

Ausbreitungsrechnungen als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main



Verteilung der Konzentrationstagesmittelwerte in einem Straßenraum (Bebauungsabstand 24m, Bebauungshöhe 28 m) mit Windrichtung zwischen 107° und 170° und Windgeschwindigkeit zwischen 1.7 m/s und 3.8 m/s

für
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Postfach 3209 · Rheingaustraße 186 · D-65022 Wiesbaden

von
IVU Umwelt GmbH · Burgweg 10 · D-79350 Sexau
Florian Pfäfflin, Götz Wiegand
Arbeitsgruppe Troposphärische Umweltforschung · Institut für
Meteorologie · Freie Universität Berlin ·
Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10 · D-12165 Berlin
Andreas Kerschbaumer, Eberhard Reimer, Rainer Stern

Mai 2004

1 Einführung

Im Ballungsraum Rhein-Main wurde im Jahr 2002 an drei verkehrsbezogenen Messstationen der Immissionswert für den Jahresmittelwert NO_2 und an einer dieser Stationen der Immissionswert für den Tagesmittelwert PM_{10} überschritten. Nach Artikel 8 der EU-Rahmenrichtlinie 96/62/EG (EU-RRL) zur Luftqualität (EU, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 1996) bzw. §13 der 22. BImSchV müssen für Gebiete, in denen Grenzwerte überschritten werden, Luftreinhaltepläne erarbeitet werden, aufgrund derer die betreffenden Grenzwerte zukünftig eingehalten werden können. In der EU-RRL sind dazu neben Messungen erstmalig auch Modellrechnungen zur Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität vorgesehen.

Nach der EU-Rahmenrichtlinie (siehe EU, 1996) müssen Ausbreitungsrechnungen zur flächendeckenden Bestimmung der Luftqualität die folgenden vier Raumskalen abdecken:

- europaweit,
- großräumig (national)
- regional (Ballungsraum)
- lokal/städtisch (Stadtquartier, Straßenschlucht).

Das Umweltbundesamt hat an die FU Berlin FE-Vorhaben vergeben, in denen ein Modellinstrumentarium entwickelt wurde, das den in der EU-RRL definierten Anforderungen an die Ausbreitungsrechnung genügt. Kern des Systems ist das chemische Transportmodell REM-CALGRID (RCG), das für die vorliegende Studie eingesetzt wurde (Stern, 2003, Stern et al., 2003). Die Ergebnisse des RCG-Modells dienen als Vorbelastung für ein sich anschließendes Straßenschlucht-Modell.

Ebenfalls durch FE-Vorhaben des Umweltbundesamtes (Ostmann et al., 1996) wurde die Entwicklung des Canyon-Plume-Box-Modell, im folgenden CPB, gefördert. CPB wurde in zahlreichen Forschungsvorhaben validiert und in Gutachten eingesetzt. Mit CPB wird der Einfluss der Emissionen der Straße berechnet.

Dieser Kurzbericht ist die Zusammenfassung einer Studie, die von der IVU-Umwelt GmbH gemeinsam mit der Arbeitsgruppe TRUMF am Institut für Meteorologie der Freien Universität im Auftrag des Hessisches Landesamts für Umwelt und Geologie (HLUG) erstellt wurde (IVU, 2004; Stern et al., 2004). Ziel der Untersuchung war die rechnerische Ermittlung der Immissionen in 15 hoch belasteten Straßenräumen im Rhein-Main-Gebiet.

2 Die 15 Straßen

Die 15 Straßenräume wurden von dem HLUG vorgegeben. Für die Straßenräume (siehe Tabelle 1) sind die NO_2 - und PM_{10} -Immissionen an der Bordsteinkante in 1.5 m Höhe mit den Modellen zu ermitteln.

Tabelle 1 15 von der HLUG definierte Straßenräume. Das Kürzel vor dem Straßenamen bedeutet FF=Frankfurt/Main, OF=Offenbach, DA=Darmstadt und WI=Wiesbaden.

| Nr | Straßenname | von | bis |
|----|----------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 1 | FF-Bleichstraße | Friedberger-Landstraße | Elefantengasse |
| 2 | FF-Bockenheimer-Straße | Schumannstraße | Senckenberganlage |
| 3 | FF-Escherheimer-Landstraße | Bockenheimer-Anlage | Querstraße |
| 4 | FF-Friedberger-Landstraße | Zeiselstraße | Wielandstraße |
| 5 | FF-Hochstraße | Große-Bockenheimer-Straße | Kleine-Hochstraße |
| 6 | FF-Höhenstraße | Heidestraße | Burgstraße |
| 7 | FF-Mainzer-Landstraße | Blittersdorfplatz | Karlstraße |
| 8 | FF-Taunusstraße | Moselstraße | Am-Hauptbahnhof |
| 9 | OF-Waldstraße | Geleitstraße | Bleichstraße |
| 10 | DA-Hügelstraße | Schützenstraße | Wilhelm-Glässig-Straße |
| 11 | DA-Bleichstraße | Gagernstraße | Kasinostraße |
| 12 | DA-Rhönring | Mollerstraße | Robert-Schneider-Straße |
| 13 | WI-Rheinstraße | Karlstraße | Schwalbacherstraße |
| 14 | WI-Kaiser-Friedrich-Ring | Scheffelstraße | Wielandstraße |
| 15 | WI-Schiersteiner Straße | Niederwaldstraße | Wolfram-von-Eschenbachstraße |

Die Lage der 15 Straßenräume zeigt die folgende Abbildung 1.

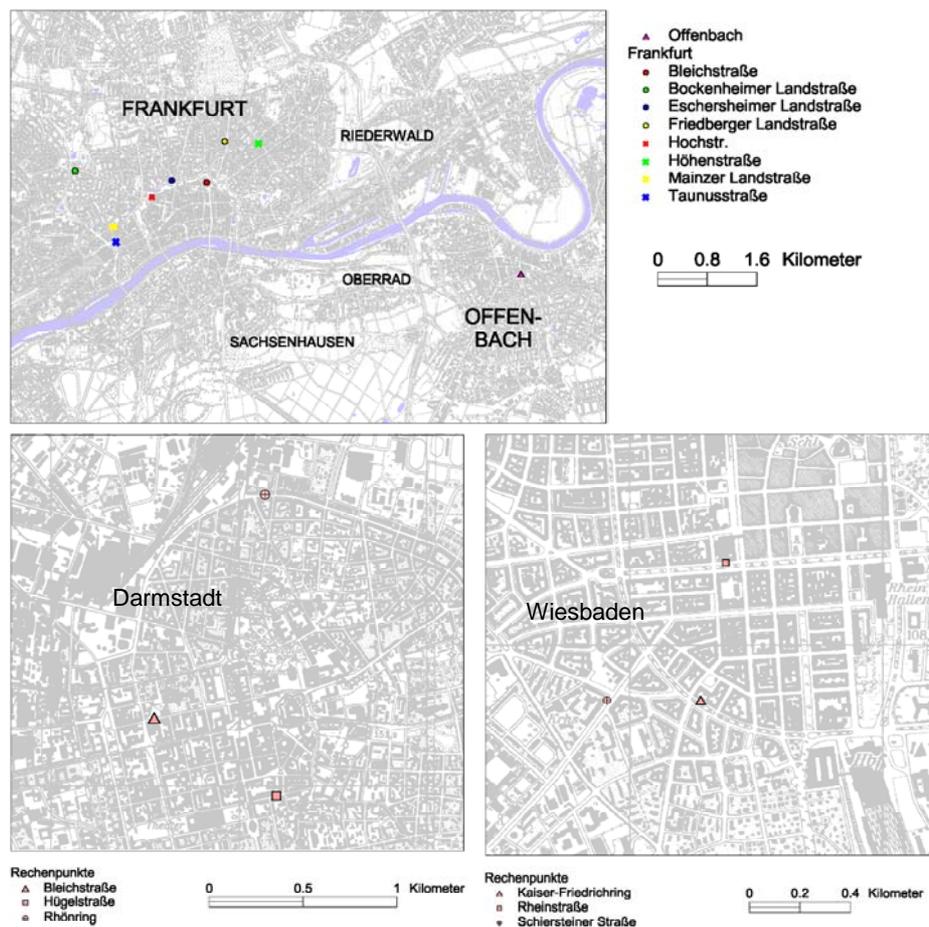


Abbildung 1 Lage der 15 Straßenräume in Frankfurt/Main (8)/Offenbach (1, oben), Darmstadt (3, unten links) und Wiesbaden (3, unten rechts).

3 Modelle

3.1 Vorbelastungsrechnungen

Die Vorbelastungsrechnungen wurden von Stern et al. (2004) mit dem REM-CALGRID-Modell (RCG) durchgeführt. Das RCG-Modell ist ein chemisches Transportmodell, das die dreidimensionale Ausbreitung und Entfernung von Schadstoffen in der Atmosphäre unter Berücksichtigung der Oxidantien- und Aerosolbildung simuliert (siehe Stern, 2003). Das Modell ist in der Lage, für alle in den EU-Richtlinien definierten Schadstoffe die entsprechenden Beurteilungsgrößen zu berechnen. Die Berechnung erfolgt dabei auf Stundenbasis für das ganze Jahr, so dass auch die in den Richtlinien verlangten Überschreitungshäufigkeiten direkt berechnet werden können. Bei den Aerosolen können neben der Gesamtsumme der Partikel $< 10 \mu\text{m}$ auch die Einzelkomponenten der wichtigsten primären und sekundären Aerosole getrennt ausgewiesen werden.

Das RCG-Modell wurde zunächst auf ein großräumiges Modellgebiet, das ganz Mitteleuropa umfasst, in einem circa $30\text{km} \cdot 30\text{km}$ -Gitter angewandt. Als Emissionsdaten wurden dazu die von der TNO, Niederlande, für Europa erstellten Daten verwendet (Stern, 2003). Die vom Modell benötigten meteorologischen Daten des Modells wurden aus meteorologischen Beobachtungen mit dem am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin betriebenen Programmsystem TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research) erstellt.

In das großräumige Modellgebiet ist ein kleinräumiges, urbanes Modellgebiet eingebettet, das das gesamte Rhein/Main-Gebiet in einem $1\text{km} \cdot 1\text{km}$ -Gitter umfasst. Die europaweite Rechnung liefert die Hintergrundkonzentrationen für die regionale/urbane Skala. Die für diese Ausbreitungsrechnungen benötigten Emissionsdaten wurden aus dem hessischen Emissionskataster 2000 in Kombination mit aktuellen Verkehrsinformationen abgeleitet.

3.2 Straßenschluchtrechnungen

Mit dem Ausbreitungsmodell CPB (Canyon-Plume-Box-Modell) können die verkehrsbedingten Luftschadstoff-Immissionen in einer Straßenschlucht berechnet werden. CPB kann einen weiten Bereich von Straßenschluchtgeometrien behandeln, darunter unterschiedliche Bebauungshöhen auf beiden Seiten, teildurchlässige, "poröse" Bebauung (z.B. offene Parkhäuser) oder gekrümmte Straßen (siehe Yamartino, 1986).

Auch die CPB-Belastung wird stundenfein berechnet. Die meteorologischen Variablen sowie die Vorbelastung liefert das RCG-Modell.

CPB enthält ein Photochemie-Modul, das es erlaubt direkt NO_2 -Immissionen zu berechnen. Die erforderlichen Eingangsdaten (stündliche NO -, NO_2 - und O_3 -Konzentrationen über dem Straßenraum) stehen als RCG-Modellrechnungen im 1km^2 -Gitter zur Verfügung.

Die stündlichen Verkehrsemissionen werden für die 15 Straßen mit dem auf den neuen Emissionsfaktoren (INFRAS, 2004) beruhenden Emissionsmodell IMMIS^{em/h} (siehe IMMIS^{luft}, 2004) berechnet.

3.3 Relevanz von Modellrechnungen

Die regional/urbane Rechnung liefert die Vorbelastungskonzentrationen für die sich anschließenden Straßenschluchtrechnungen. Damit beruhen Hintergrund-, Vor- und Zusatzbelastung komplett auf Modellrechnungen. Dies ist besonders wichtig für die Ursachenanalyse, da die nicht-linearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission unter Berücksichtigung aller relevanten physikalischen und chemischen Prozesse berechnet werden. Insbesondere für die Oxidantien und PM₁₀ ist es nur schwer möglich, das Minderungspotential von Straßenräumen ohne solch eine rechnerische Bestimmung des großräumigen Hintergrunds, der regionalen Vorbelastung sowie der Belastung aus der Straße selbst zu quantifizieren.

4 Ergebnisse

4.1 Vorbelastungsrechnungen

Das Ergebnis der Vorbelastungsrechnungen für NO₂ zeigt Abbildung 2.

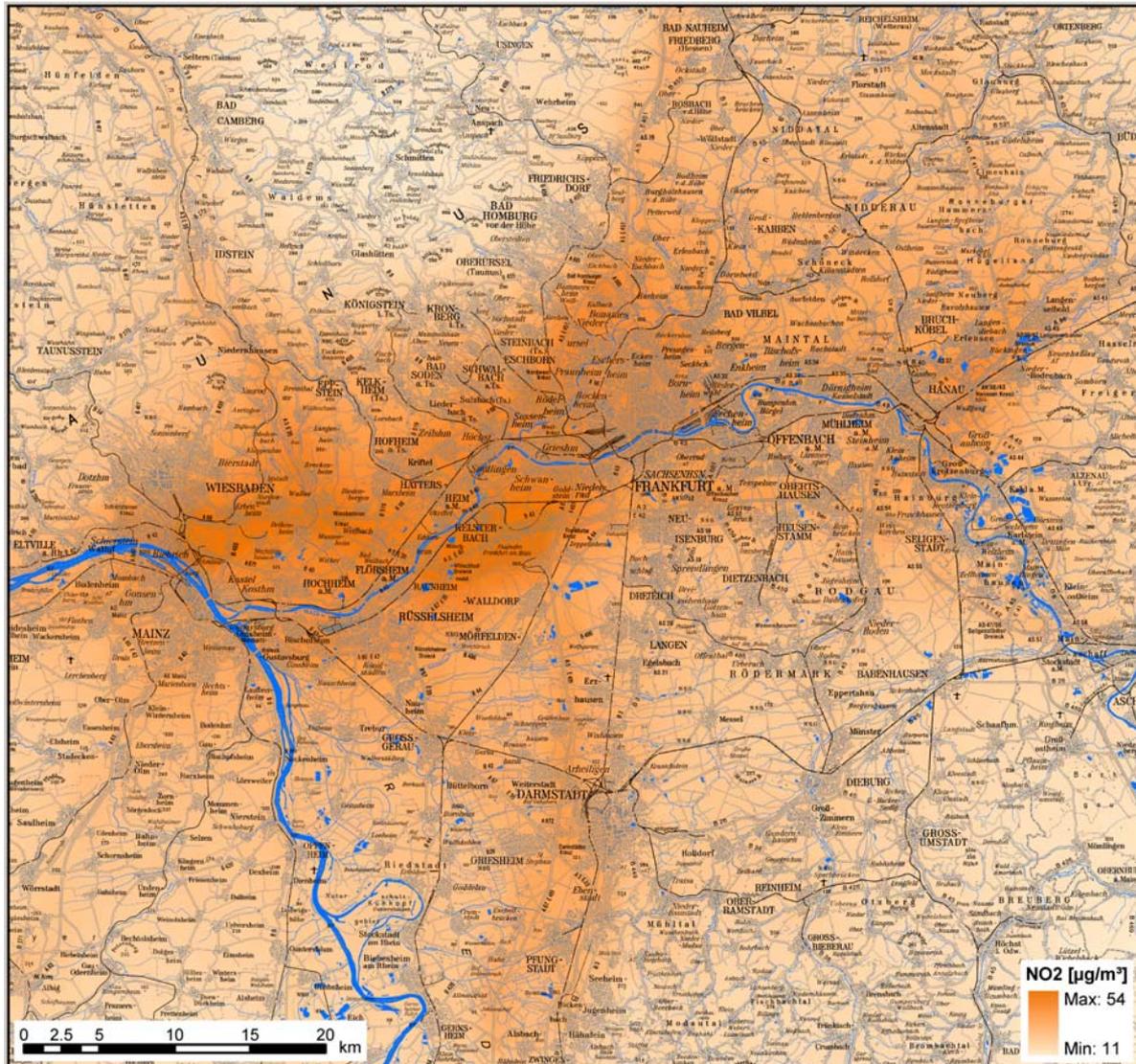


Abbildung 2 Jahresmittelwerte der NO₂-Konzentrationen im Rhein-Main-Gebiet. REM-CALGRID-Berechnung.

Das Ergebnis der Vorbelastungsrechnungen für PM₁₀ zeigt Abbildung 3.

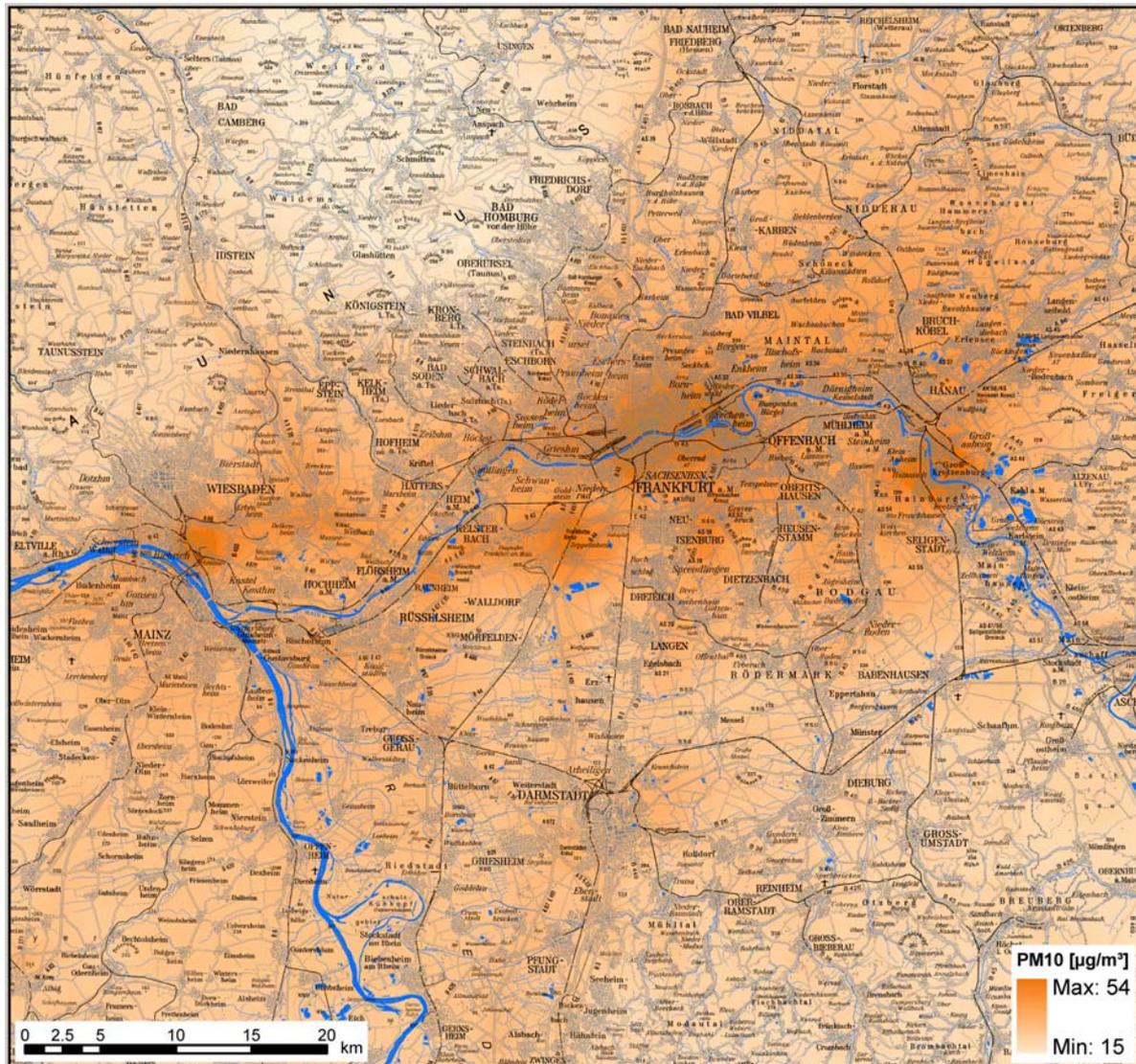


Abbildung 3 Jahresmittelwerte der PM10-Konzentrationen im Rhein-Main-Gebiet. REM-CALGRID-Berechnung.

4.2 Straßenschluchtrechnungen

Die Ergebnisse der NO₂ bzw. PM10-Immissionsberechnungen für die 15 Straßenräume zeigen Tabelle 2 und Tabelle 3. Im ersten Spaltenblock sind die Immissionen aufgeteilt nach RCG-Vorbelastung, CPB-Zusatzbelastung und Gesamtbelastung in µg/m³ angegeben. Im zweiten Spaltenblock sind die Anteile der verschiedenen Quellgruppen Kraftfahrzeuge, Hausbrand/Kleinverbraucher und Kraftwerke/Industrie in Prozent angegeben.

Die aus Szenarienrechnungen abgeleiteten Anteile der verschiedenen Verursachergruppen an der Gesamtimmission beziehen sich nur auf die Emissionen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3). Bei den Konzentrationsanteilen in den Straßenräumen ist der Beitrag des Ferntransports aus dem großräumigen Modellgebiet in das eigentliche Untersuchungsgebiet nicht enthalten, daher ergibt die Summe der Anteile in Prozent nicht 100. Weiterhin gilt zu

berücksichtigen, dass die Beziehungen zwischen den Vorläuferemissionen und den über eine komplexe Kette chemischer Reaktionen entstehenden Folgeprodukten (NO₂, O₃ und sekundäre Aerosole als Bestandteile von PM₁₀) nicht linear sind. Eine Änderung der Zusammensetzung der Emissionen führt also auch zu einer Änderung der chemischen Abläufe und damit zu einer Änderung der Konzentrationsbeiträge. Aus diesem Grunde sollten die berechneten Beiträge der verschiedenen Emissionsgruppen zur Gesamtkonzentration auch nur als größenordnungsmäßige Abschätzung verstanden werden.

Tabelle 2 NO₂-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 15 Straßenräumen und die Anteile verschiedener Quellgruppen. Näheres siehe Text.

| NO ₂ | Vorbelastung (RCG) | Zusatzbelastung (CPB) | Gesamtbelastung | Anteil Kraftfahrzeuge an Gesamtbelastung | Anteil Hausbrand + Kleinverbraucher an Gesamtbelastung | Anteil Kraftwerke + Industrie an Gesamtbelastung |
|---------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Straßenraum | µg/m ³ | µg/m ³ | µg/m ³ | % | % | % |
| FF-Bleichstrasse | 45.6 | 23.0 | 68.6 | 61 | 5 | 11 |
| FF-Bockenheimer-Str. | 45.6 | 14.6 | 60.2 | 55 | 6 | 11 |
| FF-Eschersheimer-Landstr. | 46.8 | 26.1 | 72.9 | 61 | 5 | 11 |
| FF-Friedberger-Landstr. | 46.0 | 22.2 | 68.2 | 61 | 5 | 11 |
| FF-Hochstr. | 47.0 | 25.4 | 72.3 | 61 | 5 | 11 |
| FF-Hoehenstr. | 46.0 | 34.3 | 80.3 | 67 | 5 | 9 |
| FF-Mainzer-Landstr. | 48.7 | 32.3 | 80.9 | 64 | 4 | 10 |
| FF-Taunusstr. | 48.7 | 20.8 | 69.5 | 58 | 5 | 12 |
| OF-Waldstr. | 40.0 | 15.4 | 55.4 | 60 | 6 | 12 |
| DA-Huegelstr. | 33.9 | 24.7 | 58.6 | 67 | 4 | 10 |
| DA-Bleichstr. | 33.9 | 18.6 | 52.4 | 64 | 4 | 11 |
| DA-Rhoenring | 33.7 | 13.9 | 47.6 | 59 | 5 | 13 |
| WI-Rheinstr. | 37.2 | 22.3 | 59.5 | 57 | 5 | 12 |
| WI-Kaiser-Friedrich-Ring | 41.4 | 25.3 | 66.6 | 58 | 4 | 13 |
| WI-Schiersteiner-Str. | 39.2 | 26.2 | 65.4 | 59 | 4 | 13 |

Bei NO₂ beträgt der aus den Berechnungen abgeschätzte mittlere Anteil des Kraftfahrzeugverkehrs an den Straßenraum-Immissionen 61%, Hausbrand und Kleinverbraucher tragen im Durchschnitt 5%, Kraftwerke und Industrie 11% bei.

Der Hauptverursacher der NO₂-Immissionen ist also der Kraftfahrzeugverkehr.

Tabelle 3 PM10-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 15 Straßenräumen und die Anteile verschiedener Quellgruppen. Näheres siehe Text.

| PM10 | Vorbelastung (RCG) | Zusatzbelastung (CPB) | Gesamtbelastung | Anteil Kraftfahrzeuge an Gesamtbelastung | Anteil Hausbrand + Kleinverbraucher an Gesamtbelastung | Anteil Kraftwerke + Industrie an Gesamtbelastung |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Straßenraum | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | % | % | % |
| FF-Bleichstrasse | 23.2 | 11.1 | 34.3 | 38 | 4 | 11 |
| FF-Bockenheimer-Str. | 22.5 | 6.6 | 29.1 | 30 | 4 | 11 |
| FF-Eschersheimer-Landstr. | 23.4 | 13.4 | 36.8 | 42 | 4 | 11 |
| FF-Friedberger-Landstr. | 32.4 | 11.3 | 43.6 | 34 | 3 | 8 |
| FF-Hochstr. | 23.9 | 12.4 | 36.3 | 40 | 4 | 11 |
| FF-Hoehenstr. | 32.4 | 23.0 | 55.3 | 48 | 3 | 7 |
| FF-Mainzer-Landstr. | 24.2 | 19.0 | 43.2 | 49 | 3 | 9 |
| FF-Taunusstr. | 24.2 | 9.8 | 34.0 | 35 | 4 | 12 |
| OF-Waldstr. | 23.6 | 6.3 | 29.9 | 28 | 4 | 11 |
| DA-Huegelstr. | 21.2 | 13.1 | 34.3 | 46 | 3 | 8 |
| DA-Bleichstr. | 21.2 | 8.8 | 30.0 | 38 | 4 | 9 |
| DA-Rhoenring | 20.7 | 5.5 | 26.3 | 29 | 3 | 10 |
| WI-Rheinstr. | 21.4 | 10.9 | 32.3 | 40 | 3 | 10 |
| WI-Kaiser-Friedrich-Ring | 22.7 | 14.3 | 36.9 | 45 | 3 | 10 |
| WI-Schiersteiner-Str. | 21.9 | 13.8 | 35.7 | 45 | 3 | 10 |

Bei PM10 beträgt der aus den Rechnungen abgeschätzte mittlere Anteil der Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs im Untersuchungsgebiet an den 15 Straßenraum-Immissionen 39%, Hausbrand und Kleinverbraucher tragen im Durchschnitt 4%, Kraftwerke und Industrie 10% bei.

Bei den PM10-Immissionen ist ein Hauptverursacher nicht so eindeutig zu identifizieren wie beim NO₂, da im Gegensatz zum NO₂ ein großer Teil der PM10-Vorbelastung aus Quellen außerhalb des Untersuchungsgebiets stammt. Von den Verursachern im Untersuchungsgebiet liefert aber auch der Kfz-Verkehr den Hauptbeitrag zu der Gesamtbelastung in den betrachteten Straßenräumen. Wegen des höheren Anteils des Ferntransports und des höheren Anteils der industriellen Verursachergruppen an der Vorbelastung ist der Kfz-Beitrag aus dem Untersuchungsgebiet zu der PM10-Gesamtbelastung geringer als derjenige zu der NO₂-Gesamtbelastung.

4.3 Vergleich mit Messungen

In zwei der Straßen befinden sich Messstellen des HLUg:

- Frankfurt, Friedberger Landstraße (NO₂) und
- Darmstadt, Hügelstraße (NO₂ und PM10).

In diesen Straßen kann man die Messungen zum Vergleich mit den RCG/CPB-Berechnungen heranziehen.

Die beobachteten Jahresmittelwerte (siehe Tabelle 4) werden von den Modellrechnungen um circa 15% unterschätzt. Damit liegen die Modellergebnisse innerhalb

der von den EU-Richtlinien verlangten Genauigkeit von 30% für die NO₂-Jahresmittelwerte und 50% für die PM₁₀-Jahresmittelwerte. Die gemessenen Konzentrationsverteilungen und die Anzahl der Grenzwertüberschreitungen werden richtig wiedergegeben. Die Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Rechnung kann damit als gut bezeichnet werden. Dies gilt insbesondere unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in die Modellierung an keiner Stelle eine Immissionsmessung – etwa als Vorbelastungsmessung - eingeht, sondern die Berechnung von der Emission über Transmission bis zu der Immission durchgehend auf Modellen beruht.

Tabelle 4 Jahresmittelwerte der Modellrechnungen und der Messungen.

| Nr | Straßenname | NO ₂ | PM ₁₀ | NO ₂ | PM ₁₀ |
|----|---------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | | Rechnung | | Messung | |
| 4 | FF-Friedberger-Landstraße | 63.08 | - | 73.19 | - |
| 10 | DA-Hügelstraße | 54.17 | 33.61 | 64.06 | 36.96 |

4.4 Verletzung der Grenzwerte der 22. BImSchV

Die Überschreitung der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM₁₀ der Modellrechnungen sind in Tabelle 5 dargestellt.

Der NO₂-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in allen Straßen von den Berechnungen überschritten.

Der PM₁₀-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in drei Straßen in Frankfurt von den Berechnungen überschritten: Friedberger-Landstraße, Höhenstraße und Mainzer-Landstraße.

Der Stundenmittelwert-Grenzwert für NO₂ von 200 µg/m³ wird nur in der Frankfurter Höhenstraße mehr als die erlaubten 18mal überschritten.

Der Tagesmittelwert-Grenzwert für PM₁₀ von 50 µg/m³ wird 10 der 15 Straßen mehr als die erlaubten 35mal überschritten.

Die Grenzwertüberschreitungen sind in Tabelle 5 farbig (■) hervorgehoben.

Tabelle 5 Überschreitung der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM10 in den Modellrechnungen.

| Nr | Straßenname | Grenzwerte | | | |
|----|-----------------------------|---------------------|---------|---------------------|---------|
| | | Mittelwert | | Überschreitungen | |
| | | NO ₂ >40 | PM10>40 | NO ₂ >18 | PM10>35 |
| 1 | FF-Bleichstraße | ja | nein | 0 | 37 |
| 2 | FF-Bockenheimer-Straße | ja | nein | 0 | 16 |
| 3 | FF-Eschersheimer-Landstraße | ja | nein | 3 | 58 |
| 4 | FF-Friedberger-Landstraße | ja | ja | 0 | 94 |
| 5 | FF-Hochstraße | ja | nein | 0 | 54 |
| 6 | FF-Höhenstraße | ja | ja | 21 | 204 |
| 7 | FF-Mainzer-Landstraße | ja | ja | 10 | 108 |
| 8 | FF-Taunusstraße | ja | nein | 1 | 41 |
| 9 | OF-Waldstraße | ja | nein | 0 | 19 |
| 10 | DA-Hügelstraße | ja | nein | 0 | 45 |
| 11 | DA-Bleichstraße | ja | nein | 0 | 17 |
| 12 | DA-Rhönring | ja | nein | 0 | 7 |
| 13 | WI-Rheinstraße | ja | nein | 0 | 30 |
| 14 | WI-Kaiser-Friedrich-Ring | ja | nein | 0 | 54 |
| 15 | WI-Schiersteiner-Straße | ja | nein | 2 | 43 |

5 Literatur

EU (1996). Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27.9.1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 296/55 vom 21.11. 1996

IMMIS^{luft}, 2004: Handbuch zu IMMIS^{luft}, IVU Umwelt GmbH, siehe www.IVU-Umwelt.de

INFRAS, 2004: HBEFA Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 2.1. Im Auftrag der UBA Berlin / BUWAL Bern / UBA Wien; Februar 2004

IVU, 2004: Ausbreitungsrechnungen mit dem Canyon-Plume-Box-Modell als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main. Bericht von IVU Umwelt GmbH für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie.

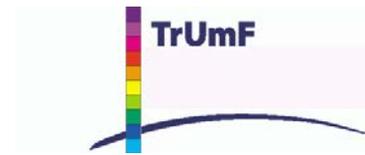
Ostmann, C., Stern, R., Wiegand, G. (1996). Canyon Plume Box Modell, Version 3, Release 8, Handbuch. IVU Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung mbH. Abschlussbericht zum FE-Vorhaben 104 02 811 des Umweltbundesamts, Berlin.

Stern, R. (2003). Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“.

Stern, R., Kerschbaumer, A., Fath, J., (2003). Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID auf die Region Berlin-Brandenburg. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 29943 246 auf dem Gebiet des Umweltschutzes „Entwicklung eines Modellsystems für das Zusammenspiel von Messung und Rechnung für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität“.

Stern, R., Kerschbaumer, A., Reimer, E. (2004). Ausbreitungsrechnungen mit dem chemischen Transportmodell REM-CALGRID als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main. Bericht der Arbeitsgruppe TRUMF am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie im Unterauftrag der IVU Umwelt GmbH.

Yamartino, R. J., Wiegand, G. (1986): Development and Evaluation of Simple Models for the Flow, Turbulence and Pollutant Concentration Fields within an Urban Street Canyon Atmospheric Environment Vol.20, No.11, pp 2137-2156; 1986



Abschlussbericht

Ausbreitungsrechnungen mit dem chemischen Transportmodell REM-CALGRID als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main

für

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Postfach 3209
Rheingaustraße 186
D-65022 Wiesbaden

Im Unterauftrag von

IVU Umwelt GmbH
Burgweg 10 · D-79350 Sexau

Rainer Stern
Andreas Kerschbaumer
Eberhard Reimer

Arbeitsgruppe TRUMF
Troposphärische Umweltforschung
Institut für Meteorologie
Freie Universität Berlin
Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10

Mai 2004

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Einführung | 1 |
| 2 Untersuchungsgebiet und Datenaufbereitung für REM-CALGRID | 3 |
| 2.1 <i>Großräumiges Modellgebiet</i> | 3 |
| 2.2 <i>Kleinräumiges Modellgebiet</i> | 3 |
| 2.3 <i>Topographie und Landnutzungsdatenbasis</i> | 5 |
| 2.4 <i>Meteorologische Daten</i> | 10 |
| 2.4.1 <i>Dreidimensionale großräumige meteorologische Analyse</i> | 10 |
| 2.4.2 <i>Adaptation an die feine Auflösung</i> | 11 |
| 2.4.3 <i>Grenzschichtparameter</i> | 12 |
| 2.5 <i>Emissionsdaten</i> | 12 |
| 3 RCG-Ergebnisse für den Basislauf 2000 | 17 |
| 3.1 <i>Überblick</i> | 17 |
| 3.2 <i>Flächendarstellungen</i> | 17 |
| 3.3 <i>Vergleich mit Messungen</i> | 19 |
| 3.4 <i>Ergebnisse der RCG-Berechnung mit 1 km Auflösung</i> | 29 |
| 4 Die Emissionsszenarien | 33 |
| 4.1 <i>Keine Emissionen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main</i> | 33 |
| 4.2 <i>Szenario Hausbrand und Kleinverbraucher Null</i> | 44 |
| 4.3 <i>Szenario Verkehr Null</i> | 47 |
| 4.4 <i>Szenario Industrie Null</i> | 50 |
| 5 Zusammenfassung: Vorbelastung für 15 Straßen | 53 |
| 6 Literatur | 58 |
| 7 Abbildungsverzeichnis | 60 |
| 8 Tabellenverzeichnis | 63 |
| 9 Anhang : Kurzbeschreibung des REM-CALGRID-Modells | 64 |

1 Einführung

Dieser Bericht beschreibt die Anwendung des chemischen Transportmodells REM-CALGRID auf die Region Rhein-Main. Das Modell wurde eingesetzt, um für eine Reihe von Straßen die zur Anwendung eines Straßenschluchtmodells notwendigen Vorbelastungskonzentrationen von NO, NO₂, PM10 und Ozon zu liefern.

Im Ballungsraum Rhein-Main wurde im Jahr 2002 an drei verkehrsbezogenen Messstationen der Immissionswert für den Jahresmittelwert NO₂ und an einer dieser Stationen der Immissionswert für den Tagesmittelwert PM10 überschritten. Nach Artikel 8 der EU-Rahmenrichtlinie 96/62/EG (EU-RRL) zur Luftqualität (EU, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 1996) müssen für Gebiete, in denen Grenzwerte überschritten werden, Luftreinhaltepläne erarbeitet werden, aufgrund derer die betreffenden Grenzwerte zukünftig eingehalten werden können. In der EU-RRL sind dazu neben Messungen erstmalig auch Modellrechnungen zur Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität vorgesehen. Im Rahmen des vom Umweltbundesamt an die FU Berlin vergebenen FE-Vorhabens 29841252 „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“ und des FE-Vorhabens 29943246 „Entwicklung eines Modellsystems für das Zusammenspiel von Messung und Rechnung für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität“ wurde ein Modellinstrumentarium entwickelt, das den in der EU-RRL definierten Anforderungen an die Ausbreitungsrechnung genügt. Kern des Systems ist das chemische Transportmodell REM-CALGRID (RCG), das für die vorliegende Studie eingesetzt wurde.

Nach der EU-Rahmenrichtlinie müssen Ausbreitungsrechnungen zur flächendeckenden Bestimmung der Luftqualität die folgenden vier Raumskalen abdecken:

- europaweit,
- großräumig (national)
- regional (Ballungsraum)
- lokal/städtisch (Stadtquartier, Straßenschlucht).

Das im Auftrag des Umweltbundesamt entwickelte Modellsystem ermöglicht es, die in den EU-Richtlinien definierten Luftqualitätswerte zu bestimmen. Betrachtet werden die Schadstoffe SO₂, NO_x, Benzol, Ozon, PM10 und CO. Gerechnet wird in stündlicher Auflösung für das ganze Jahr.

Das Modellsystem enthält für die hiesige Fragestellung folgende Ausbreitungsmodelle:

- Das dreidimensionale photochemische Transportmodell REM/CALGRID (RCG). Die Entwicklung dieses Modells und die Anwendung in der großräumigen Skala sind in Stern (2003a) beschrieben. REM/CALGRID wird zur Bestimmung der Luftqualität in der europaweiten und der nationalen Raumskala in einer Auflösung von ca. 30x30 km² und in der urbanen Raumskala (Ballungsgebiet) bis zu einer Auflösung von ca. 1x1 km² verwendet. Die aus dem großräumigen Modell berechnete Hintergrundbelastung wird als Randbedingung für die urbane Skala verwendet („one-way-nesting“). Eine Anwendung auf das Ballungsgebiet Berlin ist in Stern et al. (2003) zu finden.
- Das Canyon-Plume-Box-Modell (CPB). Das CPB-Modell (Ostmann et al., 1996; Yamartino und Wiegand, 1986) ist ein 2-dimensionales analytisch-empirisches Modell, mit dem die Luftschadstoffimmissionen in einer Straßenschlucht berechnet werden

können. Die Vorbelastung wird dazu von den urbanen Ausbreitungsrechnungen bereit gestellt („one-way-nesting“).

Der vorliegende Bericht beschreibt die Anwendung des RCG-Modells auf die Region Rhein-Main. Die für eine Reihe von Straßen in den Städten Frankfurt, Wiesbaden und Darmstadt berechneten Vorbelastungskonzentrationen wurden in Form von Zeitreihen an das Canyon-Plume-Box-Modell übergeben. Die Anwendung des CPB-Modells zur Ermittlung der Zusatzbelastung im eigentlichen Straßenraum wurde dann von der IVU-Umwelt GmbH durchgeführt.

