Erhöhung der Effizienz von Maßnahmen bei einer Erweiterung des Maßnahmensgebiets zeigen sich auch in den  $O_x$ -Überschreitungshäufigkeiten der Szenarien 4b und 8b. Werden bei Szenario 8a noch Zunahmen der 90 ppb-Überschreitungshäufigkeit berechnet, so ergibt die Erweiterung des Maßnahmensgebiets bei Szenario 8b (Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern und Minderungen im Untersuchungsgebiet wie bei Szenario 8a) bereits eine Abnahme von ca. 19%. Auch in den hohen Bereichen wird die Wirksamkeit der Maßnahme im Gebiet durch die zusätzliche Minderung außerhalb des Gebiets wieder drastisch erhöht.

Das Oxidantienenkungspotential einer Maßnahme tritt also in Ballungsgebieten deutlicher zu Tage, wenn man die Summe aus  $O_3$  und  $NO_2$  zur Beurteilung heranzieht. Die Einbeziehung des  $NO_2$  ist auch deshalb berechtigt, da es ohne  $NO_2$  nicht zur Ozonbildung kommt. In

ländlichen Gebieten mit niedrigen Konzentrationen ist daher auch das Potential der Stickoxide der limitierende Faktor bei der Ozonbildung. Dieser Umstand wird in Ballungsgebieten durch die sehr hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen überdeckt.

In der Tabelle 7.2.6 sind die Änderungen der Überschreitungshäufigkeiten für NO<sub>2</sub> zusammengestellt. Im Basislauf werden nach Tabelle 7.2.6 in 21,9% aller Gitterstunden der 1. Modellschicht mehr als 20 ppb NO<sub>2</sub> berechnet. Die 80 ppb-Marke wird noch in 1,8% aller Gitterstunden überschritten. Diese Überschreitungshäufigkeiten verringern sich in allen Bereichen für alle Szenarien je nach Ausmaß der NO<sub>x</sub>-Emissionsminderung. Die stärksten Abnahmen ergeben sich für Szenario 8b, in dem keine NO<sub>2</sub>-Konzentrationen größer 50 ppb berechnet werden.

Die Abnahme der NO<sub>2</sub>-Überschreitungshäufigkeiten wird nur geringfügig durch eine Erweiterung des Maßnahmensgebiets erhöht wie der Vergleich der Überschreitungshäufigkeiten der Szenarien 4a und 4b, bzw. 8a und 8b zeigt. Die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Modellgebiet sind also überwiegend eine Folge der Emissionen des Gebiets. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zum Ozon, wo ein bedeutender Anteil über die Ränder in das Untersuchungsgebiet transportiert wird. Dementsprechend geringer sind die NO<sub>2</sub>-Abnahmen des Langfristszenarios 10, da dessen NO<sub>x</sub>-Emissionsminderungen im Untersuchungsgebiet geringer sind als z.B. diejenigen der Szenarien 4 bis 8.

Abschließend sollen die Szenarien noch im Vergleich zu den großräumigen Modellanwendungen in der A dieser Untersuchung (s. oben) bewertet werden. Die Anwendung des REM3 auf deutschlandweite temporäre Szenarien (Stern et al., 1995) hat gezeigt, daß im Mittel über Deutschland für alle betrachteten Szenarien, also auch für die NO<sub>x</sub>-betonten, Abnahmen der Ozon-Überschreitungshäufigkeiten in allen Konzentrationsbereichen berechnet werden. Diese Szenarien führen hier vor allem in den niedrigeren Bereichen zu Ozonzunahmen. Die für ähnliche Szenarien berechneten Abnahmen der Ozonspitzenwerte sind dagegen durchaus vergleichbar.

Das unterschiedliche Verhalten bei den Überschreitungshäufigkeiten hat seine Ursache in den **unterschiedlichen Skalenbereichen** der beiden Modellanwendungen **REM3** und **CALGRID**. Auch großräumige Modellanwendungen zeigen wie die kleinräumige CALGRID-Modellrechnung in manchen Fällen in Gebieten mit starken NO<sub>x</sub>-Emissionen eine Zunahme der Ozonkonzentrationen bei Minderungen dieser NO<sub>x</sub>-Emissionen<sup>3</sup>. Mit zunehmender Quellentfernung wird der negative Effekt einer NO<sub>x</sub>-Minderung, d.h. die Berechnung von Ozonzunahmen, in den großräumigen Rechnungen dann geringer und schlägt schließlich in Ozonabnahmen um. Daher wirkt sich nach den bisherigen Modellrechnungen im weiträumigen

---

<sup>3</sup> Die REM3-Berechnungen ergaben an manchen Tagen im Ruhrgebiet bei einer NO<sub>x</sub>-Minderung eine Zunahme der Ozonkonzentrationen, siehe Stern et al. (1995).

geren Transport auch jede  $\text{NO}_x$ -Minderung in einer Reduktion der Ozonwerte aus. In einem kleinräumigen Modellgebiet liegt der Ort des Umschlagens von Ozonzunahmen in Ozonabnahmen bei gewissen meteorologischen Bedingungen ( z.B. hohe Windgeschwindigkeiten) oft bereits außerhalb des Modellgebiets. In diesen Fällen entsteht der Eindruck, daß lokale Maßnahmen, insbesondere bei  $\text{NO}_x$ -Minderungen, überwiegend geringe oder zum Teil sogar negative Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen haben.

Da die Gebiete mit hohen  $\text{NO}_x$ -Emissionen an der Gesamtfläche Deutschlands nur einen geringen Anteil haben, überdecken die meisten Gitterzellen einer deutschlandweiten Modellanwendung eher emissionsschwache Gebiete, in denen eine  $\text{NO}_x$ -Minderung zu Ozonabnahmen führt. In einer deutschlandweiten Gitterstundenauswertung fallen daher die wenigen Zellen, in denen eventuell auch in der großräumigen Modellanwendung Ozonzunahmen berechnet werden, kaum ins Gewicht. In einem kleinen Modellgebiet mit hoher Industrie- und Verkehrsdichte ist dagegen der Anteil der Gitterzellen mit starken  $\text{NO}_x$ -Emissionen sehr viel höher, wodurch die durch eine  $\text{NO}_x$ -Minderung verursachten Ozonzunahmen auch im Mittel über das Untersuchungsgebiet sehr viel stärker hervortreten als bei den großräumigen Modellrechnungen. Dies erklärt die Unterschiede in den Änderungen der Überschreitungshäufigkeiten.

Die für eine  $\text{NO}_x$ -Minderung am Quellort und der näheren Quellentfernung berechnete Ozonerhöhung muß dazuhin immer im Zusammenhang mit der bei den Berechnungen verwendeten Auflösung des Untersuchungsgebietes beurteilt werden. Berechnete Ozonänderungen überdecken immer mindestens die Fläche einer Gitterzelle. Bei großräumigen Modellrechnungen, die mit einer Auflösung von 30 bis 150 km arbeiten, können keine Aussagen unterhalb dieser Gitterauflösung getroffen werden. Eine  $\text{NO}_x$ -Minderungsmaßnahme, berechnet mit einem die Emissionsstruktur fein auflösenden Modell, kann in dem Gebiet, wo die großräumige Modellanwendung nur Ozonzunahmen oder nur Ozonabnahmen berechnet, zu Ozonzunahmen und Ozonabnahmen führen, wenn die Emissionsstruktur innerhalb einer Zelle des großräumigen Modells horizontal inhomogen ist. Ob und in welchem Maße die Ozonkonzentrationen zu- oder abnehmen, ist dabei eine komplexe Funktion der Verteilung der Vorläuferkonzentrationen und damit der Emissionsmassenverhältnisse, der Reaktivität der emittierten Kohlenwasserstoffe sowie der meteorologischen Bedingungen, wobei alle diese Größen von der gewählten Maschenweite abhängen. Erst in größerer Entfernung von den Gebieten höherer Emissionsdichten, wo die einzelnen Komponenten des photochemischen Smogs bereits weitgehend homogen verteilt sind, spielt die Gittergröße nicht mehr diese wichtige Rolle.

Aus großräumigen Modellrechnungen lassen sich daher nur bedingt Aussagen über die Auswirkungen von Maßnahmen innerhalb eines begrenzten Untersuchungsgebiets mit hohen Emissionen ableiten. Hierzu sind auf jeden Fall fein auflösende Berechnungen notwendig. Dies gilt insbesondere für relativ windschwache Wetterlagen oder für Gebiete mit komplexen Strömungsverhältnissen wie sie in dem hier betrachteten Modellgebiet oft angetroffen wer-

den. Allerdings ist nicht abzusehen, daß kleinräumige Modelle in naher Zukunft mit solch einer kleinen Maschenweite betrieben werden können, daß die weiter oben diskutierten Gittereffekte bei einer  $\text{NO}_x$ -Minderung nicht mehr in diesem Maße auftreten.

Tab. 7.2.4: Gitterstundenanalyse der O<sub>3</sub>-Konzentrationen für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien

	O <sub>3</sub> >80ppb	O <sub>3</sub> >90ppb	O <sub>3</sub> >100ppb	O <sub>3</sub> >110ppb	O <sub>3</sub> >120ppb
Basislauf	25,6%	16,7%	9,6%	4,7%	2,1%
Szenario 1	26,9% (+5,1%)	17,7% (+6,0%)	10,3% (+7,3%)	5,1% (+8,5%)	2,3% (+9,5%)
Szenario 2	27,3% (+6,6%)	17,8% (+6,6%)	10,0% (+4,2%)	4,6% (-2,1%)	1,8% (-14,2%)
Szenario 4a	31,3% (+16,3%)	20,2% (+20,9%)	10,9% (+13,5%)	4,6% (-2,1%)	1,6% (-23,8%)
Szenario 4b	27,0% (+5,5%)	15,4% (-7,8%)	7,0% (-27,1%)	2,4% (-48,9%)	0,6% (-71,4%)
Szenario 6	35,1% (+37,2%)	22,7% (+35,9%)	12,0% (+25,0%)	4,9% (+4,3%)	1,5% (-28,6%)
Szenario 7	27,1% (+5,9%)	17,6% (+5,4%)	9,8% (+2,1%)	4,5% (-4,3%)	1,7% (-19,0%)
Szenario 8a	34,9% (+36,3%)	22,5% (+34,7%)	11,9% (+23,9%)	4,8% (+2,1%)	1,5% (-28,6%)
Szenario 8b	31,8% (+24,2%)	17,0% (+1,8%)	6,8% (-29,2%)	1,9% (-59,6%)	0,3% (-85,7%)
Szenario 10	16,7% (-34,7%)	8,7% (-47,9%)	3,7% (-61,5%)	1,1% (-76,6%)	0,2% (-90,5%)

Anm: Prozentuale Anzahl der Gitterstunden, in denen die angegebenen O<sub>3</sub>-Konzentrationen im Untersuchungsgebiet vom 25.7. bis zum 6.8. 1994 für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien überschritten werden. Die maximal mögliche Anzahl von Gitterstunden ergibt sich aus der Anzahl der Simulationsstunden (312) multipliziert mit der Anzahl der ausgewerteten Zellen in der 1. Modellschicht (630) zu 196560 Gitterstunden (=100%). Die in Klammern gesetzten Prozentangaben bei den Szenarien geben die Änderung der entsprechenden Überschreitungshäufigkeit des Basislaufs aufgrund der Emissionsminderung des betreffenden Szenarios an. Ein getöntes Feld bedeutet, daß die Maßnahme bezogen auf den Basislauf zu einer Abnahme der Ozonüberschreitungshäufigkeit führt.

Tab. 7.2.5: Gitterstundenanalyse der O<sub>x</sub>-Konzentrationen für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien

	O <sub>x</sub> >80ppb	O <sub>x</sub> >90ppb	O <sub>x</sub> >100ppb	O <sub>x</sub> >110ppb	O <sub>x</sub> >120ppb
Basislauf	39,4%	26,6%	16,4%	8,8%	4,2%
Szenario 1	39,9% (+1,3%)	26,6% (0%)	16,7% (+1,8%)	9,0% (+2,3%)	4,3% (+2,4%)
Szenario 2	39,5% (+0,3%)	26,4% (-0,8%)	15,9% (-3,0%)	8,0% (-9,1%)	3,5% (-16,7%)
Szenario 4a	40,8% (+3,6%)	27,2% (+2,3%)	15,7% (-4,3%)	7,3% (-17,0%)	2,8% (-33,4%)
Szenario 4b	35,8% (-9,1%)	21,4% (-19,6%)	10,6% (-35,4%)	4,2% (-52,3%)	1,2% (-71,4%)
Szenario 6	42,9% (+8,9%)	28,5% (+7,1%)	16,1% (-1,8%)	7,0% (-20,5%)	2,4% (-42,9%)
Szenario 7	39,3% (-0,3%)	26,2% (-1,5%)	15,6% (-4,9%)	7,8% (-11,4%)	3,4% (-19,0%)
Szenario 8a	42,7% (+8,4%)	28,4% (+6,8%)	15,9% (-3,0%)	6,9% (-21,6%)	2,4% (-42,9%)
Szenario 8b	37,9% (-3,8%)	21,5% (-19,2%)	9,2% (-43,9%)	2,8% (-68,2%)	0,5% (-88,1%)
Szenario 10	25,4% (-35,5%)	13,7% (-48,5%)	6,6% (-59,8%)	2,4% (-72,7%)	0,7% (-83,3%)

Anm: Prozentuale Anzahl der Gitterstunden, in denen die angegebenen O<sub>x</sub>-Konzentrationen (O<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub>) im Untersuchungsgebiet vom 25.7. bis zum 6.8. 1994 für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien überschritten werden. Die maximal mögliche Anzahl von Gitterstunden ergibt sich aus der Anzahl der Simulationsstunden (312) multipliziert mit der Anzahl der ausgewerteten Zellen in der 1. Modellschicht (630) zu 196560 Gitterstunden (=100%). Die in Klammern gesetzten Prozentangaben bei den Szenarien geben die Änderung der entsprechenden Überschreitungshäufigkeit des Basislaufs aufgrund der Emissionsminderung des betreffenden Szenarios an. Ein getöntes Feld bedeutet, daß die Maßnahme bezogen auf den Basislauf zu einer Abnahme der O<sub>x</sub>-Überschreitungshäufigkeit führt.

Tab. 7.2.6: Gitterstundenanalyse der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien

	NO <sub>2</sub> >20ppb	NO <sub>2</sub> >30ppb	NO <sub>2</sub> >40ppb	NO <sub>2</sub> >50ppb	NO <sub>2</sub> >60ppb
Basislauf	21,9%	13,0%	8,2%	5,4%	3,7%
Szenario 1	18,5% (-15,6%)	10,5% (-19,2%)	6,4% (-22,0%)	4,1% (-24,1%)	2,8% (-24,3%)
Szenario 2	16,7% (-23,7%)	9,5% (-26,9%)	5,9% (-28,0%)	3,8% (-29,6%)	2,5% (-32,4%)
Szenario 4a	8,4% (-61,6%)	4,1% (-68,5%)	2,4% (-70,7%)	1,5% (-72,2%)	1,0% (-73,0%)
Szenario 4b	7,9% (-63,9%)	4,1% (-68,5%)	2,4% (-70,7%)	1,5% (-72,2%)	1,0% (-73,0%)
Szenario 6	2,6% (-88,1%)	0,7% (-94,6%)	0,2% (-97,6%)	0,1% (-98,1%)	0,0% (-100%)
Szenario 7	16,8% (-23,3%)	9,5% (-26,9%)	5,9% (-28,0%)	3,8% (-29,6%)	2,5% (-32,4%)
Szenario 8a	2,6% (-88,1%)	0,7% (-94,6%)	0,2% (-97,6%)	0,1% (-98,1%)	0,0% (-100%)
Szenario 8b	0,7% (-96,8%)	0,2% (-98,5%)	0,1% (-98,8%)	0,0% (-100%)	0,0% (-100%)
Szenario 10	13,9% (-36,5%)	7,5% (-42,3%)	4,5% (-45,1%)	2,8% (-48,1%)	1,8% (-51,3%)

Anm: Prozentuale Anzahl der Gitterstunden, in denen die angegebenen NO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Untersuchungsgebiet vom 25.7. bis zum 6.8. 1994 für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien überschritten werden. Die maximal mögliche Anzahl von Gitterstunden ergibt sich aus der Anzahl der Simulationsstunden (312) multipliziert mit der Anzahl der ausgewerteten Zellen in der 1. Modellschicht (630) zu 196560 Gitterstunden (=100%). Die in Klammern gesetzten Prozentangaben bei den Szenarien geben die Änderung der entsprechenden Überschreitungshäufigkeit des Basislaufs aufgrund der Emissionsminderung des betreffenden Szenarios an. Ein getöntes Feld bedeutet, daß die Maßnahme bezogen auf den Basislauf zu einer Abnahme der NO<sub>2</sub>-Überschreitungshäufigkeit führt.

### 7.2.5 Zusammenfassung und Bewertung

In diesem Kapitel wurde die Anwendung des photochemischen Ausbreitungsmodells CALGRID auf die Rhein-Main-Neckar-Region vorgestellt. Die Untersuchungen wurden vom Institut für Meteorologie an der Freien Universität Berlin durchgeführt. Mit diesem Teilvorhaben sollte einen Beitrag zur Klärung der Frage geliefert werden, wie weit lokal begrenzte Maßnahmen zur Senkung der Oxidantienkonzentrationen im Maßnahmensgebiet selbst beitragen können.

Dazu wurde mit CALGRID die Ozonverteilung in der Rhein-Main-Neckar-Region während des Zeitraums vom 22.7. 1994 bis zum 6.8. 1994 simuliert und Szenarienrechnungen zu den Auswirkungen kurzfristiger und langfristiger emissionsmindernder Maßnahmen auf die Ozonkonzentrationen durchgeführt.

Das CALGRID-Modell ist ein dreidimensionales Eulersches Gittermodell zur Simulation des Transports, der chemischen Umwandlung und Deposition reaktiver Schadstoffe im urbanen Skalenbereich. Der verwendete chemische Mechanismus ist der SAPRC-90-Mechanismus, der die Reaktionen von 40 transportierten Spezies in 129 Reaktionsgleichungen beschreibt. Kohlenwasserstoffemissionen müssen dem Modell in 9 Klassen vorgegeben werden.

Die von der Prognos AG bereitgestellten, räumlich und zeitlich hochaufgelösten Emissionsdaten der Stoffgruppen  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , CO und Kohlenwasserstoffe wurden mit einem Emissionsmanagementsystem für die Anwendung des CALGRID-Modells aufbereitet. Dieses System nimmt insbesondere eine verursachergruppenspezifische Aufteilung der nur summarisch vorliegenden Kohlenwasserstoffe in die einzelnen Klassen des SAPRC-90-Mechanismus vor. Die Erzeugung aller meteorologischen Eingangsdaten erfolgte mit dem diagnostischen meteorologischen Modell CALMET unter Verwendung aller verfügbaren meteorologischen Messungen sowie der Topographie und Orographie des Untersuchungsgebiets. Zur großräumigen Steuerung von CALMET wurden die Analyseergebnisse des großräumigen Diagnosesystems TRAMPER verwendet, das seinerseits meteorologische Felder unter Verwendung der Synopdaten und Radiosondenaufstiege erzeugt. Die immissionsseitigen Randbedingungen für alle Spezies wurden stündlich aus den europaweiten Ausbreitungsrechnungen mit dem großräumigen photochemischen Transportmodell REM3 berechnet. Diese Rechnungen basieren ebenfalls auf der SAPRC-90-Chemie, wodurch die Kompatibilität der chemischen Komponenten zwischen den beiden Skalenbereichen gewährleistet ist.

Das Modellgebiet umfaßt den gesamten Ballungsraum Rhein-Main-Neckar und reicht im Süden bis in die Region Mannheim-Ludwigshafen. Die Nord-Süd-Ausdehnung beträgt 128 km, die West-Ost-Ausdehnung 92 km, die horizontale Maschenweite 4 km. In der Vertikalen wird die Grenzschicht in 8 Schichten aufgelöst, wobei 5 Schichten unter 1000 m liegen. Die

Bodenschicht, deren Konzentrationswerte zum Vergleich mit den Beobachtungen und für die Auswertung der Szenarien benutzt werden, hat eine vertikale Ausdehnung von 20 m.

Der Vergleich der an Stationen gemessenen und für die entsprechende Gitterzelle berechneten Ozonverteilungen zeigt, daß der zeitliche Ozontrend vom Modell größtenteils gut reproduziert wird. Dies gilt auch für den im Untersuchungsgebiet an den einzelnen Tagen gemessenen horizontalen Ozongradienten. Die gemessenen Spitzenkonzentrationen, die während des betrachteten Zeitraums bis auf 150 ppb stiegen, werden vom Modell zwar erreicht, aber nicht immer am Ort der Messung.

Eine Ursache für die an einzelnen Stationen auftretenden Überschätzungen und Unterschätzungen liegt in dem Vergleich von einerseits Messungen, die nur für ein sehr kleines Gebiet bzw. den Meßpunkt repräsentativ sind, mit andererseits berechneten Konzentrationen, die den mittleren Wert eines Raumvolumens von  $4000 \times 4000 \times 20 \text{ m}^3$  darstellen. Zum anderen spiegeln die Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten Konzentrationen die unvermeidbaren Fehler in den Eingangsdaten wider.

Besonders problematisch in der Rhein-Main-Neckar-Region war die Erstellung adäquater meteorologischer Eingangsdaten, insbesondere der Windfelder, da die vorliegenden Messungen keine eindeutige Definition der dreidimensionalen Windverhältnisse erlaubten. Dies gilt insbesondere für die windschwachen Tage, wie z.B. dem 26. Juli 1994. Die für das CALGRID aus den Messungen abgeleiteten Windfelder stellen daher nur eine Realisierung aus einer Vielzahl möglicher Windfelder dar, die sich aber nicht notwendigerweise mit der an den betreffenden Tagen in der Realität aufgetretenen Windverteilung decken muß. Auch die simulierte Ozonverteilung kann sich daher nur näherungsweise mit der tatsächlichen Verteilung decken, ist aber wiederum eine der vielen möglichen Verteilungen, die bei komplexen Wetterlagen auftreten können.

Das CALGRID-Modell wurde zur Untersuchung der Auswirkungen mehrerer temporärer Maßnahmen auf die Ozonkonzentrationen eingesetzt. Bei all diesen Maßnahmen wurde angenommen, daß sie um 0 Uhr am 25. Juli 1994 in Kraft traten und über den gesamten betrachteten Zeitraum aufrecht erhalten wurden. Die Auswertung erfolgte dabei hauptsächlich für die nachmittäglichen Ozonkonzentrationen des 25. bis 27. Juli. Ebenfalls untersucht wurden die Auswirkungen des Langfrist-Szenarios "Trend 2005", das die erwartete Änderung der Vorläuferemissionen in Europa bis zum Jahre 2005 beschreibt. Die einzelnen Emissionsminderungsszenarien sowie deren emittentenspezifische Minderungsraten sind in Kap. 6 oben beschrieben.

Die temporären Szenarien "Tempolimit auf Autobahnen und außerörtlichen Straßen" (Szenario 1, siehe Kap. 6) sowie "Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw" (Szenario 2) zeigen für sich alleine nur recht geringe Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen. Die berechneten Ozonspitzenkonzentrationen sinken im Vergleich zum Basislauf um nicht mehr als 3% für

das Tempolimit und nicht mehr als 5% für das Fahrverbot. In Teilen des Modellgebiets wirken sich diese Maßnahmen gar nicht aus oder es werden leichte Zunahmen der Ozonkonzentrationen berechnet, die überwiegend aber unter 5% liegen.

Die Kombination von Tempolimit und Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw mit einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Lkw (Szenario 4a) führt zwar zu Absenkungen der berechneten Ozonspitzenwerte bis zu 15%, aber auch zu Zunahmen der Ozonkonzentrationen bis zu 30% in den Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen, wo sich die NO<sub>x</sub>-Minderung der Maßnahme besonders stark auswirkt. Dies sind i. allg. aber auch die Gebiete, in denen die berechneten Ozonkonzentrationen keine Höchstwerte aufweisen.

Kombiniert man das Szenario 4a im Untersuchungsgebiet mit einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg (Szenario 4b), lassen sich im Untersuchungsgebiet Abnahmen der Ozonspitzenkonzentrationen bis zu 20% erreichen. Die berechneten Zunahmen sind dagegen deutlich geringer als beim Szenario 4a.

Die Kombination des Szenario 4a mit einer verschärften Kontrolle der NO<sub>x</sub>-Emissionen von Industrie und Kraftwerken (Szenario 6, "Focus NO<sub>x</sub>") im Untersuchungsgebiet führt zu Abnahmen der Ozonkonzentrationen bis zu 18% und zu Zunahmen bis zu 30%. Die hohen Zunahmen sind wieder in denjenigen Gebieten zu finden, in denen sich die hohe NO<sub>x</sub>-Minderung besonders stark auswirkt.

Das als "Focus VOC" bezeichnete Szenario 7 ist die Kombination eines Fahrverbots für nicht-schadstoffarme Pkw (Szenario 2) mit einigen zusätzlichen VOC-mindernden Maßnahmen in der Industrie. Die dadurch erreichbaren Ozonabnahmen unterscheiden sich nicht wesentlich von denjenigen für das Szenario 2 und reichen ebenfalls nur bis 5%.

Die Kombination des "Focus NO<sub>x</sub>"- mit dem "Focus VOC"-Szenario beschreibt in etwa das erreichbare Minderungspotential in der Region (Szenario 8a). Die für dieses Szenario berechneten Ozonminderungen liegen aber nicht höher als bei der alleinigen Anwendung des "Focus NO<sub>x</sub>"-Szenarios.

Kombiniert man das Szenario 8a innerhalb des Untersuchungsgebiets mit einem Tempolimit für Pkw und Lkw sowie einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern (Szenario 8b), sinken die Ozonspitzenwerte im Untersuchungsgebiet bis zu 23%, die Ozonzunahmen erreichen aber immer noch 30%.

Insgesamt können sich die Überschreitungshäufigkeiten der unteren Ozonkonzentrationsbereiche durch die temporären Maßnahmen, die nahezu alle NO<sub>x</sub>-betont sind, erhöhen. Zum Teil ist dies ein Gittereffekt, der allerdings nur bei einer nicht zu realisierenden sehr feinen Auflösung des Modellgebiets zu vermeiden wäre. In den hohen Überschreitungsbereichen (O<sub>3</sub> > 120 ppb) ergeben sich, abgesehen vom Tempolimit, für alle Szenarien Abnahmen, d.h. die Auftretshäufigkeiten der hohen Ozonkonzentrationen werden durch die verschiedenen

temporären Maßnahmen gekappt. Betrachtet man die Summe aus  $O_3$  und  $NO_2$ ,  $O_x$ , erfolgt die Reduzierung der Auftrittshäufigkeiten schon für den gesamten Konzentrationsbereich größer 100 ppb.

Als einziges Langfristszenario wurde das Szenario "Trend 2005" auf seine Auswirkungen auf die Ozonkonzentration untersucht. Dieses Szenario beschreibt die bis zum Jahre 2005 in den europäischen Ländern zu erwartende Emissionsminderung, falls alle bisher eingeleiteten oder noch geplanten Maßnahmen umgesetzt werden. Die im Untersuchungsgebiet aufgrund der bundes- und europaweiten Minderung der Vorläuferemissionen berechneten Abnahmen der nachmittäglichen Ozonspitzenwerte reichen bis 30%, Ozonzunahmen treten nicht auf.

Die für die einzelnen Szenarien angesetzten Emissionsminderungen und die sich aus diesen Minderungen ergebenden maximalen positiven und negativen Ozonänderungen sind in der Tabelle 7.2.7 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Aus den Ergebnissen der Modellrechnungen für die verschiedenen Maßnahmenbündel lassen sich folgende allgemeine Schlüsse ziehen:

- die größten Abnahmen der Ozonkonzentrationen aufgrund der vorgestellten Maßnahmen lassen sich in Gebieten erzielen, in denen die  $NO_x$ -Emissionen relativ gering sind, d.h. außerhalb der Stadtgebiete. Dort werden i. allg. auch die höchsten Ozonkonzentrationen gemessen und berechnet.
- Eine  $NO_x$ -Kontrolle führt zu einem Anstieg der Ozonkonzentrationen in der näheren Umgebung von Gebieten mit hoher  $NO_x$ -Quellstärke (z.B. in den Innenstädten oder im Nahbereich großer Punktquellen). Nach den Rechnungen (und auch Messungen) treten dort aber nicht die höchsten Ozonkonzentrationen auf. Ursache der Ozonzunahmen ist die Verminderung des Titrationseffekts, d.h. des schnellen Ozonabbaus durch  $NO$ . Eine lokale  $NO_x$ -Kontrolle kann sich erst in einiger Entfernung vom Ort der Maßnahme in einer Abnahme der Ozonkonzentrationen auswirken, da dort bereits ein Teil des  $NO_x$  zu Salpetersäure oxidiert ist und der Titrationseffekt somit an Bedeutung verliert. Das verminderte  $NO_x$ -Angebot führt dann zu einer schnelleren Beendigung der photochemischen Aktivität und damit der Ozonbildung.
- Eine Vergrößerung des Maßnahmengebiets über das eigentliche Untersuchungsgebiet hinaus erhöht die Wirkung aller Maßnahmen im Untersuchungsgebiet.
- Die lokale Wirkung einer Maßnahme, d.h. die Wirkung am Ort oder in nächster Nähe der Maßnahme hängt beträchtlich von den meteorologischen Bedingungen ab. Transportarme Wettersituationen verstärken die (positive und negative) Wirkung. Bei transportbetonen Wetterlagen zeigt sich die größte Wirkung der lokalen Maßnahme unter Umständen erst in größerer Entfernung (ca. 30 bis 100 km) vom Ort der Maßnahme.

- Eine generelle Abnahme der Ozonkonzentrationen in den Stadtgebieten kann nur durch eine VOC-Kontrolle oder durch eine überregionale VOC- und NO<sub>x</sub>-Kontrolle erreicht werden.

und

- Maßnahmen wie ein temporäres Tempolimit oder ein temporäres Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw haben für sich alleine nur geringe Auswirkungen auf die Ozonkonzentration. Durch die Kombination dieser Einzelmaßnahmen und Einbeziehen der Lkw in das Fahrverbot kann aber eine deutliche Abnahme der Ozonspitzenkonzentrationen erreicht werden. In den Städten muß dabei aber mit einer Anhebung der Ozonkonzentrationen gerechnet werden. Insgesamt kommt es dadurch zu einer Nivellierung des Ozonfelds.
- Das maximale VOC-Minderungspotential der Untersuchungsregion ist deutlich geringer als das maximale NO<sub>x</sub>-Minderungspotential. Ursache ist der hohe Anteil biogen emittierter Kohlenwasserstoffe während des betrachteten Zeitraums. Will man in Ballungsgebieten eine wirksame Kontrolle der Ozonkonzentrationen durch lokale Maßnahmen erreichen, muß dazu das VOC-Minderungspotential erhöht werden, da in diesen Gebieten ein Absenken der Ozonkonzentrationen nicht über eine alleinige NO<sub>x</sub>-Kontrolle sondern nur in Verbindung mit einer sehr starken VOC-Emissionsminderung möglich ist.
- Die größten positiven Effekte im Hinblick auf eine Absenkung der Ozon-Spitzenkonzentrationen im Untersuchungsgebiet werden für die Umsetzung des langfristigen Szenarios "Trend 2005" berechnet, obwohl dieses Szenario innerhalb der Untersuchungsregion ein geringeres Minderungspotential aufweist als einige der temporären Maßnahmen. Ursache ist die bundes- und europaweite Minderung der Vorläuferemissionen, die eine Absenkung der großräumigen Hintergrundkonzentrationen bewirkt, wodurch deutlich weniger Ozon - sowie auch andere reaktive Komponenten - in das Untersuchungsgebiet einfließen als bei den temporären Maßnahmen, in denen der Hintergrund gar nicht oder, bei Einbeziehung der umliegenden Bundesländer in die Maßnahme, nur begrenzt vermindert wird. Der starke Einfluß der Hintergrundkonzentrationen ist neben der Nichtlinearität der chemischen Reaktionen auch der Hauptgrund für die bzgl. einer Emissionsminderung unterproportionale Änderung der nachmittäglichen Ozonkonzentrationen im Untersuchungsgebiet.

Insgesamt werden die in der Phase A dieser Untersuchung mit dem Modellsystem REM3 ausgeführten großräumigen Szenarienrechnungen (Stern et al., 1995) durch die kleinräumigen CALGRID-Rechnungen bestätigt. Vergleichbare Maßnahmen wie das Tempolimit und das Fahrverbot haben bei einer lokalen Umsetzung ähnliche Auswirkungen auf die Ozonspit-

zenkonzentrationen wie bei einer bundesweiten Umsetzung. Unterschiede in den Überschreitungshäufigkeiten erklären sich aus den unterschiedlichen Skalenbereichen der großräumigen und der kleinräumigen Modellanwendung.

Entsprechend der sehr viel feineren Auflösung der lokalen Anwendung sind die Ergebnisse des CALGRID-Modells für das Rhein-Main-Neckar-Gebiet sehr viel strukturierter als diejenigen des REM3 für ganz Europa, was sich insbesondere bei den NO<sub>x</sub>-betonten Minderungsszenarien bemerkbar macht. Bei fein aufgelösten Rechnungen zeigt sich, wie oben schon angeführt, daß lokale NO<sub>x</sub>-Minderungen in nächster Nähe zum Ort der Maßnahme oft zu Ozonzunahmen führen. Nach allen bisherigen Modellrechnungen wirkt sich aber im weiträumigeren Transport, also in größerer Entfernung vom Ort der Maßnahme, auch jede lokale NO<sub>x</sub>-Minderung in einer Reduktion der Ozonwerte aus. In einem kleinräumigen Modellgebiet liegt der Ort des Umschlagens von Ozonzunahmen in Ozonabnahmen bei gewissen meteorologischen Bedingungen (z.B. hohe Windgeschwindigkeiten) aber oft bereits außerhalb des Modellgebiets. Dementsprechend führt z.B. das Szenario 1 (Tempolimit), das nahezu ausschließlich aus einer Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen besteht, nach den Berechnungen mit CALGRID in der Rhein-Main-Neckar-Region im Mittel zu einer Erhöhung der Ozonüberschreitungshäufigkeiten größer 80 ppb (siehe Tab. 7.2.7) obwohl in einem Teil der Gitterzellen auch für dieses Szenario Abnahmen der nachmittäglichen Ozonspitzenwerte berechnet werden. In dem kleinen Modellgebiet ist der Anteil der Gitterzellen mit starken NO<sub>x</sub>-Emissionen aber so hoch, daß eine NO<sub>x</sub>-Minderung im Mittel über das Untersuchungsgebiet zu Zunahmen der Überschreitungshäufigkeiten führt. Bei großräumigen Modellrechnungen haben die Gebiete mit hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen nur einen geringen Anteil an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets. In einer deutschlandweiten Gitterstundenauswertung fallen daher die Zellen, in denen eventuell auch in einer großräumigen Modellanwendung Ozonzunahmen berechnet werden, kaum ins Gewicht. Dementsprechend ergeben sich nach den Berechnungen mit dem REM3 (Stern et al., 1995) für ein deutschlandweites Tempolimit im Mittel über Deutschland ausschließlich Abnahmen der Ozonüberschreitungshäufigkeiten. Auch innerhalb des Rhein-Main-Neckar-Untersuchungsgebiets treten in den REM3-Berechnungen keine Ozonzunahmen auf.

Der Vergleich der REM3- mit den CALGRID-Ergebnissen zeigt also, daß sich aus großräumigen Modellrechnungen nur bedingt Aussagen über die Auswirkungen von Maßnahmen innerhalb eines begrenzten Untersuchungsgebiets mit hohen Emissionen ableiten lassen. Hierzu sind auf jeden Fall fein auflösende Berechnungen notwendig. Dies gilt insbesondere für relativ windschwache Wetterlagen oder für Gebiete mit komplexen Strömungsverhältnissen wie sie in der hier betrachteten Rhein-Main-Neckar-Region oft angetroffen werden.

Die drei wesentlichsten Ergebnisse der im Rahmen des Aktionsprogramms und Maßnahmenplans Ozon durchgeführten klein- und großräumigen Modellrechnungen lassen sich damit folgendermaßen zusammenfassen:

- Die lokale und großräumige Wirkung von temporären und dauerhaften Maßnahmen wird durch eine Vergrößerung des Maßnahmengebiets verstärkt,
- dauerhaft umgesetzte Maßnahmen sind immer wirkungsvoller als vergleichbare temporäre Maßnahmen,
- bei einer großräumig und dauerhaft umgesetzten Maßnahme sind die zur Einhaltung von Ozongrenzwerten notwendigen Emissionsminderungen geringer als diejenigen bei einer räumlich begrenzten, temporären Maßnahme.

Tab. 7.2.7: Emissionsminderungen und maximale Auswirkungen auf die O3-Konzentrationen bei den verschiedenen Minderungsszenarien in den Modellregionen Rhein-Main-Neckar

Szenario	Emissions-Minderung	Emissions-Minderung	Emissions-Minderung	Maximale O3-Änderung in % (zugehörige Absolutänderung in ppb)
	NOX	VOC anthropogen	VOC anthropogen und biogen	
1: Regio-Tempolimit	-14%	-1,5%	-1%	-3% (160÷155) +8% (110÷119)
2: Regio-Fahrverbot für nicht schadstoffarme PKW	-26%	-37%	-27%	-5% (160÷152) +5% (110÷116)
4a: Regio-Tempolimit und Regio-Fahrverbot (Pkw+Lkw)	-53%	-45%	-32%	-15%(160÷136) +30% (94÷123)
4b: Regio-Tempolimit und REgio-Fahrverbot. Fahrverbot für nicht schadstoffarme Pkw in den Bundesländern Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg(UB)	U: -53% UB: -29%	U: -45% UB: -33%	U: -32%	-20%(160÷128) +25% (94÷117)
6: Focus Nox in der Untersuchungsregion	-74%	-46%	-33%	-18%(160÷131) +30% (90÷117)
7: Focus VOC in der Untersuchungsregion	-25%	-49%	-36%	-5% (160÷152) +5% (100÷105)
8a: Focus NOx und Focus VOC in der Untersuchungsregion	-74%	-49%	-36%	-18% (160÷131) +30% (90÷117)
8b: Focus NOx und Focus VOC in der Untersuchungsregion (U). Fahrverbot für nicht schadstoffarme Pkw in den BL Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg (UB)	U: -74% UB: -29%	U: -49% UB: -33%	U: -36%	-23% (160÷123) +30% (90÷117)
10: Trendszenario 2005 in der Untersuchungsregion, Deutschland (D), Europa (E)	U: -34% D: -30%	U: -43% D: -34%	nur intern berechnet	-30% (150÷105) Keine Ozonzunahmen

Anm.: NOx- und VOC-Reduktion im Untersuchungsgebiet Rhein-Main-Neckar (siehe Abb. 7.2-2) für die gerechneten Szenarien. Die Reduktionen beziehen sich auf die episodenspezifischen Emissionen vom 22. 7 1994 bis zum 8. 8 1994. Die VOC-Minderungen bezogen auf die Summe der anthropogenen und biogenen VOC außerhalb des Untersuchungsgebiets werden nur modellintern (REM3) berechnet. Maximale prozentuale nachmittägliche Ozonänderung (Abnahme und Zunahme) während der Episode. Die absoluten Änderungen beziehen sich auf den Ort der maximalen Änderung

## 7.3 Wirkungen von Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozonkonzentrationen in der Modellregion "Dresden "

### 7.3.1 Modellgebiet und Untersuchungszeitraum

Im Rahmen des Teilvorhabens "Ermittlung und Bewertung der Wirkungen von Ozonminderungsmaßnahmen in der Modellregion Dresden" werden die immissionsseitigen Auswirkungen von Minderungsstrategien der Emission von Vorläufersubstanzen des troposphärischen Ozons in diesem Modellgebiet untersucht. Zu diesem Zweck wurden mit dem EURAD-Modellsystem Szenarien, die auf Emissionsminderungen durch verschiedene Maßnahmen berufen, auf folgenden horizontalen Skalen simuliert:

- Der großräumigen Skala, repräsentiert durch das Nest N0 (Mitteleuropa),
- der überregionalen Skala, repräsentiert durch das Nest N1 (Neue Bundesländer und Berlin) sowie
- der regionalen Skala, repräsentiert durch das Nest N2 (Großraum Dresden).

Unter Nutzung der Nestung-Möglichkeiten des EURAD-Modellsystems (s. unten) wurde das Modelldesign gemäß der zu behandelnden Thematik wie folgt gewählt: Das sogenannte **Muttergebiet (N0)** umfaßt weite Teile Mitteleuropas (Abb. 7.3-1, oben), insbesondere die Bundesrepublik Deutschland, die Benelux-Staaten, Dänemark, den Alpenraum mit der Schweiz und Österreich, Tschechien sowie Teile von England, Frankreich, Schweden, Italien, Polen, den baltischen Staaten, der Slowakei, Ungarn und weiterer südosteuropäischer Staaten. Für dieses Gitter wurde eine Maschenweite von 27 x 27 km<sup>2</sup> definiert (Tab. 7.3.1), was bei einer Anzahl von 58 x 58 Gitterpunkten einer Ausdehnung von etwa 1566 x 1566 km<sup>2</sup> entspricht. Dieser Wert ist nicht exakt, da die gewählte Lambert-Projektion nur bei 60° Breite längentreu ist. In das Muttergitter wurden die **Nester N1** (9 x 9 km<sup>2</sup> Maschenweite mit 59 x 59 Gitterelementen, was einer Ausdehnung von ca. 531 x 531 km<sup>2</sup> entspricht) und **N2 (Untersuchungsgebiet Dresden, 3 x 3 km<sup>2</sup> Maschenweite mit 29 x 29 Gitterelementen**, was einer Ausdehnung von ca. 87 x 87 km<sup>2</sup> entspricht) gesetzt. Mit dieser Einbeziehung weiter Teile Mitteleuropas kann vor allem die Modellierung der großräumigen Wetterlage durchgeführt, sowie der Einfluß von synoptisch bedingten Einströmvorgängen belasteter Luftmassen in das Modellgebiet N 1 (N1) berücksichtigt werden. Des weiteren wird in den folgenden Kapiteln auf dieser Skala auch ein Prognose-Szenario (TREND 2005) vorgestellt, das unter Berücksichtigung europaweiter Maßnahmen zur Emissionsminderung versucht, die zukünftigen Ozonbelastungen der unteren Troposphäre vorherzusagen. Das Modellgebiet Nest 1 (N1), das vor allem die Bundesländer Sachsen, Brandenburg, Berlin, Thüringen, Sachsen-Anhalt und Teile von Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein, Hamburg, Niedersachsen, Hessen und Bayern sowie Teile von Polen und Tschechien beinhaltet (Abb. 7.3-1, Mitte), hat eine horizontale Maschenweite von 9 x 9 km<sup>2</sup>. Auf dieser Skala wurden neben der Bestimmung der Randwerte für die weitere Simulation in der nächsthöheren Modellstufe (Nest 2) auch die Auswirkung verschiedener überregionaler Emissionsminderungsszenarien simuliert. Das darin gelegene Modellgebiet Nest 2 (N2) hat eine horizontale Maschenweite von 3 x

3 km<sup>2</sup> und umfaßt vor allem den Großraum Dresden und das angrenzende südliche Brandenburg (Abb. 7.3-1, unten). Auf dieser Skala wurden neben dem großräumigen Emissions-Szenario TREND 2005 und drei verschiedenen Überregional-Szenarien auch noch vier weitere Regio-Szenarios simuliert.

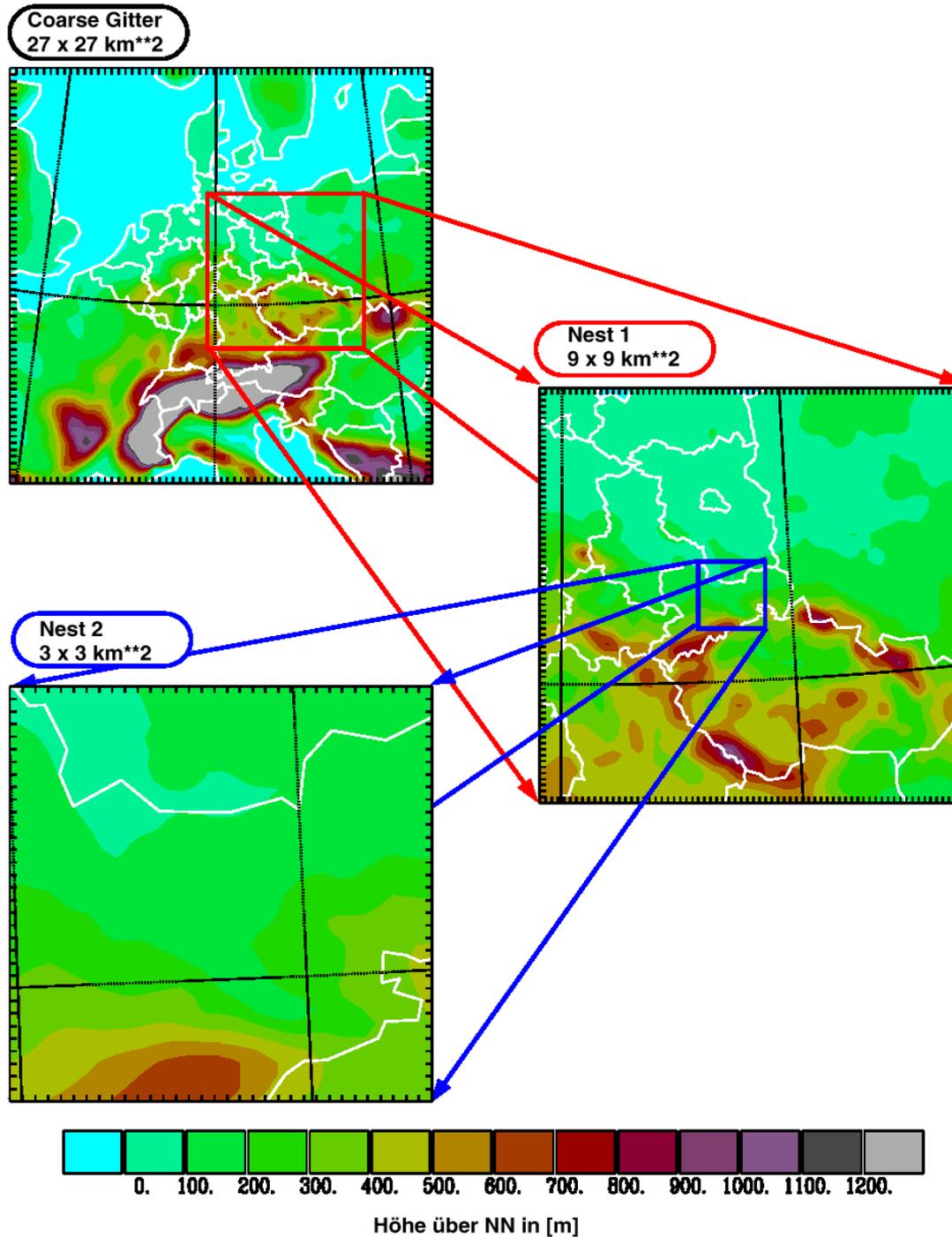
Tab. 7.3.1: Gitterkonfiguration für die verschiedenen Modellgebiete

	Nest 0	Nest 1	Nest 2
Bezeichnung	N0	N1	N2
Gebiet	Mitteleuropa	Neue Bundesl.	Großr. Dresden
Horizont. Maschenweite	27km x 27km	9km x 9km	3km x 3km
Anzahl der Gitterboxen	58 x 58	59 x 59	29 x 29
Horizont. Kantenlänge	1566 km	531 km	87 km
Vertikalauflösung (MM5)	15 Schichten	15 Schichten	15 Schichten
Vertikalauflösung (CTM2)	11 Schichten	11 Schichten	11 Schichten

In der Vertikalen umfaßt der Modellbereich die gesamte Troposphäre vom Boden (ca. 1000 hPa) bis über die Tropopause hinaus in den Bereich der unteren Stratosphäre in etwa 16 km Höhe (ca. 100 hPa). Durch diese Einbeziehung der Tropopausenregion werden auch Einmischungsvorgänge von stratosphärischer ozonreicher Luft infolge von Tropopausenfaltungen (Ebel et al., 1991) berücksichtigt. Der gesamte Höhenbereich wird unterteilt in 15 Schichten unterschiedlicher Dicke. Innerhalb der planetaren Grenzschicht (PBL), die für die hier durchgeführte Untersuchung natürlich besonders bedeutsam ist, liegen etwa 8 bis 9 Schichten je nach Grenzschichthöhe.

Sämtliche Modellsimulationen wurden für eine Sommersmogepisode im Juli/August 1994 durchgeführt für einen Zeitraum von 17 Tagen. Einschließlich des Basislaufs, der auf allen drei Modellebenen durchgeführt wurde, wurden also 16 Modellläufe durchgeführt. Der Basislauf erstreckte sich vom 23. Juli bis zum 9. August 1994 jeweils 0 UTC. Alle temporären Szenarien wurden für den Zeitraum vom 25.7. bis zum 9.8.1994 realisiert mit Ausnahme des Sommerbenzin-Szenarios, das ebenso wie der Basislauf am 23. Juli einsetzte. Das europaweite Prognose-Szenario TREND 2005 wurde ebenfalls für den gesamten Episodenzeitraum realisiert.

Abb. 7.3-1: Untersuchungsgebiet Dresden sowie die drei ineinander verschachtelten Gitter Nest O (NO) Nest 1 (N1) und Nest 2 (N2 = Untersuchungsgebiet Dresden)



Tab. 7.3.2: Durchgeführte Modellsimulationen, Bedeutung der Kürzel und Wirksamkeitszeitraum der verschiedenen Szenarien

Szenario		Nester			Kurzbeschreibung	Zeitraum
Basislauf		N0	N1	N2	Referenzlauf	21.7.94 - 9.8.94
S1	Regional-Szenario			N2	Tempolimit in der Region	25.7.94 - 9.8.94
S2	Regional-Szenario			N2	Fahrverbot Pkw in der Region	25.7.94 - 9.8.94
S4b	Überregional-Szenario		N1	N2	Kombi-Szenario Straßenverkehr Max	25.7.94 - 9.8.94
S7	Regional-Szenario			N2	Focus VOC	25.7.94 - 9.8.94
S8a	Regional-Szenario			N2	Regio-Max	25.7.94 - 9.8.94
S8b	Überregional-Szenario		N1	N2	Kombi-Szenario Max	25.7.94 - 9.8.94
S9	Überregional-Szenario		N1	N2	Kombi-Szenario Sommerbenzin	23.7.94 - 9.8.94
S10	Überregional-Szenario	N0	N1	N2	Trend 2005	23.7.94 - 9.8.94

### 7.3.2 Das EURAD-Modellsystem

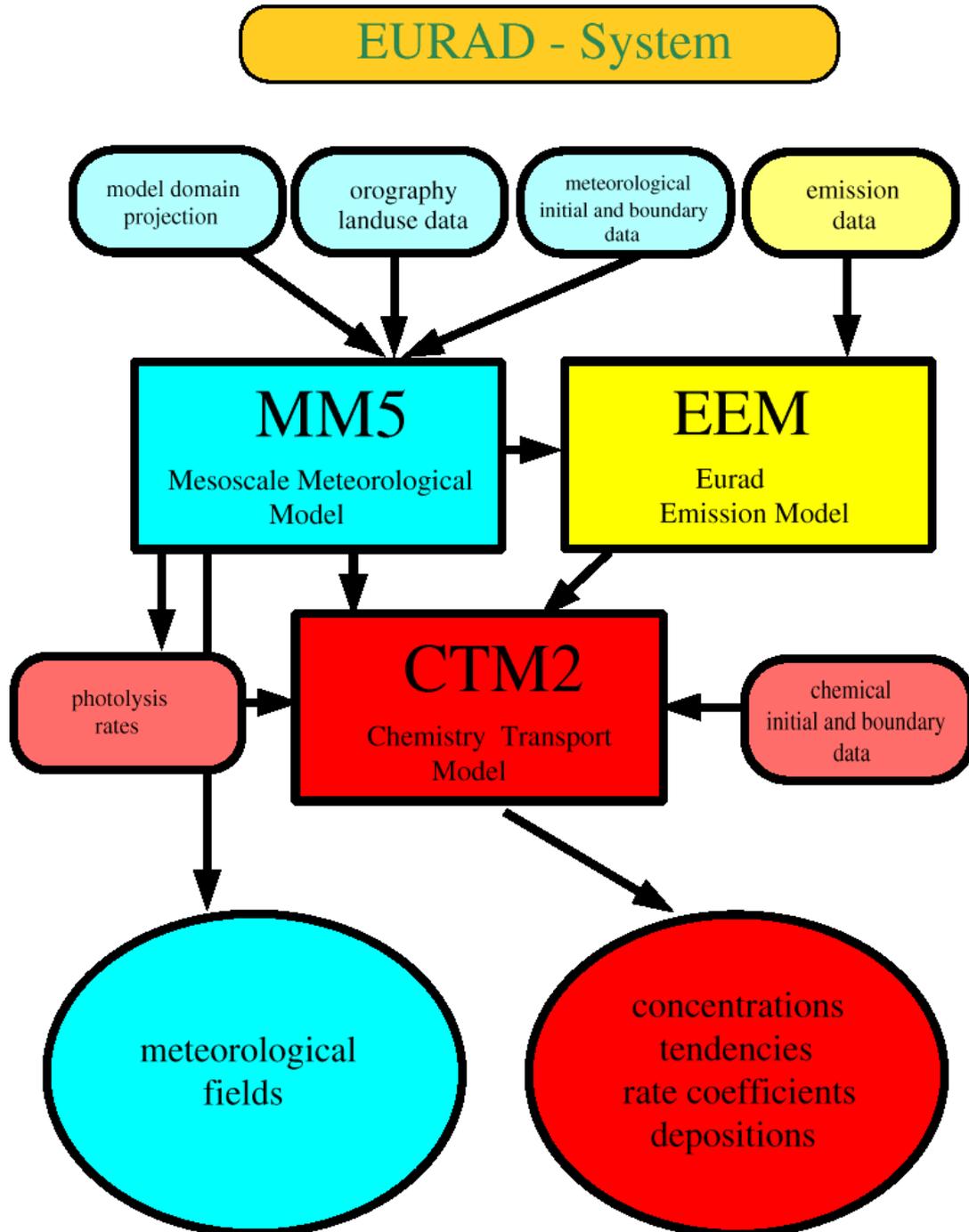
EURAD ist ein hochkomplexes Eulersches Modellsystem für die Simulation der Ausbreitung, chemischen Umsetzung und Deposition von Schadstoffen in der Atmosphäre. Der Schwerpunkt bei der Anwendung des EURAD-Systems liegt dabei auf der Behandlung episodenhafte auftretender Belastungssituationen, wie dies beispielsweise bei sommerlichen Ozonepisoden gegeben ist. Die Anwendung des Modells ist jedoch nicht auf diese Situationen begrenzt. Es kann gleichermaßen für die Berechnung winterlicher Smogepisoden (Hass et al., 1993), als begleitendes Instrument für die Dokumentaiton der Belastungssituation in den Neuen Bundesländern (Jakobs et al., 1995) oder für die Simulation der Auswirkungen des Flugverkehrs auf die Chemie der oberen Troposphäre (Ebel et al., 1994) eingesetzt werden. Das EURAD Modellsystem setzt sich aus drei Hauptbestandteilen zusammen: dem mesoskaligen meteorologischen Modell MM5 (Grell et al., 1994), dem EURAD-Emissionsmodell EEM (Memmesheimer et al., 1991; Memmesheimer et al., 1995) und dem Chemie-Transport Modell CTM2 (Hass et al., 1994; Hass et al., 1995; Hass, 1991; Chang et al., 1987). Die Struktur und der Datenfluß des Systems sind in Abb. 7.3-2 dargestellt. Das EURAD-System gestattet die Simulation mehrtägiger episodischer Szenarien über beliebigen Gebieten mit ineinander verschachtelten Sub-Gittern mit erhöhter horizontaler Auflösung (Nestung-Verfahren). Die

bisher realisierten Gitterweiten bewegen sich von 80 bis hinunter zu 2 Kilometer horizontaler Maschenweite.

Das EURAD-System ist modular aufgebaut, so daß Module für die einzelnen physikalischen und chemischen Prozesse bei Bedarf geändert und somit auf den neuesten Stand der Wissenschaft gebracht werden können. Ebenso wurde bei der Konzeption des Systems darauf geachtet, daß die horizontale und vertikale Auflösung sehr einfach dem jeweiligen Problem angepaßt werden können. Damit ergibt sich eine hohe Flexibilität des Instrumentariums für problemorientierte Anwendungen in unterschiedlichen Regionen mit verschiedenen Fragestellungen. Die numerischen Verfahren, die zur Lösung der nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen, die die komplexen chemischen und dynamischen Prozesse in der Atmosphäre beschreiben, benutzt werden, werden bei EURAD ständig weiterentwickelt. So existieren experimentelle Modellversionen, die auf Parallelrechnern mit mehr als 100 Prozessoren arbeiten (Elbern, 1995 und 1997).

Zu den detaillierten Erläuterungen des EURAD-Systems und den drei Hauptmodulen (MMT, EEM und CTM2) wird auf den gesonderten Bericht zu diesem Teilvorhaben hingewiesen.

Abb. 7.3-2: Aufbau des EURAD-Modellsystems



### 7.3.3 Basislauf

#### a) Ausgangsdaten

Der Basislauf erstreckt sich vom 21.7.1994, 0 UTC bis zum 9.8.1994, 0 UTC. Darin enthalten sind 48 Stunden Vorlaufzeit, die das Modellsystem als Einschwingzeit benötigt.

Generell unterscheidet man bei der Erstellung von episodischen Emissionsszenarien zwischen Flächen- und Punktquellen. Für die Gebiete N0 und N1 wurden die Flächenquellen für die 16 Spurenstoffklassen auf Basis der EMEP-Kataster (Co-operative Program for Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmission of Air Pollutants in Europe) erzeugt, das Jahreswerte für die Spurenstoffe  $\text{NO}_x$ , VOC und  $\text{SO}_2$  liefert. Die **Vorgehensweise** war dabei **für die Modellregionen N0 und N1** wie folgt:

1. Die angegebenen Jahreswerte werden vom EMEP-Gitter ( $150 \times 150 \text{ km}^2$ ) auf das jeweils aktuelle Gitter mit Hilfe einer modifizierten Einwohnerichtungsfunktion (siehe Bericht Memmesheimer et al., 1995, Teilvorhaben des FE-Vorhabens 104 02 812/01) transformiert.
2. Die Jahreswerte der EMEP-Kataster wurden auf die Ländersummen des CO-RINAIR-Programms für 1994 normiert. Dies gilt natürlich nur für Länder, die vollständig innerhalb des Modellgebietes liegen.
3. Für das Nest 1 wurden die Emissionen von  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  zu je 50% einwohner- und flächengewichtet aus der jeweiligen Gitterbox im Nest 0 verteilt. Für die VOC wurden diese Anteile auf 70% beziehungsweise 30% festgesetzt. Damit ergibt sich mit einer geringeren horizontalen Maschenweite im Nest 1 in urbanen Bereichen ein höheres VOC/ $\text{NO}_x$ -Verhältnis als im Nest 0.
4. Für das Nest 1 wurden diese Emissionen dann nochmals auf den Wert des Muttergebietes (N0) normiert.
5. Um eine Auffächerung in die von CTM2 benötigten Stoffgruppen zu erhalten, wurden die Gruppe der VOC-Emissionen in 10 Stoffklassen unterteilt, die Stickoxide in NO und  $\text{NO}_2$  und die Schwefeloxide in  $\text{SO}_2$  und  $\text{SO}_4$  (Memmesheimer et al., 1991, Tippke, 1992).
6. Die biogenen Emissionen wurden auf Basis der Arbeiten von Lübker und Schöpp (1989) ermittelt. Eine detailliertere Beschreibung kann den Arbeiten von Memmesheimer et al. (1991) und Lippert (1992) entnommen werden.

In einem Euler-Modell wie dem EURAD-Modellsystem werden nur mittlere Emissionsraten pro Gitterbox (Länge x Breite x Höhe) benötigt. Die Höhe der jeweiligen Gitterbox nimmt

hierbei mit wachsender Entfernung zum Erdboden zu. Unter wechselnden meteorologischen Beindungen (z.B. Tag- und Nachtregime) ändert sich für eine Punktquelle mit definierten Abgasmengen, Austrittshöhen und -temperaturen die effektive Emissionshöhe aber unter Umständen stündlich. Demzufolge wurde für die verschiedenen Punktquellen des UBA-Punktquellendatensatzes (Stern, persönliche Mitteilungen) jede Quelle folgender schrittweisen Behandlung unterzogen:

1. Stoffliche Auffächerung der 3 Emissionsgruppen ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , VOC) in die 16 CTM2-Stoffklassen. Dabei werden den verschiedenen Verursacherkategorien unterschiedliche VOC-Splits zugeordnet (Roeben, 1995).
2. Berechnung der angegebenen Zeitfunktionen, die für jede Quelle explizit Aktivitätszeiträume angeben.
3. Umrechnung des Quellortes in die jeweiligen Gitterkoordinaten im Nest 0 und Nest 1.
4. Explizite Berechnung einer Überhöhung für jede einzelne Quelle des Modellgebietes für jede der 408 Simulationsstunden in Abhängigkeit von meteorologischen Größen wie Stabilität, Temperatur und Horizontalwind sowie quellenspezifischen Größen wie Emissionsaustrittshöhe und Austrittstemperatur.

Für das **Nest 2, den Großraum Dresden**, wurden sämtliche Emissionsdaten bezüglich der Flächenquellen inklusive der biogenen Emissionen durch die Prognos AG auf einem  $2 \times 2 \text{ km}^2$  Gauß-Krüger Gitter bereitgestellt. Für die Bereitstellung der von CTM2 benötigten Datensätze wurden für die Flächenquellen folgende Modifikationen durchgeführt:

1. Stoffliche Auffächerung der 3 Emissionsgruppen ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , VOC) in die von CTM2 benötigten 16 verschiedenen emittierten Stoffklassen.
2. Räumliche Transformation von dem  $2 \times 2 \text{ km}^2$  Gauß-Krüger Gitter auf das  $3 \times 3 \text{ km}^2$  Lambert-Gitter (Ihrig, pers. Mitteilung, 1997).

Die Behandlung der Punktquellen erfolgt analog zu der für die Nester 0 und 1, allerdings mit einem für diese Simulation erstellten Punktquellendatensatz des Großraumes Dresden.

## b) Berechnete Ozonkonzentrationen im Basislauf

Während der Sommersmog-Episode Juli/August 1994 kam es zu hohen Ozonkonzentrationen im gesamten mitteleuropäischen Bereich. Da die vorliegende Studie sich vor allem auf die Beschreibung des Großraumes Dresden konzentriert, werden in diesem Abschnitt vor allem die Tage besonders berücksichtigt, an denen erhöhte Konzentrationen im Osten Deutschlands gemeldet wurden. Die Darstellungen der Simulationsergebnisse beschränken sich auf die bodennächste Modellschicht, da es aus platztechnischen Gründen nicht möglich ist, alle 11 Modellschichten hier explizit zu präsentieren.

Die Abb. 7.3-3 und 7.3-4 zeigen die berechneten Ozonkonzentrationen für die Zeitpunkte 26., 27., 28., 29., 30., 31.7. sowie den 1. und 4.8.1994 jeweils um 16 UTC. 16 UTC entspricht 18 MESZ<sup>4</sup>), zumindest die Tageszeit, an der die höchsten Ozonkonzentrationen während Akkumulationsepisoden beobachtet werden. Ausnahmen bilden hier nur urban geprägte Regionen mit einer hohen Emissionsdichte der Vorläufersubstanzen (NO<sub>x</sub>).

Für das Nest 0 wurden Vergleiche der Modellresultate mit Messungen an 10 verschiedenen UBA<sup>2</sup>-Stationen vorgenommen. Vorab sei hier explizit auf die Problematik eines solchen Vergleiches hingewiesen: Ein Eulersches Modell beschreibt nur räumlich und zeitlich gemittelte Konzentrationen, während eine Messung immer punktgenau durchgeführt wird. Bezüglich der Zeitschiene werden die Modellwerte in dieser Version immer am Ende einer Stunde herausgeschrieben, die räumliche Mittelung bezieht sich, in dem Fall des Nest 0, auf ein Volumen von 27000 x 27000 x 70 m<sup>3</sup>. Die Vergleichbarkeit mit Meßwerten ist für Stationen außerhalb des Einflußbereiches von kräftigen lokalen Emissionsspitzen angebracht, wenn diese auch eine gewisse Repräsentativität für die Umgebung besitzen. Besonders UBA-Stationen eignen sich zu diesem Zwecke, da dieses Kriterium von vielen dieser Meßstandorte erfüllt wird. Je kleiner die horizontale und vertikale Auflösung eines Euler-Modells wie das EURAD-Modellsystem ist, desto eher ist ein Vergleich Modell – Messung für urban geprägte Bereiche auch belastbar. Dann treten allerdings Probleme der räumlichen und zeitlichen Genauigkeit der Emissionsdaten als wichtige Eingabeparameter für Chemie-Transportmodelle noch weiter in den Vordergrund.

Im Nest 0 wurden 10 Stationen innerhalb der Bundesrepublik Deutschland ausgewählt, die außerhalb der höher aufgelösten Modellareale (Nest 1 und Nest 2) liegen. Der Vergleich mit diesen Meßstationen wird hier aus Platzgründen nur für die Stationen Bassum, Meinerzhagen, Deuselbach und Brotjackelriegel wiedergegeben (siehe Abb. 7.3-7).

---

<sup>4</sup> Mitteleuropäische Sommerzeit

Abb. 7.3-3: Ozonkonzentrationen (in ppbV) in der bodennahen Modellschicht im Nest O (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 28.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 29.Juli 1994, 16 UTC.

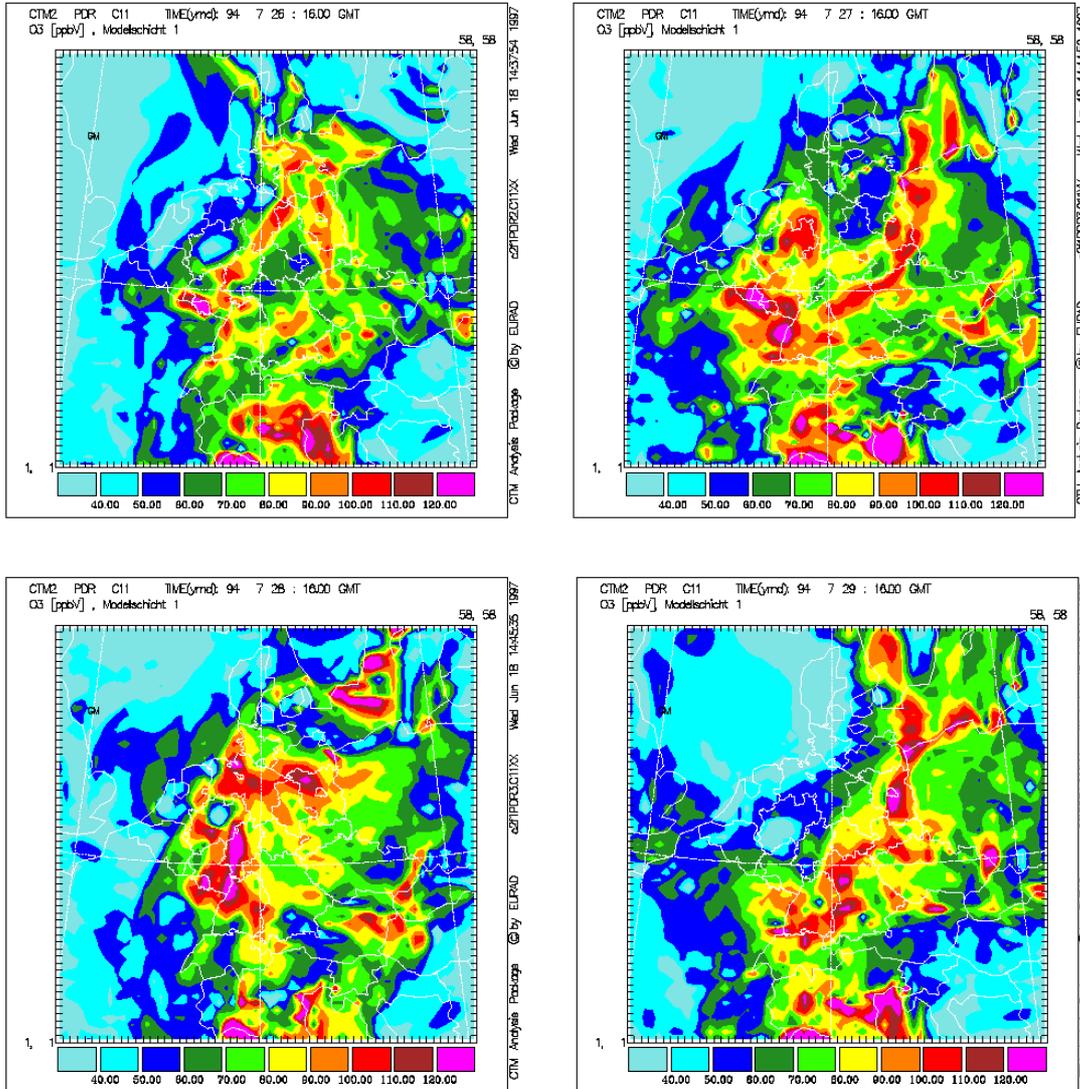


Abb. 7.3-4: Ozonkonzentrationen (in ppbV) in der bodennahen Modellschicht im Nest O (0-70m). Oben links: 30.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 31.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 1. Aug. 1994, 16 UTC, unten rechts: 2. Aug. 1994, 16 UTC.

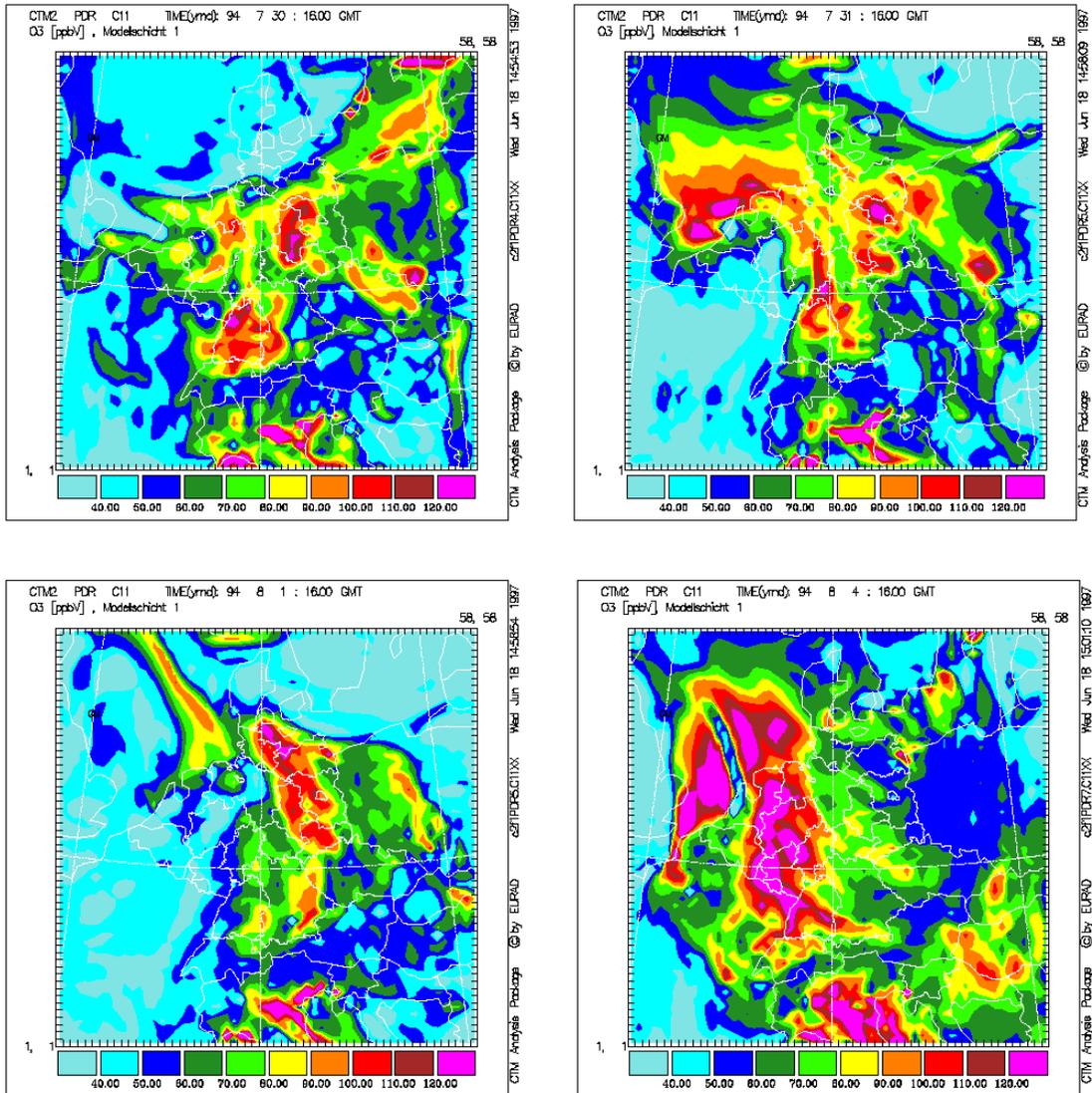


Abb. 7.3-5: Ozonkonzentrationen (in ppbV) in der bodennahen Modellschicht im Nest 1 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 28.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 29.Juli 1994, 16 UTC.

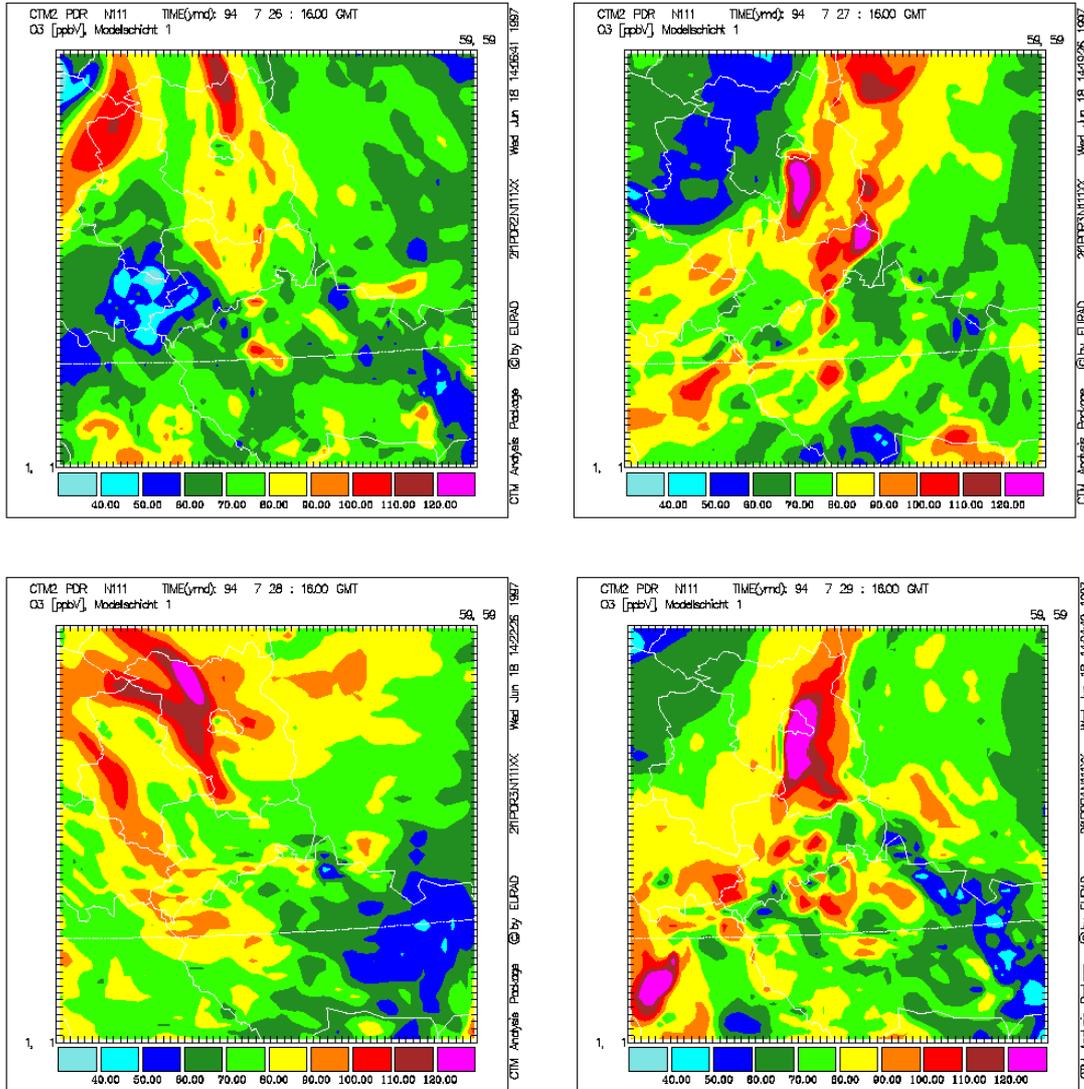


Abb. 7.3-6: Ozonkonzentrationen (in ppbV) in der bodennahen Modellschicht im Nest O (0-70m). Links: 31.Juli 1994, 16 UTC, rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC.

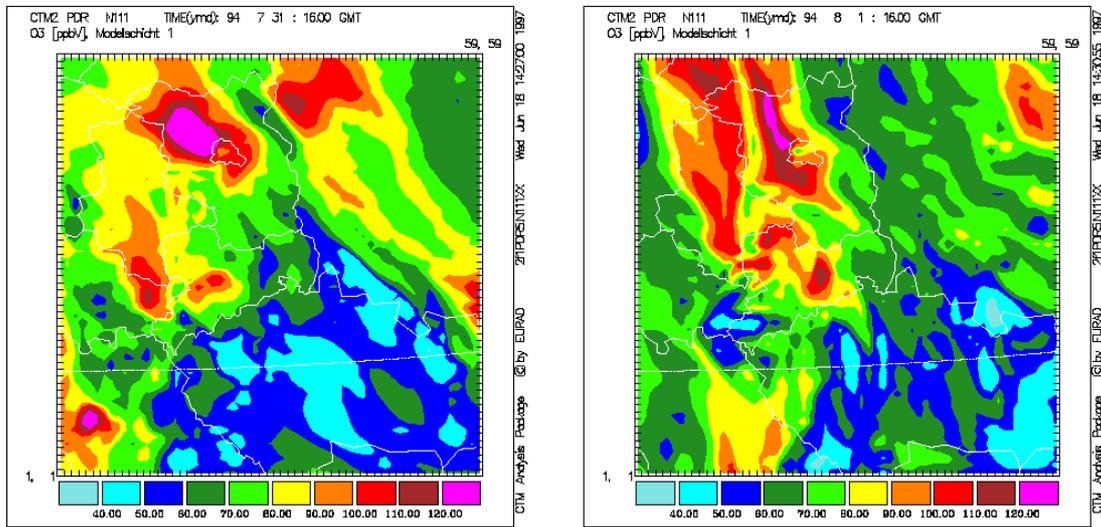
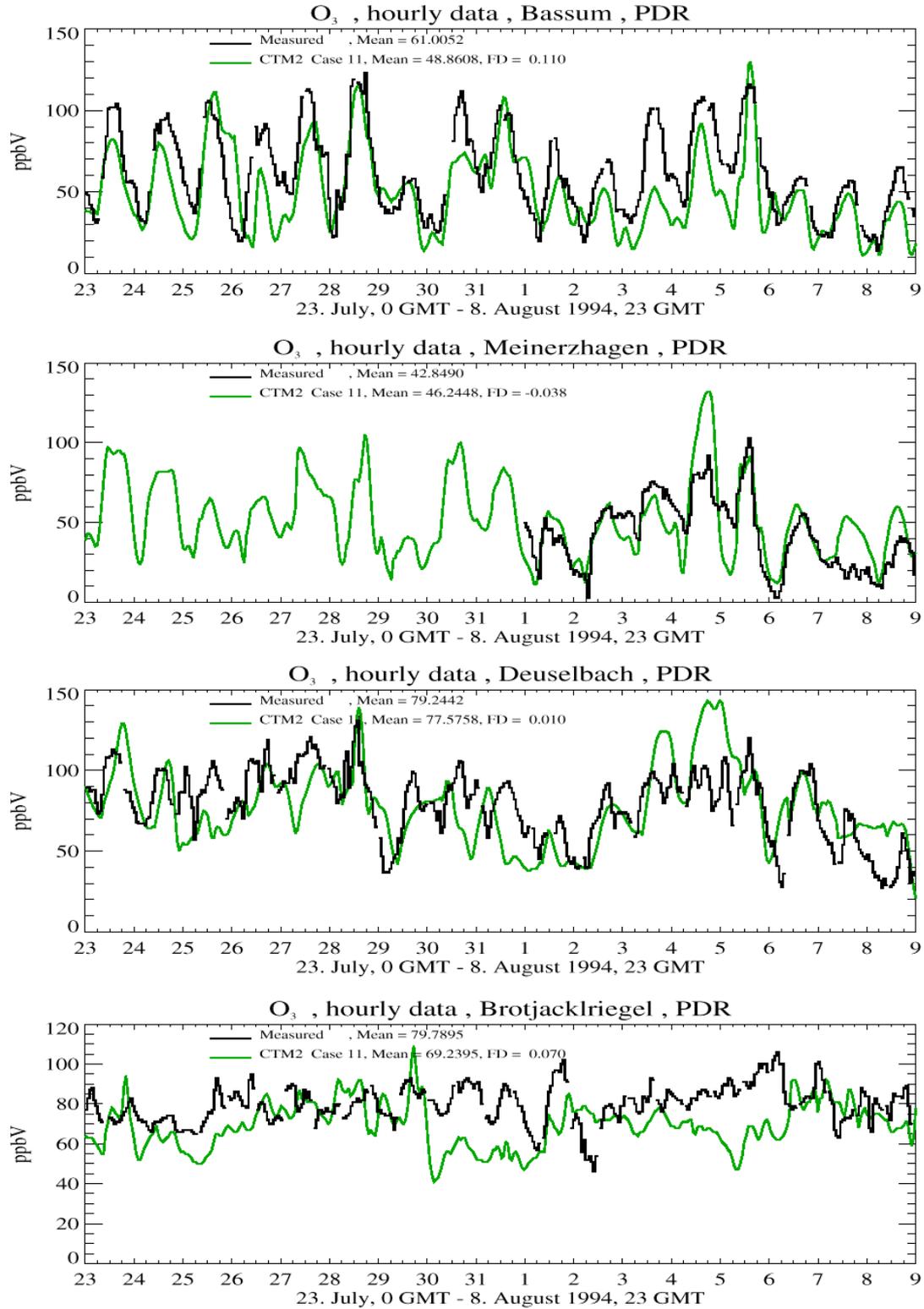


Abb. 7.3-7: Vergleich "Messung - Modellsimulation" für Ozon im Nest O für die Stationen Bassum, Meinerzhagen, Deuselbach und Brotjacklriegel



Die Nestung-Möglichkeiten des EURAD-Modellsystems werden bei der Berechnung von Umwandlung und Transport von chemischen Spurenstoffen durch ein Verfahren der Ein-Weg-Nestung realisiert. Das bedeutet, daß zum Beispiel die Randwerte für das Nest 1 aus den Nest 0 Simulationen gewonnen werden. Großräumige Effekte, die zum Beispiel den Transport einer Abgasfahne in das Modellgebiet mit höherer horizontaler Gitterweite nach sich ziehen, können somit erfaßt werden.

Die hier dargestellten Ozonkonzentrationen im Nest 1 umfassen die während dieser Episode für die N1-Region besonders stark ozonbelasteten Tage, den 26., 27., 28., 29. und 31.7. und den 1.8.1994, jeweils um 16 UTC (Abb. 7.3-5 und 7.3-6). Die Schadstoffverteilung in den unteren Atmosphärenschichten dieser Region, die vor allem die neuen Bundesländer sowie Teile von Polen und Tschechien umfaßt, ist dominiert durch den Großraum Berlin. Am 26.7.1994, 16 UTC (Abb. 7.3-5, oben rechts), ist der Zeitpunkt der Simulation herausgegriffen, der die Winddrehung im Großraum Berlin von südöstlichen Richtungen (10 UTC desselben Tages, nicht abgebildet) auf südliche Richtungen aufzeigt. Während dieser kurzen Zeitspanne drehte sich die Ozonfahne Berlins in der Modellsimulation auf einer Länge von etwa 150 km aus einer Südost-Nordwest-Achse vollständig auf eine Nord-Süd-Achse. Dieser Vorgang drückt sich auch in den Modellergebnissen aus, in Form von stark erhöhten Ozonkonzentrationen der Station Neuglobsow im Norden von Berlin (Ahier nicht gezeigt, siehe den gesonderten Bericht). Im Grenzbereich von Niedersachsen zu Sachsen-Anhalt werden für diesen Zeitraum ebenfalls hohe Ozonwerte von über 100 ppbV simuliert. Diese stammen aus Randwerten des Nest 0, das für diesen Zeitpunkt höhere Werte für die Lüneburger Heide vorhersagt. Diese schadstoffbelastete Luft wird mit südwestlichen Winden in das Nest 1 hereintransportiert. Im Laufe der Nacht zum 27.7.1994 dreht der Wind im Großraum Berlin auf nördliche Richtungen. Am frühen Morgen bilden sich in der Simulation im Nest 1 zwei Gebiete mit erhöhten Ozonkonzentrationen aus. Zum einen ist dies die südlich ausgerichtete Abgasfahne von Berlin sowie ein Bereich in der Niederlausitz. Gegen Nachmittag entwickelt sich im Grenzbereich von Sachsen, Brandenburg und Polen eine weitere Region mit Ozonkonzentrationen von über 120 ppbV. Die nach Südwesten abdrehende Fahne dieses Maximums ist deutlich in Abb. 7.3-5 (oben rechts), die die Ozonverteilung am 27.7.1994, 16 UTC, darstellt, zu erkennen. Sowohl die aus dem Berliner Großraum als auch die aus der Region des "schwarzen Dreiecks" stammenden Ozonkonzentrationen erreichen das Modellgebiet Nest 2 und resultieren dort in einer Belastung der unteren planetaren Grenzschicht. Am nächsten Tag, dem 28.7.1994, hat sich der Wind nun innerhalb der vorangegangenen 48 Stunden um 360 Grad gedreht. In der Abb. 7.3-5 (unten links) zeigt sich ein Areal hoher Ozonkonzentrationen nordwestlich von Berlin mit Werten von über 120 ppbV. Der nördlichere Teil dieser Doppelfahne hat seinen Ursprung in Berlin während der westlichere Teil in der Region Magdeburg-Dessau entsteht.

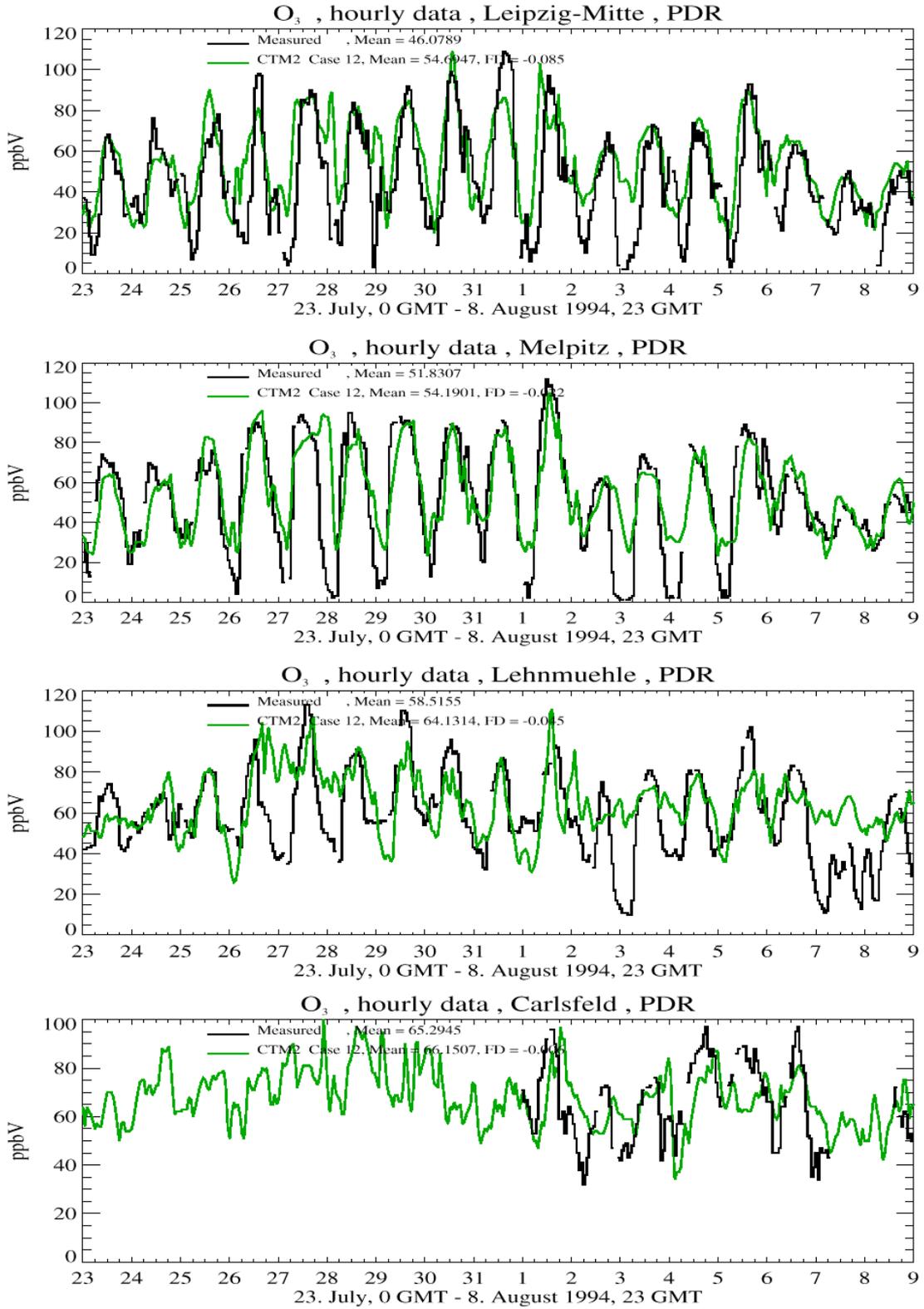
Der 29.7.1994 ist gekennzeichnet durch schwache Winde in den untersten Luftschichten im Großraum Berlin. Dementsprechend prägt sich die Schadgasfahne Berlins sehr stark aus mit Ozonkonzentrationen von lokal bis zu 200 ppbV. Gerade diese windschwachen Wetterlagen, bei denen lokalen Quellen eine erhöhte Bedeutung zukommt, erschweren eine adäquate

Simulation der tatsächlichen Gegebenheiten auf einem doch recht groben 9x9 km<sup>2</sup>-Gitter. Eine weitere Region mit sehr hohen Ozonkonzentrationen ist im Bereich von Nürnberg zu erkennen sowie in kleineren Bereichen in Sachsen und Tschechien mit Werten von wenig über 100 ppbV. Auf die Darstellung des 30.7.1994 wurde verzichtet, da äußerst ähnliche Ozonverteilungen am darauffolgenden Tage auftraten. Diese sind für den 31.7.1994, 16 UTC, in Abb. 7.3-6 (links) dargestellt. Ozonkonzentrationen von über 100 ppbV treten im Bereich Sachsen, Sachsen-Anhalt und dem westlichen Polen auf. In Tschechien hingegen treten, im Gegensatz zu den vorangegangenen Tagen, recht niedrige Werte auf. Nach dem 1.8.1994 kommt es, im Rahmen der Modellsimulation für das Nest 1, nur noch sehr selten zu Ozonkonzentrationen von über 100 ppbV. Aus diesen Gründen wird auf eine Darstellung der Ozonverteilungen während dieses Zeitraums verzichtet. Dominierend, wie es für diese Modellregion typisch ist, ist wiederum der Großraum Berlin. Wie auch schon in der Simulation im Nest 0 löst sich zu diesem Zeitpunkt die Fahne von Berlin ab und wird in nordwestlicher Richtung transportiert. Im Gegensatz zu den Ergebnissen auf dem 27x27 km<sup>2</sup>-Gitter verweilen die Ozonkonzentrationen auf dem Weg in Richtung Hamburg erheblich länger bei höheren Werten. Daraus resultierend löst sich die Fahne im Nest 1 erst gegen 4 UTC des darauffolgenden Tages auf, mithin 2 Stunden später als im Nest 0. Der 1. August 1994, 16 UTC, zeigt neben der Ozonfahne Berlins auch ein Band hoher Ozonkonzentrationen von Sachsen bis hinauf nach Mecklenburg-Vorpommern mit Werten von über 90 ppbV.

Im Nest 1 wird der Vergleich der Modellergebnisse des Basislaufes mit Meßergebnissen für die bodennahen Ozonkonzentrationen für 20 Stationen vorgenommen. Die Einschränkungen, die bei einem solchen Vergleich berücksichtigt werden müssen, sind oben schon diskutiert worden. Allerdings wird das betrachtete Volumenmittel der Modellwerte um den Faktor 9 verringert, nämlich auf 9000x9000x70 m<sup>3</sup>. Dies zieht natürlich eine entsprechend höhere Repräsentativität der Modellwerte mit sich. Ebenso wie in der Betrachtung des Vergleichs Modell-Messung im Nest 0, wird im Nest 1 kein Vergleich mit Stationen durchgeführt, die im Nest 2 liegen (s. hierzu weiter unten).

Der Vergleich ergibt bis auf wenige Ausnahmen generell eine gute bis sehr gute Übereinstimmung der Modell- mit den Meßergebnissen. Dies ist um so bemerkenswerter, da es sich bei vielen der betrachteten Stationen um urban geprägte Stationen handelt, also nicht notwendigerweise um Stationen außerhalb von lokalen, stark variierenden Emissionsquellen. Aufgrund der großen Zahl von Meßstationen werden hier nicht alle vorgestellt sondern lediglich diejenigen in Abb. 7.3-8.

Abb. 7.3-8: Vergleich "Messung - Modellsimulation" für Ozon im Nest 1 für die Stationen Leipzig-Mitte, Melpitz, Lehmühle und Carlsfeld



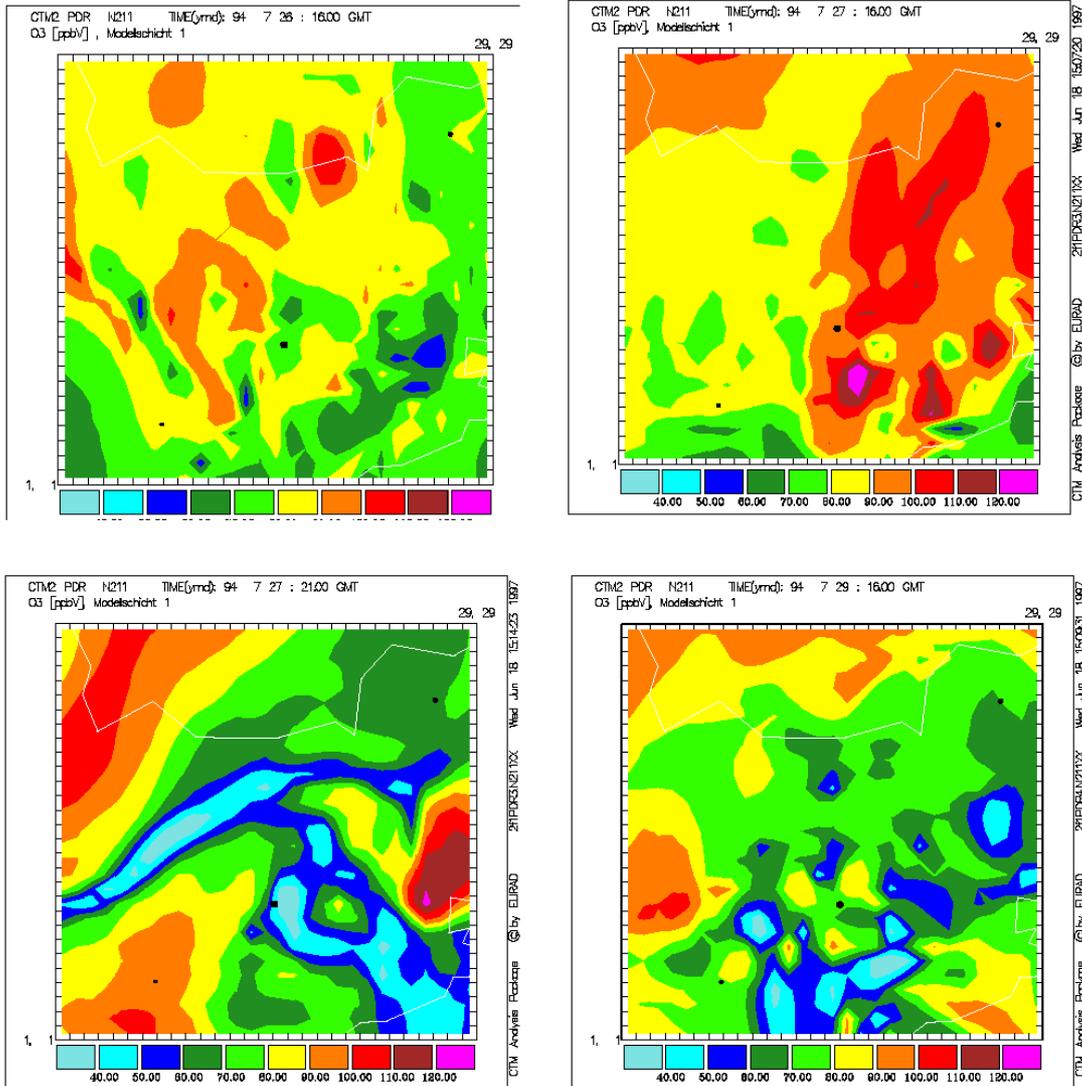
## Ozonkonzentrationen

Wie auch im Nest 1 wird bei der Berechnung der Ausbreitung und der chemischen Umwandlung im Nest 2 die Verbindung zu den Nestern mit größerer horizontaler Maschenweite durch ein Ein-Weg-Nestung-Verfahren realisiert. Die Anfangswerte der 1. Episode wie auch die Randwerte für sämtliche Simulationsstunden im Nest 2 werden aus den im Nest 1 resultierenden Konzentrationen genommen. Weiträumige Transporte starker Schadgaskonzentrationen werden somit innerhalb aller Nester berücksichtigt. Dies ist insbesondere von großer Bedeutung, da durch die recht geringe horizontale Ausdehnung dieser Region (90x90 km<sup>2</sup>) die Konzentrationen sämtlicher Spurenstoffe stark durch Einströmvorgänge durch den Rand des Areals beeinflusst sind. Bei einer angenommenen Windgeschwindigkeit von 10 m/s würde die gesamte Region innerhalb von nur 2½ Stunden durchströmt.

Die in diesem Abschnitt dargestellten Ozonkonzentrationen umfassen vor allem die Tage, an denen es zu hohen Belastungen innerhalb der Modellregion N2 kam. Wie auch in den vorangehenden Kapiteln, ist hier ausschließlich die bodennächste Modellschicht dargestellt. Während in der Simulation des Zeitraums vom 23. bis zum 25. Juli 1994, verbunden mit einem Regime südöstlicher Winde, keine Ozonkonzentrationen von über 100 ppbV auftreten, so werden am 26.7. Abbildung 7.3-9 (links oben) Ozonkonzentrationen von über 100 ppbV prognostiziert. Betroffen ist um 16 UTC vor allem ein Bereich nördlich von Dresden.

Am 27. Juli (Abb. 7.3-9, oben rechts) wird ein vorläufiger Höhepunkt der maximalen Ozonkonzentrationen für diese Region erreicht, mit einer stark lokal begrenzten Überschreitung von 120 ppbV in der Umgebung Dresden. Dies spiegelt sich auch mit Werten von über 100 ppbV in den Meßwerten wider. Nördlich davon kann man einen großen Bereich erhöhter Ozonkonzentrationen erkennen, der seinen Ursprung in der Region des "schwarzen Dreiecks" beziehungsweise dem westlichen Polen hat. Im weiteren Verlauf des Tages kommt es noch zu einem Einströmvorgang stark vorbelasteter Luftmassen aus dem Großraum Berlin im Nordwesten der Region N2 (siehe auch Abschn. 7.1.2).

Abb. 7.3-9: Ozonkonzentrationen (in ppbV) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 28.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 29.Juli 1994, 16 UTC. Die Punkte bezeichnen die Lage der Städte Freiberg, Dresden und Hoyerswerda.



Um einmal Abbaumechanismen für Ozon im Modell zu veranschaulichen, ist in Abbildung 7.3-9 (unten links) der 27. Juli um 21 UTC dargestellt. Man erkennt deutlich, daß die geringsten Ozonkonzentrationen im Bereich der Hauptverkehrsadern, der Autobahn A4 und der Region des Elbtales prognostiziert werden. Relativ zur Umgebung werden hier die höchsten  $\text{NO}_x$ -Emissionen emittiert, was zu einem raschen Abbau von Ozon während der Nachtstunden führt. Durch Transporteffekte kommt es im weiteren Verlauf der Simulation zu einer entsprechenden Verwirbelung dieser Strukturen.

Am 28. Juli (nicht dargestellt) traten ebenfalls Ozonkonzentrationen von über 100 ppbV auf, allerdings nur im südlichen Bereich von Brandenburg am Rande der Modellregion N2.

Am 29. Juli 1994 (Abb. 7.3-9, unten rechts) treten Ozonkonzentrationen von über 100 ppbV nur in der Gegend von Freiberg auf, dem westlichen Teil der Region N2. Im Großraum Dresden werden in der Simulation zu diesem Zeitpunkt nur Werte von bis zu 90 ppbV erreicht, deutlich weniger als die an den Stationen Dresden-Postplatz, Pirna und Radebeul-Wahnsdorf (siehe auch Abb. 7.3-11) gemessenen 120 ppbV. Die Verteilung der Ozonkonzentrationen weist ausgeprägte "Löcher" auf, vor allem in den Bereichen mit prognostizierten schwachen Windgeschwindigkeiten. In der zeitlichen Entwicklung treten Veränderungen gegenüber den Vortagen mit ebenfalls frühmorgendlicher Anströmrichtung aus Südosten erst gegen 14 UTC auf. Infolge der schon erwähnten geringen Windgeschwindigkeiten prägen sich in der Modellsimulation im Großraum Dresden Regionen mit signifikant geringeren Ozonkonzentrationen als im Umland aus. Diese Ergebnisse weichen von den Ergebnissen der Nest 1 Modellregion ab, die zu diesem Zeitpunkt deutlich höhere Werte vorhersagen. Dies liegt an der erhöhten Sensitivität des Modells bei niedrigen Windgeschwindigkeiten bei auch nur leicht geänderten VOC/NOX-Verhältnissen. Zu diesen kommt es, da für das Nest 1 eine Kombination aus dem Punktquellendatensatz des Umweltbundesamtes und der aufgrund einer modifizierten Wohnverteilung berechneten EMEP-Flächenquellen verwendet wird. Für das Nest 2 aber kommt der räumlich höher aufgelöste Emissionsdatensatz der Prognos AG zur Anwendung. Die damit einhergehenden räumlichen und zeitlichen Unterschiede des VOC/NOX-Verhältnisses sind daher evident und ursächlich für die Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen der Modellgebiete N1 und N2 an diesem Tag verantwortlich.

Abb. 7.3-10: Lage der Meßstationen im Nest 2

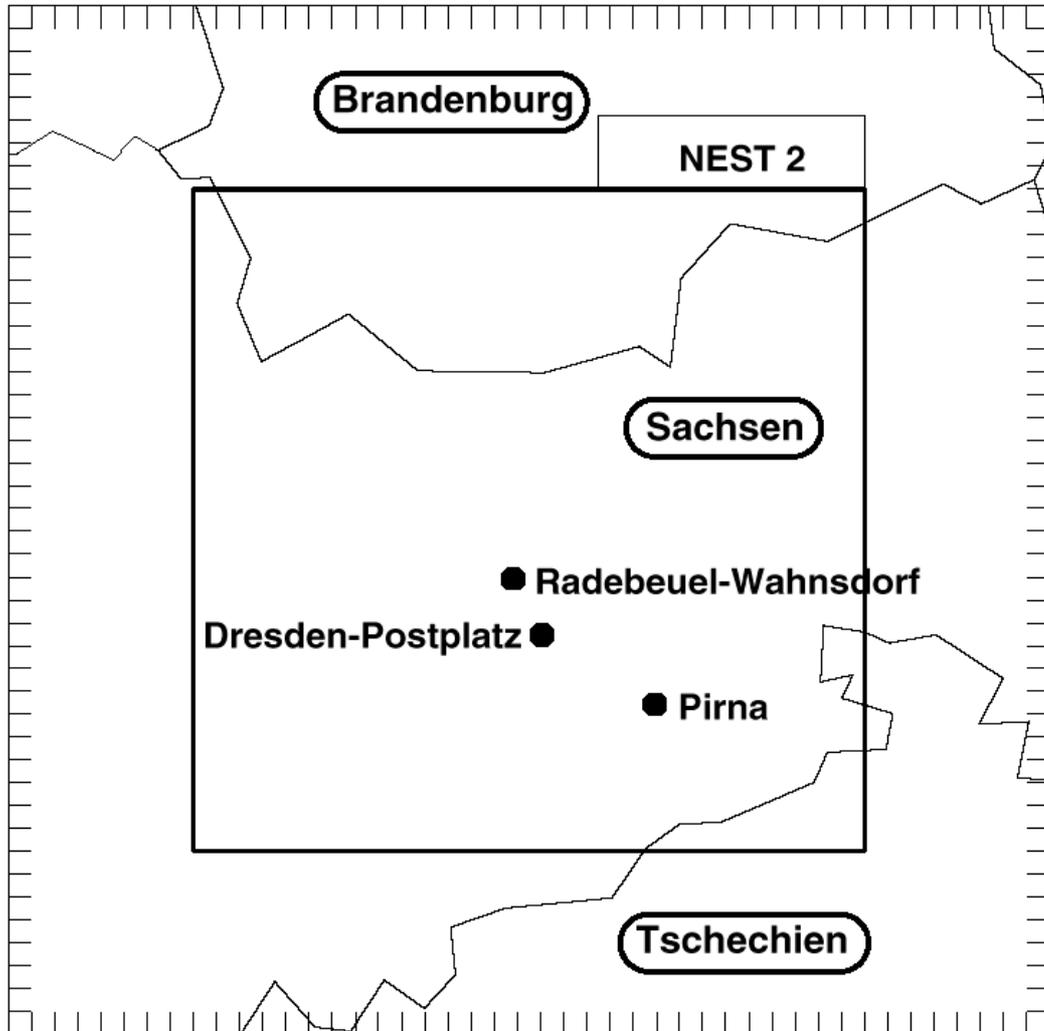
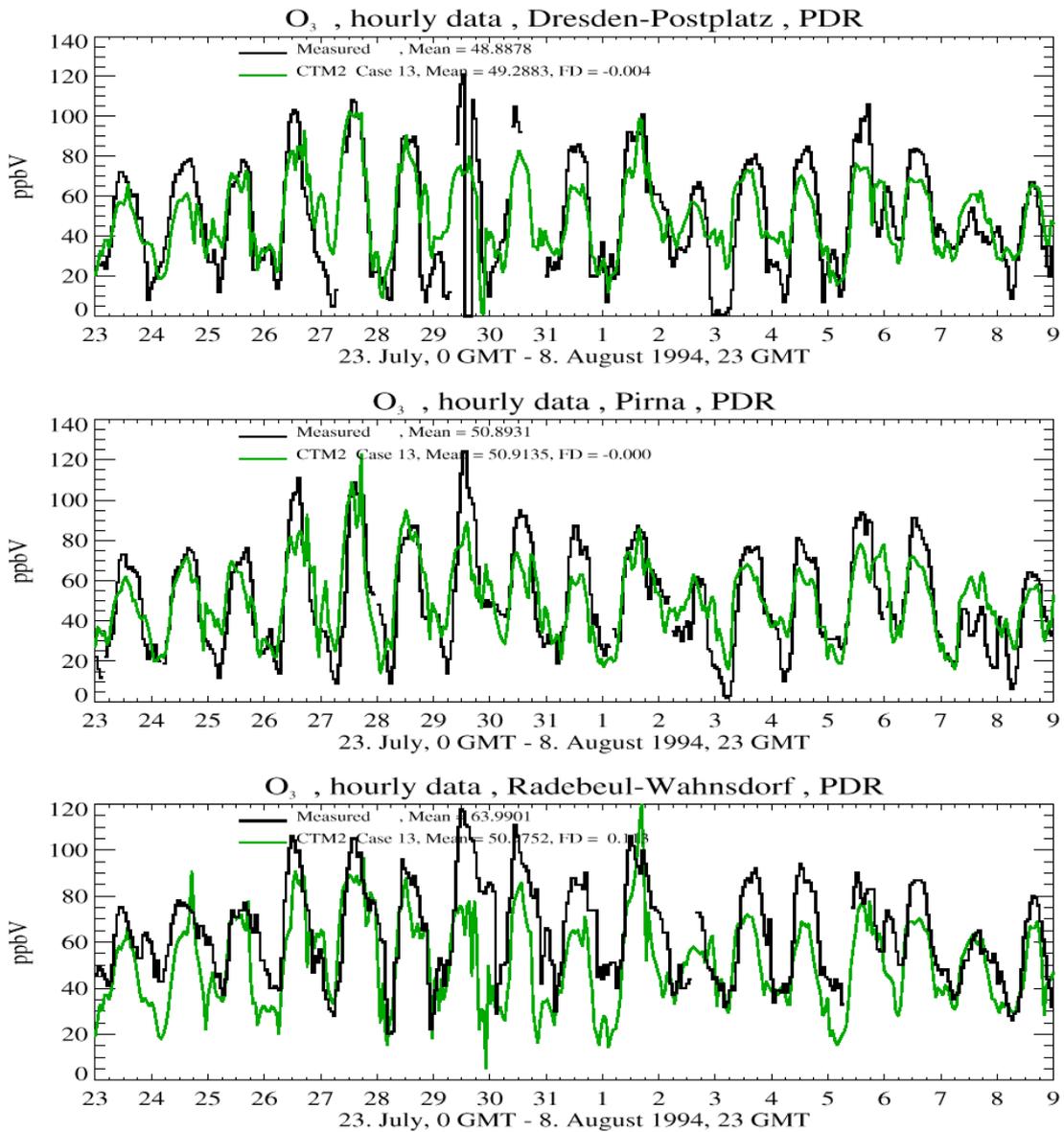


Abb. 7.3-11: Vergleich "Messung - Modellsimulation" für Ozon im Nest 2 für die Stationen Dresden-Postplatz, Pirna und Radebeul-Wahnsdorf



Für den Vergleich von Modellergebnissen mit Messungen werden im Modellgebiet N2 Messungen von 3 Stationen verwendet. Die Lage der Meßstationen im Nest 2 ist in Abb 7.3-10 dargestellt.

Für alle drei Meßstationen (Dresden-Postplatz, Pirna und Radebeul-Wahnsdorf) zeigt sich eine Akkumulation der Ozonkonzentrationen vom 23. bis zum 27. Juli bis zu Werten von über 100 ppbV (Abb. 7.3-11). Diese Entwicklung, ebenso wie der leichte Rückgang der Werte von 28. Juli, spiegelt sich in der Simulation sehr gut wider. Zum 29. Juli hin erreichen die Meßwerte das absolute Maximum dieser Episode an allen 3 Meßstationen. Dies ist natürlich auch Ausdruck der recht geringen Abstände zwischen den einzelnen Meßpunkten. In der Modellsimulation ergeben sich für diesen Tag Ozonkonzentrationen von 80 (Radebeul-Wahnsdorf), 83 (Dresden-Postplatz) und 90 ppbV (Pirna). Demgegenüber stehen Meßwerte von 120 ppbV. Die Abweichung zwischen Modell und Messung erklärt sich aus folgenden sehr komplexen und voneinander abhängigen Gründen:

- Auf die geringen Windgeschwindigkeiten wie sie in den Tagesstunden des 29. Julis auftreten, reagiert das Modell äußerst sensitiv. Durch die Verringerung der Bedeutung des Transportterms in der zu jedem Zeitschritt numerisch gelösten Modellgleichung gewinnen andere Teile dieser Gleichung relativ an Bedeutung.
- Eine große Bedeutung kommt dem Term der Modellgleichung zu, der die trockene Deposition beschreibt. Diese hängt stark vom jeweiligen Landnutzungstyp ab. Die Parametrisierung der trockenen Deposition ist mit großen Unsicherheiten behaftet.
- Ein weiterer wichtiger Term in der numerisch gelösten Modellgleichung ist der Quellterm, der die Emissionen beschreibt. Geringe zeitliche und räumliche Änderungen des VOC/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses können zu größeren Unterschieden in den resultierenden Ozonkonzentrationen führen.

An den weiteren Tagen der Simulation ergibt sich für die Stationen Dresden-Postplatz und Radebeul-Wahnsdorf ein Anstiege der beobachteten Ozonkonzentrationen sowie eine leichte Abnahme der gemessenen Ozonkonzentrationen für die Station Pirna zum 1. August hin. Dieser Trend wird durch die Modellsimulation erfaßt. Ein erneuter Anstieg von geringeren Werten zu einem lokalen Ozonmaximum hin ergibt sich für die Stationen Dresden-Postplatz und Pirna bis zum 5. August. Dies gilt gleichermaßen für Modell und Messung.

### 7.3.4 Ergebnisse der Simulationsrechnungen für verschiedene Emissionsminderungsszenarien

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der verschiedenen Maßnahme-Szenarien (siehe oben) auf die Ozonkonzentrationen der bodennächsten Modellschicht vorgestellt und untersucht. Die Abhandlung der einzelnen Maßnahmen richtet sich nach der Größe der betrachteten Region. Abschnitt 7.3.4.1 beschreibt die überregionalen Maßnahmen S4b, S8b und S9, während Abschnitt 7.3.4.2 die regionalen Maßnahmen S1, S2, S3, S7, S8a und S9 sowie die Auswirkungen der überregionalen Maßnahmen S4b, S8b und S9 im Nest 2 behandelt. Hierbei handelt es sich nur um Szenarien, die für die Modellgebiete Nest 1 und Nest 2 realisiert wurden. Der Szenarienlauf TREND 2005 wird in Abschnitt 7.3.4.3 gesondert abgehandelt.

#### 7.3.4.1 Überregionale Maßnahmen (N1) – Bereich Bundesrepublik Deutschland, Polen und Tschechien

Die überregionalen Maßnahmen im Nest 1 betreffen das engere Untersuchungsgebiet Dresden sowie den Bereich der angrenzenden Bundesländer Brandenburg (inkl. Gebiet Berlin), Sachsen-Anhalt, Thüringen und einen kleinen Streifen von Nordbayern. Es handelt sich folglich nur um Gitterpunkte, die in der Bundesrepublik Deutschland liegen und in der näheren Umgebung der detailliert betrachteten Modellregion N2. Die umliegenden Staaten Polen und Tschechien sowie auch die weiter entfernten Bereiche der angrenzenden Bundesländer sind nur insoweit durch die Maßnahmen betroffen als daß grenzüberschreitender Transport des aufgrund der verschiedenen Emissionsszenarien veränderten Schadstoffgemisches stattfindet. Allerdings sind die Emissionen dieser Anrainerstaaten mitentscheidend für die Entwicklung der Schadgaskonzentrationen in der betrachteten Modellregion, da es über lange Zeiträume der betrachteten Episode häufig zu Einströmvorgängen aus diesen Regionen kommt. Die Darstellung der Ozonkonzentrationen ist, wie auch schon beim Basislauf, auf den 26., 27. und 29. Juli sowie den 1. August beschränkt.

Für das Szenario S4b, das die Auswirkung einer maximal möglichen Minderung der Straßenverkehrsemissionen in einem Kombi-Szenario für die Gebiete N1 und N2 simuliert, sind die relativen Änderungen der Ozonkonzentrationen für die bodennächste Modellschicht im Nest 1 in Abb. 7.3-12 dargestellt. Die Darstellungen beschränken sich auf die Tage, jeweils um 16 UTC (18 MESZ), an denen die höchsten Ozonkonzentrationen auftreten.

Am 26. Juli, an dem die maximalen Ozonkonzentrationen in der Abluffahrt von Berlin sowie im Norden Sachsen-Anhalts prognostiziert werden, ergeben sich vor allem für die Region nördlich von Berlin die größten Abnahmen von 5 bis 7,5% (Abb. 7.3-12, oben links). Hier sind für den Basisfall Werte von weit über 100 ppbV berechnet worden. Desweiteren ergeben sich generell leichte bis mittlere Abnahmen der Ozonkonzentrationen von 0.5 bis zu 5% für fast den gesamten deutschen Teil des Nest 1, für den die emissionsmindernden Maßnahmen realisiert wurden. Verschwindend geringe Veränderungen ergeben sich für die angrenzenden

Regionen Polens, Tschechiens und Bayerns, für die keine emissionsmindernde Maßnahmen angenommen wurden. Im unmittelbaren Bereich von Berlin kommt es an diesem Tag um 16 UTC zu Zunahmen der Ozonwerte von unter 5%. In Absolutwerten ändern sich hier die Ozonkonzentrationen nicht erheblich, da zu diesem Zeitpunkt relativ geringe Ozonwerte von 60 bis 80 ppbV in Berlin prognostiziert werden (siehe auch Abb. 7.3-5). Im weiteren Verlauf der Simulation ergeben sich immer wieder maximale Veränderungen vor allem für den Großraum Berlin, aber auch in der näheren Umgebung von größeren Städten. Es läßt sich jedoch andererseits gut erkennen, daß Luftmassen mit hohen Ozonkonzentrationen in die Region transportiert werden, in der emissionsmindernde Maßnahmen angenommen wurden. So werden beispielsweise die hohen Ozonwerte von über 100 ppbV im Nordwesten Sachsen-Anhalts durch die emissionsmindernden Maßnahmen nicht beeinflusst.

Für den 27. Juli, 16 UTC, werden großflächige Abnahmen für weite Teile der Region N1 berechnet (Abb. 7.3-12, oben rechts). Dies zeigt sich auch in zunehmendem Maße in Gebieten, die nicht direkt durch Emissionsminderungsmaßnahmen betroffen sind. Dieser Trend verstärkt sich mit zunehmender Simulationsdauer, ist aber aufgrund der Begrenzung der Modellregion N1 nicht an allen Tagen in den in diesem Bericht abgebildeten Momentaufnahmen der Konzentrationen des bodennahen Ozons erkennbar. Hervorgehoben sind wiederum Abnahmen von 7,5 bis 10% im Bereich der Abluffahne Berlins. Diese dreht sich im Verlauf der vorangegangenen Nacht vom 26. auf den 27. Juli von Norden nach Süden. Im Grenzbe- reich zwischen Sachsen und Polen, wo an diesem Zeitpunkt ebenfalls Werte von über 120 ppbV für den Basislauf prognostiziert werden, sind die Abnahmen deutlich geringer. Sie bewegen sich zwischen 0,5 und 2,5%.

Am 29. Juli, dem Tag mit zumeist geringen Windgeschwindigkeiten in zentralen Bereichen des Nest 1, zeigen sich Reduktionen der Ozonkonzentrationen im Großraum Berlin von 7,5 bis 10% (Abb. 7.3-12, unten links). Dies ist um so bemerkenswerter, da an diesem Tag für die nähere Umgebung von Berlin Konzentrationen von über 120 ppbV gemessen und simuliert werden.

Für den 1. August (Abb. 7.3-12, unten rechts) ergibt sich fast dasselbe Bild wie am 26. Juli. Stärkere Abnahmen ergeben sich wieder für den Bereich der nach Norden gerichteten Abluffahne Berlins und Zunahmen auf der Basis von Ozonkonzentrationen von etwa 80 ppbV für den unmittelbaren Stadtbereich Berlins. Darüber hinaus ergeben sich noch leichte Zu- nahmen für die Umgebungen von Schwedt, Braunschweig und Erfurt. Die relativ hohen Ozonkonzentrationen in Sachsen-Anhalt und Sachsen werden jedoch in einem weit geringeren Maß durch die Emissionsminderungen beeinflusst als diejenigen im Bereich der Berliner Abluffahne. Dies deutet wieder darauf hin, das Ozon, das außerhalb der "Szenario-Region" produziert wurde, in dieses Gebiet gelangt.

Für das Szenario 8b, das die Auswirkung einer maximal möglichen Emissionsreduktion in einem Kombi-Szenario für die Nester N1 und N2 simuliert, sind die relativen Änderungen der Ozonkonzentrationen für die bodennächste Modellschicht für dieselben Zeitpunkte dargestellt

(Abb. 7.3-13). Im Vergleich zum Szenario S4b, erkennt man nur wenige strukturelle Unterschiede an allen dargestellten Tagen. Allerdings sind die Flächen gleicher Reduktion der Ozonkonzentrationen in der bodennächsten Modellschicht größer als für das Szenario S4b. Dies gilt in zunehmendem Maße für längere Wirksamkeitszeiträume. Stärkere Reduktionen der bodennahen Ozonkonzentrationen als für das Szenario S4b werden für den 27. Juli, 16 UTC (Abb. 7.3-13, oben rechts) vor allem für das Bundesland Sachsen vorhergesagt. Insbesondere der durch Transportvorgänge aus der Region des "schwarzen Dreiecks" beeinflusste Bereich zeigt höhere Abnahmen der Ozonkonzentrationen als für das Szenario S4b. Dies ist vor allem auf die Einbeziehung von Punktquellen in das Minderungsszenario S8b zurückzuführen. Darüber hinaus weiten sich vor allem die Regionen stärkerer relativer Abnahmen von über 5% (blaue Flächen) besonders für die Tage ab dem 29. Juli zum Teil erheblich aus. Vor allem die Orte, die noch von den extrem hohen Ozonkonzentrationen der Abluffahne Berlins erfaßt werden, können spürbare Minderungen verzeichnen. Die urban geprägten Bereiche, für die Zunahmen der Ozonwerte berechnet werden, erfahren zumeist nur eine geringe flächenmäßige Vergrößerung.

Die Ergebnisse des Szenarios S9, das die Maßnahme Sommerbenzin beschreibt, zeigt im Vergleich zu den vorangegangenen Maßnahmen nur geringe Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen (Abb. 7.3-14). Hier treten nur geringe Ab- oder Zunahmen in stark begrenzten Bereichen auf. Hauptreduktionsbereich ist wiederum die Abgasfahne von Berlin. Die relativen Abnahmen bewegen sich im Bereich zwischen 0,5 und 2,5% und erreichen nur am 29. Juli innerhalb der Stadtgrenzen Berlins kurz den Wertebereich 2,5 bis 5% (Abb. 7.3-14, unten links). Geringfügige Zunahmen wiederum in Berlin werden für den 1. August, 16 UTC (Abb. 7.3-14, unten rechts), prognostiziert. Ebenso wie in den vorher diskutierten Szenarien sind vor allem Bereiche durch Reduktionen betroffen, für die im Basislauf Ozonkonzentrationen von über 80 ppbV im Maximum prognostiziert wurden.

Abb. 7.3-12: **Szenario S-4b:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 1 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 30.Juli 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt.

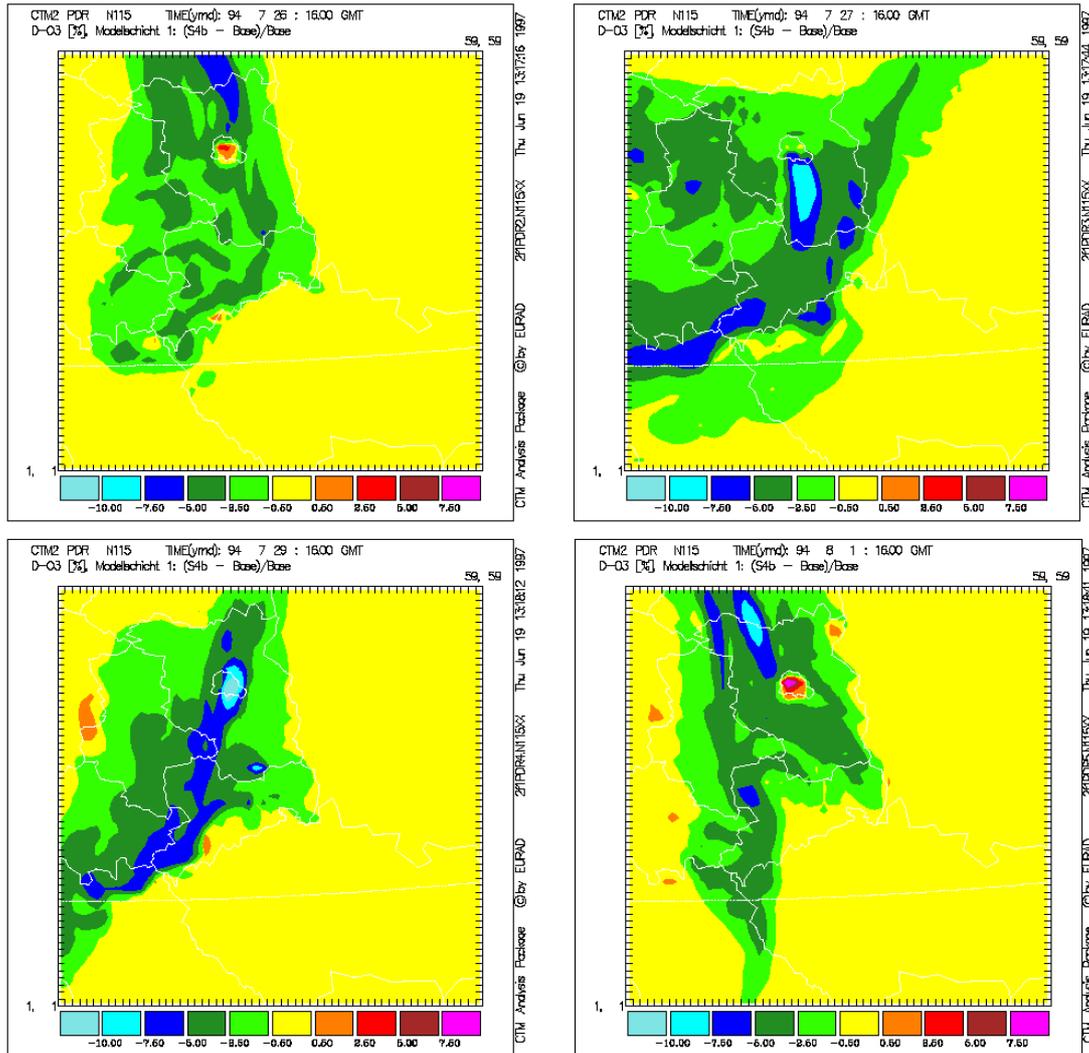


Abb. 7.3-13: **Szenario S-8b:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 1 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 30.Juli 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt.

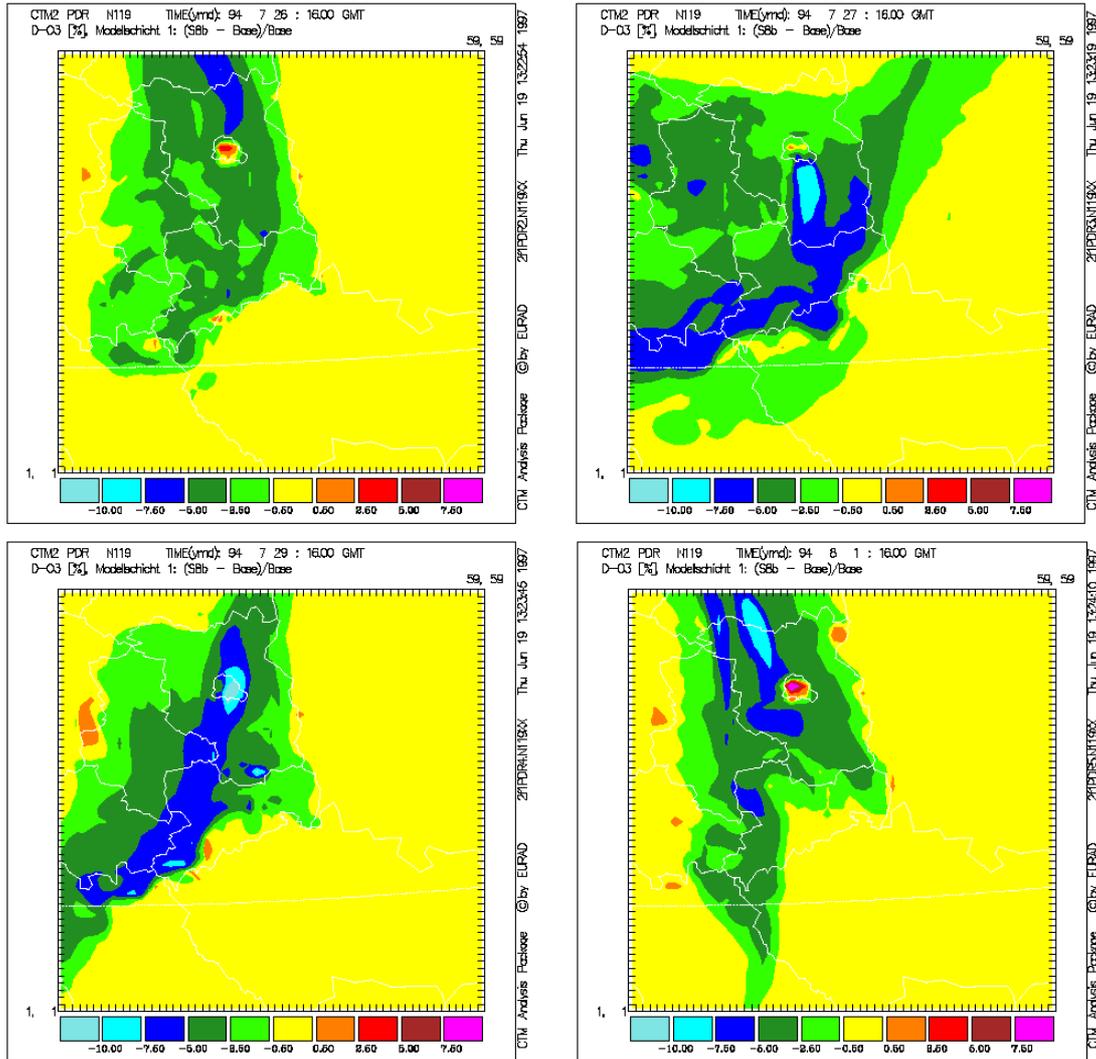
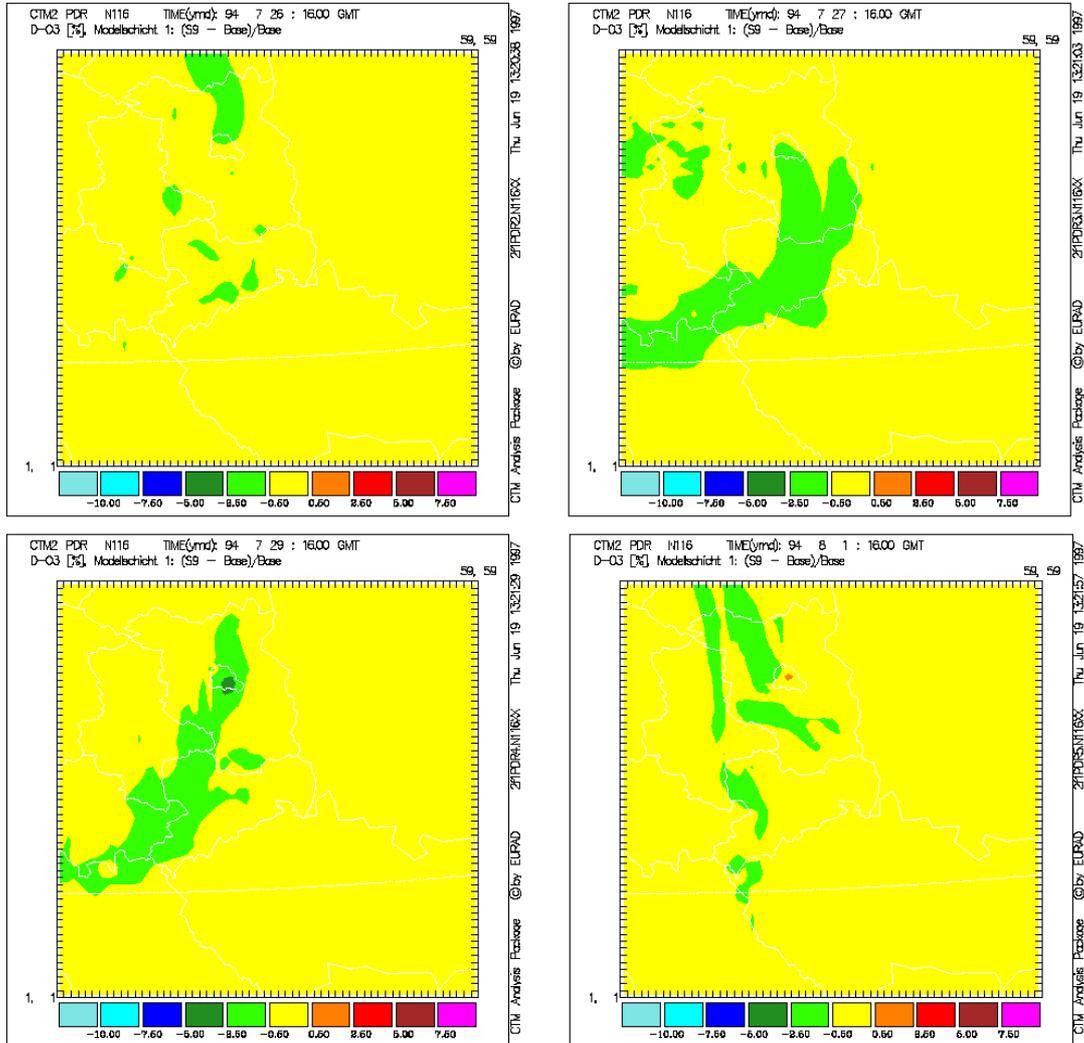


Abb. 7.3-14: **Szenario S-9:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 1 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 30.Juli 1994, 16 UTC.



#### 7.3.4.2 Regionale Maßnahmen (N2) – Bereich Sachsen und Brandenburg

In diesem Abschnitt werden sowohl Auswirkungen von Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozonkonzentrationen in der bodennächsten Modellschicht vorgestellt, deren Wirksamkeitsgebiete das Nest 1 und das Nest 2 als auch solche, die nur den Bereich des Nestes 2 alleine umfassen. Für die Szenarien S4b, S8b und S9, die auch für das Nest 1 realisiert wurden, werden bei der Simulation zusätzlich zu den Emissionsreduktionen im Nest 2 Einstromvorgänge aus dem Nest 1 mit den zuvor prognostizierten Schadstoffkonzentrationen aus den jeweiligen Szenarienzläufen in der Region N1 berücksichtigt. Somit werden überregional durchgeführte Maßnahmen speziell auch für den Großraum Dresden miteinbezogen. Die Szenarien S1, S2, S7 und S8a beschreiben nur für das Nest 2 realisierte Maßnahmen. Die Randwerte der Schadgaskonzentrationen werden nur dem zugrundeliegenden Referenzlauf entnommen. - Die emissionsseitigen regionalen Maßnahmen im Nest 2 beschränken sich auf den deutschen Teil der Modellregion.

Für das **Szenario S1**, das ein Tempolimit in der Region Nest 2 beschreibt, ergeben sich für die Zeitpunkte 26., 27. und 29. Juli und 1. August jeweils 16 UTC, die in Abb. 7.3-15 dargestellten relativen Änderungen der Ozonkonzentrationen. Generell ergeben sich aus der Modellsimulation nur geringe relative Änderungen der Ozonkonzentrationen gegenüber dem Referenzlauf. Es werden für alle Tage lediglich Abnahmen von 0,5 bis 2,5% prognostiziert.

Für das **Szenario S2**, das ein Fahrverbot für Pkw beschreibt, ergeben sich die in Abb. 7.3-16 dargestellten relativen Änderungen der Ozonkonzentrationen im Vergleich zum Referenzlauf. Im Vergleich zu den Ergebnissen des Szenarios S1 weiten sich die Effekte nun sowohl in positiver als auch in negativer Hinsicht aus. Die Regionen, in denen Abnahmen der Ozonkonzentrationen im Bezug zum Referenzlauf auftreten, vergrößern sich ebenso wie die Regionen, die für das Szenario S1 leichte Zunahmen verzeichneten. Dasselbe gilt auch für die Stärke der Abnahmen. Hier werden für den 27. und den 29. Juli (Abb. 7.3-16, oben rechts und unten links) Bereiche mit Abnahmen von 2,5 bis 5% ausgewiesen. Hierbei handelt es sich jeweils um die Regionen mit den für diesen Zeitpunkt höchsten prognostizierten Ozonkonzentrationen, von über 100 ppbV. Die Bereiche der Zunahmen beschränken sich, wie schon im Falle des Szenarios S1, auf den Großraum Dresden. Der 1. August wird dominiert durch südliche Winde und somit vor allem durch hochbelastete Luftmassen, die aus Tschechien stammen. Somit sind Effekte von Emissionsminderungsmaßnahmen im Nest 2 nur in geringem Umfang erkennbar.