Die RCG-Anwendung erfolgte in 2 Skalen:

- der europäischen Skala und
- der regionalen/urbanen Skala.

Die europaweite Rechnung liefert die Hintergrundkonzentrationen für die regionale/urbane Skala. Die regional/urbane Rechnung liefert die Vorbelastungskonzentrationen für die Straßenschluchtrechnungen. Die Vorbelastung beruht damit komplett auf Modellrechnungen. Dies ist besonders wichtig für die Ursachenanalyse, da die nicht-linearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission unter Berücksichtigung aller relevanten physikalischen und chemischen Prozesse berechnet werden. Insbesondere für Ozon und PM10 ist es nicht möglich, das Minderungspotential einer Region ohne solch eine rechnerische Bestimmung des großräumigen Hintergrunds sowie der regionalen Vorbelastung zu quantifizieren.

Neben der Bereitstellung der Vorbelastungskonzentrationen für das Jahr 2000 wurden zur Ursachenanalyse eine Reihe grundlegender Emissionsszenarien auf ihre immissionsseitigen Auswirkungen im Rhein-Main-Gebiet untersucht. Im urbanen Untersuchungsgebiet Rhein-Main wurden dazu auf Null gesetzt:

- Alle Emissionen.
- Alle Emissionen der Verursachergruppe Hausbrand und Kleinverbraucher
- Alle Emissionen der Verursachergruppe Straßenverkehr
- Alle Emissionen der Verursachergruppe Industrie und Kraftwerke

Aus der oben beschriebenen Vorgehensweise ergaben sich für die Anwendung des RCG-Modells folgende Arbeiten:

1. Durchführung des Basislaufs in der europäischen Skala und Bereitstellung der Randbedingungen für die regional/urbane Skala.
2. Erstellung der meteorologischen, topographischen und physikalischen Eingangsdaten für die regional/urbane Skala.
3. Durchführung des Basislaufs in der regional/urbanen Skala mit Hintergrundkonzentrationen abgeleitet aus den Ergebnissen der großräumigen Modellanwendung.
4. Überprüfung der Ergebnisse durch den Vergleich mit vorliegenden Messungen aus dem hessischen Raum.
5. Erstellung der Schnittstelle zu IMMIS^{CPB} und Übergabe der Vorbelastungskonzentrationen für die Straßenschluchtrechnungen.
6. Durchführung und Auswertung der Emissionsszenarien
7. Berichterstattung zur Anwendung des RCG-Modells.

Eine Kurzbeschreibung des REM-CALGRID-Modells ist im Anhang zu finden. Im folgenden Kapitel 2 werden die Untersuchungsgebiete und die verwendeten Eingangsdaten für die Mo-

dellrechnung beschrieben. Kapitel 3 enthält eine Diskussion der Ergebnisse des Basislaufs für die Region Rhein-Main. In Kapitel 4 folgen die Auswertungen der Emissionsszenarien.

2 Untersuchungsgebiet und Datenaufbereitung für REM-CALGRID

2.1 Großräumiges Modellgebiet

Das RCG-Modell wurde für die europaweite Rechnung auf das in der Abbildung 1 gezeigte Modellgebiet angewendet. Die horizontale Auflösung beträgt in einem geographischen Koordinatensystem 0.5° Länge und 0.25° Breite. In der Vertikalen wird die Atmosphäre mit 5 Schichten aufgelöst. Als Emissionsdaten wurden die von der TNO, Niederlande, für Europa erstellten Daten verwendet (Stern, 2003b). Die vom Modell benötigten meteorologischen Daten des Modells wurden aus meteorologischen Beobachtungen mit dem am Institut für Meteorologie betriebenen Programmsystem TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research) erstellt (siehe auch Kap. 2.4).

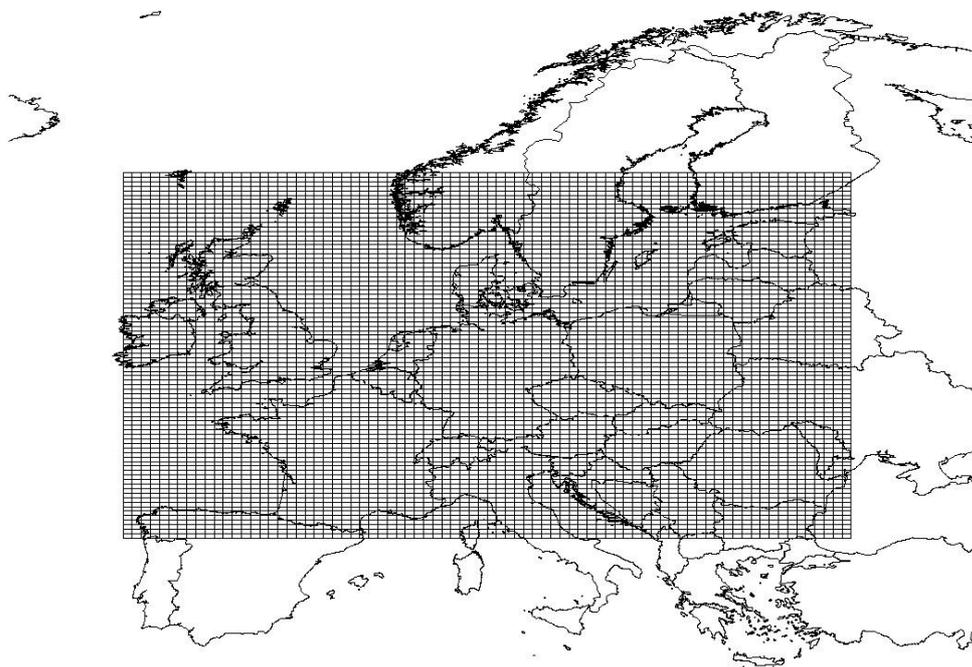


Abbildung 1: Großräumiges REM/CALGRID-Modellgebiet mit einer Maschenweite von 0.25° Breite und 0.5° Länge.

2.2 Kleinräumiges Modellgebiet

Die Verwendung von Modellrechnungen im Rahmen von Maßnahmenplanungen oder Verursacheranalysen in der urbanen Skala erfordert eine sehr hohe räumliche Auflösung. Das Untersuchungsgebiet wurde daher mit einem horizontalen Gitternetz mit der Maschenweite von circa 1 km aufgelöst. Das ausgewählte Untersuchungsgebiet zeigt die Abbildung 2.

Da die urbane Anwendung des Modells REM/CALGRID genestet in der europaweiten Anwendung erfolgt, wurde das urbane Untersuchungsgebiet in das großräumige Horizontalgitter eingepasst, um eine direkte Übergabe der Randbedingungen zu ermöglichen. Dies ist nur in einem geographischen Koordinatensystem möglich, da die großräumigen Datenbasen und damit alle großräumigen Rechnungen in solch einem System vorliegen (Stern, 2003a). Das in Abbildung 2 definierte Gebiet von 8° Ost bis $9,5^{\circ}$ Ost, bzw. $49,5^{\circ}$ Nord bis $50,5^{\circ}$ Nord erfüllt diese Bedingung.

Das Gebiet umfasst das gesamte Rhein-Main-Becken. Frankfurt am Main liegt zentral im Modellgebiet. Im Süden reicht das Gebiet bis zur Grenze Hessens mit Baden-Württemberg. Der nördliche Modellrand liegt südlich der Städte Gießen und Wetzlar. Der westliche Rand liegt am Westrand Hessens in etwa auf der Länge der Städte Limburg und Rüdeshcim. Im Osten wird noch ein Teil Unterfrankens miteinbezogen.

Zur Aufbereitung der Eingangsdaten wurde eine Gitterweite von $0,015625^{\circ}$ Länge und $0,0078125^{\circ}$ Breite gewählt. Dies entspricht einem Nesting-Verhältnis von 1:32 (Verhältnis der großräumigen zur kleinräumigen Gitterauflösung). Die Anzahl der Gitterzellen beträgt im urbanen Untersuchungsgebiet 96 (entlang der Breitengrade) x 128 (entlang der Längengrade). Die Ost-West-Ausdehnung des Gebiets am Nordrand ist 106,035 km, am Südrand 108,264 km. In Nord-Süd-Richtung erhält man eine Ausdehnung von 111,134 km. Die Maschenweite beträgt in Ost-West-Richtung am Nordrand 1105,5 m, am Südrand 1127,7 m. In Nord-Süd-Richtung beträgt die Maschenweite 868,2 m. Die Fläche einer Gitterzelle liegt zwischen 0,96 und 0,98 km².

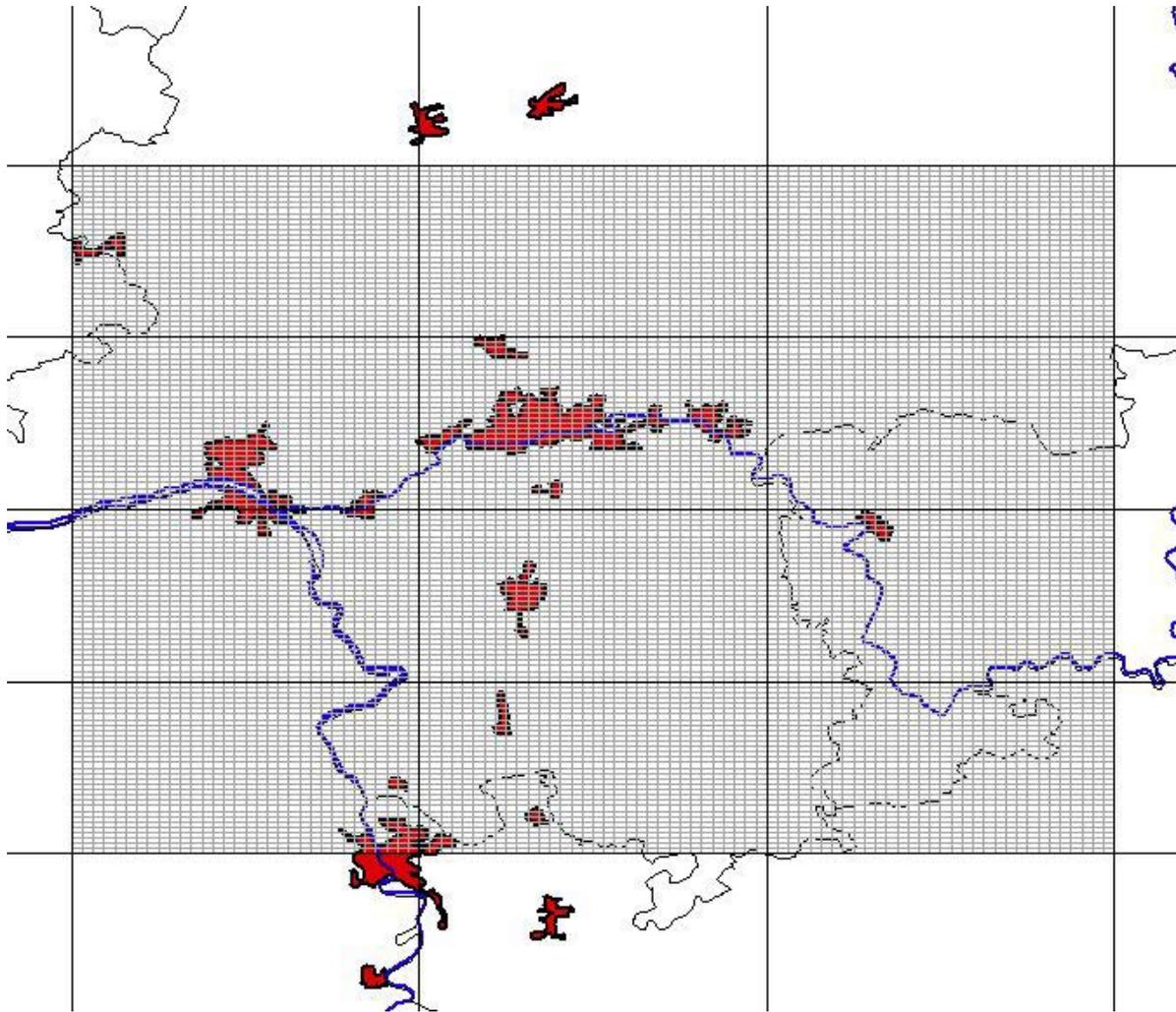


Abbildung 2: Untersuchungsgebiet Ballungsraum Rhein-Main. Die Grenzen in einem geographischen Koordinatensystem liegen bei: 8,0° Ost bis 9,5° Ost, 49,5° Nord bis 50,5° Nord. Maschenweite ist 0,015625° Länge und 0,0078125° Breite.

2.3 Topographie und Landnutzungsdatenbasis

Die geographischen Höhendaten wurden vom U.S. Geological Survey (www.usgs.org) übernommen. Das EROS DATA CENTER des USGS stellt im Internet eine Elevations-Datenbasis mit 30 Bogensekunden Auflösung zu Verfügung. Diese Daten können unter der Webadresse <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html> gefunden werden.

Mit Hilfe des GIS-Systems ARC-View wurde durch Interpolation in der Horizontalen für jede Rasterzelle des oben beschriebenen Untersuchungsgebiets ein repräsentativer Höhenwert berechnet (Abbildung 3).

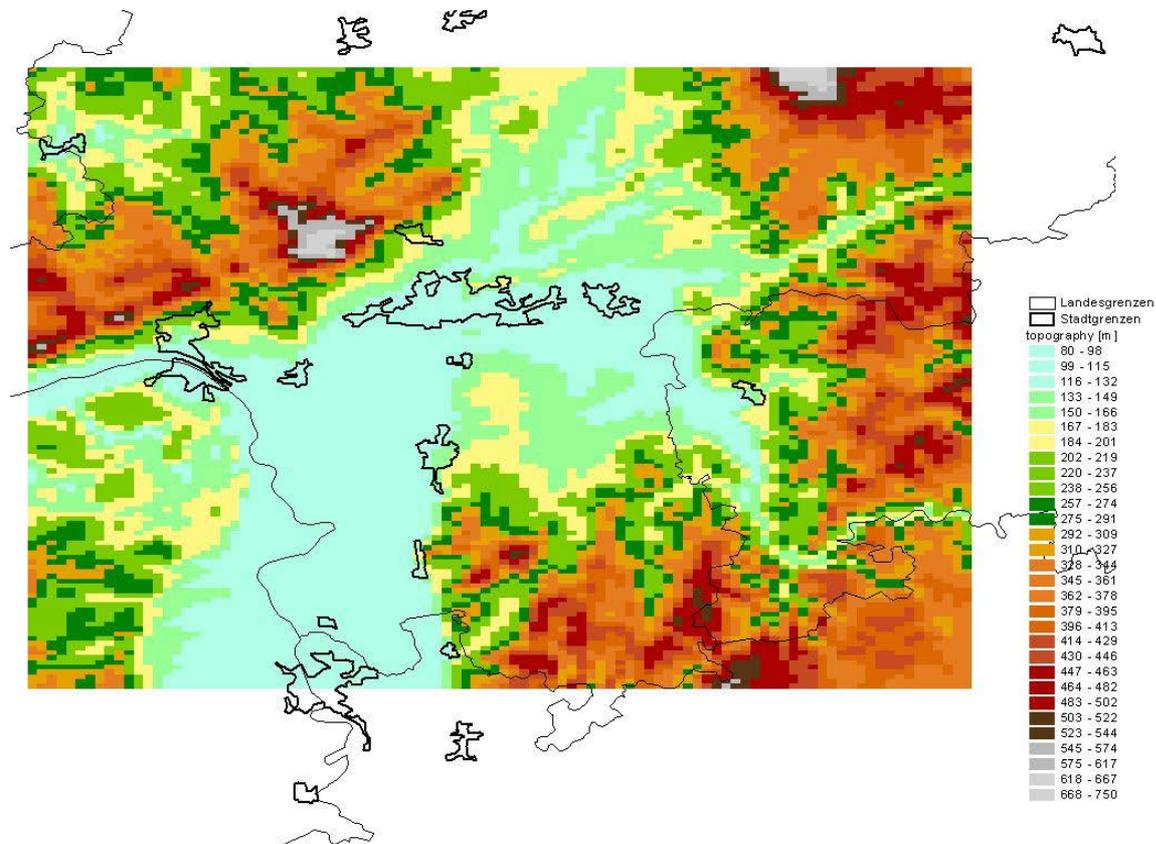


Abbildung 3: Topographie in den Rastern des Untersuchungsgebiets Rhein-Main

Die Landnutzungsdaten wurden aus der Datenbasis des Fraunhofer Instituts für Atmosphärische Umweltforschung (IFU) in Garmisch-Partenkirchen (Stand 1998) hergeleitet. Grundlage der IFU-Daten sind die Datensätze von

- CORINE3 (44 Klassen)
- PHARE3 (44 Klassen)
- IGBP (17 Klassen)

IFU erstellte daraus Versionen der allgemeinen Landnutzungsdaten für Europa und Deutschland. Die Auflösung der Landnutzungsdaten für Europa (LUE) beträgt in einem geographischen Koordinatensystem 1 Bogenminute \times 1 Bogenminute. Weiterentwickelt wurde der Landnutzungsdatensatz für Deutschland mit einer geometrischen Auflösung von 30 Bogensekunden \times 30 Bogensekunden mit den in der Tabelle 1 aufgeführten Landnutzungskategorien.

Das 30 Bogensekundenraster (1/120 Grad) von IFU wurde auf das oben beschriebene Rechenraster umgerechnet. Grundlage war dabei der proportionale Anteil der obigen 13 Kategorien im jeweiligen 30-Sekundenraster.

In Abbildung 4 bis Abbildung 7 sind die Verteilung einiger wichtiger Landnutzungskategorien im Untersuchungsgebiet Rhein-Main im oben beschriebenen Raster dargestellt.

| | | |
|----|-------------------|-------------------|
| 1 | Bebaute Fläche | Urban areas |
| 2 | Landwirtschaft | Agriculture |
| 3 | Gras | Grassland |
| 4 | Laubwald | Deciduous forest |
| 5 | Nadelwald | Coniferous forest |
| 6 | Mischwald | Mixed forest |
| 7 | Wasser | Water |
| 8 | Feuchtgebiete | Marsh or wetland |
| 9 | Sand, Fels | Sand, bare rocks |
| 10 | Tundra | Tundra |
| 11 | Eis | Permanent ice |
| 12 | Tropischer Wald | Tropical forest |
| 13 | Strauchvegetation | Woodland scrub |

Tabelle 1: Landnutzungskategorien für die Landnutzungsdatenbasis des RCG-Modells.

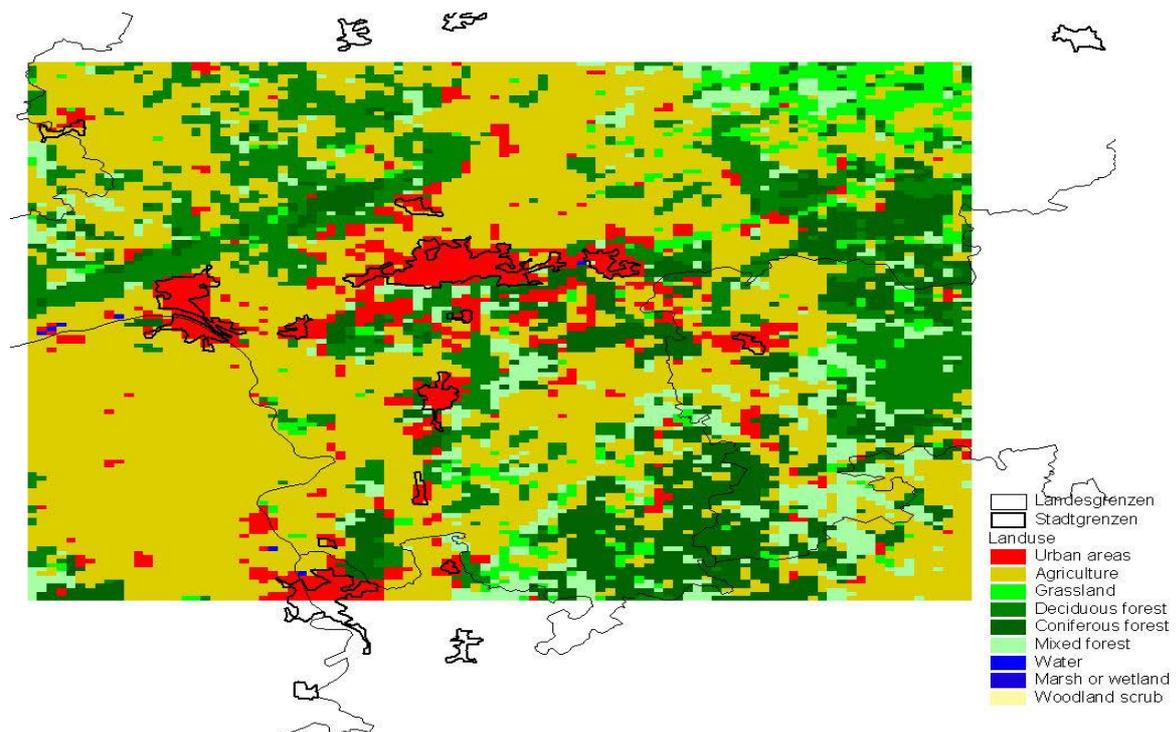


Abbildung 4: Vorherrschende Landnutzungsklassen in den Rastern des Untersuchungsgebiets Rhein-Main.

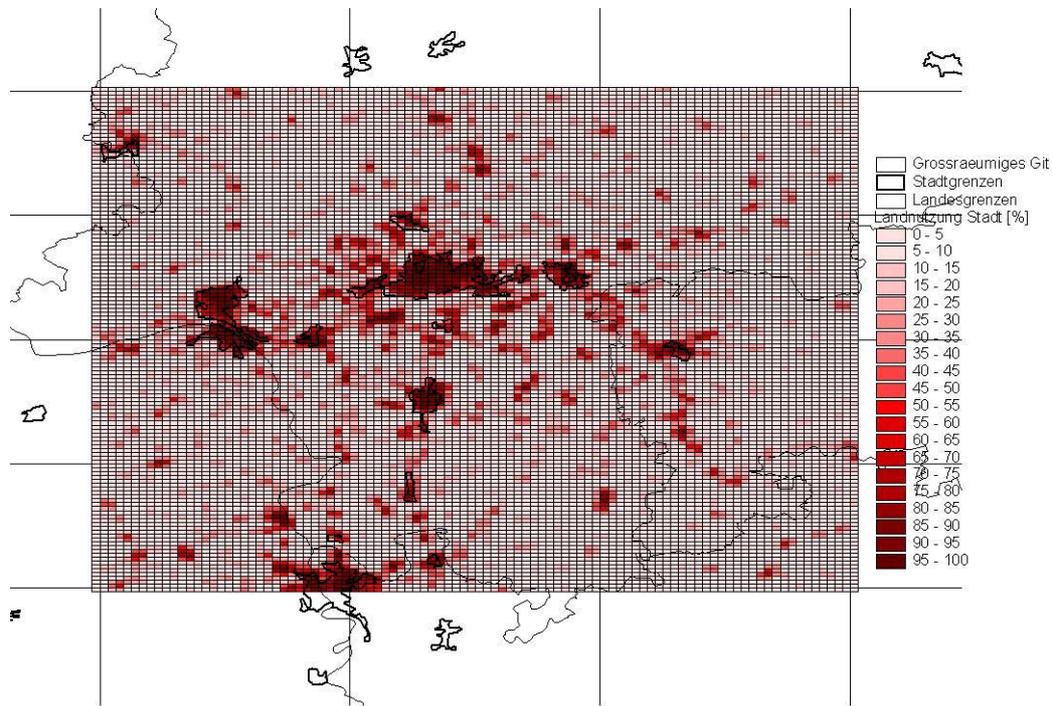


Abbildung 5: Anteile der Stadtgebiete (Urban areas) an der Landnutzung im Untersuchungsgebiet Rhein-Main.

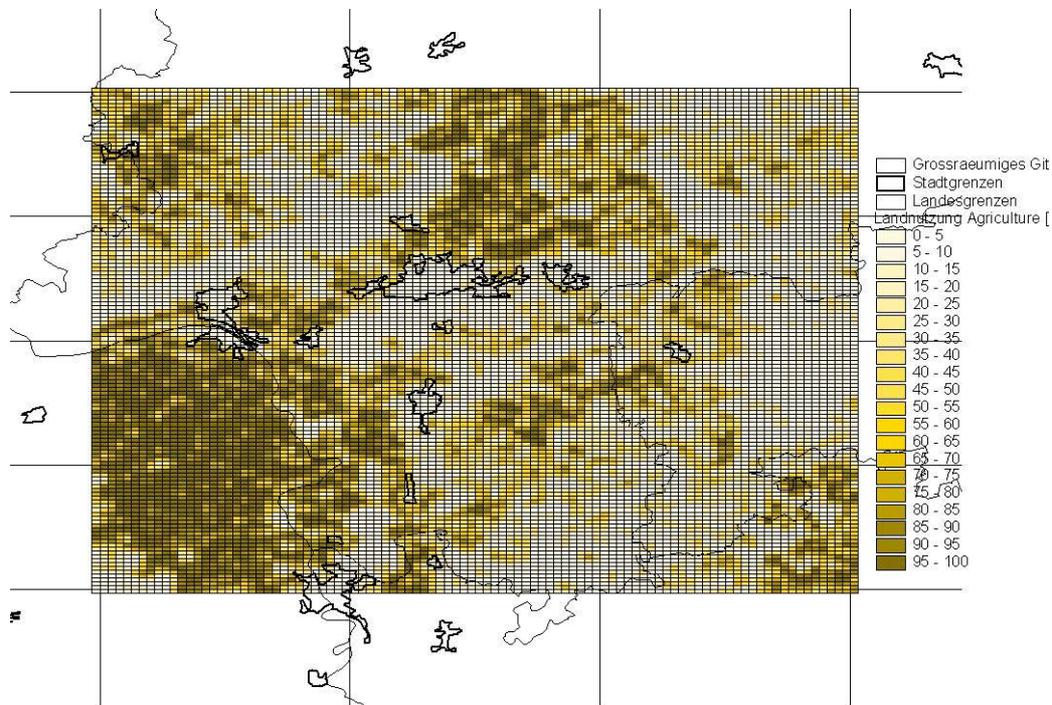


Abbildung 6: Anteile Ackerland (Agriculture) an der Landnutzung im Raster des Untersuchungsgebiets Rhein-Main.

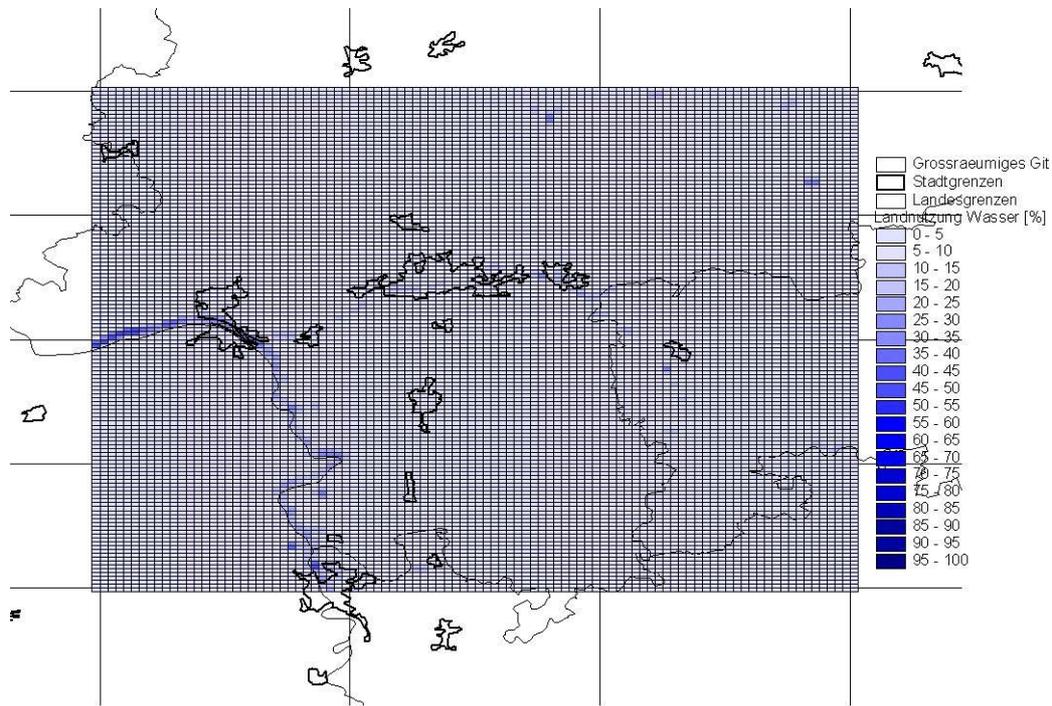


Abbildung 7: Anteile Wasser an der Landnutzung im Raster des Untersuchungsgebiets Rhein-Main.

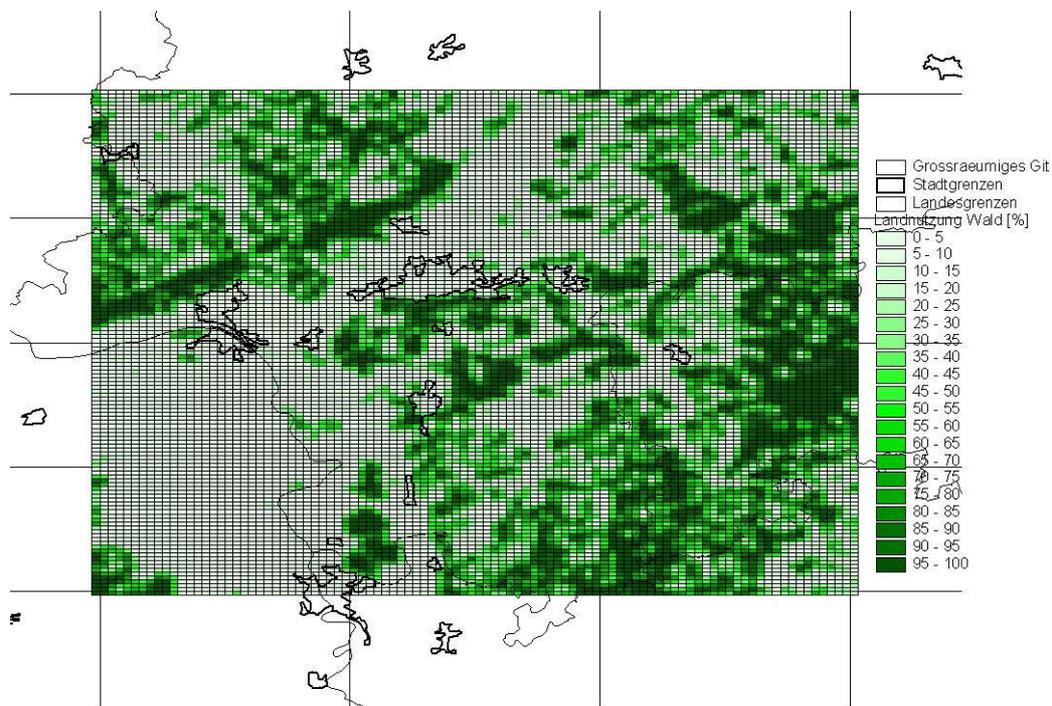


Abbildung 8: Anteile Wald an der Landnutzung im Raster des Untersuchungsgebiets Rhein-Main.

2.4 Meteorologische Daten

Die meteorologischen Eingangsdaten für das Untersuchungsgebiet Rhein-Main wurden aus an der FUB routinemäßig empfangenen Daten erstellt:

- Radiosonden- und Pilotmeldungen der synoptischen Aerologiestationen,
- stündliche und dreistündliche Beobachtungen von Teilen der synoptischen Beobachtungsnetze des deutschen Wetterdienstes.

2.4.1 Dreidimensionale großräumige meteorologische Analyse

Ausgangspunkt der Erstellung der meteorologischen Daten für das Untersuchungsgebiet Rhein-Main ist wie bei der Erstellung der meteorologischen Eingangsdaten für die großräumige Modellanwendung (Stern, 2003a) die großräumige Analyse des an der FU Berlin entwickelten diagnostischen Analysesystems TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Procedures for Environmental Research, Reimer und Scherer, 1992). Das angewandte Analyseverfahren besteht im Kern aus einer statistischen Interpolation (Optimum Interpolation, OI) beobachteter und abgeleiteter Feldgrößen auf isentropen Flächen am Gitterpunkt und einem physikalischen Abgleich der Felder mittels Variationsrechnung.

Die großräumigen Analysen der meteorologischen Felder über Mitteleuropa werden mit TRAMPER erstellt. Die Analysen werden auf isentropen Flächen mit einer Gitterweite von ca. 25 km in geographischen Koordinaten dargestellt. Der Abstand der isentropen Flächen ist der vertikalen Struktur der Atmosphäre angepasst mit hoher Auflösung in der Troposphäre und wachsendem Gitterabstand in der Stratosphäre. Die unterste Modellfläche liegt vollständig unterhalb der Topographie. In der unteren Troposphäre beträgt der Gitterabstand gleichmäßig $\Theta=2,5K$ und nimmt zur Modellobergrenze in der Stratosphäre schrittweise zu. So befinden sich ca. 15-18 Niveaus innerhalb der Troposphäre.

Durch die Wahl des isentropen Koordinatensystems und seiner recht hohen Auflösung werden insbesondere vertikal gering ausgedehnte thermische Strukturen besser wiedergegeben als in einer Standard-Druckflächenanalyse. Z.B. werden Inversionen oder allgemein die lokale Stabilität flächenhaft erfasst und ihre im Allgemeinen schräge Raumlage wiedergegeben. Druck und Temperatur unterhalb der Topographie werden mit Standardverfahren reduziert bzw. extrapoliert.

Die dreidimensional analysierten Variablen sind:

- Montgomery-Potential $M = c_p T + gH$,
- Druck (Temperatur) $p^k = (p/1000)^{2/7}$,
- lokale Stabilität $Mp^k / M\Theta$,
- Windvektorkomponenten,
- vertikale Windscherung,
- relative Feuchte,

die auf 24 isentropen Flächen und einer Bodenfläche (Sigma-Koordinate) dargestellt werden.

Zweidimensional werden dargestellt:

- Bewölkung und Wetter aus Bodenbeobachtungen,
- Potentielle Temperatur in 2m Höhe,
- Bodendrucktendenz (dreistündlich),

- Inversionshöhen aus Radiosonden.

Das Schema ist als skalenabhängiges Korrekturverfahren aufgebaut und verwendet großräumige Analysen oder Vorhersagefelder als Ausgangspunkt. Der Verfahrensablauf gliedert sich auf in folgende Schritte:

- Analysen der Boden- und Radiosondenbeobachtungen,
- zeitliche Interpolation auf stündliche Zwischentermine (falls erforderlich),
- Berechnung der Grenzschichtvariablen.

In die Analyse sind die räumliche und zeitliche Erfassung der Temperaturinversionen und ihrer Mächtigkeit sowie die horizontale Interpolation von Niederschlag, Bedeckungsgrad, Wolkentyp usw. eingebunden. Nach der dreidimensionalen Analyse werden die Grenzschichtvariablen und, unter Berücksichtigung der beobachteten Temperaturinversionen, der tägliche Verlauf der Mischungshöhe berechnet. Die Parameter am Boden sind auf einer dem Terrain folgenden Koordinatenfläche definiert und werden auf die Modelltopographie abgestimmt.

Das Ergebnis der Analyse sind dreidimensionale Felder von Windkomponenten, Temperatur und Feuchte, zweidimensionale Felder der meteorologischen Bodenbeobachtungen und der Grenzschichtparameter einschließlich Mischungshöhen sowie eine dreidimensionale Inversionsdarstellung im gesamten Modellgebiet.

Pro Tag werden zusammenhängend acht Analysen (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC) ausgeführt. Die Grundfelder für Zwischentermine, die keine ausreichende Basis an Beobachtungen aufweisen, werden durch Interpolation der nächstliegenden Termine erzeugt, wobei evtl. vorhandene Messungen örtlich berücksichtigt werden.

2.4.2 Adaptation an die feine Auflösung

Für die kleinräumigen Analysen (Gitterweite ca. 5 km und kleiner) wird ebenfalls das meteorologische Datensystem TRAMPER verwendet mit der Aufgabe, charakteristische orographische Effekte des untersuchten Gebietes in die 3-dimensionale Strömung vereinfacht zu integrieren, insbesondere Hangwinde und Barriereneffekte.

Dabei werden mit Hilfe von Strömungsadaptationsalgorithmen alle Windfelder im orographisch gegliederten Gelände angepasst. Diese verfeinerte Analyse bedarf allerdings weiterer meteorologischer Daten, um realistische, kleinräumige Phänomene in die numerischen Felder einbeziehen zu können. Gegenüber einem prognostisch-numerischen Modellierungsansatz hat die diagnostische Methode des TRAMPER-Systems den Vorteil, dass sie sich wesentlich auf vorhandene meteorologische Messungen stützt und daher eine unmittelbare Diskussion lokaler Wetterphänomene in Verbindung mit den Immissionsmessungen erlaubt.

Das diagnostische Strömungsmodul arbeitet in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird das mittlere Strömungsgrundfeld der Modellregion erzeugt, und an das thermodynamisch und topographisch bedingte Strömungsverhalten adaptiert. Folgende Optionen stehen zur Verfügung:

- Anpassung an kinematische Effekte durch die Topographie,
- Berechnung der Hangwinde,
- Berechnung von Effekten durch Strömungsbarrieren.

Im zweiten Schritt werden Stationsmessdaten mit räumlich begrenzter Wichtung in das Grundfeld integriert und die vertikale Geschwindigkeitskomponente physikalisch adaptiert:

- Interpolation lokaler Messungen,
- Anpassung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente.

Das endgültige Strömungsfeld wird mittels einem iterativem Verfahren zur Massenerhaltung gezwungen. Zwischenprodukte der verschiedenen Prozessphasen werden mittels Drei- oder Fünfpunktefilter geglättet. Die wesentlichen Parameter der Verfahren, wie Filtertyp und Anzahl der Glättungen und Iterationen werden über die Eingabe gesteuert.

Das Strömungsfeld der großräumigen Analyse wird als erste Schätzung („first guess“) benutzt. Ein vertikales Adaptationsverfahren erlaubt unter anderem die vertikale Interpolation von Bodenwinden mittels Potenzansatz oder beliebigen Profilen. Zur Minimierung der Divergenz und Erhaltung der Massenbilanz des Strömungsfeldes wird ein iteratives Verfahren eingesetzt. Dabei werden die horizontalen Komponenten unter Berücksichtigung der vertikalen Divergenz variiert. Eine ausführliche Beschreibung der Verfahren findet sich in Kerschbaumer und Reimer (2003).

2.4.3 Grenzschichtparameter

Zur Bestimmung der Parameter der planetarischen Grenzschicht werden vereinfachte eindimensionale Grenzschichtmodelle verwendet (Van Ulden und Holtslag, 1985, Hanna und Paine, 1989). Die Grenzschichtmodule verwenden unterschiedliche Parametrisierungen über Land und Wasser. Die Entwicklung der Mischungshöhen und die dazugehörigen Entrainment-Prozesse werden tagsüber bei positivem Wärmefluss aus einer prognostischen Gleichung berechnet. Die Höhe der Mischungsschicht wird tagsüber als das Maximum aus konvektiver und neutraler Mischungshöhe berechnet. Bei negativem Wärmefluss, in der Regel nachts, wird eine Gleichgewichtsformel angewandt.