Für das **Szenario S4b**, das das Kombi-Szenario Straßenverkehr MAX umfaßt, sind die Ergebnisse der Simulationsrechnungen in der Abb. 7.3-17 dargestellt. Wie schon vorher erläutert, fließen in diese Simulation auch die Resultate des Szenarios S4b im Nest 1 als Randwerte mit ein. Im Gegensatz zu den Regionalszenarien S1 und S2 werden für dieses Kombi-Szenario Veränderungen der Ozonkonzentrationen in einem viel durchgreifenderen Maße prognostiziert. Am 26. Juli, 16 UTC (Abb. 7.3-17, oben links), ergibt sich aus der Simulation fast überall eine Abnahme der Ozonkonzentrationen mit Werten an die 7,5%. Be-

troffen sind allerdings nicht die Regionen nördlich von Dresden, für die im Basislauf die höchsten Ozonwerte vorhergesagt wurden. 24 Stunden später (Abb. 7.3-17, oben rechts) ergeben sich aus der Simulation relative Abnahmen in den Ozonkonzentrationen von über 5% für weite Teile der Modellregion. In einigen Bereichen werden sogar Werte von fast 10% erreicht. Betroffen sind vor allem Bereiche mit Ozonkonzentrationen von über 80 ppbV im Basislauf. Diese Abnahme der Ozonkonzentrationen im Vergleich zum Basislauf sind damit auch deutlich höher als in den Rechnungen für das N1-Gebiet, bei der relativ hohe Ozonabnahmen von mehr als 7,5% nur in der Abluffahne Berlins im südwestlichen Brandenburg auftraten. Am 29. Juli, dem Tag mit den kritisch geringen Windgeschwindigkeiten, ergeben sich, wie auch schon in den Simulationen S1 und S2, größere Zunahmen in zentralen Modellbereichen von über 7,5% (Abb. 7.3-17, unten links). Dies hat seine Ursache vor allem in der schon vorab diskutierten starken Sensitivität des Modellsystems an Tagen mit geringen prognostizierten Windgeschwindigkeiten. Desweiteren spielt das Einströmen von gegenüber dem Basislauf unveränderten Spurenstoffgemischen aus den Regionen Tschechiens eine wichtige Rolle. Diese Bereiche sind als in gelb dargestellte Regionen mit geringen Änderungen gegenüber dem Referenzlauf im Süden des Modellgebietes zu erkennen. Am 1. August hat die Geschwindigkeit des Windes aus südlichen Richtungen zugenommen, was zu einer weiteren Reduzierung der Effekte in Bezug auf die Ozonkonzentrationen führt. Besonders an diesem Tage wirkt sich die emissionsmindernde Maßnahme teilweise erst außerhalb des N2-Gebietes aus.

Das **Szenario S7**, das eine Maßnahme mit dem Schwerpunkt auf der Minderung von VOC-Emissionen beschreibt, ist mit seinen Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen in Abb. 7.3-18 dargestellt. Gegenüber dem Szenario S2 werden hier noch zusätzliche Minderungsmaßnahmen für die Sektoren gewerbliche Lösungsmittelanwendung und Prozesse, die Produktanwendungen der Haushalte sowie den gesamten Off-Road Bereich berücksichtigt. Die damit verbundene leichte Verschiebung des VOC/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses in Richtung NO<sub>x</sub> führt jedoch zu keinen wesentlichen Veränderungen der Resultate im Vergleich zum Szenario S2.

Die **Szenarien S8a und S8b** beschreiben beide das maximal mögliche Emissionsreduktionsszenario. Betroffen sind zusätzlich zu den Emissionen des Verkehrs auch die Punktquellen und industriellen Emissionen. S8a simuliert den Fall, für den sich die Maßnahmen nur auf das Nest 2 beschränken, S8b hingegen bezieht die Region N1 mit ein und berücksichtigt zusätzlich als Randwerte die Modellresultate des Szenarios S8b im Nest 1. Die resultierenden relativen Änderungen der Ozonkonzentrationen für das Szenario S8a sind in Abb. 7.3-19 dargestellt. Die Resultate dieses Szenarios zeigen im Vergleich zu den Szenarien S7 und S2 eine viel stärkere Auswirkung auf die Ozonkonzentrationen. Sowohl die Bereiche die Abnahmen gegenüber dem Basislauf verzeichnen als auch die Regionen, die eine Zunahme prognostizieren, erreichen Werte von relativen Veränderungen von über -10% und +7,5%. Interessanterweise sind die Regionen mit den höchsten Ozonkonzentrationen im Basislauf, insbesondere am 29. Juli, besonders von starken Abnahmen betroffen (Abb. 7.3-19, unten links). Allerdings werden an diesem Tag auch die höchsten Zunahmen für den Großraum

Dresden prognostiziert. Mit dem Wechsel der Anströmrichtung nach Süden am 1. August (Abb. 7.3-19, unten rechts) verringern sich die Auswirkungen deutlich.

Die relativen Veränderungen, die sich aus der Simulation des Szenarienlaufes S8b ergeben, sind in Abb. 7.3-20 dargestellt. Natürlich treten hier vor allem an den Tagen Veränderungen gegenüber den Resultaten aus dem Szenario S8a auf, an denen es zu Transporteffekten aus den umliegenden Regionen kam, insbesondere den westlichen und nördlichen Regionen, in denen auch für das Nest 1 emissionsmindernde Maßnahmen berücksichtigt wurden. Dies sind vor allem der 26. und der 27. Juli (Abb. 7.3-20, oben). Hier vergrößern sich die Areale, für die Abnahmen vorhergesagt werden, im Vergleich zum Szenario S8a, zum Teil deutlich. Die leichten Zunahmen, die für kleine Bereiche des Nest 2 für das Szenario S8a prognostiziert werden, verringern sich an allen dargestellten Tagen an fast allen Punkten. Insbesondere gilt dies am 26. Juli für den westlichen und dem 27. Juli für den östlichen Rand des N2-Gebietes. Dort wird in Szenario S8a eine Ozonzunahme berechnet, während es im Szenario S8b zu einer Abnahme der Ozonkonzentrationen kommt. Ganz besonders deutlich sind die Auswirkungen von zusätzlichen emissionsmindernden Maßnahmen im N1-Gebiet auf die Ozonkonzentrationen im N2-Gebiet am 27. Juli (S8a, Abb. 7.3-19, oben rechts und S8b, Abb. 7.3-20, oben rechts) zu erkennen. An diesem Tag kommt es bei nördlichen Winden verstärkt zu einem Transport von Luftmassen aus dem Großraum Berlin/Brandenburg in die Region Dresden. An Tagen abflauerer Winde (29.7.1994) und an Tagen mit kräftigen Einströmungen aus dem nördlichen Tschechien (1.8.1994) sind die Veränderungen gegenüber dem Szenario S8a gering, wie zum Beispiel am 29. Juli und zum Teil sogar unerheblich wie am 1. August.

Die Resultate des **Kombi-Szenarios S9**, das die Maßnahme Sommerbenzin simuliert, sind in Abb. 7.3-21 dargestellt. Hier ergeben sich nur sehr geringe bis gar keine Effekte mit Abnahmen von maximal 2,5% gegenüber dem Referenzlauf. An dem Tag, für den eine Südwindwetterlage prognostiziert wird, ergeben sich sogar keine Abnahmen von mehr als 0,5%. Allerdings werden in dieser Modellregion N2 fast ausschließlich Abnahmen der bodennahen Ozonkonzentrationen prognostiziert, welche ihre Ursachen vor allem in der besonders betonten Reduzierten der VOC-Emissionen haben. Diese Minderungen werden für alle Bereiche, die mit dem Verbrauch, der Verteilung und der Lagerung von Pkw-Kraftstoffen verbunden sind, für die VOCs mit etwa 15% jedoch für die Stickoxide mit etwa 7% angegeben. Dies bewirkt eine entsprechende Verschiebung des VOC/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses in Richtung NO<sub>x</sub>.

Die relative Änderung der Ozonkonzentrationen im **TREND 2005-Szenario** im **Nest 1** in Bezug zum Basislauf ist in Abb. 7.3-22 dargestellt. Am 26. Juli, 16 UTC (Abb. 7.3-22, oben links) folgt die Trennlinie, welche die Abnahmen der Ozonkonzentrationen von Zunahmen trennt, fast exakt den Grenzen zwischen der Bundesrepublik Deutschland und Polen sowie Tschechien. Im deutschen Teil des Nest 1 dominieren Abnahmen zwischen 2.5% und 10%. Unterbrochen werden diese Bereiche von leichten Anstiegen im Raum Berlin, dem östlichen Brandenburg und Sachsen sowie einem kleinen Areal in der Gegend von Hamburg. Der Raum Berlin zeigt hier dieselben Charakteristika wie stark urban geprägte Bereiche generell.

Niedrige Ozonkonzentrationen im Basislauf im Zusammenspiel mit hohen Emissionsraten resultieren in höheren Ozonkonzentrationen im Szenario TREND 2005. Das östliche Brandenburg und Sachsen hingegen zeigen gegenüber dem Referenzlauf erhöhte Ozonkonzentrationen, da an diesem Tag mit östlichen und südlichen Winden höher belastete Luftmassen in die Region gelangen. Die Region südlich von Hamburg wird ebenfalls durch Transporteffekte, aber diesmal aus westlichen Regionen beeinflusst. An den darauffolgenden Tagen zeigt sich mehr oder weniger dieselbe Situation. Der entscheidende Faktor bezüglich der Trennlinie zwischen Ab- und Zunahmen in diesem Modellgebiet ist die Windgeschwindigkeit. Am 27. Juli (Abb. 7.3-22, oben rechts) strömt an der Südflanke eines schwachen Hochdruckgebietes mit Kern im Bereich Berlin mit östlichen bis nordöstlichen Winden ozonreiche Luft in das nördliche Bayern. Im Bereich dieser ozonreichen Luft kommt es im südöstlichen Brandenburg, in Sachsen sowie im südlichen Thüringen und Nordbayern zu Ozonabnahmen von mehr als 7.5%. Am 29. Juli, 16 UTC (Abb. 7.3-22, unten links) zeigen sich Zunahmen in Sachsen, bedingt durch Einstromvorgänge aus Tschechien mit südlichen Winden, sowie am westlichen Rand der Modellregion.

Am 1. August liegt der westliche Teil des N1-Gebietes im Bereich westlicher Winde. In diese Region gelangen Luftmassen aus den westlichen Teilen Deutschlands, die durch eine Abnahme der Ozonkonzentrationen im Rahmen des TREND 2005-Szenarios gekennzeichnet sind. Der östliche Teil des N1-Gebietes liegt im Zustrom sehr warmer Luft bei südlichen und südöstlichen Winden. Damit werden Luftmassen aus Tschechien herantransportiert, in deren Bereich besonders im südlichen Sachsen die Ozonwerte zunehmen (Abb. 7.3-22, unten rechts), infolge einer Umströmung des Fichtelgebirges auf der südlichen Seite. Auch die Abnahmen der Ozonkonzentrationen in der Abluffahne Berlins am 1. August, das im Bereich südlicher Winde liegt, ist deutlich erkennbar.

Die sich für das **Szenario TREND 2005** ergebenden relativen Änderungen der Ozonkonzentrationen im **Nest 2** sind in Abb. 7.3-23 dargestellt. Wiederum sind der 26., 27. und 29. Juli sowie der 1. August, jeweils um 16 UTC, abgebildet. Wie auch im Nest 0 und Nest 1 zeigt sich eine klare Unterscheidung zwischen Regionen, die durch Luftmassen tschechischen und polnischen Ursprungs, sowie den Regionen, die durch Luftmassen aus Westeuropa beeinflusst werden. Am 26. Juli, 16 UTC (Abb. 7.3-23, oben links) teilt die Trennlinie, welche die Zunahmen der Ozonkonzentrationen von Abnahmen abgrenzt, die Region N2 in etwa 2 gleiche Hälften. Am 27. Juli hingegen (Abb. 7.3-23, oben rechts) werden für fast das gesamte Nest 2 Abnahmen der Ozonkonzentrationen von bis zu 10% prognostiziert. An diesem Tag herrschen, wie vorab schon berichtet (siehe auch Abschn. 7.1.2), nördliche Winde vor. Für den 29. Juli und den 1. August (Abb. 7.3-23, unten) werden fast durchweg Zunahmen prognostiziert. Dies hat seine Ursache in herantransportierten belasteten Luftmassen aus dem polnischen und tschechischen Raum. Zusätzlich zu den Ergebnissen, die schon für die Region N1 formuliert wurden, zeigen sich Einflüsse des Großraumes Dresden an fast allen Zeitpunkten. Für diese Region wird fast immer eine schwächere Abnahme oder stärkere Zunahme der Ozonkonzentrationen im Vergleich zum Umland vorhergesagt.

Abb. 7.3-15: **Szenario S-1:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt. Punkte = Lage der Städte Freiberg, Dresden und Hoyerswerda

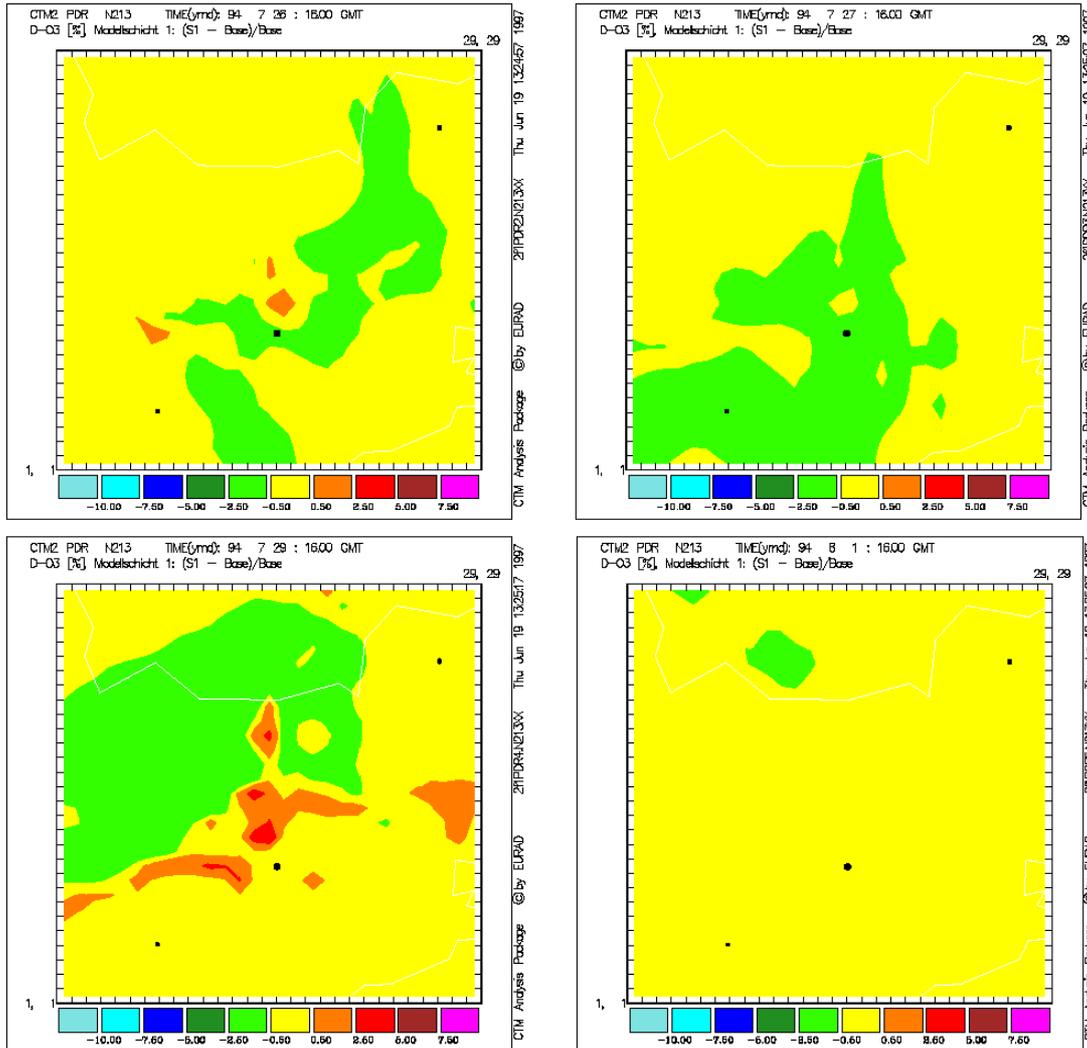


Abb. 7.3-16: **Szenario S-2:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt. Punkte = Lage der Städte Freiberg, Dresden und Hoyerswerda

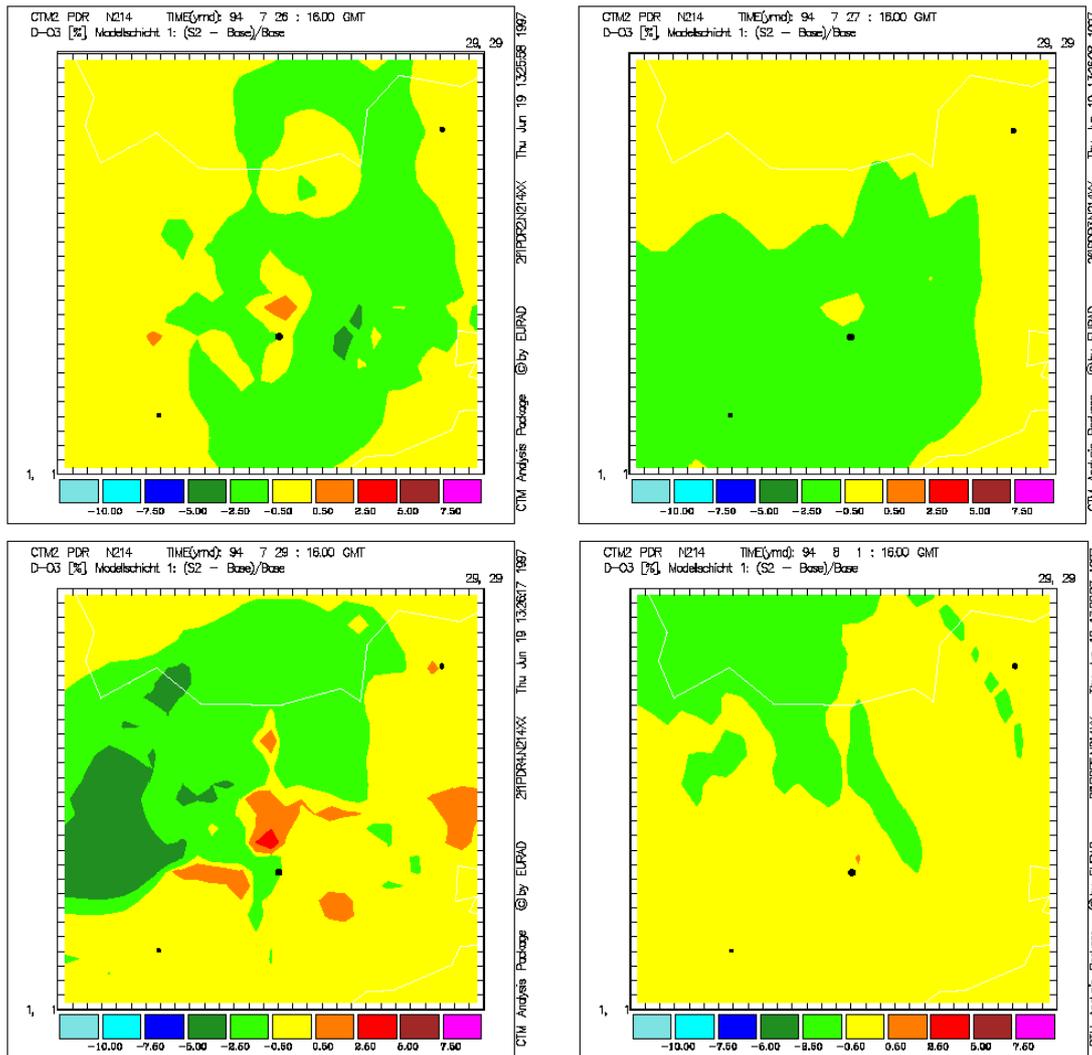


Abb. 7.3-17: **Szenario S-4b:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt. Punkte = Lage der Städte Freiberg, Dresden und Hoyerswerda

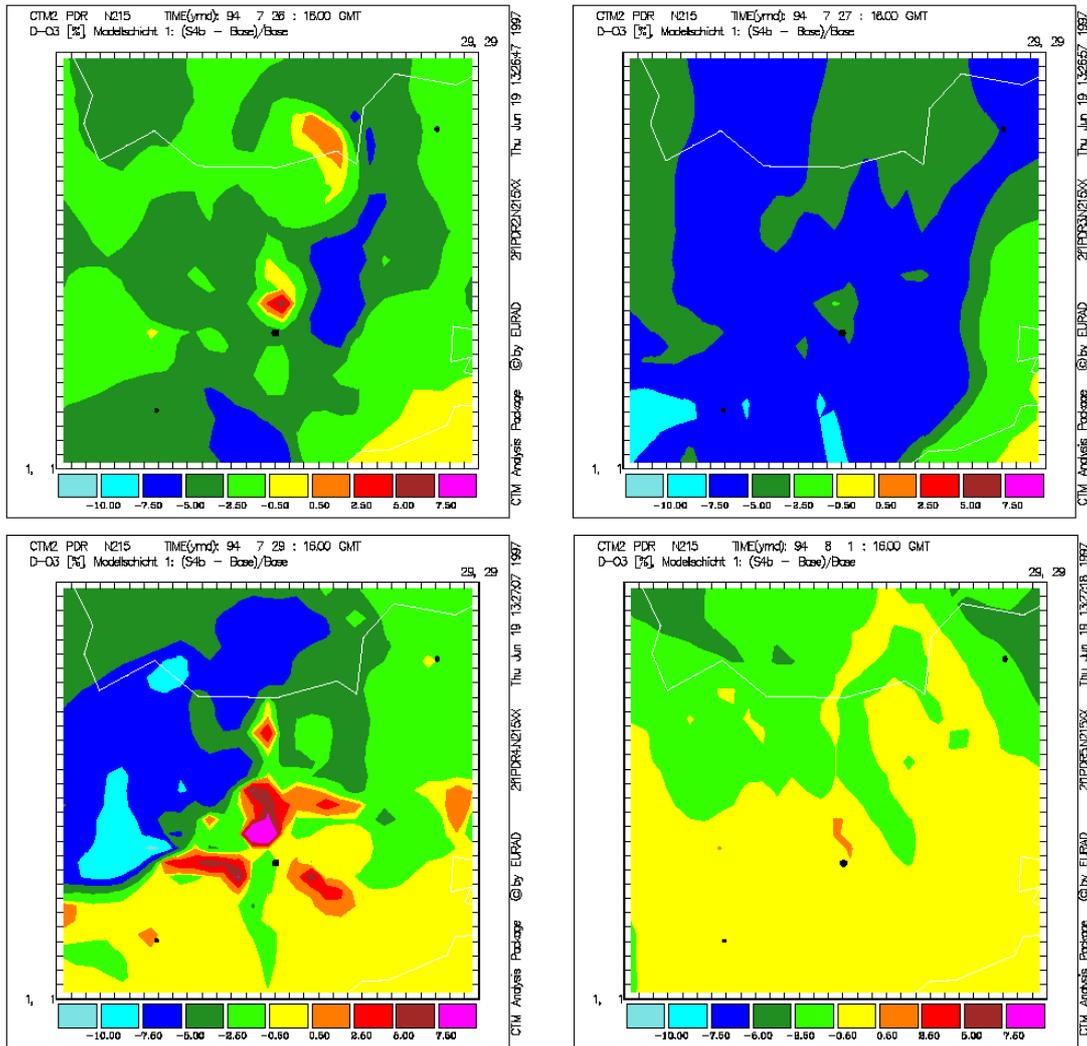


Abb. 7.3-18: **Szenario S-7:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt. Punkte = Lage der Städte Freiberg, Dresden und Hoyerswerda

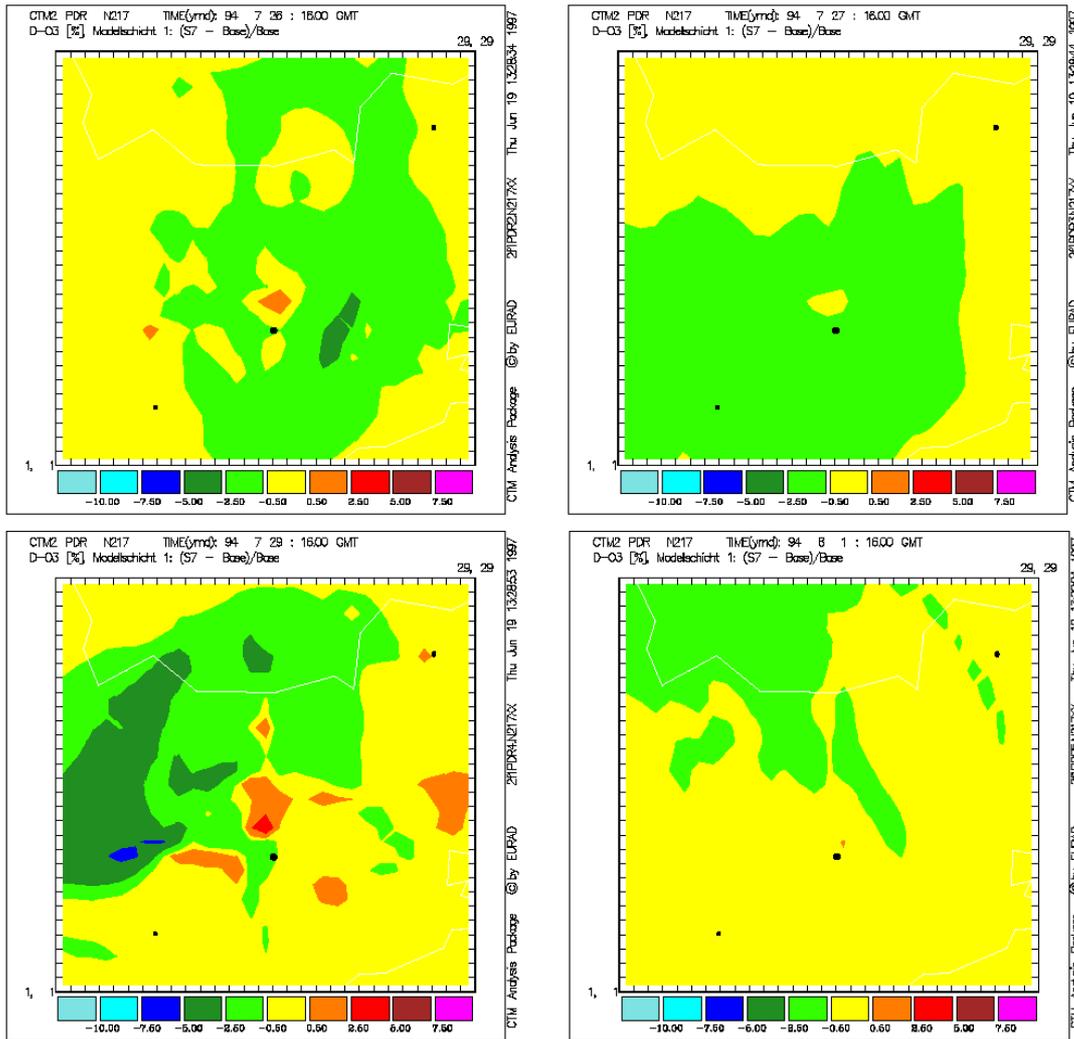


Abb. 7.3-19: **Szenario S-8a:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt. Punkte = Lage der Städte Freiberg, Dresden und Hoyerswerda

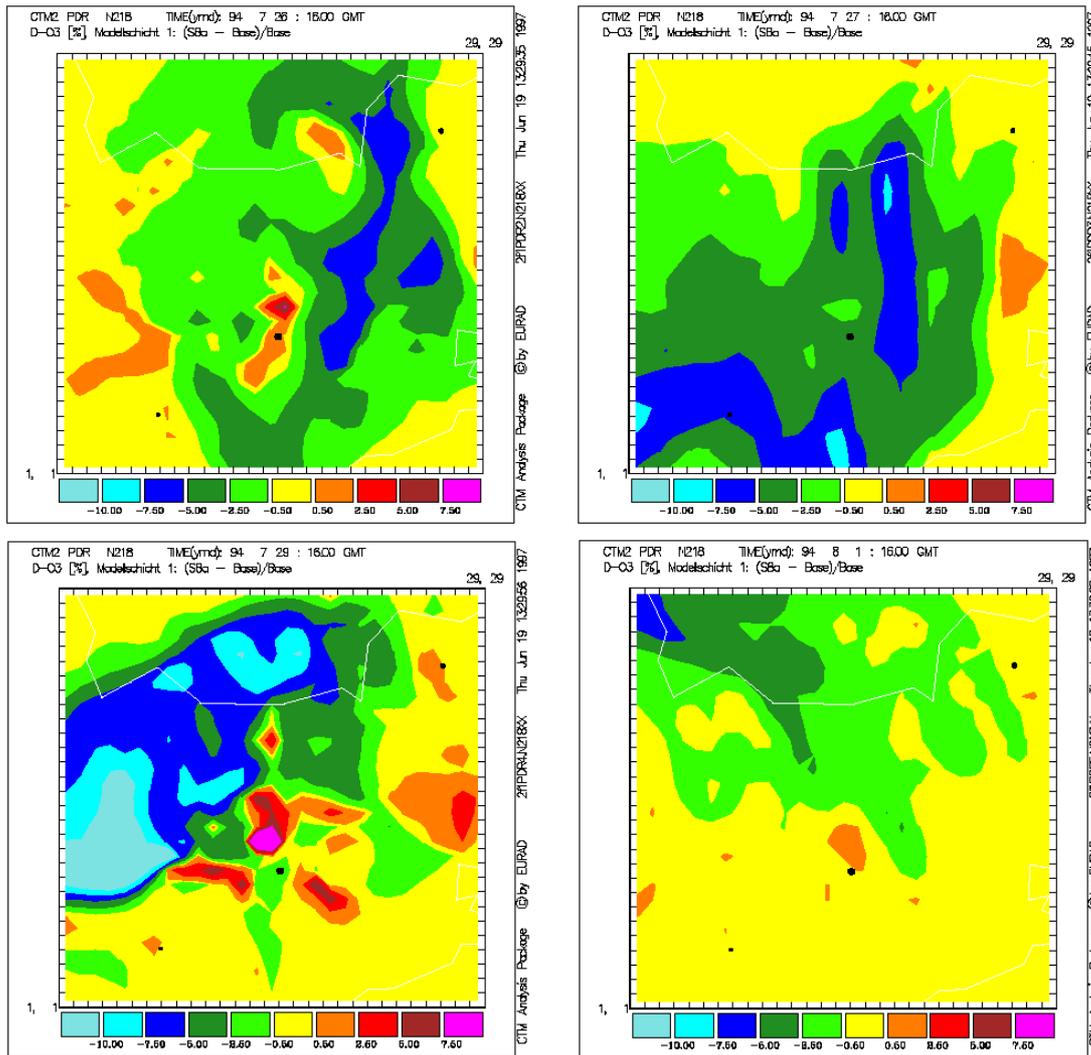


Abb. 7.3-20: **Szenario S-8b:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt. Punkte = Lage der Städte Freiberg, Dresden und Hoyerswerda

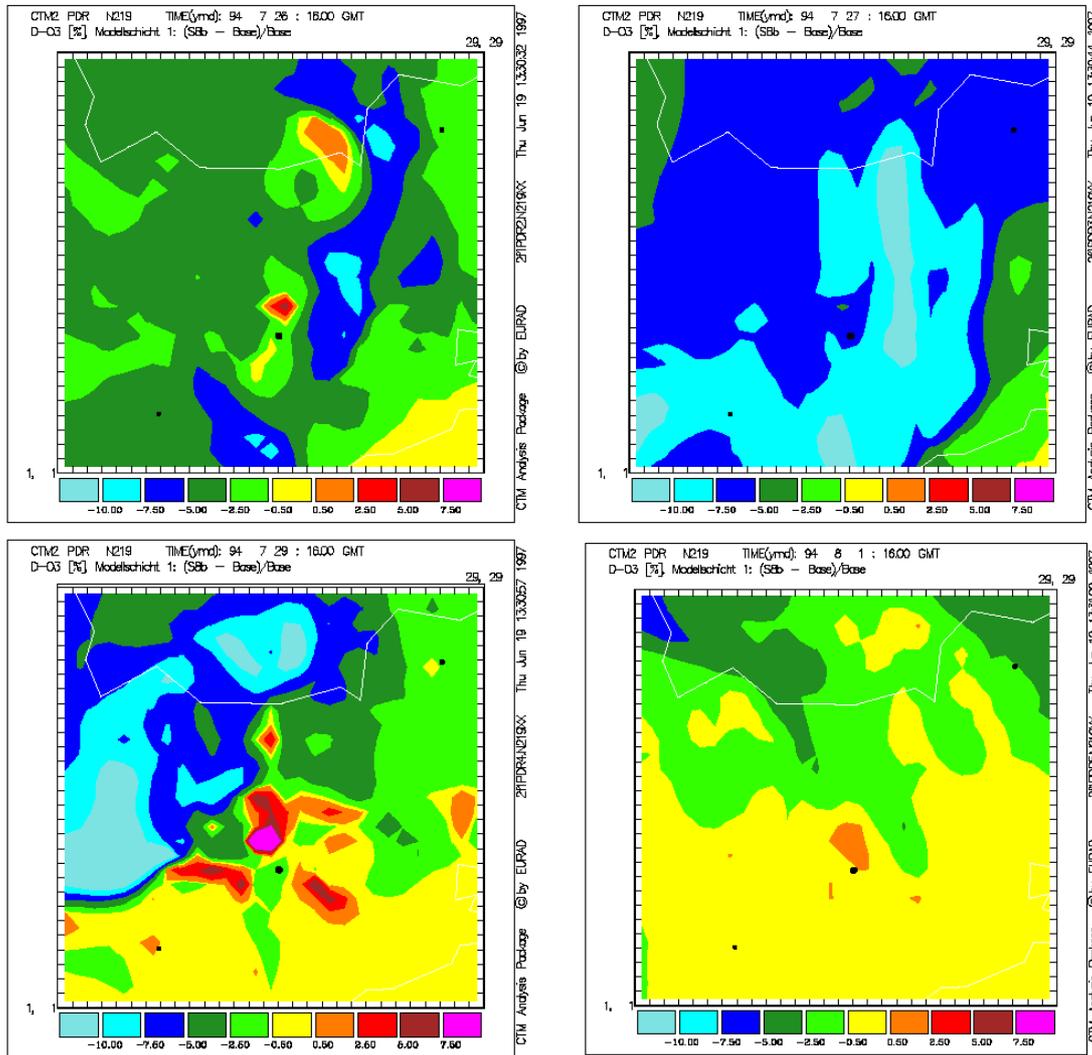


Abb. 7.3-21: **Szenario S-9:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt. Punkte = Lage der Städte Freiberg, Dresden und Hoyerswerda

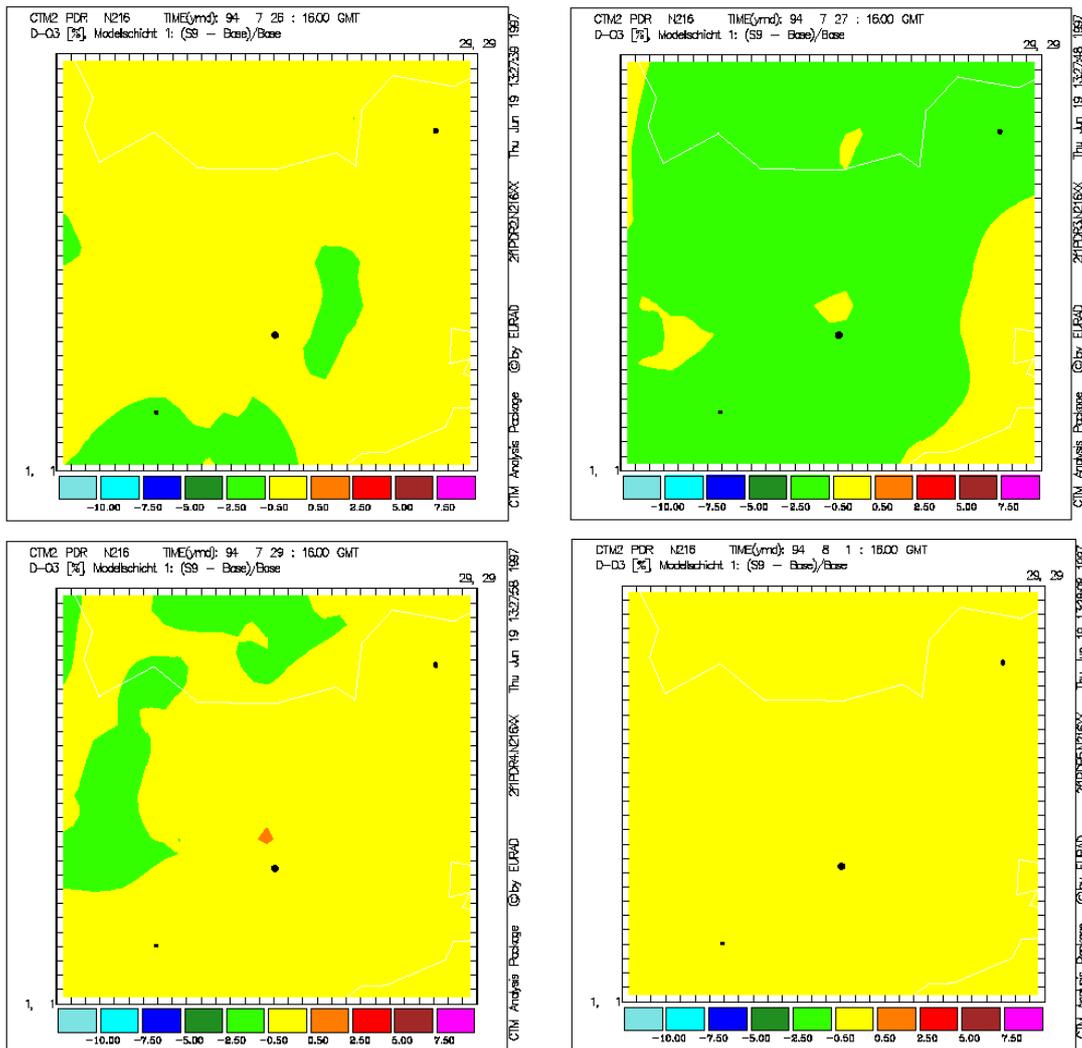


Abb. 7.3-22: **Szenario Trend 2005:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 1 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt.

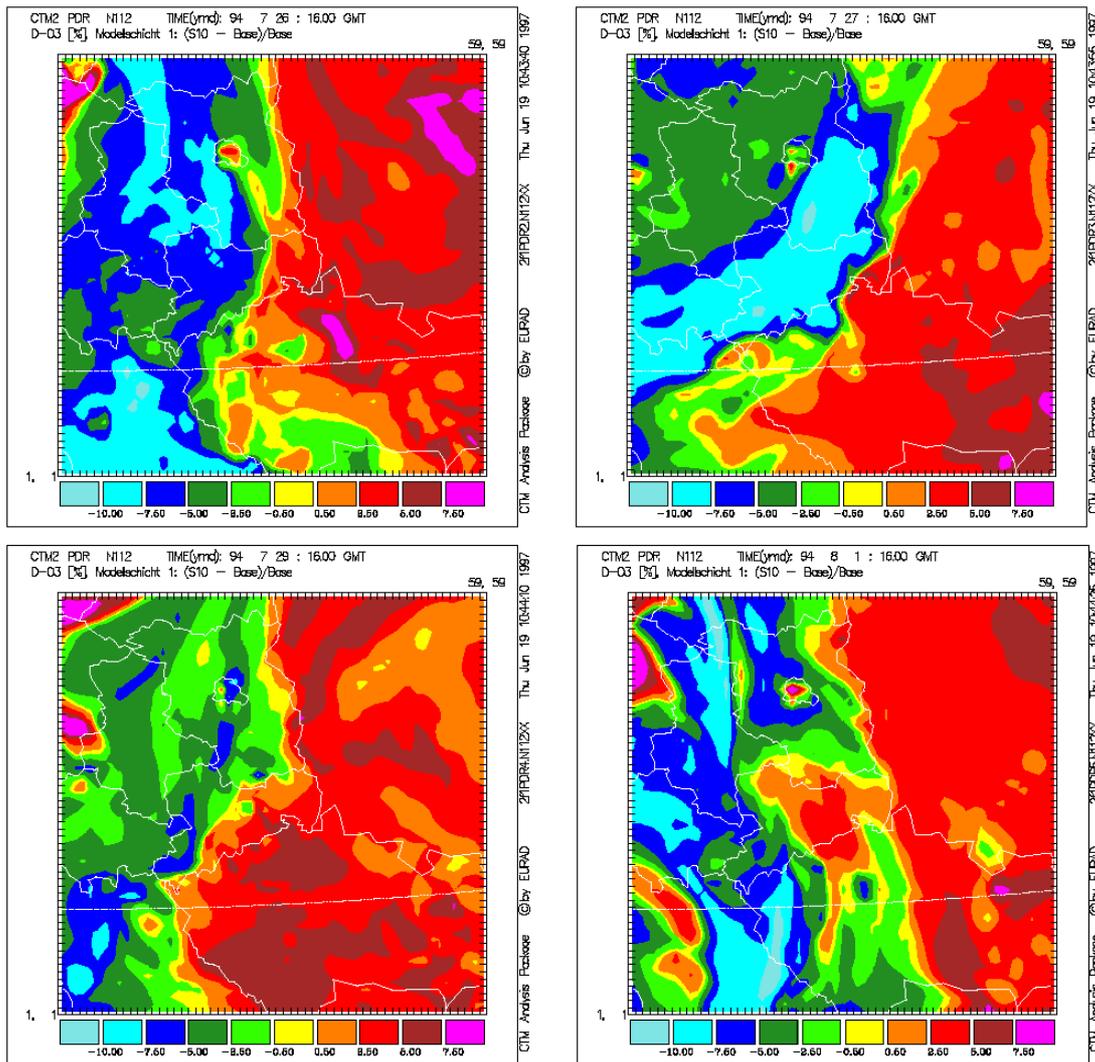
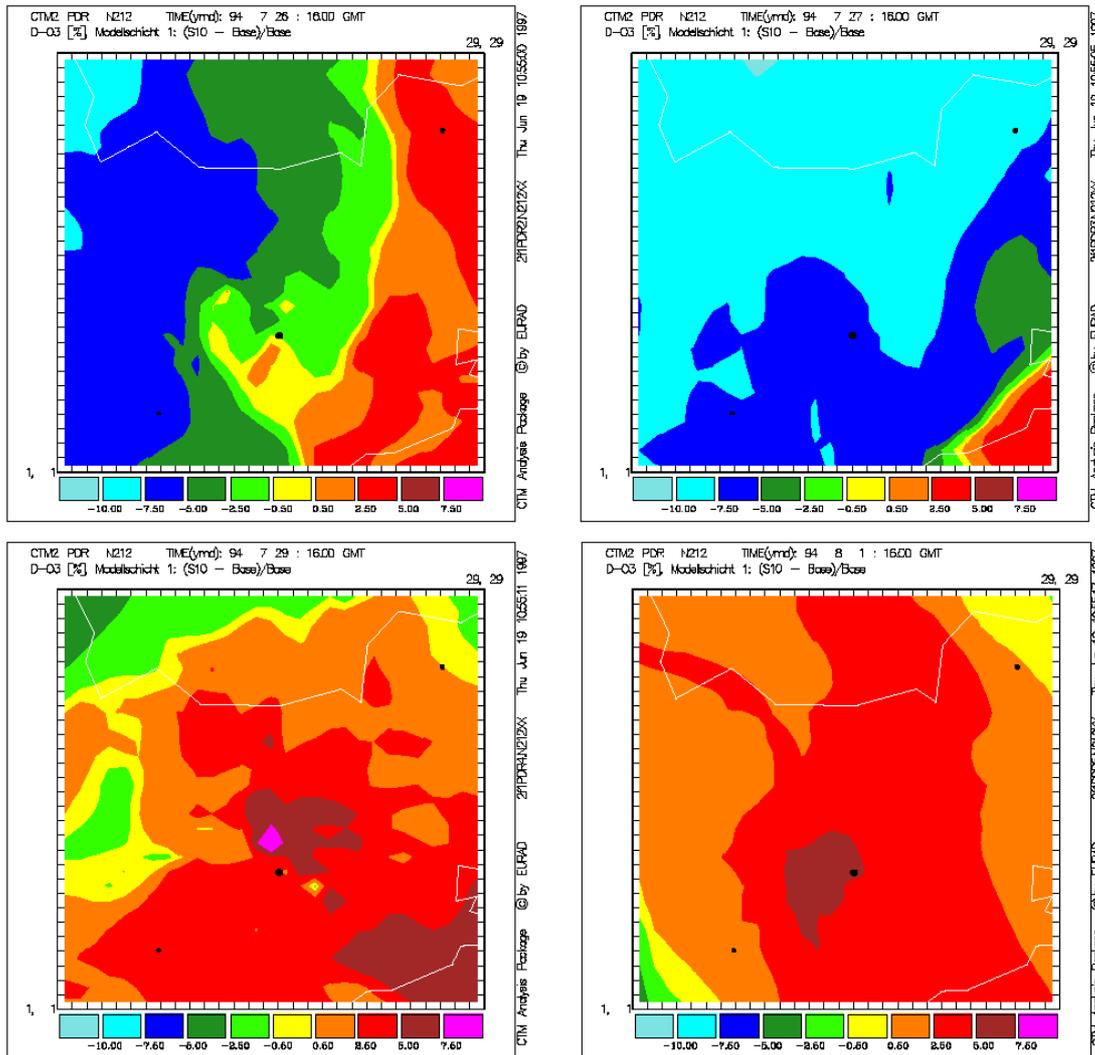


Abb. 7.3-23: **Szenario Trend 2005:** Relative Änderungen der Ozonkonzentrationen (in %) in der bodennahen Modellschicht im Nest 2 (0-70m). Oben links: 26.Juli 1994, 16 UTC, Oben rechts: 27.Juli 1994, 16 UTC, unten links: 29.Juli 1994, 16 UTC, unten rechts: 1. Aug. 1994, 16 UTC. Relative Zunahmen gegenüber dem Basisfall sind in Rottönen, geringe bis keine Änderungen in Gelbtönen, relative Abnahmen in Grün- und Blautönen dargestellt. Punkte = Lage der Städte Freiberg, Dresden und Hoyerswerda



## Gitterstundenanalysen

Um eine integrale Bewertung der durchgeführten Szenarienläufe der Episode im Sommer 1994 vornehmen zu können, werden in diesem Abschnitt die Gitterstundenüberschreitungen des bodennahen Ozons für bestimmte Grenzwerte aufgezeigt. Anhand dieser Auflistung wird eine Wirksamkeitsabschätzung der einzelnen Szenarien in Bezug zum Basislauf vorgenommen. Die Gliederung dieses Abschnitts ergibt sich wiederum aus der Größe der horizontalen Maschenweite des jeweiligen Modellgebietes:

- Nest 1: Gitterstundenanalyse für die Szenarien S4b, S8b, S9 und S10
- Nest 2: Gitterstundenanalyse für die Szenarien S1, S2, S4b, S7, S8a, S8b, S9 und S10

Analysewerte, die sich auf den gesamten Simulationszeitraum beziehen, beinhalten auch Tage, an denen nur geringe bodennahe Ozonkonzentrationen gemessen und simuliert wurden oder aber auch Tage, an denen es zu Einströmvorgängen stark ozonbelasteter Luft aus den angrenzenden Staaten Tschechien und Polen kam. Beschränkt man nun die Gitterstundenanalyse auf den Zeitraum vom 26. Juli, 0 UTC, bis zum 29. Juli, 23 UTC, so werden solche Effekte besonders für den Großraum Dresden weitgehend ausgeklammert. In diesem Zeitraum treten sowohl in der Simulation wie auch in den Meßwerten die höchsten Ozonkonzentrationen auf.

Im Zuge einer konsistenten Behandlung wurde diese Beschränkung des Analysezeitraums sowohl für den Modellbereich N2 als auch für den Modellbereich N1 durchgeführt. In den Tabellen 7.3.3 und 7.3.4 ist die **Gitterstundenverteilung** sämtlicher im **Nest 1** durchgeführten Simulationsläufe und die relativen Änderungen der Gitterstunden gegenüber den Ergebnissen des Basislaufes aufgelistet. Die maximale Anzahl von Gitterstunden ist nun 163296 bei 1701 Gitterboxen innerhalb Deutschlands im Nest 1 bei einer Simulationsdauer von 96 Stunden. Für den Basislauf werden hier 11 Gitterstunden mit mehr als 200 *ppbV* ausgewiesen, also knapp die Hälfte des Wertes für den gesamten Episodenzeitraum. Bedingt durch die Ausklammerung der Tage, an denen es zum Einströmvorgängen ozonbelasteter Luft aus den angrenzenden Staaten kam (z.B. dem 1. August, an dem stark schadstoffbelastete Luftmassen aus Tschechien über das Erzgebirge nach Sachsen gelangten), sind die relativen Gitterstundenänderungen (Tab. 7.3.4) besonders für hohe Ozonkonzentrationen deutlicher ausgeprägt. Zwar setzen die Minderungen bei etwa denselben Ozonkonzentrationen wie im Falle der Betrachtung der gesamten Episode ein, aber relativen Minderungen für alle 4 Szenarien sind oberhalb eines Wertes von 160 *ppbV* weitaus deutlicher ausgeprägt. Im Falle des 96-stündigen Simulationszeitraumes sind Reduktionen um die Hälfte des Werte für den Basislauf vor allem für die Ozonspitzenkonzentrationen für alle im Nest 1 realisierten Szenarien ausgewiesen.

Betrachtet man nun die relativen Änderungen der Gitterstunden der jeweiligen Szenarien bezüglich des Basislaufes im Nest 1 sowohl für den gesamten Episodenzeitraum als auch für

den 96-stündigen Zeitraum von 26. bis zum 29. Juli, so lassen sich die Resultate folgendermaßen zusammenfassen:

- Oberhalb von 40 *ppbV* zeigen alle temporären Maßnahmen (S4b, S8b und S9) Abnahmen in der Anzahl der Gitterstunden relativ zum Basislauf.
- Über die gesamte Episode betrachtet steigt die Wirksamkeit der zeitlich begrenzten Maßnahmen mit zunehmenden Ozonkonzentrationen (Ausnahmen: Geringere Abnahmen bei Ozonkonzentrationen zwischen 130 und 140 *ppbV* in den Szenarien S4b und S8b beziehungsweise 150 und 160 *ppbV* im Szenario S9 und in den Szenarien S4b und S8b bei Ozonkonzentrationen von mehr als 190 *ppbV*). Die letztere Ausnahme gilt nicht für den Zeitraum vom 26. bis zum 29. Juli.
- Das Szenario S10 ist, bezogen auf den gesamten Episodenzeitraum, in der Modellregion N1 besonders wirksam für Ozonkonzentrationen von 100 bis 140 *ppbV*, weniger jedoch für Ozonkonzentrationen zwischen 160 und 170 *ppbV*. Letzere Einschränkung ist, bedingt durch die starke Beeinflussung durch Immissionen aus Nachbarstaaten, nur für die gesamte Episode gültig. Für vor allem durch nördliche und westliche Winde geprägte Teilepisoden ergibt sich eine generelle Abnahme der Gitterstundenwerte im Szenario S10.
- Die Ausklammerung der Zeiträume, bei denen es zu starken Einströmvorgängen kam, verstärkt bei allen Szenarien im Nest 1 die Abnahmetendenzen gegenüber den Ergebnissen für den gesamten Simulationszeitraum bei Ozonspitzenwerten von mehr als 160 *ppbV* (alle Szenarien), für Ozonkonzentrationen zwischen 90 und 110 *ppbV* (S4b und S8b) und zwischen 90 und 120 *ppbV* (S9 und S10).
- Die Szenarien S4b und S8b unterscheiden sich nicht allzusehr. Für Ozonkonzentrationen zwischen 40 und 150 *ppbV* scheint das Szenario S8b wirksamer zu sein, für Ozonkonzentrationen zwischen 170 und 190 *ppbV* hingegen das Szenario S4b.
- Das Szenario S9 ist das am wenigsten wirksame im Nest 1.

Tabelle 7.3.3: Gitterstunden des bodennahen Ozons im Zeitraum 26.7. - 29.7.1994 für den Basislauf und die Szenarien S4b, S8b, S9 und S10 für den im N1-Gebiet liegenden Teil Deutschlands. Angegeben ist die Anzahl der Gitterstunden, an denen ein bestimmter Ozonwert überschritten wird.

<b>Betrachteter Zeitraum: 26.7.-29.7.94</b>					
<b>03 [ppbV]</b>	<b>Gitterstunden</b>				
	<b>Nest 1</b>				
	<b>Basislauf</b>	<b>S4b</b>	<b>S8b</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>
0	163296	163296	163296	163296	163296
10	162860	162932	162938	162869	163119
20	161292	161248	161447	161319	162002
30	154466	154452	154466	154472	155706
40	139572	138980	138913	139495	140434
50	116278	114749	114554	116086	115303
60	88114	85887	85614	87835	84919
70	59966	57011	56583	59525	54547
80	32204	28216	27559	31618	26656
90	11131	8766	8275	10756	7689
100	3459	2510	2340	3292	2153
110	1199	761	659	1102	620
120	433	246	232	403	234
130	191	130	131	175	123
140	104	71	70	95	86
150	71	43	43	68	58
160	45	30	30	42	40
170	36	16	17	31	28
180	25	4	6	22	18
190	14	3	3	9	6
200	6	3	3	3	3

Tabelle 7.3.4: Relative Gitterstundenänderung des bodennahen Ozons im Zeitraum 26.7. bis 29.7.1994 für die Szenarien S4b, S8b, S9 und S10 für den im N1-Gebiet liegenden Teil Deutschlands. Angegeben ist die prozentuale Änderung der Gitterstunden bezüglich des Basisfalls, an denen ein bestimmter Ozonwert überschritten wird.

<b>Betrachteter Zeitraum: 26.7.-29.7.94</b>					
<b>03 [ppbV]</b>	<b>Rel. Gitterstunden Nest 1 (%)</b>				
		S4b	S8b	S9	S10
0		0.00	0.00	0.00	0.00
10		0.04	0.05	0.01	0.16
20		0.08	0.10	0.02	0.44
30		-0.01	0.00	0.00	0.80
40		-0.42	-0.47	-0.06	0.62
50		-1.31	-1.48	-0.17	-0.84
60		-2.53	-2.84	-0.32	-3.63
70		-4.93	-5.64	-0.74	-9.04
80		-12.38	-14.42	-1.82	-17.23
90		-21.25	-25.66	-3.37	-30.92
100		-27.44	-32.35	-4.83	-37.76
110		-36.53	-45.04	-8.09	-48.29
120		-43.19	-46.42	-6.93	-45.96
130		-31.94	-31.41	-8.38	-35.60
140		-31.73	-32.69	-8.65	-17.31
150		-39.44	-39.44	-4.23	-18.31
160		-33.33	-33.33	-6.67	-11.11
170		-55.56	-52.78	-13.89	-22.22
180		-84.00	-76.00	-12.00	-28.00
190		-78.57	-78.57	-35.71	-57.14
200		-50.00	-50.00	-50.00	-50.00

Betrachtet man im Falle des **Nestes N2**, wie auch schon im Falle der Modellregion N1, den Ausschnitt des Episodenzeitraumes vom 26. bis zum 29. Juli (Tab. 7.5 und 7.6), so ergibt sich das Folgende:

- Die Grenze, bei der für die temporären Szenarien Abnahmen relativ zum Basislauf vorhergesagt werden, steigt um 10 *ppbV* auf den Bereich zwischen 70 und 80 *ppbV* an. Dies hat seine Ursache in den während dieses Zeitraumes durchschnittlich höheren berechneten Ozonkonzentrationen.
- Relativ zu den Werten für den gesamten Zeitraum weisen vor allem die temporären regionalen Maßnahmen (S1, S2, S7 und S8a, aber auch S9) leichte Reduktionen und fast sämtliche überregionalen temporären Maßnahmen (S4b und S8b) deutlichere Reduktionen der Gitterstundenwerte relativ zum Basisverlauf aus.
- Das Szenario S10 zeigt gegenüber den Ergebnissen für den gesamten Simulationszeitraum generell Abnahmen relativ zum Basislauf ab Ozonkonzentrationen von 60 *ppbV*. Insbesondere die für die Gesamtperiode ausgewiesenen Zunahmen in den Bereichen zwischen 110 und 130 und auch oberhalb von 190 *ppbV* zeigen nun ebenfalls nennenswerte Reduktionen. Dies hat seine Ursache in der Ausklammerung der Einströmzeiträume Anfang August, wo hochbelastete Luftmassen aus Tschechien, für das im Szenario TREND 2005 Zunahmen der Emissionen prognostiziert werden, über das Erzgebirge in den Großraum Dresden gelangten.
- Ebenso wie für den gesamten Simulationszeitraum ergibt sich auch während dieser Ausschnittsperiode ein klarer Vorrang überregionaler gegenüber regionalen Maßnahmen. Die Ausnahme bildet hier das am wenigsten effektive überregionale Szenario S9 (Sommerbenzin), das verglichen mit dem einschneidendsten regionalen Szenario S8a (maximale Emissionsreduktion), deutlich geringere Abnahmen in den Ozonkonzentrationen relativ zum Basislauf aufweist.

Aus den Ergebnissen der relativen Änderungen der Gitterstunden sämtlicher Szenarien in der Modellregion N2 im Zeitraum vom 26. bis zum 29. Juli 1994 gemäß Tabelle 7.3.6 ist ersichtlich, daß innerhalb dieses Zeitraumes weisen nunmehr alle Szenarien ab einem Wert von 80 *ppbV* Abnahmen im Vergleich zu den Werten des Basislaufes aus. Die effektivsten Szenarien über sämtliche Zeiträume sind damit die temporären Kombi-Szenarien S8b und S4b, die die deutlichsten Rückgänge aufweisen. Mit Ausnahme des Szenarios S8a, das die maximale regionale Emissionsreduktion simuliert, liegen die Effekte des Kombi-Szenarios S9 über denen der temporären Regio-Szenarien S1, S2 und S7. Daraus ergibt sich klar der Vorrang überregionaler, weniger einschneidender gegenüber rigorosen, aber stark räumlich begrenzten Maßnahmen.

Tabelle 7.3.5: Gitterstunden des bodennahen Ozons im Zeitraum 26.7. - 29.7.1994 für den Basislauf und die Szenarien S1, S2, S4b, S7, S8a, S8b, S9 und S10 für den im Nest 2 liegenden Teil Deutschlands. Angegeben ist die Anzahl der Gitterstunden, an denen ein bestimmter Ozonwert überschritten wird.

Betrachteter Zeitraum: 26.7.-29.7.94									
03 [ppbV]	Gitterstunden Nest 2								
	Basis- lauf	S1	S2	S4b	S7	S8a	S8b	S9	S10
0	89184	89184	89184	89184	89184	89184	89184	89184	89184
10	89124	89125	89150	89152	89150	89156	89155	89122	89137
20	88157	88143	88244	88323	88244	88408	88126	88126	88180
30	82829	82832	83005	82955	83006	83352	82754	82754	82667
40	72361	72415	72740	72385	72746	73163	72193	72193	72277
50	60139	60279	60608	60072	60616	61016	59995	59995	60640
60	48664	48871	49174	48194	49184	49456	48258	48528	48544
70	35933	35999	36069	34217	36047	35673	35756	35756	35462
80	19566	19192	18889	15267	18803	17161	19065	19065	17296
90	7322	7197	7067	4637	7037	6393	6969	6969	4589
100	2081	1999	1945	857	1934	1600	1878	1878	620
110	299	287	269	121	268	233	258	258	56
120	36	35	35	23	34	35	16	33	22
130	16	16	16	13	16	13	11	16	11
140	10	9	9	9	9	9	7	9	8
150	8	8	8	7	8	7	6	8	6
160	7	7	7	5	7	6	4	7	4
170	5	5	5	3	5	3	3	5	3
180	4	3	4	3	4	3	3	3	3
190	3	3	3	3	3	3	3	3	3
200	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Tabelle 7.3.6: Relative Gitterstundenänderung des bodennahen Ozons im Zeitraum 26.7. bis 29.7.1994 für die Szenarien S1, S2, S4b, S7, S8a, S8b, S9 und S10 für den im N2-Gebiet liegenden Teil Deutschlands. Angegeben ist die prozentuale Änderung der Gitterstunden bezüglich des Basisfalls, an denen ein bestimmter Ozonwert überschritten wird.

Betrachteter Zeitraum: 26.7.-29.7.94									
03 [ppbV]	Rel. Gitterstunden Nest 2 (%)								
		S1	S2	S4b	S7	S8a	S8b	S9	S10
0		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10		0.00	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.00	0.01
20		-0.02	0.10	0.19	0.10	0.28	0.25	-0.04	-0.20
30		0.00	0.21	0.15	0.21	0.63	0.26	-0.09	-0.20
40		0.07	0.52	0.00	0.53	1.11	0.03	-0.23	-0.12
50		0.23	0.78	-0.11	0.79	1.46	-0.14	-0.24	0.83
60		0.43	1.05	-0.97	1.07	1.63	-1.44	-0.28	-0.25
70		0.18	0.38	-4.78	0.32	-0.72	-6.49	-0.49	-1.31
80		-1.91	-3.46	-21.97	-3.90	-12.29	-26.90	-2.56	-11.60
90		-1.71	-3.48	-36.67	-3.89	-12.69	-46.67	-4.82	-37.33
100		-3.94	-6.54	-58.82	-7.06	-23.11	-70.59	-9.75	-70.21
110		-2.78	-2.78	-36.11	-5.56	-2.78	-55.56	-8.33	-38.89
120		0.00	0.00	-18.75	0.00	-18.75	-31.25	0.00	-31.25
130		-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-30.00	-10.00	-20.00
140		0.00	0.00	-12.50	0.00	-12.50	-25.00	0.00	-25.00
150		0.00	0.00	-28.57	0.00	-14.29	-42.86	0.00	-42.86
160		0.00	0.00	-40.00	0.00	-40.00	-40.00	0.00	-40.00
170		-25.00	0.00	-25.00	0.00	-25.00	-25.00	-25.00	-25.00
180		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
190		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200									

### 7.3.5 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel dargestellte Untersuchung ist ein Teilvorhaben des UBA F&E-Vorhabens "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon". Im Rahmen dieses Teilvorhabens wird das EURAD-Modellsystem eingesetzt, um die immissionsseitigen Auswirkungen verschiedener Emissionsminderungs-Szenarien auf die daraus resultierenden Ozonkonzentrationen unter besonderer Berücksichtigung des Großraums Dresden zu untersuchen. Es werden dazu 3 Modellebenen realisiert, nämlich das Nest 0 (Europa), das Nest 1 (NBL) und das Nest 2 (Großraum Dresden), die mit unterschiedlichen horizontalen Maschenweiten durch das sogenannte Nestung-Verfahren ineinander verschachtelt sind. In diesem Teilvorhaben für die Modellregion Dresden werden - wie auch für die beiden anderen Modellregionen - 3 Typen von Emissionsszenarien unterschieden:

1. Ein europaweites Prognose-Szenario "TREND 2005", das auf den zur Zeit beschlossenen Maßnahmen basiert (1 Szenario auf den Modellebenen NO, N1 und N2).
2. Überregionale temporäre Maßnahmen, die beim Überschreiten bestimmter Ozonwarnstufen eingeleitet werden können (3 Szenarien auf den Modellebenen N1 und N2).
3. Regionale temporäre Maßnahmen, die beim Erreichen bestimmter Ozonwarnstufen eingeleitet werden können (4 Szenarien auf der Modellebene N2).

Alle diese Szenarien wurden für die Photosmogepisode vom 23. Juli bis zum 9. August 1994 modelltechnisch umgesetzt und hinsichtlich der resultierenden Ozonkonzentrationen sowie der Gitterstundenüberschreitungshäufigkeiten auf allen 3 Modellebenen untersucht. Das Kerngebiet der vorliegenden Untersuchung, der Großraum Dresden, weist zwar nicht annäherungsweise so hohe Quellstärken wie zum Beispiel das Rhein-Main-Gebiet oder der Großraum Berlin auf, ist jedoch wegen seiner Nähe zu Tschechien und Polen von besonderem Interesse. Zu nennen sind hier vor allem Effekte aufgrund von südlichen und östlichen Anströmrichtungen und der daraus resultierenden Einschränkung der Wirksamkeit regionaler oder sogar überregionaler Maßnahmen, solange diese auf die Bundesrepublik Deutschland beschränkt bleiben. Dies resultiert aus der für Ozonspitzenkonzentrationen in unseren Breiten typischen Hochdruckwetterlage und der damit häufig verbundenen östlichen bis südlichen Windrichtung. Generell zeigte es sich, daß Ozonkonzentrationen im grenznahen Bereich erheblich durch Immissionen angrenzender Staaten beeinflusst werden können.

Für das Prognose-Szenario TREND 2005 ergeben sich folgende Resultate:

- Im Nest 0 ergibt sich relativ zum Basislauf eine Abnahme der Gitterstundenwerte für die westlichen Länder der Modellregion sowie eine Zunahme für östliche Regionen gemäß der für das Jahr 2005 jeweils vorhergesagten Emissionszu- beziehungsweise Emissionsabnahmen. Abweichungen von diesem Trend zeigen sich nur in Nordrhein-

Westfalen und den Benelux-Staaten aufgrund der dort vorherrschenden VOC-Limitierung bei Oxidantienbildung.

- Für die Bundesrepublik Deutschland ergeben sich für das Nest 0 und das Nest 1 generell Abnahmen der Gitterstundenwerte im Vergleich zum Basislauf. Die Ergebnisse des Nest 2 dagegen zeigen für dieses Szenario eine starke Abhängigkeit von der vorherrschenden Anströmrichtung. Südliche und östliche Winde bewirken erhöhte, westliche und nördliche Winde dagegen reduzierte Ozonkonzentrationen relativ zum Basislauf.

Im Gegensatz zu dem Prognose-Szenario TREND 2005, das auf allen 3 Modellebenen realisiert wurde, wurden sämtliche temporäre Szenarien auf den Modellebenen N1 und N2 oder nur auf der Modellebene N2 durchgeführt. Für die überregionalen und regionalen temporären Maßnahmen lassen sich folgende Resultate zusammenfassen:

- Die überregionalen Szenarien "Straßenverkehr Max" und das maximale Reduktionsszenario "Kombi-Max" bewirken einen deutlichen Rückgang der Überschreitungshäufigkeiten für Ozonkonzentrationen von über 90 ppbV auf bis zu 40% des Wertes für den Basislauf.
- Das Szenario "Sommerbenzin" ist das am wenigsten wirksame Überregional-Szenario.
- Außer dem Szenario "Regio-Max" sind für alle Regio-Szenarien die Überschreitungshäufigkeiten höher als für alle Überregional-Szenarien. Damit ergibt sich ein klarer Vorrang von weniger einschränkenden Überregional- gegenüber stark einschränkenden Regional-Szenarien.
- Gewisse Grundbelastungen bei Ozonkonzentrationen von unter 50 ppbV bleiben zumeist erhalten.

## 7.4 Wirkungen von Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozonkonzentrationen in der Modellregion "Berlin-Brandenburg"

### 7.4.1 Modellgebiet und Simulationszeitraum

Die Abbildung 7.4-1 zeigt das für die photochemischen Ausbreitungsrechnungen ausgewählte **Modellgebiet**. Im Zentrum liegt der Ballungsraum Berlin mit ca. 3,5 Millionen Einwohner auf einer Fläche von ca. 900 km<sup>2</sup>. Insgesamt umfaßt das Untersuchungsgebiet ca. 10800 km<sup>2</sup>. Es ist orographisch nur schwach gegliedert. Die einzigen deutlichen Erhebungen bilden der Fläming im Südwesten und der Barnim im Nordosten von Berlin. Die Höhenunterschiede betragen maximal nur ca. 100 m. Emissionsseitig ist das Gebiet geprägt durch den Ballungsraum Berlin/Potsdam sowie durch den Berliner Autobahnring mit seinen diversen Abzweigungen. Ansonsten ist die Emissionsdichte eher gering.

Entsprechend der Auflösung des für die Untersuchungen verwendeten Emissionsdatensatzes wird das Gebiet durch ein horizontales Gitter mit der Maschenweite 2 km überdeckt. Bei einer Ost-West-Ausdehnung von 100 km und einer Süd-Nord-Ausdehnung von 108 km ergeben sich damit 50x54 Rasterflächen. Die Grenzen des Gebiets liegen im Westen bei dem Gauß-Krüger-Rechtswert R 5332000, im Osten bei R 5432000. Den Nordrand bildet der Hochwert H 5876000, im Süden der Hochwert H 5768000 die Begrenzung der Modellregion. Die Randbedingungen werden in einer separaten Rendreihe behandelt, so daß insgesamt 52x56 horizontale Gitterzellen verwendet werden.

In der Vertikalen erfolgt eine Unterteilung der Atmosphäre in 10 Schichten bis zu einer Modellobergrenze von 4000 m. Die unterste Schicht ist 20 m dick. Mit wachsender Höhe nimmt die Schichtdicke zu. Die unteren 800 m der Atmosphäre werden dabei in 6 Zellen aufgelöst.

Als **Simulationszeitraum** wurde der Zeitabschnitt vom 22. Juli 1994 bis zum 6. August 1994 ausgewählt. Die meteorologische Situation während dieser Zeit war geprägt durch hochsommerliche Verhältnisse über Mitteleuropa mit geringen Luftdruckschwankungen, überwiegend geringer Bewölkung, hoher Einstrahlung und hohen Temperaturen. Da eine meteorologische Beschreibung des Gesamtzeitraums bereits oben vorgenommen wurde, beschränkt sich die folgende meteorologische Charakterisierung räumlich auf den Großraum Berlin und zeitlich auf den Zeitraum des FluMOB-Projekts (23.7.-27.7. 1994), der auch für die Modellevaluierung benutzt wird.