Die turbulenten Grenzschichtparameter Monin-Obukhov-Länge, Schubspannungsgeschwindigkeit, konvektive Geschwindigkeit und sensibler Wärmefluss am Boden werden bei der Bestimmung der Mischungsschichthöhe mit errechnet.

2.5 Emissionsdaten

Die Emissionsdaten für das Untersuchungsgebiet Rhein-Main (Abbildung 2) wurden zum Teil von der IVU Umwelt GmbH bereitgestellt, zum Teil aus der für die großräumigen Berechnungen verwendeten Emissionsdatenbasis (Stern, 2003b) abgeleitet. Diese zweigleisige Vorgehensweise wurde notwendig, da die von IVU Umwelt gelieferten Daten nur einen Teil des Untersuchungsgebiets abdecken.

Emissionen der Stoffgruppen SO_2 , NO_x , CO , NH_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ und NMVOC müssen dem Modell in Form von Punkt- oder Flächenquellen vorgegeben werden. Für die Punktquellen wird aus den Kenndaten der Quelle und lokalen meteorologischen Größen eine effektive Schornsteinhöhe bestimmt. Die Übergabe der Emissionen erfolgt dann in die dazugehörige Modellschicht. Flächen- und Punktquellen werden im Modell als Volumenquellen behandelt, d.h. die Emissionen verteilen sich unmittelbar in der betreffenden Gitterzelle.

Das Modell verlangt jahresspezifische Emissionsdaten für alle benötigten Spezies getrennt nach Punkt- und Flächenquellen und unterteilt nach Verursachergruppen. Für die Verursachergruppen werden im Modell ausgehend von den Jahreswerten stündliche Emissionen abgeleitet. Die dazu verwendeten Monats-, Tages- und Stundenfaktoren müssen ebenfalls vorgegeben werden und berücksichtigen die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Emissionen der einzelnen Verursachergruppen. Bei den Kohlenwasserstoffen verlangt das Modell die Gesamtemissionen für die definierten Verursachergruppen und ein zu jeder Verursachergruppe gehöriges Kohlenwasserstoffprofil, das die prozentualen Anteile der spezifischen Kohlenwasserstoffe an

der Gesamtemission der Verursachergruppe angibt. Jeder Kohlenwasserstoff wird dann den entsprechenden Klassen des chemischen Mechanismus zugeordnet. Diese Vorgehensweise vermeidet die Verwendung pauschaler, mechanismusabhängiger Zuordnungsfaktoren und gewährleistet, dass das emittierte Kohlenwasserstoffgemisch exakt entsprechend der vom chemischen Mechanismus verlangten Klassifizierung behandelt wird. Biogene VOC- und NO_x-Emissionen werden stündlich modellintern mit Hilfe von Landnutzungsdaten und entsprechenden Emissionsfaktoren berechnet.

IVU-Umwelt lieferte für folgende Verursacher die Emissionen als Flächenquellen in einer Auflösung von 1x1 km²:

- Verkehr Hauptstraßennetz
- Verkehr Nebenstraßennetz
- Tankemissionen des Verkehrs
- Haushalte
- Kleinverbraucher
- Bodenverkehr und stationäre Quellen auf dem Flughafengelände
- Flugverkehrs in der Luft bis 300 m Höhe
- Biogene Emissionen

Die industriellen Emissionen wurden als Punktquellen geliefert.

In der folgenden Tabelle 2 sind die gelieferten Schadstoffmengen für alle Verursacher zusammengestellt. Die Abbildung 9 zeigt für die NO_x-Emissionen die Verteilung im Untersuchungsgebiet. Für die weißen Flächen in der Abbildung stehen keine fein auflösenden Emissionsinformationen zur Verfügung. Diese Flächen wurden daher für alle Schadstoffe mit der Emissionsinformation aus der großräumigen Datenbasis (Stern, 2003b) aufgefüllt. Dies bedeutet, dass die flächenhaften Emissionen in den weißen Gebieten nur eine Auflösung von circa 30 km besitzen. Abbildung 10 bis Abbildung 13 zeigen die räumliche Verteilung der ergänzten NO_x-NMHC, CO- und PM10-Emissionen. Die von IVU für PM10 gelieferten Emissionsmengen beziehen sich ausschließlich auf die von Dieselfahrzeugen über den Auspuff emittierten Partikel. Angaben zum Beitrag des Reifen- und Bremsabriebs sowie der Staubaufwirbelung zu den Kfz-bedingten PM10-Emissionen liegen nicht vor. Nach den Untersuchungen von Düring et al. (2002) erklären die PM10-Auspuffemissionen aber nur circa 50% der gemessenen Verkehrs-Zusatzbelastung. Zur Berücksichtigung der Nicht-Auspuff-Emissionen wurden die PM10-Emissionen für den Verkehr daher verdoppelt.

| Tonnen/Jahr (Stand 2000) | NOX | NMHC | SO2 | CO | PM10 | NH3 |
|-------------------------------------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Verkehr Hauptnetz | 30979.5 | 8273.9 | 938.1 | 94143.9 | 2543.3 | 407.4 |
| Verkehr Nebennetz | 926.4 | 2221.2 | 33.9 | 6395.1 | 60.9 | 23.9 |
| Tank | | 460.0 | | | | |
| Haushalte | 8059.9 | 2159.3 | 6218.3 | 28053.2 | 597.3 | |
| Kleinverbraucher | | 5792.5 | | | 84.8 | |
| Bodenverkehr und stationäre Quellen auf dem Flughafen | 961.5 | 910.3 | 103.5 | 3018.5 | 23.7 | |
| Flugverkehr bis 300 m Höhe | 1170.2 | 8.4 | 42.0 | 70.4 | 3.6 | |
| Biogene Emissionen | 2590.9 | | | | | 9827.3 |
| Industrielle Punktquellen | 10696.3 | 3258.5 | 3794.7 | 7815.7 | 1231.0 | 86.9 |

Tabelle 2: Von IVU-Umwelt gelieferte Emissionen für das RCG-Untersuchungsgebiet Rhein-Main (Abbildung 2). Die biogenen Emissionen von NO_x werden nicht benutzt, da die biogenen Emissionen in RCG direkt während des Modelllaufes aus der Landnutzung und aktuellen meteorologischen Informationen berechnet werden.

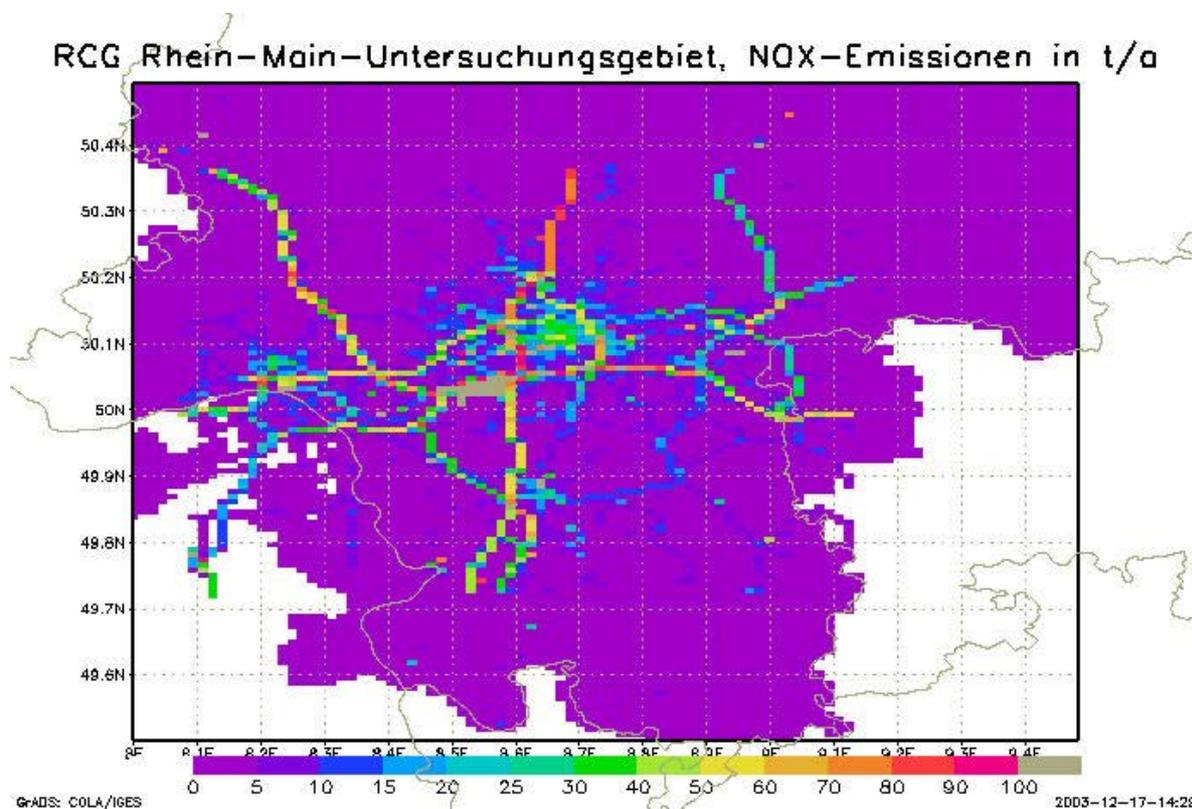


Abbildung 9: NO_x-Emissionen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main nach den Informationen der Tabelle 2. Auflösung 1x1 km². Für die weißen Flächen wurden keine Emissionen geliefert.

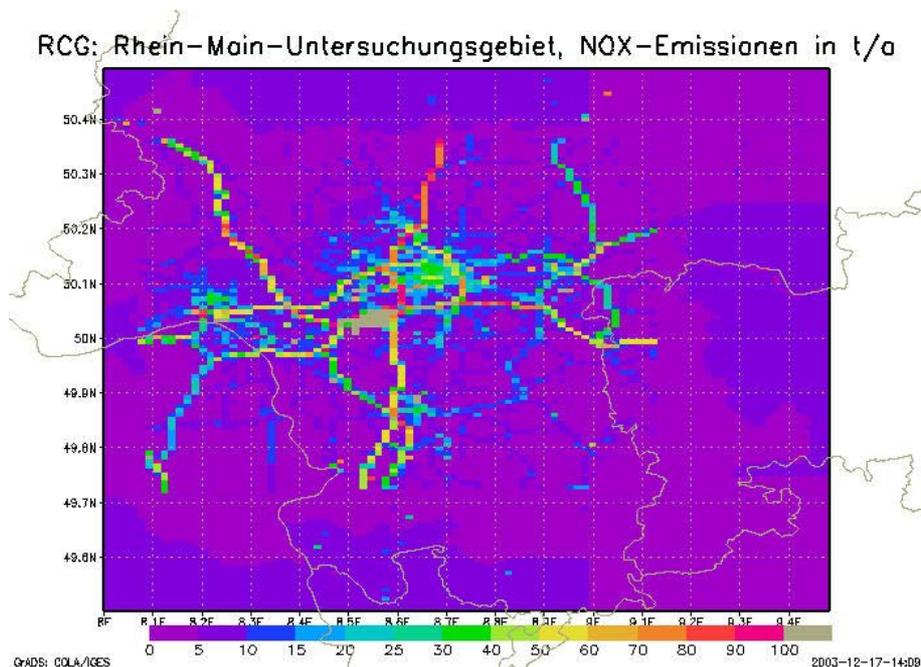


Abbildung 10: NO_x-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Rhein-Main nach den Informationen der Tabelle 2. Auflösung 1x1 km². Für die Gebiete, in denen keine Daten von IVU-Umwelt geliefert wurden (weiße Flächen in Abbildung 9), wurden die Emissionen der großräumigen Datenbasis (Auflösung circa 30 km) verwendet.

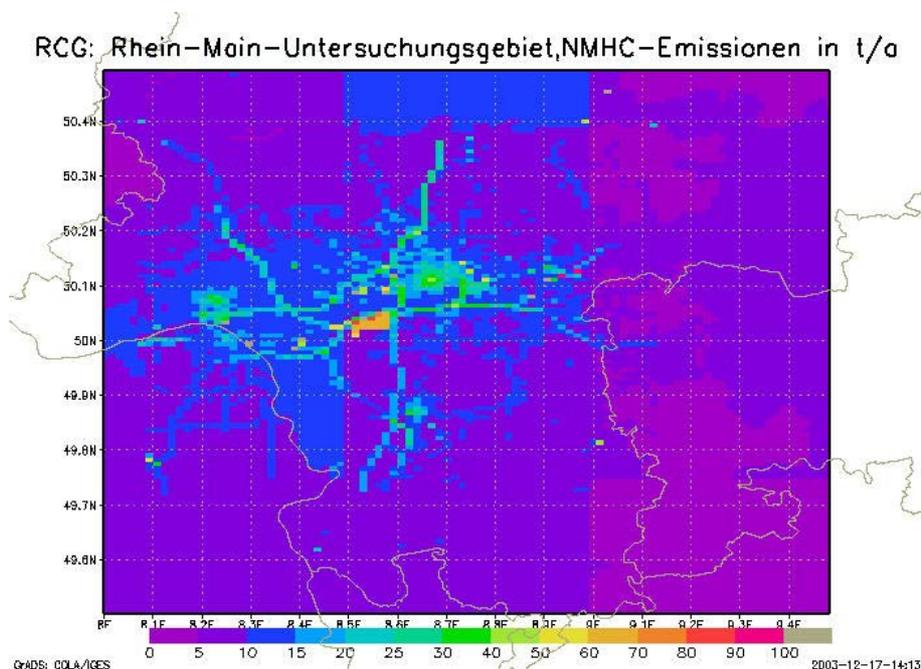


Abbildung 11: NMHC-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Rhein-Main nach den Informationen der Tabelle 2. Auflösung 1x1 km². Für die Gebiete, in denen keine Daten von IVU-Umwelt geliefert wurden (weiße Flächen in Abbildung 9), wurden die Emissionen der großräumigen Datenbasis (Auflösung circa 30 km) verwendet.

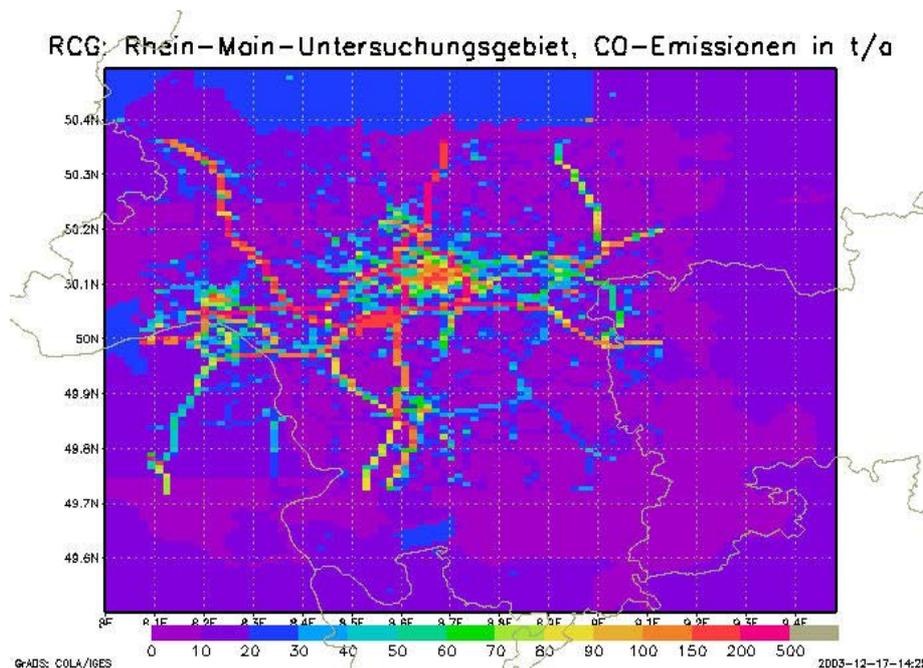


Abbildung 12: CO-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Rhein-Main nach den Informationen der Tabelle 2. Auflösung $1 \times 1 \text{ km}^2$. Für die Gebiete, in denen keine Daten von IVU-Umwelt geliefert wurden (weiße Flächen in Abbildung 9), wurden die Emissionen der großräumigen Datenbasis (Auflösung circa 30 km) verwendet.

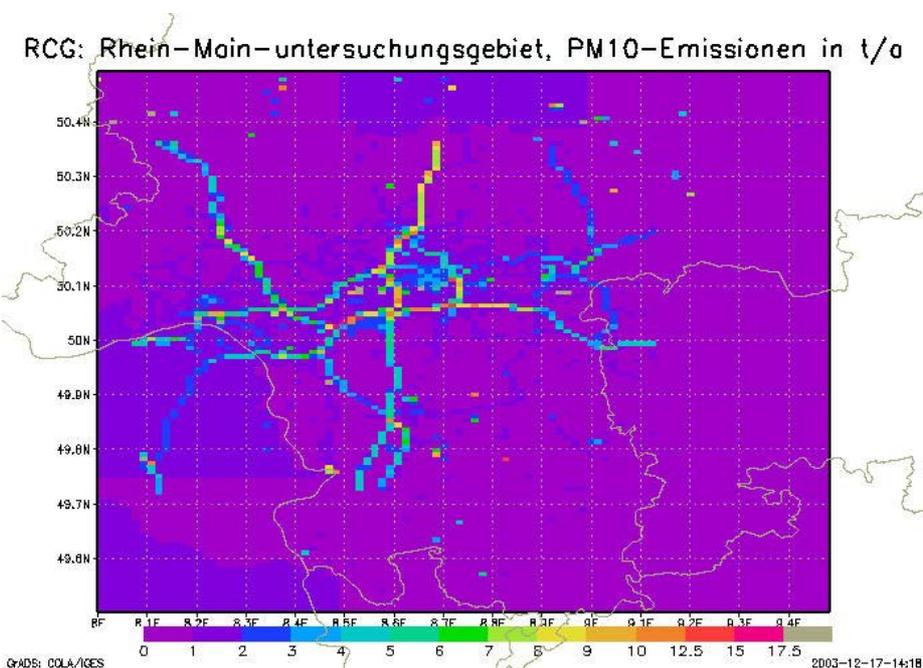


Abbildung 13: PM10-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Rhein-Main nach den Informationen der Tabelle 2. Auflösung $1 \times 1 \text{ km}^2$. Für die Gebiete, in denen keine Daten von IVU-Umwelt geliefert wurden (weiße Flächen in Abbildung 9), wurden die Emissionen der großräumigen Datenbasis (Auflösung circa 30 km) verwendet.

3 RCG-Ergebnisse für den Basislauf 2000

3.1 Überblick

Die Ausbreitungsrechnungen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main wurden in 2 Stufen durchgeführt:

- Für das gesamte Gebiet der Abbildung 2 mit einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$ (Lauf 1).
- Für ein Teilgebiet des in Abbildung 2 gezeigten Gebiets mit einer Auflösung von circa $1 \times 1 \text{ km}^2$. Dieses Teilgebiet beinhaltet alle 15 Straßen, für die die Hintergrundwerte bereitgestellt werden sollen (Lauf 2).

Die Randbedingungen für Lauf 1 werden aus der europaweiten RCG-Anwendung abgeleitet, diejenigen für Lauf 2 aus den Ergebnissen von Lauf 1 abgeleitet. Insgesamt wurden also 3 Basisläufe in drei verschiedenen Auflösungen erstellt. Alle Läufe wurden für das gesamte Jahr 2000 durchgeführt. Die in den folgenden Kapiteln präsentierte Auswertung konzentriert sich auf NO_2 , PM_{10} und Ozon. Der Vergleich mit Messungen erfolgt für Stationen im kleinräumigen Untersuchungsgebiet. Die Straßenhintergrundzeitreihen für die 15 mit dem CPB-Modell zu simulierenden Straßen wurden aus der Rechnung mit 1 km Auflösung abgeleitet.

3.2 Flächendarstellungen

Abbildung 14 bis Abbildung 16 zeigen die berechnete Verteilung der NO_2 -, PM_{10} - und O_3 -Jahresmittelwerte im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. Die höchsten NO_2 -Jahresmittel werden im Rhein-Main-Becken entlang der Achse Wiesbaden-Frankfurt-Hanau berechnet. Spitzenkonzentrationen von 45 bis $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ergeben sich im Bereich des Frankfurter Kreuzes und des Wiesbadener Kreuzes. Die Region um den Flughafen und das Frankfurter Kreuz haben im Rastermittel von $1 \times 1 \text{ km}^2$ auch die höchsten NO_x -Emissionen in der Region (siehe Abbildung 10). Die maximalen PM_{10} -Jahresmittel von über $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ werden für eine Gitterbox an der Hessischen Landesgrenze zu Bayern in der Höhe von Hanau berechnet. Weitere Gebiete mit hohen PM_{10} -Konzentrationen sind das Frankfurter Stadtgebiet sowie eine Gitterzelle im Bereich Wiesbaden. Die höchsten Ozon-Jahresmittel treten dagegen im Taunus und im Odenwald auf. Die Regionen mit hohen NO_x -Emissionen sind eher Ozonsenken, d.h. die Konzentrationen liegen deutlich unter denen der ländlichen Umgebung.

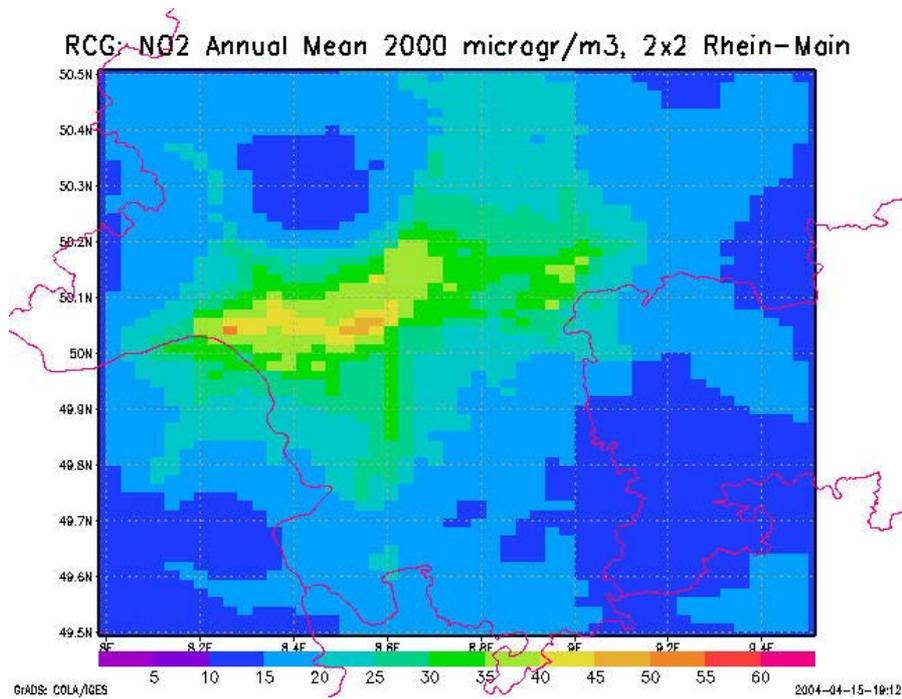


Abbildung 14: Berechneter NO₂-Jahresmittelwert 2000 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

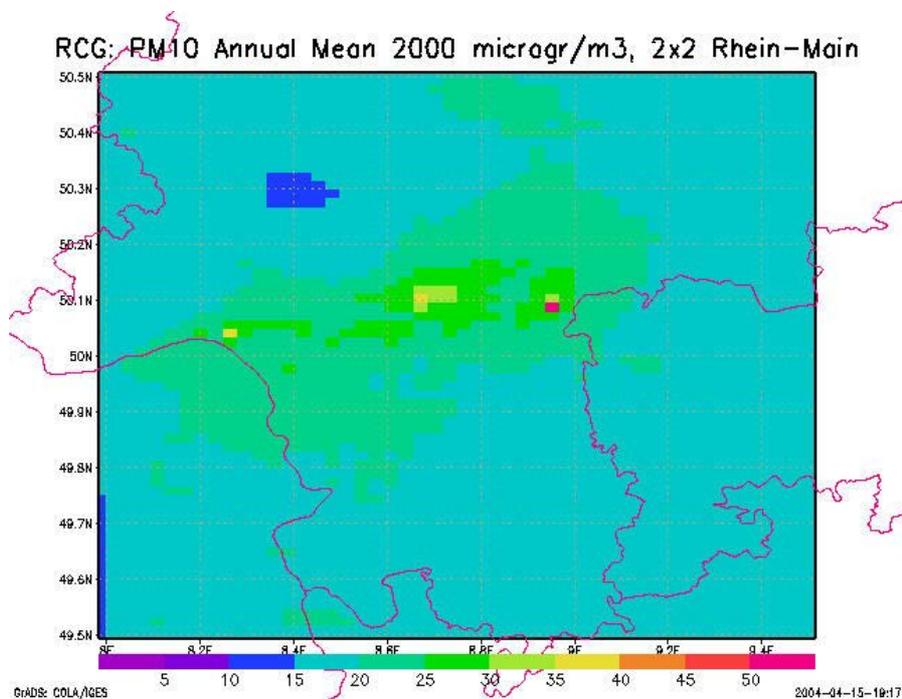


Abbildung 15: Berechneter PM₁₀-Jahresmittelwert 2000 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

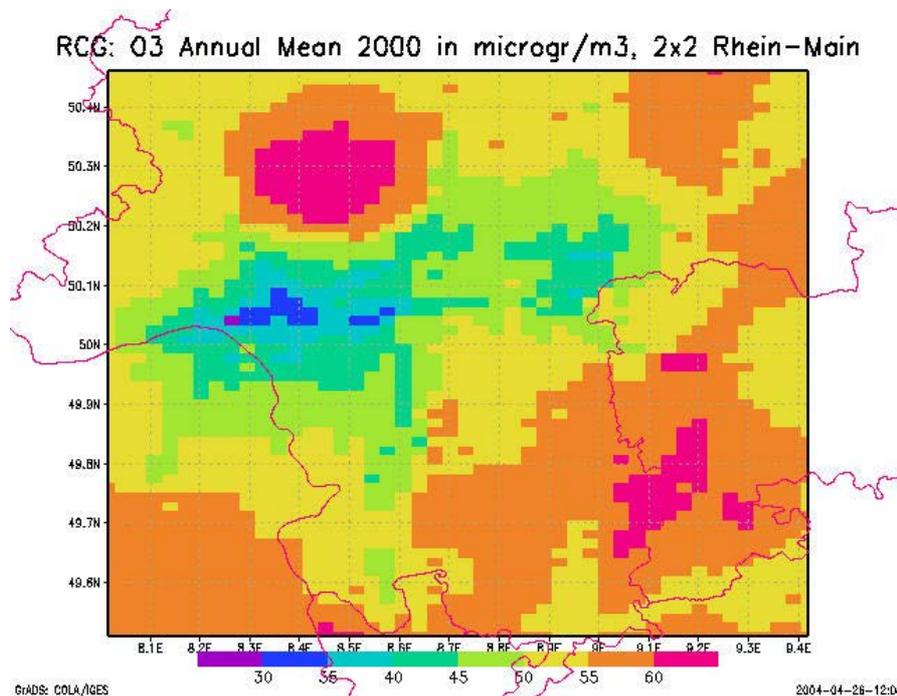


Abbildung 16: Berechneter Ozon-Jahresmittelwert 2000 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

3.3 Vergleich mit Messungen

Der berechnete zeitliche Verlauf der Konzentrationen wird im Vergleich mit den Messungen an einigen ausgewählten Stationen im Untersuchungsgebiet diskutiert. Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die berechneten und beobachteten Zeitreihen des täglichen maximalen 8-Stundenmittelwerts von Ozon und des Tagesmittelwerts von NO_2 an den Stationen Königstein im Taunus und Fürth im Odenwald. Der beobachtete Konzentrationsverlauf wird an diesen beiden Hintergrundstationen generell gut nachvollzogen mit einer leichten Tendenz zur Überschätzung der Ozonwerte an der Station Königstein und der NO_2 -Werte im Winter. Der relative geringe Unterschied zwischen der europaweiten RCG-Rechnung in einer Auflösung von circa 30 km und der regionalen Rechnung in einer Auflösung von circa 2 km ist ein Hinweis dafür, dass diese beiden Stationen nicht unter dem Einfluss lokaler Emissionsquellen liegen. In den Stadtgebieten verstärkt sich die Tendenz zur Überschätzung des Ozons, da der dort herrschende Titrationseffekt selbst mit einer Auflösung im Kilometerbereich nicht ausreichend nachvollzogen werden kann (Abbildung 19). Durch die höhere Emissionsauflösung sind in die Ozonwerte in der kleinräumigen Anwendung niedriger als in der großräumigen Anwendung. Die Tagesmittelwerte von NO_2 werden an den ausgewählten Stadtstationen im Jahresverlauf gut nachvollzogen (Abbildung 20). Die hohen beobachteten Spitzenwerte werden aber oft nicht erreicht, insbesondere nicht an der Station Frankfurt-Höchst. In Wiesbaden-Süd kommt es dagegen im Winter sogar zu Überschätzungen der NO_2 -Tagesmittelwerte. Beim NO_2 zeigen sich die Auswirkungen der hoch aufgelösten Eingangsdaten sehr deutlich: Die großräumige Modellrechnung in der Auflösung von circa 30 km ist nicht imstande, die in Stadtgebieten beobachtete NO_2 -Konzentrationen in der Höhe auch nur annähernd nachzuvollziehen. Die beobachteten PM_{10} -Konzentrationsverläufe an den Stadtstationen zeichnen sich durch eine starke zeitliche Variation mit hohen Spitzenwerten aus. Diese Spitzen werden in der Modellrechnung nicht erreicht (Abbildung 21). Der Unterschied zwischen den kleinräumigen und den großräumigen

Modellrechnungen ist beim PM10 geringer als beim NO₂. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die PM10-Konzentrationen stärker großräumig beeinflusst sind als die NO₂-Konzentrationen. Auf diesen Umstand wird bei den Szenarienrechnungen noch genauer eingegangen.

Den Vergleich der berechneten mit den beobachteten NO₂-Jahresmittelwerten für alle verfügbaren Stationen in Hessen und Rheinland-Pfalz zeigt die Abbildung 22 für die europaweite Berechnung in der Auflösung von circa 30 km und die kleinräumige Berechnung in der Auflösung von circa 2 km. Entsprechend der Modellskala werden in der großräumigen Anwendung nur die NO₂-Jahresmittelwerte an den ländlichen Stationen (rural) in der richtigen Größenordnung wiedergegeben. Die meisten Stadtstationen (urban) und natürlich alle verkehrsnahen Stationen (traffic) werden stark unterschätzt. In der kleinräumigen Anwendung (Abbildung 22 unten) mit der Auflösung 2 km werden die Landstationen ebenfalls gut reproduziert. Die an den Stadtstationen beobachteten Jahresmittelwerte werden leicht unterschätzt, der Trend wird aber sehr gut modelliert, d.h. an Stationen, wo hohe Jahresmittelwerte gemessen werden, werden auch hohe Jahresmittelwerte berechnet. Für die kleinräumige Rechnung wurden die Stationen gemäß ihrer Stationscharakteristik noch weiter unterteilt. Stationen, die in Gebieten liegen, für die keine fein aufgelösten Emissionen vorliegen (no 2x2 emissions, siehe Abbildung 9), weisen eine größere Streuung auf als die Stadtstationen in den Gebieten mit fein aufgelösten Emissionen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Grundvoraussetzung für kleinräumige Modellrechnungen entsprechend aufgelöste Emissionsdaten sind. Verkehrsnahen Stationen (traffic influenced) werden klar unterschätzt und es ist offensichtlich, dass Straßenschluchtstationen (street) nicht mit einem Gittermodell der urbanen Skala modelliert werden können. Es handelt sich dabei um die Stationen Wiesbaden-Ringkirche, Frankfurt-Friedberger Landstraße und Darmstadt-Hügelstraße. Dies sind auch drei der 15 Straßen, für die für die Straßenschluchtmodellierung mit dem CPB-Modell Hintergrundkonzentrationen bereitgestellt werden sollen.

Die Abbildung 23 macht deutlich, dass die PM10-Jahresmittelwerte in der großräumigen Anwendung an den meisten Stadtstationen und insbesondere an allen verkehrsnahen Stationen stark unterschätzt werden. Die höhere Auflösung bewirkt eine große Verbesserung der Modellgüte. Stark unterschätzt werden in der kleinräumigen RCG-Berechnung nur noch die beiden Straßenschluchtstationen (street), die sich Untersuchungsgebiet befinden (Frankfurt-Friedberger Landstraße und Darmstadt-Hügelstraße). Solche Stationen können nur mit dafür entwickelten Straßenschluchtmodellen simuliert werden, die im Gegensatz zu dem hier verwendeten Gittermodell die Straßengeometrie explizit berücksichtigen.

Die Abbildung 24 zeigt, dass in der großräumigen RCG-Anwendung die an den Landstationen beobachteten Ozon-Jahresmittelwerte in der richtigen Größenordnung reproduziert werden. Die meisten Stadtstationen werden klar überschätzt. In der kleinräumigen Anwendung werden die Stadtstationen zwar besser simuliert, die generelle Überschätzung bleibt aber bestehen. Der Abbau des großräumig gebildeten Ozons durch lokal emittiertes Stickstoffmonoxid kann also selbst in der hier verwendeten hohen Auflösung nicht angemessen simuliert werden.

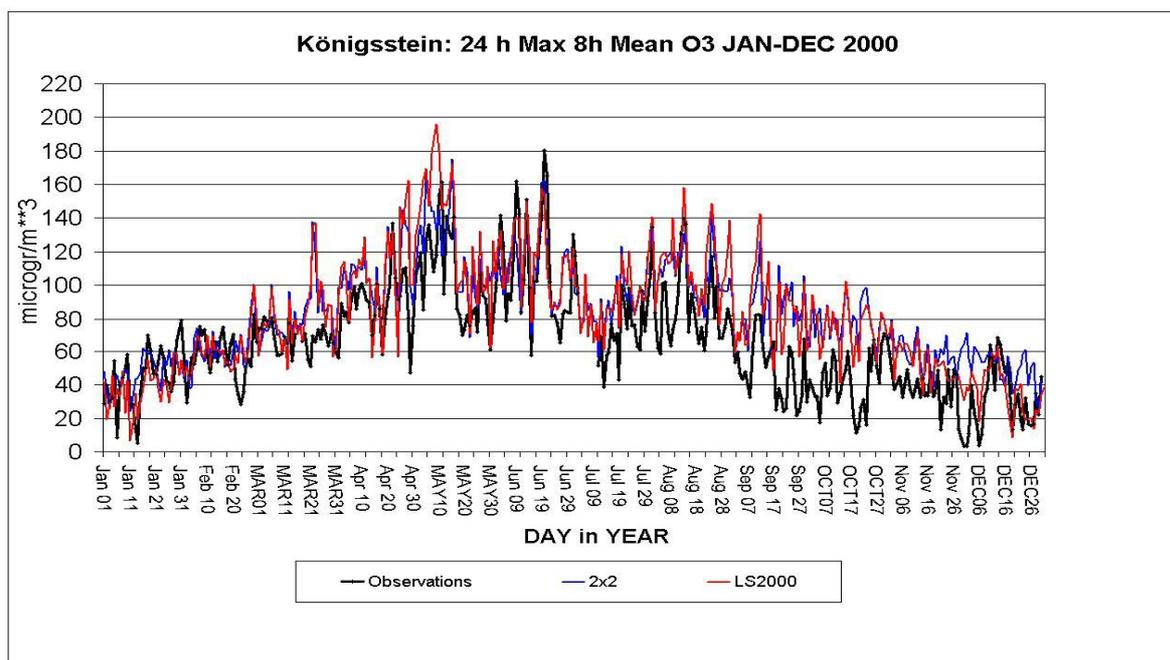
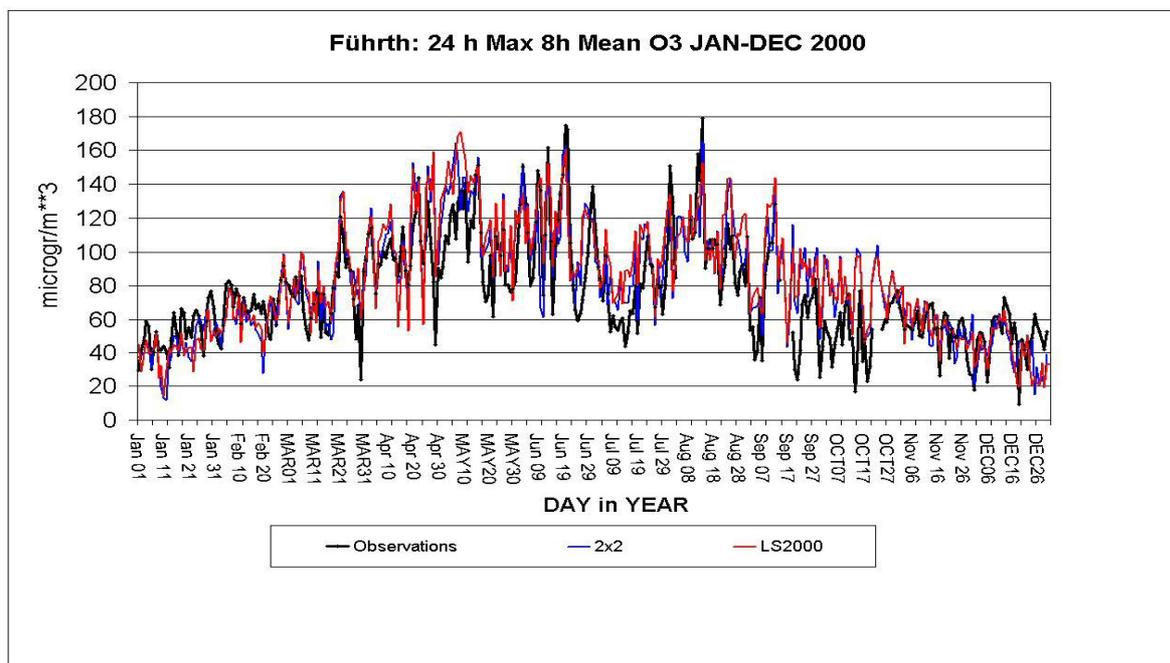


Abbildung 17: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen maximalen 8-h-Mittelwerts von Ozon in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die ländlichen Stationen Fürth im Odenwald und Königsstein im Taunus. 2x2: RCG in 2 km Auflösung, LS2000: Europaweite RCG-Anwendung in circa 30 km Auflösung.

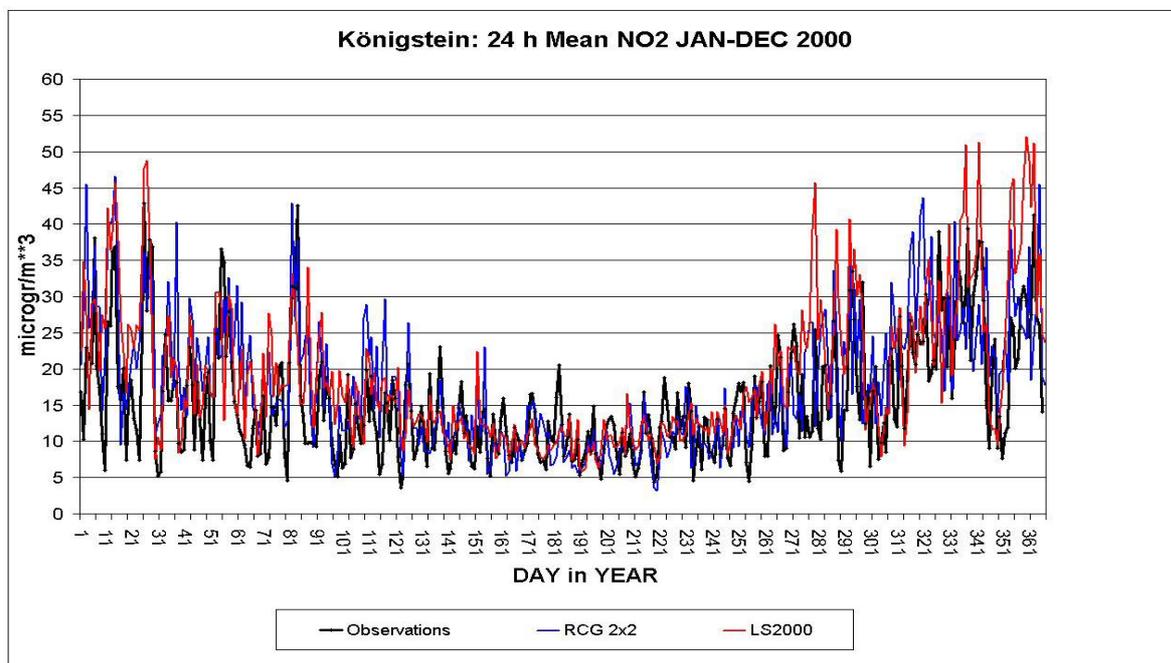
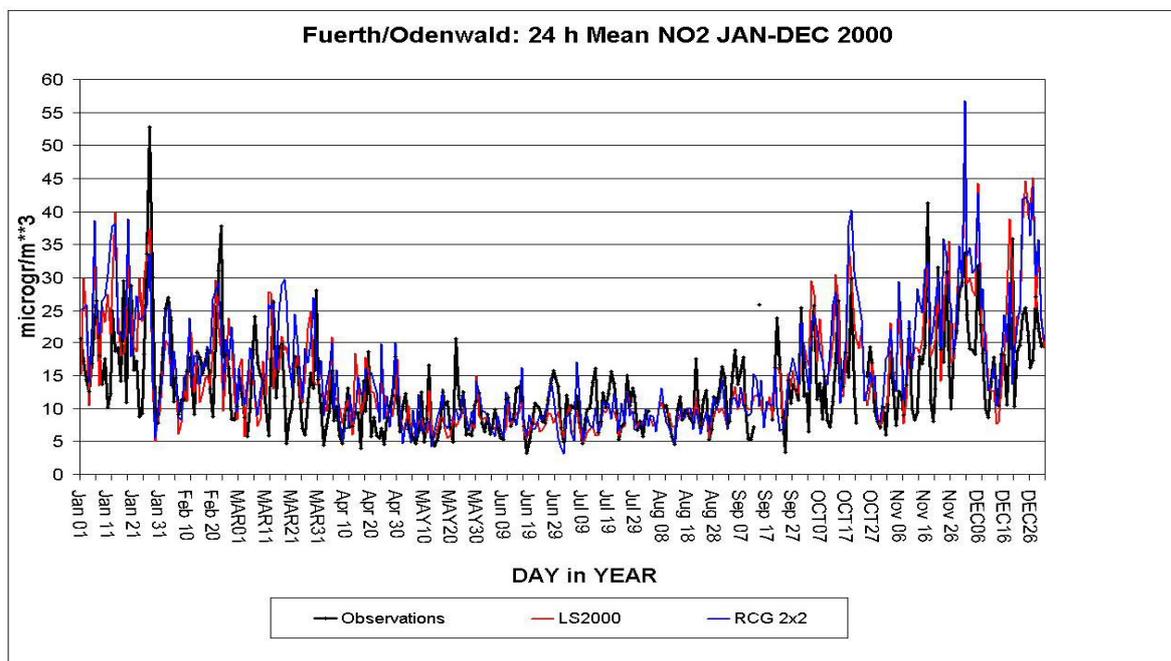


Abbildung 18: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen Mittelwert von NO₂ in µg/m³ für die ländlichen Stationen Fürth im Odenwald und Königstein im Taunus. 2x2: RCG in 2 km Auflösung, LS2000: Europaweite RCG-Anwendung in circa 30 km Auflösung.

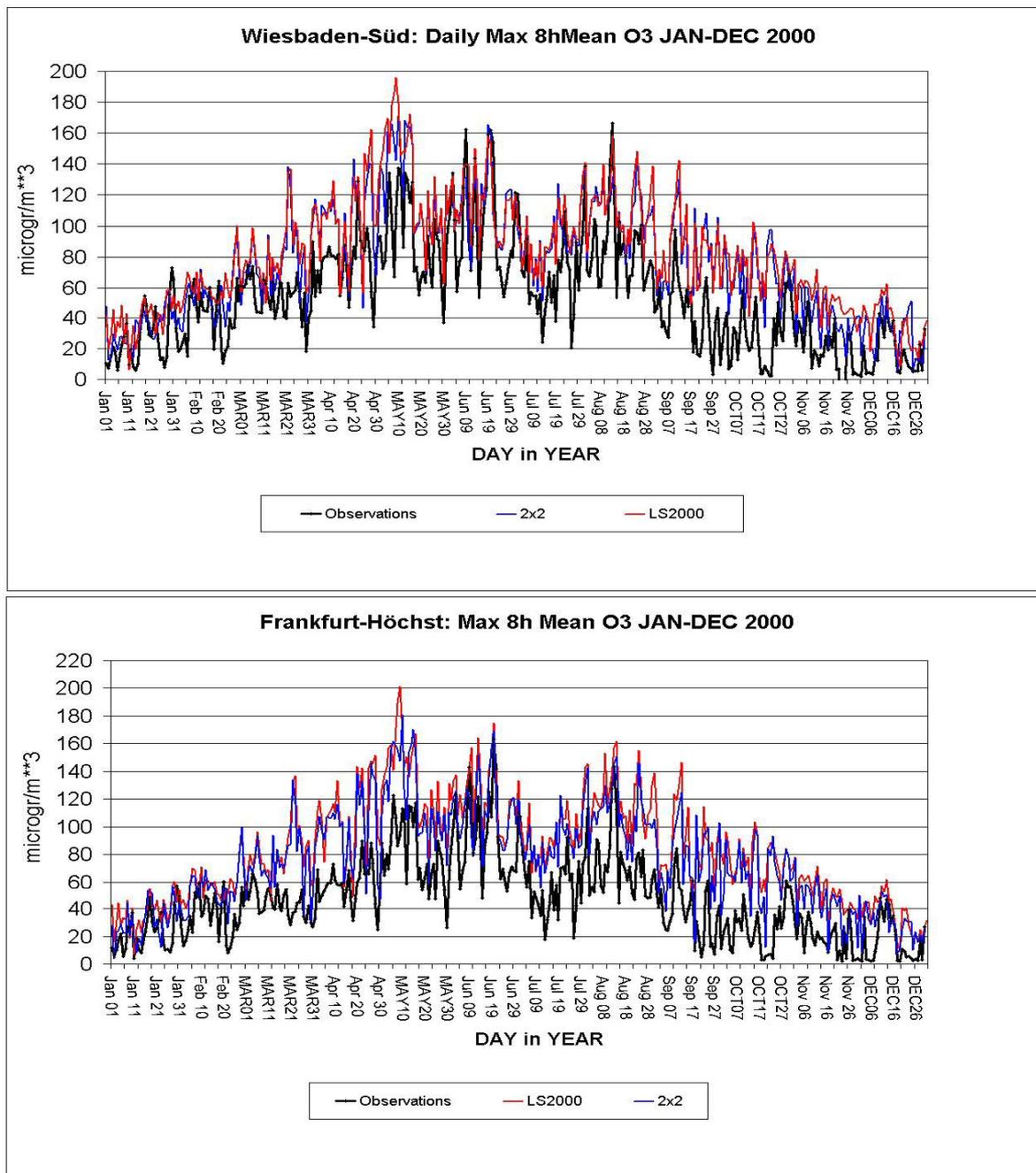


Abbildung 19: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen maximalen 8-h-Mittelwerts von Ozon in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Stadtstationen Wiesbaden-Süd und Frankfurt-Höchst. 2x2: RCG in 2 km Auflösung, LS2000: Europaweite RCG-Anwendung in circa 30 km Auflösung.

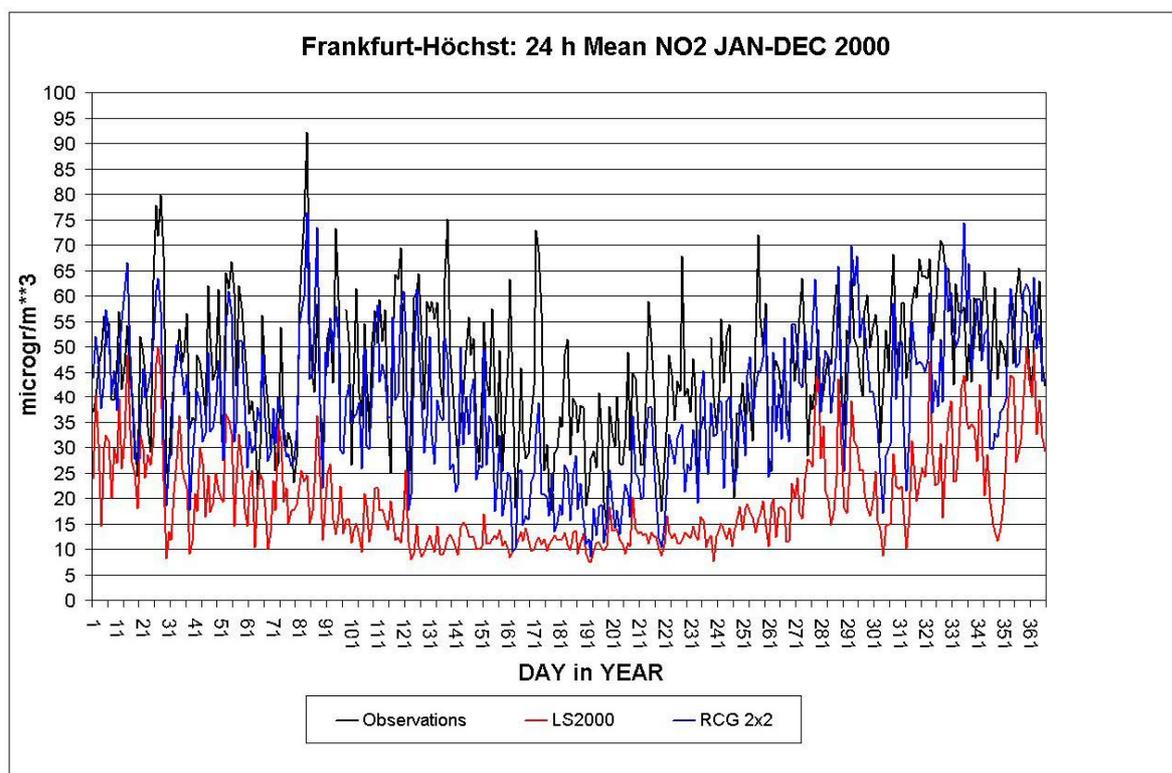
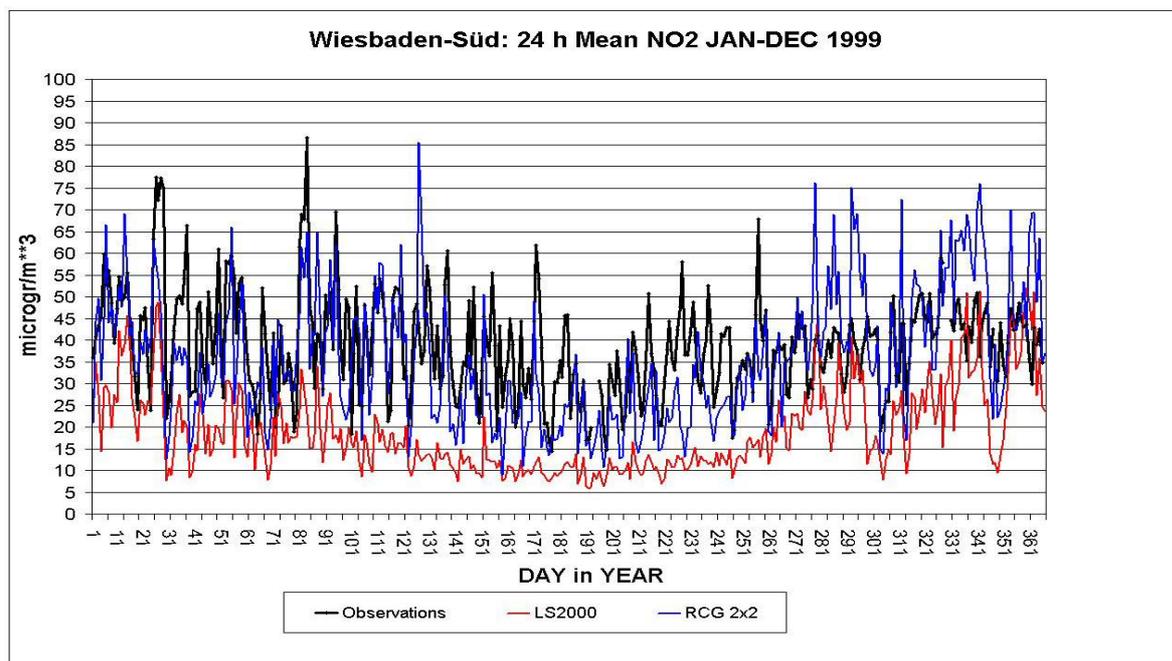


Abbildung 20: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen Mittelwerts von NO₂ in µg/m³ für die Stadtstationen Wiesbaden-Süd und Frankfurt-Höchst. 2x2: RCG in 2 km Auflösung, LS2000: Europaweite RCG-Anwendung in circa 30 km Auflösung.

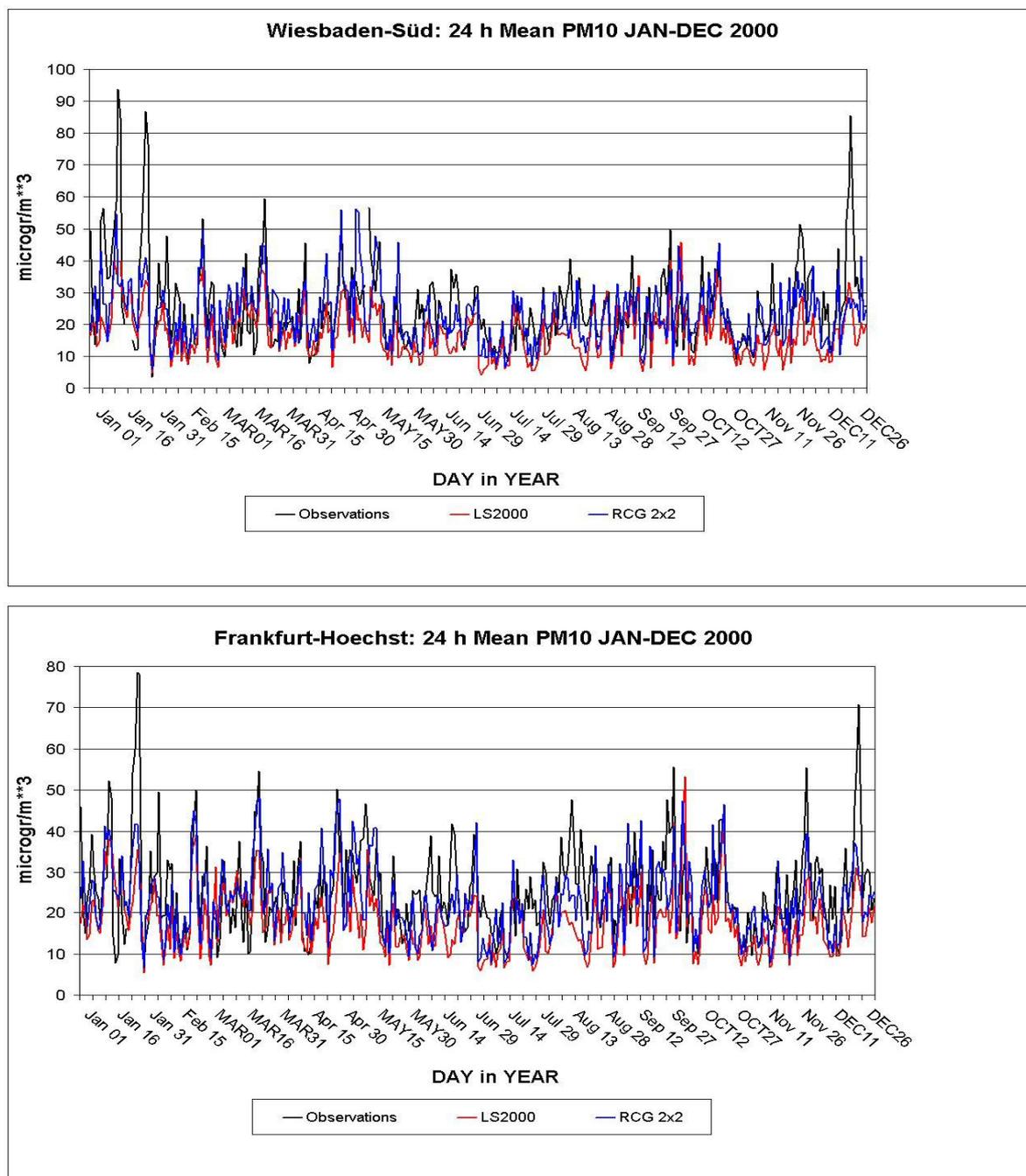


Abbildung 21: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen Mittelwerts von PM10 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Stadtstationen Wiesbaden-Süd und Frankfurt-Höchst. 2x2: RCG in 2 km Auflösung, LS2000: Europaweite RCG-Anwendung in circa 30 km Auflösung.

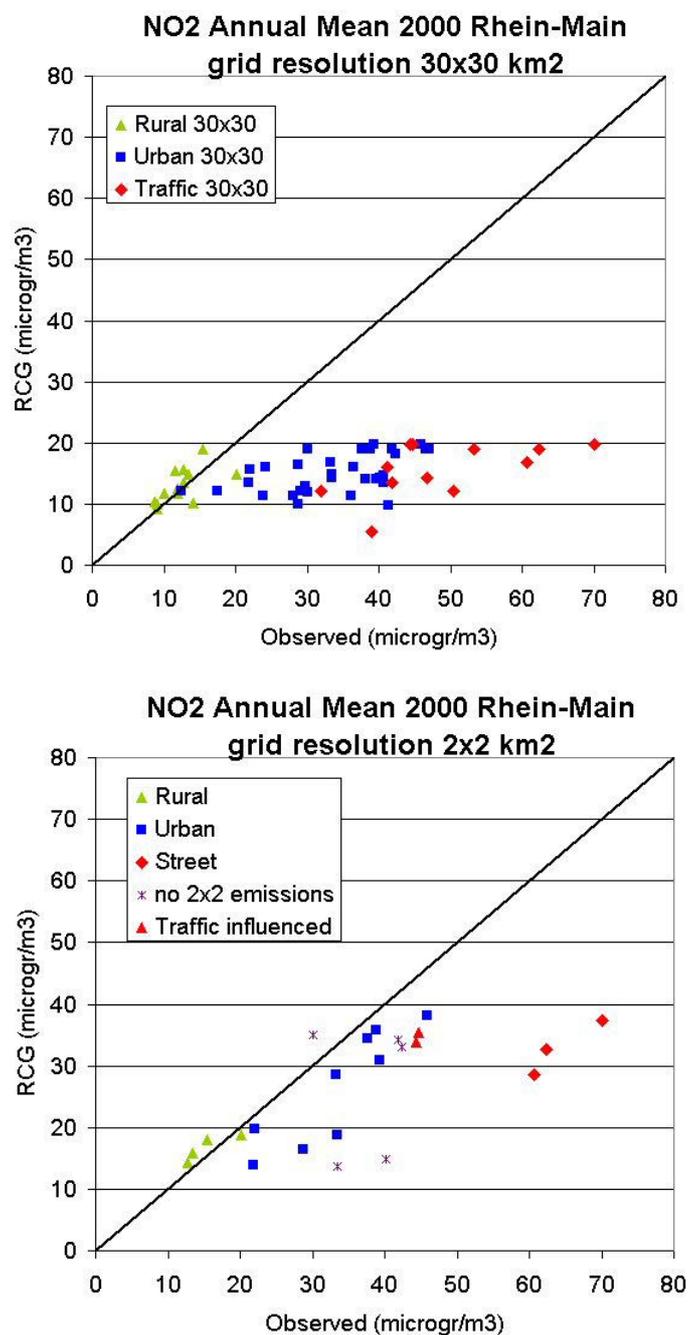


Abbildung 22: Streudiagramme der berechneten und beobachteten NO_2 -Jahresmittelwerte für alle Stationen in Hessen und Rheinland-Pfalz (30 km Auflösung, oben) und alle Stationen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main (2 km Auflösung, unten, Gebiet siehe Abbildung 2). Die Stationen sind entsprechend der Stationscharakteristik gekennzeichnet. Weitere Erläuterungen im Text.

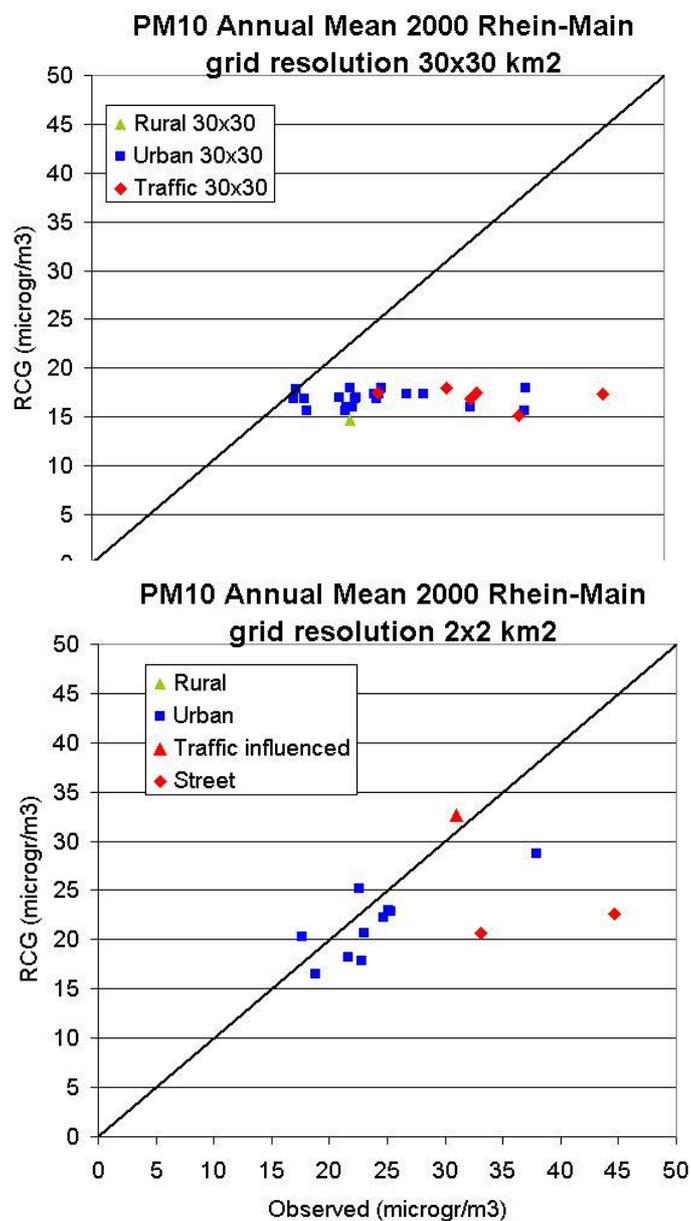


Abbildung 23: Streudiagramme der berechneten und beobachteten PM10-Jahresmittelwerte für alle Stationen in Hessen und Rheinland-Pfalz (30 km Auflösung, oben) und alle Stationen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main (2 km Auflösung, unten, Gebiet siehe Abbildung 2). Die Stationen sind entsprechend der Stationscharakteristik gekennzeichnet. Weitere Erläuterungen im Text.

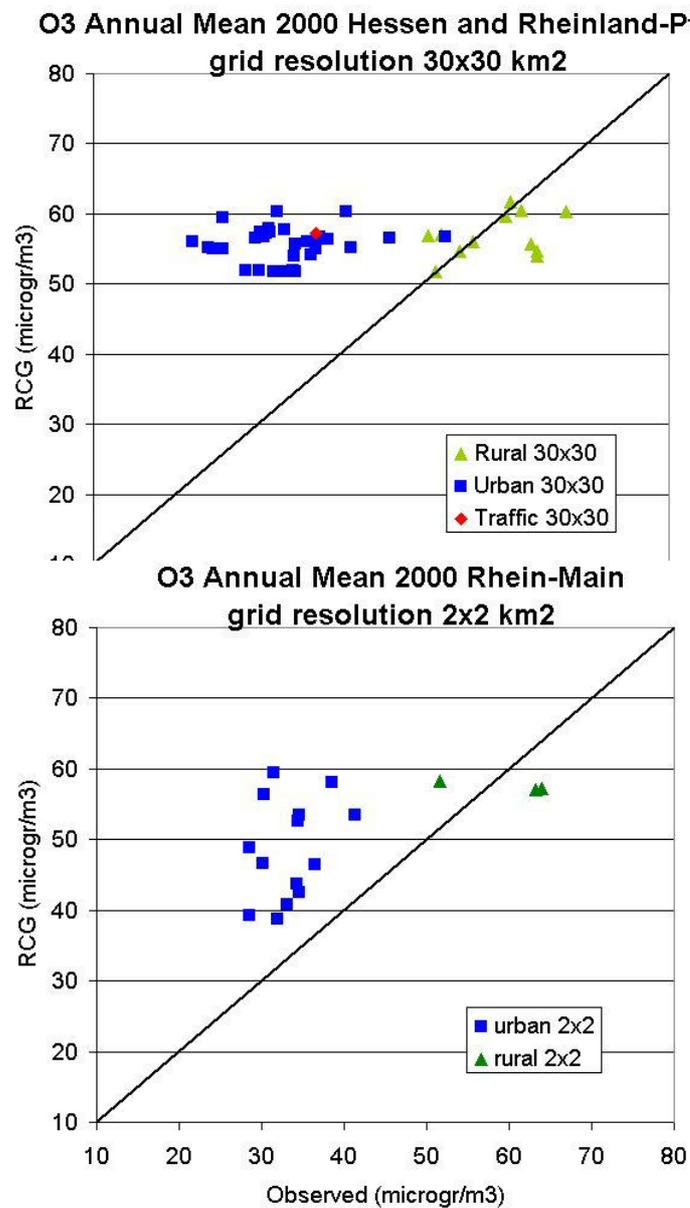


Abbildung 24: Streudiagramme der berechneten und beobachteten Ozon-Jahresmittelwerte für alle Stationen in Hessen und Rheinland-Pfalz (30 km Auflösung, oben) und alle Stationen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main (2 km Auflösung, unten, Gebiet siehe Abbildung 2). Die Stationen sind entsprechend der Stationscharakteristik gekennzeichnet. Weitere Erläuterungen im Text.

3.4 Ergebnisse der RCG-Berechnung mit 1 km Auflösung

Für ein Teilgebiet des in Abbildung 2 gezeigten Gebiets wurde auch mit einer Auflösung von circa $1 \times 1 \text{ km}^2$ gerechnet. Dieses Teilgebiet beinhaltet alle 15 Straßen, für die die Hintergrundkonzentrationen bereitgestellt werden sollen. Insgesamt sind die Unterschiede zwischen der Rechnung mit 1 bzw. 2 km Auflösung im Bereich der 15 Straßen aber relativ gering. Da sich in dem Teilgebiet relativ wenige Messstationen befinden, werden die Ergebnisse für 1 km Auflösung nicht mehr im Detail diskutiert. Abbildung 25 zeigt die für 1 km Auflösung berechnete Verteilung der NO_2 -Jahresmittelwerte. Entsprechend der feineren Auflösung zeichnet sich die Emissionsstruktur deutlicher ab als in der 2 km Auflösung (siehe Abbildung 14). In einzelnen Gitterzellen ergeben sich dadurch etwas höhere Spitzenkonzentrationen als in der Rechnung mit der gröberen Auflösung. Abbildung 26 zeigt die für die Friedberger Landstraße, eine der zu untersuchenden Straßenschluchten, in 1 bzw. 2 km Auflösung berechnete NO_2 -Hintergrundkonzentration. Die Unterschiede sind relativ gering, insbesondere im Vergleich zu der sehr hohen gemessenen Konzentration am Boden der Straßenschlucht. Ähnliches gilt auch für die ebenfalls zu untersuchende Darmstädter Hügelstraße (Abbildung 27) und die anderen 13 Standorte.

In der RCG-Rechnung mit 1 km Auflösung ergeben sich im Vergleich zur Rechnung mit 2 km Auflösung im Bereich Wiesbaden lokal höhere PM_{10} -Jahresmittelwerte (Abbildung 28 und Abbildung 15). Die erhöhten PM_{10} -Jahresmittelwerte im Frankfurter Norden in der Rechnung mit der 2 km Auflösung (Abbildung 15) sind in dem Teilausschnitt der 1 km Rechnung nicht mehr enthalten. Die Unterschiede zwischen der $1 \times 1 \text{ km}^2$ und der $2 \times 2 \text{ km}^2$ Rechnung sind für PM_{10} etwas größer als für NO_2 , da das PM_{10} -Feld stärker durch die niedrigen Einzelquellen geprägt wird. Dadurch kann eine Station unter Umständen in der $2 \times 2 \text{ km}^2$ Rechnung unter den direkten Einfluss einer Einzelquelle kommen, die im $1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster in der benachbarten Gitterzelle liegt und damit nicht direkt die Station beaufschlagt. Auch aus den PM_{10} -Zeitreihen für die Darmstädter Hügelstraße (Abbildung 29, Straßenschlucht, für die Hintergrundkonzentrationen berechnet werden) und die Stadtrandstation Wiesbaden-Süd (Abbildung 30) wird aber deutlich, dass die Erhöhung der Auflösung von 2 auf 1 km keine grundsätzliche Änderung des berechneten Konzentrationsverlaufes ergibt. Alle aus der Rechnung mit der 2 km Auflösung abgeleiteten Ergebnisse lassen sich damit auch auf die Rechnung mit der 1 km Auflösung übertragen.

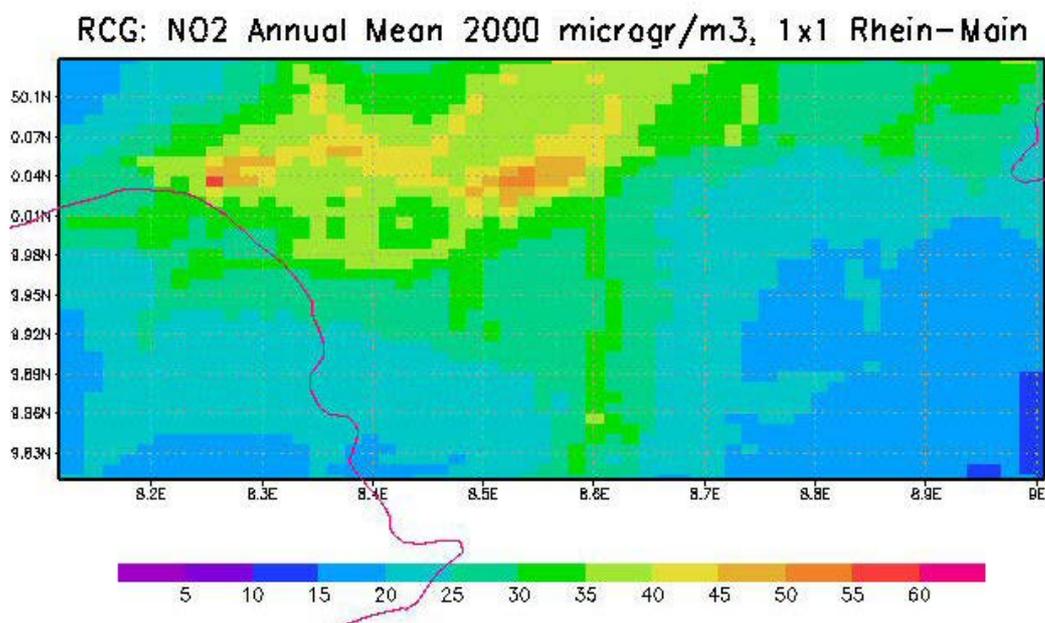


Abbildung 25: Berechneter NO₂-Jahresmittelwert 2000 in µg/m³ in einem Teilgebiet des Untersuchungsgebiet Rhein-Main. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 1x1 km².

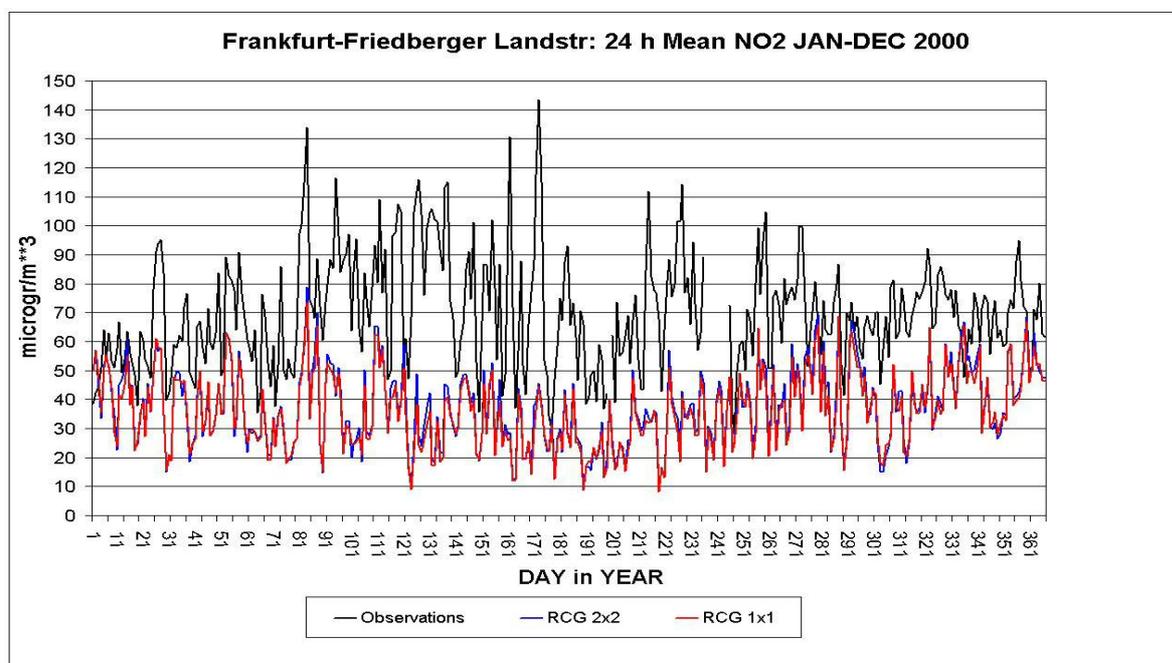


Abbildung 26: Berechnete Vorbelastungskonzentration des täglichen Mittelwerts von NO₂ in µg/m³ für die Friedberger Landstraße in Frankfurt. RCG in 1, bzw. 2 km Auflösung. Die Beobachtung ist die Messung in der Straßenschlucht.

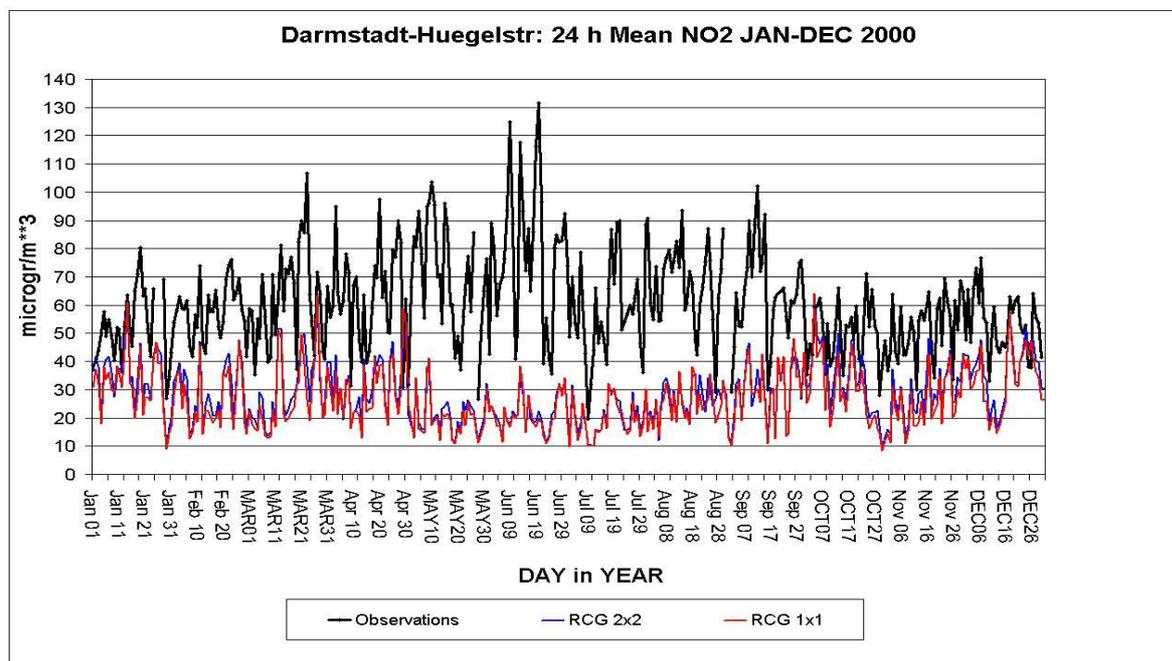


Abbildung 27: Berechnete Vorbelastungskonzentration des täglichen Mittelwerts von NO₂ in µg/m³ für die Hügelstraße in Darmstadt. RCG in 1, bzw. 2 km Auflösung. Die Beobachtung ist die Messung in der Straßenschlucht.

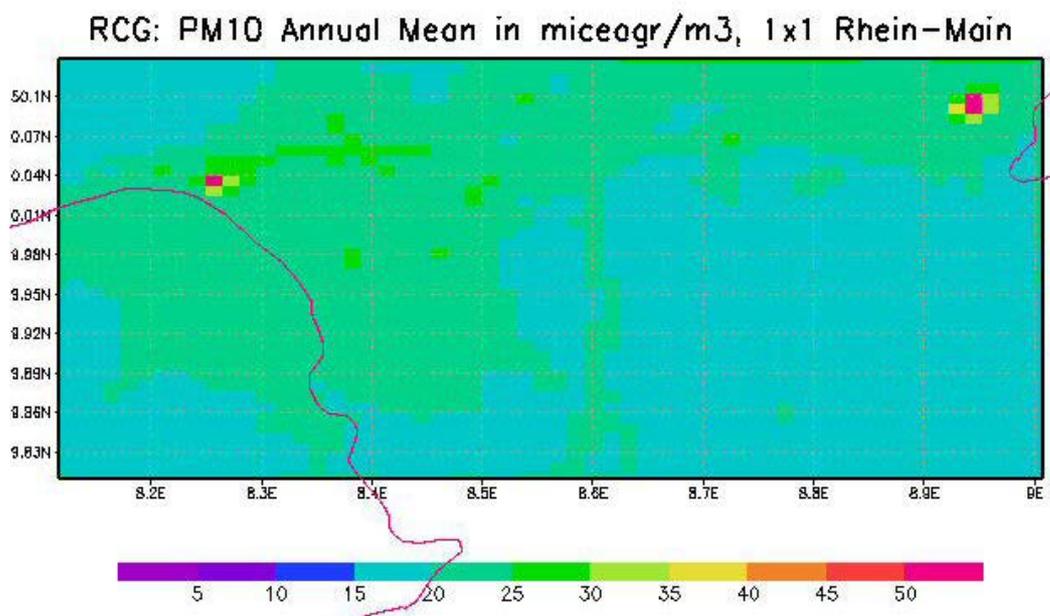


Abbildung 28: Berechneter PM10-Jahresmittelwert 2000 in µg/m³ in einem Teilgebiet des Untersuchungsgebiet Rhein-Main. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 1x1 km².