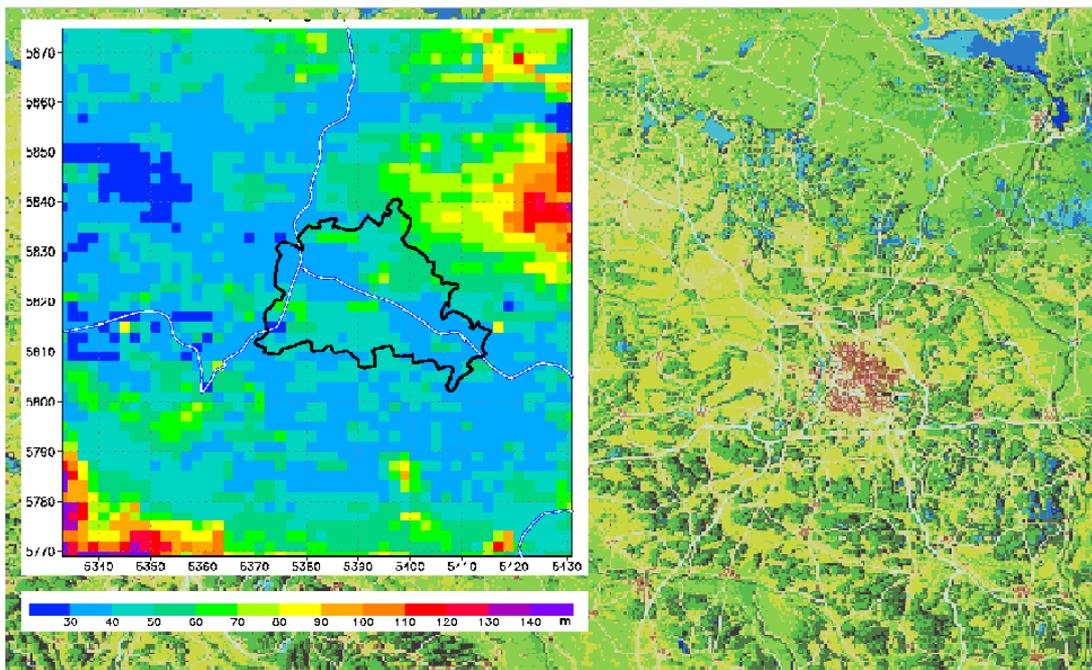
Mitteleuropa und damit Berlin lagen während der ersten drei Tage der Beobachtungskampagne unter dem Einfluß eines Langwellenhochkeils mit höherem Luftdruck über dem Raum Ostsee, Baltikum und Skandinavien und tieferem Luftdruck über dem Ostatlantik. Aufgrund dieser Druckverteilung wurde Berlin vom 23.7. bis zum 25.7. 1994 mit Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 4 m/s aus östlichen bis südöstlichen Richtungen angeströmt. Die Tempe-

peraturen stiegen bei hoher täglicher Sonnenscheindauer deutlich über 30°C, die Bewölkung bestand aus hohen Cirrus-Wolken mit einer Gesamtbedeckung von 1 bis 2 Achteln. Die Mischungsschichthöhe erreichte in dieser Phase eine vertikale Ausdehnung von 3000 m und mehr.

Im Verlauf des 26.7. überquerte ein Tiefausläufer mit vorauslaufender Konvergenzlinie ganz Deutschland. Mit dem Durchzug des Tiefausläufers kam es zu einem Luftmassenwechsel, der deutlich feuchtere Luft nach Berlin führte. Durch den Druckanstieg auf der Rückseite des flachen Tiefausläufers geriet Berlin am 26.7. und 27.7. 1994 in eine bodennahe nordöstliche bis nördliche Strömung. In der Höhe blieb die eher südwestliche Strömung erhalten. Am 26.7. bildeten sich im Bereich der eingeflossenen feuchteren Luftmassen tiefe und mittelhohe Wolken, was zu einem Rückgang der Sonnenscheindauer und deutlich niedrigeren Mischungsschichthöhen als in der ersten Phase der Meßkampagne führte. Die Temperaturen überstiegen aber weiterhin die 30°C-Grenze. Auch die Windgeschwindigkeiten blieben niedrig, wobei insbesondere am 27.7. nur Windgeschwindigkeiten von 1 bis 2 m/s gemessen wurden.

Insgesamt wurden in Berlin ab dem 22.7. an 11 Tagen fortlaufend Tageshöchsttemperaturen von mehr als 30°C registriert. Diese hohen Temperaturen brachten Berlin mit einem Klimamittel von 22,8°C den wärmsten Juli dieses Jahrhunderts.

Abb. 7.4-1: Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg



#### 7.4.2 Modellsystems CALGRID/REM3

Das für die Wirkungsanalysen in der Modellregion Berlin-Brandenburg eingesetzte Modellsystem ist identisch mit demjenigen der Rhein-Main-Neckar-Untersuchung (Stern et al., 1997). Es besteht aus den beiden mesoskaligen Modellen CALMET (Scire et al., 1995) und CALGRID (Yamartino et al., 1989), dem großräumigen meteorologischen Analysesystem TRAMPER (Reimer und Scherer, 1992) und einem graphischen Aufbereitungssystem auf der Basis von GRADS (Doty, 1995). Zur Erzeugung der Anfangs- und Randbedingungen wird das großräumige photochemische Transportmodell REM3 (Stern, 1994; Stern et al., 1995; Hass et al., 1997) verwendet.

CALMET ist der für das Transportmodell CALGRID entwickelte meteorologische Treiber, der auf der Basis von Messungen alle für CALGRID benötigten Daten erzeugt. CALMET verwendet als Eingangsdaten alle verfügbaren meteorologischen Standard-Bodenmessungen, die verfügbaren Vertikalsondierungen sowie Landnutzungsdaten und topographische Daten. Aus diesen Daten berechnet das Modell mit Hilfe von Interpolationsmethoden und Strömungs-adaptionsalgorithmen unter Verwendung von Grenzschichttheorie alle benötigten Felder.

TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research) ist ein großräumiges diagnostisches meteorologisches Analysesystem, das den Antrieb für CALMET liefert. Mit TRAMPER werden ausgehend von der großräumigen Wetterlage im Untersuchungsgebiet Vertikalprofile für alle meteorologischen Parameter erstellt. Diese Vertikalprofile dienen als Stützwerte für das CALMET-Modell, das unter weiterer Einbeziehung lokaler Meßwerte die meteorologischen Felder für CALGRID in der definierten Auflösung berechnet. TRAMPER liefert auch alle zum Betreiben des großräumigen photochemischen Modells REM3 benötigten meteorologischen Daten.

CALGRID ist ein dreidimensionales photochemisches Transportmodell mit Modulen für den horizontalen und vertikalen Transport, die horizontale und vertikale Diffusion, trockene Deposition sowie für die photochemischen Reaktionen. Als photochemischer Mechanismus wird der SAPRC-90-Mechanismus verwendet, eine kompakte Version des am Statewide Air Pollution Research Center (SAPRC) der Universität Kalifornien entwickelten SAPRC Mechanismus (Carter, 1990).

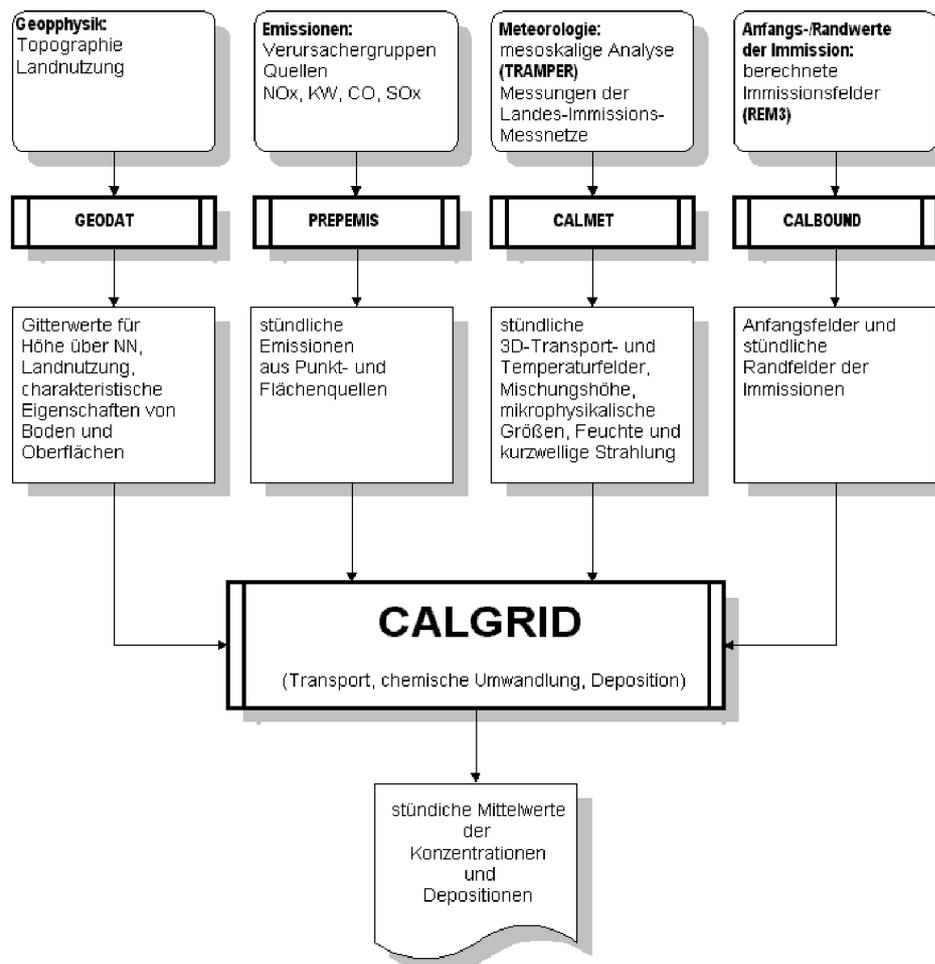
REM3 (Regional Eulerian Model with 3 chemistry schemes) ist ein großräumiges dreidimensionales photochemisches Ausbreitungsmodell zur Simulation der Bildung, des Transports und der Entfernung von Oxidantien in der planetarischen Grenzschicht. Das Modell enthält drei verschiedene photochemische Reaktionsmechanismen, von denen einer der ebenfalls im CALGRID-Modell integrierte SAPRC-90-Mechanismus ist. REM3 arbeitet mit dem Konzept der dynamischen Schichten, die in Abhängigkeit der lokalen meteorologischen Verhält-

nisse expandieren oder kontrahieren. Der Ausbreitungsraum wird dazu in drei Schichten aufgeteilt. Das REM3 ist eines der beiden Modelle, die im Teil A des FE-Vorhabens 104 02 812 zur europaweiten Oxidantienberechnung zum Einsatz gekommen sind (Stern et al., 1995; Motz et al., 1996).

Die gesamte graphische Auswertung wird mit einem auf GRADS (Grid Analysis and Display System) beruhenden Analysesystem vorgenommen. GRADS wurde am Center for Ocean - Land - Atmosphere Interactions der Universität von Maryland entwickelt ( Doty, 1995).

Die beiden Modelle CALMET und CALGRID sowie die zu Anwendung notwendigen Eingabedaten sind in Yamartino (1989) und Stern et al. (1997) näher beschrieben. Für Einzelheiten zu REM3 sei auf Stern (1994) verwiesen. Die Abbildung 7.4-2 gibt einen schematischen Überblick zum Aufbau des Modellsystems.

Abb. 7.4-2: Das CALGRID-Modellsystem



### 7.4.3 Basisdaten

#### a) Emissionsdaten

Die für die Modellanwendung Berlin-Brandenburg benötigten Emissionsdaten wurden von der Prognos AG (Hartmann und Motz, 1997) als Flächen- und Punktquellen zur Verfügung gestellt. Die Maschenweite des Flächenquellenkatasters beträgt 2 km. Emissionen von Kraftwerken und großen Industrieanlagen sind als Punktquellen erfaßt, alle anderen Verursachergruppen als Flächenquellen. Details zur Erhebungsmethode können in den entsprechenden Berichten der Prognos AG gefunden werden.

Die Emissionsdaten umfassen die Stoffe  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , CO und Kohlenwasserstoffe (VOC, volatile organic compounds) unterteilt nach 21 Verursachergruppen. Die Tabelle 7.4.1 zeigt die verwendeten Verursachergruppen mit den dazugehörigen Jahresemissionen im Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg. Die Emissionen des Kfz-Verkehrs stellen bei den Stickoxiden mit ca. 70% und bei den anthropogenen Kohlenwasserstoffen mit ca. 60% den Hauptanteil an den Gesamtemissionen im Untersuchungsgebiet. Weitere große Stickoxidemittenten sind die Kraftwerke und die industriellen Feuerungen. Bei den Kohlenwasserstoffen fällt vor allem noch der gewerbliche und private Lösemittelverbrauch ins Gewicht. Die Abbildungen 7.4-3 und 7.4-4 zeigen die flächenhafte Verteilung der jährlichen Kohlenwasserstoff- bzw. der Stickoxidemissionen. In den Abbildungen werden nur die Emissionen der Flächenquellen betrachtet. Emissionsschwerpunkt ist Berlin. Der Berliner Autobahnring und die auf den Ring zuführenden Autobahnen zeichnen sich klar in den flächenhaften  $\text{NO}_x$ - und VOC-Emissionen ab, was die dominierende Rolle der Verkehrsemissionen verdeutlicht.

Biogene Emissionen wurden von Prognos für die Verursachergruppen "Konifere Emittenten", "Isopren-Emittenten" und "Nicht-Isopren-Emittenten" für eine Referenztemperatur von 30°C zur Verfügung gestellt.

Die Jahresemissionen wurden für die CALGRID-Rechenläufe mit von Prognos erarbeiteten Aktivitätsfaktoren in stündliche, damit episodenspezifische Emissionen umgewandelt. Den Aktivitätsfaktoren liegen Jahres-, Wochen- und Tagesgänge für die einzelnen Verursachergruppen zugrunde. Die Aktivitätsfaktoren für die biogenen Emissionen wurden unter Verwendung der aktuellen Temperatur berechnet. In der Tabelle 7.4.2 sind die auf diese Weise abgeleiteten Tagesemissionen für Montag den 25. Juli 1994 zusammengestellt. Den größten Anteil an den Kohlenwasserstoffen stellen mit über 40% die biogenen Quellen. Dies ist nicht verwunderlich, da an diesem, wie auch an den anderen Tagen der FluMoB-Kampagne, Tagesspitzentemperaturen von deutlich über 30°C beobachtet wurden (siehe unten) und die Waldflächen im Untersuchungsgebiet einen Anteil von über 30% haben. Es folgen die Auspuffemissionen Pkw mit 22%. Die dritte große Gruppe ist der kommerzielle Lösemittelverbrauch (ca.12%). Bei den Stickoxiden liefern die Auspuffemissionen Lkw mit über 50% den

größten Einzelbeitrag gefolgt von den Auspuffemissionen Pkw mit 23%. Außer den industriellen und kleingewerblichen Prozessen (ca. 10%) sowie den großen Kraftwerken und Industrieanlagen (Punktquellen, ca. 7%) gibt es keine weiteren bedeutenden Stickoxid-Verursachergruppen.

Die Aufteilung der Gesamtkohlenwasserstoffe auf die Modellspezies des SAPRC-90-Mechanismus erfolgt mit Hilfe verursachergroupenspezifischer Kohlenwasserstoffprofile (siehe Stern, 1994). Diese Vorgehensweise ermöglicht sowohl eine genaue Zuordnung einzelner Kohlenwasserstoffe entsprechend den Vorgaben der Mechanismusentwickler als auch eine Anpassung der kinetischen und mechanistischen Parameter des Mechanismus auf das spezifische Kohlenwasserstoffgemisch des Untersuchungsgebiets (Carter, 1990). Es sei angemerkt, daß eine solche Anpassung auch bei der Umsetzung der verschiedenen Emissionsszenarien in Modelleingangsdaten vorgenommen wurde, da jedem Szenario ein anderes Kohlenwasserstoffgemisch zugrunde liegt. Die Tabelle 7.4.3 zeigt die für den Istzustand der Emissionen aus den verursachergroupenspezifischen Kohlenwasserstoffprofilen abgeleitete VOC-Zusammensetzung an einem ausgewählten Tag des Untersuchungszeitraums in den Modellspezies des SAPRC-90-Mechanismus. Erwartungsgemäß stellen die biogenen Emissionen den größten Anteil. Biogene Alken-Emissionen werden repräsentiert durch das Modellspezies OLE3, alle anderen werden der Alkan-Gruppe ALK1 zugeschlagen. Ca. 40% der Masse in der Gruppe ALK1<sup>5</sup> sind daher an dem ausgewählten Tag auf biogene Emissionen zurückzuführen.

---

<sup>5</sup> Alle biogenen Emissionen, die nicht einem spezifischen Kohlenwasserstoff zuzuordnen sind, werden im SAPRC-90-Mechanismus der Gruppe ALK1 zugeschlagen.

Abb. 7.4-3: Anthropogene Kohlenwasserstoffemissionen der Flächenquellen in t/a im 2kmx2km-Raster der Region Berlin-Brandenburg

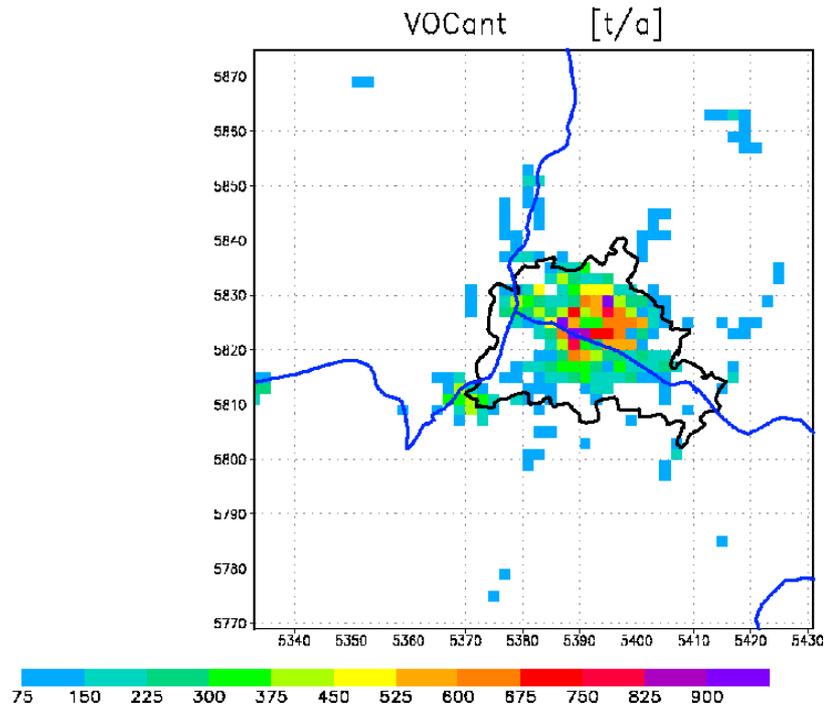
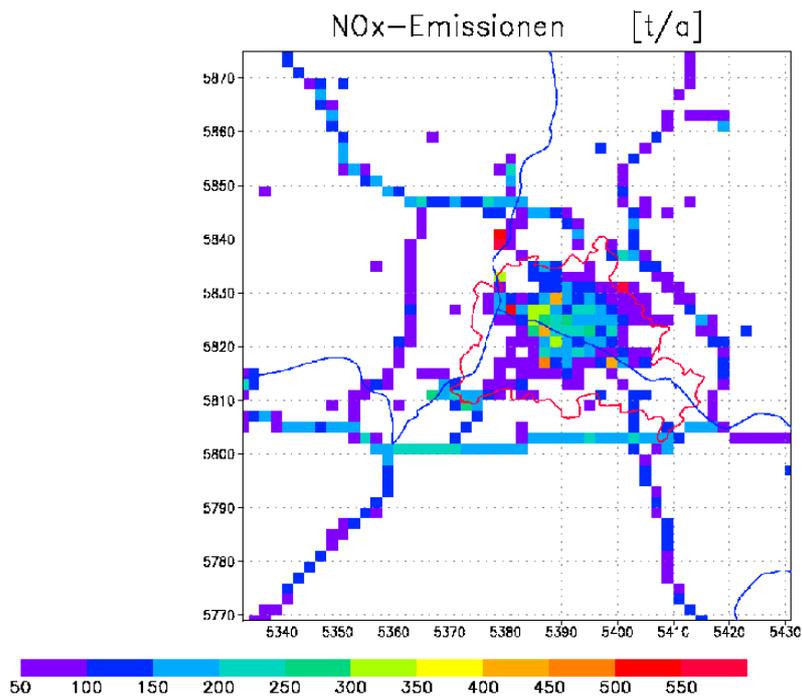


Abb. 7.4-4: NOx-Emissionen der Flächenquellen in t/a im 2kmx2km-Raster der Region Berlin-Brandenburg



Tab. 7.4.1: Anthropogene Jahresemissionen im Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg

Verursacherguppe	NOX (t/a)	VOC (t/a)	CO (t/a)	SOX (t/a)
Auspuffemissionen PKW	29.902	57.348	271.700	1.727
Auspuffemissionen LKW	50.392	8.145	51.508	2.682
Verdunstungsemissionen aus Abstellvorgängen Kfz	-	10.437	-	-
Verdunstungsemissionen aus Tankatmung Kfz	-	2.706	-	-
Verdunstungsemissionen aus Kunststofftankwanddiffusion	-	406	-	-
Umschlag/Lagerung von Mineralölprodukten	-	498	-	-
Verteilung von Kraftstoffen	-	5049	-	-
Industrie/Kleingew. Prozesse Lösemittelanwendung	-	23.165	-	-
Industrielle Feuerungen	13.045	2.260	9.589	25.820
Kleingewerbl. Feuerungen	3.718	1.760	38.530	7.021
Lösemittel Haushalte	-	11.902	-	-
Warmwasser Haushalte	723	132	1.517	443
Flugzeugemissionen bis 100m	188	952	2.103	32
Flugzeugemissionen zwischen 100m und 300m	143	17	76	26
Flugzeugemissionen zwischen 300m und 1000m	443	34	136	45
Binnenschifffahrt gewerblich	387	70	105	19
Binnenschifffahrt privat	42	803	1606	1
Off-Road gewerblich	1.445	3.377	24.933	82
Off-Road privat	112	2.449	21.571	4
Schienenverkehr	1.655	331	662	132
Punktquellen	11.389	800	1.575	10.226
<b>Summe</b>	<b>113.584</b>	<b>132.641</b>	<b>425.611</b>	<b>48.260</b>

Quelle: Angaben der Länder Berlin und Brandenburg; Berechnungen und Schätzungen der Prognos AG

Tab. 7.4.2: VOC und NOx-Emissionen im Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg in t/d für Montag, 25.07.1994 (Gesamtsumme und prozentuale Anteile der einzelnen Verursachergruppen)

Verursachergruppe	NOX	VOC
Auspuffemissionen PKW	23,3%	22,1%
Auspuffemissionen LKW	53,6%	4,5%
Verdunstungsemissionen aus Abstellvorgängen Kfz	-	4,7%
Verdunstungsemissionen aus Tankatmung Kfz	-	2,1%
Verdunstungsemissionen aus Kunststoffankwanddiffusion	-	0,3%
Umschlag/Lagerung von Mineralölprodukten	-	0,4%
Verteilung von Kraftstoffen	-	2,3%
Industrie/Kleingew. Prozesse Lösemittelanwendung	-	11,7%
Industrielle Feuerungen	10,3%	0,4%
Kleingewerbl. Feuerungen	0,9%	0,1%
Lösemittel Haushalte	-	5,1%
Warmwasser Haushalte	0,6%	<0,1%
Flugzeugemissionen bis 100m	0,2%	0,4%
Flugzeugemissionen zwischen 100m und 300m	0,1%	<0,1%
Flugzeugemissionen zwischen 300m und 1000m	0,4%	<0,1%
Binnenschifffahrt gewerblich	0,3%	<0,1%
Binnenschifffahrt privat	0,1%	0,9%
Off-Road gewerblich	1,9%	2,3%
Off-Road privat	0,1%	1,0%
Schienenverkehr	1,5%	0,2%
Biogene Quellen	-	41,1%
Punktquellen	6,7%	0,3%
<b>Summe</b>	<b>339 t/d</b>	<b>552 t/d</b>

Quelle: Berechnungen und Schätzungen der Prognos AG

Tab. 7.4.3: Prozentualer Anteil der Modellspezies des SAPRC-Mechanismus an den Gesamtkohlenwasserstoffen (Mittelwert für Montag, den 25.07.94)

Modellspezies des SAPRC-90 Mechanismus	Anteil an den VOC
ALK1	31,8 %
ALK2	13,4%
ARO1	4,5%
ARO2	7,2%
ETHE	3,6%
HCHO	0,8%
CCHO	0,1%
RCHO	0,3%
OLE1	2,8%
OLE2	1,7%
OLE3	30,6%
MEK	1,5%
ETOH	1,3%
MEOH	0,4%

**b) Geophysikalische Daten**

An geophysikalischen Daten benötigt CALGRID eine Klassifizierung der Landnutzung mit zugehöriger Oberflächenrauigkeit sowie die Topographie. Von der Prognos AG wurden dazu für jedes Rechenraster die topographische Höhe sowie der prozentuale Anteil der in Tabelle 7.4.4 angeführten sechs Landnutzungsklassen geliefert. Die Waldgebiete überdecken ca. 35% der Fläche des Untersuchungsgebiets. Es folgen die landwirtschaftlich genutzten Flächen mit ca. 31% und städtisch bebauten Flächen mit ca. 20%. Knapp die Hälfte der bebauten Flächen entfällt dabei auf Berlin.

Tab. 7.4.4: Landnutzungsklassen und prozentuale Anteile der einzelnen Klassen an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes

Landnutzungsklasse	Prozentualer Anteil an der Gesamtfläche
Städtisch bebaute Flächen	20,2%
Landwirtschaftlich genutzte Flächen	30,9%
Weiden/Wiesen	7,6%
Waldgebiete	35,2%
Wasserflächen	6,0%
Feuchtgebiete/Sumpf	<0,1%

**c) Immissionsdaten**

Immissionsdaten zur Verifizierung der Modellergebnisse standen zur Verfügung aus

- dem Meßnetz des Landes Berlin,
- dem Meßnetz des Landes Brandenburg,
- dem Datenpool der während des FluMOB-Projekts erhobenen Flugzeug- und Bodenmessungen.

**d) Meteorologische Daten**

Meteorologische Meßdaten werden benötigt zur diagnostischen Aufbereitung der meteorologischen Eingabedaten für die beiden photochemischen Transportmodelle REM3 und CALGRID. Zur Erzeugung der meteorologischen Treiberdateien für das großräumige Transportmodell REM3 wurden europaweit alle verfügbaren synoptischen Beobachtungen und aerologischen Daten sowie Landnutzung und Topographie herangezogen. Mit dem Programmsystem TRAMPER, einem meteorologischen Datenanalyse-System, wurden dann täglich sechsstündlich dreidimensionale mesoskalige meteorologische Analysen in einer Auflösung von 0,5° Länge und 0,25° Breite erzeugt und in der Datenbank am Institut für Meteorologie der FU Berlin gespeichert. Das dabei verwendete Analysegitter zeigt die Abbildung 7.4-5. Aus diesen Analysen erfolgt unter Verwendung dreistündlich vorliegender Synopdaten die Erstellung der dreistündlichen meteorologischen Treiberdateien für REM3 (Reimer und Scherer, 1992; Stern et al., 1995).

Die dem Antrieb des REM3 zugrundeliegenden mesoskaligen Analysen des meteorologischen Datensystems TRAMPER dienen auch als Grundfelder für die kleinräumige CALGRID-Anwendung. Damit ist die Anbindung der lokalen an die überregionalen Strömungsverhältnis-

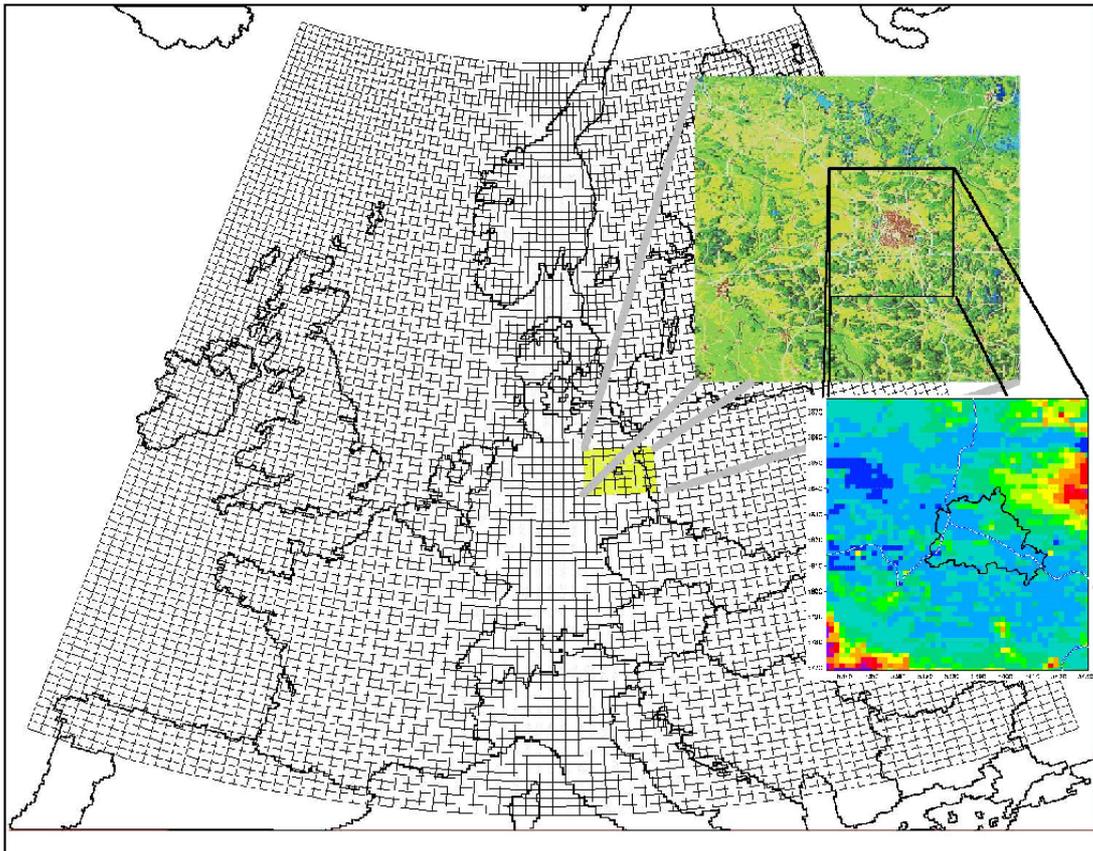
se gewährleistet. Die mesoskaligen Grundfelder werden dann mit Hilfe des meteorologischen Vorschaltmodells CALMET unter Berücksichtigung lokaler Messungen und der kleinräumigen topographischen Bedingungen zeitlich (1-stündlich) und räumlich auf das  $2 \times 2 \text{ km}^2$ -Gitter interpoliert. Die dafür verwendeten lokalen meteorologischen Messungen stammen aus den Datennetzen der Länder Berlin und Brandenburg. Details zu den dabei verwendeten Methoden können in Stern et al. (1997) gefunden werden.

#### **e) Anfangs- und Randbedingungen**

Die Anfangs- und Randbedingungen für das CALGRID-Modell wurden entsprechend der Vorgehensweise im Rhein-Main-Neckar-Gebiet (Stern et al., 1997) auch im Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg mit dem großräumigen photochemischen Transportmodell REM3 (Stern, 1994; Stern et al., 1995; Hass et al., 1997) erstellt. Dieses Modell wurde dazu mit dem SAPRC-90-Mechanismus auf den Zeitraum vom 20. Juli 1994 bis zum 6. August 1994 in einem ganz Mitteleuropa umfassenden Modellgebiet angewandt (Abb. 7.4-5). Das dazu eingesetzte Verfahren zur meteorologischen und emissionsseitigen Datenaufbereitung ist im Detail in Stern et al. (1995) beschrieben. Eine ausführliche Diskussion der großräumigen Simulation dieser Periode auf der Basis des Carbon-Bond-IV-Mechanismus kann ebenfalls in Stern et al. (1995) gefunden werden.

Die mit dem REM3 berechneten Konzentrationen wurden für ein Areal, in das das CALGRID-Modellgebiet (Abb. 7.4-5) vollständig eingebettet ist, für alle Spezies des SAPRC-90-Mechanismus stündlich in einer Datei abgelegt. Die Übertragung dieser Daten auf das CALGRID-Gitter erfolgt mit Hilfe eines einfachen Interpolationsprogrammes, das den einzelnen CALGRID-Zellen die räumlich entsprechende REM3-Zelle zuordnet. Die Randbedingungen für die CALGRID-Rechenläufe werden dabei stündlich aus den Konzentrationen derjenigen vertikalen REM3-Scheiben abgeleitet, die am nächsten zum Rand des CALGRID-Gebietes liegen, dieses aber nicht überdecken.

Abb. 7.4-5: Gitter für das TRAMPER-Analyseverfahren und das REM3-Modell - Gitterweite 0,5°Länge und 0,25°Breite - sowie das CALGRID-Raster des Untersuchungsgebietes Berlin-Brandenburg



#### 7.4.4 Basislauf

##### a) Überblick

Das CALGRID-Modell wurde auf den Zeitraum vom 22. Juli 1994 bis zum 7. August 1994 in dem in der Abb. 7.4.1 gezeigten Gebiet mit einer horizontalen Maschenweite von  $2 \times 2 \text{ km}^2$  angewandt. Die Simulation beginnt am 22. Juli 1994, 0 Uhr mit für alle Spezies aus den Berechnungen des REM3 unter Verwendung des SAPRC-90-Mechanismus abgeleiteten Anfangskonzentrationfeldern. Die diesen Anfangsfeldern zugrundeliegenden REM3-Berechnungen wurden bereits am 20. Juli 1994 aufgesetzt, um ein Einschwingen des REM3 auf die meteorologische und emissionsseitige Situation zu gewährleisten. Die Bereitstellung der CALGRID-Randbedingungen aus den REM3-Berechnungen erfolgte stündlich für den gesamten Simulationszeitraum.

Der Basislauf wird im folgenden anhand des Vergleichs von berechneten und gemessenen Oxidantienfeldverteilungen und Zeitreihen an ausgewählten Stationen im Untersuchungsgebiet diskutiert. Bei den Feldverteilungen werden die berechneten Oxidantienkonzentrationen vom 23. bis zum 27. Juli 1994 mit den während dieser Periode im Rahmen des FluMOB-Projekts erhobenen Flugzeug- und Bodenmessungen verglichen. Die beschriebenen Zeitreihen umfassen den Zeitraum vom 22. Juli bis zum 28. Juli 1994. Für den restlichen Zeitraum der Simulation wurde auf eine Verifizierung der Modellergebnisse verzichtet, da die dazu notwendigen Meßdaten nicht in ausreichender Dichte zur Verfügung standen.

Bei der Beurteilung der Modellergebnisse anhand eines Vergleichs von Berechnungen mit Messungen sind zwei Punkte zu berücksichtigen:

- a) Die Rechenwerte repräsentieren Mittelwerte eines Volumens, das aus der Horizontalausdehnung der betrachteten Gitterzelle ( $2000 \text{ m} \times 2000 \text{ m}$ ) mal der Vertikalausdehnung der betrachteten Modellschicht (20 m am Boden bis mehrere hundert m in der Höhe) gebildet wird, Messungen dagegen sind insbesondere in Stadtgebieten nur repräsentativ für ein kleines Gebiet um die Meßstelle.
- b) Nicht nur die Berechnungen sondern auch die Messungen unterliegen gewissen Ungenauigkeiten. Die Qualitätssicherung der im Rahmen des Projekts FluMoB eingesetzten Meßgeräte führte zu folgender Genauigkeitsabschätzung:

Ozon: +/- 15% oder +/- 2 ppb

Stickoxide: +/- 25% oder +/- 2ppb

In diesem Abschnitt wird eine stark gekürzte Darstellung der horizontalen und vertikalen Feldverteilungen (als Auszug aus dem gesonderten Bericht) gegeben. Die Abbildungen in diesem Kapitel zeigen jeweils berechnete Oxidantienverteilungen als Stundenmittel am Boden und in ca. 300 m Höhe (5. Modellschicht zwischen 200 und 400 m). Diese Modellschicht dient zum Vergleich mit den Flugzeugmessungen, da ein Großteil der Flugbewegun-

gen in diesem Höhenbereich durchgeführt wurde. Die dargestellten Zeiten variieren von Tag zu Tag, da diejenigen Stunden ausgewählt wurden, in denen entweder die meisten Flugzeugmessungen zur Verfügung standen oder in die das berechnete Ozonmaximum fiel. In die berechneten Bodenkonzentrationsverteilungen sind die an Stationen der Meßnetze Berlins (BLUME) und Brandenburgs (LUAB) sowie an den FluMoB-Sondermeßstationen (Container und Meßwagen) zur dargestellten Zeit beobachteten Oxidantienwerte eingeblendet.

Die während der Kampagne eingesetzten Meßwagen wurden im jeweils vermuteten Lee- bzw. Luv-Bereich von Berlin an Orten positioniert, die möglichst wenig durch lokale Stickoxidemissionen beeinflusst sind. Die berechnete Oxidantienverteilung der Modellschicht 5 enthält die Messung am Turm in Frohnau (Meßhöhe 324 m) sowie die während des dargestellten Stundenzitraums durchgeführten Flugzeugmessungen. Die Bodenmeßwerte sind Stundenmittel, die dargestellten Flugzeugmessungen Minutenmittelwerte. Beim Vergleich von Messung und Rechnung müssen also nicht nur die bereits angeführten unterschiedlichen räumlichen Auflösungen (Volumenmittel der Rechnung gegen Punktwert der Bodenmessung, bzw. Linienmittelwert der Flugmessung) sondern auch die unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen berücksichtigt werden. Der im dargestellten Stundenzitraum zurückgelegte Flugweg ist durch Symbole verschiedener Größe markiert. Je größer das Symbol, desto höher ist der in diesem Bereich gemessene Konzentrationswert. Die ausgewertete Flugzeit sowie der größte und kleinste während dieser Zeit gemessene Konzentrationswert sind ebenfalls in den Abbildungen angegeben. Die Farbe der Bezifferung entlang des Flugweges gibt an, in welcher Höhe der entsprechende Meßwert gewonnen wurde.

Die Abbildung 7.4-6 zeigt für den 25.07.94 die zwischen 15 und 16 Uhr berechneten und gemessenen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationsverteilungen. Gegenüber dem Vormittag sind die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen stark abgesunken. Die entsprechend der Windrichtung nach Nordwesten zeigende Fahne ist am Boden und insbesondere in der Höhe aber noch deutlich zu erkennen. Die Lage der berechneten  $\text{NO}_2$ -Fahne deckt sich genau mit der während des Nachmittagflugs ermittelten  $\text{NO}_2$ -Fahne. Dem maximalen Meßwert von 3 ppb stehen in diesem Bereich berechnete Werte um die 4 bis 5 ppb gegenüber.

Die Ozon-Konzentrationen im Luv sind in Messung und Rechnung am 25.07.94 am Nachmittag (Abb. 7.4-7) deutlich höher als an den beiden Vortagen, d. h. am 25. Juli wurde der Großraum Berlin von stärker belasteten Luftmassen angeströmt. Der aus den Messungen ableitbare Ozonanstieg von Luv nach Lee liegt bei ca. 15 bis 20 ppb. Die Modellrechnung ergibt an diesem Tag eine vergleichbare Nettoozonproduktion. Die maximalen bodennahen Luv-Lee-Unterschiede werden in der Rechnung zwischen 13 und 14 Uhr ermittelt. Dazu zeigt die Abbildung einen Ost-West-Vertikalschnitt durch das Modellgebiet. Der Schnitt verläuft nördlich von Berlin entlang des Gauß-Krüger-Hochwerts 5841 und wurde so gelegt, daß er das berechnete bodennahe Ozonmaximum nordwestlich von Berlin schneidet (siehe Abb. 7.4-8). Die Abbildung enthält zwei Informationen: Die entlang des Schnitts berechnete verti-

kale Ozonverteilung vom Boden bis zur Modelobergrenze und die am Boden entlang des Schnitts berechnete Ozonkonzentration am 25. Juli 1994, 13 bis 14 Uhr MEZ. Am Ostrand strömem ca. 80 ppb Ozon in das Modellgebiet. Bis zum Rechtswert 5380 (am Westrand des Berliner Stadtgebiets) bleibt die Bodenkonzentration nahezu unverändert. Dann erfolgt der Anstieg bis auf ca. 105 ppb am Westrand des Modellgebiets. Aus dem Schnitt wird auch ersichtlich, daß die hohen Ozonkonzentrationen nur in den untersten 1000 bis 1500 m der Atmosphäre berechnet werden. Insgesamt sind die gemessenen und auch berechneten Ozonkonzentrationen im Lee von Berlin am 25. Juli 1994 höher als am Tage zuvor. Allerdings ist auch die Vorbelastung an diesem Tage deutlich angewachsen, so daß sich das Ausmaß der Ozonproduktion durch die Emissionen des Großraums Berlin nicht wesentlich von derjenigen am Tag zuvor unterscheidet. Die Ozonbildung setzt aber später ein und läuft dafür schneller ab, so daß sowohl das berechnete als auch das gemessene Ozonmaximum an diesem Tage näher an der Stadt gefunden werden. Dies ist möglicherweise auf die am Montag sehr viel höheren Emissionen hochreaktiver Kohlenwasserstoffe zurückzuführen, die durch ihre Oxidation schnell zum Ozonaufbau beitragen.

Abb. 7.4-6: Berechnete NO<sub>2</sub>-Konzentration in ppb am 25.07.94, Stundenmittel 15-16 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Windfeld und Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (200-400m) mit Flugzeugmessungen und Windfeld

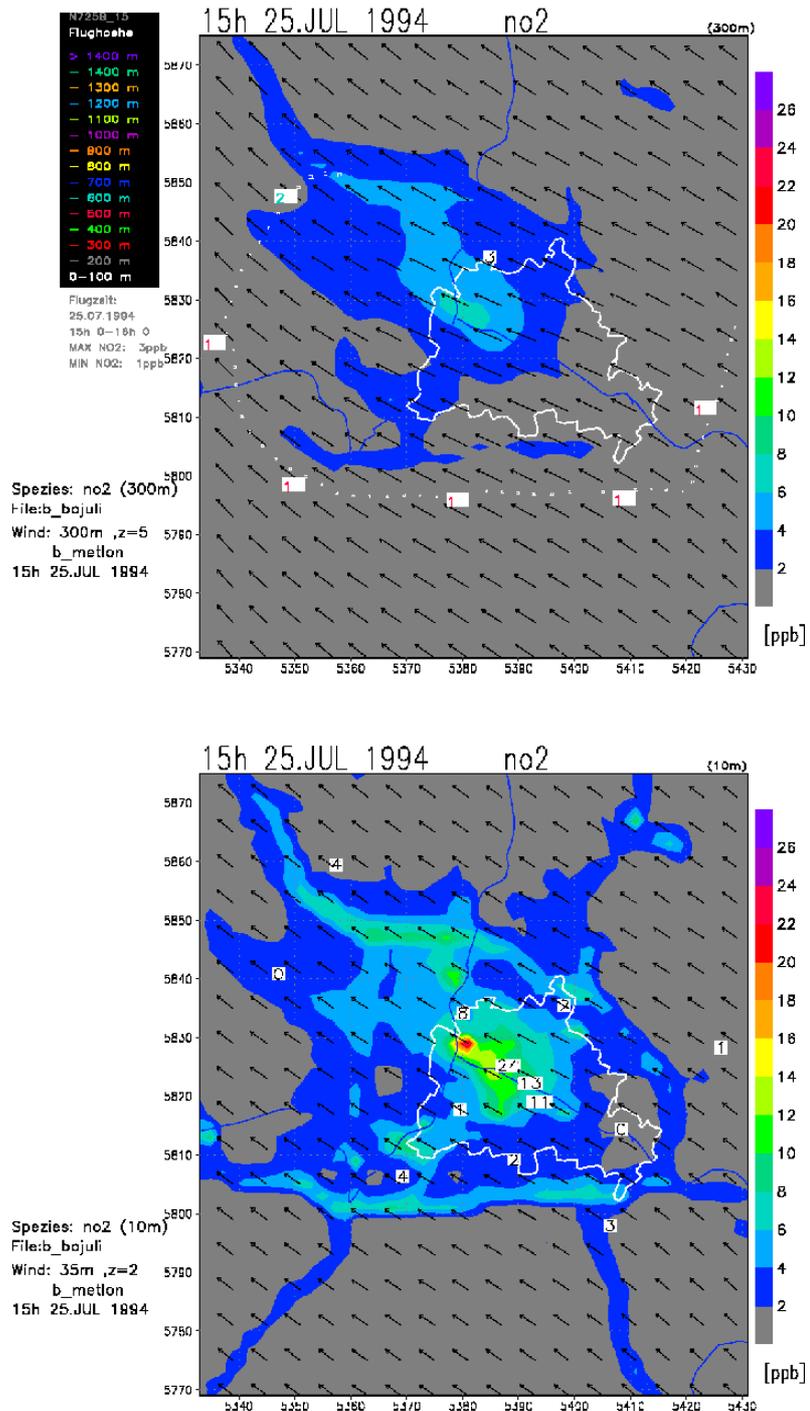


Abb. 7.4-7: Berechnete O<sub>3</sub>-Konzentration in ppb am 25.07.94, Stundenmittel 15-16 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Windfeld und Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (200-400m) mit Flugzeugmessungen und Windfeld

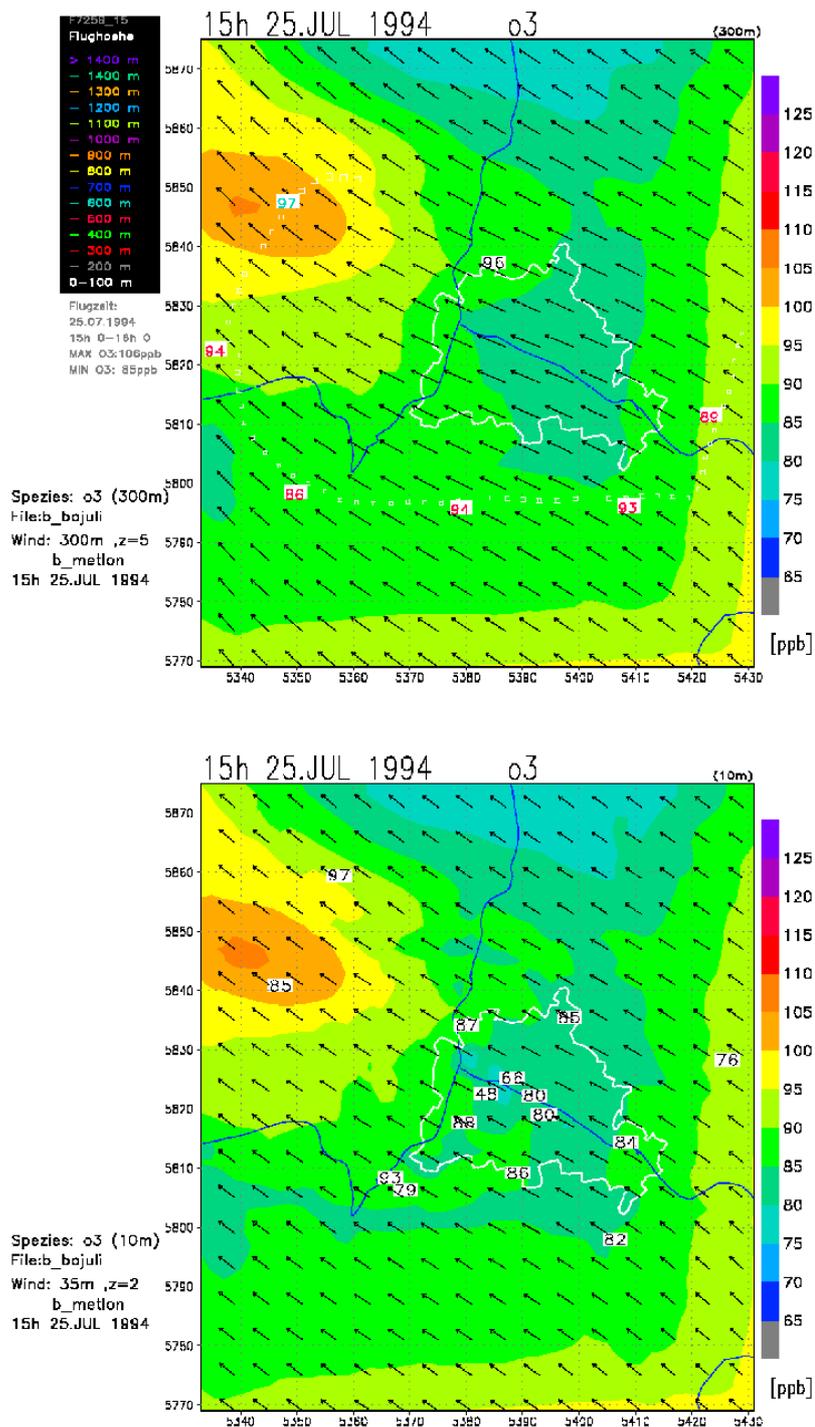
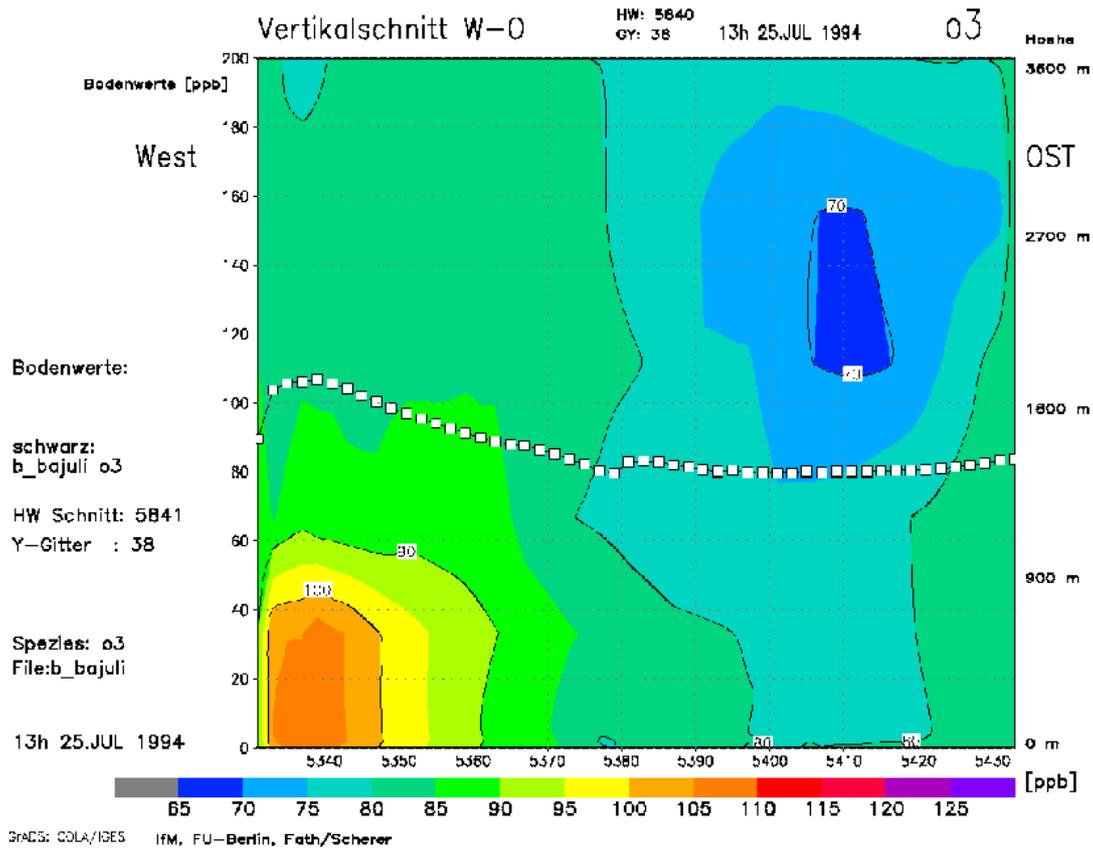


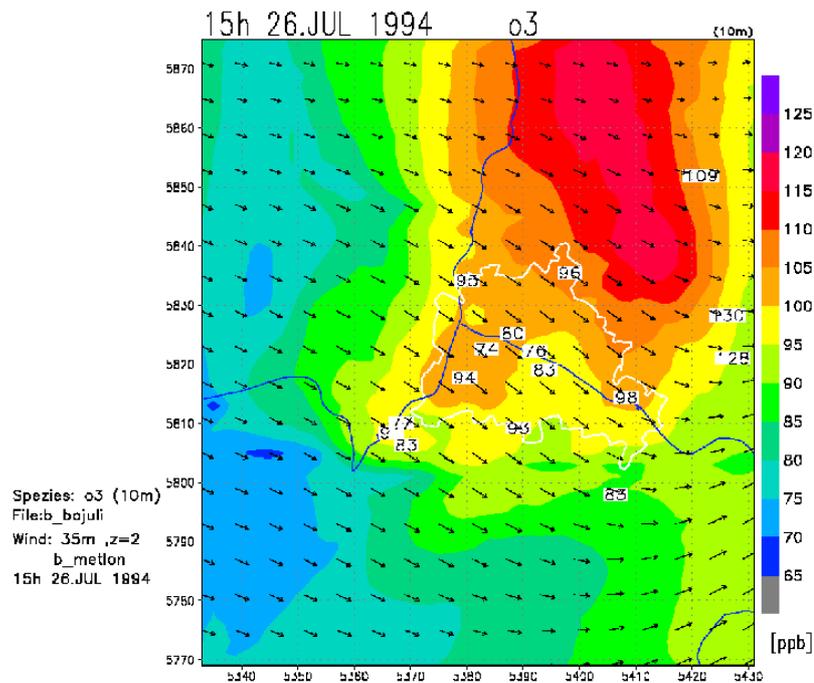
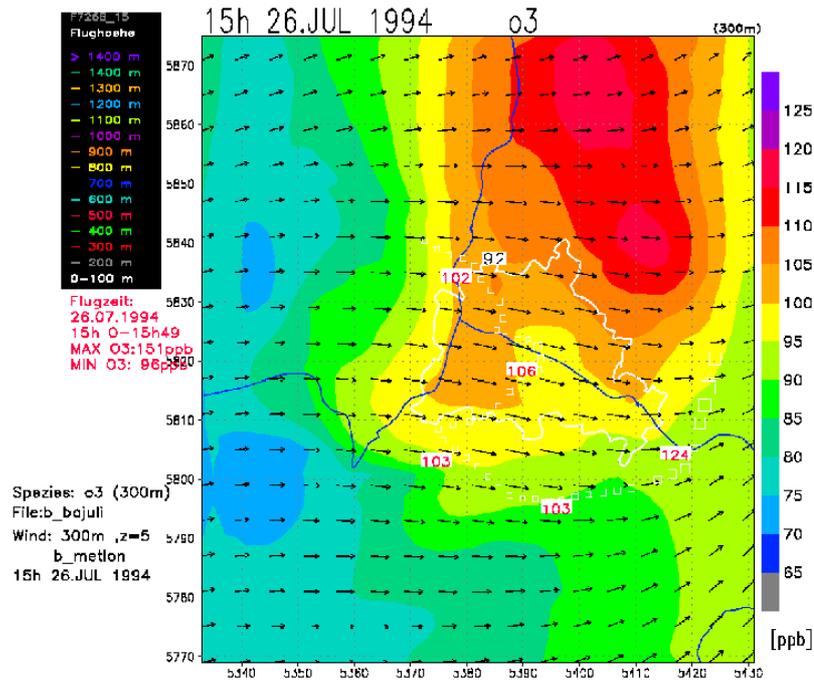
Abb. 7.4-8: West-Ost-Vertikalschnitt der berechneten Ozonverteilung durch das Modellgebiet. Der Schnitt verläuft nördlich von Berlin entlang des Gauß-Krüger-Hochwertes 5840. Isolinien: berechnete Konzentrationen in ppb am 25.7.94, Stundenmittel 13-14 Uhr MEZ vom Boden bis zur Modellobergrenze (rechte Skala); zusätzlich: O3-Bodenkonzentrationen entlang des Schnitts (linke Skala)



Im Verlauf des 26. Juli 1994 begann sich die Wetterlage umzustellen. Der Wind drehte mit Durchzug eines schwachen Tiefausläufers in Bodennähe von Südost über Süd auf westliche Richtungen. Die Mischungsschichthöhe, die an den Tagen zuvor bis in Höhen von 3000 m und mehr reichte, hatte am 26. Juli nur noch eine vertikale Ausdehnung von ca. 1500 m. Die Sonnenscheindauer lag an diesem Tag niedriger als an den Tagen zuvor, da sich im Bereich der Konvergenzzone und der eingeflossenen feuchteren Luftmassen mittelhohe und tiefe Wolken bildeten.

Wie schon am Tage zuvor, deckt sich am Morgen das Gebiet hoher  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen mit dem Gebiet niedriger Ozonkonzentrationen. Insbesondere im Stadtgebiet und im Lee macht sich also wieder der Titrationseffekt bemerkbar. Im Luv von Berlin wurden zwischen 9 und 10 Uhr in der Höhe zwischen 80 und 100 ppb gemessen, am Boden an der mobilen Meßstelle V1 (südwestlich des Berliner Rings) 76 ppb. Diese Konzentrationen werden in der Simulation am Boden um ca. 15 ppb, in der Höhe um mehr als 20 ppb unterschätzt, was auf eine Unterschätzung der Ozon-Hintergrundbelastung zurückzuführen ist. Die entlang der Flugroute gemessenen Ozonkonzentrationen nehmen im Norden Berlins im Bereich der hohen Stickoxidkonzentrationen auf unter 70 ppb ab. In der Rechnung fallen die Ozonkonzentration in diesem Bereich entsprechend der zu geringen Ozongrundbelastung bis auf 50 ppb ab.

Abb. 7.4-9: Berechnete O<sub>3</sub>-Konzentration in ppb am 26.07.94, Stundenmittel 15-16 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m) mit Messungen. Oberes Bild: 5. Modellschicht (200-400m) mit Flugzeugmessungen und Windfeld



Um 11 Uhr hat sich der Modellwind in allen Schichten auf südwestliche Richtungen eingependelt und in der Höhe ergibt sich ein deutlicher horizontaler Ozongradient von ca. 70 bis 75 ppb Ozon im Südwesten bis zu ca. 100 bis 105 ppb im Nordosten Berlins. Dieser Gradient wird von dem zwischen 11 und 12 Uhr ausgeführtem Flug bestätigt, wenngleich die Messung auf einem ca. 20 ppb höherem Ozonniveau im Luv von Berlin aufsetzt. Am Nordrand Berlins wurden zwischen 94 ppb (Turm Frohnau) und 105 ppb (Flugzeug) gemessen. Das nördlich von Bernau gemessene Ozonmaximum von über 120 ppb wird in den Modellrechnungen nicht erreicht. Die luv- und leeseitigen Bodenmessungen lagen am späten Vormittag um jeweils ca. 15 bis 20 ppb unter den entsprechenden Höhenmessungen. Die berechneten Bodenkonzentrationen sind dagegen nahezu gleich hoch wie diejenigen der 5. Modellschicht, was darauf hindeutet, daß der vertikale Austausch im Modell möglicherweise überschätzt wird. Auch eine Stunde später sind das berechnete und das gemessene Ozonmaximum noch nordöstlich von Berlin bei Bernau zu finden. Am Nachmittag dagegen driften gemessene und berechnete Ozonmaxima auseinander. Die Abbildung 7.4-9 zeigt dazu die zwischen 15 und 16 Uhr am Boden und in der 5. Modellschicht berechneten Ozonverteilungen mit den verfügbaren Messungen. In der Simulation werden trotz der in den untersten 5 Modellschichten vorwiegend westlichen bis nordwestlichen Windrichtungen großflächig hohe Ozonwerte bis zu knapp 120 ppb nordöstlich von Berlin berechnet. Die höchsten Ozonkonzentrationen mit bis zu 150 ppb wurden dagegen entsprechend den westlichen bis nordwestlichen Windrichtungen östlich von Berlin in der Höhe von Strausberg gemessen. Eine Erklärung für die Lage des berechneten Ozonmaximums nordöstlich von Berlin gibt der Blick auf die berechneten Ozon- und Windfelder in den Schichten 6 und 7 (hier nicht gezeigt; s. den ausführlichen Bericht), d. h. in dem Höhenbereich von 400 m bis 1600 m. In der 6. Modellschicht ist die vorherrschende Windrichtung Südwest, in der 7. Modellschicht Süd. Ein Großteil der Luftmassen innerhalb der Modellgrenzschicht wird also nicht nach Osten, sondern eher nach Norden verfrachtet. Der starke vertikale Austausch sorgt für einen schnellen Konzentrationsausgleich zwischen Boden- und Höhenschichten, wobei die in Bodennähe emittierten Vorläufer hoch gemischt werden und damit eine Ozonbildung in der gesamten Grenzschicht ermöglichen. Die Lage des Ozonfahne wird dabei durch die vorherrschende Transportrichtung in den höheren Schichten bestimmt, da in diesen Schichten sehr viel mehr Masse verfrachtet wird als in den relativ dünnen bodennahen Schichten. Eine Analyse des aus Windprofilermessungen am Meteorologischen Observatorium Lindenberg erstellten Zeit-Höhen-Diagramms des Windvektors<sup>6</sup> zeigt deutlich, daß die in den Modellwinden auftretende starke vertikale Windscherung auch in Wirklichkeit vorhanden war, aber zumindestens in Lindenberg erst in etwa 1000 m Höhe beobachtet wurde. Im Modell dagegen dreht der Wind schon ab 400 m Höhe auf mehr südliche Richtungen, was dann zu der Verschiebung der Ozonfahne

---

<sup>6</sup> Dieses Diagramm ist als Abbildung 4.6 im FluMoB-Abschlußbericht enthalten.

nach Norden führt. Warum in den mit dem CALMET-Modell erstellten Windfeldern die Höhendrehung schon bei so niedrigen Höhen erfolgt, bedarf einer detaillierten Analyse.

Auch der 27. Juli 1994 war gekennzeichnet durch eine starke vertikale Windscherung in ca. 1000 m Höhe. In Bodennähe herrschte eine nordwestliche Strömung vor während in der freien Atmosphäre wie schon am Tage zuvor die südliche Grundströmung dominierte. In Bodennähe wurden an diesem Tag mit 1 bis 2 m/s die geringsten Windgeschwindigkeiten während der FluMoB-Kampagne gemessen. Die Mischungsschichthöhe erreichte maximale Höhen von ca. 2000 m.



Abb. 7.4-11: Berechnete O3-Konzentration in ppb am 27.07.94, Stundenmittel 17-18 Uhr MEZ. Unteres Bild: Bodenschicht (0 -20m). Oberes Bild: 5. Modellschicht (200-400m)

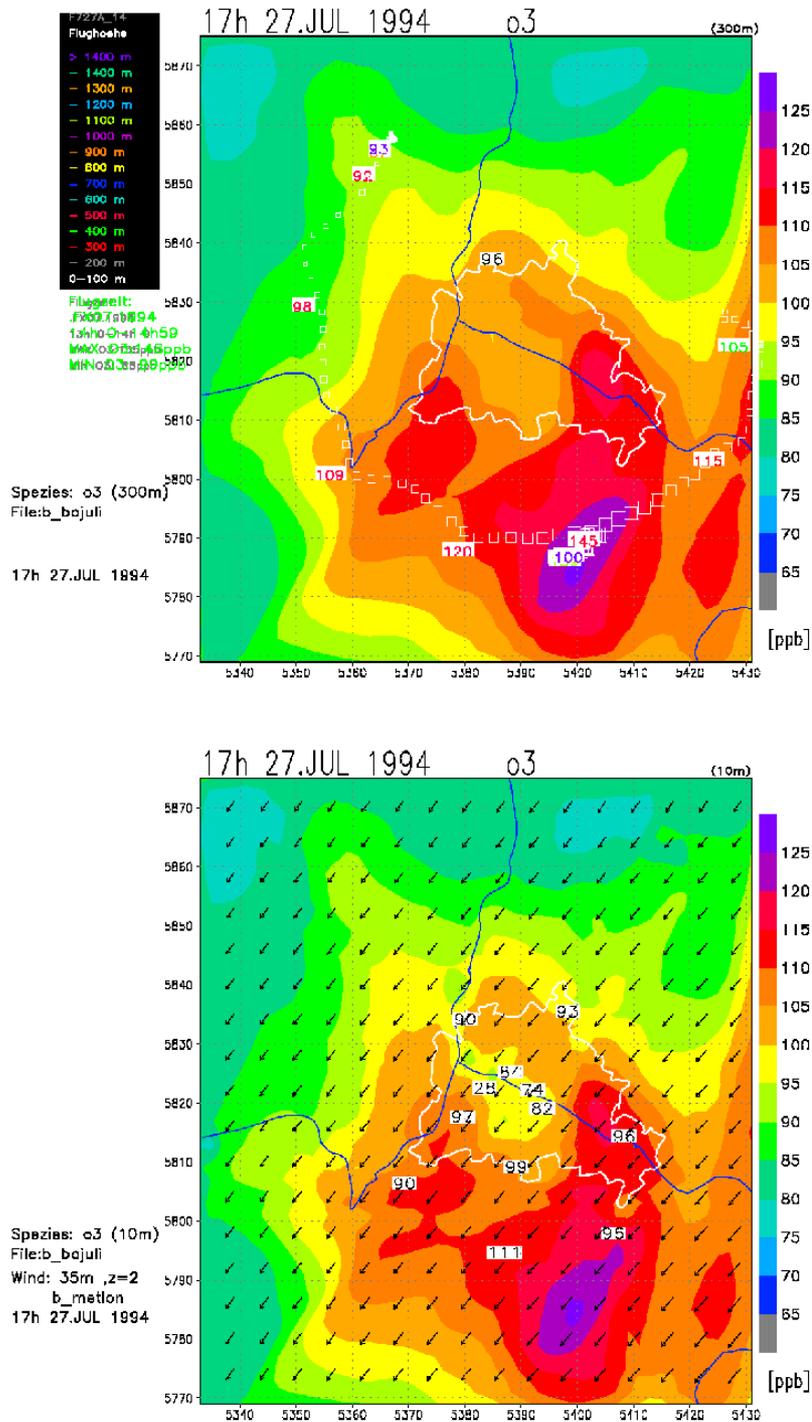


Abb. 7.4-12: In der Gittersäule über dem Ort mit den Koordinaten RW5400/HW5785 berechnete O<sub>3</sub>-Konzentration von 0 Uhr am 27.7.94 bis 0 Uhr am 28.7.94 in allen Rechenniveaus

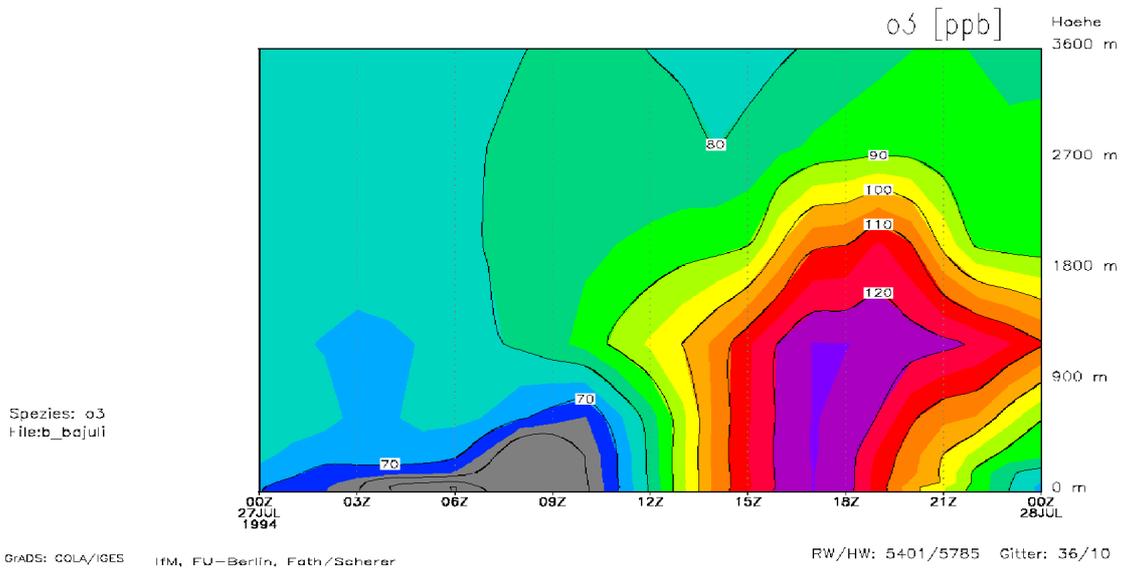
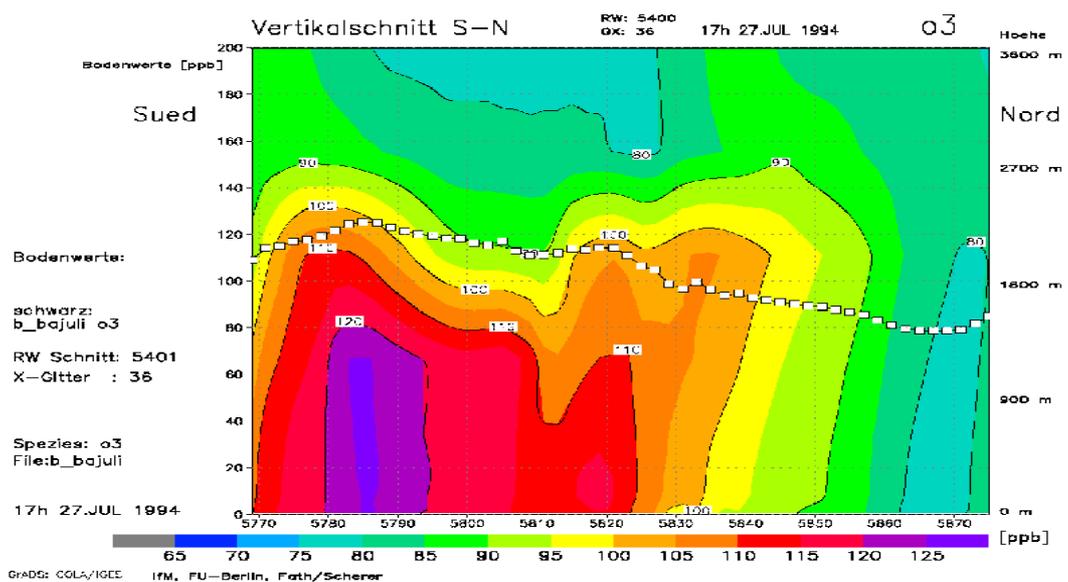


Abb. 7.4-13: Süd-Nord-Vertikalschnitt der berechneten Ozonverteilung durch das Modellgebiet (Süd ist links; Nord ist rechts). Der Schnitt verläuft in der Osthälfte Berlins entlang des Gauß-Krüger-Rechtswertes 5400. Isolinien: berechnete Konzentrationen in ppb am 27.7.94, Stundenmittel 17-18 Uhr MEZ vom Boden bis zur Modellobergrenze (rechte Skala); zusätzlich: O<sub>3</sub>-Bodenkonzentrationen entlang des Schnitts (linke Skala)



Die Entwicklung der Bodenozonekonzentrationen zwischen 15 und 17 Uhr zeigt die Abbildung 7.4-10. Im Großraum Berlin erreichten die Messungen ihr Maximum zwischen 15 und 16 Uhr, die simulierten Ozonkonzentrationen etwas später. Die höchste Ozonkonzentration wurde mit 127 ppb am Müggelsee gemessen (Abb. 7.4-10 oben). Dort liegt auch das berechnete Maximum mit knapp 120 ppb. Südlich von Königs-Wusterhausen hat sich in der Rechnung ein großes Gebiet mit Ozonkonzentrationen zwischen 110 und 115 ppb entwickelt. An den drei Potsdamer Stationen wurden auf relativ kurze Distanz Ozonkonzentrationen zwischen 85 und 117 ppb gemessen. Diese großen Unterschiede sind auf lokale Einflüsse zurückzuführen, die in den Simulationsrechnungen mit einer Maschenweite von 2 km nicht aufgelöst werden können. Das Modell berechnet in Potsdam um die 105 ppb. Eine Stunde später (Abb. 7.4-10 unten) nehmen die Meßwerte in Berlin bereits wieder ab während die Ozonkonzentrationen der Simulation in etwa auf dem Niveau der vorherigen Stunde bleiben. Auffällig ist der krasse Abfall der Messung am Müggelsee, die innerhalb einer Stunde von 127 ppb auf 91 ppb absank, was wieder auf lokale Einflüsse hinweist. In der Modellrechnung sind die Ozonkonzentrationen im Lee von Berlin weiter angestiegen, so daß sich jetzt ein breites Band hoher Ozonkonzentrationen von den südöstlichen Stadtteilen bis zum Südrand des Modellgebiets ausgebildet hat. Die Messungen an der Station Königs-Wusterhausen und der mobilen Station V2 südlich des Berliner Rings bestätigen diesen weiteren Ozonanstieg im Lee von Berlin. Die Abbildung 7.4-11 zeigt die Ozonkonzentrationsfelder noch eine Stunde später, also zwischen 17 und 18 Uhr. Ca. 30 km südlich von Berlin sind die Ozonwerte in der Rechnung noch weiter gestiegen, so daß sich dort ein Ozonmaximum mit Spitzenwerten bis zu knapp 130 ppb entwickelt hat. Im Stadtgebiet und direkt südlich der Stadtgrenze sind die Konzentrationen aber bereits wieder gefallen (Abb. 7.4-11 unten). Der zwischen 17 und 18 Uhr berechneten Ozonverteilung der 5. Modellschicht sind noch einmal die zwischen 13 und 15 Uhr in der Höhe gemessenen Konzentrationen überlagert, da später kein Flug mehr stattfand. Es ist offensichtlich, daß die Lage und Ausdehnung des zwischen 17 und 18 Uhr berechneten Gebiets hoher Ozonkonzentrationen gut mit der 3 Stunden vorher gemessenen Verteilung übereinstimmt (Abb. 7.4-11 oben), wenn auch die in der Höhe gemessenen Spitzenwerte nicht erreicht werden. Insgesamt wird die Entwicklung des Bodenozonekonzentrationsfeldes am 27. Juli 1994 also gut nachvollzogen. In der Höhe allerdings wird der dort beobachtete Konzentrationsanstieg nur mit zeitlicher Verzögerung simuliert und die gemessenen Spitzenwerte von knapp 150 ppb werden um ca. 10 bis 20% unterschätzt.

Die Entwicklung des für den 27. Juli 1994 südlich von Berlin berechneten Ozonmaximums ist in der Abbildung 7.4-12 anhand eines zeitlichen Vertikalschnitts der berechneten Ozonkonzentrationen dargestellt. Die Abbildung zeigt die in der Gittersäule über dem Ort mit den Koordinaten RW 540000/HW 578500 berechneten Ozonkonzentrationen von 0 Uhr am 27. Juli 1994 bis 0 Uhr am 28. Juli 1994 in allen Rechenniveaus. In der Nacht werden die Ozonkonzentrationen in Bodennähe durch frisch emittiertes NO und Depositionsprozesse bis auf ca. 40 ppb abgebaut. Infolge der stabilen Schichtung ist der Vertikalaustausch unterbunden,

so daß die Ozonkonzentrationen bereits ab wenigen 100 m Höhe nachts nahezu konstant bleiben. Am frühen Morgen gegen 6 Uhr herrscht zwischen Bodenschicht und den oberen Schichten deshalb ein Ozongradient von ca. 40 bis 50 ppb. Ab 6 Uhr früh nehmen die Ozonkonzentrationen am Boden wegen der beginnenden Einstrahlung und dem damit verbundenen Abbau der stabilen Bodenschicht wieder zu. Im weiteren Verlauf des Morgens steigt die Mischungshöhe schnell an, und infolge der immer stärker wirkenden turbulenten Vermischung kommt es zu einem schnellen Konzentrationsausgleich zwischen Boden und Höhe, was zu einem Anstieg der bodennahen Ozonkonzentrationen führt. Gegen Mittag ist die Modellatmosphäre bereits wieder nahezu komplett durchmischt, wobei die Bodenkonzentrationen das Niveau der nachts in der Höhe berechneten Konzentrationen erreichen. Dies bedeutet, daß der Anstieg der Ozonkonzentrationen in Bodennähe bis dahin überwiegend auf das Heruntermischen der hohen Konzentrationen in den oberen Modellschichten zurückzuführen ist. Am frühen Nachmittag steigen die Ozonkonzentrationen in der gesamten Grenzschicht weiter an. Zwischen 15 und 18 Uhr werden die Maximalkonzentrationen dieses Tages berechnet. Höchstkonzentrationen treten dabei bis zur Obergrenze der Mischungsschicht in ca. 2000 m auf. Die nachmittägliche Zunahme ist also eine Folge der photochemischen Reaktivität während der aus den von Berlin antransportierten Vorläuferemissionen über die chemischen Reaktionsketten zusätzliches Ozon gebildet wird. Mit dem abendlichen Zusammenbruch der Mischungsschicht und der nachlassenden Einstrahlung beginnt der oben beschriebene Zyklus in ähnlicher Weise von neuem.

Der zeitliche Vertikalschnitt demonstriert deutlich, wie schnell im Modell die vertikale Vermischung abläuft. Ab Mittag gibt es daher in den Simulationen kaum einen vertikalen Ozongradienten und Bodenkonzentrationen sind nahezu identisch mit den Konzentrationen in größeren Höhen. In der Realität trat eine solche nahezu komplette vertikale Vermischung der Ozonkonzentrationen nur während der ersten drei Tage der FluMoB-Kampagne auf. Am 26. und 27. Juli dagegen wurden im Lee von Berlin in 250 bis 500 m Höhe am Nachmittag jeweils ca. 15 bis 25 ppb höhere Ozonkonzentrationen gemessen als am Boden. Diese geringere vertikale Durchmischung wird vom Modell nicht reproduziert. In CALGRID wird der vertikale turbulente Transport über die turbulenten Austauschkoefizienten gesteuert, die als Funktion verschiedener Grenzschichtparameter wie Monin-Obukhov-Länge, Schubspannungsgeschwindigkeit oder Mischungsschichthöhe berechnet werden (Yamartino, 1989; Stern et al., 1997). Ob nun die meteorologische Eingangsinformation für den meteorologischen Treiber CALMET nicht genau genug war oder ob die verwendeten Parametrisierungsansätze die mikrophysikalischen Veränderungen, die zu einer Reduzierung des vertikalen Austauschs führten, nur ungenügend wiedergeben, kann nur durch eine meteorologische Feinanalyse ermittelt werden, die den Rahmen dieser Studie sprengen würde.

Das schnelle vormittägliche Anwachsen des Vertikalaustauschs hat zur Folge, daß die Vorläuferemissionen schnell gleichmäßig innerhalb der Grenzschicht verteilt werden, da die

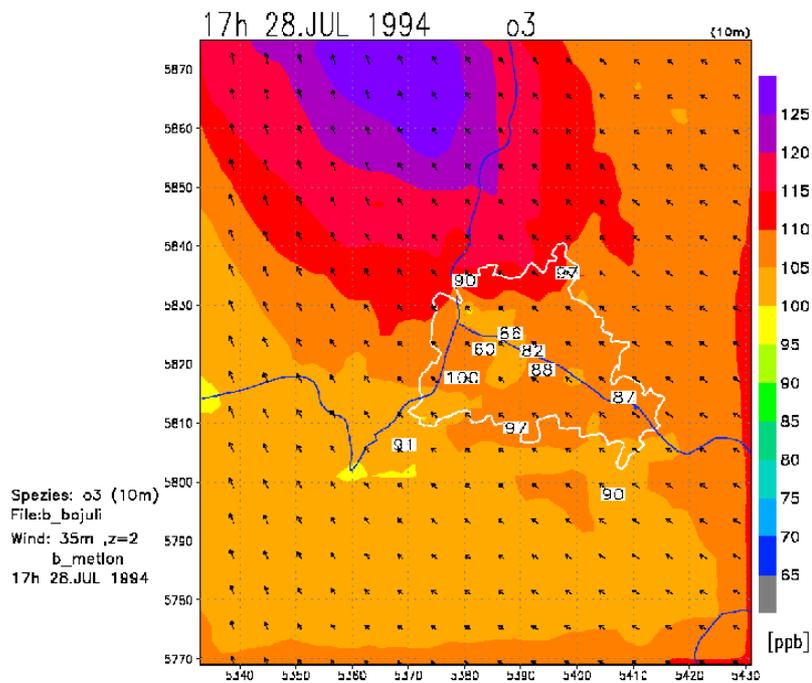
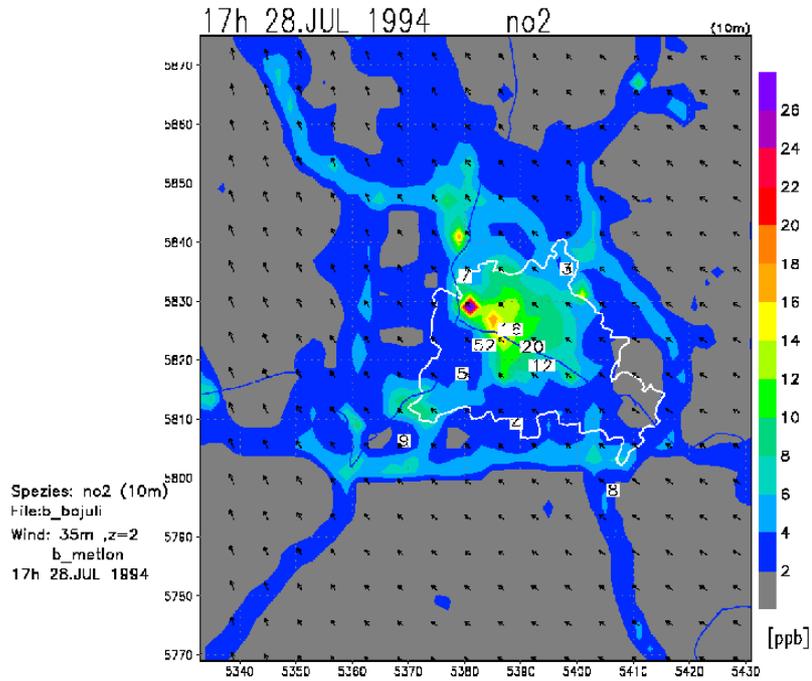
Vertikalvermischung sehr viel schneller abläuft als die ozonbildenden Reaktionen. Dadurch kommt es zu einer Verdünnung der Vorläuferkonzentrationen, was in den meisten Fällen eine Verlangsamung der Ozonbildung nach sich zieht. In der Realität erfolgt der vertikale Austausch dagegen nicht so schlagartig wie in den Modellrechnungen, so daß in der unteren Grenzschicht starke Ozonbildung in mit Vorläufern hochbelasteten Luftmassenpaketen ablaufen kann. Erst im Verlaufe des Tages erfolgt dann eine gleichmäßigere Vermischung der Oxidantien innerhalb der gesamten Grenzschicht. Da ozonabbauende Prozesse vor allem in Bodennähe wirken, bildet sich an Tagen mit geringerem vertikalem Austausch ein Ozongradient zwischen Boden und Höhe aus. Dieser Gradient wird in den Modellrechnungen durch den immer wirkenden schnellen Vertikalaustausch sofort abgebaut.

Die Abbildung 7.4-13 zeigt zur Verdeutlichung des berechneten Ozonanstiegs von Luv nach Lee einen Süd-Nord-Vertikalschnitt durch das Modellgebiet am 27. Juli, 17 bis 18 Uhr MEZ. Der Schnitt verläuft durch die Osthälfte Berlins entlang des Gauß-Krüger-Rechtswerts 5401 und wurde so gelegt, daß er das berechnete bodennahe Ozonmaximum südlich von Berlin schneidet (siehe Abb. 7.4-11). Die Abbildung enthält zwei Informationen: Die entlang des Schnitts berechnete vertikale Ozonverteilung vom Boden bis zur Modellobergrenze und die am Boden entlang des Schnitts berechneten Bodenozonekonzentrationen. Am Nordrand strömen ca. 80 ppb Ozon in das Modellgebiet (rechts in der Abb. 7.4-13). Zwischen dem Berliner Autobahnring und der nördlichen Stadtgrenze bei Hochwert HW 5860 beginnen die Ozonkonzentrationen anzusteigen. Im Norden Berlins bei HW 5830 sind bereits knapp 100 ppb erreicht. Weiter nach Süden steigen die Ozonkonzentrationen dann bis auf über 125 ppb an. Aus dem Schnitt wird wieder ersichtlich, daß die hohen Ozonkonzentrationen nur in den untersten 1000 bis 1500 m der Atmosphäre berechnet werden. In diesem Bereich ist die Modellatmosphäre auch größtenteils gut durchmischt.

Der im Modell berechnete maximale Ozonzuwachs vom Nord nach Süd beträgt am 27. Juli also ca. 40 bis 45 ppb. Aus den Höhenmessungen läßt sich ein maximaler Ozonunterschied zwischen Luv und Lee von ca. 45 bis 50 ppb ableiten. Am Boden liegt der gemessene Unterschied mit ca. 40 ppb etwas niedriger.

Am 28. Juli hatten sich wieder in der ganzen Grenzschicht südliche bis südöstliche Windrichtungen durchgesetzt, so daß maximale Ozonkonzentrationen im Norden Berlins berechnet wurden. Da die FluMoB-Kampagne am Tag zuvor zu Ende gegangen war, stehen für den 28. Juli nur noch die stationären Bodenmessungen zur Verfügung. Die Abbildung 7.4-14 zeigt daher nur die zwischen 16 und 17 Uhr berechneten Ozon- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Bodenschicht. An diesem Tage werden vom REM3 nachmittägliche Ozonhintergrundkonzentrationen von ca. 100 bis 110 ppb geliefert. Nach den wenigen Luvmessungen scheinen diese Konzentrationen um ca. 10 bis 15 ppb zu hoch zu liegen, was zu einer leichten Überschätzung der Ozonwerte in Berlin führt. Nördlich von Berlin bildet sich in der Simulation eine breite Fahne hoher Ozonkonzentrationen mit Maximalwerten über 125 ppb aus, die wegen fehlender Messungen aber nicht verifiziert werden kann.

Abb. 7.4-14: Berechnete O<sub>3</sub>- und NO<sub>2</sub>-Bodenkonzentrationen in ppb am 28. Juli 1994, Stundemittel 17-18 Uhr MEZ; mit Bodenmessungen



**b) Zeitreihenanalysen**

Die folgenden Abbildungen zeigen für eine ausgewählte Anzahl von Stationen die dort gemessenen und die für die zugehörige Gitterzelle berechneten Konzentrationsverläufe. Bei dem Vergleich ist wieder zu beachten, daß die Messungen punktuelle Werte darstellen während die berechneten Konzentrationen Volumenmittel der betreffenden Bodenzelle (Volumen  $2000 \times 2000 \times 20 \text{ m}^3$ ) sind. Der abgebildete Zeitraum umfaßt die Periode vom 22. Juli 1994 bis zum 28. Juli 1994.

In den Abbildungen 7.4-15 und 7.4-16 sind die im Norden Berlins in Heiligensee und auf dem Frohnauer Funkturm in 324 m Höhe berechneten Ozon-,  $\text{NO}_2$ - und NO-Konzentrationen zusammengestellt. Der auf dem Frohnauer Turm gemessene Konzentrationstrend wird in der Simulation gut nachvollzogen. Der am 25. Juli beobachtete Anstieg der großräumigen Vorbelastung zeigt sich auch in den berechneten Ozonzeitreihen (Abb. 7.4-15 oben). Da die Meßstation nachts über der bodennahen stabilen Schicht liegt, ist der nächtliche Ozonabbau gering. Interessant ist dabei der am frühen Morgen des 26. Juli und auch 28. Juli beobachtete Ozonabfall, der Hand in Hand mit einem Anstieg der NO- und  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen geht. Dieses Phänomen ist ein Hinweis auf vertikale oder auch horizontale Transportvorgänge, durch die die Turmstation kurzzeitig in den Einflußbereich stark stickoxidbelasteter Luftmassen gerät, was dann einen sofortigen Rückgang der Ozonkonzentration nach sich zieht. Die am Morgen des 26. Juli beobachteten starken  $\text{O}_3$ -, NO- und  $\text{NO}_2$ -Konzentrationsänderungen finden sich auch in den Modellrechnungen wieder. Den Ozoneinbruch am Morgen des 28. Juli kann das Modell dagegen nicht nachvollziehen, d.h. die für dieses Transportphänomen verantwortlichen lokalen meteorologischen Verhältnisse werden in den Modelldaten nicht richtig wiedergegeben. Am Nachmittag des 28. Juli werden die Ozonspitzenwerte überschätzt, was im wesentlichen auf einer Überschätzung der Ozonbelastung der in das CALGRID-Gebiet einströmenden Luftmassen beruht.

Die Bodenstation Heiligensee zeigt im Gegensatz zur Turmmessung wegen der in Bodennähe wirkenden nächtlichen OzonAbbauprozesse eine sehr viel ausgeprägtere Tag-Nacht-Schwankung der Ozonkonzentrationen (Abb. 7.4-16). Auch hier wird die allgemeine Ozonentwicklung gut nachvollzogen. Die gemessenen NO-Konzentrationen zeigen eine starke tägliche Variation mit kurzzeitigen Spitzenkonzentrationen am Morgen und ansonsten relativ niedrigen Konzentrationen. Die morgendliche Spitze taucht an den meisten Tagen auch in den Modellrechnungen auf, die hohen Spitzen werden aber unterschätzt. Die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen erreichen in der Regel nachts Maximalwerte und sinken bis zum Nachmittag auf sehr niedrige Werte ab. Dieses grundsätzliche Verhalten, das durch die Ozon- $\text{NO}_x$ -Chemie bestimmt wird, ist auch in den simulierten  $\text{NO}_2$ -Zeitreihen zu finden.

Als innerstädtische Station wird zum Vergleich die Meßstation Wedding herangezogen (Abb. 7.4-17). Die höhere Belastung der Berliner Innenstadt ab dem 26. Juli macht sich in Messung und Rechnung durch eine im Vergleich zu den Vortagen um 15 bis 20 ppb höhere Ozonspitze

bemerkbar. Die an dieser Station beobachteten nächtlichen Ozonanstiege (z.B. am 25./26. Juli) beruhen auf Transportvorgängen, die in der Simulation nur zum Teil nachvollzogen werden. Die gemessenen NO-Konzentrationen zeigen deutlich die morgendliche verkehrsbedingte Emissionsspitze, die an den Werktagen sehr viel höher liegt als am Wochenende (23. und 24. Juli). Die Simulation überschätzt die gemessenen morgendlichen NO-Spitzenwerte beträchtlich, ein Hinweis dafür, daß der mittlere Emissionsfluß in die Gitterzelle um die Station Wedding höher ist als die lokale Emissionsdichte im direkten Einflußbereich dieser Station. Infolge der am Morgen einsetzenden vertikalen Vermischung werden die hohen NO-Konzentrationen aber sehr schnell abgebaut. Der gemessene NO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf wird von der Simulation getroffen, wenngleich es vor allem in den Abendstunden zu teilweise kräftigen, aber kurzzeitigen Überschätzungen der Spitzenwerte kommt, die Hand in Hand mit einer Unterschätzung der Ozonkonzentrationen gehen. Da NO<sub>x</sub>-Konzentrationen sehr stark von den lokalen Emissions- und Ausbreitungsbedingungen bestimmt werden, muß beim Vergleich von berechneten NO<sub>x</sub>-Volumenmittelwerten mit Messungen, die nur für ein im Vergleich zur Maschenweite sehr kleines Gebiet repräsentativ sind, oft mit solch größeren Abweichungen gerechnet werden. Die sofortige Vermischung aller Stoffe innerhalb eines Gittervolumens führt in Modellrechnungen in Ballungsgebieten mit hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen infolge des Titrationseffekts oft zu einem sehr starken nächtlichen Ozonabbau verbunden mit einem NO<sub>2</sub>-Anstieg. In der Realität, in der innerhalb eines solchen Volumens starke Konzentrationsvariationen auftreten können, wird ein ähnliches Verhalten dagegen nur an Stationen beobachtet, die im direkten Einflußbereich starker NO<sub>x</sub>-Quellen liegen.

Als Beispiel für eine solche Station sind in der Abbildung 7.4-18 die gemessenen und berechneten Konzentrationen an der Station Charlottenburg gezeigt. Diese Station liegt im direkten Einflußbereich der Stadtautobahn, d.h. die Messungen sind stark geprägt von den hohen Stickoxidemissionen des Verkehrs. Den berechneten Konzentrationsverläufen liegen dagegen die deutlich niedrigeren mittleren Emissionsverhältnisse in der Zelle um die Station zugrunde. Die Messungen an der Station Charlottenburg sind daher eigentlich nicht für die Modellevaluierung geeignet, werden hier aber zur Demonstration eines für das CALGRID-Modell subskaligen Effekts mit aufgeführt. Entsprechend der niedrigen NO<sub>x</sub>-Emissionsdichte werden die an der Station Charlottenburg gemessenen NoxKonzentrationen auch stark unterschätzt und die Ozonkonzentrationen entsprechend überschätzt.

An der nicht im direkten Einflußbereich lokaler Quellen gelegenen Station Grunewald werden die gemessenen Konzentrationsverläufe in der Simulation dagegen gut reproduziert (Abb. 7.4-19). Auch an der Station Friedrichshagen am Müggelsee kann der vom 22. bis zum 28. Juli beobachtete Trend der Ozonkonzentrationen simuliert werden. Die hohen Spitzenwerte am 26. und 27. Juli werden aber nicht erreicht. Auch die berechneten NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen stimmen gut mit der Messung überein (Abb. 7.4-20).

Abb. 7.4-15: Berechnete und gemessene Ozon-, NO<sub>2</sub>- und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Fernsehturm Frohnau und gerechneter Verlauf für die 4. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm.

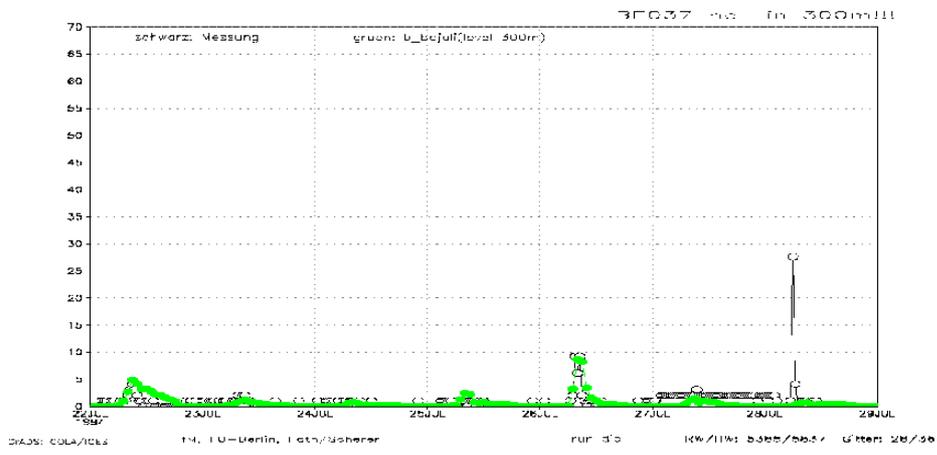
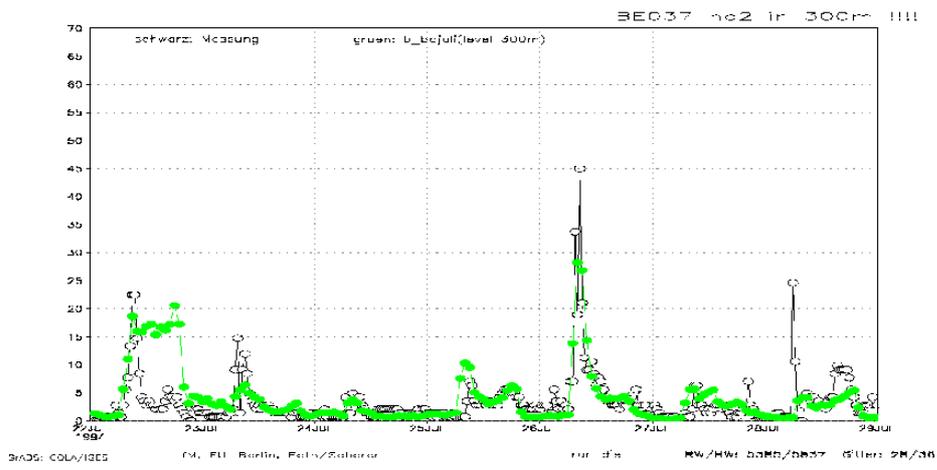
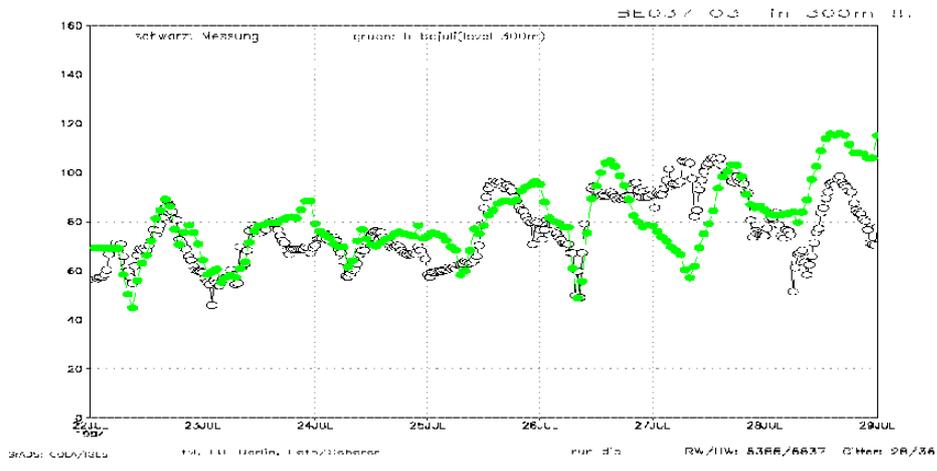


Abb. 7.4-16: Berechnete und gemessene Ozon-, NO<sub>2</sub>- und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Heiligensee und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm.

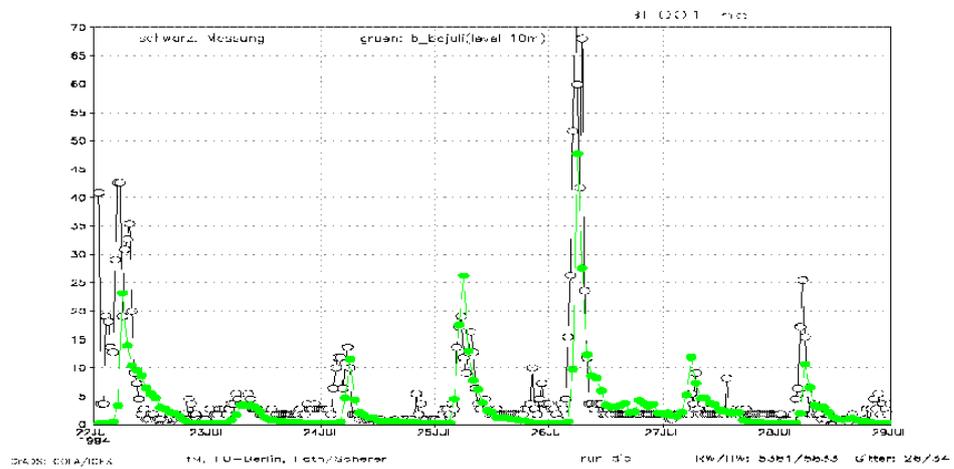
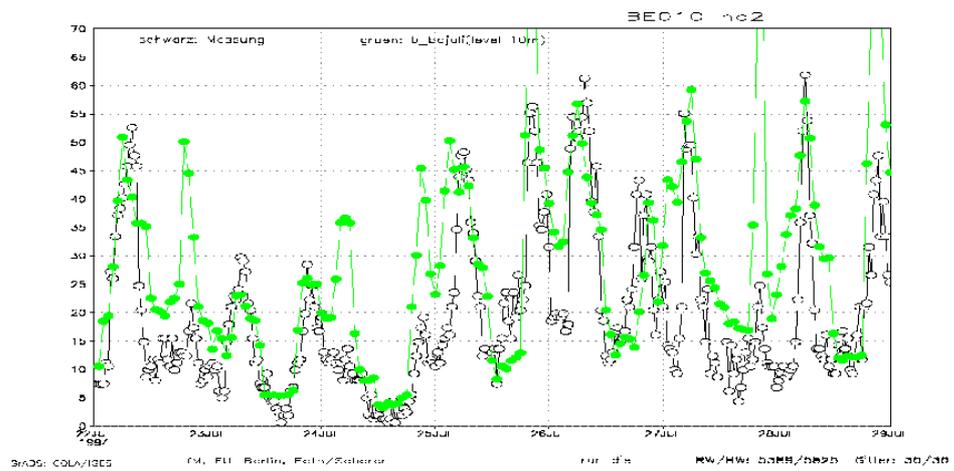
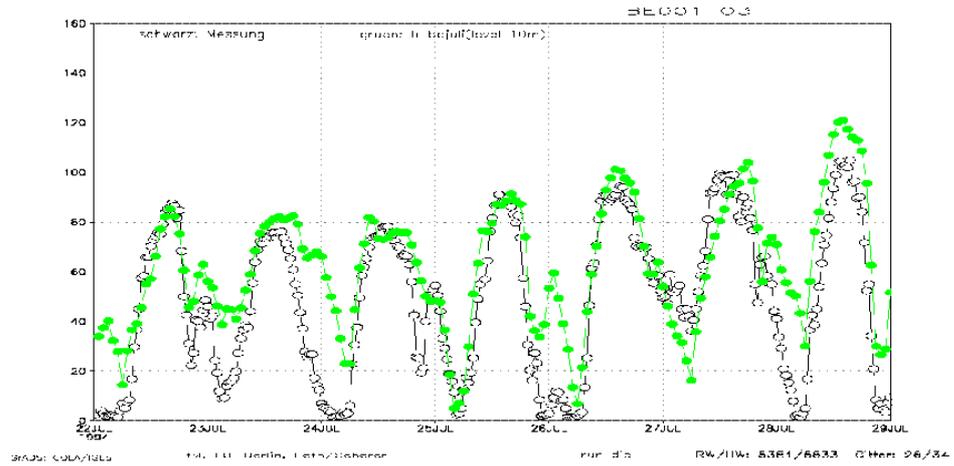


Abb. 7.4-17: Berechnete und gemessene Ozon-, NO<sub>2</sub>- und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Wedding und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm.

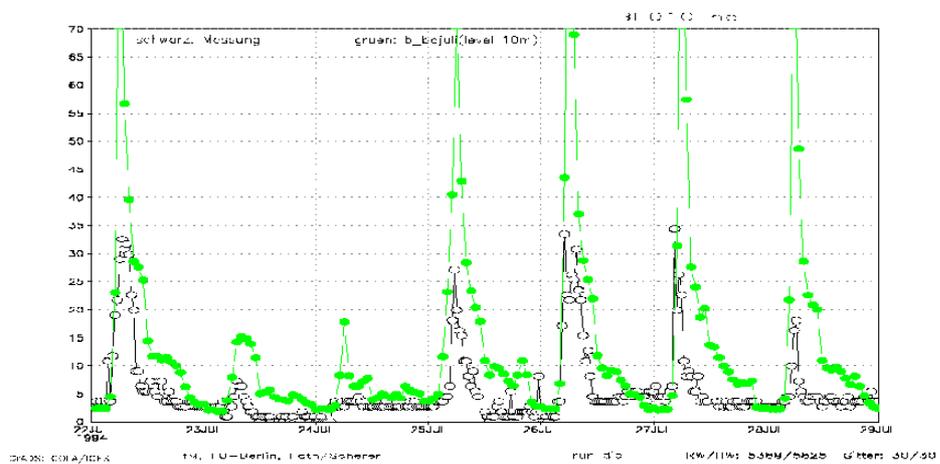
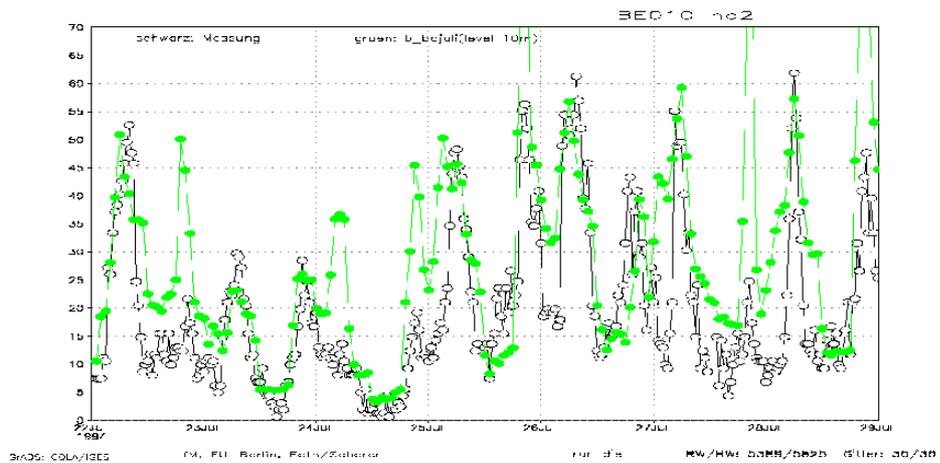
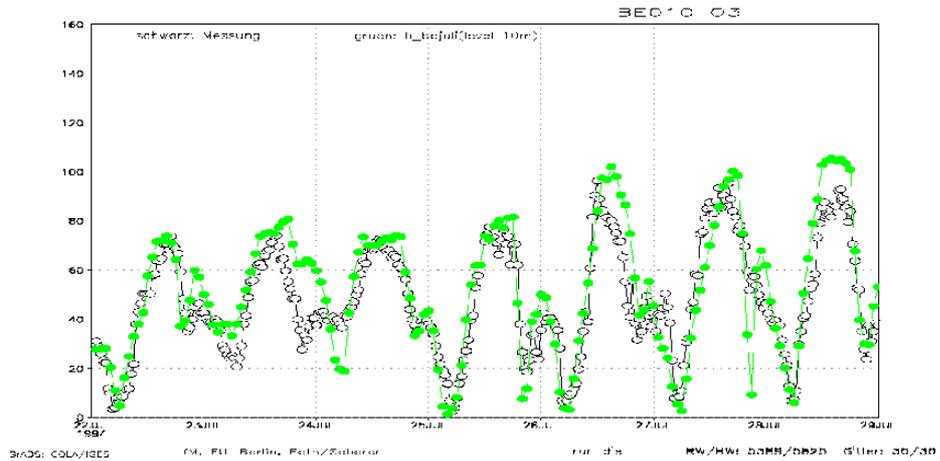


Abb. 7.4-18: Berechnete und gemessene Ozon-, NO<sub>2</sub>- und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Charlottenburg und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm.

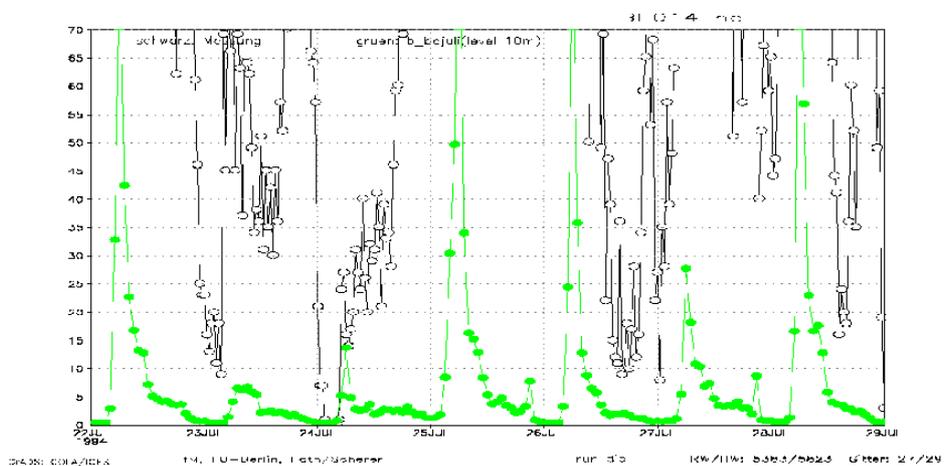
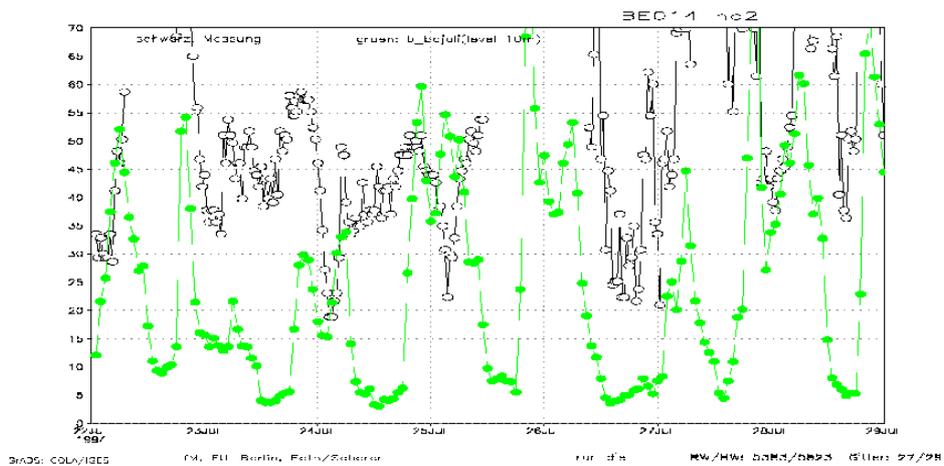
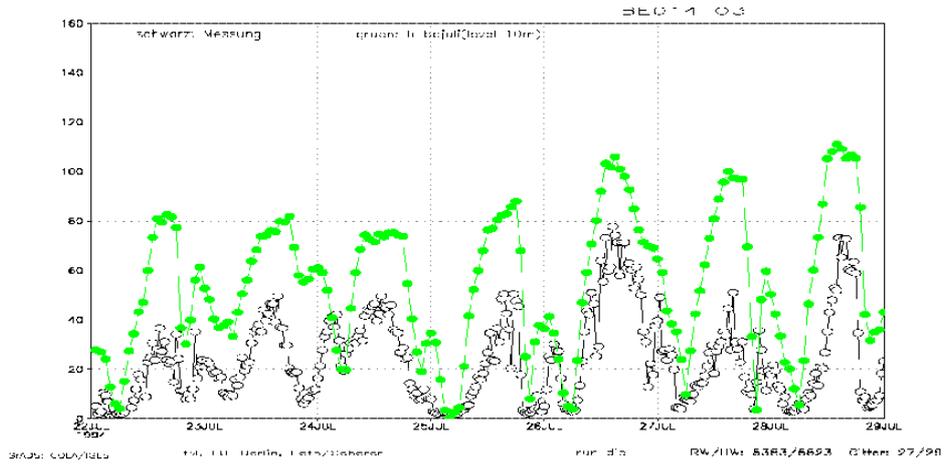


Abb. 7.4-19: Berechnete und gemessene Ozon-, NO<sub>2</sub>- und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Grunewald und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm.

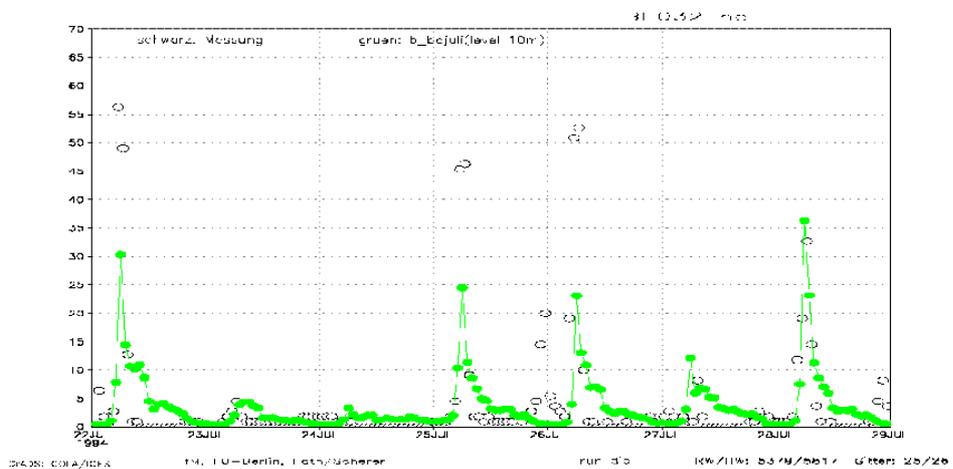
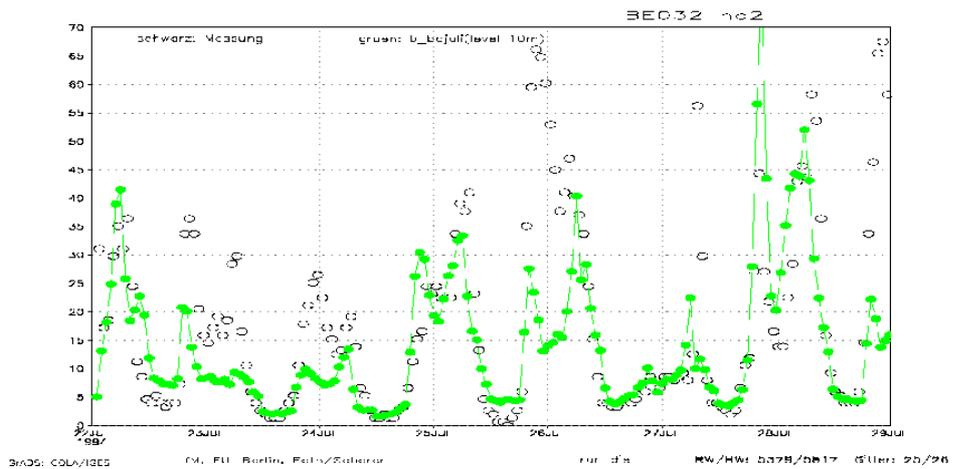
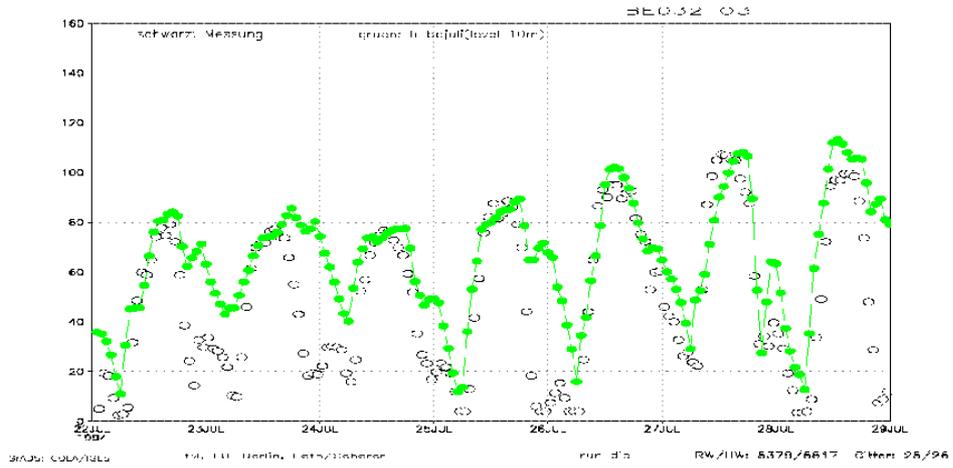
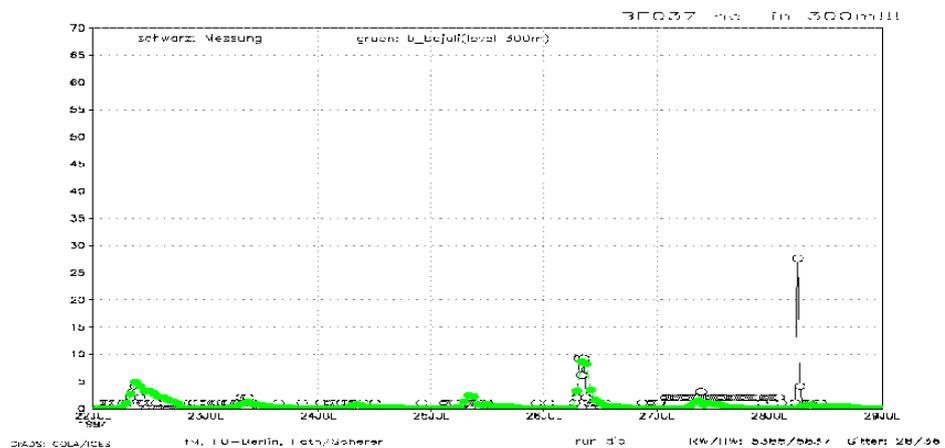
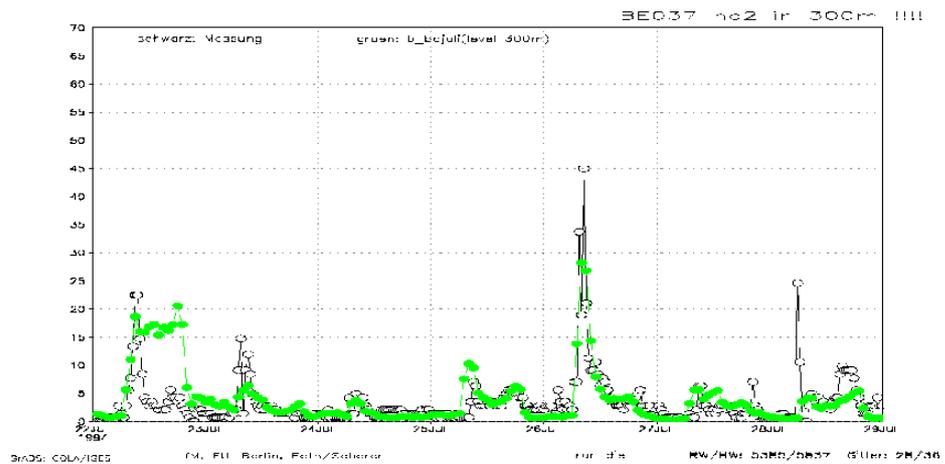
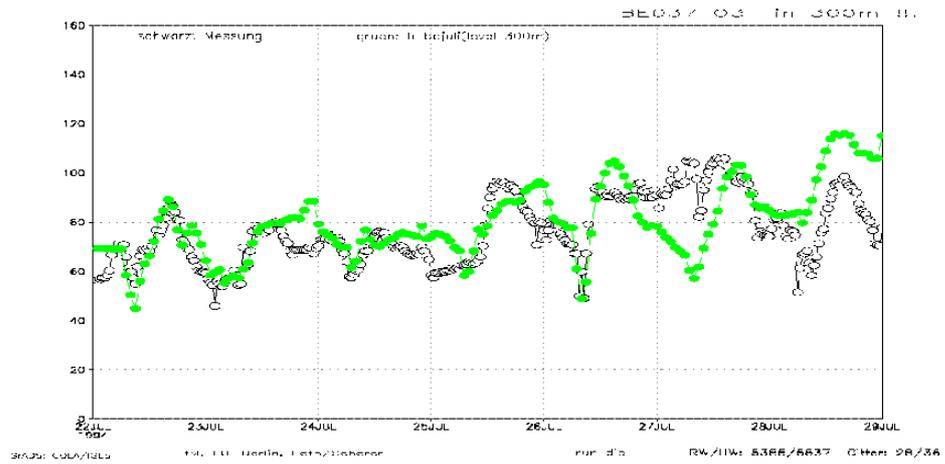


Abb. 7.4-20: Berechnete und gemessene Ozon-, NO<sub>2</sub>- und NO-Konzentrationen vom 22.7. bis zum 28.7.1994. Station Friedrichshagen und gerechneter Verlauf für die 1. Modellschicht in der entsprechenden Gitterbox. Alle Angaben in ppm.



Tab. 7.4.5: NOx- und VOC-Reduktionen (gerundet auf volle %) im Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg für unterschiedliche Emissionsminderungszenarien (Reduktionen bezogen auf die episodenspezifischen Emissionen vom 25.07. bis 06.08.1994)

Szenario	NOX	VOC anthropogen	VOC anthropogen und biogen
1 Tempolimit in der Untersuchungsregion	-10%	-2%	-1%
2 Fahrverbot für nicht-schadstoffarme PKW in der Untersuchungsregion	-18%	-42%	-28%
4a Tempolimit und Fahrverbot in der Untersuchungsregion (Pkw+Lkw)	-51%	-47%	-31%
4b Tempolimit und Fahrverbot in der Untersuchungsregion (U). Fahrverbot für nicht schadstoffarme Pkw in den Bundesländern Brandenburg, Sachsen und Sachsen-Anhalt (UB)	U: -51% UB: -13%	U: -47% UB: -51%	U: -31%
6 Focus NOx in der Untersuchungsregion	-66%	-49%	-33%
7 Focus VOC in der Untersuchungsregion	-19%	-54%	-36%
8a Focus NOx und Focus VOC in der Untersuchungsregion	-66%	-60%	-40%
8b Focus NOx und Focus VOC in der Untersuchungsregion (U). Fahrverbot für nicht schadstoffarme Pkw in den Bundesländern Brandenburg, Sachsen und Sachsen-Anhalt (UB)	U: -66% UB: -13%	U: -60% UB: -51%	U: -40%
9 Sommerbenzin in der Untersuchungsregion (U) und den Bundesländern Brandenburg, Sachsen und Sachsen-Anhalt (UB)	U: -3% UB: -3%	U: -10% UB: -11%	U: -7%
10 Trend 2005	-21%	-46%	-30%

#### **7.4.5 Auswirkungen der Emissionsminderungs-Maßnahmen auf die Oxidantienkonzentrationen in der Modellregion Berlin-Brandenburg**

Die Auswirkungen der in Tabelle 7.4.5 zusammengestellten temporären und dauerhaften Minderungsmaßnahmen werden anhand der im Kapitel 7.4.3 beschriebenen Simulation der Periode hoher Ozonkonzentrationen im Juli 1994 untersucht. Für alle temporären Maßnahmen wird angenommen, daß sie zu Beginn des 25. Juli 1994 in Kraft treten und dann bis zum Ende der Simulation am 6. August wirken. Da das Untersuchungsgebiet selbst bei relativ geringen Windgeschwindigkeiten innerhalb eines Tages durchspült wird, können die Auswirkungen der temporären Minderungsmaßnahmen an den einzelnen Tagen unabhängig von einander betrachtet werden. Die vom REM3 gelieferten Randbedingungen bleiben, wenn nicht anders vermerkt, unverändert. Bei den VOC werden ausschließlich die Emissionen der anthropogenen Kohlenwasserstoffe entsprechend den verschiedenen Szenarien modifiziert.

Die Änderung der Ozonkonzentrationen als Folge der temporären Maßnahmen wird im wesentlichen für die berechneten nachmittäglichen Ozonkonzentrationen der ersten drei Tage nach dem Einleiten der Maßnahme diskutiert, also vom 25. bis zum 27. Juli 1994. Die Auswirkungen der einzelnen Szenarien werden anhand der berechneten prozentualen Änderungen dieser Konzentrationsverteilungen als Folge der Emissionsveränderungen vorgestellt. Es handelt sich hierbei um stark gekürzte Fassungen der ausführlichen Erläuterungen im gesonderten Bericht zum teilvorhaben "Ozon-Wirkungsanalysen in der Modellregion Berlin-Brandenburg".

##### **Szenario 1: Tempolimit in der Untersuchungsregion**

Durch ein Tempolimit werden die  $\text{NO}_x$ -Emissionen der Region um 10%, die Summe der anthropogenen und biogenen VOC-Emissionen um 1% gemindert (Tabelle 7.4.5). In den Abbildungen 7.4-21 bis 7.4-23 sind die prozentualen Änderungen der nachmittäglichen Ozonkonzentration am 25., 26., und 27. Juli 1994 als Folge der Einleitung eines Tempolimits zu Beginn des 25. Juli 1994 abgebildet. Den prozentualen Änderungen unterlegt als Isolinien sind die Ozonkonzentrationen des Basislaufs, so daß deutlich wird, auf welche Absolutkonzentrationen sich die prozentualen Abnahmen beziehen.

Die durch ein Tempolimit erreichte Abnahme der Emissionen wirkt sich kaum auf die Kohlenwasserstoffe aus, da die VOC-Emissionen des Kfz-Verkehrs wenig sensitiv gegenüber einer Änderung der Geschwindigkeit in den höheren Bereichen sind. Die  $\text{NO}_x$ -Minderung eines Tempolimits hat - wie die Abbildungen zeigen - insgesamt nur geringe Auswirkungen (um -1% bis -3%), bewirkt im Modellgebiet aber Ozonab- und Ozonzunahmen. Ozonzunahmen treten dabei nur entlang der Autobahnen und insbesondere an den verkehrlich besonders hoch belasteten Autobahnkreuzen auf, also in Gebieten, in denen die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen

des Basislaufs hoch sind und gleichzeitig das Tempolimit eine relativ starke Abnahme dieser Konzentrationen bewirkt.

### **Szenario 2: Fahrverbot für nicht-schadstoffarme PKW in der Untersuchungsregion**

Ein Fahrverbot für nicht-schadstoffarme PKW führt in der Untersuchungsregion Berlin-Brandenburg zu einer Abnahme der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 18% und der VOC-Emissionen um 28% (Tab. 7.4.5). Die Abb. 7.4-25 bis 7.4-27 zeigen wieder die mit CALGRID für den 25., 26. und 27. Juli 1994 berechneten prozentualen Abnahmen der nachmittäglichen Ozonkonzentrationen.

Am 25. Juli 1994 erreichen die Ozonabnahmen im Bereich der berechneten Ozonmaxima nordwestlich von Berlin 3%, Ozonzunahmen bis zu 4% werden nur in einem kleinen Gebiet der Berliner Innenstadt und vereinzelt entlang der Autobahnen berechnet (Abb. 7.4-25). Am 26. Juli nehmen die Ozonkonzentrationen in der gesamten Ozon-Fahne ab und erreichen am Nordrand des Modellgebiets 4% (Abb. 7.4-26), wobei höhere Abnahmen außerhalb des Modellgebiets nicht ausgeschlossen werden können. Ozonzunahmen werden in geringem Ausmaß nur in der Berliner Innenstadt und im Bereich des Autobahnkreuzes Potsdam berechnet. Die Zunahmen bleiben unter 4%. Am 27. Juli steigen die Ozonabnahmen südlich von Berlin im Bereich der maximalen Ozonkonzentrationen des Basislaufs auf ca. 7% (Abb. 7.4-27). Ozonzunahmen bis zu 3% werden nur noch in der Berliner Innenstadt berechnet, wo die Ozonkonzentrationen im Basislauf aber deutlich niedriger sind als im Süden von Berlin. Diese Ozonzunahmen sind ein Folge der starken NO<sub>x</sub>-Minderung bis zu 40% im Berliner Stadtgebiet (Abb. 7.4-28). Im Bereich der Autobahnen werden durch das Fahrverbot die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen etwas geringer gemindert als durch das Tempolimit (vergleiche Abb. 7.4-24 und Abb. 7.4-28).

Im Vergleich zum Szenario "Tempolimit" sind die erreichbaren Ozonabnahmen des Szenarios "Fahrverbot Pkw" also höher und überdecken auch ein größeres Gebiet. Die berechneten Ozonzunahmen sind dagegen abgesehen vom Berliner Stadtgebiet etwas geringer. Die stärkeren Ozonabnahmen sind eine Folge der sehr viel höheren VOC-Minderung bei Szenario 2. Diese erhöhte VOC-Minderung verhindert in NO<sub>x</sub>-reichen Regionen die als Folge einer starken NO<sub>x</sub>-Minderung auftretenden Ozonzunahmen und schwächt dadurch den negativen Effekt der NO<sub>x</sub>-Minderung ab oder hebt diesen sogar ganz auf. Dies zeigt sich insbesondere am 27. Juli in der Gegend um Königs-Wusterhausen, wo das Tempolimit, das weitgehend nur die NO<sub>x</sub>-Emissionen mindert, zu Ozonzunahmen, das Fahrverbot aber zu Ozonabnahmen führt (vergleiche Abb. 7.4-23 mit Abb. 7.4-27).

#### **Szenario 4a: Tempolimit kombiniert mit Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw und Lkw in der Untersuchungsregion**

Das Szenario "Straßenverkehr max" kombiniert Szenario 1 mit Szenario 2 und einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Lkw. Dieses Maßnahmenbündel führt im Mittel über das Modellgebiet zu einer Abnahme der episodenspezifischen  $\text{NO}_x$ -Emissionen um 51% und der Summe aus anthropogen und biogenen Kohlenwasserstoffemissionen um 31% (Tab. 7.4.5). Das Szenario 4a stellt damit die umfassendste Kfz-bezogene Maßnahme in der Untersuchungsregion dar.

Die nachmittägliche Änderung der Ozonkonzentrationen des 25. Juli 1994 aufgrund der Maßnahmen des Szenarios 4a zeigt die Abb. 7.4-29. Im Lee von Berlin werden großflächig Ozonabnahmen bis zu 8% berechnet. Im Nordwesten laufen die Abnahmen entsprechend den vorherrschenden südwestlichen Winden aus dem Modellgebiet hinaus, so daß keine Aussagen getroffen werden können, ob sich die Ozonabnahmen windabwärts noch weiter verstärken. Ozonzunahmen bis zu 5% werden wieder in der Berliner Innenstadt und entlang der Autobahnen berechnet. Ursache der im Vergleich zum Szenario 2 stärkeren Ozonveränderungen ist die zusätzliche Verminderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch das Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Lkw. Auch am 26. Juli 1994 nehmen die Ozonkonzentrationen als Folge der emissionsmindernden Wirkung des Szenarios 4a im Großteil des Modellgebiets ab (Abb. 7.4-30). Die maximalen Abnahmen reichen im Nordosten bis zu 10%. Ozonzunahmen bis zu 5% ergeben sich nur noch im Bereich der Autobahnen um Potsdam. Im Berliner Stadtgebiet werden jetzt kaum noch Ozonzunahmen berechnet. Am 27. Juli 1994 ist die Spannweite der Ozonänderungen deutlich größer als am Tag zuvor (Abb. 7.4-31). Die größten Ozonabnahmen bis zu 14% werden an diesem Tag entsprechend der vorherrschenden Windrichtung im Süden von Berlin im Bereich der hohen Ozonkonzentrationen berechnet. Im Stadtgebiet und um Königs-Wusterhausen ergeben sich aber im Gegensatz zu Szenario 2 wieder Zunahmen der Ozonkonzentration, die in der Berliner Innenstadt bis zu 10% reichen. Diese relativ starken Zunahmen sind auf die starken  $\text{NO}_x$ -Emissionsminderungen des Szenarios 4a zurückzuführen, die in der Berliner Innenstadt und im Bereich der Autobahnen ein Absinken der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen bis um 70% (Abb. 7.4-32) bewirken. Der negative Effekt der  $\text{NO}_x$ -Minderung wird am 27. Juli noch verstärkt durch die überwiegend windschwachen Bedingungen.

Die Höhe der bei  $\text{NO}_x$ -Minderungen oft berechneten Ozonzunahmen hängt also nicht nur vom Ausmaß der  $\text{NO}_x$ -Minderung sondern auch von den meteorologischen Bedingungen ab, wobei windschwache Bedingungen eine Ozonzunahme in der näheren Umgebung der Maßnahme begünstigen. Der nichtlineare Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Emissionsminderung und den damit erreichbaren Ozonveränderungen zeigt sich auch besonders deutlich am 27. Juli, an dem das Ozonmaximum näher an Berlin liegt als an den Tagen zuvor: Die stärksten Ozonzunahmen im Bereich des Ozonmaximums südlich von Berlin

werden für das Tempolimit berechnet, bei dem die NO<sub>x</sub>-Emissionen nur um 10% und die VOC-Emissionen nur um 1% gemindert werden (Abb. 7.4-23). Bei einem Fahrverbot (NO<sub>x</sub>-Emissionen -19%, VOC-Emissionen -28%) ergeben sich in diesem Bereich nur Abnahmen (Abb. 7.4-27). Das schärfste Kfz-Szenario (Szenario 4a mit NO<sub>x</sub>-Emissionen -51%, VOC-Emissionen -31%) führt zwar größtenteils zu den stärksten Ozonabnahmen, im Bereich der hohen NO<sub>2</sub>-Konzentrationen ergeben sich aber wieder Ozonzunahmen (Abb. 7.4-31). Die berechneten Ozonkonzentrationsänderungen sind damit auch eine Funktion des relativen Verhältnisses der NO<sub>x</sub>- zur VOC-Emissionsminderung. Dabei darf nicht vergessen werden, daß die angegebenen Emissionsveränderungen mittlere Angaben für das ganze Gebiet sind. Da das NO<sub>x</sub>-VOC-Emissionsverhältnis von Raster zu Raster variiert, kann das Verhältnis der Minderungsraten entlang der Trajektorie der Luftmassen, deren Schadstoffbelastung letztendlich das Ozonmaximum im Lee bestimmt, stark von dem über das ganze Untersuchungsgebiet gemittelten Verhältnis abweichen. Windrichtung und Windgeschwindigkeit sind damit ebenfalls wichtige Einflußfaktoren, die die Effizienz einer Maßnahme bestimmen. Dies zeigt sich auch schon in den von Tag zu Tag unterschiedlichen Auswirkungen der einzelnen Szenarien.

**Szenario 4b: Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw und Lkw und Tempolimit in der Untersuchungsregion kombiniert mit Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern**

Das Szenario 4b kombiniert Szenario 4a für das Untersuchungsgebiet mit einem Fahrverbot in den an das Untersuchungsgebiet angrenzenden Bundesländern Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen. Im Untersuchungsgebiet führt diese Maßnahme zu einer Abnahme der episodenspezifischen NO<sub>x</sub>-Emissionen um 51% und der Kohlenwasserstoffemissionen um 31%. In den umliegenden Bundesländern ergibt ein Fahrverbot (zur Definition siehe Kap. 7.1) eine Abnahme der episodenspezifischen NO<sub>x</sub>-Emissionen um ca. 13% und der Kohlenwasserstoffemissionen um ca. 51% (Tab.7.4.5). Die Umsetzung der Emissionsminderung außerhalb des Untersuchungsgebiets erfolgt durch eine Anwendung des REM3. Die Emissionseingaben für das REM3 werden dazu im Untersuchungsgebiet und in den drei Bundesländern ab dem 25. Juli 0 Uhr um die entsprechenden Beträge gemindert. Die so berechneten stündlichen Konzentrationen dienen dann als neue Randbedingungen für die feinaufgelösten Berechnungen mit CALGRID.

Am 25. Juli 1994 ergibt sich für die Änderung der nachmittäglichen Ozonkonzentration als Folge der Emissionsminderungen des Szenarios 4b eine ähnliche Verteilung wie bei Szenario 4a (vergleiche Abb. 7.4-29 mit Abb. 7.4-33). Die Ozonabnahmen reichen aber im Lee von Berlin im Nordwesten bis 10% (Szenario 4a nur bis 8%), die Ozonzunahmen in der Innenstadt und entlang der Autobahnen sind dagegen geringer als bei Szenario 4a. Am südlichen und östlichen Einströmrand werden die Auswirkungen des Fahrverbots in den umliegenden

Bundesländern deutlich: Bei Szenario 4a ergeben sich dort kaum Änderungen des nachmittäglichen Ozons, da außerhalb des Untersuchungsgebiets keine Maßnahmen angesetzt sind (Abb. 7.4-29). Dagegen liegen die berechneten Ozonkonzentrationen bei Szenario 4b im Großteil dieser Randregionen bis zu 5% niedriger als im Basislauf (Abb. 7.4-33). Es strömen also bereits weniger mit Ozon und anderen Oxidantien belastete Luftmassen in das Untersuchungsgebiet ein, was innerhalb des Untersuchungsgebiets zu einer erhöhten Ozonabnahme führt.

Auch am 26. und 27. Juli 1994 verstärkt das Fahrverbot außerhalb der Untersuchungsregion die durch Szenario 4a in der Untersuchungsregion bewirkten Ozonabnahmen und vermindert die in Gebieten mit hoher  $\text{NO}_x$ -Emission berechneten Ozonzunahmen (vergleiche Abb. 7.4-30 mit Abb. 7.4-34 und Abb. 7.4-3158 mit Abb. 7.4-35). Durch das zusätzliche Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den drei umliegenden Bundesländern steigen die maximalen Ozonabnahmen am 26. Juli von 10% auf 12% und am 27. Juli von von 14% auf 16%.

#### **Szenario 6: Maximal mögliche Minderung der $\text{NO}_x$ -Emissionen in der Modellregion**

Das Szenario "Focus  $\text{NO}_x$ " umfaßt ein Tempolimit für Pkw und Lkw und ein Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw und Lkw (Szenario 4a). Zusätzlich erfolgt eine Stilllegung der Kraftwerke und eine Reduktion bei industriellen und kleingewerblichen Feueranlagen. Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen während der Episode vermindern sich durch dieses Maßnahmenbündel im Mittel über das Untersuchungsgebiet um 66%, die Summe der biogenen und anthropogenen VOC-Emissionen um 33% (Tab. 7.4.5).

Die Abbildungen 7.4-36 bis 7.4-38 zeigen die berechneten nachmittäglichen Ozonänderungen am 25., 26. und 27. Juli 1994. Am 25. Juli erreichen die Ozonabnahmen nordwestlich von Berlin 10% (Abb. 7.4-36), wobei außerhalb des Modellgebiets mit weiteren, möglicherweise höheren Ozonabnahmen zu rechnen ist. Damit sind die maximalen Ozonabnahmen für Szenario 6 höher als für das rein Kfz-bezogene Szenario 4a. Die berechneten Ozonzunahmen sind dagegen etwas geringer.

Auch an den nächsten beiden Tagen sind die als Folge der emissionsmindernden Maßnahmen des Szenarios 6 berechneten Ozonabnahmen leicht höher als bei Szenario 4a. Am 26. Juli 1994 nehmen die berechneten Ozonmaxima bis zu 14% (Abb. 7.4-37), am 27. Juli 1994 bis zu 21% ab (Abb. 7.4-38).