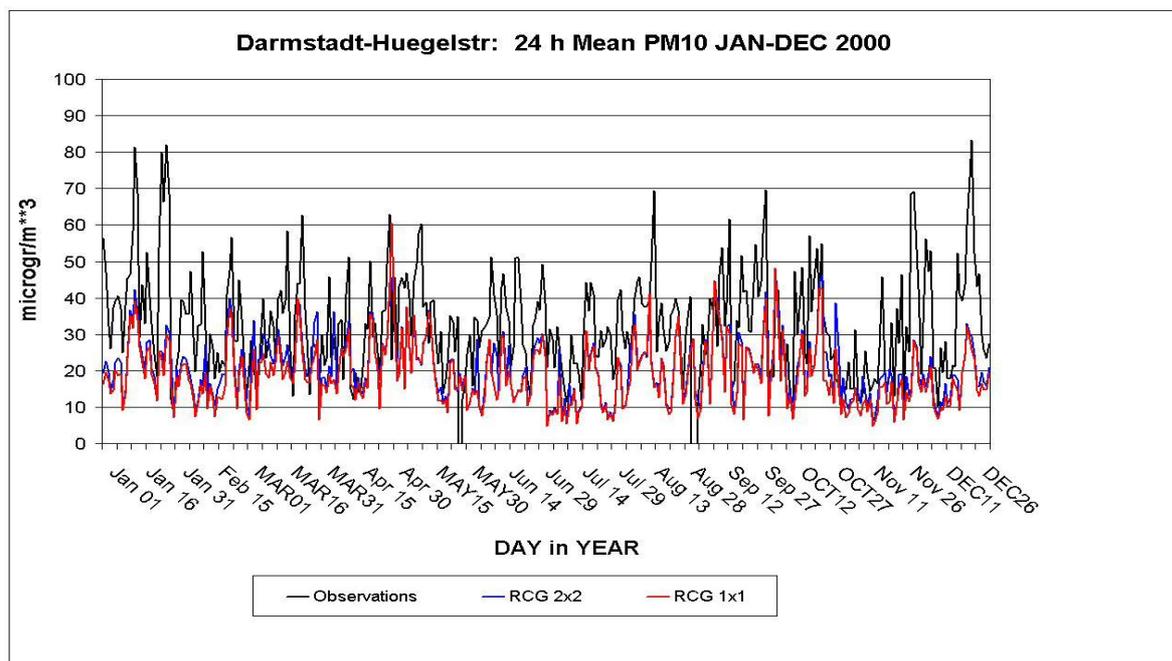


Abbildung 29: Berechnete Vorbelastungskonzentration des täglichen Mittelwerts von PM10 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Hügelstraße in Darmstadt. RCG in 1, bzw. 2 km Auflösung. Die Beobachtung ist die Messung in der Straßenschlucht.

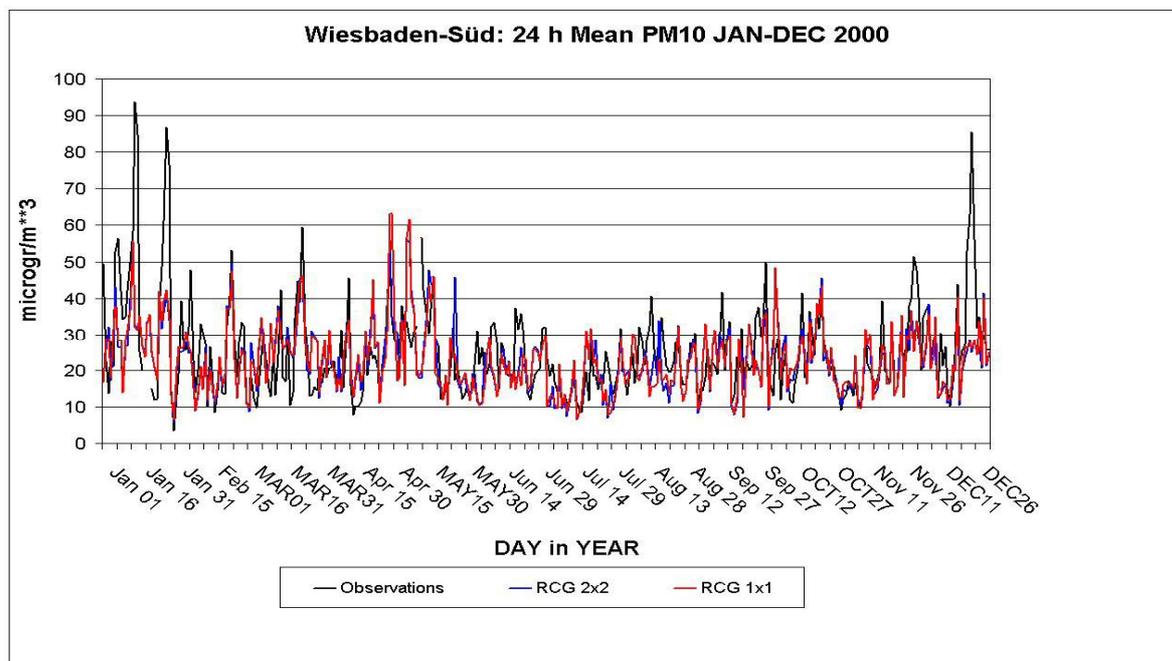


Abbildung 30: Berechnete Konzentration des täglichen Mittelwerts von PM10 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Stadtrandstation Wiesbaden-Süd. RCG in 1, bzw. 2 km Auflösung.

4 Die Emissionsszenarien

Alle Emissionsszenarien werden für das in Abbildung 2 gezeigte Untersuchungsgebiet in einer Auflösung von 2 km berechnet. Folgende Szenarien werden betrachtet:

- Keine anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet
- Alle Emissionen der Verursachergruppe Hausbrand und Kleinverbraucher Null
- Alle Emissionen der Verursachergruppe Straßenverkehr Null
- Alle Emissionen der Verursachergruppe Industrie und Kraftwerke Null.

Alle anderen Eingangsdaten bleiben jeweils unverändert.

Der Beitrag der Emissionen außerhalb des Untersuchungsgebiets zu den Konzentrationen im Untersuchungsgebiet wird für die Stoffe NO₂, PM10 und Ozon diskutiert. Bei den anderen Szenarien werden nur die für diese Untersuchung relevanten Schadstoffe NO₂ und PM10 ausgewertet. Es muss ausdrücklich betont werden, dass die Addition der hier berechneten Beiträge der einzelnen Verursachergruppen **nicht** zu der Gesamtkonzentration führen, wie sie sich unter der Verwendung aller Emissionen ergeben. Hauptursache dafür sind die nichtlinearen Beziehungen zwischen den Vorläuferemissionen und den über eine komplexe Kette chemischer Reaktionen entstehenden Folgeprodukten NO₂, O₃ und PM10. Eine Änderung der Zusammensetzung der Emissionen führt also auch zu einer Änderung der chemischen Abläufe und damit zu einer Änderung der Konzentrationsbeiträge. Aus diesem Grunde können die berechneten Beiträge der verschiedenen Emissionsgruppen zur Gesamtkonzentration auch nur als Näherung betrachtet werden.

4.1 Keine Emissionen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main

In diesem Szenario werden alle anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet (Abbildung 2) auf Null gesetzt. Anthropogene Emissionen sind hier alle Emissionen, die direkt durch technische oder strukturelle Maßnahmen beeinflusst werden können. Die nicht-anthropogenen Emissionen (hier Isopren und Terpen-Emissionen aus Wäldern, NO_x-Emissionen aus Böden, Staubaufwirbelung) bleiben unverändert. Mit diesem Szenario kann der Beitrag der deutschen und europäischen Emissionen außerhalb des Rhein-Main-Gebiets zu den Immissionen im Gebiet ermittelt werden. Abbildung 31 zeigt die für das Untersuchungsgebiet Rhein-Main berechneten NO₂-Jahresmittelwerte unter der Annahme, dass die anthropogenen Emissionen im Gebiet Null sind. An den Rändern des Gebiets, über die Schadstoffe ins Gebiet transportiert werden, ergeben sich Jahresmittelwerte um die 10 µg/m³. Im Zentrum des Gebiets, wo im Basislauf NO₂-Jahresmittelwerte zwischen 30 und 45 µg/m³ berechnet wurden (Abbildung 14), stellen sich ohne den Beitrag der Emissionen des Rhein-Main-Gebiets Jahresmittelwerte unter 5 µg/m³ ein. Dies bedeutet, dass der Beitrag der Emissionen zu den NO₂-Jahresmittelwerten in den Stadtgebieten Wiesbaden und Frankfurt circa 80 bis 90 % beträgt (Abbildung 31 unten). Zu den Rändern hin nimmt der Beitrag ab, da hier ein größerer Teil des NO₂ aus Quellen außerhalb des Untersuchungsgebiets stammt. Den beiden in Abbildung 32 gezeigten Zeitreihen kann entnommen werden, dass nach den RCG-Rechnungen die NO₂-Tagesmittelwerte ohne den Beitrag der Emissionen im Untersuchungsgebiet selten über 15 µg/m³ steigen.

Abbildung 33 zeigt die für das Untersuchungsgebiet Rhein-Main berechneten PM10-Jahresmittelwerte ohne den Beitrag der anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet. Nördlich von Frankfurt werden auch ohne die Emissionen noch Jahresmittelwerte über 20 µg/m³

berechnet. In den anderen Teilen des Gebietes ergeben sich Jahresmittelwerte zwischen 10 und 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Der Anteil der Emissionen des Rhein-Main-Gebiets an den berechneten PM10-Jahresmitteln für den Basislauf (Abbildung 15) liegt nach Abbildung 33, unten, in den Randgebieten zwischen 10 und 20%, in den höher belasteten Gebieten zwischen 40 und 60% und steigt nur im Bereich lokaler Emissionsspitzen über 70%. Insgesamt ist der Beitrag der Emissionen im Untersuchungsgebiet zu den PM10-Jahresmitteln damit deutlich niedriger als derjenige zu den NO_2 -Jahresmitteln. Dies zeigen auch die Zeitreihen der PM10-Tagesmittel mit und ohne Emissionen im Untersuchungsgebiet (Abbildung 34). Dies hat mehrere Ursachen: PM10 setzt sich aus primären, d.h. direkt emittierten Partikeln und sekundären, d.h. über physikalisch/chemische Prozesse gebildeten Partikeln zusammen. Die Bildung der sekundären Bestandteile ist ein großräumiger Prozess. Demzufolge wird ein Großteil der sekundären Partikel außerhalb des Untersuchungsgebietes gebildet und in das Gebiet transportiert und unterliegt damit nicht dem Einfluss lokaler Maßnahmen. Zum anderen liefert die im RCG-Modell enthaltene Parametrisierung der Aufwirbelung von Bodestaub einen Beitrag zu den PM10-Konzentrationen, der durch das Ausschalten der anthropogenen Quellen nicht betroffen ist. Dies erklärt das Maximum in der Region nördlich von Frankfurt. Die Jahresmittelwerte der primären bzw. sekundären PM10-Komponenten zeigt die Abbildung 35. Es ist ersichtlich, dass die Struktur des PM10-Feldes durch die direkt emittierten primären Komponenten geprägt wird. Die Verteilung der sekundären Komponenten ist dagegen deutlich gradientschwächer, was auf die überwiegend großräumige Bildung zurückzuführen ist. Der Abbildung 36 kann entnommen werden, dass die Emissionen im Untersuchungsgebiet in den hoch belasteten Gebieten zwischen 60 und 85 % zu den Immissionen der primären PM10-Komponenten beitragen. Die sekundären Komponenten werden dagegen höchstens zu einem Drittel von den Emissionen im Untersuchungsgebiet verursacht.

Abbildung 37 zeigt die für das Untersuchungsgebiet Rhein-Main berechneten Ozon-Jahresmittelwerte ohne den Beitrag der anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet. Im Vergleich zur Basissimulation (Abbildung 16) kommt es zu Erhöhungen der Jahresmittelwerte, die in den Stadtgebieten bis in den Bereich von 100% reichen (Abbildung 38, unten). Die Zunahmen sind eine Folge des nicht mehr vorhandenen Titrationseffekt, der in der Basissimulation den Abbau des Ozons in den Gebieten hoher Stickstoffoxidemissionen bewirkt. Den Zeitreihen des täglichen 8-h-Mittelwerts (Abbildung 38) kann aber entnommen werden, dass die Ozonzunahmen durch das Abschalten der Emissionen im Wesentlichen in niedrigeren Ozonbereichen auftreten. Die Spitzenwerte werden dagegen durch die Emissionsabschaltung vermindert. Dies zeigt auch deutlich die Abbildung 39, in der die berechnete Anzahl der Tage mit Überschreitungen des täglichen 8-h-Mittelwerts dargestellt ist. Die nach der Tochterraichtlinie Ozon der EU erlaubten 25 Überschreitungen werden im Basislauf in einigen Regionen des Gebiets überschritten. Schaltet man die anthropogenen Emissionen ab, werden im Kerngebiet deutlich weniger Überschreitungstage berechnet und der Grenzwert wird eingehalten. Dies kann als Hinweis interpretiert werden, dass die hohen Ozon-Spitzenkonzentrationen zum Großteil hausgemacht sind, d.h. durch Vorläuferemissionen aus der Region verursacht werden. Die Zunahme von Überschreitungstagen an den Rändern des Untersuchungsgebiets hat seine Ursache im Transport von Ozon in das Untersuchungsgebiet, das durch die fehlenden Stickoxidemissionen im Gebiet nicht mehr abgebaut wird.

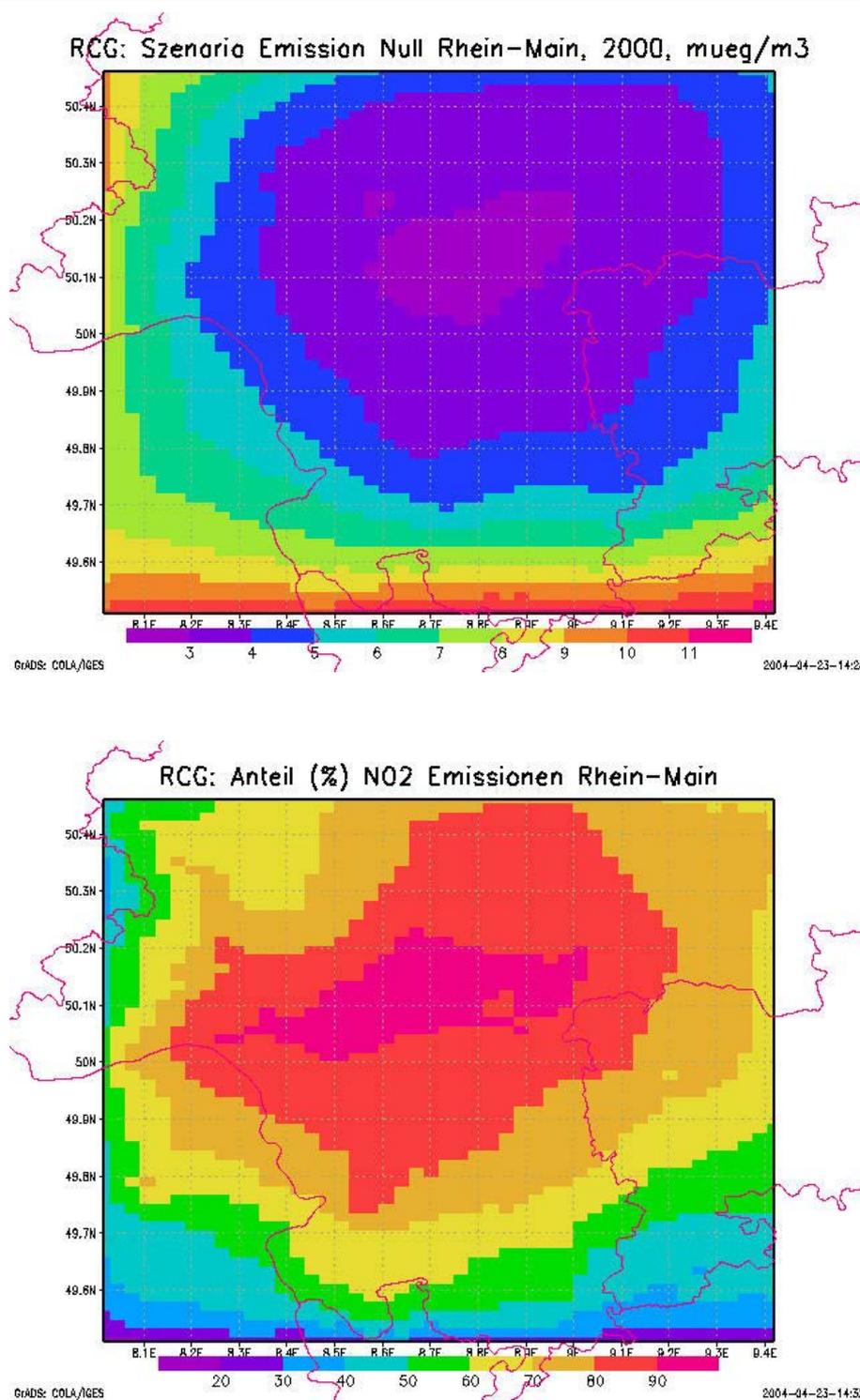


Abbildung 31: Oben: Berechneter NO₂-Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null gesetzt,“. Unten: Beitrag der Emissionen Rhein-Main in % zu den Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (siehe Abbildung 14). RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

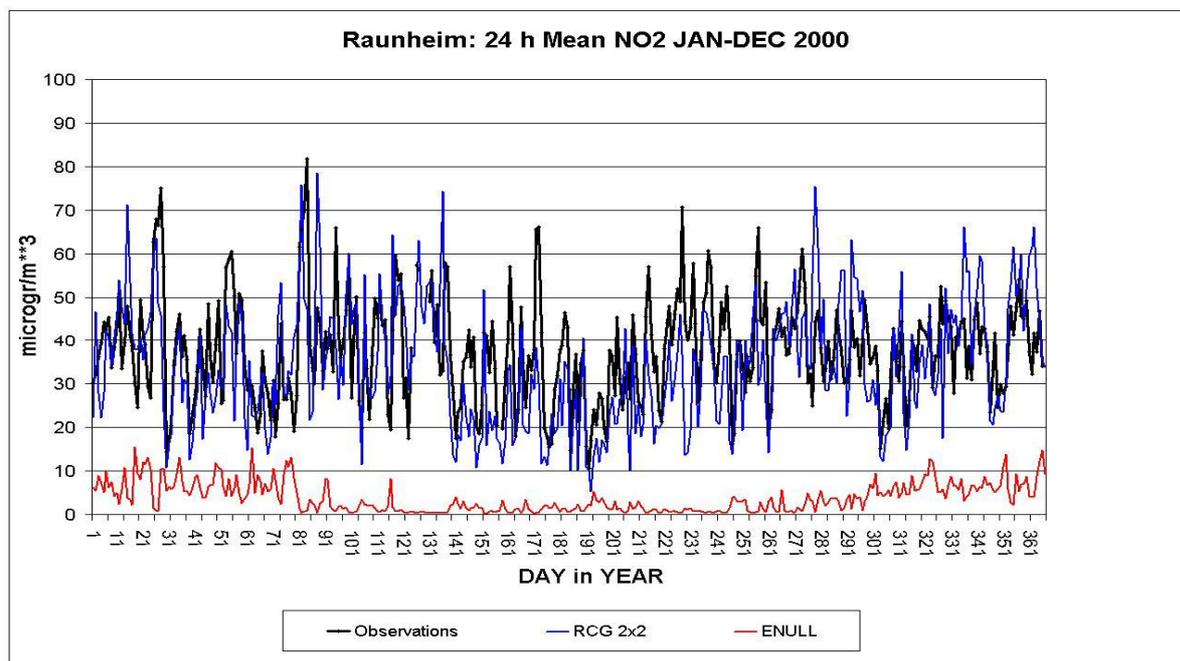
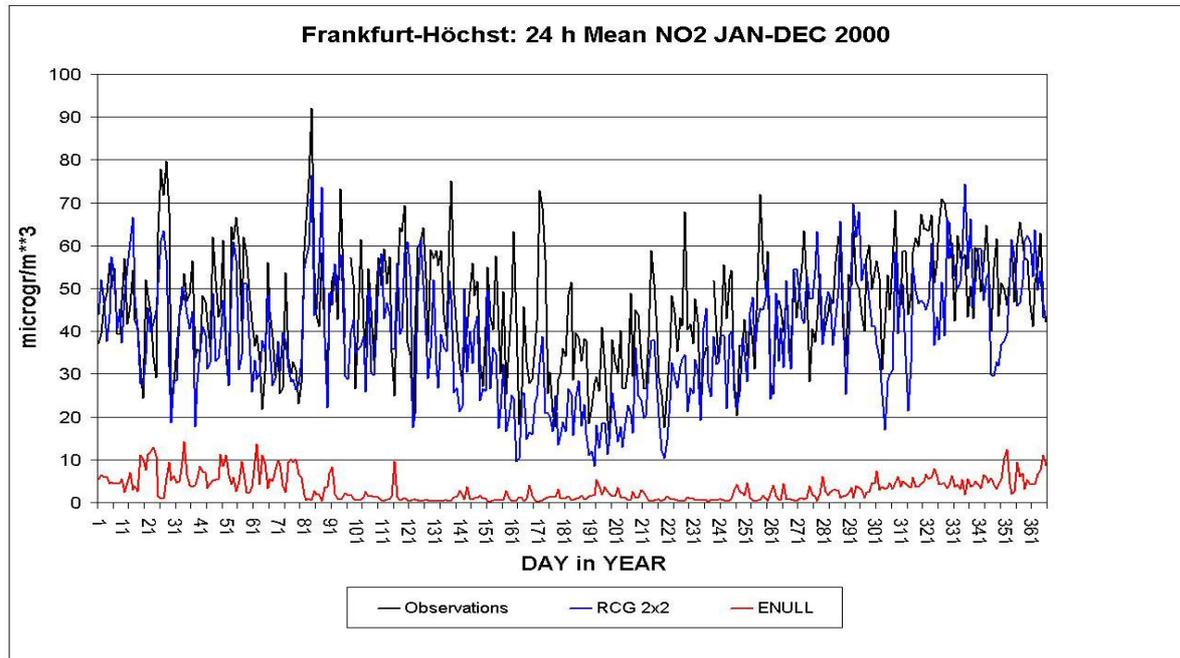


Abbildung 32: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen Mittelwerts von NO₂ in µg/m³ für die Stationen Frankfurt-Höchst und Raunheim. 2x2: Basislauf RCG in 2 km Auflösung, ENULL: Keine anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet.

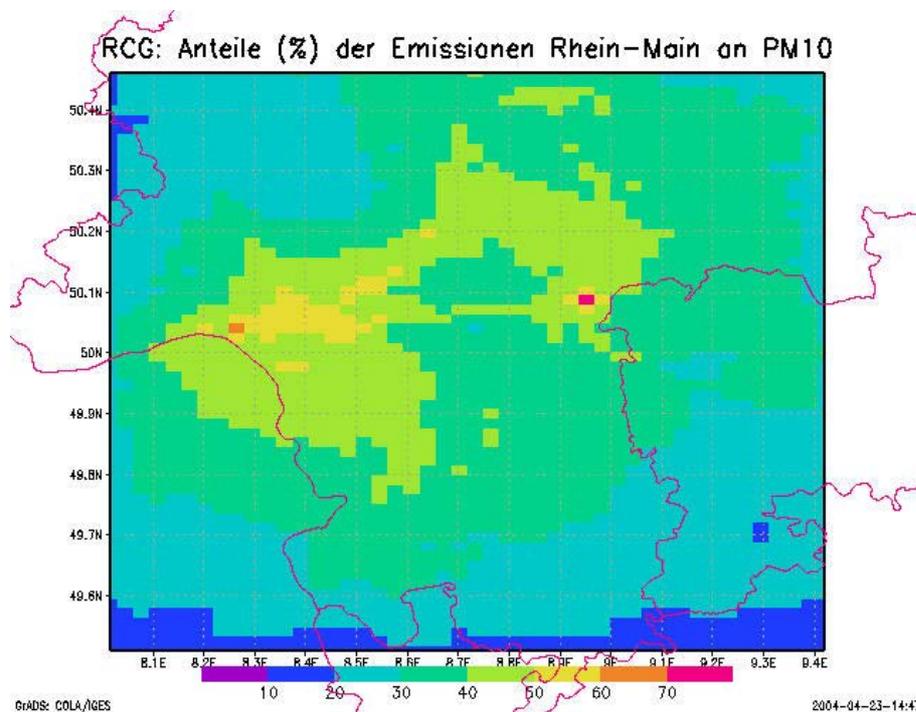
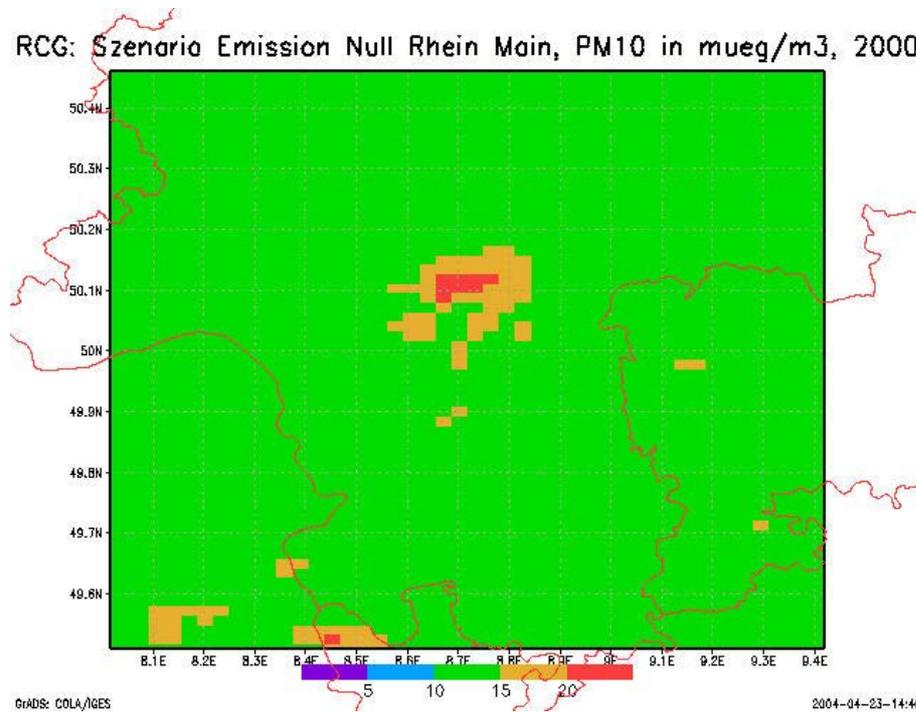


Abbildung 33: Oben: Berechneter PM10-Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null gesetzt,“. Unten: Beitrag der Emissionen Rhein-Main in % zu den Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (siehe Abbildung 15). RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

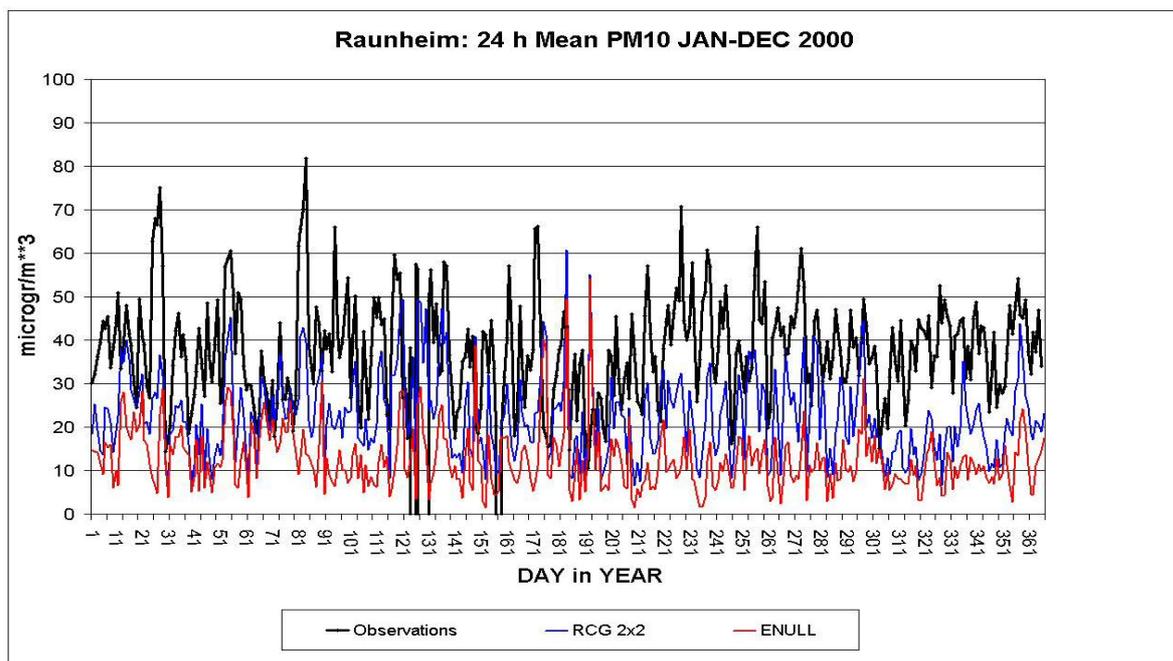
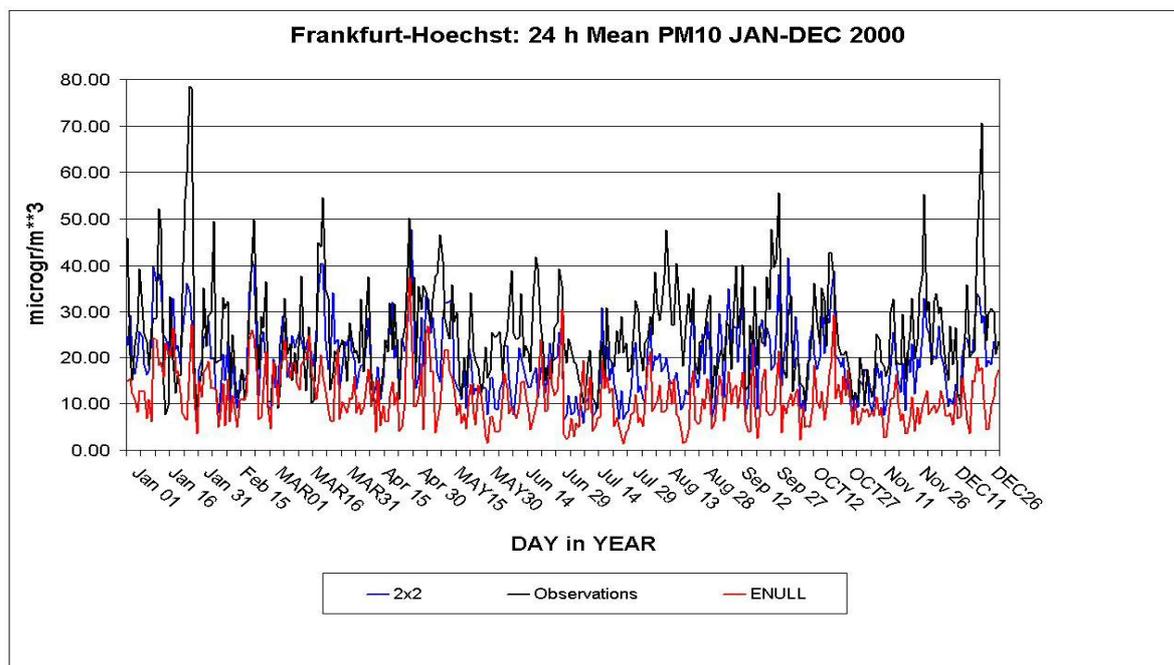


Abbildung 34: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen Mittelwerts von PM10 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Stationen Frankfurt-Höchst und Raunheim. 2x2: Basislauf RCG in 2 km Auflösung, ENULL: Keine anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet.

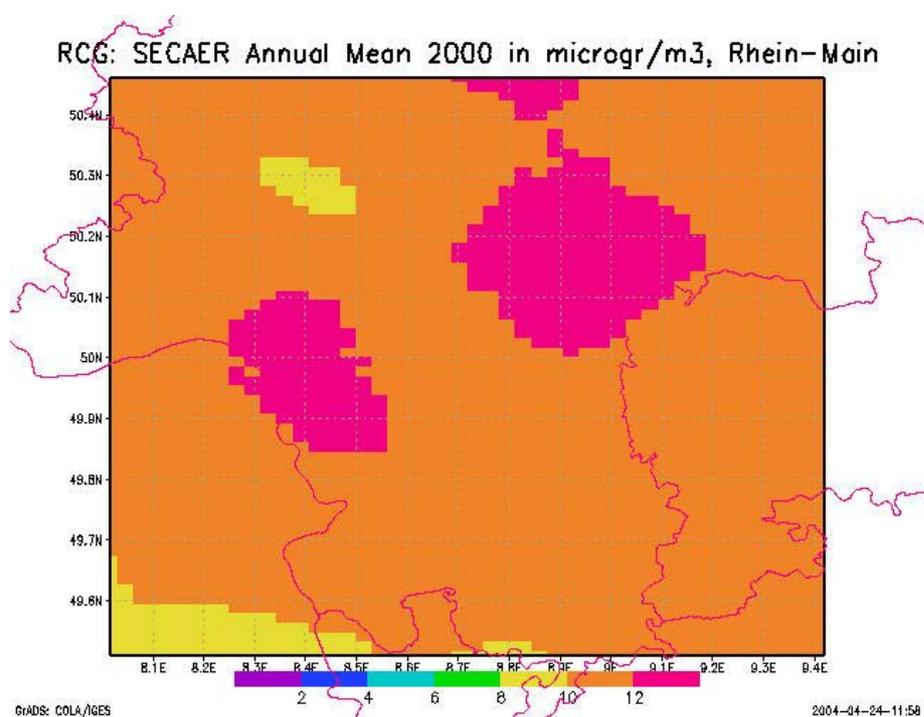
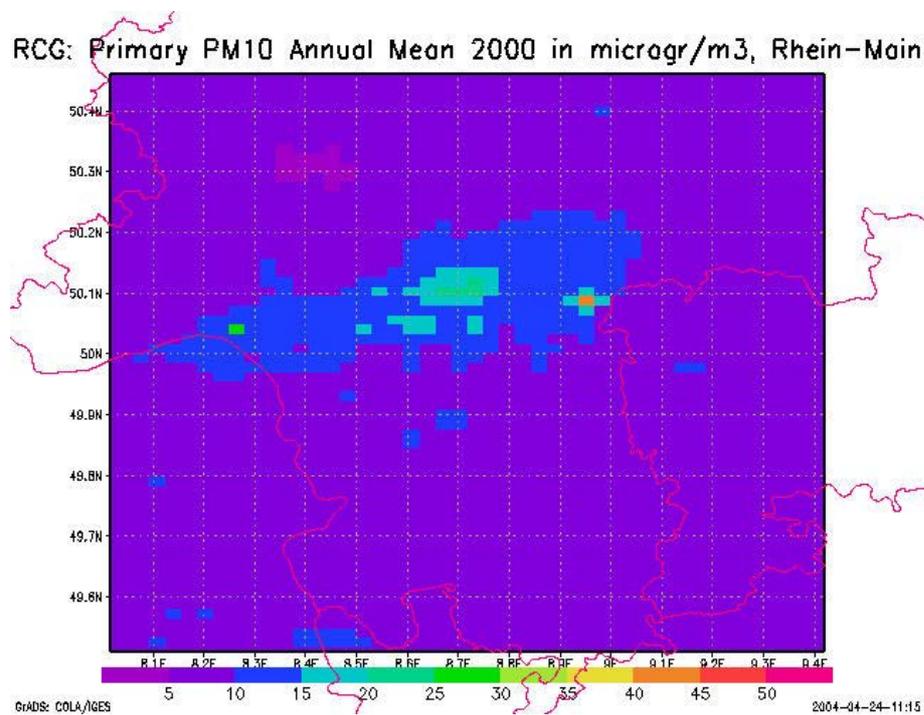


Abbildung 35: Berechneter PM10-Jahresmittelwert 2000 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main unterteilt in die primären PM10-Komponenten (oben) und die sekundären PM10-Komponenten (unten). Die Summe beider Komponenten ergibt die PM10-Gesamtkonzentrationsverteilung (Abbildung 15). RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

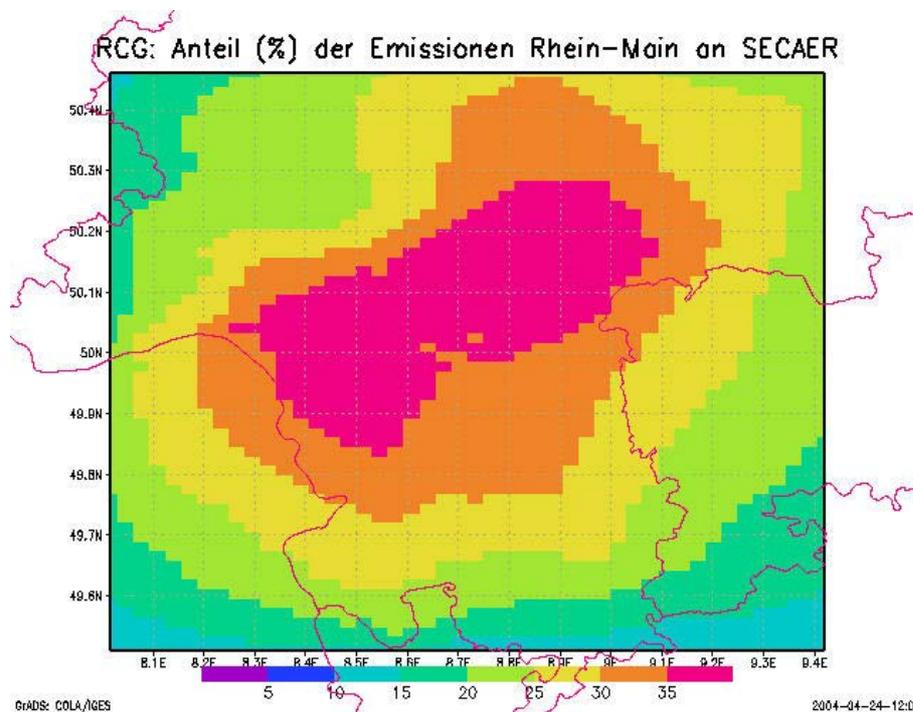
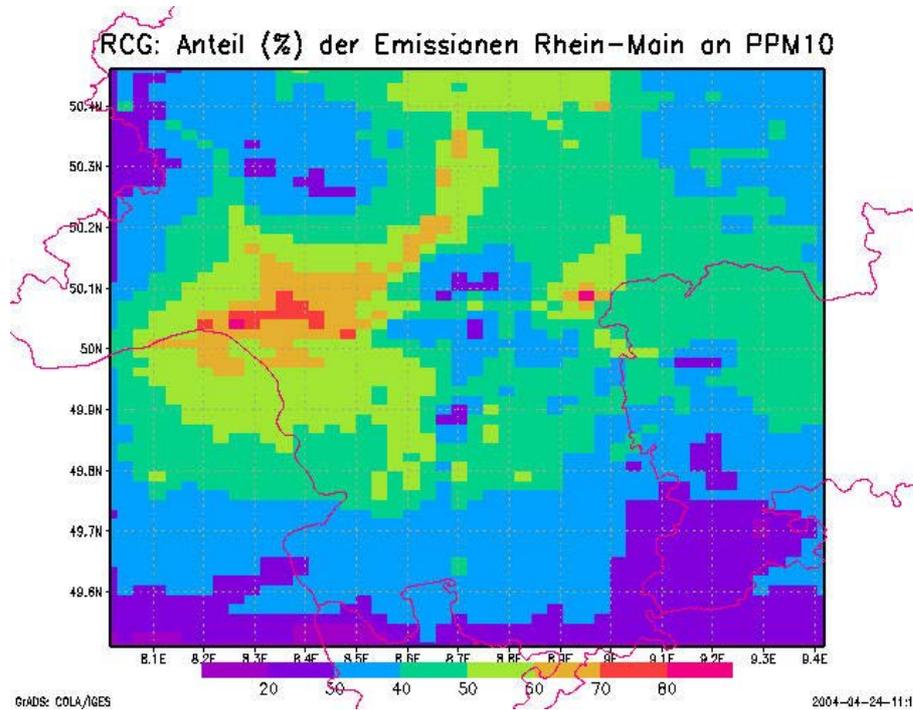


Abbildung 36: Beitrag (%) der Emissionen Rhein-Main zu den Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 der primären PM10-Komponenten (oben), bzw. der sekundären PM10-Komponenten (unten) (Absolutkonzentrationen siehe Abbildung 35). RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km².

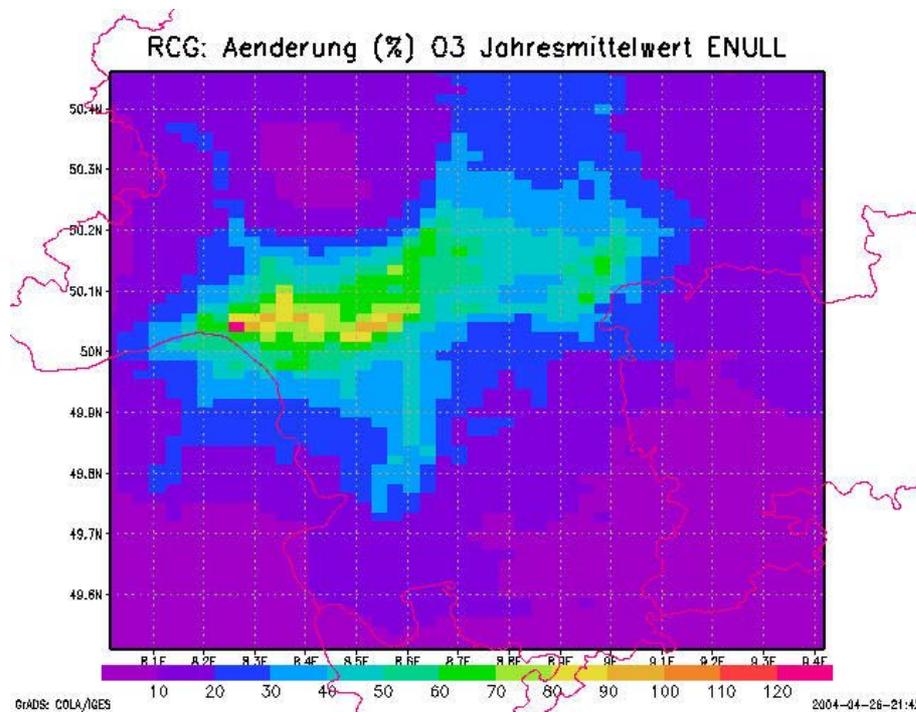
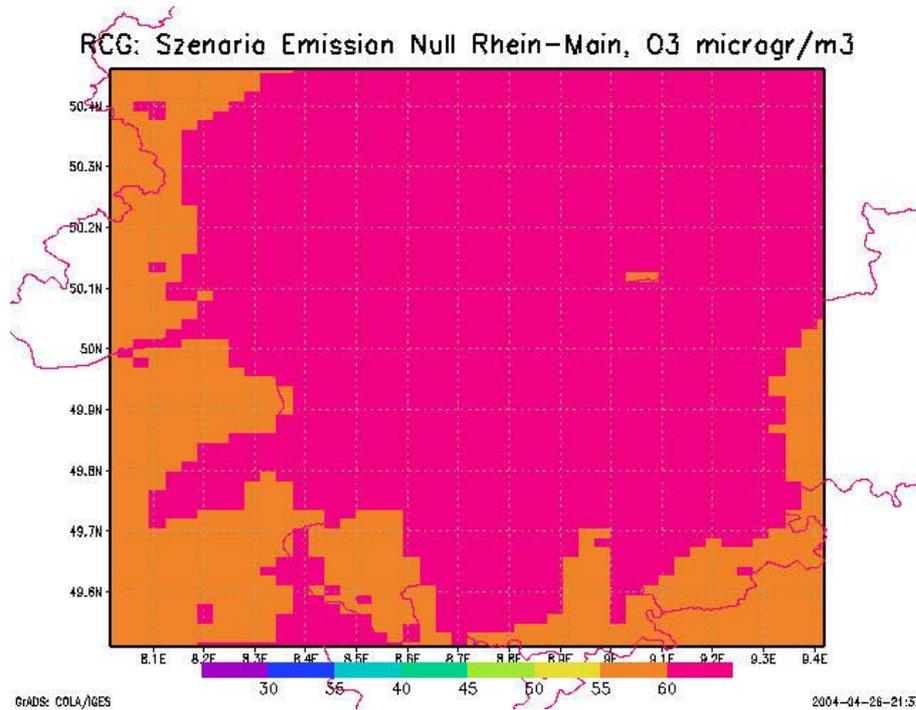


Abbildung 37: Oben: Berechneter Ozon-Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null gesetzt,“. Unten: Änderung (%) der Jahresmittelwerte des Basislaufs 2000 (siehe Abbildung 16) für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null gesetzt“. RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

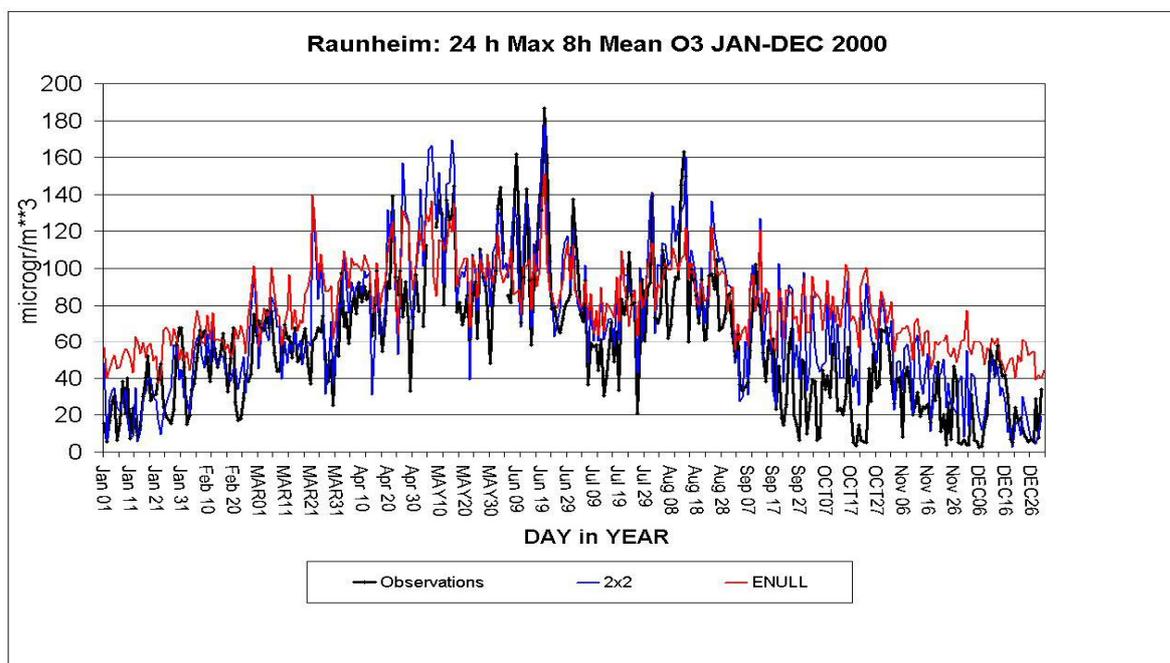
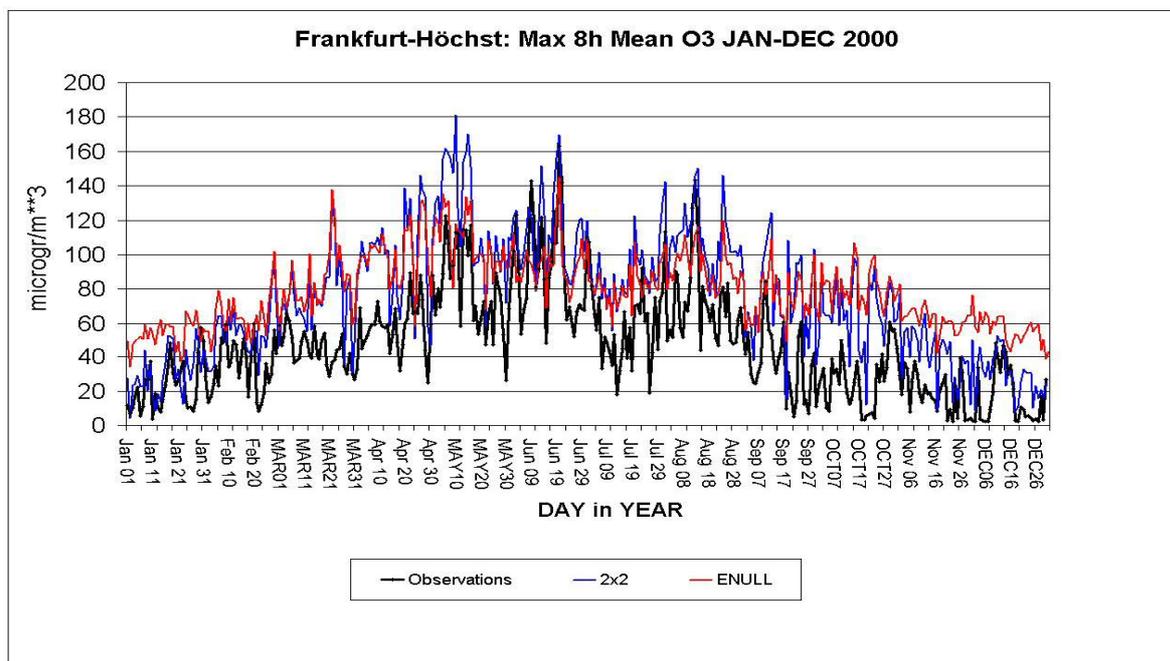


Abbildung 38: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen maximalen 8-h-Mittelwerts von Ozon in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Stationen Frankfurt-Höchst und Raunheim. 2x2: Basislauf RCG in 2 km Auflösung, ENULL: Keine anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet.

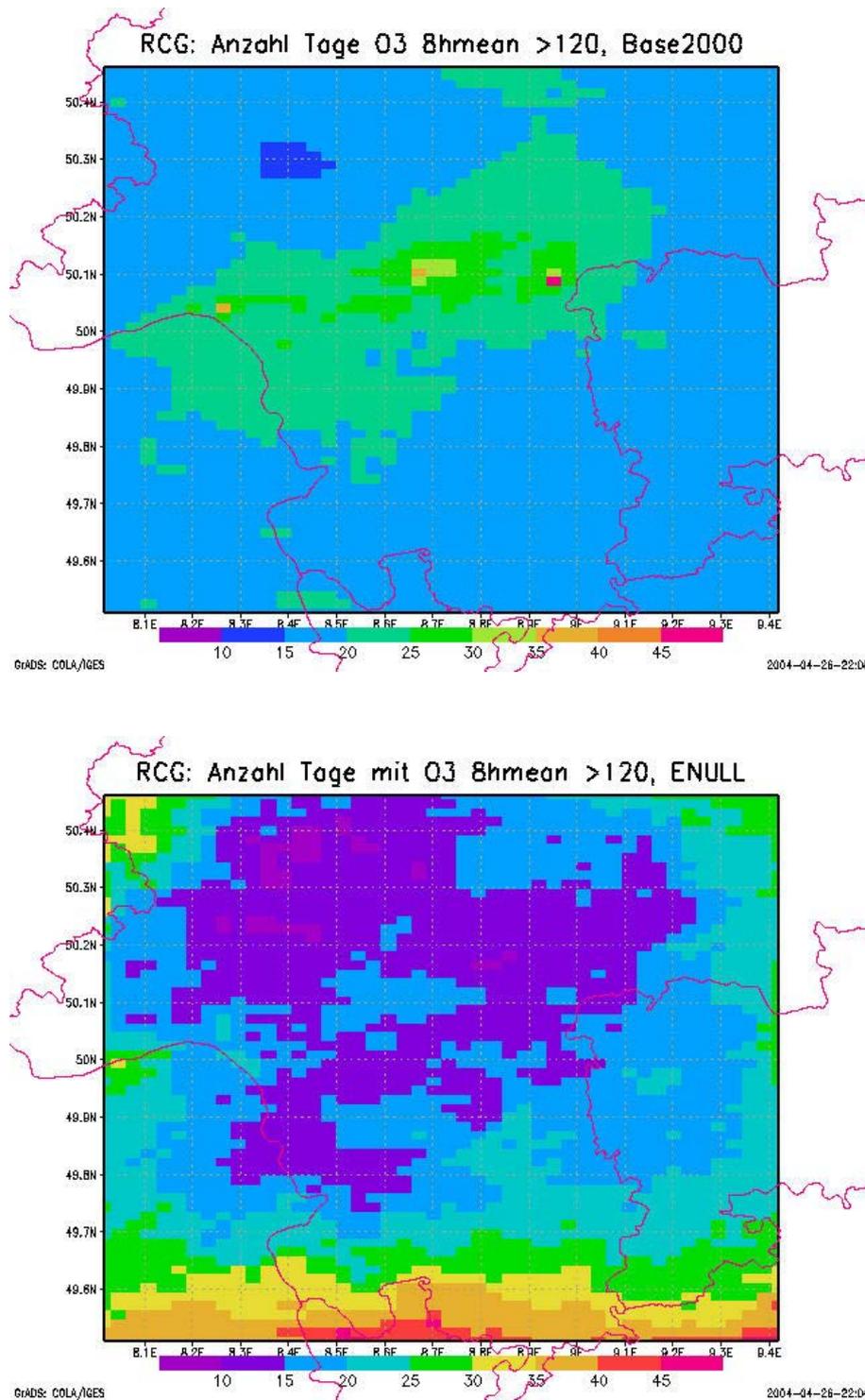


Abbildung 39: Anzahl der berechneten Tage im Jahr 2000, an denen der maximale 8-Stundenmittelwert größer 120 µg/m³ ist. Oben: Basislauf 2000. Unten: Reduzierung aller Emissionen im Rhein-Main-Gebiet auf Null. Angabe in Tagen.

4.2 Szenario Hausbrand und Kleinverbraucher Null

In diesem Szenario werden die Emissionen der Haushalte und Kleinverbraucher (Tabelle 2) in der Region Rhein-Main auf Null gesetzt. Die Minderungen umfassen auch die Gebiete, die mit Daten aus der großräumigen Datenbasis aufgefüllt wurden. Alle anderen Eingangsdaten bleiben unverändert. Im Mittel über das Untersuchungsgebiet Rhein-Main entspricht das Szenario einer Minderung der NO_x-Emissionen um circa 11% und der PM₁₀-Emissionen um circa 19%. Infolge der unterschiedlichen Beiträge der Verursachergruppen in der großräumigen und der kleinräumigen Datenbasis ergeben sich auch unterschiedliche Minderungsraten. In dem Gebiet, für das fein aufgelöste Emissionsinformationen vorliegen (Abbildung 9) beträgt die mittlere NO_x-Minderung 14% und die mittlere PM₁₀-Minderung 15%. In dem Gebiet, das mit den großräumigen Emissionen aufgefüllt wurde, ist der Beitrag der Emissionen von Hausbrand und Kleinverbrauchern bei NO_x nur 6% und beim PM₁₀ dagegen 20%. Die unterschiedliche Zusammensetzung und auch die unterschiedliche Gesamtmenge der Emissionen in den beiden hier verwendeten Emissionsdatenbasen ist eine Folge der unterschiedlichen Erhebungsweise der Daten: Die von den lokalen Behörden Emissionsdaten beruhen überwiegend auf lokal erhobenen Informationen wie Emissionserklärungen bei den industriellen Emissionen oder einzelnen Gebäude- und Heizungsinformationen beim Hausbrand. Die Kfz-Emissionen werden i. A. mit Hilfe von Emissionsmodellen berechnet. Dieser Ansatz wird als „bottom-up approach“ bezeichnet. Die hier verwendete großräumige CORINAIR-Emissionsdatenbasis der EU (Stern, 2003b) beruht dagegen auf mittleren Bilanzen der emissionsrelevanten Aktivitäten in den einzelnen Verbrauchssektoren und daraus über Emissionsfaktoren abgeleiteten Emissionsmengen. Dieser Ansatz wird als „top-down-approach“ gekennzeichnet.

Abbildung 40 zeigt die berechnete Abnahme der NO₂-Jahresmittelkonzentrationen, wenn man alle Emissionen der Verursachergruppen Hausbrand und Kleinverbraucher Null setzt. Nach den Modellrechnungen liegen die erzielbaren Abnahmen selbst im Stadtgebiet von Frankfurt, wo die höchsten Emissionen dieser Gruppe zu finden sind, unter 5 µg/m³. Den berechneten relativen Beitrag zu den Gesamtkonzentrationen kann man der Abbildung 40, unten entnehmen. Zu den Gesamtkonzentrationen tragen die Hausbrand- und Kleinverbraucheremissionen höchstens 14%, in den Stadtgebieten unter 10% bei. Diese Angaben gelten nur für eine Rechnung, bei der alle anderen Emissionen nicht verändert werden. Wie bereits ausgeführt, können diese Beiträge wegen der nichtlinearen Beziehung zwischen Emission und Immission nur als erste Näherung betrachtet werden.

Die Abnahmen der PM₁₀-Jahresmittelwerte als Folge der Nichtberücksichtigung der Emissionen des Hausbrands und der Kleinverbraucher zeigt die Abbildung 41. Die Abnahmen sind deutlich geringer als für NO₂. Der maximal berechnete absolute Beitrag zu den Gesamt-PM₁₀-Konzentrationen liegt bei 2 µg/m³, der maximale relative Beitrag unter 10%, im Stadtgebiet von Frankfurt unter 5 %.

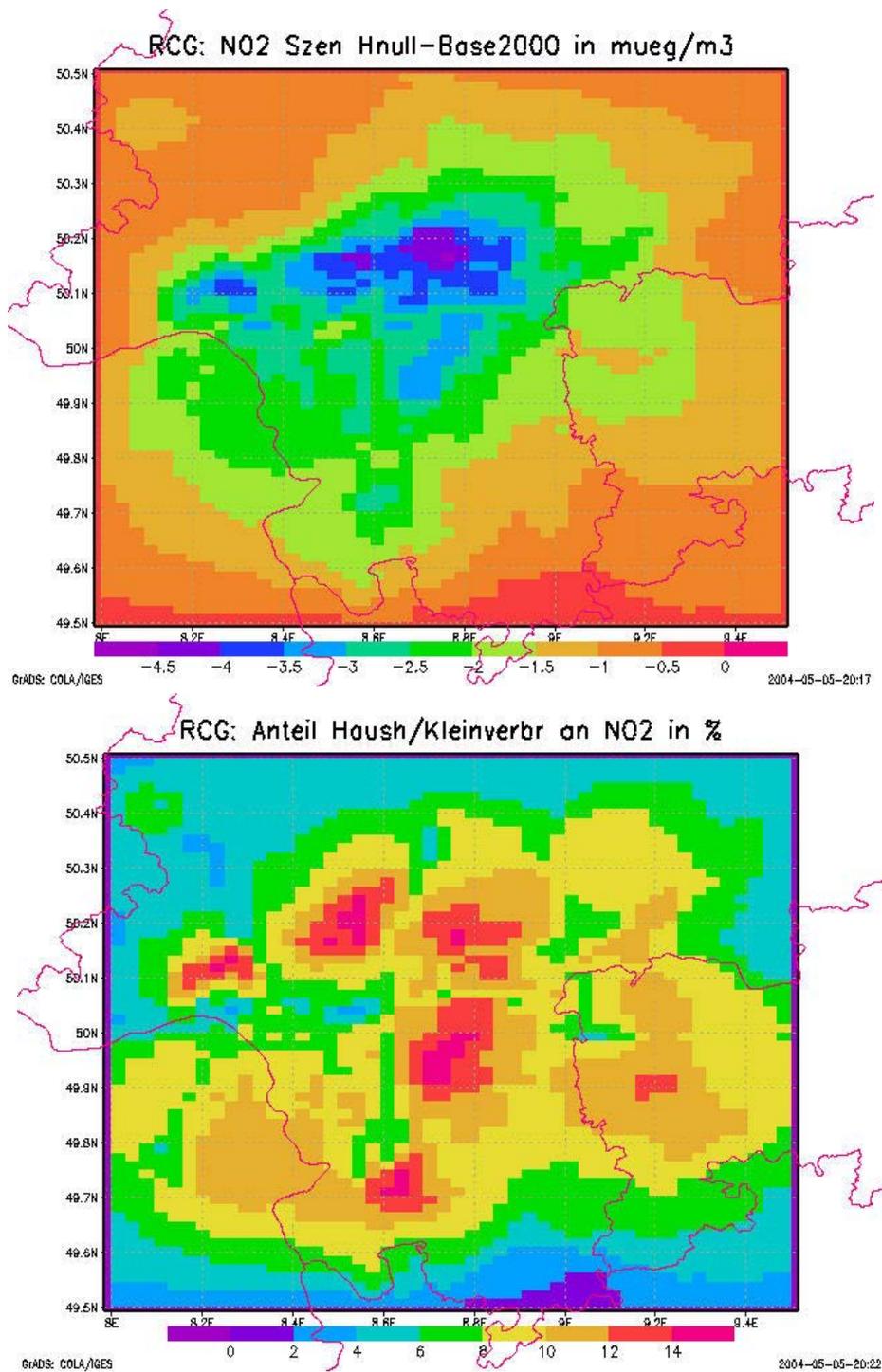


Abbildung 40: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten NO₂-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Szenario „Hausbrand- und Kleinverbraucheremissionen Null“. Unten: Beitrag in % zu den NO₂-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 14) der Emissionen der Verursachergruppen Hausbrand und Kleinverbraucher. RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

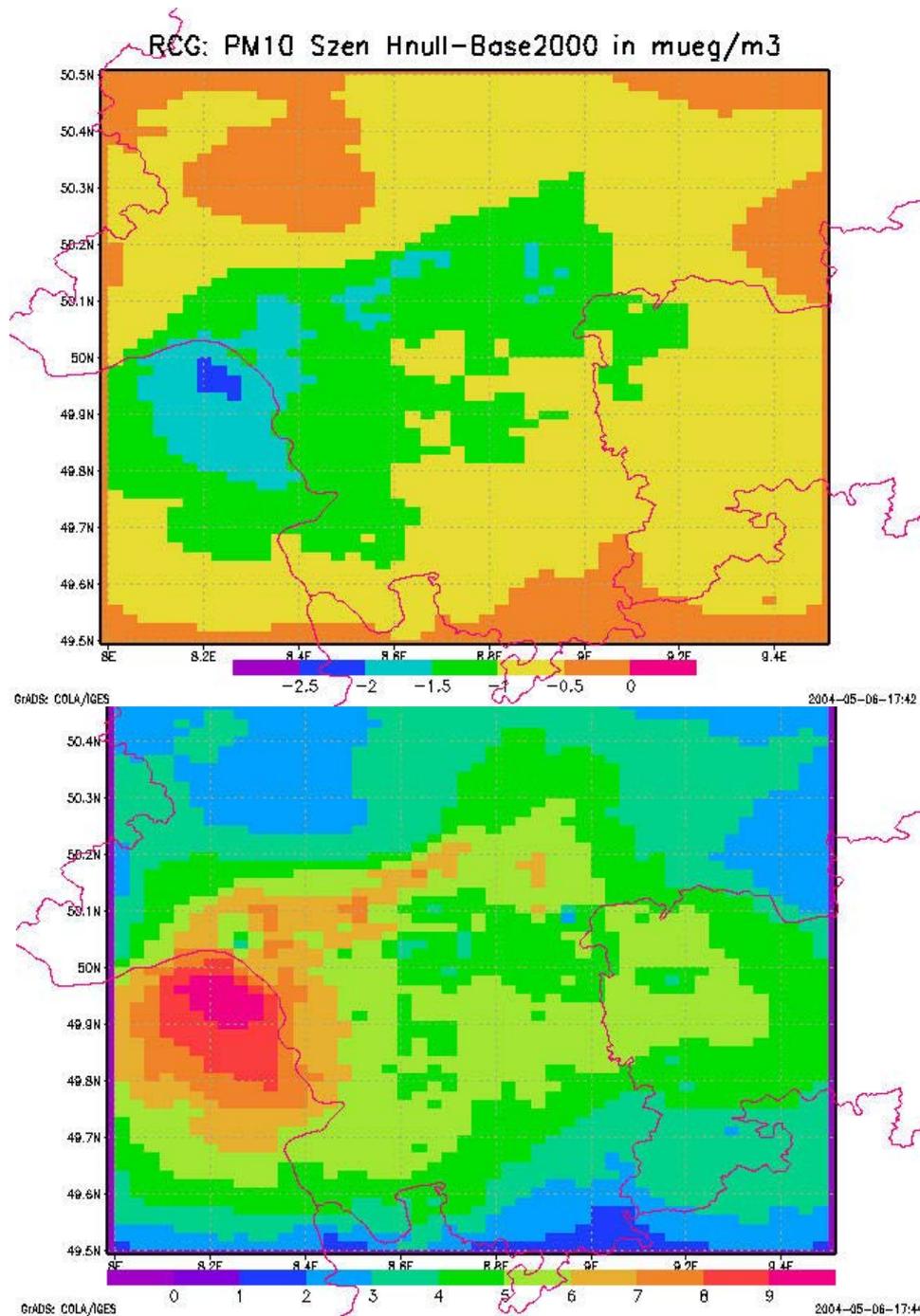


Abbildung 41: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten PM10-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Szenario „Hausbrand- und Kleinverbraucheremissionen Null“. Unten: Beitrag in % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 15) der Emissionen der Verursachergruppen Hausbrand und Kleinverbraucher. RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

4.3 Szenario Verkehr Null

In diesem Szenario werden alle Emissionen der Verursachergruppe Verkehr Null gesetzt. Dies umfasst die Emissionen des Haupt- und des Nebennetzes, die Tankemissionen und alle Verkehrsemissionen aus der großräumigen Datenbasis, die zum Auffüllen des Untersuchungsgebiets benutzt wurde (siehe Kap.2.5). Im Mittel über das Untersuchungsgebiet Rhein-Main entspricht das Verkehrs-Szenario einer Minderung der NO_x-Emissionen um circa 49% und der PM₁₀-Emissionen um circa 35%. In dem Gebiet, für das fein aufgelöste Emissionsinformationen vorliegen (Abbildung 9) beträgt die durch Nullsetzen der Verkehrsemissionen erreichbare mittlere NO_x-Minderung 58% und die mittlere PM₁₀-Minderung 57%. In dem Gebiet, das mit den großräumigen Emissionen aufgefüllt wurde, ist der Beitrag der Emissionen des Verkehrs bei NO_x nur 38% und beim PM₁₀ nur 25%.

Abbildung 42 zeigt die berechnete Abnahme der NO₂-Jahresmittelkonzentrationen für den Fall, dass alle Emissionen der Verursachergruppe Verkehr Null gesetzt werden. Die größten Abnahmen werden in denjenigen Modellboxen berechnet, in denen die Autobahnen verlaufen. Hier werden Abnahmen von 14 bis 20 µg/m³ berechnet. Dies entspricht relativen Anteilen an der gesamten NO₂-Konzentration von 40 bis 50 %. In den Stadtgebieten beträgt der hier berechnete Beitrag zu den NO₂-Jahresmitteln circa 15 µg/m³ oder circa 40% an den gesamten NO₂-Jahresmittelwerten. Wie schon ausgeführt, gelten diese Anteile nur für den Fall, dass alle anderen Emissionen unverändert bleiben.

Die Abnahmen der PM₁₀-Jahresmittelwerte als Folge der Nichtberücksichtigung der Emissionen des Verkehrs zeigt die Abbildung 43. Die Abnahmen sind deutlich geringer als für NO₂ und erreichen im Bereich der Autobahnen circa 6 µg/m³. In den Stadtgebieten reichen die Abnahmen von 2 bis 4 µg/m³. Dies entspricht etwa 8 bis 16 % der gesamten berechneten PM₁₀-Konzentrationen in diesen Gebieten.

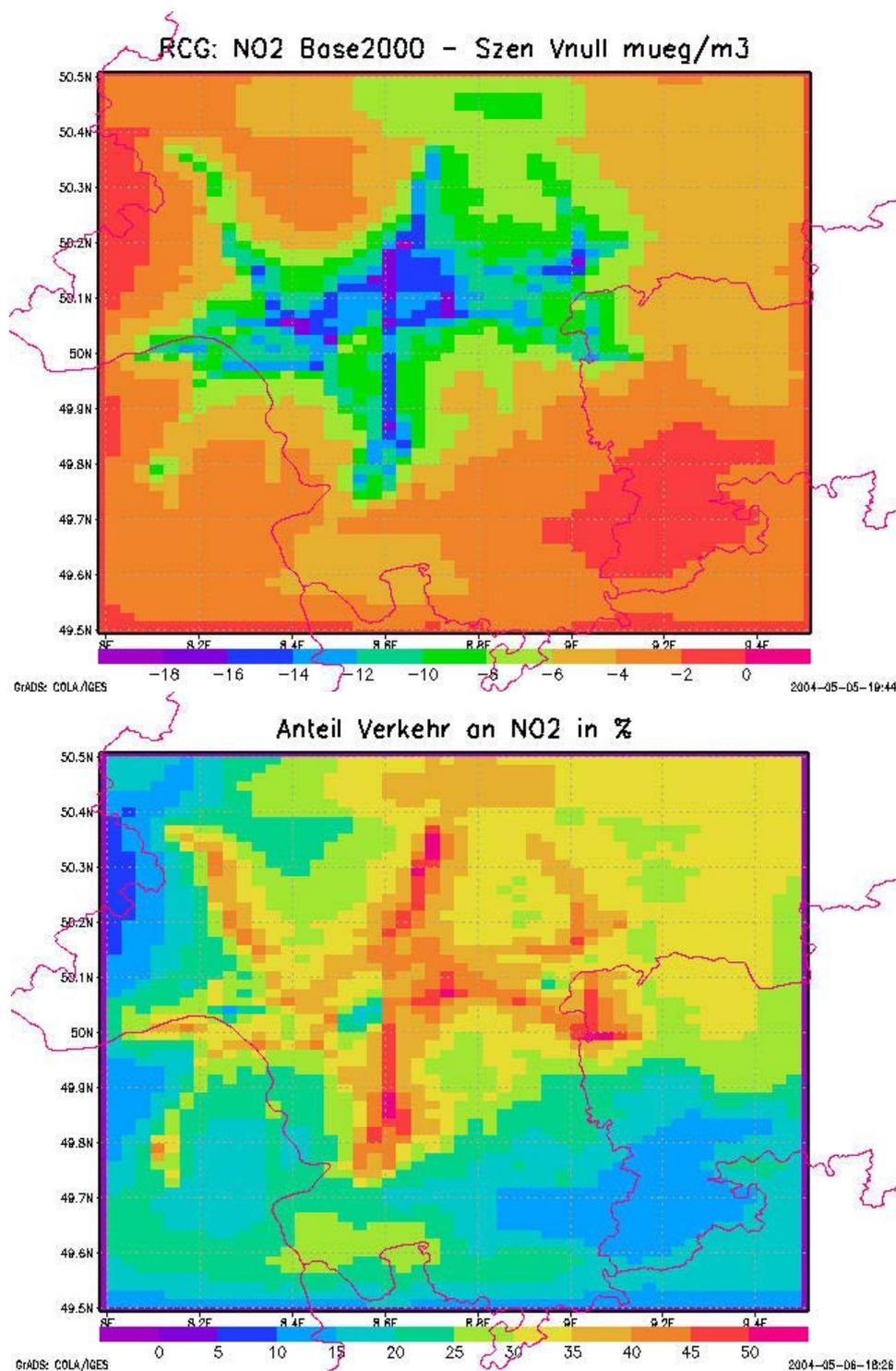


Abbildung 42: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten NO₂-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Szenario „Verkehr Null“. Unten: Beitrag in % zu den NO₂-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 14) der Emissionen der Verursacherguppe Verkehr. RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

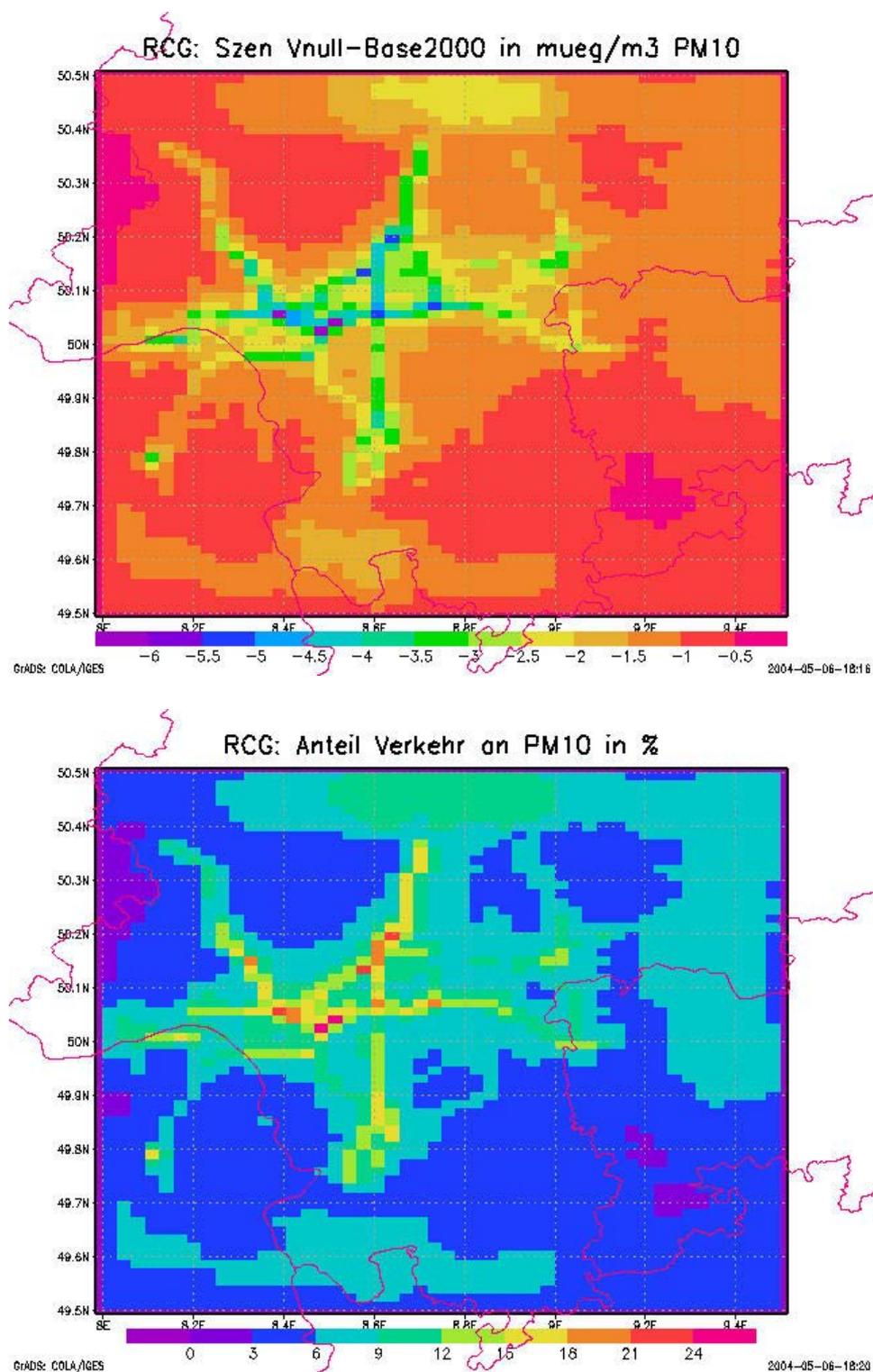


Abbildung 43: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten PM10-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Szenario „Verkehr Null“. Unten: Beitrag in % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 15) der Emissionen der Verursacherguppe Verkehr. RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

4.4 Szenario Industrie Null

In diesem Szenario werden alle Emissionen der Verursachergruppe Industrie Null gesetzt. Dieses Szenario umfasst alle Punktquellen im Kerngebiet (siehe Tabelle 2) und die Emissionen der industriellen Gruppen in der großräumigen Datenbasis, die zum Auffüllen des Untersuchungsgebiets benutzt wurde (siehe Kap.2.5). Im Mittel über das Untersuchungsgebiet Rhein-Main entspricht das Industrie-Szenario einer Minderung der NO_x-Emissionen um circa 35% und der PM₁₀-Emissionen um circa 44%. In dem Gebiet, für das fein aufgelöste Emissionsinformationen vorliegen (Abbildung 9) beträgt die mittlere NO_x-Minderung dagegen nur 19% und die mittlere PM₁₀-Minderung 27%. In dem Gebiet, das mit den großräumigen Emissionen aufgefüllt wurde, ist der Beitrag der Emissionen der industriellen Verursachergruppen bei NO_x dagegen 58% und beim PM₁₀ 52%.

Die Beiträge der industriellen Emissionen zu den NO₂-Jahresmittelwerten liegen im Großteil des Untersuchungsgebiets zwischen 3 und 12 µg/m³ (Abbildung 44). Nur an zwei industriellen Schwerpunkten, in der Region Hanau und insbesondere im Raum Wiesbaden, werden deutlich höhere Beiträge der Industrieemissionen berechnet. Die relativen Beiträge zu der berechneten Gesamtkonzentration liegen im Raum Frankfurt zwischen 5 und 15%. Wegen der insgesamt niedrigeren Immissionen außerhalb der Stadtgebiete ist dort der Beitrag der industriellen Emissionen höher, da diese wegen der im Mittel größeren Emissionshöhe weiter transportiert werden und deswegen auch der höhere Anteil der Industrieemissionen in der großräumigen CORINAIR-Datenbasis stärker zur Immission beiträgt. Die höchsten Beiträge ergeben sich aber an den schon erwähnten Industriestandorten.

Die Industriebeiträge zum PM₁₀ sind noch stärker auf die Industriestandorte im Raum Wiesbaden und Hanau konzentriert (Abbildung 45). Hier werden Beiträge über 15 µg/m³ berechnet. Im Großteil des Untersuchungsgebiets liegt der Industriebeitrag zu den PM₁₀-Jahresmitteln unter 5 µg/m³. Relativ zur gesamten PM₁₀-Konzentration entspricht dies in etwa 5 bis 25%. Nur direkt an den Industriestandorten erreicht der Industriebeitrag die 50%-Marke. Auch beim PM₁₀ ist der Beitrag der Industrieemissionen außerhalb der Stadtgebiete relativ hoch.