Der Unterschied zwischen Szenario 4a und Szenario 6 besteht in einer deutlich höheren Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen und einer etwas höheren Minderung der VOC-Emissionen. Die zusätzlichen Minderungen bei industriellen Anlagen wirkt sich auf die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen hauptsächlich im und am Rande des Stadtgebiets aus. Dies zeigt der Vergleich der Abbildungen 7.4-32 und 7.4-39, in denen die berechneten  $\text{NO}_2$ -Abnahmen für das Szenario 4a bzw. das Szenario 6 am Nachmittag des 27. Juli dargestellt sind. Die im Mittel

über das Untersuchungsgebiet im Vergleich zu Szenario 4a zwar nur geringfügig höhere VOC-Minderung des Szenarios 6 wirkt sich aber im Bereich der Berliner Abluffahne am 27. Juli doch so stark aus, daß die bei Szenario 4a südlich von Berlin berechneten Ozonzunahmen jetzt nicht mehr auftreten (vergleiche Abb. 7.4-31 mit Abb. 7.4-38).

#### **Szenario 7: Maximal mögliche Minderung der VOC-Emissionen in der Modellregion**

Das Szenario "Focus VOC" besteht aus einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw (Szenario 2) und einer Reduzierung der Lösemittelanwendungen. Die dadurch erreichbare Minderung der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen liegt bei 19%, die der Kohlenwasserstoffe bei 36% (Tab. 7.4.5). Insgesamt sind die Kohlenwasserstoffminderungen bei dem Szenario 7 damit nur geringfügig höher als bei den anderen Szenarien während die NO<sub>x</sub>-Minderungen deutlich niedriger als z.B. bei Szenario 4 und 6 sind. Bezüglich der Minderungsraten ist das Szenario 7 daher am ehesten mit Szenario 2 zu vergleichen.

Am 25. Juli nehmen die maximalen Ozonkonzentrationen im Lee von Berlin im Szenario 7 bis zu 7% ab (Abb. 7.4-40). In Szenario 2, das bei gleichen NO<sub>x</sub>-Minderungsraten wie bei Szenario 7 nur eine VOC-Minderungsrate von 28% hat, werden dagegen nur bis 3,5% Ozonabnahmen berechnet (Abb. 7.4-25). Der relativ geringe Unterschied in den VOC-Minderungsraten dieser beiden Szenarien hat also relativ starke Auswirkungen auf die erreichbaren Ozonabnahmen. In absoluten Zahlen bewirkt das Szenario 2 eine Abnahme der maximalen Ozonkonzentrationen um 3 bis 4 ppb, das Szenario 7 dagegen um 4 bis 8 ppb.

Auch am 26. Juli ist die ozonmindernde Wirkung des Szenarios 7 ca. doppelt so stark wie diejenige des Szenarios 2 (vgl. Abb. 7.4-41 mit Abb. 7.4-26). Die Ozonabnahmen übersteigen jetzt 10%. Noch krasser werden die Unterschiede am 27. Juli. Szenario 7 bewirkt an diesem Tag eine Abnahme der maximalen Ozonkonzentrationen südlich von Berlin bis zu 25%, was absolut gesehen ca. 30 ppb entspricht (Abb. 7.4-42). Bei Szenario 2 dagegen liegen die maximalen Abnahmen bei 8% oder ca. 10 ppb (Abb. 7.4-27). An den letzten beiden Tagen werden mit Szenario 7 auch im Stadtgebiet nur Abnahmen der Ozonkonzentration berechnet.

Interessant ist auch ein Vergleich des Szenarios 7 mit Szenario 6, das eine mehr als dreifach höhere NO<sub>x</sub>-Minderung und eine etwas geringere VOC-Minderung hat (siehe Tab. 7.4.5). Am 25. und 26. Juli sind die mit Szenario 6 erreichbaren Ozonminderungen höher (vergleiche Abb. 7.4-36 mit Abb. 7.4-40 und Abb. 7.4-37 mit Abb. 7.4-41). Am 27. Juli wirkt sich Szenario 7 dagegen stärker in einer Minderung der sehr hohen Ozonwerte aus als Szenario 6 (vergleiche Abb. 7.4-38 mit Abb. 7.4-42). Durch Szenario 6 werden nur maximale Abnahmen der Ozonkonzentration von ca. 21% erzielt, am Ort des berechneten Ozonmaximums ergibt sich nur eine Abnahme von ca. 15%. Hier werden mit Szenario 7 bis zu 25% Ozonabnahme berechnet. Das maximale Kohlenwasserstoff-Szenario bewirkt am 27. Juli in der Berliner

Ablufffahne also eine stärkere Ozonabnahme als das maximale  $\text{NO}_x$ -Szenario. In der Abbildung 7.4-43 sind dazu die durch die beiden Szenarien bewirkten absoluten Änderungen der nachmittäglichen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen am 27. Juli zusammengestellt. Für Szenario 6 (Focus  $\text{NO}_x$ ), das durch das Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Lkw eine starke Abnahme der  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Stadtbereich und auf den Autobahnen bewirkt, werden in der Innenstadt und im Bereich des Autobahnkreuzes bei Königs-Wusterhausen Abnahmen der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen von 10 bis 15 ppb berechnet (Abb. 7.4-43 oben). In diesen Gebieten sind die erreichbaren Ozonabnahmen gering oder es werden wie im Stadtgebiet sogar Zunahmen berechnet (Abb. 7.4-38). Das Szenario 7 (Focus VOC) dagegen hat sowohl im Stadtgebiet als auch im Bereich der Autobahnen sehr viel geringere Auswirkungen auf die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen. Im Stadtgebiet nehmen die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen um höchstens 5 ppb ab, im Bereich des Autobahnkreuzes Königs-Wusterhausen werden kaum Änderungen berechnet. Südlich davon ergeben sich sogar leichte Zunahmen der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen (Abb. 7.4-43 unten). Maximale Ozonabnahmen werden im Szenario 7 im Gegensatz zu Szenario 6 auch dort berechnet, wo die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen hoch sind. In Szenario 6 kommt es in diesen Gebieten nur zu einer geringeren Abnahme der Ozonkonzentrationen oder sogar zu Zunahmen, da eine starke Abnahme hoher  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen lokal die Ozonbildung eher verstärkt. Dagegen sind die mit Szenario 6 erreichbaren Ozonabnahmen in Gebieten niedriger  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen im Südwesten Berlins höher als diejenigen des Szenarios 7.

Die unterschiedlichen Auswirkungen von Szenario 6 und 7 haben ihre Ursache in den unterschiedlichen photochemischen Regimen der drei betrachteten Tage: Am 25. und 26. Juli werden im Bereich der Ozonmaxima im Lee von Berlin relativ niedrige Stickoxidkonzentrationen berechnet. Solche Gebiete sind eher  $\text{NO}_x$ -limitiert, d.h. eine Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen führt zu einer Abnahme der Ozonkonzentrationen. Am 27. Juli fallen dagegen die hohen Ozonkonzentrationen mit hohen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen zusammen. Solche Gebiete, die in der Regel nur in oder am Rande von Ballungsgebieten zu finden sind, sind eher Kohlenwasserstoff-limitiert. Hier ergibt die Minderung der Kohlenwasserstoffe eine Abnahme der Ozonkonzentrationen während die  $\text{NO}_x$ -Minderung unter Umständen sogar zu einer Zunahme der Ozonkonzentrationen führen kann. Ob und in welchem Maße die Ozonkonzentrationen zu- oder abnehmen, wird damit zu einer komplexen Funktion der lokalen Emissionsverhältnisse, der Reaktivität der emittierten Kohlenwasserstoffe und nicht zuletzt der meteorologischen Verhältnisse, die die Höhe der Schadstoffbelastung in der Ablufffahne eines Emissionsgebietes bestimmen.

### **Szenario 8a: Maximal mögliche Minderung der NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen in der Untersuchungsregion**

Das Szenario 8a kombiniert das Szenario "Focus VOC" mit dem Szenario "Focus NO<sub>x</sub>". Die Minderung der episodenspezifischen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen erreicht dadurch im Untersuchungsgebiet 66%, die der Kohlenwasserstoffe 40% (Tab. 7.4.5). Dieses Szenario ist bezüglich der Minderungsraten also nahezu identisch mit dem Szenario 6 "Focus NO<sub>x</sub>". Lediglich die Kohlenwasserstoffminderung ist höher als bei diesem Szenario.

Die für das Szenario 8a berechneten Ozonveränderungen unterscheiden sich daher nur geringfügig von denen für das Szenario 6 "Focus NO<sub>x</sub>" (vergl. Abb. 7.4-36 und Abb. 7.4-44, Abb. 7.4-37 und Abb. 7.4-45 sowie Abb. 7.4-38 und Abb. 7.4-46). Entsprechend der höheren Kohlenwasserstoffminderung sind die erreichbaren Ozonabnahmen etwas höher als bei Szenario 6. Am 25. Juli werden maximale Abnahmen von 12%, am 26. Juli von 14% und am 27. Juli von 21% erreicht. Die Struktur des Minderungsfeldes wird wie bei Szenario 6 durch die NO<sub>x</sub>-Minderungen bestimmt. Trotz der höheren Kohlenwasserstoffminderung sind die für den 27. Juli berechneten Ozonabnahmen in den Gebieten hoher NO<sub>2</sub>-Konzentrationen niedriger als diejenigen für Szenario 7, da dort die negativen Auswirkungen der NO<sub>x</sub>-Minderung den zusätzlichen Minderungseffekt der Kohlenwasserstoffe aufheben (vergl. Abb. 7.4-42 mit Abb. 7.4-46).

### **Szenario 8b: Maximal mögliche Minderung der NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen in der Untersuchungsregion kombiniert mit einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern**

Das Szenario 8b kombiniert das Szenario "Focus VOC+Focus NO<sub>x</sub>" im Untersuchungsgebiet mit einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen. Die Minderung der episodenspezifischen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen erreicht dadurch im Untersuchungsgebiet 66%, die der Kohlenwasserstoffe 40% (Tab. 7.4.5). Die zusätzliche Maßnahme eines Fahrverbots führt in den Bundesländern außerhalb des Untersuchungsgebiets zu einer Abnahme der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 13% und der anthropogenen VOC-Emissionen um 51%. Die Minderung der Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets erfordert die Verwendung von Randbedingungen, die die Effekte der Maßnahme beinhalten. Diese werden wieder wie für Szenario 4b aus REM3-Berechnungen abgeleitet, bei denen die Emissionen in diesen Bundesländern entsprechend gemindert werden.

Wie schon bei Szenario 4b erhöht die Erweiterung des Maßnahmengebiets die Wirksamkeit der Maßnahmen im eigentlichen Untersuchungsgebiet. Die maximalen Ozonabnahmen steigen im Vergleich zu Szenario 8a um bis zu 3 Prozentpunkte und es werden großflächig

Abnahmen nahezu im gesamten Modellgebiet berechnet (Vergleiche Abb. 7.4-44 mit Abb. 7.4-47, Abb. 7.4-45 mit Abb. 7.4-48 und Abb. 7.4-46 mit Abb. 7.4-49).

### **Szenario 9: Sommerbenzin in der Untersuchungsregion und den umliegenden Bundesländern**

Das Szenario 9 geht davon aus, daß in der Untersuchungsregion und den umliegenden Bundesländern während des ganzen Sommers emissionsarmes Sommerbenzin verwendet wird. Die Minderung der episodenspezifischen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen erreicht durch diese Maßnahme im Untersuchungsgebiet 3%, die der Kohlenwasserstoffe 7%. In den Bundesländern Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen führt die Verwendung von Sommerbenzin zu einer Abnahme der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 3% und der anthropogenen VOC-Emissionen um 11%. Die Minderung der Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets erfordert die Verwendung von Randbedingungen, die die Effekte der Maßnahme beinhalten. Diese werden analog zur Vorgehensweise bei den Szenarien 4b und 8b aus entsprechenden REM3-Berechnungen abgeleitet. Im Gegensatz zu den anderen Szenarien wird die emissionsmindernde Maßnahme nicht erst am 25. Juli umgesetzt, sondern schon zu Beginn der Simulation am 22. Juli (CALGRID), bzw. 20. Juli (REM3). Damit soll berücksichtigt werden, daß das Sommerbenzin nicht nur während der Periode ab dem 25. Juli sondern während des ganzen Sommers verwendet wird.

Die Abbildungen 7.4-50 bis 7.4-52 zeigen die aufgrund der Verwendung von Sommerbenzin berechneten nachmittäglichen Ozonänderungen vom 25. bis zum 27. Juli 1994. Insgesamt sind die berechneten Ozonänderungen gering. Am 25. Juli ergeben sich im Bereich des Ozonmaximums nordwestlich von Berlin kaum Änderungen der Ozonkonzentrationen (Abb. 7.4-50). Am östlichen Einströmrand werden dagegen leichte Zunahmen bis 1% berechnet. Für den nächsten Tag werden für den Großteil des Untersuchungsgebiets Abnahmen bis zu 1,5% berechnet (Abb. 7.4-51). Am 27. Juli, dem Tag mit den höchsten Ozonkonzentrationen liegen die maximal erreichbaren Abnahmen knapp über 2% (Abb. 7.4-52).

### **Szenario 10: Auswirkungen dauerhafter Maßnahmen gemäß Szenario Trend 2005**

Das dauerhafte, langfristige Maßnahmenzenario "Trend 2005" umfaßt Maßnahmen in Deutschland und auf EU-Ebene, die bereits eingeleitet sind oder deren Einleitung in Kürze erfolgt. In Deutschland wird für dieses Szenario von 1994 bis 2005 eine Abnahme der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen um 30% und der anthropogenen VOC-Emissionen um 34% angesetzt. Für das eigentliche Untersuchungsgebiet ergeben sich NO<sub>x</sub>-Minderungen um 21% und anthropogene VOC-Minderungen um 46%. Außerhalb Deutschlands variieren die Emissionsänderungen beträchtlich von Land zu Land, wobei es vor allem in den ehemaligen Ostblockländern auch zu Zunahmen kommen kann.

Die Umsetzung des Langfristszenarios für die CALGRID-Anwendung in der Region Berlin-Brandenburg erfordert die Bereitstellung neuer Randbedingungen, die den Emissionsminderungen des Trendszenarios außerhalb der Modellregion Rechnung tragen. Das REM3 wurde dazu mit den großräumig entsprechend geminderten Emissionen bereits am 18. Juli 1994 gestartet, damit sich die europaweiten Emissionsminderungen bis zum Beginn der CALGRID-Berechnungen am 22. Juli auf die Konzentrationen im Bereich der Untersuchungsregion auswirken können. Für die gesamte CALGRID-Anwendung vom 22. Juli bis zum 6. August werden dann die sich aus diesem REM3-Lauf ergebenden stündlichen Konzentrationen als Randbedingungen verwendet. Die CALGRID-Anfangsbedingungen beruhen auf den Konzentrationen des REM3 um 0 Uhr, 22. Juli 1994. Die Auswertung des Szenarios erfolgt wieder für die nachmittäglichen Ozonkonzentrationen des 25., 26. und 27. Juli 1994.

Die Abbildung 7.4-53 zeigt die aufgrund der Minderungen des Szenarios Trend 2005 berechneten Änderungen der nachmittäglichen Ozonkonzentrationen am 25. Juli 1994. Im gesamten Untersuchungsgebiet werden Abnahmen der Ozonkonzentrationen berechnet, die von wenigen Prozent bis ca 12% reichen.

Am 26. Juli 1994 werden Abnahmen der Ozonkonzentration zwischen 5 und 15% berechnet (Abb. 7.4-54). Die höchsten Ozonabnahmen sind nordöstlich von Berlin zu finden, wo im Basislauf die Maximalkonzentrationen berechnet werden. Insgesamt ist das Gebiet mit Abnahmen größer 10% sehr viel ausgeprägter als am Tage zuvor.

Die größten Ozonabnahmen werden am 27. Juli berechnet. Im Bereich der hohen Ozonkonzentrationen südlich von Berlin nehmen die Konzentrationen bis zu 40% ab (Abb. 7.4-55). Im gesamten mittleren und südlichen Bereich liegen die Abnahmen ansonsten zwischen 10 und 20%.

Die im Trendzenario 2005 berechneten Ozonminderungen bewegen sich in der Größenordnung derer für die effektivsten temporären Maßnahmen, obwohl die regionale und überregionale  $\text{NO}_x$ -Minderung des Trendszenarios deutlich niedriger ist als z.B. diejenige der Szenarien 4 oder 6. Dies unterstreicht die höhere Effektivität großräumig und dauerhaft angesetzter Maßnahmen. Im Berliner Raum werden die negativen Auswirkungen einer lokalen  $\text{NO}_x$ -Kontrolle durch eine großräumige Minderung der Vorläufer ganz aufgehoben. Ozonzunahmen werden also nicht mehr berechnet. Dies bedeutet, um so überregionaler eine Maßnahme angesetzt wird, desto sicherer kann man sein, daß die Maßnahme auch lokal, d.h. am Ort der Minderung, zu einer Abnahme der Ozonkonzentrationen führen wird.

Abb. 7.4-21: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Tempolimit" (Szenario S-1) am 25.7.94, 16-17 Uhr

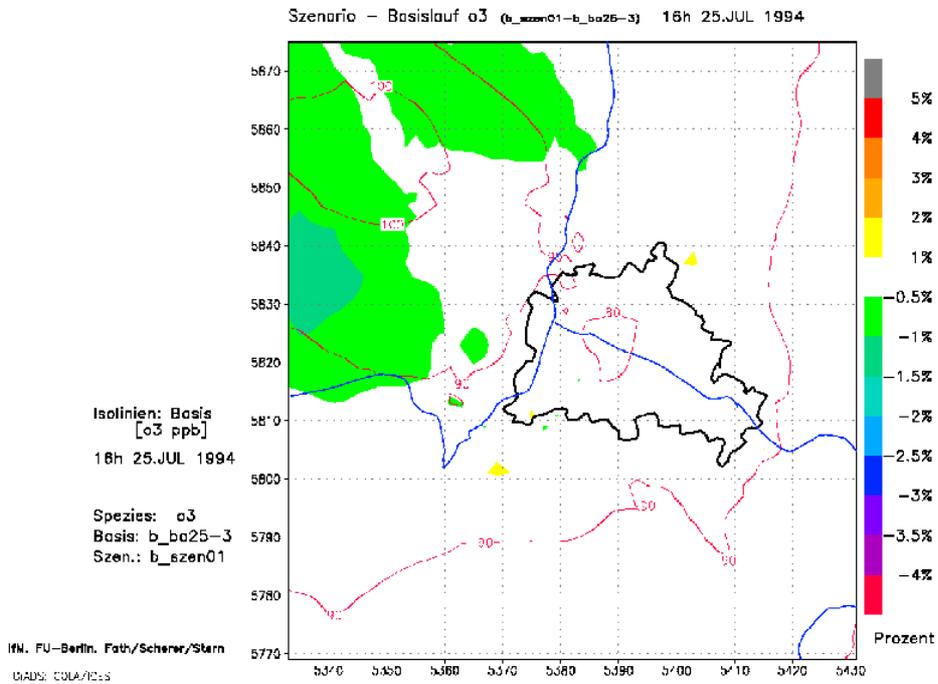


Abb. 7.4-22: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme " Regio-Tempolimit" (Szenario S-1) am 26.7.94, 16-17 Uhr

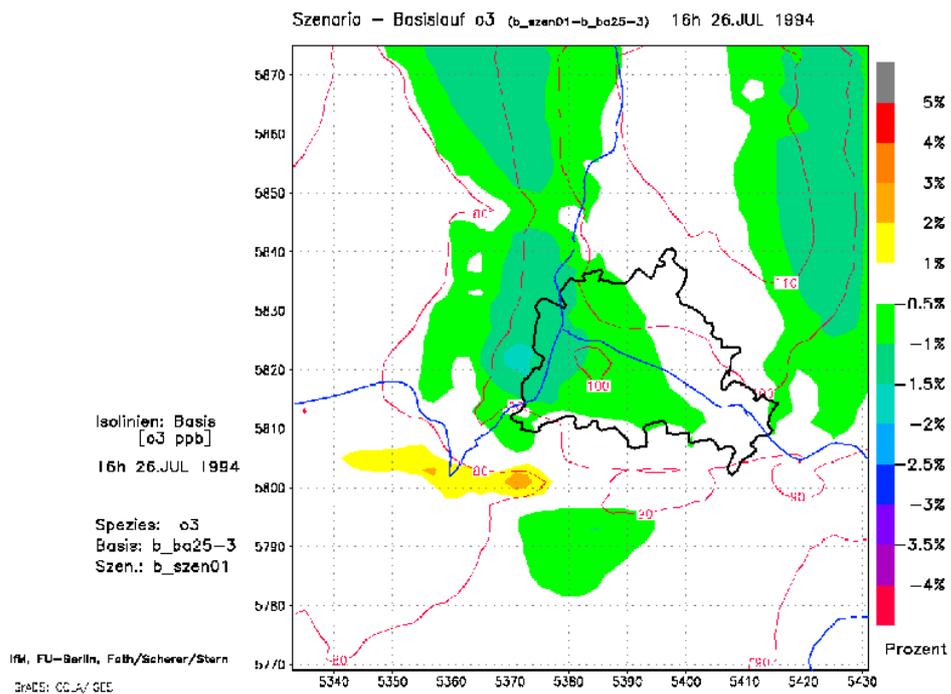


Abb. 7.4-23: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme " Regio-Tempolimit" (Szenario S-1) am 27.7.94, 16-17 Uhr

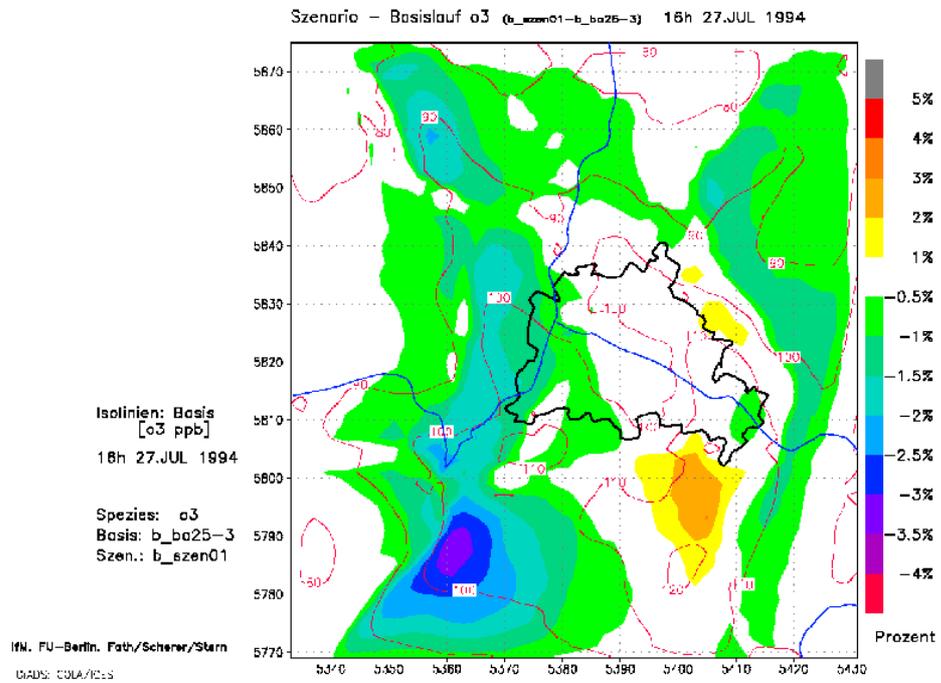


Abb. 7.4-24: Prozentuale Änderung der NO2-Konzentrationen am Boden für die temporäre Maßnahme " Regio-Tempolimit" (Szenario S-1) am 27.7.94, 16-17 Uhr

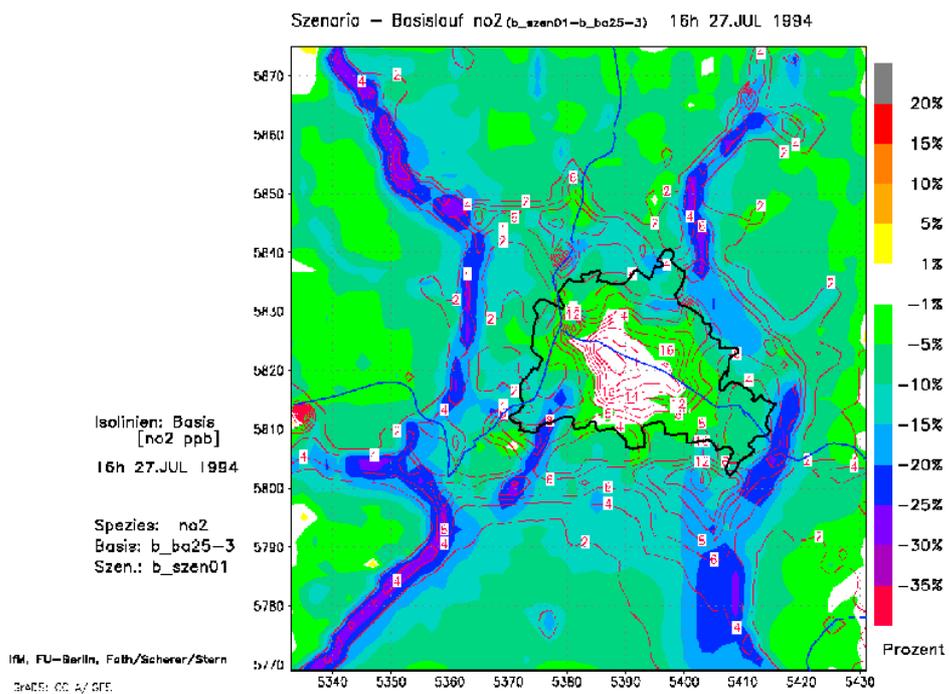


Abb. 7.4-25: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Fahrverbot" (S-2) am 25.7.94, 16-17 Uhr

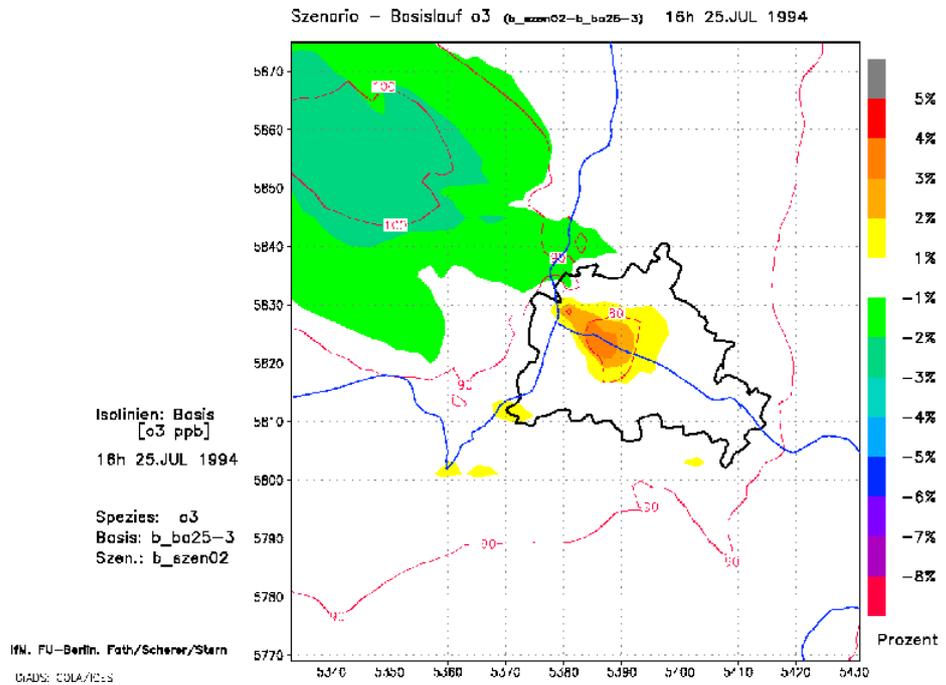


Abb. 7.4-26: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Fahrverbot" (S-2) am 26.7.94, 16-17 Uhr

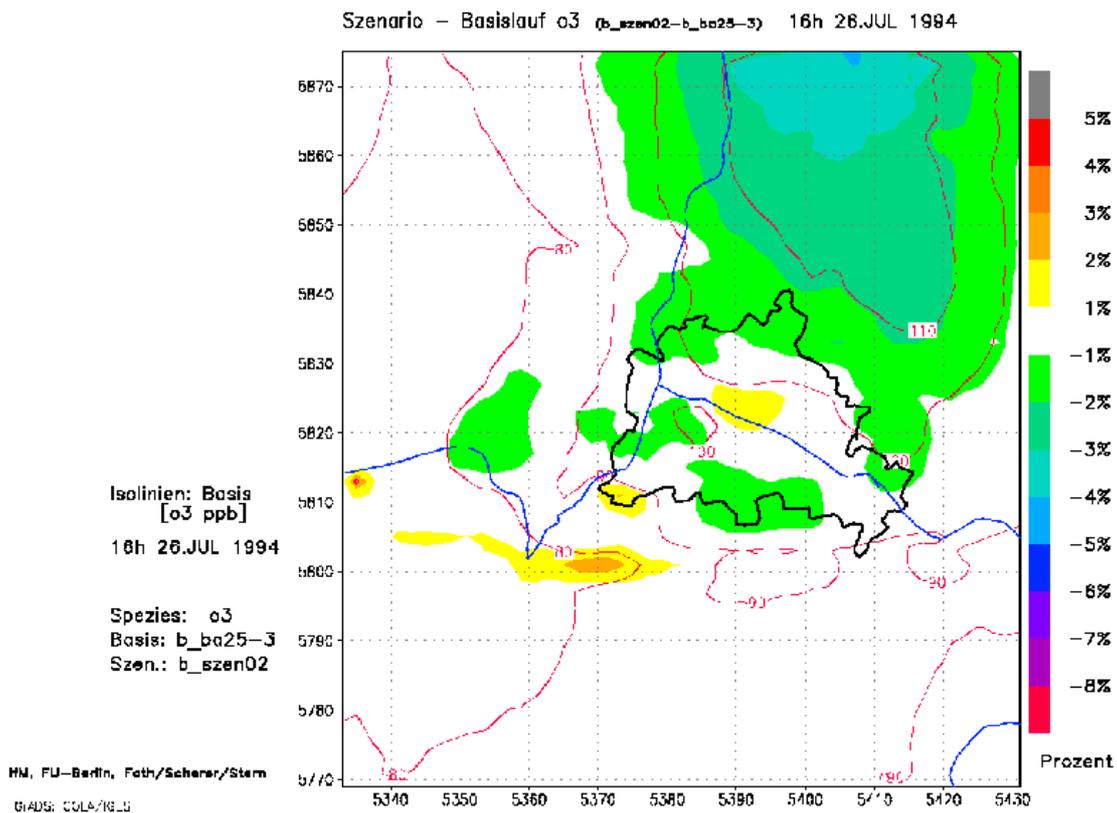


Abb. 7.4-27: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Fahrverbot" (S-2) am 27.7.94, 16-17 Uhr

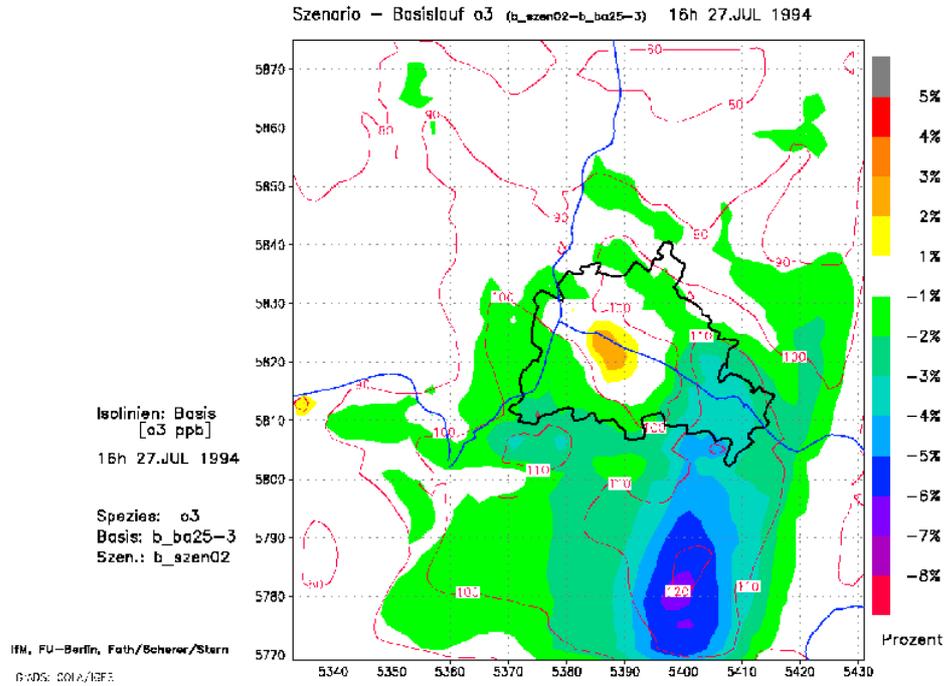


Abb. 7.4-28: Prozentuale Änderung der NO2-Konzentrationen am Boden für die temporäre Maßnahme "Regio-Fahrverbot" (S-2) am 27.7.94, 16-17 Uhr

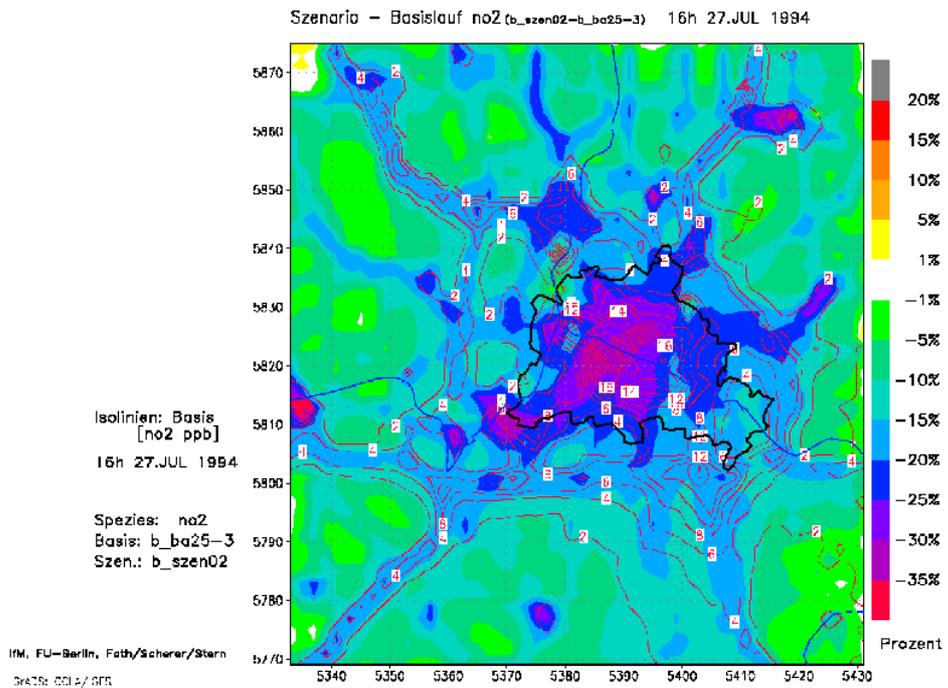


Abb. 7.4-29: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Straßenverkehr" (S-4a) am 25.7.94, 16-17 Uhr

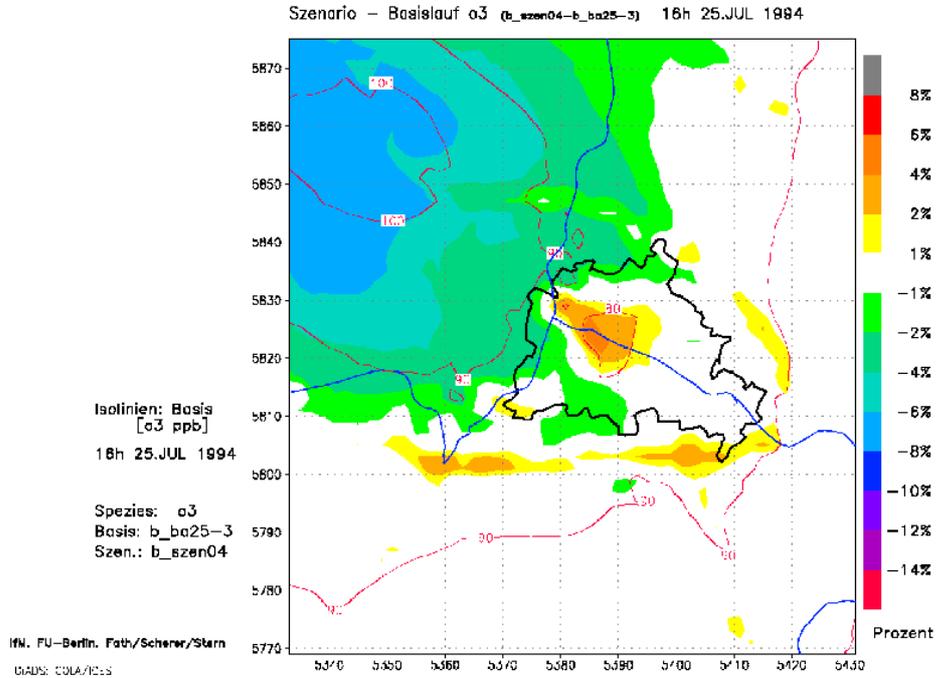


Abb. 7.4-30: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Straßenverkehr" (S-4a) am 26.7.94, 16-17 Uhr

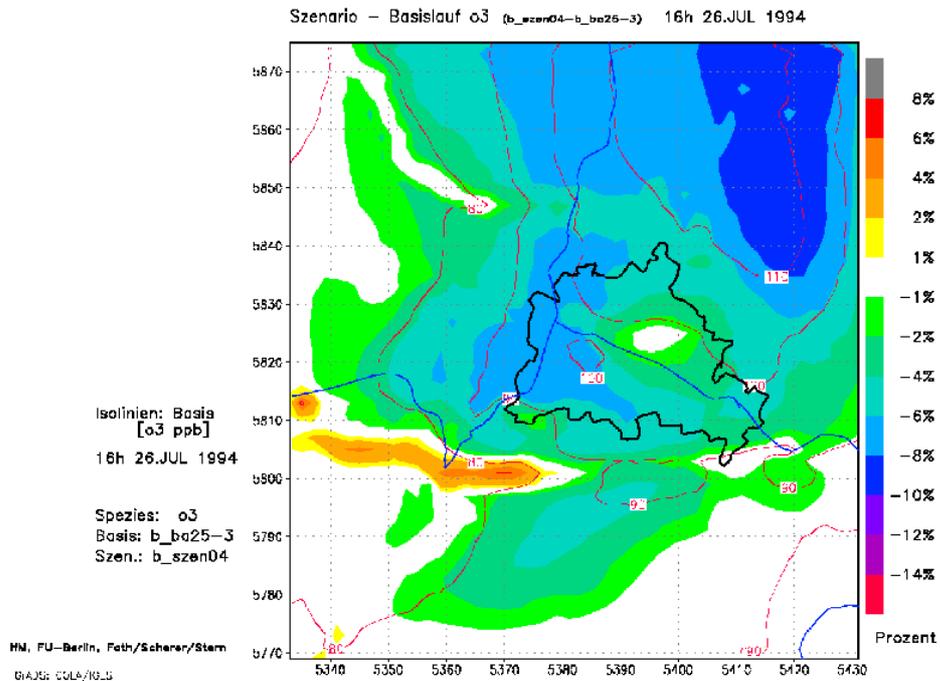


Abb. 7.4-31: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Regio-Straßenverkehr" (S-4a) am 27.7.94, 16-17 Uhr

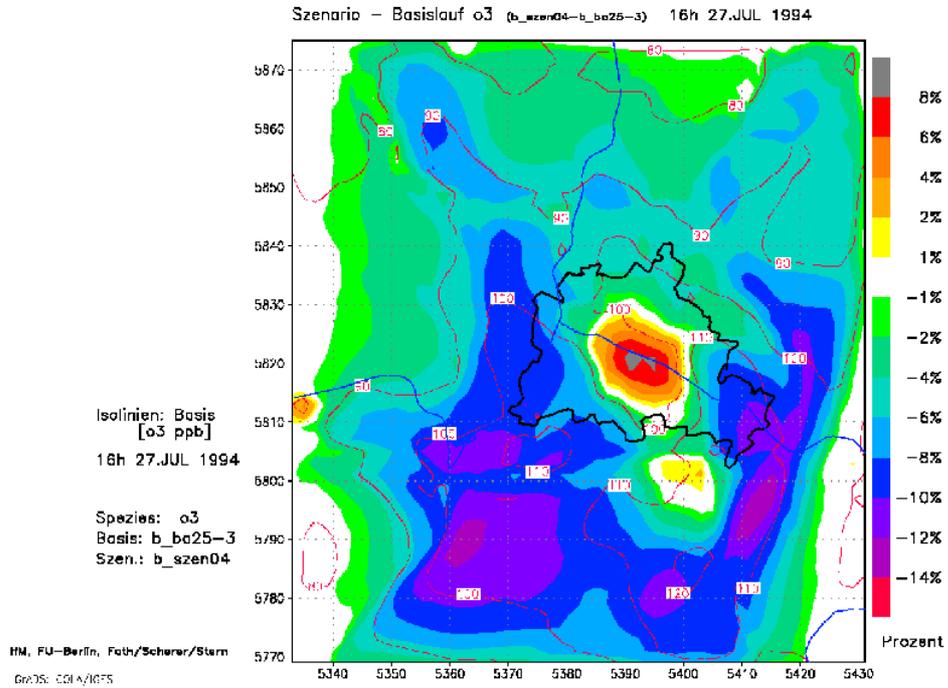


Abb. 7.4-32: Prozentuale Änderung der NO2-Konzentrationen am Boden für die temporäre Maßnahme "Regio-Straßenverkehr" (S-4a) am 27.7.94, 16-17 Uhr

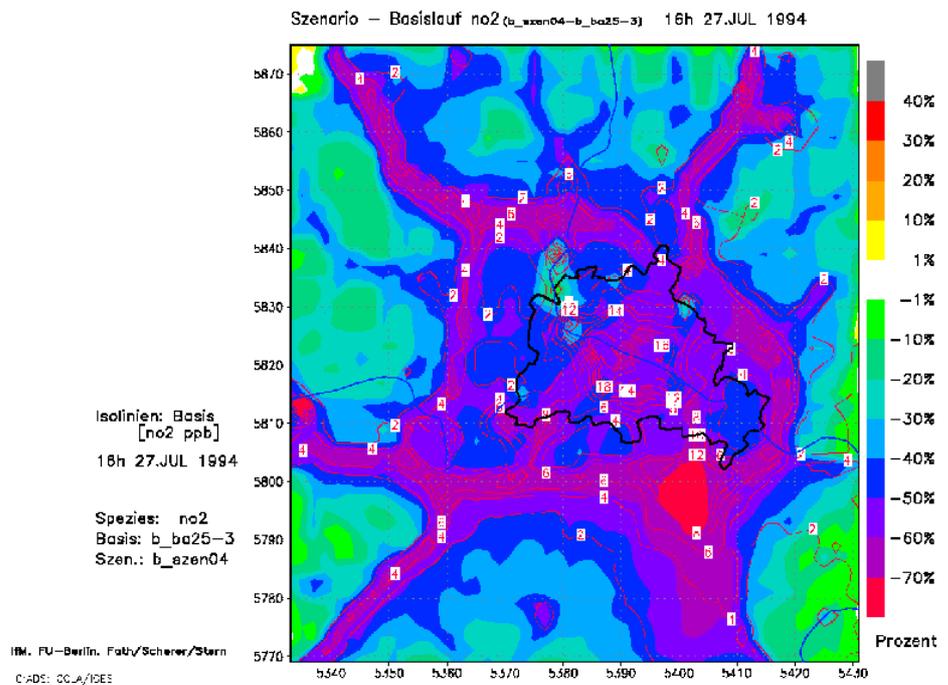


Abb. 7.4-33: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Kombi-Straßenverkehr: Regio + uml. Bundesländer" (S-4b) am 25.7.94, 16-17 Uhr

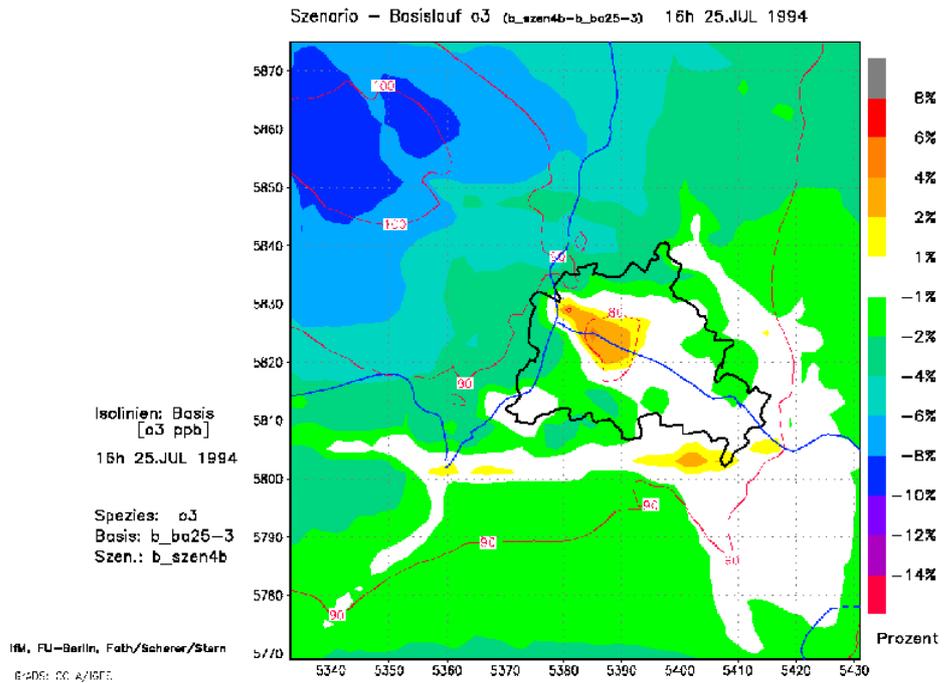


Abb. 7.4-34: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Kombi-Straßenverkehr: Regio + uml. Bundesländer" (S-4b) am 26.7.94, 16-17 Uhr

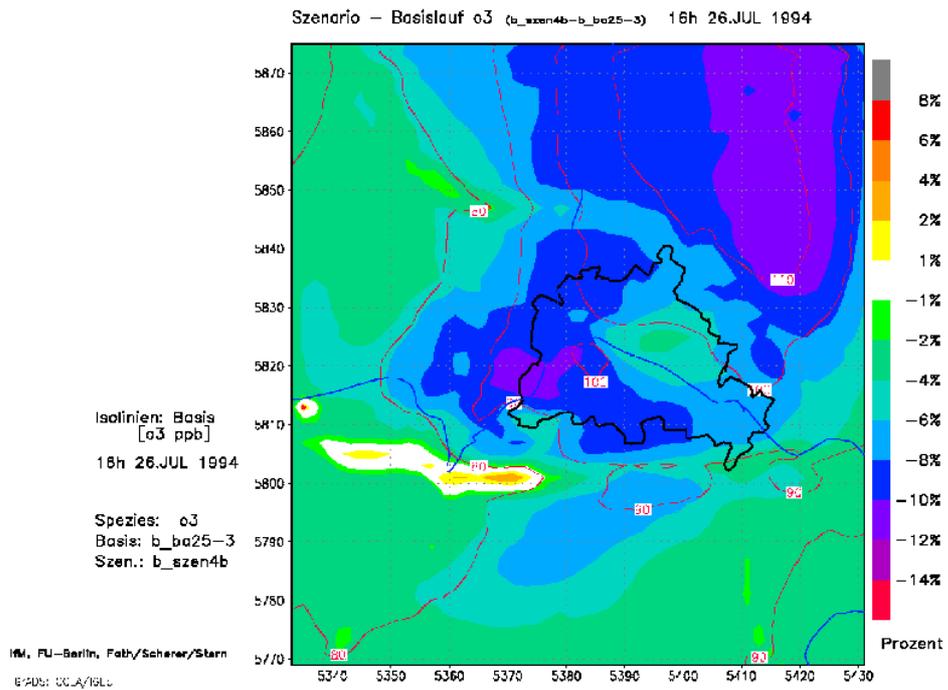


Abb. 7.4-35: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Kombi-Straßenverkehr: Regio + uml. Bundesländer" (S-4b) am 27.7.94, 16-17 Uhr

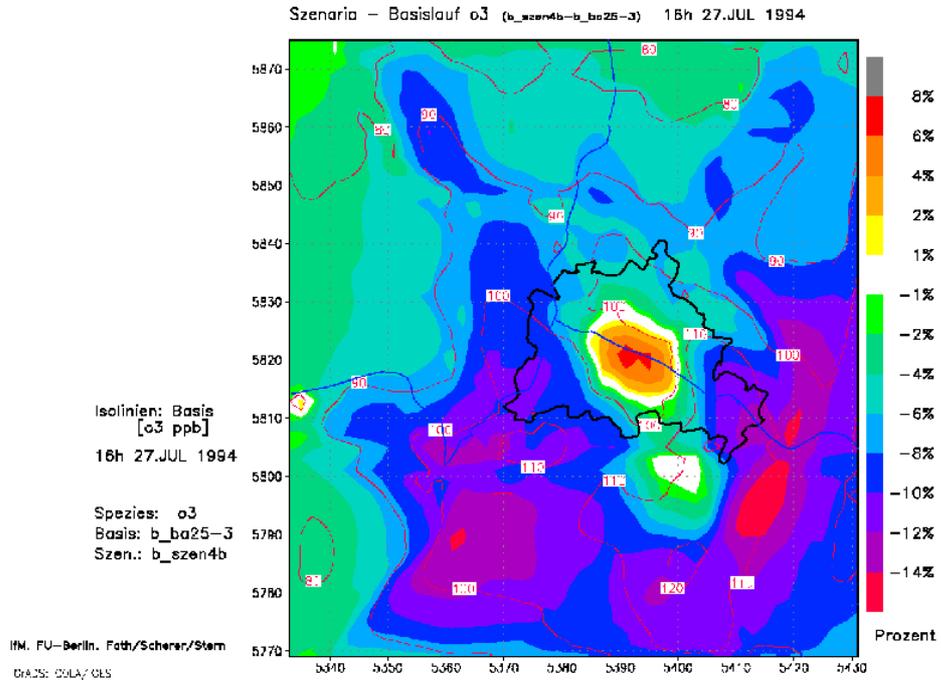


Abb. 7.4-36: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus NOx" (S-6) am 25.7.94, 16-17 Uhr

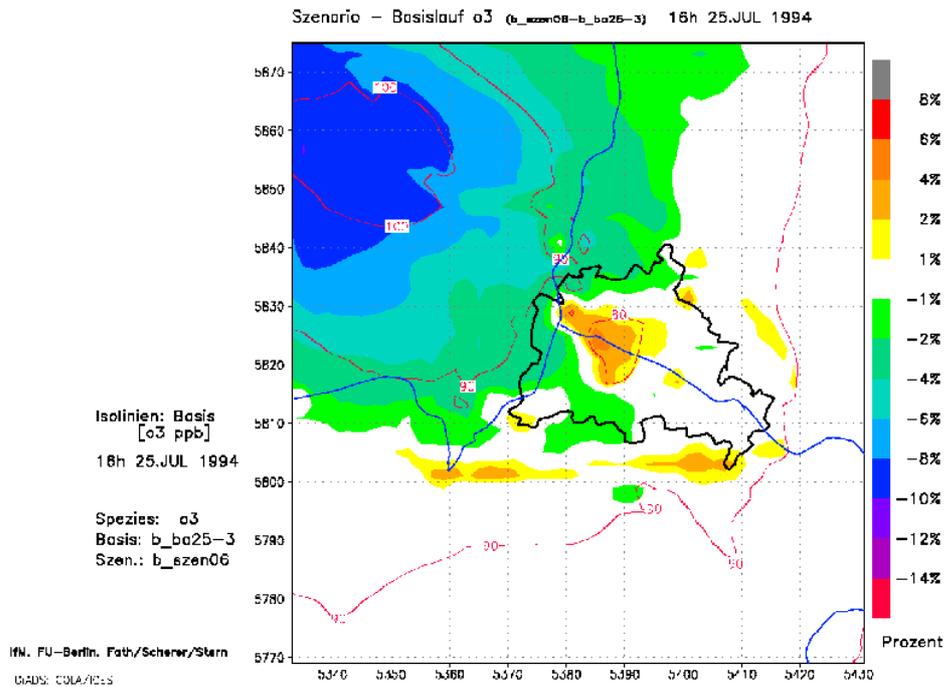


Abb. 7.4-37: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus NOx" (S-6) am 26.7.94, 16-17 Uhr

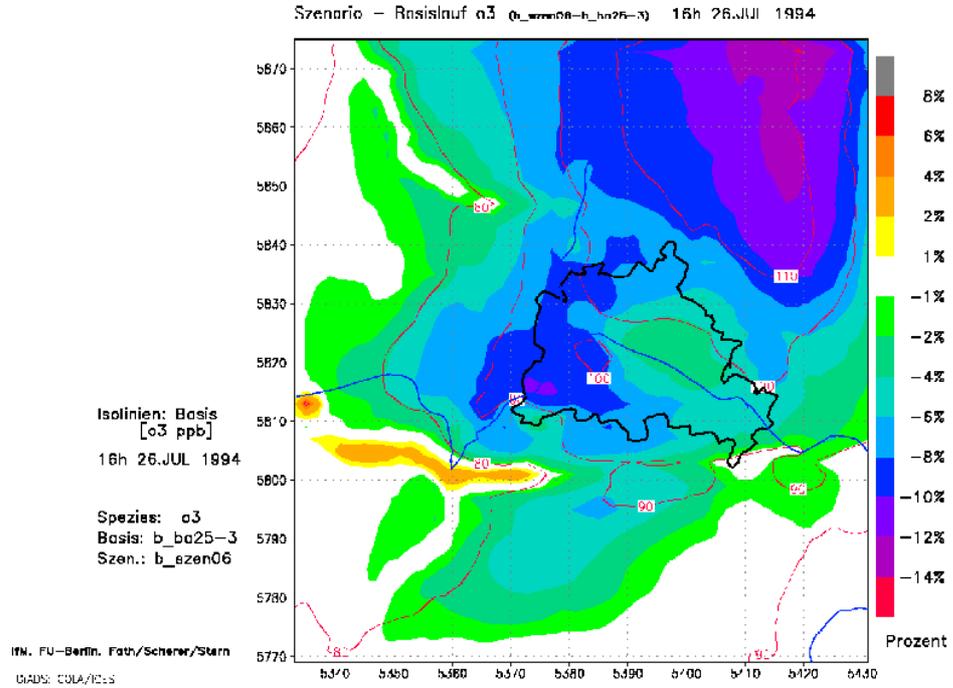


Abb. 7.4-38: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus NOx" (S-6) am 27.7.94, 16-17 Uhr

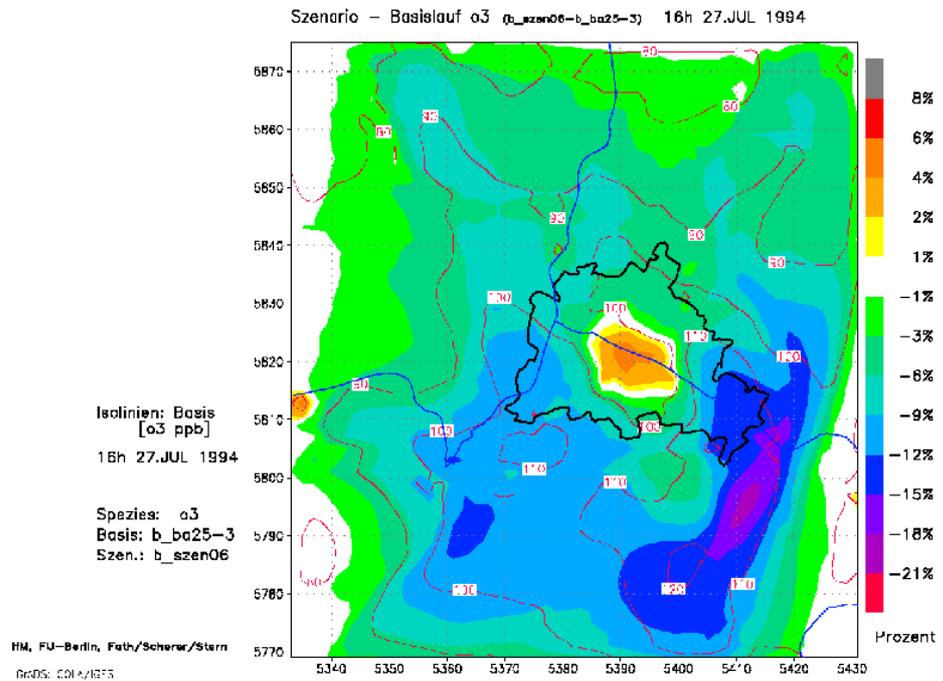


Abb. 7.4-39: Prozentuale Änderung der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen am Boden für die temporäre Maßnahme "Focus NOx" (S-6) am 27.7.94, 16-17 Uhr

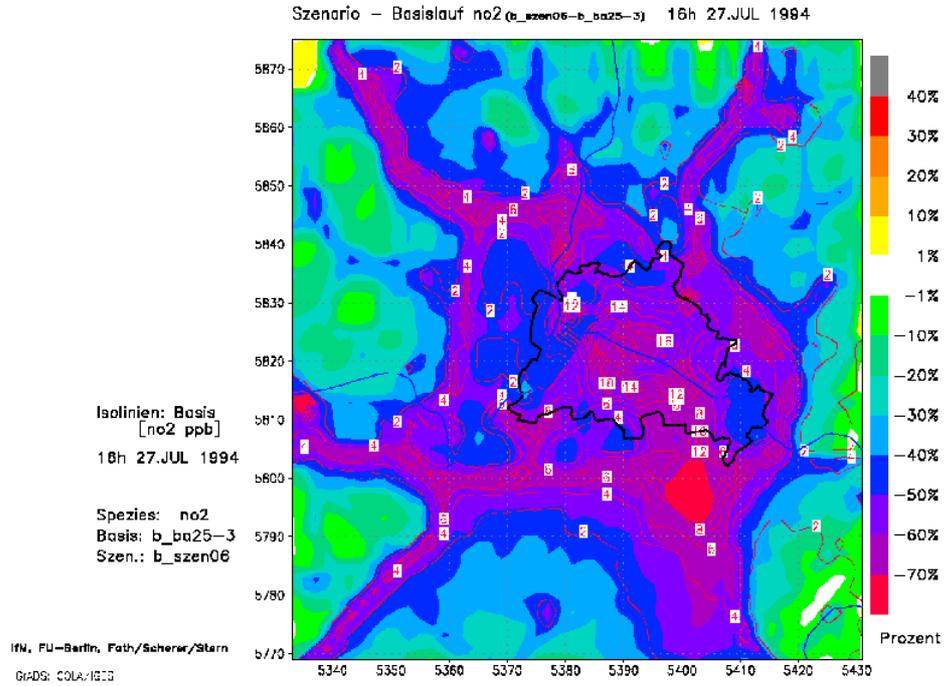


Abb. 7.4-40: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus VOC" (S-7) am 25.7.94, 16-17 Uhr

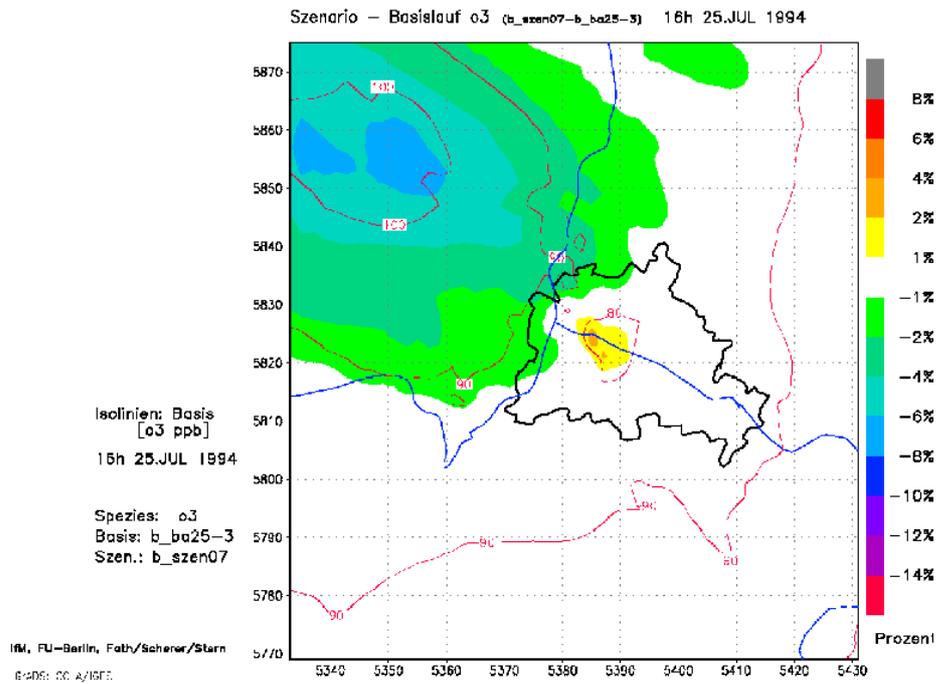


Abb. 7.4-41: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus VOC" (S-7) am 26.7.94, 16-17 Uhr

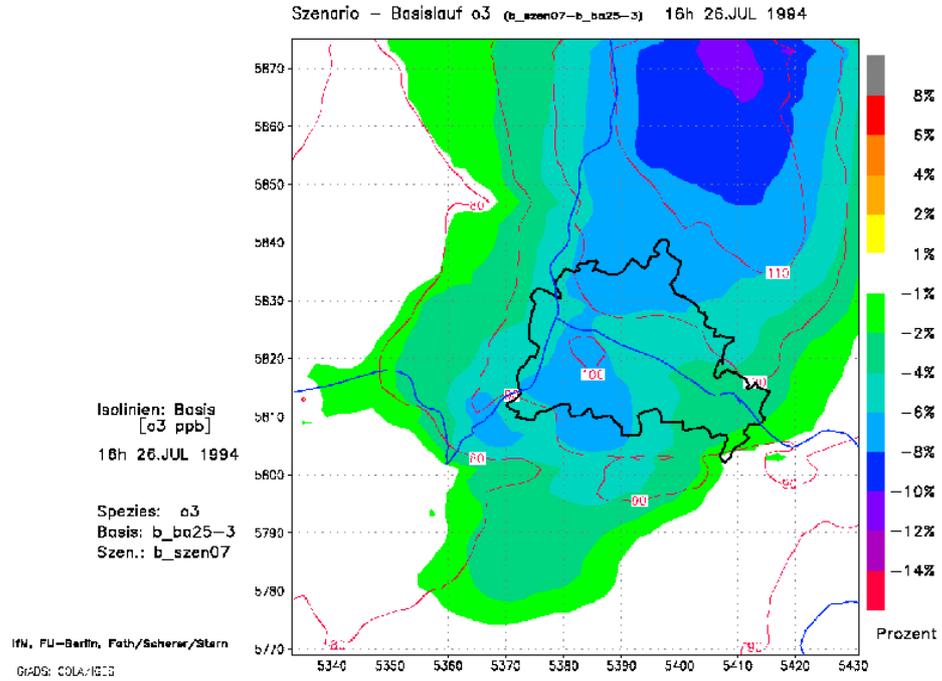


Abb. 7.4-42: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Focus VOC" (S-7) am 27.7.94, 16-17 Uhr

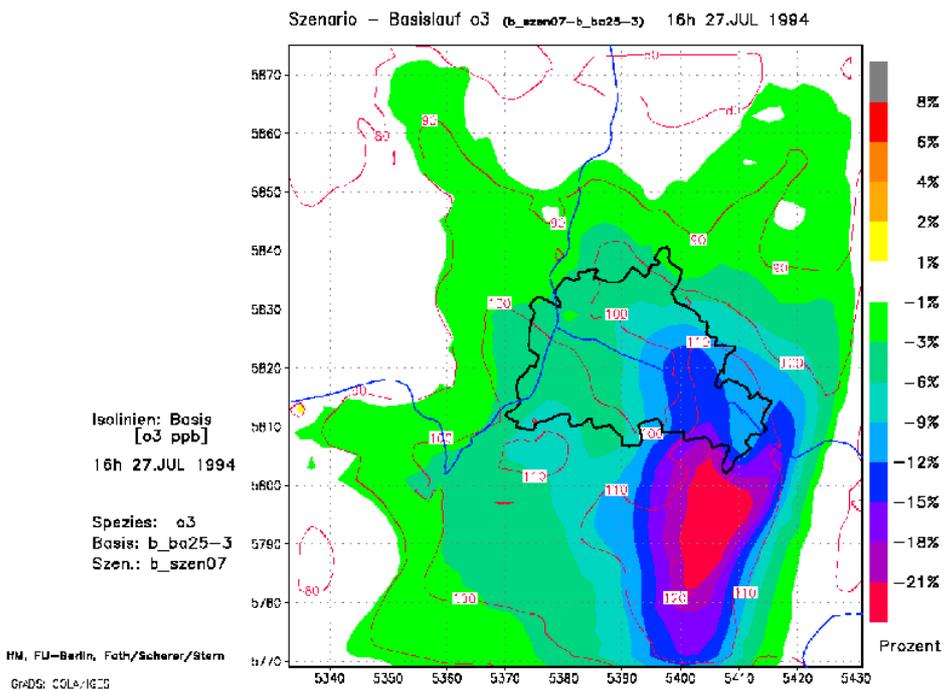


Abb. 7.4-43: Absolute Änderung der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen am Boden für die temporäre Maßnahme "Focus NOx" (oben) und "Focus VOC" (unten) am 27.7.94, 16-17 Uhr

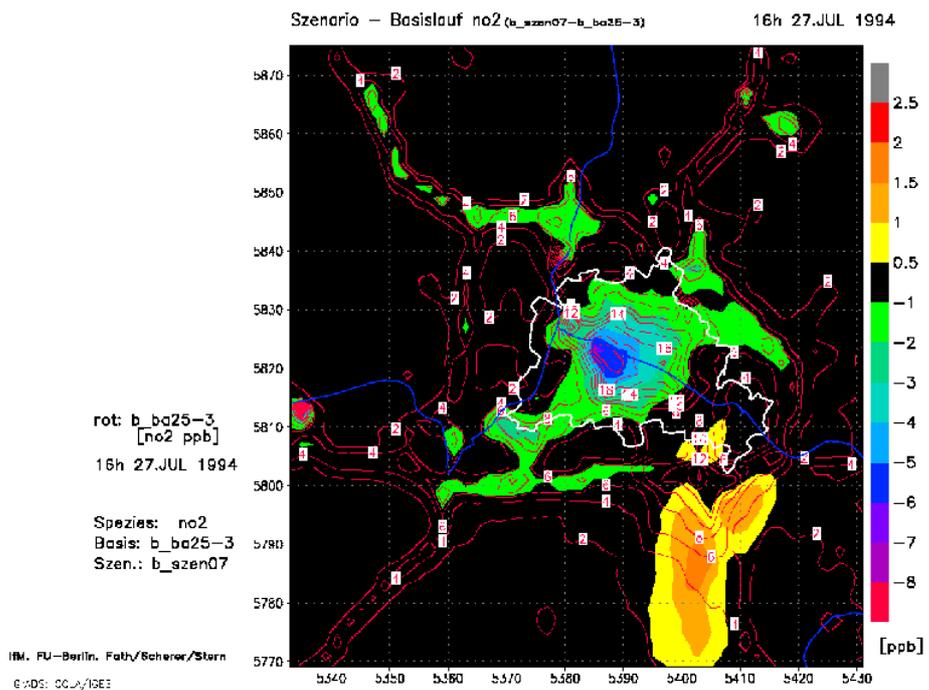
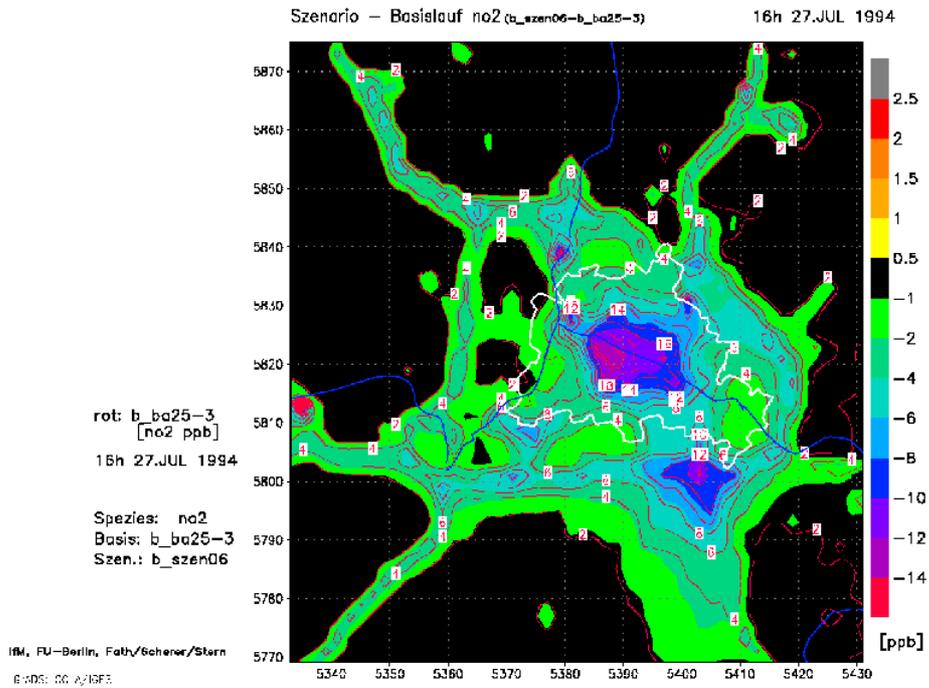