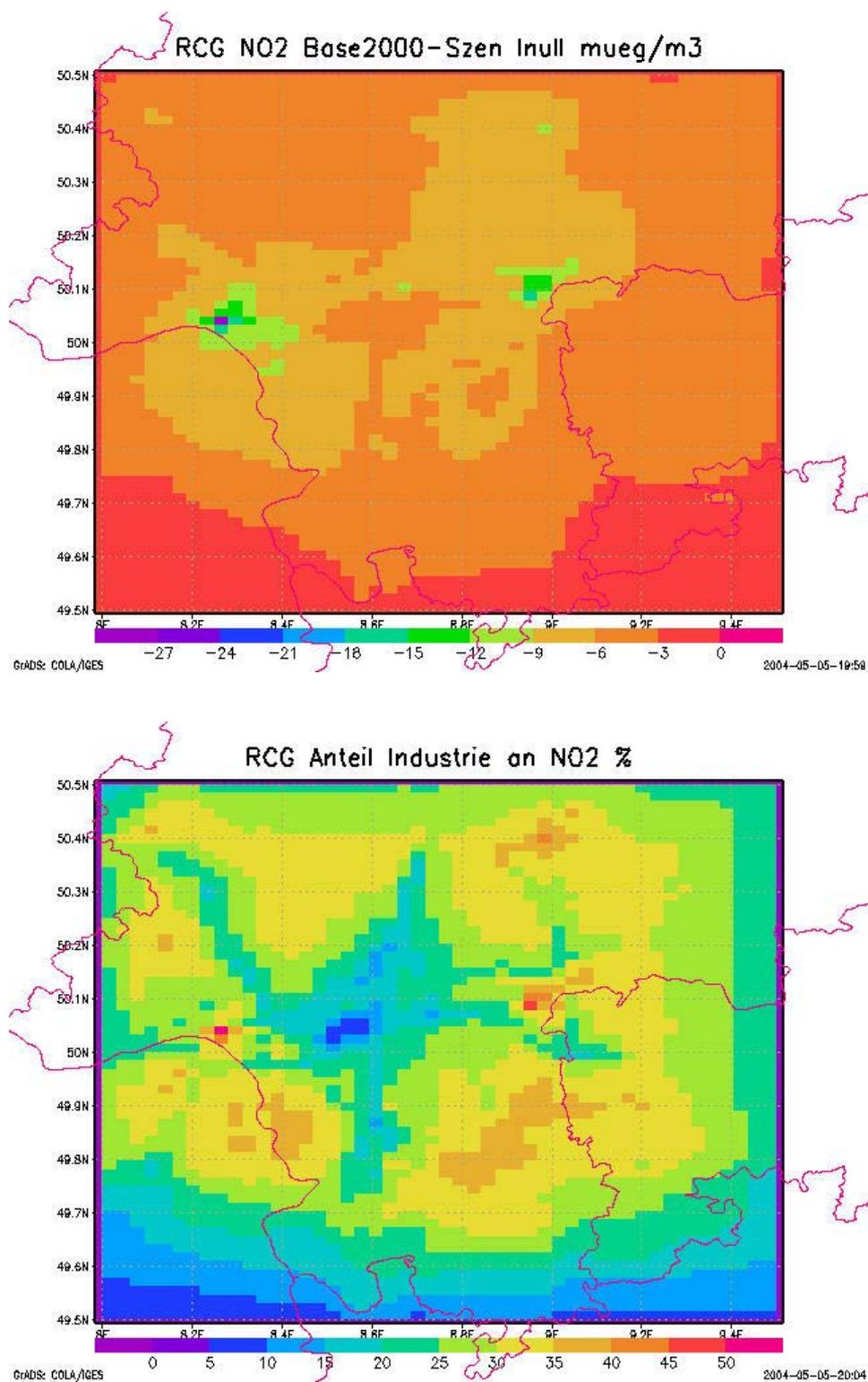


Abbildung 44: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten NO₂-Jahresmittelwerte in µg/m³ für das Szenario „Industrie Null“. Unten: Beitrag in % zu den NO₂-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 14) der Emissionen der Verursacherguppe Industrie. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km².

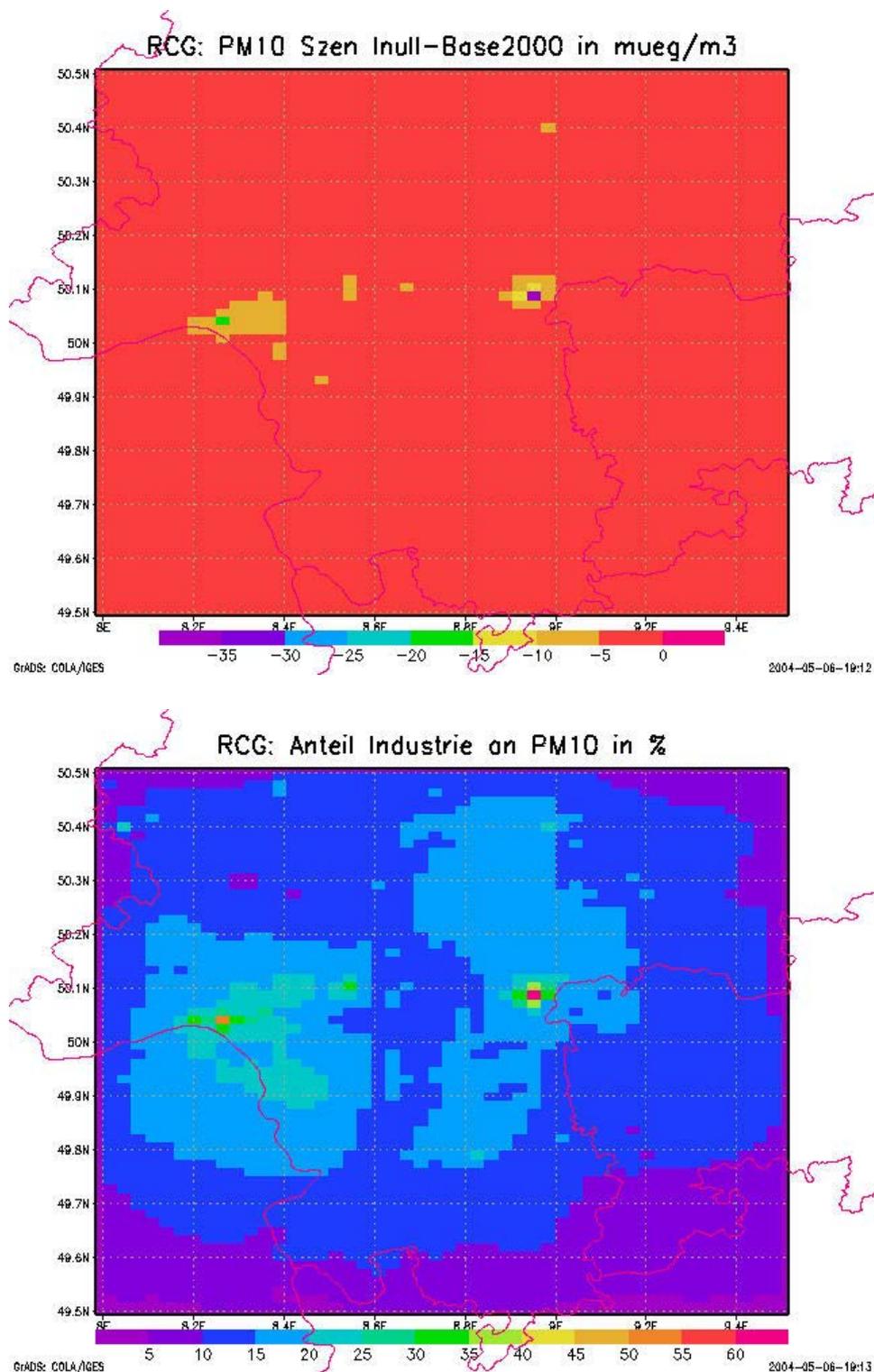


Abbildung 45: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten PM10-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Szenario „Industrie Null“. Unten: Beitrag in % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 15) der Emissionen der Verursacherguppe Industrie. RCG-Modell in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$.

5 Zusammenfassung: Vorbelastung für 15 Straßen

In Tabelle 4 bis Tabelle 7 sind die für die 15 Straßen berechnete Vorbelastung von NO₂ und PM10 zusammengestellt. Die Tabellen beruhen auf der Ausbreitungsrechnung mit der Rasterauflösung von 2x2 km² und können sich unter Umständen insbesondere im Einflussbereich von Einzelquellen von den Vorbelastungen unterscheiden, die für die CPB-Berechnungen benutzt wurden, da diese Berechnungen auf dem 1x1 km²-Raster beruhen. Die Tabellen zeigen weiterhin die absoluten und relativen Beiträge aller anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet sowie der Verursachergruppen Haushalte/Kleinverbraucher, Verkehr und Industrie zu dieser Vorbelastung. Es muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass sich die Einzelbeiträge nicht zur Gesamtbelastung addieren, da diese Einzelbeiträge wegen der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission nur als Näherung betrachtet werden sollten. Zudem wurden die Flughafenemissionen nicht in diese Betrachtung miteinbezogen. Wie schon diskutiert, ist der Beitrag der Emissionen innerhalb des Untersuchungsgebiets zu den NO₂-Immissionen deutlich höher als derjenige zu den PM10-Immissionen. Im Mittel werden 80 bis 90% der NO₂-Vorbelastung über den betrachteten Straßenschluchten durch die Emissionen im Untersuchungsgebiet erklärt. Beim PM10 tragen die Emissionen im Gebiet nur zwischen 30 und 45% zur Vorbelastung an den ausgewählten Straßen bei. Diese Angaben gelten für die Mittelwerte, und nicht für den Einzelfall.

Schätzt man die Einzelbeiträge der betrachteten Verursachergruppen ab, so erhält man die in Tabelle 3 zusammengestellten Relationen, die auf den Beitrag der Verursachergruppe Haushalte/Kleinverbraucher normiert sind. Im Mittel ist danach der Beitrag der Verkehrsemissionen zu den NO₂-Immissionen circa 4x höher, der der Industrie circa 2 bis 3x höher als der Beitrag der Haushalte/Kleinverbraucher. Beim PM10 liefern die Industrieemissionen den größten Beitrag der betrachteten Gruppen, was zum Teil mit dem hohen Anteil der industriellen Verursachergruppen in der großräumigen Emissionsdatenbasis zusammenhängt. Naturgemäß hängt der Beitrag der Industrie auch sehr stark von der geographischen Lage der Anlagen und der betrachteten Straßen ab. Die in Tabelle 3 abgeschätzten Verhältnisse sollten daher nicht verallgemeinert werden. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass der Beitrag des Verkehrs wahrscheinlich unterschätzt wird, da insbesondere der Beitrag des Verkehrs in der nächsten Nachbarschaft der betrachteten Straße von einem Gittermodell mit der Auflösung von 1x1 km² nicht adäquat berechnet werden kann.

| | NO ₂ -Jahresmittelwert | PM10-Jahresmittelwert |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Haushalte/Kleinverbraucher | 1 | 1 |
| Industrie | 2-3 | 2-3 |
| Verkehr | 4 | 2 |
| | | |

Tabelle 3: Relative Beiträge der betrachteten Verursachergruppen zu den mittleren Vorbelastungen für die 15 ausgewählten Straßen, normiert auf den Beitrag der Haushalte/Kleinverbraucher. Weitere Erläuterungen im Text.

| NO2 | Vorbelastung für den Straßenraum | Vorbelastung 2000 µg/m3 | Beitrag aller Emis- sionen im Gebiet Rhein-Main µg/m3 | Beitrag Verkehr µg/m3 | Beitrag Hausbrand/Kleinverbraucher µg/m3 | Beitrag Industrie µg/m3 |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|
| | F-Bleichstrasse | 34.6 | 31.8 | 14.3 | 3.6 | 7.5 |
| | F-Bockenheimer-Str | 35.9 | 33 | 14.5 | 3.4 | 6.4 |
| | F-Eschenheimer-Landstr | 37.3 | 34.4 | 14.7 | 3.4 | 8.2 |
| | F-Friedberger-Landstr | 35.4 | 32.6 | 14.9 | 3.7 | 7.2 |
| | F-Hochstr | 37.3 | 34.4 | 14.7 | 3.4 | 8.2 |
| | F-Hoehenstr | 35.4 | 32.6 | 14.9 | 3.7 | 7.2 |
| | F-Mainzer-Landstr | 37.3 | 34.4 | 14.7 | 3.4 | 8.2 |
| | F-Taunusstr | 37.3 | 34.4 | 14.7 | 3.4 | 8.2 |
| | OF-Waldstr | 30.9 | 28.1 | 13.7 | 3.4 | 6.9 |
| | DA-Huegelstr | 28.5 | 25 | 12.4 | 2.3 | 6 |
| | DA-Bleichstr | 28.5 | 25 | 12.4 | 2.3 | 6 |
| | DA-Rhoenring | 26.5 | 23 | 11.1 | 2.3 | 6.4 |
| | WI-Rheinstrasse | 28.6 | 23.8 | 9.1 | 2.8 | 7 |
| | WI-Kaiser-Friedrich-Ring | 32.6 | 27.8 | 10.4 | 2.6 | 8.4 |
| | WI-Schliersteinerstr | 32.6 | 27.8 | 10.4 | 2.6 | 8.4 |

Tabelle 4: Berechnete NO₂-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 15 Straßen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. Beitrag aller anthropogenen Emissionen im Gebiet, der Verkehrsemissionen, der Emissionen der Haushalte und Kleinverbraucher sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Wegen der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission, dem geräumigen Beitrag sowie der Nichtbetrachtung der Flughafenemissionen addieren sich die Einzelbeiträge nicht zur gesamten Vorbelastung. RCG-Rechnung mit 2x2 km²-Auflösung.

| NO ₂ | Vorbelastung für den Straßenraum | Vorbelastung 2000 µg/m ³ | Beitrag aller Emis- sionen im Gebiet Rhein-Main % | Beitrag Verkehr % | Beitrag Hausbrand/Kleinverbraucher | | Beitrag Industrie % |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------|
| | | | | | Hausbrand/Kleinverbraucher % | Industrie % | |
| | F-Bleichstrasse | 34.6 | 91.9 | 41.3 | 10.4 | | 21.7 |
| | F-Bockenheimer-Str | 35.9 | 91.9 | 40.4 | 9.5 | | 17.8 |
| | F-Eschenheimer-Landstr | 37.3 | 92.2 | 39.4 | 9.1 | | 22.0 |
| | F-Friedberger-Landstr | 35.4 | 92.1 | 42.1 | 10.5 | | 20.3 |
| | F-Hochstr | 37.3 | 92.2 | 39.4 | 9.1 | | 22.0 |
| | F-Hoehenstr | 35.4 | 92.1 | 42.1 | 10.5 | | 20.3 |
| | F-Mainzer-Landstr | 37.3 | 92.2 | 39.4 | 9.1 | | 22.0 |
| | F-Taunusstr | 37.3 | 92.2 | 39.4 | 9.1 | | 22.0 |
| | OF-Waldstr | 30.9 | 90.9 | 44.3 | 11.0 | | 22.3 |
| | DA-Huegelstr | 28.5 | 87.7 | 43.5 | 8.1 | | 21.1 |
| | DA-Bleichstr | 28.5 | 87.7 | 43.5 | 8.1 | | 21.1 |
| | DA-Rhoenring | 26.5 | 86.8 | 41.9 | 8.7 | | 24.2 |
| | WI-Rheinstrasse | 28.6 | 83.2 | 31.8 | 9.8 | | 24.5 |
| | WI-Kaiser-Friedrich-Ring | 32.6 | 85.3 | 31.9 | 8.0 | | 25.8 |
| | WI-Schiersteinerstr | 32.6 | 85.3 | 31.9 | 8.0 | | 25.8 |

Tabelle 5: Berechnete NO₂-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 15 Straßen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. Relativer Beitrag aller anthropogenen Emissionen im Gebiet, der Verkehrsemissionen, der Emissionen der Haushalte und Kleinverbraucher sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Wegen der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission, dem großräumigen Beitrag sowie der Nichtbetrachtung der Flughafenemissionen addieren sich die relativen Einzelbeiträge nicht zu 100%. RCG-Rechnung mit 2x2 km²-Auflösung.

| PM10 | Vorbelastung für den Straßenraum | Vorbelastung 2000 µg/m ³ | Beitrag aller Emissionen im Gebiet Rhein-Main µg/m ³ | Beitrag Verkehr µg/m ³ | Beitrag Haus- brand/Kleinverbraucher µg/m ³ | Beitrag Industrie µg/m ³ |
|------|-------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| | F-Bleichstrasse | 31.6 | 10.0 | 2.8 | 1.4 | 3.9 |
| | F-Bockenheimer-Str | 26.8 | 9.5 | 2.7 | 1.3 | 3.3 |
| | F-Eschenheimer-Landstr | 30.7 | 10.4 | 2.8 | 1.3 | 4.1 |
| | F-Friedberger-Landstr | 29 | 10.0 | 3.1 | 1.5 | 3.6 |
| | F-Hochstr | 30.7 | 10.4 | 2.8 | 1.3 | 4.1 |
| | F-Hoehenstr | 29 | 10.0 | 3.1 | 1.5 | 3.6 |
| | F-Mainzer-Landstr | 30.7 | 10.4 | 2.8 | 1.3 | 4.1 |
| | F-Taunusstr | 30.7 | 10.4 | 2.8 | 1.3 | 4.1 |
| | OF-Waldstr | 28.9 | 9.3 | 2.5 | 1.3 | 3.2 |
| | DA-Huegelstr | 20.8 | 8.5 | 2.5 | 1.1 | 2.8 |
| | DA-Bleichstr | 20.8 | 8.5 | 2.5 | 1.1 | 2.8 |
| | DA-Rhoenring | 20.1 | 7.7 | 2.0 | 0.9 | 2.6 |
| | WI-Rheinstrasse | 19.9 | 7.7 | 1.8 | 1.1 | 3.2 |
| | WI-Kaiser-Friedrich-Ring | 21.2 | 8.8 | 2.2 | 1.1 | 3.6 |
| | WI-Schiersteinerstr | 21.2 | 8.8 | 2.2 | 1.1 | 3.6 |

Tabelle 6: Berechnete PM10-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 15 Straßen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. Beitrag aller anthropogenen Emissionen im Gebiet, der Verkehrsemissionen, der Emissionen der Haushalte und Kleinverbraucher sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Wegen der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission, dem großräumigen Beitrag sowie der Nichtbetrachtung der Flughafenemissionen addieren sich die Einzelbeiträge nicht zur gesamten Vorbelastung. RCG-Rechnung mit 2x2 km²-Auflösung.

| PM10 | Vorbelastung für den Straßenraum | Vorbelastung 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Beitrag aller Emis- sionen im Gebiet Rhein-Main % | Beitrag Verkehr % | Beitrag Hausbrand/Kleinverbraucher | | Beitrag Industrie % |
|------|-------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------|
| | | | | | Hausbrand/Kleinverbraucher % | Industrie % | |
| | F-Bleichstrasse | 31.6 | 31.6 | 8.9 | 4.4 | 12.3 | 12.3 |
| | F-Bockenheimer-Str | 26.8 | 35.4 | 10.1 | 4.9 | 12.3 | 12.3 |
| | F-Eschenheimer-Landstr | 30.7 | 33.9 | 9.1 | 4.2 | 13.4 | 13.4 |
| | F-Friedberger-Landstr | 29 | 34.5 | 10.7 | 5.2 | 12.4 | 12.4 |
| | F-Hochstr | 30.7 | 33.9 | 9.1 | 4.2 | 13.4 | 13.4 |
| | F-Hoehenstr | 29 | 34.5 | 10.7 | 5.2 | 12.4 | 12.4 |
| | F-Mainzer-Landstr | 30.7 | 33.9 | 9.1 | 4.2 | 13.4 | 13.4 |
| | F-Taunusstr | 30.7 | 33.9 | 9.1 | 4.2 | 13.4 | 13.4 |
| | OF-Waldstr | 28.9 | 32.2 | 8.7 | 4.5 | 11.1 | 11.1 |
| | DA-Huegelstr | 20.8 | 40.9 | 12.0 | 5.3 | 13.5 | 13.5 |
| | DA-Bleichstr | 20.8 | 40.9 | 12.0 | 5.3 | 13.5 | 13.5 |
| | DA-Rhoenring | 20.1 | 38.3 | 10.0 | 4.5 | 12.9 | 12.9 |
| | WI-Rheinstrasse | 19.9 | 38.7 | 9.0 | 5.5 | 16.1 | 16.1 |
| | WI-Kaiser-Friedrich-Ring | 21.2 | 41.5 | 10.4 | 5.2 | 17.0 | 17.0 |
| | WI-Schiersteinerstr | 21.2 | 41.5 | 10.4 | 5.2 | 17.0 | 17.0 |

Tabelle 7: Berechnete PM10-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 15 Straßen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. Relativer Beitrag aller anthropogenen Emissionen im Gebiet, der Verkehrsemissionen, der Emissionen der Haushalte und Kleinverbraucher sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Wegen der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission, dem großräumigen Beitrag sowie der Nichtbetrachtung der Flughafenemissionen addieren sich die relativen Einzelbeiträge nicht zu 100%. RCG-Rechnung mit $2 \times 2 \text{ km}^2$ -Auflösung.

6 Literatur

- Düring, I., Lambrecht, U., Peranic, Z., Weber, G., Lohmeyer, A. (2002). Determination of „non-exhaust“ PM10 emissions of roads on the basis of the results of the roadside air quality monitoring of the German states. Particles in the size of 2.5 to 10 microns in urban areas. Workshop in support of the Clean Air for Europe (CAFE) programme of DG ENV in Berlin, Germany, November 4-6, 2002. www.trumf.fu-berlin.de/veranstaltungen
- EU (1996). Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27.9.1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 296/55 vom 21.11. 1996
- EU (1999). Richtlinie 1999/30/EG des Rats vom 22.4.1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 163/41 vom 29.6. 1999.
- EU (2000). Richtlinie 2000/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rats vom 16.11.2000 über Grenzwerte für Benzol und Kohlenmonoxid in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 313/12 vom 13.12. 2000.
- EU (2002). Richtlinie 2002/3/EG des Europäischen Parlaments und des Rats vom 12.2.2002 über den Ozongehalt der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 67/14 vom 9.3. 2002.
- Hanna S.R. und Paine R.J. (1989). Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) Development and Evaluation. J. of Appl. Met., Vol.28, pp. 206-224
- Ingenieurbüro Janicke (2003). AUSTAL2000 Programmbeschreibung zu Version 1.0. Stand 2003-02-09. Entwicklung eines modellgestützten Beurteilungssystems für den anlagenbezogenen Immissionsschutz. UBA F&E-Bericht 200 43 256.
- Kerschbaumer, A. und Reimer, E. (2003). Erstellung der Meteorologischen Eingangsdaten für das REM/CALGRID-Modell: Modellregion Berlin-Brandenburg. Abschlussbericht zum UBA-Forschungsvorhaben FE-Vorhaben 299 43 246. Freie Universität Berlin. Institut für Meteorologie.
- Motz, G., Hartmann, A., Plinke, E., Stern, R., Scherer, B., Fath, J., Reimer, E., Memmesheimer, M., Tippke, J., Ebel, A. (1997). Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon: Ermittlung und Bewertung der Effekte von lokalen, regionalen und überregionalen Emissionsminderungs-Strategien auf bodennahe Ozonkonzentrationen in hochsommerlichen Episoden mit Hilfe modellgestützter emissions- und immissionsseitiger Wirkungsanalysen. Kurzfassung. Im Auftrag des Umweltbundesamts. www.umweltbundesamt.de/ozon.
- Ostmann, C., Stern, R., Wiegand, G. (1996). Canyon Plume Box Modell, Version 3 ,Release 8, Handbuch. IVU Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung mbH. Abschlussbericht zum FE-Vorhaben 104 02 811 des Umweltbundesamts, Berlin.
- 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
- Stern, R., Kerschbaumer, A., Fath, J., (2003). Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID auf die Region Berlin-Brandenburg. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 29943 246 auf dem Gebiet des Umweltschutzes „Entwicklung eines Modellsystems für das Zusammenspiel von Messung und Rechnung für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität“.
- Stern, R. (2003a). Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“.
- Stern, R. (2003b). Erstellung einer europaweiten Emissionsdatenbasis mit Bezugsjahr 1995 und die Erarbeitung von Emissionsszenarien für die großräumigen Ausbreitungsrechnungen mit

REM/CALGRID. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“.

Stern, R. (1994). Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen photochemischen Ausbreitungsmodells mit verschiedenen chemischen Mechanismen, Meteorologische Abhandlungen Serie A Band 8, Heft 1 (1994). Verlag von Dietrich Reimer, Berlin.

Van Ulden A.P. und 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.

Yamartino, R. J., Wiegand, G.: Development and Evaluation of Simple Models for the Flow, Turbulence and Pollutant Concentration Fields within an Urban Street Canyon; *Atmospheric Environment* Vol.20, No.11, pp 2137-2156; 1986

Yamartino, R., et al. (1989). A mesoscale photochemical grid model. Model formulation. *Atm. Env.* 26A, pp.1493-1512.

7 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Großräumiges REM/CALGRID-Modellgebiet mit einer Maschenweite von 0.25° Breite und 0.5° Länge. | 3 |
| Abbildung 2: Untersuchungsgebiet Ballungsraum Rhein-Main. Die Grenzen in einem geographischen Koordinatensystem liegen bei: 8,0° Ost bis 9,5° Ost, 49,5° Nord bis 50,5° Nord. Maschenweite ist 0,015625° Länge und 0,0078125° Breite. | 5 |
| Abbildung 3: Topographie in den Rastern des Untersuchungsgebiets Rhein-Main | 6 |
| Abbildung 4: Vorherrschende Landnutzungsklassen in den Rastern des Untersuchungsgebiets Rhein-Main. | 7 |
| Abbildung 5: Anteile der Stadtgebiete (Urban areas) an der Landnutzung im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. | 8 |
| Abbildung 6: Anteile Ackerland (Agriculture) an der Landnutzung im Raster des Untersuchungsgebiets Rhein-Main. | 8 |
| Abbildung 7: Anteile Wasser an der Landnutzung im Raster des Untersuchungsgebiets Rhein-Main. | 9 |
| Abbildung 8: Anteile Wald an der Landnutzung im Raster des Untersuchungsgebiets Rhein-Main. | 9 |
| Abbildung 9: NO _x -Emissionen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main nach den Informationen der Tabelle 2. Auflösung 1x1 km ² . Für die weißen Flächen wurden keine Emissionen geliefert. | 14 |
| Abbildung 10: NO _x -Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Rhein-Main nach den Informationen der Tabelle 2. Auflösung 1x1 km ² . Für die Gebiete, in denen keine Daten von IVU-Umwelt geliefert wurden (weiße Flächen in Abbildung 9) wurden die Emissionen der großräumigen Datenbasis (Auflösung circa 30 km) verwendet. | 15 |
| Abbildung 11: NMHC-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Rhein-Main nach den Informationen der Tabelle 2. Auflösung 1x1 km ² . Für die Gebiete, in denen keine Daten von IVU-Umwelt geliefert wurden (weiße Flächen in Abbildung 9) wurden die Emissionen der großräumigen Datenbasis (Auflösung circa 30 km) verwendet. | 15 |
| Abbildung 12: CO-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Rhein-Main nach den Informationen der Tabelle 2. Auflösung 1x1 km ² . Für die Gebiete, in denen keine Daten von IVU-Umwelt geliefert wurden (weiße Flächen in Abbildung 9) wurden die Emissionen der großräumigen Datenbasis (Auflösung circa 30 km) verwendet. | 16 |
| Abbildung 13: PM ₁₀ -Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Rhein-Main nach den Informationen der Tabelle 2. Auflösung 1x1 km ² . Für die Gebiete, in denen keine Daten von IVU-Umwelt geliefert wurden (weiße Flächen in Abbildung 9) wurden die Emissionen der großräumigen Datenbasis (Auflösung circa 30 km) verwendet. | 16 |
| Abbildung 14: Berechneter NO ₂ -Jahresmittelwert 2000 in µg/m ³ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km ² . | 18 |
| Abbildung 15: Berechneter PM ₁₀ -Jahresmittelwert 2000 in µg/m ³ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km ² . | 18 |
| Abbildung 16: Berechneter Ozon-Jahresmittelwert 2000 in µg/m ³ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km ² . | 19 |
| Abbildung 17: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen maximalen 8-h-Mittelwerts von Ozon in µg/m ³ für die ländlichen Stationen Fürth im Odenwald und Königstein im Taunus. 2x2: RCG in 2 km Auflösung, LS2000: Europaweite RCG-Anwendung in circa 30 km Auflösung. | 21 |
| Abbildung 18: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen Mittelwert von NO ₂ in µg/m ³ für die ländlichen Stationen Fürth im Odenwald und Königstein im Taunus. 2x2: RCG in 2 km Auflösung, LS2000: Europaweite RCG-Anwendung in circa 30 km Auflösung. | 22 |
| Abbildung 19: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen maximalen 8-h-Mittelwerts von Ozon in µg/m ³ für die Stadtstationen Wiesbaden-Süd und Frankfurt-Höchst. 2x2: RCG in 2 km Auflösung, LS2000: Europaweite RCG-Anwendung in circa 30 km Auflösung. | 23 |
| Abbildung 20: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen Mittelwerts von NO ₂ in µg/m ³ für die Stadtstationen Wiesbaden-Süd und Frankfurt-Höchst. 2x2: RCG in 2 km Auflösung, LS2000: Europaweite RCG-Anwendung in circa 30 km Auflösung. | 24 |
| Abbildung 21: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen Mittelwerts von PM ₁₀ in µg/m ³ für die Stadtstationen Wiesbaden-Süd und Frankfurt-Höchst. 2x2: RCG in 2 km Auflösung, LS2000: Europaweite RCG-Anwendung in circa 30 km Auflösung. | 25 |
| Abbildung 22: Streudiagramme der berechneten und beobachteten NO ₂ -Jahresmittelwerte für alle Stationen in Hessen und Rheinland-Pfalz (30 km Auflösung, oben) und alle Stationen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main (2 km Auflösung, unten, Gebiet siehe Abbildung 2). Die Stationen sind entsprechend der Stationscharakteristik gekennzeichnet. Weitere Erläuterungen im Text. | 26 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 23: Streudiagramme der berechneten und beobachteten PM10-Jahresmittelwerte für alle Stationen in Hessen und Rheinland-Pfalz (30 km Auflösung, oben) und alle Stationen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main (2 km Auflösung, unten, Gebiet siehe Abbildung 2). Die Stationen sind entsprechend der Stationscharakteristik gekennzeichnet. Weitere Erläuterungen im Text. | 27 |
| Abbildung 24: Streudiagramme der berechneten und beobachteten Ozon-Jahresmittelwerte für alle Stationen in Hessen und Rheinland-Pfalz (30 km Auflösung, oben) und alle Stationen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main (2 km Auflösung, unten, Gebiet siehe Abbildung 2). Die Stationen sind entsprechend der Stationscharakteristik gekennzeichnet. Weitere Erläuterungen im Text. | 28 |
| Abbildung 25: Berechneter NO ₂ -Jahresmittelwert 2000 in µg/m ³ in einem Teilgebiet des Untersuchungsgebiet Rhein-Main. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 1x1 km ² . | 30 |
| Abbildung 26: Berechnete Vorbelastungskonzentration des täglichen Mittelwerts von NO ₂ in µg/m ³ für die Friedberger Landstraße in Frankfurt. RCG in 1, bzw. 2 km Auflösung. Die Beobachtung ist die Messung in der Straßenschlucht. | 30 |
| Abbildung 27: Berechnete Vorbelastungskonzentration des täglichen Mittelwerts von NO ₂ in µg/m ³ für die Hülgelstraße in Darmstadt. RCG in 1, bzw. 2 km Auflösung. Die Beobachtung ist die Messung in der Straßenschlucht. | 31 |
| Abbildung 28: Berechneter PM10-Jahresmittelwert 2000 in µg/m ³ in einem Teilgebiet des Untersuchungsgebiet Rhein-Main. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 1x1 km ² . | 31 |
| Abbildung 29: Berechnete Vorbelastungskonzentration des täglichen Mittelwerts von PM10 in µg/m ³ für die Hülgelstraße in Darmstadt. RCG in 1, bzw. 2 km Auflösung. Die Beobachtung ist die Messung in der Straßenschlucht. | 32 |
| Abbildung 30: Berechnete Konzentration des täglichen Mittelwerts von PM10 in µg/m ³ für die Stadtrandstation Wiesbaden-Süd. RCG in 1, bzw. 2 km Auflösung. | 32 |
| Abbildung 31: Oben: Berechneter NO ₂ -Jahresmittelwert in µg/m ³ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null gesetzt,“. Unten: Beitrag der Emissionen Rhein-Main in % zu den Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (siehe Abbildung 14). RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km ² . | 35 |
| Abbildung 32: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen Mittelwerts von NO ₂ in µg/m ³ für die Stationen Frankfurt-Höchst und Raunheim. 2x2: Basislauf RCG in 2 km Auflösung, ENULL: Keine anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet. | 36 |
| Abbildung 33: Oben: Berechneter PM10-Jahresmittelwert in µg/m ³ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null gesetzt,“. Unten: Beitrag der Emissionen Rhein-Main in % zu den Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (siehe Abbildung 15). RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km ² . | 37 |
| Abbildung 34: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen Mittelwerts von PM10 in µg/m ³ für die Stationen Frankfurt-Höchst und Raunheim. 2x2: Basislauf RCG in 2 km Auflösung, ENULL: Keine anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet. | 38 |
| Abbildung 35: Berechneter PM10-Jahresmittelwert 2000 in µg/m ³ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main unterteilt in die primären PM10-Komponenten (oben) und die sekundären PM10-Komponenten (unten). Die Summe beider Komponenten ergibt die PM10-Gesamtkonzentrationsverteilung (Abbildung 15). RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km ² . | 39 |
| Abbildung 36: Beitrag (%) der Emissionen Rhein-Main zu den Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 der primären PM10-Komponenten (oben), bzw. der sekundären PM10-Komponenten (unten) (Absolutkonzentrationen siehe Abbildung 35). RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km ² . | 40 |
| Abbildung 37: Oben: Berechneter Ozon-Jahresmittelwert in µg/m ³ im Untersuchungsgebiet Rhein-Main für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null gesetzt,“. Unten: Änderung (%) der Jahresmittelwerte des Basislaufs 2000 (siehe Abbildung 16) für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null gesetzt“. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km ² . | 41 |
| Abbildung 38: Berechnete und beobachtete Zeitreihe des täglichen maximalen 8-h-Mittelwerts von Ozon in µg/m ³ für die Stationen Frankfurt-Höchst und Raunheim. 2x2: Basislauf RCG in 2 km Auflösung, ENULL: Keine anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet. | 42 |
| Abbildung 39: Anzahl der berechneten Tage im Jahr 2000, an denen der maximale 8-Stundenmittelwert größer 120 µg/m ³ ist. Oben: Basislauf 2000. Unten: Reduzierung aller Emissionen im Rhein-Main-Gebiet auf Null. Angabe in Tagen. | 43 |
| Abbildung 40: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten NO ₂ -Jahresmittelwerte in µg/m ³ für das Szenario „Hausbrand- und Kleinverbraucheremissionen Null“. Unten: Beitrag in % zu den NO ₂ -Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 14) der Emissionen der Verursachergruppen Hausbrand und Kleinverbraucher. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km ² . | 45 |
| Abbildung 41: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten PM10-Jahresmittelwerte in µg/m ³ für | |

- das Szenario „Hausbrand- und Kleinverbraucheremissionen Null“. Unten: Beitrag in % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 15) der Emissionen der Verursachergruppen Hausbrand und Kleinverbraucher. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km². 46
- Abbildung 42: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten NO₂-Jahresmittelwerte in µg/m³ für das Szenario „Verkehr Null“. Unten: Beitrag in % zu den NO₂-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 14) der Emissionen der Verursachergruppe Verkehr. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km². 48
- Abbildung 43: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten PM10-Jahresmittelwerte in µg/m³ für das Szenario „Verkehr Null“. Unten: Beitrag in % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 15) der Emissionen der Verursachergruppe Verkehr. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km². 49
- Abbildung 44: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten NO₂-Jahresmittelwerte in µg/m³ für das Szenario „Industrie Null“. Unten: Beitrag in % zu den NO₂-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 14) der Emissionen der Verursachergruppe Industrie. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km². 51
- Abbildung 45: Oben: Abnahme der für den Basislauf 2000 berechneten PM10-Jahresmittelwerte in µg/m³ für das Szenario „Industrie Null“. Unten: Beitrag in % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2000 (Abbildung 15) der Emissionen der Verursachergruppe Industrie. RCG-Modell in einer Auflösung von circa 2x2 km². 52

8 Tabellenverzeichnis

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Landnutzungskategorien für die Landnutzungsdatenbasis des RCG-Modells. | 7 |
| Tabelle 2: Von IVU-Umwelt gelieferte Emissionen für das RCG-Untersuchungsgebiet Rhein-Main (Abbildung 2). Die biogenen Emissionen von NO _x werden nicht benutzt, da die biogenen Emissionen in RCG direkt während des Modelllaufes aus der Landnutzung und aktuellen meteorologischen Informationen berechnet werden. | 14 |
| Tabelle 3: Relative Beiträge der betrachteten Verursacherguppen zu den mittleren Vorbelastungen für die 15 ausgewählten Straßen, normiert auf den Beitrag der Haushalte/Kleinverbraucher. Weitere Erläuterungen im Text. | 53 |
| Tabelle 4: Berechnete NO ₂ -Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 15 Straßen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. Beitrag aller anthropogenen Emissionen im Gebiet, der Verkehrsemissionen, der Emissionen der Haushalte und Kleinverbraucher sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Wegen der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission, dem großräumigen Beitrag sowie der Nichtbetrachtung der Flughafenemissionen addieren sich die Einzelbeiträge nicht zur gesamten Vorbelastung. RCG-Rechnung mit 2x2 km ² -Auflösung.... | 54 |
| Tabelle 5: Berechnete NO ₂ -Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 15 Straßen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. Relativer Beitrag aller anthropogenen Emissionen im Gebiet, der Verkehrsemissionen, der Emissionen der Haushalte und Kleinverbraucher sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Wegen der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission, dem großräumigen Beitrag sowie der Nichtbetrachtung der Flughafenemissionen addieren sich die relativen Einzelbeiträge nicht zu 100%. RCG-Rechnung mit 2x2 km ² -Auflösung. | 55 |
| Tabelle 6: Berechnete PM10-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 15 Straßen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. Beitrag aller anthropogenen Emissionen im Gebiet, der Verkehrsemissionen, der Emissionen der Haushalte und Kleinverbraucher sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Wegen der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission, dem großräumigen Beitrag sowie der Nichtbetrachtung der Flughafenemissionen addieren sich die Einzelbeiträge nicht zur gesamten Vorbelastung. RCG-Rechnung mit 2x2 km ² -Auflösung. | 56 |
| Tabelle 7: Berechnete PM10-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 15 Straßen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main. Relativer Beitrag aller anthropogenen Emissionen im Gebiet, der Verkehrsemissionen, der Emissionen der Haushalte und Kleinverbraucher sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Wegen der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission, dem großräumigen Beitrag sowie der Nichtbetrachtung der Flughafenemissionen addieren sich die relativen Einzelbeiträge nicht zu 100%. RCG-Rechnung mit 2x2 km ² -Auflösung. | 57 |

9 Anhang : Kurzbeschreibung des REM-CALGRID-Modells

An der Freien Universität Berlin (FUB), Institut für Meteorologie, wurde im Rahmen mehrerer FE-Vorhaben des Umweltbundesamts ein Modellinstrumentarium entwickelt, das den in der EU-Rahmenrichtlinie (EU, 1996) über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität sowie deren Tochtrichtlinien (EU, 1999, 2000, 2002) definierten Anforderungen an die Ausbreitungsrechnung genügt. Nach der EU-Rahmenrichtlinie müssen Ausbreitungsrechnungen zur flächendeckenden Bestimmung der Luftqualität die folgenden vier Raumskalen abdecken:

- europaweit,
- großräumig (national)
- regional (Ballungsraum)
- lokal/städtisch (Stadtquartier, Straßenschlucht).