Abb. 7.4-44: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max " (S-8a) am 25.7.94, 16-17 Uhr

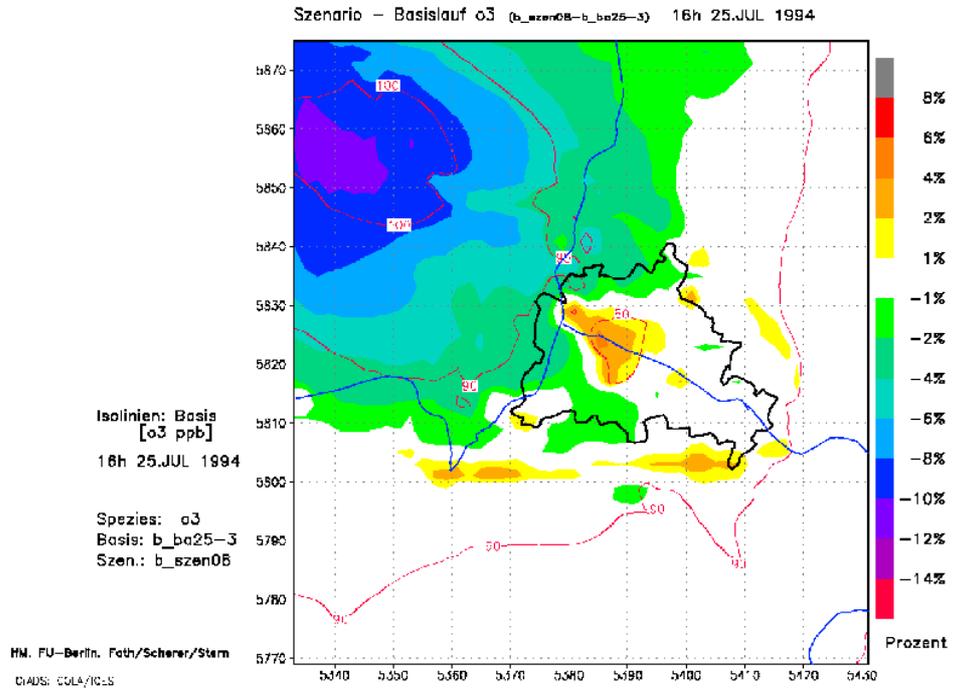


Abb. 7.4-45: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max " (S-8a) am 26.7.94, 16-17 Uhr

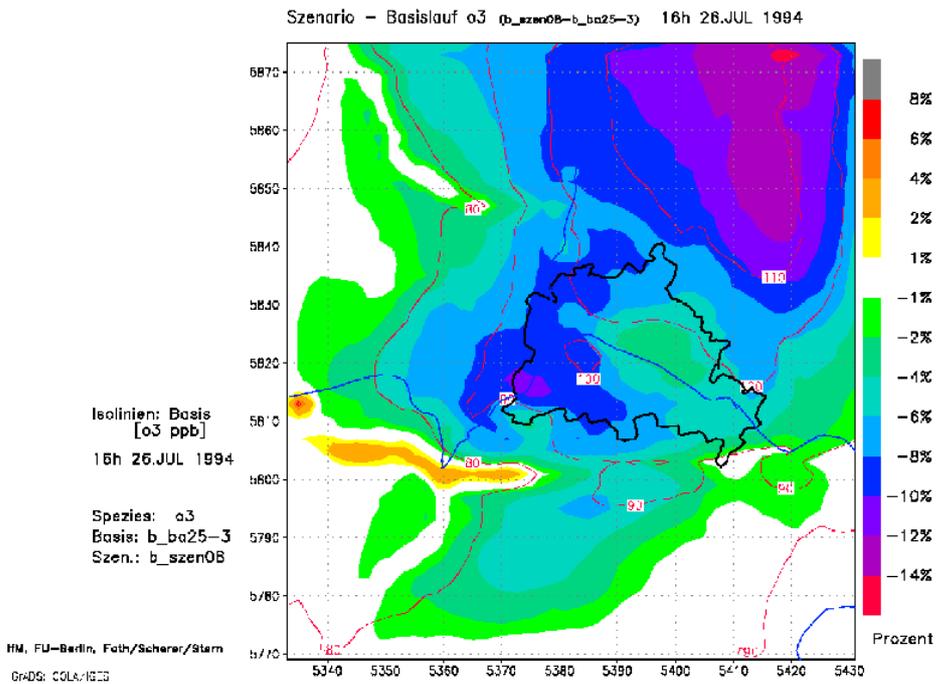


Abb. 7.4-46: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max " (S-8a) am 27.7.94, 16-17 Uhr

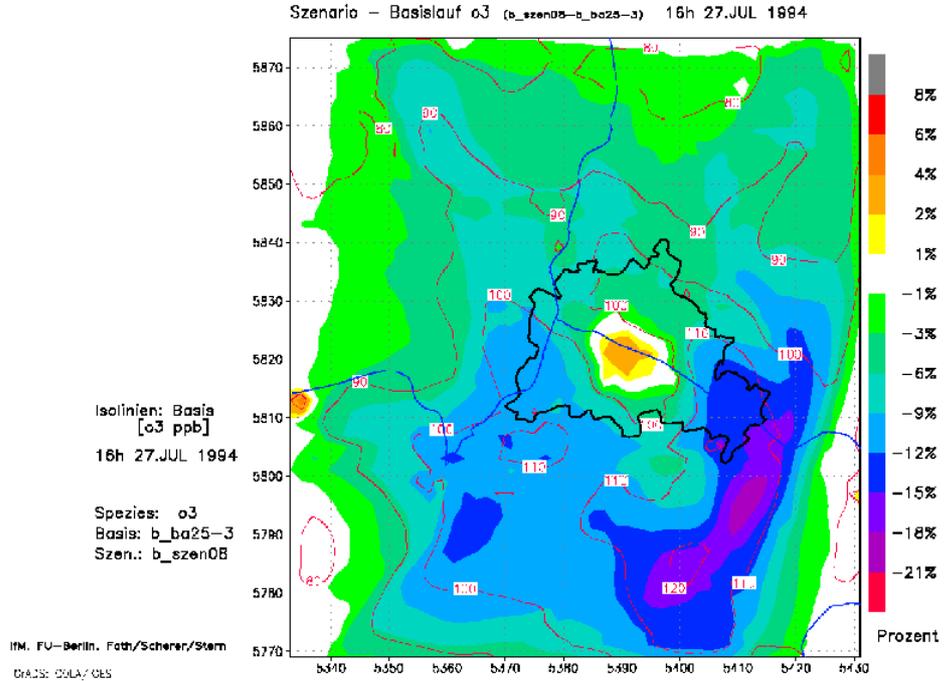


Abb. 7.4-47: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max plus Fahrverbot i. uml. Bundesländer" (S-8b) am 25.7.94, 16-17 Uhr

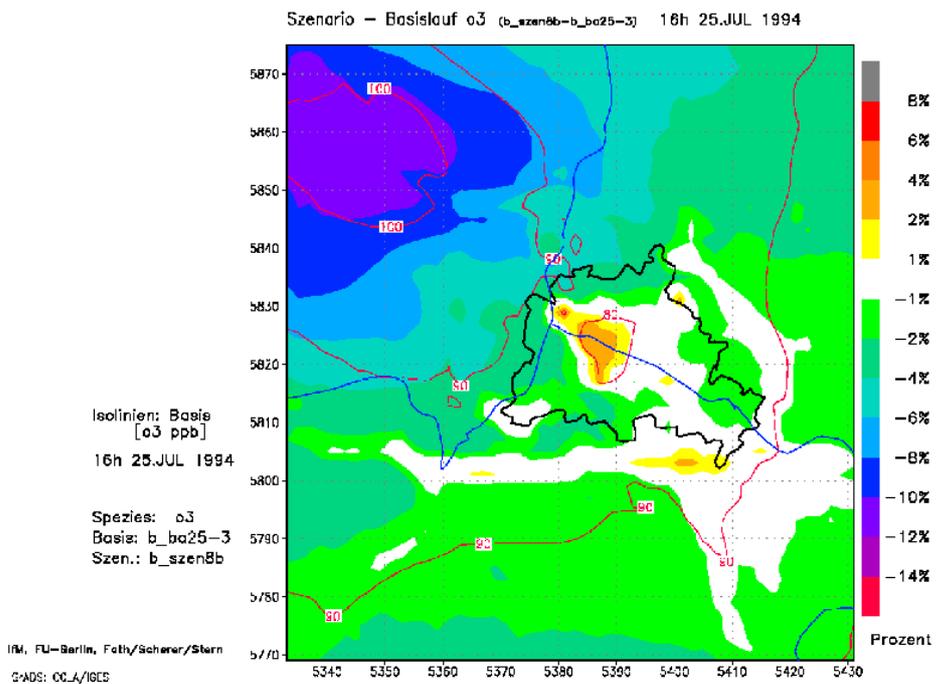


Abb. 7.4-48: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max plus Fahrverbot i. uml. Bundesländer" (S-8b) am 26.7.94, 16-17 Uhr

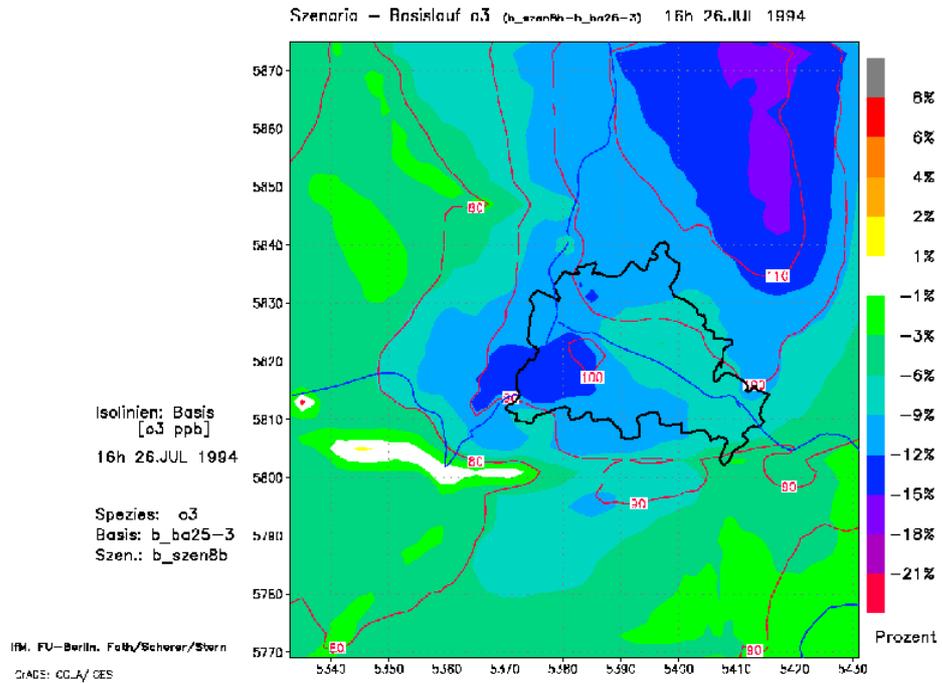


Abb. 7.4-49: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die temporäre Maßnahme "Region-Max plus Fahrverbot i. uml. Bundesländer" (S-8b) am 27.7.94, 16-17 Uhr

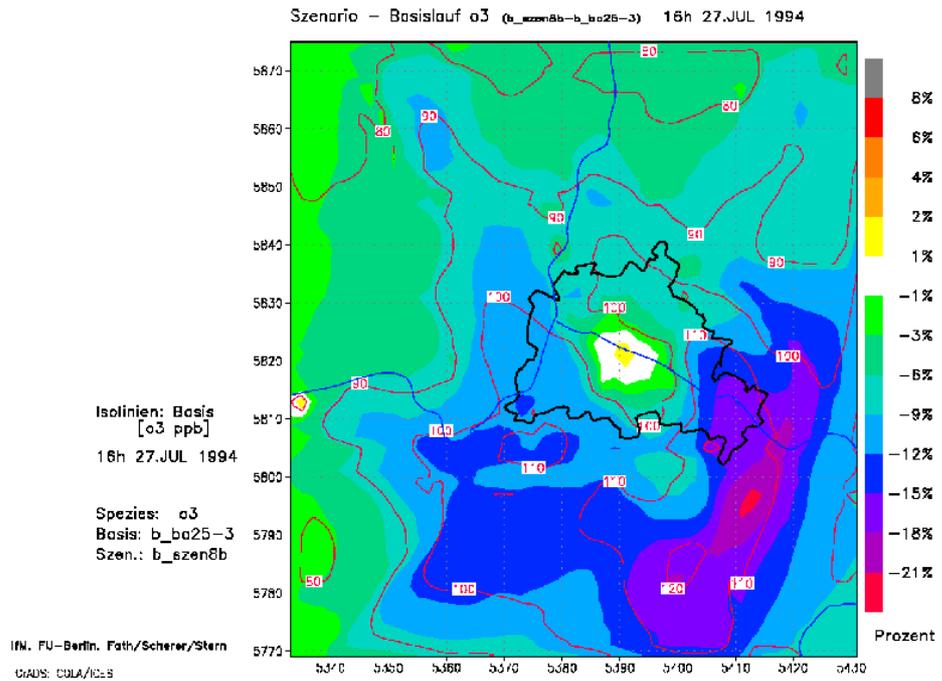


Abb. 7.4-50: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Sommerbenzin" (S-9) am 25.7.94, 16-17 Uhr

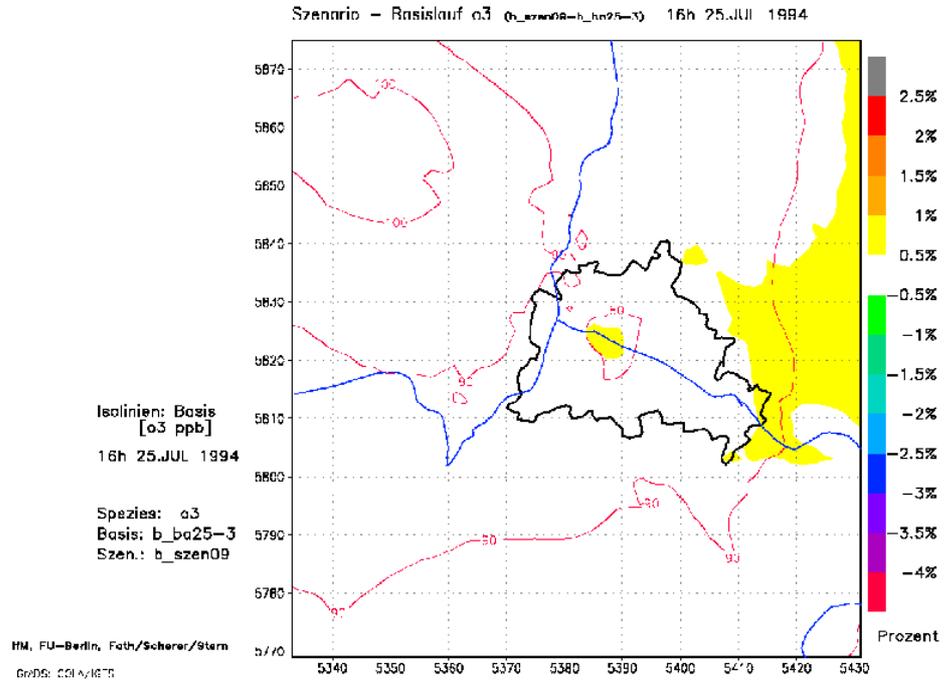


Abb. 7.4-51: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Sommerbenzin" (S-9) am 26.7.94, 16-17 Uhr

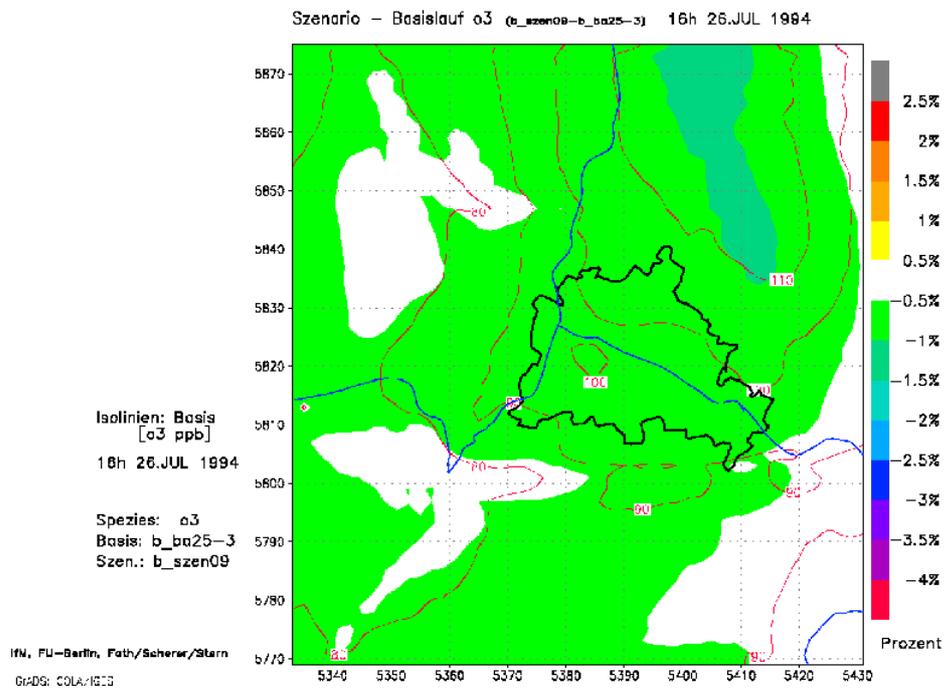


Abb. 7.4-52: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Sommerbenzin" (S-9) am 27.7.94, 16-17 Uhr

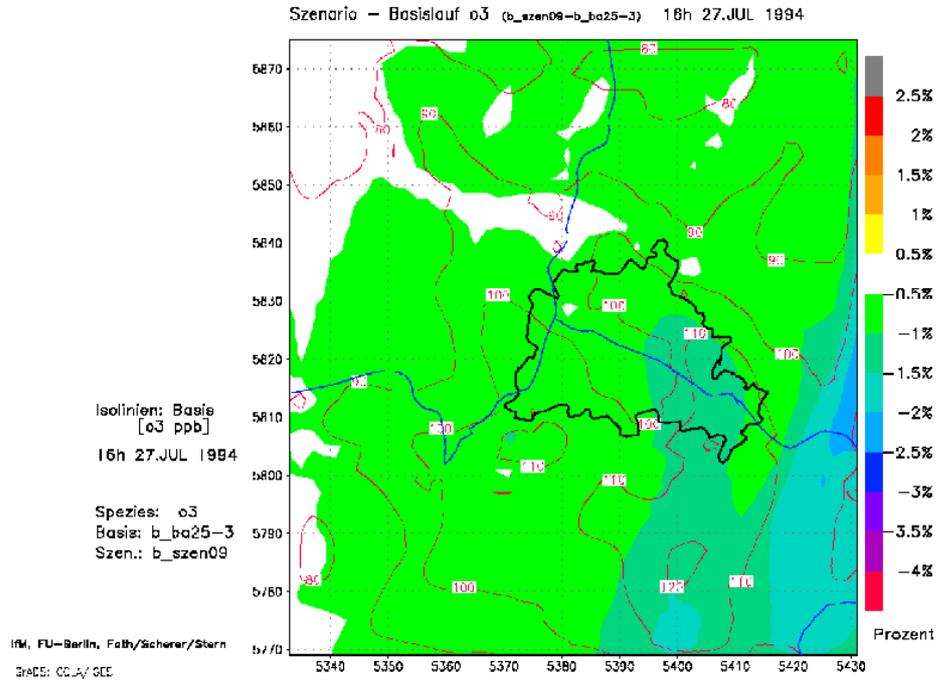


Abb. 7.4-53: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Trend-2005" am 25.7.94, 16-17 Uhr

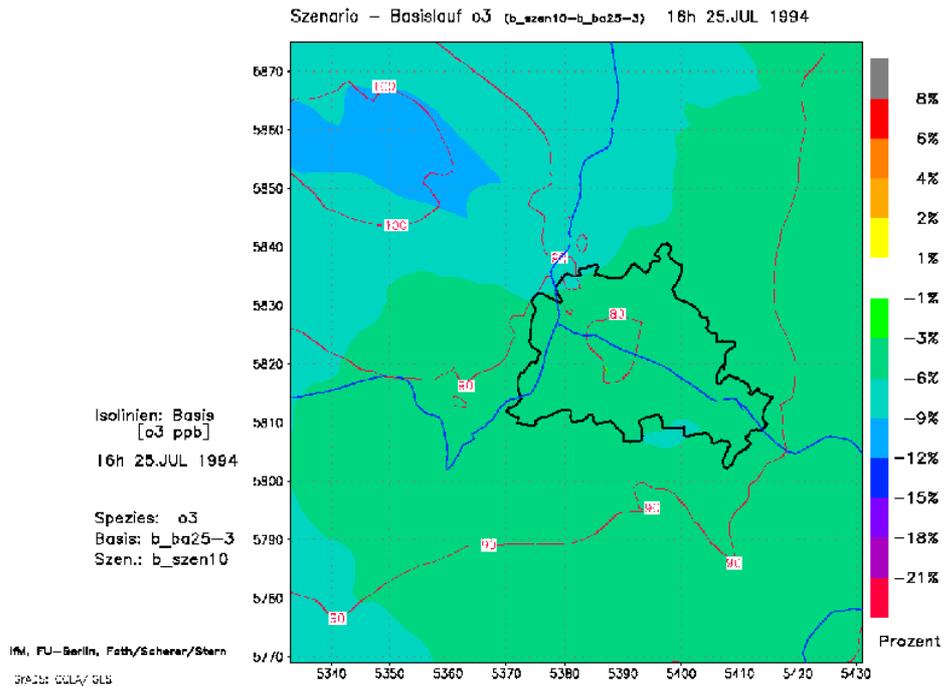


Abb. 7.4-54: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Trend-2005" am 25.7.94, 16-17 Uhr

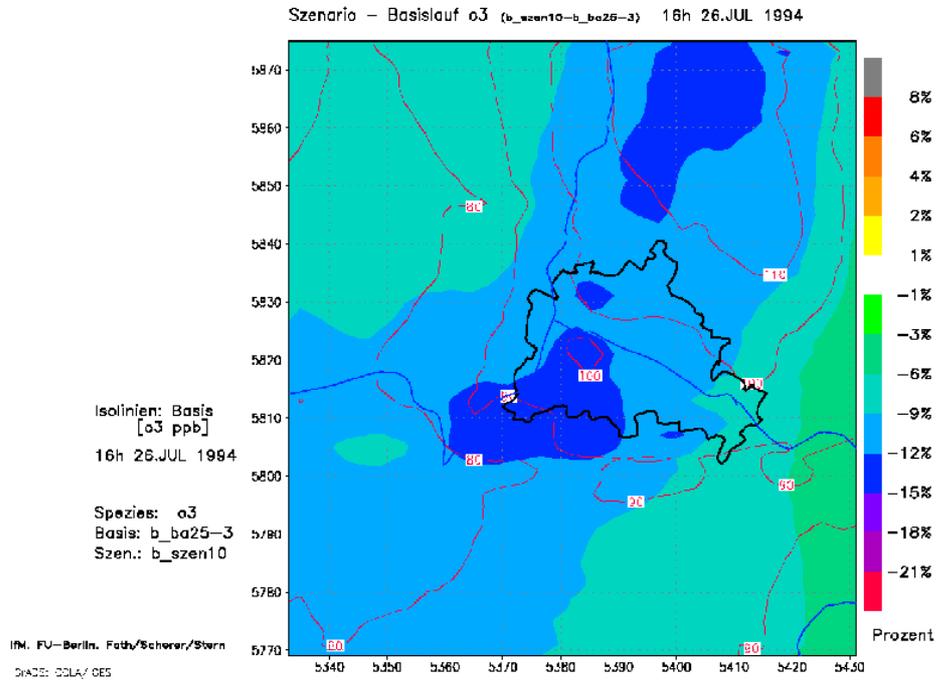
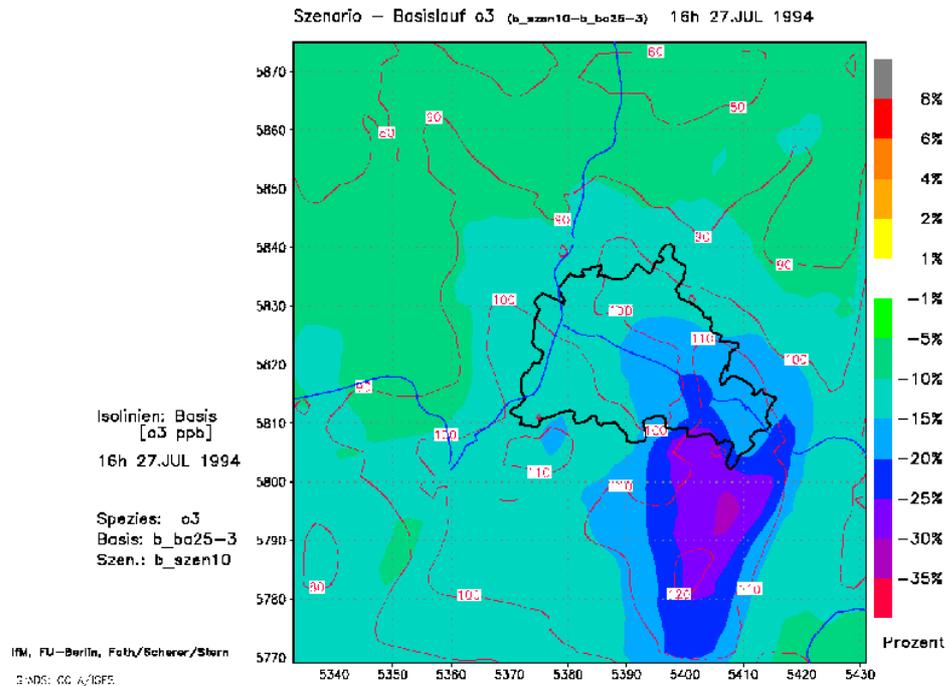


Abb. 7.4-55: Prozentuale Änderung der Boden-Ozonverteilung für die dauerhafte Maßnahme "Trend-2005" am 26.7.94, 16-17 Uhr



## Überschreitungshäufigkeiten

Eine mittlere quantitative Bewertung der Auswirkungen der temporären und langfristigen Szenarienbetrachtungen auf die Oxidantienkonzentrationen im Untersuchungsgebiet wird entsprechend der Untersuchung im Rhein-Main-Neckar-Gebiet (Stern et al., 1997) mit Hilfe der Überschreitungshäufigkeiten verschiedener Konzentrationsschwellenwerte vorgenommen. Die Überschreitungshäufigkeiten werden dabei aus den sog. Gitterstunden ermittelt. Die Anzahl der Gitterstunden gibt an, wieviele Stunden ein gewisser Konzentrationsschwellenwert in den Zellen der Bodenschicht, d.h. der 1. Modellschicht, während des Simulationszeitraums oder an einzelnen Tagen überschritten wird. Die maximal mögliche Anzahl von Gitterstunden in einer Zelle der Bodenschicht entspricht der Anzahl der Stunden des jeweils betrachteten Auswertzeitraums. Sie beträgt für den Zeitraum vom 25. Juli bis zum 6. August also 312 Stunden, für einen Tag 24 Stunden. Aufsummiert über alle Zellen der Bodenschicht ergeben sich für den gesamten Simulationszeitraum  $312 \times 50 \times 54 = 842.400$  Gitterstunden<sup>7</sup>, für einen Tag dementsprechend 64.800 Gitterstunden. Die folgenden Tabellen zeigen die so berechneten Ozon-Überschreitungshäufigkeiten als Prozentanteile von der maximal möglichen Anzahl von Gitterstunden für den Basislauf und die Szenarien.

In der Zeit vom 25. Juli bis einschließlich 6. August 1994 werden im Basislauf in der Bodenschicht in 29,0% aller Gitterstunden im Untersuchungsgebiet mehr als 90 ppb Ozon berechnet (Tab. 7.4.6). Die 120 ppb-Grenze wird in 0,6% aller Gitterstunden überschritten.

Bei Szenario 1, dem Tempolimit, erhöhen sich die Überschreitungshäufigkeiten relativ zum Basislauf für alle Bereiche kleiner 100 ppb, bei Szenario 2 und Szenario 4a für alle Bereiche kleiner 110 ppb. Auch bei den Szenarien 6 und 8a ergeben sich Erhöhungen für den Bereich größer 80 ppb. Für den Bereich größer 110 ppb werden bei allen Szenarien Abnahmen der Überschreitungshäufigkeiten berechnet. Von den temporären Szenarien, die auf das Gebiet Berlin-Brandenburg beschränkt bleiben, führen nur die Szenarien 7 und 9 zu einer generellen Abnahme der Ozonüberschreitungshäufigkeiten größer 80 ppb. Ursache der Erhöhung der Überschreitungshäufigkeiten in den unteren Bereichen ist die starke NO<sub>x</sub>-Betonung der meisten Szenarien (siehe Tab. 7.4.6), die am Ort der Maßnahme, in der Untersuchungsregion Berlin-Brandenburg also hauptsächlich im Stadtgebiet von Berlin und entlang der Autobahnen, teilweise zu Ozonerhöhungen führt, wie bereits oben bei der Diskussion der flächenhaften Konzentrationsänderungen gezeigt wurde. Die VOC-betonten Szenarien 7 und 9 bewirken zwar im Gegensatz zu den NO<sub>x</sub>-betonten Szenarien eine generelle Abnahme der Ozonkonzentrationen größer 80 ppb, ihre Wirksamkeit ist aber in den höheren Ozonbereichen deutlich geringer als diejenigen der NO<sub>x</sub>-betonten Szenarien. Bei dem Szenario 9

---

<sup>7</sup> Die Randzellen werden bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt

"Sommerbenzin" sind die prozentualen Ozonabnahmen so gering, weil die Emissionsänderungen gering sind. Das Szenario 7 "Focus VOC", bei dem immerhin mehr als die Hälfte der anthropogenen VOC-Emissionen gemindert wird, bewirkt aber auch nur eine Abnahme der Ozonüberschreitungen größer 110 ppb um 19,4% (Tab. 7.4.6). Bei Szenario 8a "Focus NO<sub>x</sub> und Focus VOC", das eine dreifach höhere NO<sub>x</sub>-Minderung beinhaltet als Szenario 7, wird für diesen Bereich eine Abnahme von mehr als 33% berechnet.

Daß die Effizienz von Maßnahmen bei einer Erweiterung des Maßnahmensgebiets steigt, zeigt der Vergleich der Überschreitungshäufigkeiten der Szenarien 4a und 4b, bzw. 8a und 8b. Werden z.B. bei Szenario 4a noch geringe Zunahmen der 100 ppb-Überschreitungshäufigkeit berechnet (+1,2%), so ergibt die Erweiterung des Maßnahmensgebiets bei Szenario 4b (Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen und Minderungen im Untersuchungsgebiet wie bei Szenario 4a) bereits eine Abnahme von 21%. Auch in den hohen Bereichen wird die Wirksamkeit der Maßnahme im Gebiet durch die zusätzliche Minderung außerhalb des Gebiets deutlich erhöht.

Dementsprechend ist das Langfristszenario 10, bei dem die Emissionen europaweit und dauerhaft gemindert werden, mit Abstand das wirksamste Szenario zur Reduzierung der Ozon-Überschreitungshäufigkeiten. Nach den Modellrechnungen ergibt sich eine Abnahme der Überschreitungshäufigkeiten des 90 ppb-Schwellenwerts von knapp 28%, diejenigen des 110 ppb-Schwellenwert werden über 50% reduziert. Die im Vergleich zu den temporären Szenarien sehr viel stärkere Minderung in den unteren Bereichen hat ihre Ursache in der großräumigen Absenkung der Hintergrundkonzentrationen, wodurch die Oxidantienbelastung der in das Untersuchungsgebiet einströmenden Luftmassen gesenkt wird.

Es muß betont werden, daß die Überschreitungshäufigkeiten und damit auch deren Änderung durch Emissionsminderungen über das Untersuchungsgebiet und über den gesamten Zeitraum gemittelte Verhältnisse beschreiben. An einzelnen Tagen kann die Effizienz von Emissionsminderungsmaßnahmen durch unterschiedliche meteorologische Bedingungen und durch unterschiedliche hohe Hintergrundbelastungen daher von diesen mittleren Verhältnissen abweichen. Nähere Einzelheiten hierzu enthält der detaillierte Bericht.

Die Auswirkungen des oben bereits mehrfach angesprochenen Titrationseffekts können aus der Reduktionsbetrachtung eliminiert werden, wenn man die Summe aus Ozon und Stickstoffdioxid ( $O_x = NO_2 + O_3$ ) betrachtet. Szenarien werden dann nach der Minderung des Oxidantienpotential  $O_3+NO_2$  beurteilt. In der Tab. 7.4.7 sind dazu die entsprechenden Überschreitungshäufigkeiten für den Summenstoff  $O_x$  zusammengestellt. In der Zeit vom 25. Juli bis einschließlich 6. August 1994 werden im Basislauf in 38,4% aller Gitterstunden der Bodenschicht im Untersuchungsgebiet mehr als 90 ppb  $O_x$  berechnet. Die 120 ppb-Grenze wird in 1,7% aller Gitterstunden überschritten. Bei allen Szenarien ergeben sich für die Bereiche größer 80 ppb jetzt durchweg Abnahmen. Auch bei der Betrachtung von  $O_x$  ist das Langfrist-

szenario 10 das wirksamste Szenario zur Reduzierung der Oxidantien-Überschreitungshäufigkeiten. Da ein Großteil der Wirkung dieses Szenarios auf der Reduzierung des großräumigen Hintergrunds beruht, sind die Unterschiede zwischen O<sub>3</sub>-Minderung und O<sub>x</sub>-Minderung sehr viel geringer als bei den anderen Szenarien. Die NO-O<sub>3</sub>-Reaktion beeinflusst die berechneten Ozonkonzentrationen also nur direkt in den Quellgebieten, wo die hohen NO-Konzentrationen auftreten. Die Erhöhung der Effizienz von Maßnahmen bei einer Erweiterung des Maßnahmensgebiets zeigen sich auch in den O<sub>x</sub>-Überschreitungshäufigkeiten der Szenarien 4b und 8b. Werden bei Szenario 4a Abnahmen der Überschreitung des 90 ppb-Warnwerts von 7,8% berechnet, so ergibt die Erweiterung des Maßnahmensgebiets bei Szenario 4b (Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern und Minderungen im Untersuchungsgebiet wie bei Szenario 4a) bereits eine Abnahme von mehr als 18%.

Das Oxidantiensenkungspotential einer Maßnahme tritt also in Ballungsgebieten deutlicher zu Tage, wenn man die Summe aus O<sub>3</sub> und NO<sub>2</sub> zur Beurteilung heranzieht. Die Einbeziehung des NO<sub>2</sub> ist auch deshalb berechtigt, da es ohne NO<sub>2</sub> nicht zur Ozonbildung kommt. In ländlichen Gebieten mit niedrigen Konzentrationen ist daher auch das Potential der Stickoxide der limitierende Faktor bei der Ozonbildung.

Das Bild bei den Überschreitungshäufigkeiten für NO<sub>2</sub> kann wie folgt zusammengefaßt werden: Im Basislauf werden in 9,1% aller Gitterstunden der 1. Modellschicht mehr als 20 ppb NO<sub>2</sub> berechnet. Die 60 ppb-Marke wird noch in 0,7% aller Gitterstunden überschritten. Diese Überschreitungshäufigkeiten verringern sich in allen Bereichen für alle Szenarien je nach Ausmaß der NO<sub>x</sub>-Emissionsminderung. Die stärksten Abnahmen ergeben sich für Szenario 8b, in dem nur noch in 0,1% aller Gitterstunden NO<sub>2</sub>-Konzentrationen größer 40 ppb berechnet werden.

Die Analysen zeigen auch, daß die Abnahme der NO<sub>2</sub>-Überschreitungshäufigkeiten kaum durch eine Erweiterung des Maßnahmensgebiets (aus dem Vergleich der Überschreitungshäufigkeiten der Szenarien 4a und 4b, bzw. 8a und 8b ablesbar; siehe den detaillierten Bericht). Die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Modellgebiet sind also überwiegend eine Folge der Emissionen des Gebiets. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zum Ozon, bei dem ein bedeutender Anteil über die Ränder in das Untersuchungsgebiet transportiert wird. Dementsprechend geringer sind die NO<sub>2</sub>-Abnahmen des Langfristszenarios 10, da dessen Emissionsminderungen im Untersuchungsgebiet geringer sind als z.B. diejenigen der Szenarien 4 bis 8.

Tab. 7.4.6: Prozentuale Anteile der Überschreitungshäufigkeiten von Gitterstunden-Schwellwerten im Basislauf und in den Szenario-Rechnungen

25.7.-6.8. 1994	O3>80ppb	O3>90ppb	O3>100ppb	O3>110ppb	O3>120ppb
Basislauf	48,4%	29,0%	16,2%	6,2%	0,6%
Szenario 1	49,1% (+1,4%)	29,5% (+1,7%)	16,6% (-2,4%)	6,1% (-1,6%)	0,6% (0%)
Szenario 2	49,5% (+2,3%)	29,7% (+2,4%)	16,6% (+2,5%)	5,7% (-8,1%)	0,3% (-50,0%)
Szenario 4a	51,0% (+5,4%)	29,6% (+2,1%)	16,4% (+1,2%)	4,5% (-27,4%)	0% (-100%)
Szenario 4b	46,9% (-3,1%)	26,2% (-9,7%)	12,8% (-21,0%)	2,7% (-56,5%)	0% (-100%)
Szenario 6	49,6% (+2,5%)	28,5% (-1,7%)	15,7% (-3,1%)	4,2% (-32,3%)	0% (-100%)
Szenario 7	46,9% (-3,1%)	27,1% (-6,6%)	14,7% (-9,3%)	5,0% (-19,4%)	0,1% (-83,4%)
Szenario 8a	49,5% (+2,3%)	28,3% (-2,4%)	15,5% (-4,3%)	4,1% (-33,9%)	0,0% (-100%)
Szenario 8b	45,3% (-6,4%)	25,0% (-13,8%)	12,1% (-25,3%)	2,4% (-61,3%)	0,0% (-100%)
Szenario 9	48,1% (-0,6%)	28,8% (-0,7%)	16,1% (-0,6%)	5,9% (-4,8%)	0,5% (-16,7%)
Szenario 10	39,0% (-19,4%)	21,0% (-27,6%)	10,3% (-36,4%)	2,9% (-53,2%)	0% (-100%)

Anm: Prozentuale Anzahl der Gitterstunden (GS), in denen die angegebenen Ozon-Konzentrationen im Untersuchungsgebiet vom 25.7. bis zum 6.8.1994 für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien überschritten werden. Die maximal mögliche Anzahl von GS ergibt sich aus der Anzahl der Tagesstunden (312) multipliziert mit der Anzahl der ausgewerteten Zellen in der 1. Modellschicht (2700) zu 842.400 GS (=100%). Die Prozentangaben in Klammern geben die Änderung der entsprechenden Überschreitungshäufigkeit des Basislaufs aufgrund der Emissionsminderung des betreffenden Szenarios an.

Tab. 7.4.7: Gitterstunden-Analysen der Szenario-Simulationsrechnungen basierend auf Ox-Konzentrationen

25.7. - 6.8. 1994	Ox> 80ppb	Ox> 90ppb	Ox> 100ppb	Ox> 110ppb	Ox> 120ppb	Ox> 130ppb
Basislauf	59,3%	38,4%	22,7%	10,1%	1,7%	0,1%
Szenario 1	59,2% (-0,2%)	38,0% (-1,0%)	22,5% (-0,9%)	9,7% (-4,0%)	1,4% (-17,7%)	0% (-100%)
Szenario 2	59,1% (-0,3%)	37,6% (-2,1%)	22,1% (-2,6%)	9,2% (-8,9%)	0,8% (-52,9%)	0% (-100%)
Szenario 4a	58,0% (-2,2%)	35,4% (-7,8%)	20,3% (-10,6%)	6,9% (-31,7%)	0,1% (-94,1%)	0% (-100%)
Szenario 4b	53,5% (-9,8%)	31,4% (-18,2%)	16,5% (-27,3%)	4,4% (-56,4%)	0% (-100%)	0% (-100%)
Szenario 6	56,1% (-5,4%)	33,8% (-12,0%)	19,4% (-14,5%)	6,5% (-35,6%)	0,1% (-94,1%)	0% (-100%)
Szenario 7	56,4% (-4,9%)	35,1% (-8,6%)	20,0% (-11,9%)	8,0% (-20,8%)	0,4% (-76,5%)	0% (-100%)
Szenario 8a	56,0% (-5,6%)	33,6% (-11,8%)	19,2% (-15,4%)	6,4% (-36,6%)	0,1% (-94,1%)	0% (-100%)
Szenario 8b	51,5% (-13,2%)	29,7% (-22,7%)	15,3% (-32,6%)	3,9% (-61,4%)	0,0% (-100%)	0,0% (-100%)
Szenario 9	58,9% (-0,7%)	37,9% (-1,3%)	22,2% (-2,2%)	9,7% (-4,0%)	1,4% (-17,6%)	0% (-100%)
Szenario 10	48,2% (-18,7%)	28,1% (-26,8%)	14,1% (-37,9%)	4,9% (-51,5%)	0,1% (-94,1%)	0% (-100%)

Anm: Prozentuale Anzahl der Gitterstunden (GS), in denen die angegebenen Ox-Konzentrationen im Untersuchungsgebiet vom 25.7. bis zum 6.8.1994 für den Basislauf und die verschiedenen Szenarien überschritten werden. Die maximal mögliche Anzahl von GS ergibt sich aus der Anzahl der Tagesstunden (312) multipliziert mit der Anzahl der ausgewerteten Zellen in der 1. Modellschicht (2700) zu 842.400 GS (=100%). Die Prozentangaben in Klammern geben die Änderung der entsprechenden Überschreitungshäufigkeit des Basislaufs aufgrund der Emissionsminderung des betreffenden Szenarios an.

**7.4.6 Vergleichende Bewertung der kleinräumigen CALGRID-Anwendungen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg sowie der großräumigen REM3-Anwendung**

Abschließend sollen die Szenarien noch im Vergleich zu den entsprechenden großräumigen REM3-Modellanwendungen des Teils A des Aktionsprogramms und den entsprechenden CALGRID-Anwendungen auf das Rhein-Main-Neckar -Gebiet bewertet werden. Die Anwendung des REM3 auf deutschlandweite temporäre Szenarien (Stern et al., 1995) hat gezeigt, daß im Mittel über Deutschland für alle betrachteten Szenarien, also auch für die NO<sub>x</sub>-betonten, Abnahmen der Ozon-Überschreitungshäufigkeiten in allen höheren Konzentrationsbereichen berechnet werden. Dies ist in den kleinskaligeren Anwendungen des CALGRID-Modells auf die beiden Ballungsgebiete Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg nicht immer der Fall. Bei einigen der untersuchten Szenarien kommt es hier vor allem in den niedrigeren Bereichen zu Ozonzunahmen. Die für ähnliche Szenarien berechneten Abnahmen der Ozonspitzenwerte sind dagegen in den klein- und großräumigen Berechnungen durchaus vergleichbar.

Die Tabelle 7.4.8 zeigt für die beiden Szenarien "Tempolimit" und "Fahrverbot" (Szenario 1 und 2) die berechneten Änderungen der Ozon-Überschreitungshäufigkeiten für die Gebiete Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg sowie für ganz Deutschland. Es ist offensichtlich, daß die deutschlandweite Umsetzung der Szenarien im Mittel über Deutschland sehr viel effektiver zur Abnahme hoher Ozonkonzentrationen führt als eine Umsetzung in kleineren Gebieten. In Berlin-Brandenburg wirken diese beiden Szenarien relativ betrachtet stärker ozonreduzierend als im Rhein-Main-Neckar-Gebiet.

Tab. 7.4.8: Vergleich der Wirkungen von Minderungsmaßnahmen in den kleinräumigen Untersuchungsgebieten Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg und im großräumigen Untersuchungsgebiet Deutschland

Szenario	O3> 80ppb	O3> 90ppb	O3> 100ppb	O3> 110ppb	O3> 120ppb
<b>A. TEMPOLIMIT</b>					
Rhein-Main-Neckar	+5,1%	+6,0%	+7,3%	+8,5%	+9,5%
Berlin-Brandenburg	+1,4%	+1,7%	-2,4%	-1,6%	0%
Deutschland	-14,1%	-17,3%	-15,3%	-10,9%	-17,6%
<b>B. FAHRVERBOT</b>					
Rhein-Main-Neckar	+6,6%	+6,6%	+4,2%	-2,1%	-14,2%
Berlin-Brandenburg	+2,3%	+2,4%	+2,5%	-8,1%	-50,0%
Deutschland	-22,8%	-25,0%	-21,3%	-15,4%	-21,1%

Das unterschiedliche Verhalten bei den Überschreitungshäufigkeiten hat seine Ursache in den unterschiedlichen Skalenbereichen der beiden Modellanwendungen REM3 und CALGRID. Die Zunahmen der Überschreitungshäufigkeiten in den kleinräumigen Rechnungen treten immer dann auf, wenn hohe NO<sub>x</sub>-Emissionen stark gemindert werden. In Ballungsgebieten sind davon große Teile des Gebiets betroffen, so daß sich die negativen Auswirkungen einer NO<sub>x</sub>-Minderung auch deutlich in den über das Gebiet gemittelten Überschreitungshäufigkeiten niederschlagen. In einer deutschlandweiten Rechnung überwiegen die Gebiete mit niedrigen NO<sub>x</sub>-Emissionen, der negative Effekt einer starken NO<sub>x</sub>-Minderung tritt also nur in einem sehr kleinen Teil des Untersuchungsgebiets auf und spielt daher in den mittleren Überschreitungshäufigkeiten keine Rolle. Zudem werden die positiven Auswirkungen einer NO<sub>x</sub>-Minderung in großen Modellgebieten immer innerhalb des Gebiets berechnet während sie sich in kleinen Modellgebieten zum Teil erst außerhalb des Modellgebiets bemerkbar machen und damit nicht in die Bilanz eingehen. Für eine ausführlichere Diskussion der Unterschiede zwischen klein- und großräumigen Rechnungen sei auf Stern et al. (1997) verwiesen.

In der Tabelle 7.4.9 sind die in den Untersuchungsregionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg für die einzelnen Szenarien ermittelten Emissionsminderungen den daraus resultierenden Änderungen der Ozon-Überschreitungshäufigkeiten größer 90 ppb und größer 120 ppb gegenübergestellt. Die in den beiden Regionen erreichbaren Emissionsminderungen sind bei den Kohlenwasserstoffen relativ ähnlich während die NO<sub>x</sub>-Minderung im Rhein-Main-Neckar-Gebiet bei den temporären Szenarien immer höher ist als in Berlin-Brandenburg. Dies hängt mit den oben bereits angesprochenen strukturellen Unterschieden in den Emissionsdatenbasen zusammen. In der Region Berlin-Brandenburg sind die berechneten relativen Zunahmen der Überschreitungshäufigkeiten geringer und die relativen Abnahmen höher als in der Region Rhein-Main-Neckar. So werden z.B. für Szenario 4a im Rhein-Main-Neckar-Gebiet im Gegensatz zu Berlin-Brandenburg Zunahmen der Ozon-Überschreitungshäufigkeiten größer 90 ppb und größer 120 ppb berechnet. Die berechneten Ozonzunahmen als Folge einer starken NO<sub>x</sub>-Minderung sind im Rhein-Main-Neckar-Gebiet sehr viel ausgeprägter als in Berlin-Brandenburg, da dort vergleichsweise sehr viel mehr NO<sub>x</sub> emittiert wird (Tab. 7.4.9). Lediglich im Langzeitszenario "Trend 2005" werden für den Raum Rhein-Main-Neckar größere relative Abnahmen der Überschreitungshäufigkeiten berechnet als in Berlin-Brandenburg, was zum einen mit den höheren prognostizierten langfristigen NO<sub>x</sub>-Emissionsabnahmen in den alten Bundesländern zusammenhängt (siehe Stern et al., 1995). Dadurch wird der Hintergrundbeitrag im Rhein-Main-Neckar-Gebiet stärker reduziert als in Berlin-Brandenburg. Zum anderen ist die mittlere (berechnete) Hintergrundbelastung während des betrachteten Zeitraums im Raum Rhein-Main-Neckar niedriger als in Berlin-Brandenburg: Im Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg werden in ca. 29% aller Gitterstunden mehr als 90 ppb Ozon berechnet, im Untersuchungsgebiet Rhein-Main-Neckar dagegen nur in ca. 17%. Die Absenkung des Hintergrundbeitrags wirkt sich daher im Rhein-

Main-Neckar-Gebiet stärker auf die Überschreitungshäufigkeiten von Ozonkonzentrationen größer 90 ppb aus als in Berlin-Brandenburg. Auf der anderen Seite werden im Rhein-Main-Neckar-Gebiet während des betrachteten Zeitraums sehr viel mehr hohe Ozonkonzentrationen berechnet als in Berlin-Brandenburg: 2,1% aller Gitterstunden liegen im Rhein-Main-Neckar-Gebiet über 120 ppb, in Berlin-Brandenburg sind es nur 0,6%. Die berechnete Ozonzusatzbelastung ist im Raum Rhein-Main-Neckar also deutlich größer als im Raum Berlin-Brandenburg. Dies erklärt auch die geringere relative Abnahme der hohen Überschreitungshäufigkeiten im Raum Rhein-Main-Neckar.

Die Tabelle 7.4.9 zeigt die maximalen prozentualen und die dazugehörigen absoluten Ozonänderungen, die während des betrachteten Zeitraums für die einzelnen Szenarien in den beiden Untersuchungsgebieten berechnet werden. In Berlin-Brandenburg und auch im Rhein-Main-Neckar-Gebiet ergeben sich die maximalen Abnahmen jeweils am 27. Juli 1994. Im Rhein-Main-Neckar-Gebiet ist dies auch der Tag mit dem höchsten berechneten Ozonmaximum von ca. 160 ppb (siehe Stern et al., 1997). In Berlin-Brandenburg werden am 27. Juli Ozonkonzentrationen bis zu 125 ppb berechnet. Solche Ozonmaxima treten in der Simulation im Untersuchungsgebiet Berlin-Brandenburg auch noch an den folgenden Tagen auf, die erreichbaren Ozonminderungen liegen aber unter denjenigen des 27. Juli. Die erreichbaren Abnahmen der Maximalkonzentrationen bewegen sich in Raum Berlin-Brandenburg und im Raum Rhein-Main-Neckar nach Tab. 7.4.10 für die verschiedenen Szenarien in etwa in demselben Bereich. Größere Unterschiede ergeben sich nur für das Szenario 7, "Focus VOC", das in Berlin-Brandenburg deutlich stärker zur Minderung der Spitzenkonzentrationen beiträgt als im Raum Rhein-Main-Neckar, was wahrscheinlich mit den strukturellen Unterschieden in den Emissionsdatenbasen zusammenhängt. Als zweiter wesentlicher Unterschied manifestieren sich noch einmal die sehr viel negativeren Auswirkungen einer NO<sub>x</sub>-Kontrolle im Raum Rhein-Main-Neckar. Während im Stadtgebiet von Berlin maximale Ozonzunahmen von ca. 10% oder etwa 10 ppb berechnet werden (Szenario 4a) ergeben sich im Raum Rhein-Main-Neckar in den Stadtgebieten Zunahmen bis zu 30% oder knapp 30 ppb.

Es sei angemerkt, daß der obige Vergleich der Wirksamkeit von Emissionsminderungsmaßnahmen in verschiedenen Gebieten nur exemplarischen Charakter haben kann, da anhand der Simulation einer Periode erhöhter Ozonkonzentrationen keine quantitativ belastbaren Aussagen getroffen werden können.

Tab. 7.4.9: NOx- und VOC-Reduktionen bei den verschiedenen Minderungsszeanrien in den Modellregionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg sowie Änderungen der Gitterstunden-Überschreitungshäufigkeiten von Ozon-Konzentrationsschwellwerten

Szenario	Emissions-Minderungen NOX	Emissions-Minderungen VOC (anthrop.+biogene)	Änderung Überschreitungshäufigkeit Ozon	
			>90ppb	>120ppb
1: Tempolimit Berlin-Brandenburg Rhein-Main-Neckar	-10% -14%	-1% -1%	+1,7% +6,0%	0% +9,5%
2: Fahrverbot für nicht schadstoffarme PKW Berlin-Brandenburg Rhein-Main-Neckar	-18% -26%	-28% -27%	+2,4% +6,6%	-50,0% -14,2%
4a: Tempolimit und Fahrverbote Berlin-Brandenburg Rhein-Main-Neckar	-51% -53%	-31% -32%	+2,1% +20,9%	-100% -23,8%
4b: Tempolimit und Fahrverbot (U). Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw (UB) Berlin-Brandenburg Rhein-Main-Neckar	U:-51%,UB:-13% U:-53%,UB:-29%	U:-31%,UB <sup>*</sup> :-51% U:-53%,UB <sup>*</sup> :-33%	-9,7% -7,8%	-100% -71,4%
6: Focus NOx Berlin-Brandenburg Rhein-Main-Neckar	-66% -74%	-33% -33%	-1,7% +35,9%	-100% -28,6%
7:Focus VOC Berlin-Brandenburg Rhein-Main-Neckar	-19% -25%	-36% -33%	-6,6% +35,9%	-83,4% -28,6%
8a:Focus NOx und Focus VOC Berlin-Brandenburg Rhein-Main-Neckar	-66% -74%	-40% -36%	-2,4% +34,7%	-100% -28,6%
8b:Focus NOx und Focus VOC (U). Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in (UB) Berlin-Brandenburg Rhein-Main-Neckar	U:-66%,UB:-13% U:-74%,UB:-29%	U:-40%,UB <sup>*</sup> :-51% U:-36%,UB <sup>*</sup> :-33%	-13,8% +1,8%	-100% -85,7%
10:Trend 2005 Berlin-Brandenburg Rhein-Main-Neckar	-21% -34%	-46% <sup>*</sup> -43% <sup>*</sup>	-27,6% -47,9%	-100% -90,5%

\*: Bezogen auf die anthropogenen VOC-Emissionen

Tab 7.4.10: Maximale prozentuale nachmittägliche Ozonänderung (Abnahme und Zunahme) innerhalb des Zeitraums vom 25.7.1994 bis zum 6.8.1994 in den Untersuchungsregionen Rhein-Main-Neckar und Berlin-Brandenburg

Szenario	Berlin-Brandenburg	Rhein-Main-Neckar
	Maximale Ozonänderung in % (zugehörige Absolutänderung in ppb)	Maximale Ozonänderung in % (zugehörige Absolutänderung in ppb)
1: Tempolimit	-4% (-4 ppb: 100÷96) +3% (+3ppb: 110÷113)	-3% (-5 ppb: 160÷155) +8% (+9 ppb: 110÷119)
2: Fahrverbot für nicht-schadstoffarme PKW	-7% (-9 ppb: 125÷116) +3% (+3 ppb: 100÷103)	-5% (-8 ppb: 160÷152) +5% (+6 ppb: 110÷116)
4a: Tempolimit und Fahrverbot (Pkw+Lkw)	-14%(-17 ppb: 125÷108) +10% (10 ppb: 100÷110)	-15%(-24 ppb: 160÷136) +30% (+29 ppb: 94÷123)
4b: Tempolimit und Fahrverbot (U). Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw (UB)	-16%(-20 ppb: 125÷105) +7% (+7 ppb: 100÷107)	-20%(-32 ppb: 160÷128) +25% (+23 ppb: 94÷117)
6: Focus NOx	-21%(-26 ppb: 125÷99) +6% (+6 ppb: 100÷106)	-18%(-29 ppb: 160÷131) +30% (+27 ppb: 90÷117)
7: Focus VOC	-25% (-31 ppb: 125÷94) +3% (+2 ppb: 80÷82)	-5% (-8 ppb: 160÷152) +5% (+5 ppb: 100÷105)
8a: Focus NOx und Focus VOC	-21% (-26 ppb: 125÷99) +6% (+6 ppb: 100÷106)	-18% (-29 ppb: 160÷131) +30% (+27 ppb: 90÷117)
8b: Focus NOx und Focus VOC (U). Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw (UB)	-23% (-29 ppb: 125÷96) +3% (+2 ppb: 80÷82)	-23% (-37 ppb: 160÷123) +30% (+27 ppb: 90÷117)
10: Trend 2005	-41% (-47 ppb: 115÷68) Keine Ozonzunahmen	-30% (-45 ppb: 150÷105) Keine Ozonzunahmen

Anm: Die absoluten Änderungen beziehen sich auf den Ort der maximalen Änderung

#### 7.4.7 Zusammenfassung und Bewertung

In diesem Kapitel wurde die Anwendung des photochemischen Ausbreitungsmodells CALGRID auf die Untersuchungsregion Berlin-Brandenburg vorgestellt. Die Anwendung ist Teil des vom Umweltbundesamt geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens 10402812/01 "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon". Das in diesem Abschnitt vorgestellte Teilvorhaben sollte wie schon die vorherige Anwendung des CALGRID-Modells auf die Region Rhein-Main-Neckar einen Beitrag zur Klärung der Frage liefern, wie weit lokal begrenzte Maßnahmen zur Senkung der Oxidantienkonzentrationen im Maßnahmensgebiet selbst beitragen können.

Dazu wurden mit CALGRID entsprechend der Vorgehensweise im Raum Rhein-Main-Neckar auch für Berlin-Brandenburg die Ozonverteilungen während des Zeitraums vom 22.7. 1994 bis zum 6.8. 1994 simuliert und Szenarienrechnungen zu den Auswirkungen kurzfristiger und langfristiger emissionsmindernder Maßnahmen auf die Ozonkonzentrationen durchgeführt.

Das CALGRID-Modell ist ein dreidimensionales Eulersches Gittermodell zur Simulation des Transports, der chemischen Umwandlung und Deposition reaktiver Schadstoffe im urbanen Skalenbereich. Der verwendete chemische Mechanismus ist der SAPRC-90-Mechanismus, der die Reaktionen von 40 transportierten Spezies in 129 Reaktionsgleichungen beschreibt. Kohlenwasserstoffemissionen werden dem Modell in 9 Klassen vorgegeben.

Die von der Prognos AG bereitgestellten Emissionen der Stoffgruppen  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , CO und Kohlenwasserstoffe wurden mit einem Emissionsmanagementsystem für die Anwendung des CALGRID-Modells aufbereitet. Dieses System nimmt insbesondere eine verursachergruppenspezifische Aufteilung der nur summarisch vorliegenden Kohlenwasserstoffe in die einzelnen Klassen des SAPRC-90-Mechanismus vor. Die Erzeugung aller meteorologischen Eingangsdaten erfolgte mit dem diagnostischen meteorologischen Modell CALMET unter Verwendung aller verfügbaren meteorologischen Messungen sowie der Topographie und Orographie des Untersuchungsgebiets. Zur großräumigen Steuerung von CALMET wurden die Analyseergebnisse des großräumigen Diagnosesystems TRAMPER verwendet, das seinerseits meteorologische Felder unter Verwendung der Synopdaten und Radiosondenaufstiege erzeugt. Die immissionsseitigen Randbedingungen für alle Spezies wurden stündlich aus den europaweiten Ausbreitungsrechnungen mit dem großräumigen photochemischen Transportmodell REM3 berechnet. Diese Rechnungen basieren ebenfalls auf der SAPRC-90-Chemie, wodurch die Kompatibilität der chemischen Komponenten zwischen den beiden Skalenbereichen gewährleistet ist.

Das Modellgebiet hat eine Nord-Süd-Ausdehnung von 108 km und eine West-Ost-Ausdehnung von 100 km. Der Großraum Berlin liegt im Zentrum. Die horizontale Maschenweite ist 2 km. In der Vertikalen wird die Grenzschicht in 10 Schichten aufgelöst, wobei 6 Schichten

unter 800 m liegen. Die Bodenschicht, deren Konzentrationswerte zum Vergleich mit den Beobachtungen und für die Auswertung der Szenarien benutzt werden, hat eine vertikale Ausdehnung von 20 m.

Die Verifizierung der Modellergebnisse erfolgte durch Vergleich der berechneten Ozon- und Stickoxid-Konzentrationsverteilungen mit den während der FluMoB-Meßkampagne vom 23. Juli bis zum 27. Juli 1994 gewonnenen Boden- und Flugzeugmessungen. Die Lage der beobachteten Stickoxid- und Ozonfahnen im Lee von Berlin wurde in 4 von 5 Tagen richtig getroffen. Am Boden stimmen die berechneten Konzentrationsmaxima gut mit den Messungen überein, in der Höhe werden die gemessenen Ozonspitzenkonzentrationen, die insbesondere im zweiten Teil der Meßkampagne 140 bis 150 ppb erreichten, vom Modell zum Teil bis zu ca. 20% unterschätzt. Ursache der Unterschätzung dürfte die zu schnelle vertikale Vermischung im Modell sein. Die von den Messungen abweichende Lage der berechneten nachmittäglichen Ozonfahne am 26. Juli ist eine Folge der Unterschiede zwischen den als Antrieb verwendeten Modellwindfeldern und der realen Windverteilung, die an diesem Tag durch extreme vertikale Windscherungen gekennzeichnet war.

Auch die zwischen Luv und Lee nachmittags in der Höhe gemessenen Ozonkonzentrationsunterschiede wurden in der Größenordnung richtig wiedergegeben, wie der folgenden Tab. 7.4.11 entnommen werden kann:

Tab. 7.4.11: Nachmittägliche mittlere gemessene und berechnete Ozonkonzentration in ca. 400m bis 500m Höhe im Luv und im Lee von Berlin (entlang der Flugrouten) sowie der daraus ermittelte Ozonanstieg

	23. 7.94	24. 7.94	25. 7.94	26. 7.94	27. 7.94
<b>MESSUNG</b>					
Luv	60-65 ppb	70-75 ppb	85-90 ppb	95-100 ppb	95-100 ppb
Lee	80-85 ppb	85-90 ppb	100-105 ppb	130-135 ppb	140-145 ppb
<b>Anstieg</b>	<b>20ppb</b>	<b>15 ppb</b>	<b>15 ppb</b>	<b>35 ppb</b>	<b>45 ppb</b>
<b>(gemittelt)</b>	<b>(+33 %)</b>	<b>(+21%)</b>	<b>(+17%)</b>	<b>(+36%)</b>	<b>(+47%)</b>
<b>RECHNUNG</b>					
Luv	75-80 ppb	75-80 ppb	90-95 ppb	90-95 ppb	80-85 ppb
Lee	100-105 ppb	90-95 ppb	105-110 ppb	120-125 ppb	120-125 ppb
<b>Anstieg</b>	<b>25 ppb</b>	<b>15 ppb</b>	<b>15 ppb</b>	<b>30 ppb</b>	<b>45 ppb</b>
<b>(gemittelt)</b>	<b>(+33%)</b>	<b>(+19%)</b>	<b>(+16%)</b>	<b>(+33%)</b>	<b>(+50%)</b>

Allerdings ist offensichtlich, daß die Ozonbelastung der in das Untersuchungsgebiet einströmenden Luftmassen in der ersten Hälfte der Meßkampagne überschätzt und in der zweiten Hälfte unterschätzt wird, was sich dann entsprechend in Überschätzungen der während

der Flüge gemessenen Ozonspitzen in den ersten Tagen der Kampagne und Unterschätzungen in den letzten beiden Tagen auswirkt. Die berechnete Ozonproduktion im Gebiet selbst stimmt aber sowohl im Trend als auch in der Höhe gut mit der aus den Messungen abgeleiteten Produktion überein.

Das CALGRID-Modell wurde zur Untersuchung der Auswirkungen mehrerer temporärer Maßnahmen auf die Ozonkonzentrationen eingesetzt. Bei all diesen Maßnahmen wurde angenommen, daß sie um 0 Uhr am 25. Juli 1994 in Kraft traten und über den gesamten betrachteten Zeitraum aufrecht erhalten wurden. Die Auswertung erfolgte dabei hauptsächlich für die nachmittäglichen Ozonkonzentrationen des 25. bis 27. Juli. Ebenfalls untersucht wurden die Auswirkungen des Langfrist-Szenarios "Trend 2005", das die erwartete Änderung der Vorläuferemissionen in Europa bis zum Jahre 2005 beschreibt.

Die temporären Szenarien "Tempolimit auf Autobahnen und außerörtlichen Straßen" (Szenario 1, siehe Kap. 7) sowie "Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw" (Szenario 2) haben recht geringe Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen. Die berechneten Ozonspitzenkonzentrationen sinken im Vergleich zum Basislauf um nicht mehr als 4% für das Tempolimit und nicht mehr als 7% für das Fahrverbot. In manchen Teilen des Modellgebiets wirken sich diese Maßnahmen gar nicht aus oder es werden leichte Zunahmen der Ozonkonzentrationen berechnet, die aber nicht über 3% liegen. Diese Zunahmen werden vor allem im Stadtzentrum oder im Bereich der Autobahnen berechnet.

Die Kombination von Tempolimit und Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw mit einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Lkw (Szenario 4a) führt zu Absenkungen der berechneten Ozonspitzenwerte bis zu 14%, im Stadtzentrum kommt es aber auch zu Zunahmen der Ozonkonzentrationen bis zu 10%. Dort werden aber nicht die höchsten Ozonkonzentrationen berechnet.

Kombiniert man das Szenario 4a im Untersuchungsgebiet mit einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen (Szenario 4b), lassen sich im Untersuchungsgebiet Abnahmen der Ozonspitzenkonzentrationen bis zu 16% erreichen. Die berechneten Zunahmen sind jetzt deutlich geringer als beim Szenario 4a.

Die Kombination des Szenario 4a mit einer verschärften Kontrolle der NO<sub>x</sub>-Emissionen von Industrie und Kraftwerken (Szenario 6, "Focus NO<sub>x</sub>") im Untersuchungsgebiet führt zu Abnahmen der Ozonkonzentrationen bis zu 21% und zu Zunahmen bis zu 6%. Die Zunahmen sind wiederum hauptsächlich im Berliner Stadtgebiet zu finden.

Das als "Focus VOC" bezeichnete Szenario 7 ist die Kombination eines Fahrverbots für nicht-schadstoffarme Pkw (Szenario 2) mit einigen zusätzlichen VOC-mindernden Maßnahmen in der Industrie. Die dadurch erreichbaren Abnahmen der Ozonspitzenwerte liegen maximal bei 25%.

Die Kombination des "Focus NO<sub>x</sub>" - mit dem "Focus VOC" -Szenario beschreibt in etwa das erreichbare Minderungspotential in der Region (Szenario 8a). Die für dieses Szenario berechneten Ozonminderungen liegen aber nicht höher als bei der alleinigen Anwendung des "Focus NO<sub>x</sub>" -Szenarios und am 27. Juli sogar niedriger als beim Szenario "Focus VOC", bei dem sehr viel weniger NO<sub>x</sub> gemindert wird.

Kombiniert man das Szenario 8a innerhalb des Untersuchungsgebiets mit einem Tempolimit für Pkw und Lkw sowie einem Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern (Szenario 8b), sinken die Ozonspitzenwerte im Untersuchungsgebiet bis zu 23%, die Ozonzunahmen erreichen höchstens 3%.

Als Langfristszenario mit dauerhaftem Emissionsminderungseffekt wurde das Szenario "Trend 2005" auf seine Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen untersucht. Dieses Szenario beschreibt die bis zum Jahre 2005 in den europäischen Ländern zu erwartende Emissionsminderung, falls alle bisher eingeleiteten oder noch geplanten Maßnahmen umgesetzt werden. Die im Untersuchungsgebiet aufgrund der europaweiten Minderung der Vorläuferemissionen berechneten Abnahmen der nachmittäglichen Ozonspitzenwerte reichen bis 40%, Ozonzunahmen treten nicht auf.

Die maximal erreichbaren Ozonabnahmen bewegen sich in Raum Berlin-Brandenburg und im Raum Rhein-Main-Neckar für die verschiedenen Szenarien in etwa in demselben Bereich. Größere Unterschiede ergeben sich nur für das Szenario 7, "Focus VOC", das in Berlin-Brandenburg an einzelnen Tagen deutlich stärker zur Minderung der Spitzenkonzentrationen beiträgt als im Raum Rhein-Main-Neckar, was auf die Unterschiede in den Emissionsdatenbasen zurückgeführt werden kann. Im Rhein-Main-Neckar-Gebiet werden vergleichsweise sehr viel mehr Stickoxide emittiert als in der Region Berlin-Brandenburg. Dies manifestiert sich auch in den sehr viel negativeren Auswirkungen der NO<sub>x</sub>-dominierten Szenarien im Raum Rhein-Main-Neckar. Während im Stadtgebiet von Berlin maximal Ozonzunahmen von ca. 10% oder etwa 10 ppb berechnet werden (Szenario 4a) ergeben sich im Raum Rhein-Main-Neckar in den Stadtgebieten Zunahmen bis zu 30% oder knapp 30 ppb. Wegen der geringeren Auswirkungen des Titrationseffekts haben die VOC-betonten Maßnahmen in Berlin-Brandenburg insbesondere an windschwachen Tagen, an denen die Ozonmaxima näher am Stadtgebiet liegen, eine stärker ozonmindernde Wirkung als im Raum Rhein-Main-Neckar.

Aus den Ergebnissen der Modellrechnungen für beide Modellgebiete lassen sich folgende allgemeine Schlüsse ziehen:

- die größten Abnahmen der Ozonkonzentrationen aufgrund der vorgestellten Maßnahmen lassen sich in denjenigen Gebieten erzielen, wo die NO<sub>x</sub>-Emissionen relativ gering sind, d.h. außerhalb der Stadtgebiete. Dort werden i. allg. auch die höchsten Ozonkonzentrationen gemessen und berechnet.

- Eine NO<sub>x</sub>-Kontrolle führt zu einem Anstieg der Ozonkonzentrationen in der näheren Umgebung von Gebieten mit hoher NO<sub>x</sub>-Quellstärke (z.B. in den Innenstädten, im Nahbereich der Autobahnen mit hohem Verkehrsaufkommen oder im Nahbereich großer Punktquellen). Nach den Rechnungen (und auch Messungen) treten dort aber nicht die höchsten Ozonkonzentrationen auf. Ursache der Ozonzunahmen ist die Verminderung des Titrationseffekts, d.h. des schnellen OzonAbbaus durch NO. Eine lokale NO<sub>x</sub>-Kontrolle kann sich erst in einiger Entfernung vom Ort der Maßnahme in einer Abnahme der Ozonkonzentrationen auswirken, da dort bereits ein Teil des NO<sub>x</sub> zu Salpetersäure oxidiert ist und der Titrationseffekt somit an Bedeutung verliert. Das verminderte NO<sub>x</sub>-Angebot führt dann zu einer schnelleren Beendigung der photochemischen Aktivität und damit der Ozonbildung.
- Eine Vergrößerung des Maßnahmegebiets über das eigentliche Untersuchungsgebiet hinaus erhöht die Wirkung aller Maßnahmen im Untersuchungsgebiet.
- Die lokale Wirkung einer Maßnahme, d.h. die Wirkung am Ort oder in nächster Nähe der Maßnahme hängt beträchtlich von den meteorologischen Bedingungen ab. Transportarme Wettersituationen verstärken die (positive und negative) Wirkung. Bei transportbetonen Wetterlagen zeigt sich die größte Wirkung der lokalen Maßnahme unter Umständen erst in größerer Entfernung (ca. 30 bis 100 km) vom Ort der Maßnahme. Die aufgrund einer Maßnahme erreichbaren Ozonabnahmen können sich daher von Tag zu Tag unterscheiden.
- Eine generelle Abnahme der Ozonkonzentrationen in den Stadtgebieten kann nur durch eine VOC-Kontrolle oder durch eine überregionale VOC- und NO<sub>x</sub>-Kontrolle erreicht werden.

und

- Maßnahmen wie ein temporäres Tempolimit oder ein temporäres Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw haben allein betrachtet nur geringe Auswirkungen auf die Ozonkonzentration. Durch die Kombination dieser Einzelmaßnahmen und Einbeziehen der Lkw in das Fahrverbot kann aber eine deutliche Abnahme der Ozonspitzenkonzentrationen erreicht werden. In den Städten muß dabei aber mit einer Anhebung der Ozonkonzentrationen gerechnet werden, die je nach den Emissionsverhältnissen und den meteorologischen Bedingungen verschieden stark ausfallen kann. Insgesamt kommt es dadurch zu einer Nivellierung des Ozonfelds.
- Das maximale VOC-Minderungspotential der beiden untersuchten Regionen ist deutlich geringer als das maximale NO<sub>x</sub>-Minderungspotential. Ursache ist der hohe Anteil biogen emittierter Kohlenwasserstoffe während des betrachteten Zeitraums. Will man in Ballungsgebieten eine wirksame Kontrolle der Ozonkonzentrationen durch lokale Maßnahmen erreichen, muß dazu das VOC-Minderungspotential erhöht

werden, da in diesen Gebieten ein Absenken der Ozonkonzentrationen nicht über eine alleinige NO<sub>x</sub>-Kontrolle sondern nur in Verbindung mit einer sehr starken VOC-Emissionsminderung möglich ist.

- Die größten positiven Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen<sup>8</sup> im Untersuchungsgebiet werden für die Umsetzung des langfristigen Szenarios "Trend 2005" berechnet, obwohl dieses Szenario innerhalb der Untersuchungsregion ein geringeres Minderungspotential aufweist als einige der temporären Maßnahmen. Ursache ist die europaweite Minderung der Vorläuferemissionen, die eine Absenkung der großräumigen Hintergrundkonzentrationen bewirkt, wodurch deutlich weniger Ozon<sup>9</sup> in das Untersuchungsgebiet einfließt als bei den temporären Maßnahmen, in denen der Hintergrund gar nicht oder, bei Einbeziehung der umliegenden Bundesländer in die Maßnahme, nur geringfügig vermindert wird. Der starke Einfluß der Hintergrundkonzentrationen ist neben der Nichtlinearität der chemischen Reaktionen auch der Hauptgrund für die bzgl. einer Emissionsminderung unterproportionale Änderung der nachmittäglichen Ozonkonzentrationen im Untersuchungsgebiet.

Insgesamt werden die in der Stufe A der vorliegenden Untersuchung (s. oben) ausgeführten großräumigen Szenarienrechnungen mit REM3 (Stern et al., 1995) durch die kleinräumigen CALGRID-Rechnungen bestätigt. Vergleichbare Maßnahmen wie das Tempolimit und das Fahrverbot haben bei einer lokalen Umsetzung ähnliche Auswirkungen auf die Ozonspitzenkonzentrationen wie bei einer bundesweiten Umsetzung. Unterschiede in den Überschreitungshäufigkeiten erklären sich aus den unterschiedlichen Skalenbereichen der großräumigen und der kleinräumigen Modellanwendung.

Die drei wesentlichsten Ergebnisse der im Rahmen des Aktionsprogramms und Maßnahmenplans Ozon durchgeführten klein- und großräumigen Modellrechnungen lassen sich damit folgendermaßen zusammenfassen:

- Die lokale und großräumige Wirkung von temporären und dauerhaften Maßnahmen wird durch eine Vergrößerung des Maßnahmengebiets verstärkt.
- Dauerhaft umgesetzte Maßnahmen sind immer wirkungsvoller als vergleichbare temporäre Maßnahmen.
- Bei einer großräumig und dauerhaft umgesetzten Maßnahme sind die zur Einhaltung von Ozongrenzwerten notwendigen Emissionsminderungen geringer als diejenigen bei einer räumlich begrenzten, temporären Maßnahme.

<sup>8</sup> Im Sinne einer Absenkung der Ozonkonzentrationen

<sup>9</sup> und auch weniger andere reaktive Komponenten

**IV. Gesamtbewertung der Effektivität von  
Minderungsstrategien**

## 8. Auswirkungen und Effektivität von dauerhaften und von temporären Emissionsminderungsmaßnahmen zur Bekämpfung von hohen bodennahen Ozonkonzentrationen

### 8.1 Synopse der groß- und kleinräumigen Wirkungsanalysen

(1) Im Rahmen der **großräumigen Wirkungsanalysen** wurden insgesamt **8 Maßnahmenbündel** und im Rahmen der **kleinräumigen Wirkungsanalysen** insgesamt **11 Maßnahmenbündel** (Minderungsszenarien) definiert und untersucht. Sie sind in den Tabellen 8.1 und 8.2 nochmals im Überblick dargestellt. Für alle groß- und kleinräumigen Minderungsmaßnahmen bzw. -szenarien wurden zunächst die emissionsseitigen Wirkungen und anschließend die immissionsseitigen Wirkungen - mit besonderem Focus auf den Ozon-Spitzenkonzentrationen - untersucht.

(2) Die Minderungsszenarien weisen unterschiedliche Schwerpunktsetzungen im Hinblick auf die sektoralen, räumlichen und zeitlichen Ausprägungen auf:

- Eine Schwerpunktsetzung liegt bei den Straßenverkehrsemissionen. Hierfür werden im Rahmen der kleinräumigen Analysen bei den Regio-Szenarien S-1, S-2 und S-4a sowie bei den Kombi-Szenarien S-4b und S-9 (erweitertes Maßnahmengebiet um die umliegenden Bundesländer) verschiedene Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündel wie Tempolimits, Fahrverbote usw. in Ansatz gebracht werden. Bei den großräumigen Analysen beinhalten die temporären Minderungsszenarien eine ausschließliche ( T-1, T-2, T-3, T-5) oder eine starke straßenverkehrsbezogene Ausrichtung (T-4, T-6).
- Eine zweite Schwerpunktsetzung liegt im Rahmen der kleinräumigen Analysen bei denjenigen Szenarien, bei denen die maximale Ausschöpfung der Minderungspotentiale bei den regionalen NOx- und VOC-Emissionen ermittelt und untersucht wird. Es sind dies die Regio-Szenarien S-6, S-7 und S-8a sowie das Kombi-Szenario S-8b.
- Eine dritte Schwerpunktsetzung betrifft den Aspekt der Größe des Maßnahmengebietes und somit die Frage, inwieweit die Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen durch eine räumliche Ausdehnung des Maßnahmengebietes beeinflusst wird. Dazu werden im Rahmen der kleinräumigen Analysen die lediglich regionsbezogenen Maßnahmenbündel der Szenarien S-4a und S-4b erweitert durch den Einbezug von Fahrverboten für nicht schadstoffarme Pkw in den umliegenden Bundesländern, und somit zur Bildung der beiden Kombi-Szenarien S-4b und S-8b. Bei den großräumigen Analysen wird der Effekt der räumlichen Einschränkung durch den Vergleich des Maß-

nahmenszenarios T-2 (Fahrverbote in Städten >250.000 Einwohner) mit dem Szenario T-5 (bundesweites Fahrverbot) sichtbar.

- Eine vierte Schwerpunktsetzung betrifft den Vergleich der Effektivität von temporären Maßnahmen und von dauerhaften Maßnahmen.

Bei den großräumigen Analysen werden den temporären Szenarien die beiden dauerhaften Minderungsszenarien "Trend 2005" und "Reduktion 2005" gegenübergestellt. Bei den kleinräumigen Analysen wird das Szenario Trend 2005, bei dem von einer dauerhaften Reduzierung aller anthropogenen regionalen Vorläuferemissionen ausgegangen wird, den temporären Minderungsszenarien gegenübergestellt.

- (3) Die Szenarien weisen erhebliche Unterschiede im Bezug auf die erreichbaren **Emissionsminderungen** auf: Besonders deutlich wird dies im Falle der kleinräumigen Analysen (vgl. Tab. 8.2):

- Die maximalen Reduktionsraten betragen bei NO<sub>x</sub> bis zu -75% (bei den Szenarien S-6, S-8). Bei den VOCs sind die erreichbaren maximalen Minderungsraten deutlich geringer (bis zu -45%). Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, daß bei den VOCs lediglich die Emissionen aus anthropogenen Quellen gemindert werden können. Die VOC-Emissionen aus biogenen Quellen, deren Anteile infolge der hochsommerlichen Temperaturen in der untersuchten Episode rd. 30-50% erreichen, werden nicht tangiert. Im Falle der unterstellten maximalen Ausschöpfung von regionalen Minderungspotentialen weisen die entsprechenden Szenarien daher eine vorrangige NO<sub>x</sub>-Betonung insoweit auf, als die NO<sub>x</sub>-Minderungsraten gesamthaft höher ausfallen als die VOC-Minderungsraten.
- Desweiteren ist anzumerken, daß die Minderungseffekte der regionalen Maßnahmen bzw. Szenarien aufgrund der regionsspezifischen Emissionsprofile von Region zu Region unterschiedlich stark ausfallen (vgl. Tab. 8.1).
- Sowohl bei den großräumigen Analysen als auch bei den kleinräumigen Analysen erweist sich, daß die erreichbaren Minderungsraten bei der Maßnahme "regionales Tempolimit" bezogen auf die nationalen bzw. regionalen Gesamtemissionen vergleichsweise sehr gering sind und zudem nur die NO<sub>x</sub>-Emissionen betreffen.
- Bezüglich des Szenario Trend 2005 ist noch zu beachten, daß die Reduktionsraten im Falle der kleinräumigen Wirkungsanalysen auf das Ausgangsjahr 1994 bezogen sind. Bei den großräumigen Analysen gehen die Berechnungen hingegen vom Bezugsjahr 1990 aus.

**Tab. 8.1: Kleinräumige, regionale und überregionale Emissionsminderungs-Szenarien in den Modellregionen**

Nr.	Kurzbezeichnung	Maßnahmen	NO <sub>x</sub> -Effekte in %	VOC-Effekte in %
			in der Modellregion	
			Rhein-Main / Dresden / Berlin-Bbg.	
S-1	Regio-Tempolimit	Scharfes Tempolimit in der Region	-14% / -11% / -10%	-1% / -1% / -1%
S-2	Regio-Pkw-Fahrverbot	Fahrverbot für nicht schadstoffarme (nsa) Pkw in der Region	-25% / -22% / -19%	-27% / -25% / -28%
S-4a	Regio-Straßenverkehr	Scharfes regionales Tempolimit plus Fahrverbot für nsa-Pkw + Lkw in der Region (S-1 plus S-2)	-53% / k.B. / -51%	-32% / k.B. / -31%
S-4b	Kombi-Straßenverkehr - Max	S-4a plus Fahrverbot für nsa-Pkw in umliegenden Bundesländern (uBL)	-53% / -43% / -51% plus Effekte in uBL	-32% / -27% / -31% plus Effekte in uBL
S-6	Regio-Focus NO <sub>x</sub>	Tempolimits, Fahrverbote, Stilllegung größerer NO <sub>x</sub> -Einzel-emissionsquellen, Appelle	-74% / k.B. / -66%	-33% / k.B. / -33%
S-7	Regio-Focus VOC	Fahrverbote nsa-Pkw, Stilllegung größerer VOC-Emissionsquellen, Appelle an Gewerbe/Haushalte	-25% / -22% / -19%	-36% / -30% / -36%
S-8a	Regio-Max NO <sub>x</sub> /VOC	S-6 plus S-7	-74% / -74% / -66%	-36% / -33% / -40%
S-8b	Kombi-Max NO <sub>x</sub> /VOC	S-8a plus Fahrverbote in umliegenden Bundesländern	-74% / -74% / -66% plus Effekte in uBL	-36% / -33% / -40% plus Effekte in uBL
S-9	Sommerbenzin	Reformulierte Kraftstoffe für Otto- u. Dieselmotoren	k.B. / -3% / -3% plus Effekte in uBL	k.B. / -6% / -7% plus Effekte in uBL
S-10	Trend 2005	Umsetzung aller eingeleiteten Maßnahmen in Deutschland und Europa	-30% / -22% / -21% plus Effekte in Deutschland/Europa	-31% / -27% / -30% plus Effekte in Deutschland/Europa
S-4a+	Vorzeitige Inkraftsetzung	Vorgezogene Einleitung S-4a (Regio-Straßenverkehr) um 48 h	-53% (Rhein-Main)	-32% (Rhein-Main)

k.B. = keine Berechnung

Tab. 8.2: Großräumige, überregionale Emissionsminderungs-Szenarien

D-1	<b>Trend-2005</b>	Reduktionen der Emissionen von Ozon-Vorläufersubstanzen, welche dauerhaft durch eingeleitete emissionsmindernde Maßnahmen bis zum Jahr 2005 erreicht sein werden (EU - Richtlinien, BImSchG, TA Luft usw.)
D-2	<b>Reduktion-2005</b>	Trend-2005 zuzüglich Maßnahmen zur Ausschöpfung weitergehender Minderungspotentiale in den Bereichen Verkehrs-, Industrie-, Lösemittelemissionen
T-1	<b>Bundesweite Tempolimits</b>	Bundesweite Tempolimits (80km/h-Pkw und 60km/h-Lkw auf Autobahnen sowie 60km/h auf sonstigen außerörtlichen Straßen; 80% Befolgungsrate)
T-2	<b>Fahrverbote in Ballungsräumen</b>	Fahrverbote auf innerörtlichen Straßennetzen in Städten mit mehr als 250.000 Einwohnern
T-3	<b>T-1 plus T-2</b>	Kombination der temporären Maßnahmen T1 und T2
T-4	<b>T-3 plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen</b>	T-3 plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen und beim Lösemittelverbrauch aufgrund von Appellen
T-5	<b>Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw</b>	Flächendeckendes, bundesweites Fahrverbot für Pkw ohne geregelten 3-Wege-Katalysator und für nicht-schadstoffarme Diesel-Pkw
T-6	<b>T-5 plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen</b>	T-5 plus freiwillige Reduktionen bei stationären Quellen und beim Lösemittelverbrauch aufgrund von Appellen

(4) Die zentralen **Ergebnisse der kleinräumigen photochemischen Simulationsrechnungen** in den drei Modellregionen zur Ermittlung der **Wirkungen von Minderungsmaßnahmen auf die lokalen Ozonkonzentrationen** lauten wie folgt (vgl. hierzu die Abb. 8-1 und Tab. 8.3):

- a) **Temporäre, und lediglich regionsbezogene Einzelmaßnahmen** mit relativ niedriger Emissionsminderung haben geringe Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen in der Region. Dies zeigen die untersuchten Szenarien S-1 (regionales Tempolimit) und S-2 (regionale Fahrverbote für nicht-schadstoffarme Pkw). Die Ozon-Spitzenbelastungen nehmen im Falle des Szenarios S-2 um maximal 7% ab. Bei einer Kombination von regionalem Tempolimit und Fahrverboten für nicht-schadstoffarme Pkw/Lkw (Szenario S-4a) sinken die berechneten Ozon-Spitzenkonzentrationen um bis zu 15%.

Hauptgrund für die geringe Wirkungseffektivität dieser regionalen Maßnahmen ist der Umstand, daß regional begrenzte Maßnahmen lediglich die lokale Ozonproduktion beeinflussen. Die Hintergrundkonzentrationen bleiben unverändert und bestimmen über

die von außen einströmenden vorbelasteten Luftmassen sowie vertikale Durchmischungen maßgeblich die Ozonbelastungen in der Region. Bei Gebietsgrößen von 100km x 100km erfolgt aber selbst bei geringen Windgeschwindigkeiten ein vollständiger Luftmassenaustausch innerhalb eines Tages. Regionale Minderungsmaßnahmen müssen folglich zur Erreichung einer gewissen Effektivität eine hohe Eingriffstiefe aufweisen und zudem auf besonders transportschwache Bedingungen treffen, falls sie innerhalb der Modellregion Wirkung zeigen sollen.

- b) Die **räumliche Erweiterung des Maßnahmengebietes** durch Einbezug von angrenzenden Regionen (Bundesländer) führt zu einer deutlichen Effektivitätsverbesserung. Die berechneten regionalen Ozon-Spitzenkonzentrationen sinken im Falle des Kombiverkehrsszenario S-4b um bis zu 20%, und die Anzahl der Gitterstunden mit berechneten Überschreitungen des Schwellenwertes von 240 µg/m<sup>3</sup> liegt um über 50% niedriger als im Basisfall. Der Vergleich der Ergebnisse der Szenarien S-8a (regional) und S-8b (plus umliegende Regionen) bestätigt diesen Befund.

Die Erweiterung des Maßnahmengebietes bewirkt eine Reduzierung der Vorbelastungen der in die Region einströmenden Luftmassen. Dadurch kann in Summe eine deutlich stärkere Minderung von erhöhten Ozon-Konzentrationen erreicht werden als bei lediglich lokalen/regionalen Maßnahmen.

- c) Die Wirksamkeit von regionalen Minderungsstrategien steigt mit der **Intensität des emissionsseitigen Eingriffs**. Allerdings müssen bei regional begrenzten, temporären Maßnahmen sehr hohe Emissionsminderungen realisiert werden, um spürbare Absenkungen der Ozonkonzentrationen zu erreichen. Unter bestimmten Bedingungen - wie z.B. transportbetonteren Wetterlagen - sind auch maximale regionale Minderungsmaßnahmen innerhalb der Region relativ wirkungslos. Die immissionsseitigen Effekte kommen dann erst in einiger Entfernung vom Maßnahmengebiet (leeseitig - im Bereich der Abluffahnen) zum Tragen. Bei transportbetonteren Wetterlagen zeigt sich die größte Wirkung der lokalen Maßnahme unter Umständen erst in Entfernungen von 30 bis 100 km vom Ort der Maßnahme.
- d) Die **innerregionalen Effekte** von Minderungsmaßnahmen können sehr unterschiedlich ausfallen. Die **größten Abnahmen** der Ozonkonzentrationen aufgrund der untersuchten Maßnahmen werden i.d.R. für diejenigen Gebiete berechnet, in denen die NO<sub>x</sub>-Emissionen relativ gering sind, d.h. **außerhalb der Stadtgebiete**. In diesen Gebieten werden im allgemeinen auch die höchsten Ozonkonzentration gemessen und berechnet.

In der näheren Umgebung von **Gebieten mit hoher NO<sub>x</sub>-Quellstärke** (z.B. in den

Städten oder im Nahbereich von Straßenverkehrsachsen und großer Punktquellen) führt eine NO<sub>x</sub>-Kontrolle zu einem Anstieg der Ozonkonzentrationen. Nach den Rechnungen (und auch Messungen) treten dort aber nicht die höchsten Ozonkonzentrationen auf. Ursache der Ozonzunahmen ist die Verminderung des **Titrationseffekts**, d.h. des schnellen Ozonabbaus durch frisch emittiertes NO. Eine lokale NO<sub>x</sub>-Kontrolle kann sich erst in einiger Entfernung vom Ort der Maßnahme in einer Abnahme der Ozonkonzentrationen auswirken, da dort bereits ein Teil des NO<sub>x</sub> zu Salpetersäure oxidiert ist und der Titrationseffekt somit an Bedeutung verliert. Das verminderte NO<sub>x</sub>-Angebot führt dann zu einer schnelleren Beendigung der photochemischen Aktivität und damit der Ozonbildung.

Eine generelle Abnahme von lokalen Ozonkonzentrationen in den Gebieten mit hoher NO<sub>x</sub>-Quellstärke kann - so die Folgerungen aus den kleinräumigen Simulationsrechnungen - nur durch eine VOC-Kontrolle oder durch eine überregionale VOC- und NO<sub>x</sub>-Kontrolle erreicht werden.

- e) **Dauerhaft wirksame, großräumige Emissionsminderungen** (S-10) resultieren in Abnahmen der berechneten Ozon-Spitzenkonzentrationen um 30% bis 50%. Bei nachmittäglichen Spitzenwerten von 240-280 µg/m<sup>3</sup> bedeutet dies eine Reduktion auf unter 200 µg/m<sup>3</sup>.

Die **Wirksamkeit** von dauerhaften großräumigen Maßnahmen ist **deutlich höher als** diejenige von **temporären Maßnahmen**, obwohl die emissionsseitigen Minderungseffekte "nur" im Bereich von 30% bis 40% liegen. Hauptursache ist die beim Szenario S-10 (Trend-2005) unterstellte europaweite Absenkung der Vorläuferemissionen. Dadurch wird die großräumige Hintergrundkonzentration von Ozon und anderen reaktiven Komponenten reduziert.

- f) Mit **regional ausgelegten temporären Minderungsstrategien** können - unter der Voraussetzung von nur geringem Luftmassenaustausch - moderate Absenkungen der nachmittäglichen Ozon-Spitzenwerte in der Maßnahmenregion erreicht werden. Bei transportbetonteren Wetterlagen ist dies nicht der Fall. Temporäre, regionale Minderungsstrategien sind somit einer dauerhaften, großräumigen Minderungsstrategie sehr deutlich unterlegen. Auch bei maximaler Ausschöpfung aller regionalen Minderungspotentiale (und somit höchster maßnahmenseitiger Eingriffstiefe) reichen die immissionsseitigen Wirkungen nicht an diejenigen einer dauerhaften, großräumigen (und weniger starken) Emissionsabsenkung heran.
- g) Die Simulation der Effekte einer Umstellung der Kompositionen von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen in den Sommermonaten, sog. "**Sommerbenzin**" ("reformulated gasoline")

ergibt, daß damit eine Reduktion der regionalen Ozon-Spitzenkonzentrationen in einer Größenordnung von 3% erzielt werden kann. Emissionsseitig wurden bei dieser Maßnahme die Minderungseffekte bei VOC und bei NO<sub>x</sub> berücksichtigt, nicht hingegen die Veränderungen im VOC-Komponentenmix. Dieser emissionsseitig relativ "milden" Maßnahme kommt immissionsseitig zugute, daß sie dauerhaft und überregional ausgelegt ist.

(5) Die modellgestützten photochemischen Simulationsrechnungen für die drei Modellregionen zeigen generell, daß die mit Minderungsstrategien **erreichbaren regionalen Minderungseffekte** eine **komplexe Funktion aus meteorologischen und emissionsseitigen Einflußgrößen** sind. Die Wirkungsanalysen der untersuchten Minderungsmaßnahmen in den drei Modellregionen gelangen zwar weitgehend zu übereinstimmenden Ergebnissen. Sie weisen aber auch Abweichungen auf, die auf die spezifisch unterschiedlichen regionalen Emissionsdichten und -strukturen sowie die besonderen meteorologischen Bedingungen zurückzuführen sind (vgl. hierzu insbesondere die Ausführungen in Kap. 7.4.6).

(6) Die Ergebnissen der **großräumigen und der kleinräumigen immissionsseitigen Wirkungsanalysen** gelangen **weitgehend zu übereinstimmenden Ergebnissen** hinsichtlich der Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen und von Maßnahmenbündeln auf die Reduzierung von Ozon-Spitzenwerten in den untersuchten Episoden.

- Für gleiche bzw. ähnliche Minderungsszenarien werden in den groß- und kleinräumigen Berechnungen durchaus vergleichbare Abnahmen der Spitzenkonzentrationen von bodennahem Ozon ermittelt.
- Der Befund, daß dauerhafte Minderungsmaßnahmen eine deutlich höhere Wirksamkeit bei der Bekämpfung von Ozonspitzenkonzentrationen aufweisen als temporäre Maßnahmen, wird sowohl bei den großräumigen als auch bei den drei kleinräumigen Analysen in sehr deutlicher, übereinstimmender Weise erreicht.
- Das bei den kleinräumigen Analysen sehr deutliche Ergebnis, daß bei einer räumlichen Erweiterung des Maßnahmenggebietes die Wirksamkeit der Maßnahme(n) generell stark zunimmt, wurde bei den großräumigen Analysen in ebenso deutlichem Ausmaß ermittelt.

(7) Beim Vergleich der groß- und kleinräumigen immissionsseitigen Wirkungsanalysen treten allerdings auch **Unterschiede** hinsichtlich der Effekte von NO<sub>x</sub>-Minderungen zutage, die auf die unterschiedliche Skalierung bzw. räumliche Auflösung zurückzuführen sind.

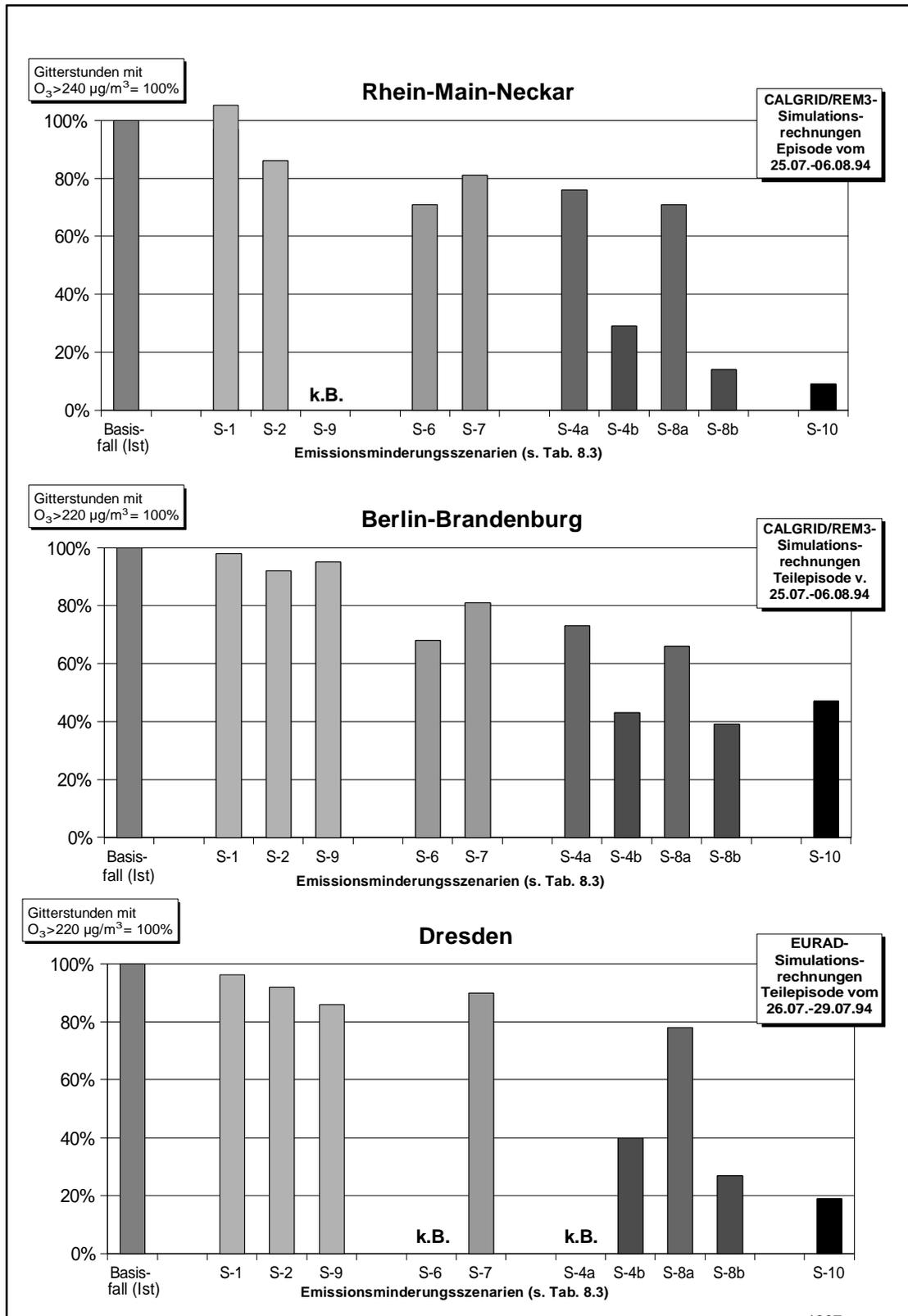
- Bei den kleinskaligeren Analysen werden für einem Teil der untersuchten Szenarien in den niedrigeren Konzentrationsbereichen auch örtlich Ozonzunahmen berechnet.

- Diese Zunahmen werden vor allem für diejenigen bodennahen Zellen berechnet, bei denen hohe lokale NO<sub>x</sub>-Emissionen stark gemindert werden. Der bei diesen Emissionsbedingungen lokal wirksame Titrationseffekt wird dadurch gemindert (s. Kap.7).
  - Innerhalb der Ballungsgebiete können von diesem Effekt relativ große Gebietsteile betroffen sein, wenn es sich dabei um Ballungsräume des Typs Rhein-Main-Neckar mit zahlreichen starken NO<sub>x</sub>-Quellen sowohl punktueller als auch flächenextensiver Art (Autobahnen, industrielle Quellen) handelt. Demgegenüber sind Ballungsräume des Typs Dresden wegen der vergleichsweise erheblich geringeren NO<sub>x</sub>-Emissionsdichten davon weniger betroffen. Ballungsräumen des Typs Berlin-Brandenburg mit einzelnen gebietsweise starken NO<sub>x</sub>-Emissionen (Stadtautobahn) kommt diesbezüglich - wie die Analysen in Kap. 7.4- zeigen - eine mittlere Stellung zu.
  - In den feinskaligeren Analysen für Regionen mit Ballungskernen sind von diesem Effekt eine entsprechende Anzahl von bodennahen Zellen betroffen, so daß sich die Auswirkungen von NO<sub>x</sub>-Minderungen in diesen Zellen in Richtung einer Erhöhungen der (meist weniger hohen) O<sub>3</sub>-Konzentrationen niederschlagen. In den großräumigen (deutschlandweiten) Rechnungen überwiegen hingegen die Gebiete mit niedrigen NO<sub>x</sub>-Emissionen. Dies führt dazu, daß der negative Effekt von starken NO<sub>x</sub>-Minderungen nur in wenigen Gitterzellen des (großräumigen) Untersuchungsgebietes zu Buche schlägt, und somit die rechnerischen mittleren Überschreitungshäufigkeiten hiervon nicht tangiert werden. (Wenn auch bei den gröber aufgelösten Gittern mehrere benachbarte Flächen zum Typ "Ballungsgebiet" bzw. NO<sub>x</sub>-intensiv gehören, so wird dieser Effekt auch in den großräumigen Analysen sichtbar: siehe die berechneten Zunahmen für Teile des Rhein-Ruhr-Raumes in Kapitel 4.)
  - Anzumerken ist ferner, daß die photochemischen Modellrechnungen im Rahmen dieser Untersuchung zu dem Ergebnis gelangen, daß die immissionsseitigen Auswirkungen von NO<sub>x</sub>-Minderungen letztendlich durchweg positiver Art sind. Bei großen Modellgebieten werden diese positiven Effekte überwiegend innerhalb des Untersuchungsgebietes berechnet. Bei kleinen Modellgebieten (und entsprechend schnellem Luftmassenaustausch) machen sich die positiven Effekte aber vielfach erst außerhalb des Untersuchungsgebietes bemerkbar und gehen daher nicht in die regionale Bilanz ein (vgl. hierzu auch den Feldversuch "Neckarsulm-Heilbronn").
- (8) Die Arbeiten im Rahmen dieser Untersuchung zeigen ferner, daß mit den durchgeführten groß- und kleinräumigen photochemischen Modellrechnungen auch verschiedene Kenntnislücken über den Verlauf von Ozonepisoden und insbesondere das Ausmaß der flächigen Ozon-Belastungen im bodennahen Bereich abgedeckt werden können. Dies zeigt sich vor allem beim Vergleich der Immissionsdaten der Meßstationen mit den Modellrechnungen.

Die Meßdaten liefern Informationen über punktuelle, einzelstandörtliche Belastungen. Daraus können nur begrenzt Rückschlüsse auf großflächigere Konzentrationsbelastungen gezogen werden. In den **Modellrechnungen** werden hingegen die **Ozon-Belastungen flächendeckend aufgezeigt** und somit die Phänomene von **weiträumigen Belastungen**, von Spitzenbelastungen in **Abluffahnen** sowie vor allem von **Transportvorgänge** sichtbar gemacht.

(9) Aus dem Vergleich der Ergebnisse der großräumigen und der kleinräumigen photochemischen Simulationsrechnungen ergeben sich desweiteren eine Reihe von Erkenntnissen über die Anwendung derartiger Modellsysteme. Bei einer **feinskaligeren Auflösung** des Untersuchungsgebietes und Modellrechengitters werden generell präzisere Simulationen ermöglicht. Dies hat zum einen den Vorteil, daß im Umfeld besonderer Emissionsquellen - und insbesondere für Gebiete mit hoher NO<sub>x</sub>-Emissionsdichte - das Auftreten des sog. Titrationseffektes (die örtliche Erhöhung der O<sub>3</sub>-Konzentration bei einer Senkung der NO-Emissionen) gezeigt werden kann. Bei einer **gröberen mesoskaliger Auflösung** ist dies wegen des Vermischungseffektes nicht möglich. Ein weiterer Vorteil ist, daß die für Ballungsräume typischen Abgas- und Ozonfahnen wesentlich exakter modelliert und untersucht werden. Feinskaligere Auflösung, und damit kleinere Untersuchungsgebiete, beinhalten aber auch Nachteile. Im Falle von transportbetonen Wetterlagen werden die Bedingungen innerhalb des Untersuchungsgebietes in starkem Maße von externen Einträgen bestimmt.

**Abb. 8-1: Wirkungen von lokalen/regionalen und überregionalen Emissionsminderungsmaßnahmen auf die lokalen Ozon-Spitzenkonzentrationen in den Modellregionen**



**Tab. 8.3: Effekte der Emissionsminderungs-Szenarien in den Modellregionen auf Emissionen und auf regionale Ozon-Spitzenkonzentrationen**

Nr.	Kurzbezeichnung	Maßnahmen	Effekte auf O <sub>3</sub> -Spitzenkonzentrationen (Veränderung der Überschreitungshäufigkeit von Schwellwerten)		
			Rhein-Main-Neckar Gitterzellen: 630 O <sub>3</sub> -Gitterstunden > 240µg/m <sup>3</sup>	Dresden Gitterzellen: 841 O <sub>3</sub> -Gitterstunden > 220µg/m <sup>3</sup>	Berlin-Brandenburg Gitterzellen: 2700 O <sub>3</sub> -Gitterstunden > 220µg/m <sup>3</sup>
S-0	Basislauf	Keine	GS* = 4.127	GS* = 299	GS* = 9.655
S-1	Regio-Tempolimit	Scharfes Tempolimit in der Region	GS= +9% O <sub>3</sub> -max: -4%	GS= -4% O <sub>3</sub> -max: -3%	GS= -2% O <sub>3</sub> -max: -3%
S-2	Regio-Pkw-Fahrverbot	Fahrverbot für nicht schadstoffarme (nsa) Pkw in der Region	GS= -14% O <sub>3</sub> -max: -7%	GS= -10% O <sub>3</sub> -max: -5%	GS= -8% O <sub>3</sub> -max: -5%
S-4a	Regio-Straßenverkehr	Scharfes regionales Tempolimit plus Fahrverbot für nsa-Pkw + Lkw in der Region (S-1 plus S-2)	GS= -24% O <sub>3</sub> -max: -14%	k.B.	GS= -27% O <sub>3</sub> -max: -15%
S-4b	Kombi-Straßenverkehr-Max	S-4a plus Fahrverbot für nsa-Pkw in umliegenden Bundesländern (uBL)	GS= -71% O <sub>3</sub> -max: -16%	GS= -59% O <sub>3</sub> -max: -10%	GS= -56% O <sub>3</sub> -max: -20%
S-6	Regio-Focus NO <sub>x</sub>	Tempolimits, Fahrverbote, Stilllegung größerer NO <sub>x</sub> - Emissionsquellen, Appelle	GS= -29% O <sub>3</sub> -max: -21%	k.B.	GS= -32% O <sub>3</sub> -max: -18%
S-7	Regio-Focus VOC	Fahrverbote nsa-Pkw, Stilllegung größerer VOC-Emissionsquellen, Appelle an Gewerbe/Haushalte	GS= -19% O <sub>3</sub> -max: -25%	GS= -10% O <sub>3</sub> -max: -6%	GS= -19% O <sub>3</sub> -max: -5%
S-8a	Regio-Max NO <sub>x</sub> /VOC	S-6 plus S-7	GS= -29% O <sub>3</sub> -max: -21%	GS= -22% O <sub>3</sub> -max: -12%	GS= -34% O <sub>3</sub> -max: -18%
S-8b	Kombi-Max NO <sub>x</sub> /VOC	S-8a plus Fahrverbote in umliegenden Bundesländern	GS= -86% O <sub>3</sub> -max: -23%	GS= -73% O <sub>3</sub> -max: -15%	GS= -61% O <sub>3</sub> -max: -23%
S-9	Sommerbenzin	Reformulierte Kraftstoffe für Otto- u. Dieselmotoren	k.B.	GS= -13% O <sub>3</sub> -max: -3%	GS= -5% O <sub>3</sub> -max: -2%
S-10	Trend 2005	Umsetzung aller eingeleiteten Maßnahmen in Deutschland und Europa	GS= -91% O <sub>3</sub> -max: -41%	GS= -81% O <sub>3</sub> -max: -10%	GS= -53% O <sub>3</sub> -max: -30%

Anm.: Die Analysen der Anzahl der Gitterstunden mit Überschreitungen von O<sub>3</sub>-Konzentrationsschwellwerten für die Regionen Dresden und Berlin-Brandenburg basieren auf den Gitterstunden >220µg/m<sup>3</sup>, da die Anzahl der Gitterstunden >240µg/m<sup>3</sup> nur sehr klein ist.

k.B. = keine Berechnung; \*) GS = Gitterstunden

## 8.2 Gesamtfazit

Die Untersuchung der Effekte von Minderungsstrategien zur Bekämpfung von überhöhten bodennahen Ozonbelastungen in hochsommerlichen Episoden wurde zunächst emissionsseitig und anschließend immissionsseitig auf der Basis von umfangreichen groß- und kleinräumigen Simulationsrechnungen mit einer Vielzahl von Minderungsmaßnahmen bei den Ozon-Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC durchgeführt. Als Fazit der Modellrechnungen kann festgehalten werden:

1. Mit **dauerhaft und großräumig** (bundes-, europaweit) **ausgelegten Minderungsmaßnahmen** (Szenario "Trend 2005" mit -30% bis -49% bei NO<sub>x</sub> und VOC aus anthropogenen Quellen bzw. Szenario "Reduktion 2005" mit -70% bei NO<sub>x</sub> und VOC aus anthropogenen Quellen) können die **effektivsten Minderungen der Ozonspitzenwerte** erreicht werden.

Dauerhafte, großräumige Minderungsmaßnahmen bewirken sowohl eine Senkung der großräumigen Hintergrundkonzentrationen als auch eine Minderung der lokalen Ozonproduktion. Bei der Umsetzung dieser Maßnahmen (bis zum Jahre 2005) können großräumig Abnahmen der Ozonspitzenwerte bis zu 20% (Trend 2005) bzw. bis zu 40% (Reduktion 2005) erreicht werden. Es muß aber weiterhin mit Überschreitungen des derzeitigen Warnwerts von 180 µg/m<sup>3</sup> gerechnet werden. Die Anzahl solcher Überschreitungen wird jedoch deutlich geringer sein als heute.

2. **Temporäre Maßnahmen**, die in der Episode nach Überschreitung eines Immissionsgrenzwertes ausgelöst werden, sind **deutlich weniger effektiv als dauerhafte und großräumige Maßnahmen**.
3. **Temporäre und regional begrenzte Einzelmaßnahmen** (wie ein regionales Tempolimit, ein regionales Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw oder die regionale Einführung von sog. "Sommerbenzin" mit geringerem Schadstoffgehalt) **tragen für sich alleine nur geringfügig zur Verminderung hoher Ozonkonzentrationen bei**. Die durch solche Einzelmaßnahmen erreichbaren Abnahmen der Ozonspitzenwerte liegen bei höchstens 5%, vornehmlich wegen der nur relativ geringen emissionsseitigen Reduktionseffekte.
4. Die **Kombination mehrerer regional begrenzter Maßnahmen** führt hingegen zu einer deutlichen Reduktion der Ozon-Vorläuferemissionen (50% und mehr) und macht sich dann auch in den Simulationsrechnungen in einer **deutlichen Senkung der Ozon-Belastungsspitzen** bemerkbar. Es ist allerdings nicht zu erwarten, daß die Abnahmen der Ozonspitzenwerte selbst bei einer Ausschöpfung des gesamten regionalen Minderungspotentials größer als 20% sein werden. Die Abnahmen der Überschreitungshäufigkeiten des Warnwertes von 180 µg/m<sup>3</sup> fallen bei regionalen Maßnahmen

deutlich geringer aus als bei gleichstarken großräumigen und dauerhaften Maßnahmen.

5. Grundsätzlich gilt, daß mit zunehmender **Größe des Maßnahmensgebietes**, etwa im Maßstab mehrerer benachbarter Bundesländer, die Effektivität temporärer Maßnahmen deutlich zunimmt. Bei der Ozon-Bekämpfung sind großräumige Strategien mit abgestimmter, überregionaler Vorgehensweise wesentlich effizienter als einzelne lokale/regionale Aktionen, und benötigen zudem eine vergleichsweise geringere Eingriffstiefe.
6. Grundsätzlich gilt ferner, daß die **Wirksamkeit von temporären Maßnahmen** auch von den **meteorologischen und emissionspezifischen Randbedingungen** im Maßnahmensgebiet abhängt. Bei transportbetonten Wetterlagen kommen die Wirkungen von regionalen Maßnahmen nicht dem eigentlichen Maßnahmensgebiet, sondern benachbarten Gebieten zugute. Umgekehrt gilt: je geringer der Luftmassenaustausch, umso höher der Einfluß von regionalen Maßnahmen auf den lokalen Ozonbildungsprozess.

## LITERATURVERZEICHNIS

- Allwine, K.J. and Whiteman, C.D. (1985): MELSAR:  
A mesoscale air quality model for complex terrain: Volume 1 - Overview, technical description and user's guide. Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
- Altshuler, S., Arcado, T., Lawson, D. (1995):  
Weekday vs weekend ambient ozone concentrations: discussion and hypotheses with focus on Northern California. J. Air Waste Man. Ass. 45, pp. 967-972
- Baumbach et al.  
Luftreinhaltung; Berlin, Heidelberg, New York 1992
- Bower, J. et al. (1989):  
Surface ozone concentrations in the U.K. in 1987-1988. Atmos. Environ. 23, pp. 2003-2016
- Boysen, B. et al: Erfassung stündlicher SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg in einer räumlichen Ausflösung von 1x1 km für die Zeit der TULLA Meßkampagne, KfK-PEF 21; Karlsruhe 1987
- Briggs, G.A. (1975):  
Plume rise predictions. Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis. AMS Boston, pp. 59-111.
- Brönniman, S. and Neu, U. (1997):  
Weekend-weekday differences of near-surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. Atmos. Environ. 31,8 pp. 1127-1135
- Builtjes, P.:  
The LOTOS-long term ozone simulation project. Summary report. TNO-Report IMW-R 92/240, 1992.
- Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.): ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank, First Edition Draft, Bonn 1993.
- Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.): Verkehr in Zahlen 1994, Bonn 1995
- Carter, W. (1990):  
A detailed mechanism for the gas-phase atmospheric reactions of organic compounds. Atmos. Environ. 24A, 3
- Carter, W. (1990):  
A detailed mechanism for the gas-phase atmospheric reactions of organic compounds, Atm. Env.24A, 3
- Chang, J.S., R.A. Brost, I.S.A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W.R. Stockwell and C.J. Walcek:  
A threedimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation. J. Geophys. Res., 92, 14681-14700, 1987.

Concawe:

The effects of temperature and fuel volatility on vehicle evaporative emissions. Report no. 90/51, Brüssel 1990

Derwent, R.G. and Davies, T.J.:

Modeling the impact of NO<sub>x</sub> or hydrocarbon control and photochemical ozone in Europe. Atmos. Environ., 28, 2019-2052, 1994.

Doty, B. (1995):

The Grid Analysis and Display System GrADS, Center for Ocean-Land-Atmospheric Studies, <http://grads.iges.org/grads/head.html>

Dyer, A.J. and B.B. Hicks (1970):

Flux-gradient relationships in the constant flux layer, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96, 715-721

Ebel, A., H. Hass, H.J. Jakobs, M. Laube, M. Memmesheimer, A. Oberreuter, H. Geiß and Y.-H. Kuo:

Simulation of ozone intrusion caused by a tropopause fold and cut-off low. Atmospheric Environment, 25A, 2131-2144, 1991.

Ebel, A., H. Petry:

The Impact of Air Traffic on Tropospheric Composition. In: Air Pollution II, Vol. 1, eds. J.M. Baldasano, C.A. Brebbia, H. Power, P. Zanetti, p. 221-229, Computational Mechanics Publications, 1994.

Elbern, H.:

Massive parallelization of a comprehensive atmospheric chemistry-transport model system. Proceedings of 9th International Symposium on Computer Science for Environmental Protection, CSEP 1995. Berlin, 29.9.1995.

Elbern, H.:

Parallelization and load balancing of a comprehensive atmospheric chemistry transport model. Atmos. Env., in press, 1997.

Elkus, B. and Wilson K. (1977):

Photochemical air pollution: weekend-weekday differences. Atmos. Environ. 11, pp. 509-515

Europäisches Institut für Binnenschifffahrt Duisburg (EBD):

Persönliche Mitteilung, Duisburg 1995

Flughafen AG:

Persönliche Mitteilungen, Frankfurt 1994/1995

Forschungsgesellschaft für Verkehr e.V. (Hrsg.):

Richtlinien für die Anlagen von Straßen, Teil: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen - RAS-W, Köln 1986

Fricke, W.:

Ermittlung des Einflusses von NO<sub>x</sub>-Minderungen auf die Ozonkonzentration in ausgewählten Gebieten in Deutschland. Gutachten im Auftrag des bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen, September 1995.

Friedrich, R., M. Heymann, Y. Kasas:

Estimation of European Emission Data with High Temporal Resolution. EUROTRAC Annual Report 1993. S. 20-42. EUROTRAC International Scientific Secretariat (ISS), Garmisch-Partenkirchen. July 1994.

Goodin, W.R., G.J. McRae and J.H. Seinfeld (1980):

An objective analysis technique for constructing three-dimensional urban scale wind fields, J. Appl. Meteor., 19,98-108

Grell, G.A., J. Dudhia and D.R. Stauffer:

A description of the Fifth-Generation PENN State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR., 138 pp., 1994.

Hanna, S.R., Schulman, L.L, Paine, R.J., Pleim, E., Baer, M. (1985):

Development and Evaluation of the Offshore and Coastal Dispersion Model, JAPCA, Vol.35, No.10, pp.1039-1047

Hartmann, A., Kämpf, K, Motz, G. (1995):

Analyse der immissionsseitigen Effekte der Anwendung der Hessischen Ozonverordnung während der Ozonepisode des Sommers 1994, Studie im Auftrag der Hessischen Landesanstalt für Umwelt. Prognos AG, Basel

Hartmann, A., Motz, G. (1996):

Inputdatenbasis 1994 der Modellregion Rhein-Main-Neckar: Kleinräumige Emissionen nach Emittentengruppen, Emissionsminderungs-Szenarien, Landnutzung und Orographie, Ergebnisbericht zur Stufe B-1.1 des F&E-Vorhabens 10402812. Prognos AG im Auftrag des Umweltbundesamts

Hartmann, A., Motz, G. (1997):

Inputdatenbasis 1994 der Modellregion Dresden: Kleinräumige Emissionen nach Emittentengruppen, Emissionsminderungs-Szenarien, Landnutzung und Orographie. Ergebnisbericht zur Stufe B-1.2 des FE-Vorhabens 10402812/01. Prognos AG im Auftrag des Umweltbundesamts

Hartmann, A., Motz, G. (1997):

Inputdatenbasis 1994 der Modellregion Berlin-Brandenburg: Kleinräumige Emissionen nach Emittentengruppen, Emissionsminderungs-Szenarien, Landnutzung und Orographie. Ergebnisbericht zur Stufe B-1.3 des FE-Vorhabens 10402812/01. Prognos AG im Auftrag des Umweltbundesamts

Hass, H., A. Ebel, H. Feldmann, H.J. Jakobs and M. Memmesheimer:

Evaluation studies with a regional chemical transport model (EURAD) using air quality data from the EMEP monitoring network. Atmos. Environ., 27A, 867-887, 1993.

- Hass, H., Bultjes P., Simpson, D., Stern, R. (1996):  
Comparison of photooxidant dispersion model results, EUROTRAC report, Garmisch Partenkirchen
- Hass, H., Bultjes, P., Simpson, D., Stern, R. (1997):  
Comparison of model results obtained with several European regional air quality models, *Atm. Env.* 31, pp. 3259-3279
- Hass, H., H.J. Jakobs, M. Memmesheimer:  
Analysis of a regional model (EURAD) near surface gas concentration predictions using observations from networks. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 57, 173-200, 1995.
- Hass, H., H.J. Jakobs, M. Memmesheimer:  
Budget of Ozone and Precursors for European Regions as Simulated by the Regional Air Quality Model EURAD. In: *Proceedings of the Sixth European Symposium on 'Physico-Chemical Behaviour of Atmospheric Pollutants' Varese 18-22 October 1993*, Report EUR 15609/1 EN, Vol. 1, 500-505, 1994.
- Heinz und Feier:  
Erstellung eines Emissionskatasters der Quellgruppe KFZ-Verkehr für das Bundesland Hessen, Studie im Auftrag der HLFU; Wiesbaden 1993
- Hessische Landesanstalt für Umwelt (Hrsg.):  
Ermittlung der Emissionen auf dem Flughafen Frankfurt am Main - Fortschreibung 1988, Wiesbaden 1991
- Hessisches Landesamt für Strassenbau (Hrsg.):  
Daten über den Straßenverkehr in Hessen, Heft 34: Jahresvergleich 1991/92 und 1992/93, Wiesbaden 1994
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (Hrsg.):  
Luftreinhalteplan Rhein-Main, 1. Fortschreibung, Wiesbaden 1991
- Heusch-Boesefeldt (1993):  
Untersuchung des repräsentativen Fahrverhaltens von Pkw auf Stadt- und Landstraßen; Studie im Auftrag des BMV, Aachen 1993
- Heusch-Boesefeldt (1994a):  
Ermittlung der Lkw-Jahresfahrleistungen 1990 und 1986 auf allen Straßen der Bundesrepublik Deutschland, Aachen 1994
- Heusch-Boesefeldt (1994b):  
Ermittlung der Pkw-Jahresfahrleistungen 1990 und 1986 auf allen Straßen der Bundesrepublik Deutschland, Aachen 1994;
- Heusch-Boesefeldt (1995):  
Studie zur Verbesserung der Umweltsituation im Oberen Elbtal - Emissionskataster der Quellengruppe Verkehr, Aachen 1995
- Holtslag, A. and Nieuwstadt, F.(1986):  
Scaling the atmospheric boundary layer, *Bound. Lay. Met.* 36, pp.201-209

- Hütting, G., Hotes, A. (TU Berlin):  
Abschätzung der Schadstoffemissionen mit Strahlantrieb - Bewertung für den Flughafenbereich und das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Berlin 1994
- IFEU: Ozonalarm und verkehrsbedingte Schadstoffemissionen in Hessen, Heidelberg 1995
- Ingenieurschule Biel:  
Emissionsmessungen bei Motorrädern und Motorfahrrädern, im Auftrag des BUWAL, Bern 1992
- Jakobs, H.J., H. Feldmann, H. Hass, M. Memmesheimer:  
The use of nested models for air pollution studies: An application to a SANA episode, J. Appl. Meteor., Vol. 34, No. 6, 1995.
- Karl, T. (1978):  
Day of week variations of photochemical pollutants in St. Louis area. Atmos. Environ. 11, pp. 1657-1667
- Kessler, R.C. (1989):  
Users guide of the SAI-Version of the Colorado State University Mesoscale Model Version 2, Systems Applications, San Rafael, CA 94903
- Kraftfahrtbundesamt:  
Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern in Deutschland am 1. Juli 1994, Flensburg 1994
- Künzle, T. und Neu, U. (1994):  
Experimentelle Studien zur Struktur und räumlichen Dynamik des Sommersmogs über dem Schweizer Mittelland. Berne
- Lamb, B. et al.:  
A biogenic hydrocarbon emission inventory for the U.S.A. using a simple forest canopy model, Atmos. Environ., 27, No. 11.
- Lippert, E.: Biogene Emissionen:  
Einbindung natürlicher VOCs in das EURAD-Emissionsmodell, Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln, 1992.
- Liu, M.K. and Yocke, M.A. (1980):  
Siting of wind turbine generators in complex terrain. J. Energy; 4, 10:16
- Masuhr, K. et al. (1996):  
Energieprognose bis 2010, Studie der Prognos AG im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft
- Mayer, H. und Schmidt J. (1993):  
Analyse der Ozonkonzentration an Sonn- und Werktagen. Institut für Meteorologie der Universität Freiburg

Mayer, H. und Schmidt J. (1994):

Wettersituationsabhängige Auswertung der Stickstoffoxid- und Ozonmesswerte von Heilbronn und Neckarsulm. Institut für Meteorologie der Universität Freiburg

Meeuwssen, H.J. et al (1994):

Emissions- und Landnutzungsdatenbasis 1990 für das PHOXA-Untersuchungsgebiet (Stand Aug. 1994), TNO Institute of Environmental Sciences, Delft/NL, Abschlußbericht zum Teilvorhaben A-1 "Großräumige Emissionsdatenbasis" im Rahmen des F&E-Vorhabens 10402812/01 "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon" des Umweltbundesamts. Im Auftrag der Prognos AG

Memmesheimer, M., H. Hass, J. Tippke, A. Ebel:

Modeling of Episodic Emission Data for Europe with the EURAD Emission Model (EEM). In Proceedings of: A&WMA's International Speciality Conference "Regional Photochemical Measurement and Modeling Studies", San Diego, 1995.

Memmesheimer, M., Hass, H., Ebel, A., et al.(1995):

Ozon-Modellrechnungen mit EURAD für Episoden in 1990 und 1994 zur Bewertung der Effektivität von Ozonminderungsstrategien, Rheinisches Institut für Umweltforschung an der Universität zu Köln,.. Abschlußbericht zum Teilvorhaben A-5.2 "Großräumige Ozon-Ausbreitungsrechnungen" im Rahmen des FE-Vorhabens 10402812/01 "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon" des Umweltbundesamts. Im Auftrag der Prognos AG

Memmesheimer, M., J. Tippke, A. Ebel, H. Hass, H.J. Jakobs and M. Laube:

On the use of EMEP emission inventories for European scale air pollution modelling with the EURAD model. In: Proceedings of the EMEP workshop on photooxidant modelling for long-range transport in relation to abatement strategies. Ed.: J. Pankrath, UBA, Berlin, Germany, 307-324, 1991.

Morris, R. und Myers, T. (1990):

User's manual for UAM (CB-IV), EPA-450/4-90-007

Motz, G., Hartmann, A., Plinke, E . (1996):

Bewertung der Effekte von kurz- und langfristigen Minderungsstrategien auf hochsommerliche Ozonkonzentrationen mit Hilfe modellgestützter emissions- und immissionsseitiger Wirkungsanalysen. Ergebnisbericht zur Stufe A des FE-Vorhabens 10402812/01. Prognos AG im Auftrag des Umweltbundesamts

Motz, G., Plinke, E . (1993):

Methoden zur Bewertung der Effekte von regionalen Minderungsmaßnahmen mit dem Ziel einer bundeseinheitlichen Vorgehensweise, Projektdefinitionsphase, FE-Vorhabens 10402673. Prognos AG im Auftrag des Umweltbundesamts

Müller, Th., Boysen B., Friedrich, R., Voß A.:

Ermittlung und Analyse des zeitlichen Verlaufs und der räumlichen Verteilung der derzeitigen und zukünftigen SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg, Forschungsbericht KfK-PEF 71; Karlsruhe 1990

Münch, J. et al.:

Berechnung der Verbesserung der Luftqualität als Folge von Maßnahmen zur Minderung der Emissionen, Phase II: Emissionsdatenbasis 1990; UBA-Forschungsvorhaben 104 02 592/II, Berlin 1992

N.N.: Aircraft Engine Emissions:

NASA Conference Publication 2071, Cleveland, Ohio 1977

Nieuwstadt, F.T.M. and Tennekes, (1981):

A rate equation for the nocturnal boundary layer height. J. Atmos. Sci., Vol.38, pp. 1418-1428.

Nieuwstadt, F.T.M., (1984):

Some aspects of the turbulent stable boundary layer, Bond. Layer Meteor., Vol. 30, pp.31-55

O'Brien, J.J. (1970):

A note on the vertical structure of the eddy exchange coefficient in the planetary boundary layer. J.Atmos. Sci, 27,1213-1215

Obermaier A. et al.: Zeitlicher Verlauf und räumliche Verteilung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen und Kohlenmonoxid in Baden-Württemberg, KfK-PEF 78, Karlsruhe 1991

Orthofer, R. et al.:

Flüchtige Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe in Österreich: Regionalisierte Emissionsinventuren und Strategien der Emissionsminderung, OEFZS-A-2065, Seibersdorf 1989

Pielke, R.A. (1984):

Mesoscale Meteorological Modeling, Academic Press

Pilinis, C., Kassomenos, P., Kallos, G. (1993):

Modelling of photochemical pollution in Athens. Atm. Env.27b, 4

Plinke, E., Hartmann, A., Motz, G. (1996):

Großräumige Emissionsminderungsmaßnahmen und -Szenarien - emissionsseitige Wirkungen von langfristigen sowie von temporären Minderungsmaßnahmen und -szenarien, Ergebnisbericht zur Stufe A-2 des FE-Vorhabens 10402812/01. Prognos AG im Auftrag des Umweltbundesamts

Pryor, S. and Steyn, D. (1995):

Hebdomadal and diurnal cycles in ozone time series from the Lower Fraser Valley, B.C.. Atmos. Environ. 29, pp. 1007-1019

Reichert, K.-H., Kunz, G.:

Ermittlung von Daten über Einsatz, Verbrauch und Emissionen bei der Anwendung von Beschichtungsmitteln, Druckfarben und Verdünnungen in Industrie, Gewerbe und Haushalten in Baden-Württemberg; Forschungsinstitut für Pigmente und Lacke e.V., unveröffentlichter Bericht, Stuttgart 1990)

Reimer, E. und Scherer, B. (1992):

An operational meteorological diagnostic system for regional air pollution analysis and long-term modelling. Air Poll. Modelling and its Applications IX. Plenum Press

Rentz, O., Röll, C.:

Minderung der VOC-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland, UBA-Forschungsvorhaben 104 04 167, Berlin 1992

Roeben, B.:

Vergleich von Chemiemechanismen für das EURAD-Modellsystem. Diplomarbeit, Universität zu Köln, Juli 1995.

Rommerskirchen, St. et al. (1993):

Die energiewirtschaftliche Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2010 unter Einbeziehung der fünf neuen Länder; Studie der Prognos AG im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft,

Rommerskirchen, St., Becker, U., Cerwenka, P., Eland, M. (1991):

Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zu Reduktion der verkehrlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005, Untersuchung der PROGNOSE AG im Auftrag des Bundesministers für Verkehr (F&E-Nr. 90 303/90)

Roth et al.:

Atmos. Environ. 8-1974 oder PLACET, M. in: IRVING, P.M. (Hrsg.): Acidic Deposition: State of Science and Technology, NAPAP Summary Report; Washington D.C. 1991

RWTÜV:

Ermittlung der Emissionsfaktoren für Motorräder in der Bundesrepublik Deutschland, Köln 1993

RWTÜV:

Ermittlung von Abgas-Emissionsfaktoren von Straßenfahrzeugen in der Schweiz. Teil 3: Motorräder, Untersuchung im Auftrag des BUWAL, Bern 1994

Scire, J.S., E.M. Insley, R.J. Yamartino and M.E. Fernau (1995):

A User's Guide for the CALMET Meteorological Model, EARTH TECH, Concord, MA, USA

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz und Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg (1995):

Flugzeug- und Bodenmessungen von Ozon und Vorläuferstoffen zur Abschätzung der Wirksamkeit von emissionsmindernden Maßnahmen im Großraum Berlin-Brandenburg (FluMOB-Projekt)

Simpson, D.:

Biogenic VOC Emissions in Europe Part I - Emissions and Uncertainties, EMEP/MSC-W-Note 4/94, Oslo 1994.

Simpson, D.:

Photochemical model calculations over Europe for two extended summer periods: 1985 and 1989, Atmos. Environ. 27A, No. 6.

Smagorinsky, J. (1963):

General circulation experiments with the primitive equations- I the basic experiment, Mo. Wea. Rev. 91, pp. 99-164

Statistisches Bundesamt (Hrsg.):

Fachserie 8 Reihe 4 - Binnenschifffahrt 1992, Wiesbaden 1995

Statistisches Bundesamt (Hrsg.):

Flugverkehr 1994, Wiesbaden 1995

Stern, R. (1994):

Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen photochemischen Ausbreitungsmodells mit verschiedenen chemischen Mechanismen. Meteorologische Abhandlungen Serie A Band 8, Heft 1. Verlag von Dietrich Reimer Berlin

Stern, R. (1997):

Untersuchung des Einflusses des Emissionswochengangs auf die Ozonkonzentrationen mit Hilfe des photochemischen Ausbreitungsmodells REM3. Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie. Abschlußbericht zum Teilvorhaben A-3.3 "Großräumige Ozon-Ausbreitungsrechnungen" im Rahmen des FE-Vorhabens 10402812/01 "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon" des Umweltbundesamts

Stern, R., Fath, J., Reimer, E. (1995):

Bewertung der Effektivität von Ozonminderungsstrategien mit Hilfe des photochemischen Ausbreitungsmodells REM3. Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie. Abschlußbericht zum Teilvorhaben A-3.1 "Großräumige Ozon-Ausbreitungsrechnungen" im Rahmen des FE-Vorhabens 10402812/01 "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon" des Umweltbundesamts. Im Auftrag der Prognos AG

Stern, R., Scherer, B., Fath, J. (1997):

Ermittlung und Bewertung der Wirkung von Ozonminderungsmaßnahmen im Rhein-Main-Gebiet mit Hilfe des photochemischen Ausbreitungsmodells CALGRID. Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie. Abschlußbericht zum Teilvorhaben B-3.1 "Kleinräumige Ozon-Ausbreitungsrechnungen" im Rahmen des FE-Vorhabens 10402812/01 "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon" des Umweltbundesamts. Im Auftrag der Prognos AG

Stern, R., Scherer, B., Fath, J., Reimer, E. (1997):

Ermittlung und Bewertung der Wirkung von Ozonminderungsmaßnahmen im Großraum Berlin-Brandenburg mit Hilfe des photochemischen Ausbreitungsmodells CALGRID. Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie. Abschlußbericht zum Teilvorhaben B-3.1 "Kleinräumige Ozon-Ausbreitungsrechnungen" im Rahmen des FE-Vorhabens 10402812/01 "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon" des Umweltbundesamts. Im Auftrag der Prognos AG

Suisselectra (1989):

Ozon-Studie - Vergleich der Ozonkonzentrationen zwischen Werktagen und Wochenenden, Lufthygieneamt Basel, Liestal

Tippke, J., Memmesheimer, M., Jakobs, H. et al. (1997):

Ermittlung und Bewertung der Wirkungen von Ozonminderungsmaßnahmen in der Modellregion Dresden, Abschlußbericht zum Teilvorhaben B-3.2 "Kleinräumige Ozon-Ausbreitungsrechnungen" im Rahmen des FE-Vorhabens 10402812/01 "Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon" des Umweltbundesamts. Im Auftrag der Prognos AG

Tippke, J.:

Entwicklung und Anwendung eines Emissionsmodells für Simulationsrechnungen mit dem EURAD-Modell. Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln, 1992.

Umweltbundesamt (Hrsg.):

Abgas-Emissionsfaktoren von Pkw in der Bundesrepublik Deutschland - Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 -bis 1990, Berlin 1994

Umweltbundesamt (Hrsg.):

Das Abgas-Emissionsverhalten von Lkw in der Bundesrepublik Deutschland im Bezugsjahr 1998, Berlin 1983

Umweltbundesamt (Hrsg.):

Emissionsfaktoren für die Verdunstungsemissionen von Kraftfahrzeugen mit Ottomotoren, Berlin 1989

Umweltbundesamt (Hrsg.):

Daten zur Umwelt - Der Zustand der Umwelt in Deutschland, Ausgabe 1997, Berlin 1997

Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg.):

Luftreinhalteplan Großraum Mannheim/Heidelberg 1995, Stuttgart 1995

Umweltministerium Baden-Württemberg:

Bericht der VOC-Ladeskommission - Konzeption zur Minderung der VOC-Emissionen in Baden-Württemberg, Karlsruhe 1993

Umweltministerium Rheinland-Pfalz (Hrsg.):

Luftreinhaltepläne Ludwigshafen, Mainz 1987 und Mainz-Budenheim 1991 sowie Luftreinhalteplan Mainz-Budenheim, 1. Fortschreibung 1987-1995, Mainz 1993 und Luftreinhalteplan Ludwigshafen-Frankenthal - 1. Fortschreibung 1985 - 1991, Mainz 1989

Van Ulden, A.P. and Holtslag, A.A.M. (1985):

Estimation of Atmospheric Boundary Layer Parameters for Diffusion Applications, J. Climate and Appl. Meteor., Vol.24, No.11, pp. 1196-1207

Vanderstraeten, P., Willette, F., Dumont, G. (1996):

Working day versus non-working day ambient ozone concentrations in Brussels and in Belgium. Proceedings of EUROTRAC Symposium '96. Volume 1: Clouds, Aerosols, Modeling and Photo-oxidants. Computational Mechanics Publication, Southampton

Veldt C. et al. (1988):

PHOXA Emission Data Base, TNO report 88-120; Apeldoorn

Veldt, C.:

Updating and upgrading the PHOXA emission data base to 1990, TNO-report 92-118

Vogel, B., Grabe, F., Fiedler, F. (1996):

The effect of weekend emission reduction on the ozone concentration in the South-western part of Germany. Proceedings of EUROTRAC Symposium '96. Volume 1: Clouds, Aerosols, Modeling and Photo-oxidants. Computational Mechanics Publication, Southampton

Weil, J.C. and R.P. Brower (1983):

Estimating convective boundary layer parameters for diffusion application, Draft Report Prepared by Environmental Center, Martin Marietta Corp. For Maryland Dept. Of Natural Resources

Winiwarter, W., A. Kopcsa, W. Loibl (1993):

Zeitliche Disaggregation von Emissionsinventuren. Forschungszentrum Seibersdorf, Januar 1993.

Yamartino, R. (1993):

Nonnegative, conserved scalar transport using grid-cell-centered, spectrally constrained Blackman cubics for applications on a variable thickness mesh, Mo. Wea. Rev. 121, pp. 753-763

Yamartino, R., et al. (1989):

A mesoscale photochemical grid model. Model formulation, Atm. Env. 26A, pp.1493-1512