Das Modellsystem ermöglicht es, die in den EU-Richtlinien definierten Luftqualitätswerte zu bestimmen. Betrachtet werden die Schadstoffe SO₂, NO_x, Benzol, Ozon, PM10 und CO. Das Modellsystem enthält folgende Ausbreitungsmodelle:

- Das dreidimensionale photochemische Transportmodell REM/CALGRID (RCG). Die Entwicklung dieses Modells und die Anwendung in der großräumigen Skala sind in Stern (2003a) beschrieben. REM/CALGRID wird zur Bestimmung der Luftqualität in der europaweiten und der nationalen Raumskala in einer Auflösung von ca. 30x30 km² und in der urbanen Raumskala (Ballungsgebiet) bis zu einer Auflösung von ca. 1x1 km² verwendet. Die aus dem großräumigen Modell berechnete Hintergrundbelastung wird als Randbedingung für die urbane Skala verwendet („one-way-nesting“).
- Das Canyon-Plume-Box-Modell (CPB). Das CPB-Modell (Ostmann et al., 1996; Yamartino und Wiegand, 1986) ist ein 2-dimensionales analytisch-empirisches Modell, mit dem die Luftschadstoffimmissionen in einer Straßenschlucht berechnet werden können. Die Hintergrundbelastung wird dazu von den urbanen Ausbreitungsrechnungen bereit gestellt („one-way-nesting“).
- AUSTAL2000, ein Lagrange'sches Partikelsimulationsmodell zur Beschreibung von Immissionsbelastungen ausgehend von industriellen Quellen (Ingenieurbüro Janicke, 2003). Die Hintergrundbelastung dazu wird ebenfalls von den urbanen Ausbreitungsrechnungen bereit gestellt („one-way-nesting“).

Kern des Systems ist das dreidimensionale chemische Transportmodell REM/CALGRID, das im Rahmen der Anwendung Rhein-Main eingesetzt wurde. Das System ist in der Lage, für alle in den diversen EU-Richtlinien definierten Schadstoffe die entsprechenden Beurteilungsgrößen zu berechnen. Die Berechnung erfolgt dabei auf Stundenbasis für das ganze Jahr, so dass auch die in den Richtlinien verlangten Überschreitungshäufigkeiten direkt berechnet werden können. Bei den Aerosolen können neben der Gesamtsumme der Partikel < 10 µm auch die Einzelkomponenten PM10-PM 2.5, PM 2.5, EC, OC, die anorganischen Sekundäraerosole SO₄, NH₄, und NO₃ sowie einige organische Aerosole getrennt ausgewiesen werden.

Das REM/CALGRID-Modell (RCG-Modell) entstand aus der Verschmelzung des ursprünglich für die großräumige Skala entwickelten REM3 (Stern, 1994) und des für die urbane Skala entwickelten CALGRID-Modells (Yamartino et al., 1989). Beide Modelle wurden bereits im Rahmen des Aktionsprogramms und Maßnahmenplans Ozon (AMPO) für episodenzugehörige

Szenariorechnungen eingesetzt (Motz et al., 1997). Alle wissenschaftlichen Module wurden überarbeitet und auf den Stand des Wissens gebracht. Die Parametrisierungen der physikalisch/chemischen Prozesse erfolgte mit Modellierungsansätzen mittlerer Komplexität, um die auf Langfristberechnungen abzielende Anwendung des Modells gewährleisten zu können.

Die wesentlichsten Bestandteile des REM/CALGRID sind:

- Dynamisches oder festes vertikales Koordinatensystem mit einer beliebigen Anzahl von Modellschichten. In der Horizontalen Wahl zwischen einem geographischen oder einem rechtwinkligen Koordinatensystem,
- Ein neues, absolut massenerhaltendes „operator-splitting“-Verfahren,
- Ein sehr genauer und trotzdem nicht-rechenintensiver neuer Algorithmus für die Horizontaladvektion,
- Überarbeitete Module für die trockene und nasse Deposition,
- Die neuesten Versionen der chemischen Module CBM4 und SAPRC93,
- Behandlung der PM10- und PM2.5-Problematik ,
- Ein Aerosol-Modul zur Bestimmung der sekundären anorganischen Aerosole,
- Ein Aerosol-Modul zur Bestimmung der sekundären organischen Aerosole,
- Module zur Bestimmung der biogenen Emissionen auf der Basis von Biomassen,
- Emissionsmanagementsystem zum einfachen Umsetzen von Emissionsszenarien in die Emissionsdatenbasis,
- Auswerte-Module zur Berechnung der in den EU-Richtlinien zur Luftqualität festgeschriebenen Beurteilungsgrößen.

Eine detaillierte Beschreibung des Modells kann in Stern (2003a) gefunden werden.

Der meteorologische Antrieb des Modells wird aus meteorologischen Beobachtungen mit dem am Institut für Meteorologie betriebenen Programmsystem TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research) erstellt (siehe Kerschbaumer und Reimer, 2003).

Die Emissionsdaten werden verursachergruppenspezifisch aus den zur Verfügung gestellten Daten für die Modellrechnungen aufbereitet. Emissionen der Stoffgruppen SO_x, NO_x, CO, NH₃, Benzol, PM10, PM2.5 und VOC müssen dem Modell in Form von Punkt- oder Flächenquellen vorgegeben werden. Flächenquellen emittieren dabei wahlweise in die Bodenschicht oder in die zweite Modellschicht. Für die Punktquellen wird aus den Kenndaten der Quelle und lokalen meteorologischen Größen eine effektive Schornsteinhöhe bestimmt. Die Übergabe der Emissionen erfolgt dann in die dazugehörige Modellschicht. Flächen- und Punktquellen werden im Modell als Volumenquellen behandelt, d.h. die Emissionen verteilen sich unmittelbar in der betreffenden Gitterzelle.

Das Modell verlangt jahresspezifische Emissionsdaten für alle in den verschiedenen chemischen Mechanismen benötigten Spezies getrennt nach Punkt- und Flächenquellen und unterteilt nach Verursachergruppen. Es ist die Verarbeitung einer beliebigen Anzahl von Verursachergruppen möglich. Für die Verursachergruppen werden im Modell ausgehend von den Jahreswerten stündliche Emissionen abgeleitet. Die dazu verwendeten Monats-, Tages- und Stundenfaktoren müssen ebenfalls vorgegeben werden und berücksichtigen die Zeit-

und Temperaturabhängigkeit der Emissionen der einzelnen Verursachergruppen. Bei den Kohlenwasserstoffen verlangt das Modell die Gesamtemissionen für die definierten Verursachergruppen und ein zu jeder Verursachergruppe gehöriges Kohlenwasserstoffprofil, das die prozentualen Anteile der spezifischen Kohlenwasserstoffe an der Gesamtemission der Verursachergruppe angibt. Jeder Kohlenwasserstoff wird dann den entsprechenden Klassen der zwei im Ausbreitungsmodell integrierten Mechanismen zugeordnet. Diese Vorgehensweise vermeidet die Verwendung pauschaler, mechanismusabhängiger Zuordnungsfaktoren und gewährleistet, dass das emittierte Kohlenwasserstoffgemisch exakt entsprechend der von jedem Mechanismus verlangten Klassifizierung behandelt wird. Biogene VOC- und NO_x-Emissionen werden stündlich modellintern mit Hilfe von Landnutzungsdaten und entsprechenden Emissionsfaktoren berechnet.

Ausbreitungsrechnungen als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main



Verteilung der Konzentrationstagesmittelwerte in einem Straßenraum (Bebauungsabstand 24m, Bebauungshöhe 28 m) mit Windrichtung zwischen 107° und 170° und Windgeschwindigkeit zwischen 1.7 m/s und 3.8 m/s

für
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Postfach 3209 · Rheingaustraße 186 · D-65022 Wiesbaden

von
IVU Umwelt GmbH · Burgweg 10 · D-79350 Sexau
Florian Pfäfflin, Götz Wiegand
Arbeitsgruppe Troposphärische Umweltforschung · Institut für
Meteorologie · Freie Universität Berlin ·
Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10 · D-12165 Berlin
Andreas Kerschbaumer, Eberhard Reimer, Rainer Stern

Mai 2004

1 Einführung

Im Ballungsraum Rhein-Main wurde im Jahr 2002 an drei verkehrsbezogenen Messstationen der Immissionswert für den Jahresmittelwert NO_2 und an einer dieser Stationen der Immissionswert für den Tagesmittelwert PM_{10} überschritten. Nach Artikel 8 der EU-Rahmenrichtlinie 96/62/EG (EU-RRL) zur Luftqualität (EU, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 1996) bzw. §13 der 22. BImSchV müssen für Gebiete, in denen Grenzwerte überschritten werden, Luftreinhaltepläne erarbeitet werden, aufgrund derer die betreffenden Grenzwerte zukünftig eingehalten werden können. In der EU-RRL sind dazu neben Messungen erstmalig auch Modellrechnungen zur Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität vorgesehen.

Nach der EU-Rahmenrichtlinie (siehe EU, 1996) müssen Ausbreitungsrechnungen zur flächendeckenden Bestimmung der Luftqualität die folgenden vier Raumskalen abdecken:

- europaweit,
- großräumig (national)
- regional (Ballungsraum)
- lokal/städtisch (Stadtquartier, Straßenschlucht).

Das Umweltbundesamt hat an die FU Berlin FE-Vorhaben vergeben, in denen ein Modellinstrumentarium entwickelt wurde, das den in der EU-RRL definierten Anforderungen an die Ausbreitungsrechnung genügt. Kern des Systems ist das chemische Transportmodell REM-CALGRID (RCG), das für die vorliegende Studie eingesetzt wurde (Stern, 2003, Stern et al., 2003). Die Ergebnisse des RCG-Modells dienen als Vorbelastung für ein sich anschließendes Straßenschlucht-Modell.

Ebenfalls durch FE-Vorhaben des Umweltbundesamtes (Ostmann et al., 1996) wurde die Entwicklung des Canyon-Plume-Box-Modell, im folgenden CPB, gefördert. CPB wurde in zahlreichen Forschungsvorhaben validiert und in Gutachten eingesetzt. Mit CPB wird der Einfluss der Emissionen der Straße berechnet.

Dieser Kurzbericht ist die Zusammenfassung einer Studie, die von der IVU-Umwelt GmbH gemeinsam mit der Arbeitsgruppe TRUMF am Institut für Meteorologie der Freien Universität im Auftrag des Hessisches Landesamts für Umwelt und Geologie (HLUG) erstellt wurde (IVU, 2004; Stern et al., 2004). Ziel der Untersuchung war die rechnerische Ermittlung der Immissionen in 15 hoch belasteten Straßenräumen im Rhein-Main-Gebiet.

2 Die 15 Straßen

Die 15 Straßenräume wurden von dem HLUG vorgegeben. Für die Straßenräume (siehe Tabelle 1) sind die NO_2 - und PM_{10} -Immissionen an der Bordsteinkante in 1.5 m Höhe mit den Modellen zu ermitteln.

Tabelle 1 15 von der HLUg definierte Straßenräume. Das Kürzel vor dem Straßenamen bedeutet FF=Frankfurt/Main, OF=Offenbach, DA=Darmstadt und WI=Wiesbaden.

| Nr | Straßenname | von | bis |
|----|----------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 1 | FF-Bleichstraße | Friedberger-Landstraße | Elefantengasse |
| 2 | FF-Bockenheimer-Straße | Schumannstraße | Senckenberganlage |
| 3 | FF-Escherheimer-Landstraße | Bockenheimer-Anlage | Querstraße |
| 4 | FF-Friedberger-Landstraße | Zeiselstraße | Wielandstraße |
| 5 | FF-Hochstraße | Große-Bockenheimer-Straße | Kleine-Hochstraße |
| 6 | FF-Höhenstraße | Heidestraße | Burgstraße |
| 7 | FF-Mainzer-Landstraße | Blittersdorfplatz | Karlstraße |
| 8 | FF-Taunusstraße | Moselstraße | Am-Hauptbahnhof |
| 9 | OF-Waldstraße | Geleitstraße | Bleichstraße |
| 10 | DA-Hügelstraße | Schützenstraße | Wilhelm-Glässing-Straße |
| 11 | DA-Bleichstraße | Gagernstraße | Kasinostraße |
| 12 | DA-Rhönring | Mollerstraße | Robert-Schneider-Straße |
| 13 | WI-Rheinstraße | Karlstraße | Schwalbacherstraße |
| 14 | WI-Kaiser-Friedrich-Ring | Scheffelstraße | Wielandstraße |
| 15 | WI-Schiersteiner Straße | Niederwaldstraße | Wolfram-von-Eschenbachstraße |

Die Lage der 15 Straßenräume zeigt die folgende Abbildung 1.

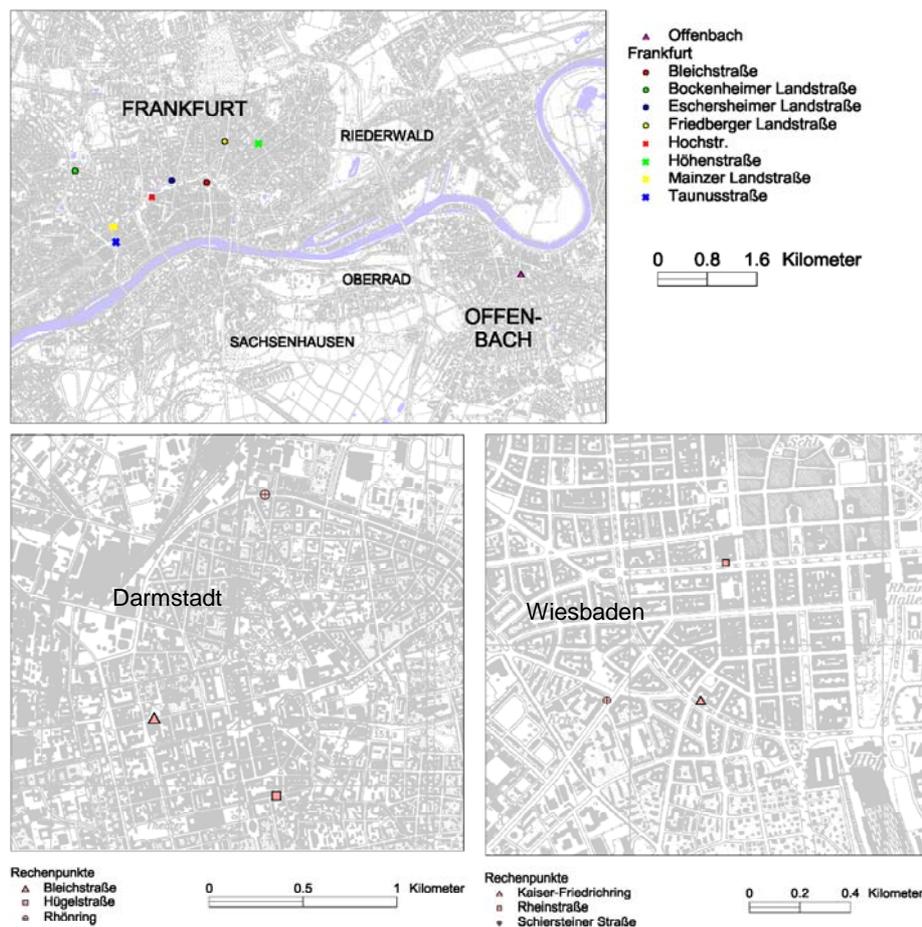


Abbildung 1 Lage der 15 Straßenräume in Frankfurt/Main (8)/Offenbach (1, oben), Darmstadt (3, unten links) und Wiesbaden (3, unten rechts).

3 Modelle

3.1 Vorbelastungsrechnungen

Die Vorbelastungsrechnungen wurden von Stern et al. (2004) mit dem REM-CALGRID-Modell (RCG) durchgeführt. Das RCG-Modell ist ein chemisches Transportmodell, das die dreidimensionale Ausbreitung und Entfernung von Schadstoffen in der Atmosphäre unter Berücksichtigung der Oxidantien- und Aerosolbildung simuliert (siehe Stern, 2003). Das Modell ist in der Lage, für alle in den EU-Richtlinien definierten Schadstoffe die entsprechenden Beurteilungsgrößen zu berechnen. Die Berechnung erfolgt dabei auf Stundenbasis für das ganze Jahr, so dass auch die in den Richtlinien verlangten Überschreitungshäufigkeiten direkt berechnet werden können. Bei den Aerosolen können neben der Gesamtsumme der Partikel $< 10 \mu\text{m}$ auch die Einzelkomponenten der wichtigsten primären und sekundären Aerosole getrennt ausgewiesen werden.

Das RCG-Modell wurde zunächst auf ein großräumiges Modellgebiet, das ganz Mitteleuropa umfasst, in einem circa $30\text{km} \cdot 30\text{km}$ -Gitter angewandt. Als Emissionsdaten wurden dazu die von der TNO, Niederlande, für Europa erstellten Daten verwendet (Stern, 2003). Die vom Modell benötigten meteorologischen Daten des Modells wurden aus meteorologischen Beobachtungen mit dem am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin betriebenen Programmsystem TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research) erstellt.

In das großräumige Modellgebiet ist ein kleinräumiges, urbanes Modellgebiet eingebettet, das das gesamte Rhein/Main-Gebiet in einem $1\text{km} \cdot 1\text{km}$ -Gitter umfasst. Die europaweite Rechnung liefert die Hintergrundkonzentrationen für die regionale/urbane Skala. Die für diese Ausbreitungsrechnungen benötigten Emissionsdaten wurden aus dem hessischen Emissionskataster 2000 in Kombination mit aktuellen Verkehrsinformationen abgeleitet.

3.2 Straßenschluchtrechnungen

Mit dem Ausbreitungsmodell CPB (Canyon-Plume-Box-Modell) können die verkehrsbedingten Luftschadstoff-Immissionen in einer Straßenschlucht berechnet werden. CPB kann einen weiten Bereich von Straßenschluchtgeometrien behandeln, darunter unterschiedliche Bebauungshöhen auf beiden Seiten, teildurchlässige, "poröse" Bebauung (z.B. offene Parkhäuser) oder gekrümmte Straßen (siehe Yamartino, 1986).

Auch die CPB-Belastung wird stundenfein berechnet. Die meteorologischen Variablen sowie die Vorbelastung liefert das RCG-Modell.

CPB enthält ein Photochemie-Modul, das es erlaubt direkt NO_2 -Immissionen zu berechnen. Die erforderlichen Eingangsdaten (stündliche NO -, NO_2 - und O_3 -Konzentrationen über dem Straßenraum) stehen als RCG-Modellrechnungen im 1km^2 -Gitter zur Verfügung.

Die stündlichen Verkehrsemissionen werden für die 15 Straßen mit dem auf den neuen Emissionsfaktoren (INFRAS, 2004) beruhenden Emissionsmodell IMMIS^{em/h} (siehe IMMIS^{luft}, 2004) berechnet.

3.3 Relevanz von Modellrechnungen

Die regional/urbane Rechnung liefert die Vorbelastungskonzentrationen für die sich anschließenden Straßenschluchtrechnungen. Damit beruhen Hintergrund-, Vor- und Zusatzbelastung komplett auf Modellrechnungen. Dies ist besonders wichtig für die Ursachenanalyse, da die nicht-linearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission unter Berücksichtigung aller relevanten physikalischen und chemischen Prozesse berechnet werden. Insbesondere für die Oxidantien und PM₁₀ ist es nur schwer möglich, das Minderungspotential von Straßenräumen ohne solch eine rechnerische Bestimmung des großräumigen Hintergrunds, der regionalen Vorbelastung sowie der Belastung aus der Straße selbst zu quantifizieren.

4 Ergebnisse

4.1 Vorbelastungsrechnungen

Das Ergebnis der Vorbelastungsrechnungen für NO₂ zeigt Abbildung 2.

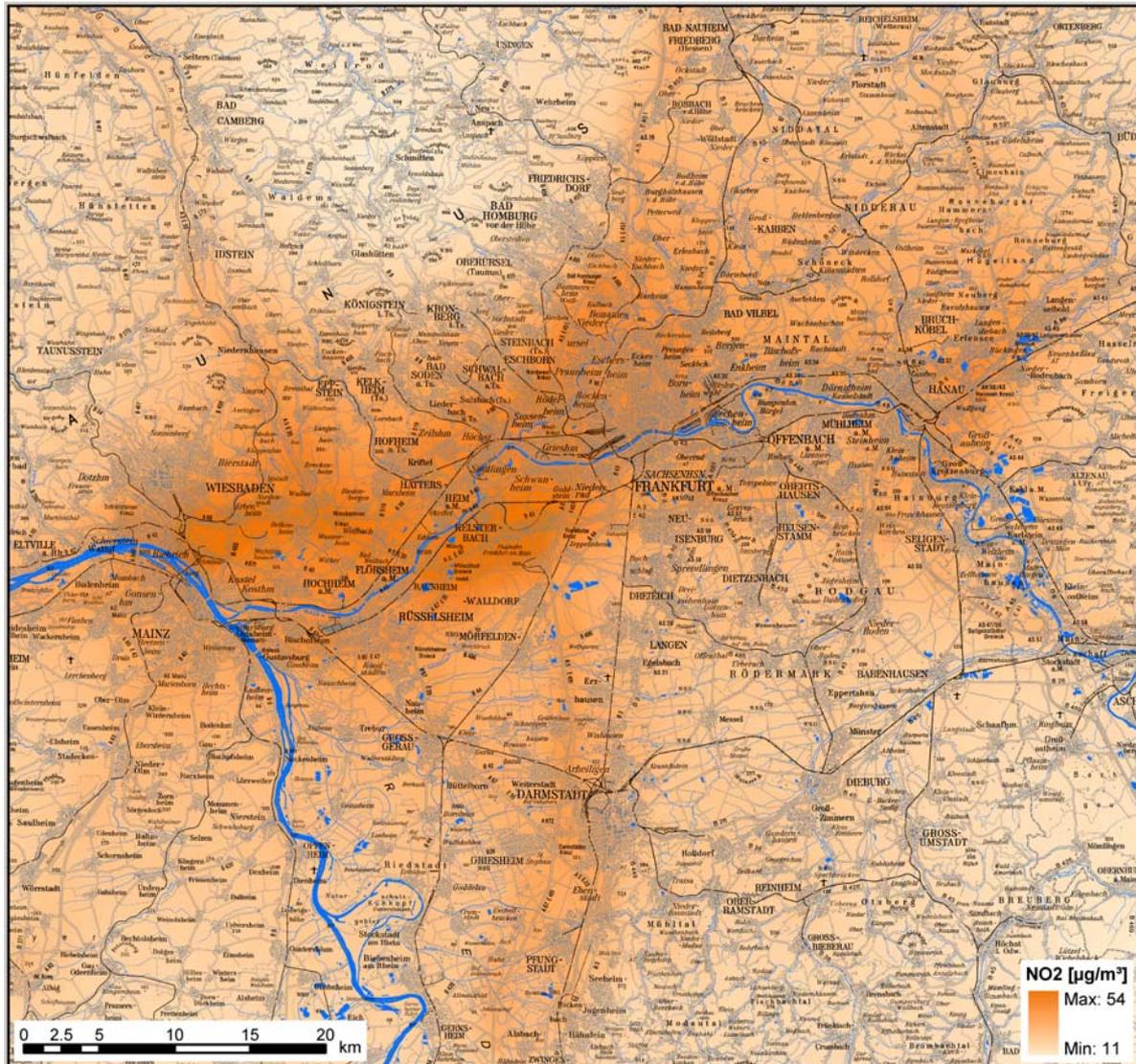


Abbildung 2 Jahresmittelwerte der NO₂-Konzentrationen im Rhein-Main-Gebiet. REM-CALGRID-Berechnung.

Das Ergebnis der Vorbelastungsrechnungen für PM₁₀ zeigt Abbildung 3.

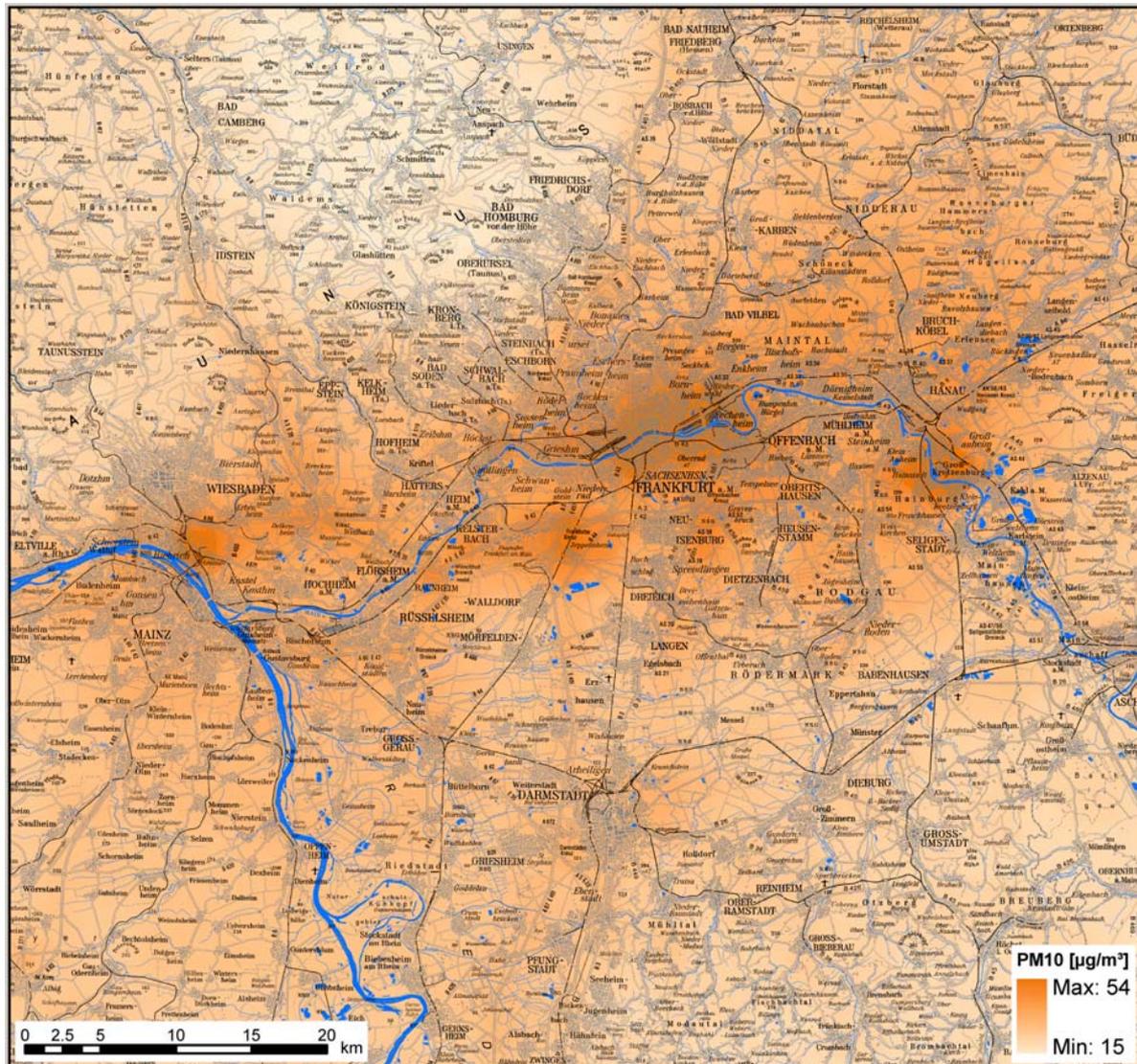


Abbildung 3 Jahresmittelwerte der PM10-Konzentrationen im Rhein-Main-Gebiet. REM-CALGRID-Berechnung.

4.2 Straßenschluchtrechnungen

Die Ergebnisse der NO₂ bzw. PM10-Immissionsberechnungen für die 15 Straßenräume zeigen Tabelle 2 und Tabelle 3. Im ersten Spaltenblock sind die Immissionen aufgeteilt nach RCG-Vorbelastung, CPB-Zusatzbelastung und Gesamtbelastung in µg/m³ angegeben. Im zweiten Spaltenblock sind die Anteile der verschiedenen Quellgruppen Kraftfahrzeuge, Hausbrand/Kleinverbraucher und Kraftwerke/Industrie in Prozent angegeben.

Die aus Szenarienrechnungen abgeleiteten Anteile der verschiedenen Verursachergruppen an der Gesamtimmission beziehen sich nur auf die Emissionen im Untersuchungsgebiet Rhein-Main (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3). Bei den Konzentrationsanteilen in den Straßenräumen ist der Beitrag des Ferntransports aus dem großräumigen Modellgebiet in das eigentliche Untersuchungsgebiet nicht enthalten, daher ergibt die Summe der Anteile in Prozent nicht 100. Weiterhin gilt zu

berücksichtigen, dass die Beziehungen zwischen den Vorläuferemissionen und den über eine komplexe Kette chemischer Reaktionen entstehenden Folgeprodukten (NO₂, O₃ und sekundäre Aerosole als Bestandteile von PM₁₀) nicht linear sind. Eine Änderung der Zusammensetzung der Emissionen führt also auch zu einer Änderung der chemischen Abläufe und damit zu einer Änderung der Konzentrationsbeiträge. Aus diesem Grunde sollten die berechneten Beiträge der verschiedenen Emissionsgruppen zur Gesamtkonzentration auch nur als größenordnungsmäßige Abschätzung verstanden werden.

Tabelle 2 NO₂-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 15 Straßenräumen und die Anteile verschiedener Quellgruppen. Näheres siehe Text.

| NO ₂ | Vorbelastung (RCG) | Zusatzbelastung (CPB) | Gesamtbelastung | Anteil Kraftfahrzeuge an Gesamtbelastung | Anteil Hausbrand + Kleinverbraucher an Gesamtbelastung | Anteil Kraftwerke + Industrie an Gesamtbelastung |
|---------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Straßenraum | µg/m ³ | µg/m ³ | µg/m ³ | % | % | % |
| FF-Bleichstrasse | 45.6 | 23.0 | 68.6 | 61 | 5 | 11 |
| FF-Bockenheimer-Str. | 45.6 | 14.6 | 60.2 | 55 | 6 | 11 |
| FF-Eschersheimer-Landstr. | 46.8 | 26.1 | 72.9 | 61 | 5 | 11 |
| FF-Friedberger-Landstr. | 46.0 | 22.2 | 68.2 | 61 | 5 | 11 |
| FF-Hochstr. | 47.0 | 25.4 | 72.3 | 61 | 5 | 11 |
| FF-Hoehenstr. | 46.0 | 34.3 | 80.3 | 67 | 5 | 9 |
| FF-Mainzer-Landstr. | 48.7 | 32.3 | 80.9 | 64 | 4 | 10 |
| FF-Taunusstr. | 48.7 | 20.8 | 69.5 | 58 | 5 | 12 |
| OF-Waldstr. | 40.0 | 15.4 | 55.4 | 60 | 6 | 12 |
| DA-Huegelstr. | 33.9 | 24.7 | 58.6 | 67 | 4 | 10 |
| DA-Bleichstr. | 33.9 | 18.6 | 52.4 | 64 | 4 | 11 |
| DA-Rhoenring | 33.7 | 13.9 | 47.6 | 59 | 5 | 13 |
| WI-Rheinstr. | 37.2 | 22.3 | 59.5 | 57 | 5 | 12 |
| WI-Kaiser-Friedrich-Ring | 41.4 | 25.3 | 66.6 | 58 | 4 | 13 |
| WI-Schiersteiner-Str. | 39.2 | 26.2 | 65.4 | 59 | 4 | 13 |

Bei NO₂ beträgt der aus den Berechnungen abgeschätzte mittlere Anteil des Kraftfahrzeugverkehrs an den Straßenraum-Immissionen 61%, Hausbrand und Kleinverbraucher tragen im Durchschnitt 5%, Kraftwerke und Industrie 11% bei.

Der Hauptverursacher der NO₂-Immissionen ist also der Kraftfahrzeugverkehr.

Tabelle 3 PM10-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 15 Straßenräumen und die Anteile verschiedener Quellgruppen. Näheres siehe Text.

| PM10 | Vorbelastung (RCG) | Zusatzbelastung (CPB) | Gesamtbelastung | Anteil Kraftfahrzeuge an Gesamtbelastung | Anteil Hausbrand + Kleinverbraucher an Gesamtbelastung | Anteil Kraftwerke + Industrie an Gesamtbelastung |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Straßenraum | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | % | % | % |
| FF-Bleichstrasse | 23.2 | 11.1 | 34.3 | 38 | 4 | 11 |
| FF-Bockenheimer-Str. | 22.5 | 6.6 | 29.1 | 30 | 4 | 11 |
| FF-Eschersheimer-Landstr. | 23.4 | 13.4 | 36.8 | 42 | 4 | 11 |
| FF-Friedberger-Landstr. | 32.4 | 11.3 | 43.6 | 34 | 3 | 8 |
| FF-Hochstr. | 23.9 | 12.4 | 36.3 | 40 | 4 | 11 |
| FF-Hoehenstr. | 32.4 | 23.0 | 55.3 | 48 | 3 | 7 |
| FF-Mainzer-Landstr. | 24.2 | 19.0 | 43.2 | 49 | 3 | 9 |
| FF-Taunusstr. | 24.2 | 9.8 | 34.0 | 35 | 4 | 12 |
| OF-Waldstr. | 23.6 | 6.3 | 29.9 | 28 | 4 | 11 |
| DA-Huegelstr. | 21.2 | 13.1 | 34.3 | 46 | 3 | 8 |
| DA-Bleichstr. | 21.2 | 8.8 | 30.0 | 38 | 4 | 9 |
| DA-Rhoenring | 20.7 | 5.5 | 26.3 | 29 | 3 | 10 |
| WI-Rheinstr. | 21.4 | 10.9 | 32.3 | 40 | 3 | 10 |
| WI-Kaiser-Friedrich-Ring | 22.7 | 14.3 | 36.9 | 45 | 3 | 10 |
| WI-Schiersteiner-Str. | 21.9 | 13.8 | 35.7 | 45 | 3 | 10 |

Bei PM10 beträgt der aus den Rechnungen abgeschätzte mittlere Anteil der Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs im Untersuchungsgebiet an den 15 Straßenraum-Immissionen 39%, Hausbrand und Kleinverbraucher tragen im Durchschnitt 4%, Kraftwerke und Industrie 10% bei.

Bei den PM10-Immissionen ist ein Hauptverursacher nicht so eindeutig zu identifizieren wie beim NO₂, da im Gegensatz zum NO₂ ein großer Teil der PM10-Vorbelastung aus Quellen außerhalb des Untersuchungsgebiets stammt. Von den Verursachern im Untersuchungsgebiet liefert aber auch der Kfz-Verkehr den Hauptbeitrag zu der Gesamtbelastung in den betrachteten Straßenräumen. Wegen des höheren Anteils des Ferntransports und des höheren Anteils der industriellen Verursachergruppen an der Vorbelastung ist der Kfz-Beitrag aus dem Untersuchungsgebiet zu der PM10-Gesamtbelastung geringer als derjenige zu der NO₂-Gesamtbelastung.

4.3 Vergleich mit Messungen

In zwei der Straßen befinden sich Messstellen des HLUg:

- Frankfurt, Friedberger Landstraße (NO₂) und
- Darmstadt, Hügelstraße (NO₂ und PM10).

In diesen Straßen kann man die Messungen zum Vergleich mit den RCG/CPB-Berechnungen heranziehen.

Die beobachteten Jahresmittelwerte (siehe Tabelle 4) werden von den Modellrechnungen um circa 15% unterschätzt. Damit liegen die Modellergebnisse innerhalb

der von den EU-Richtlinien verlangten Genauigkeit von 30% für die NO₂-Jahresmittelwerte und 50% für die PM₁₀-Jahresmittelwerte. Die gemessenen Konzentrationsverteilungen und die Anzahl der Grenzwertüberschreitungen werden richtig wiedergegeben. Die Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Rechnung kann damit als gut bezeichnet werden. Dies gilt insbesondere unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in die Modellierung an keiner Stelle eine Immissionsmessung – etwa als Vorbelastungsmessung - eingeht, sondern die Berechnung von der Emission über Transmission bis zu der Immission durchgehend auf Modellen beruht.

Tabelle 4 Jahresmittelwerte der Modellrechnungen und der Messungen.

| Nr | Straßenname | NO ₂ | PM ₁₀ | NO ₂ | PM ₁₀ |
|----|---------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | | Rechnung | | Messung | |
| 4 | FF-Friedberger-Landstraße | 63.08 | - | 73.19 | - |
| 10 | DA-Hügelstraße | 54.17 | 33.61 | 64.06 | 36.96 |

4.4 Verletzung der Grenzwerte der 22. BImSchV

Die Überschreitung der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM₁₀ der Modellrechnungen sind in Tabelle 5 dargestellt.

Der NO₂-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in allen Straßen von den Berechnungen überschritten.

Der PM₁₀-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in drei Straßen in Frankfurt von den Berechnungen überschritten: Friedberger-Landstraße, Höhenstraße und Mainzer-Landstraße.

Der Stundenmittelwert-Grenzwert für NO₂ von 200 µg/m³ wird nur in der Frankfurter Höhenstraße mehr als die erlaubten 18mal überschritten.

Der Tagesmittelwert-Grenzwert für PM₁₀ von 50 µg/m³ wird 10 der 15 Straßen mehr als die erlaubten 35mal überschritten.

Die Grenzwertüberschreitungen sind in Tabelle 5 farbig (■) hervorgehoben.

Tabelle 5 Überschreitung der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM₁₀ in den Modellrechnungen.

| Nr | Straßenname | Grenzwerte | | | |
|----|-----------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| | | Mittelwert | | Überschreitungen | |
| | | NO ₂ >40 | PM ₁₀ >40 | NO ₂ >18 | PM ₁₀ >35 |
| 1 | FF-Bleichstraße | ja | nein | 0 | 37 |
| 2 | FF-Bockenheimer-Straße | ja | nein | 0 | 16 |
| 3 | FF-Eschersheimer-Landstraße | ja | nein | 3 | 58 |
| 4 | FF-Friedberger-Landstraße | ja | ja | 0 | 94 |
| 5 | FF-Hochstraße | ja | nein | 0 | 54 |
| 6 | FF-Höhenstraße | ja | ja | 21 | 204 |
| 7 | FF-Mainzer-Landstraße | ja | ja | 10 | 108 |
| 8 | FF-Taunusstraße | ja | nein | 1 | 41 |
| 9 | OF-Waldstraße | ja | nein | 0 | 19 |
| 10 | DA-Hügelstraße | ja | nein | 0 | 45 |
| 11 | DA-Bleichstraße | ja | nein | 0 | 17 |
| 12 | DA-Rhönring | ja | nein | 0 | 7 |
| 13 | WI-Rheinstraße | ja | nein | 0 | 30 |
| 14 | WI-Kaiser-Friedrich-Ring | ja | nein | 0 | 54 |
| 15 | WI-Schiersteiner-Straße | ja | nein | 2 | 43 |

5 Literatur

EU (1996). Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27.9.1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 296/55 vom 21.11. 1996

IMMIS^{luft}, 2004: Handbuch zu IMMIS^{luft}, IVU Umwelt GmbH, siehe www.IVU-Umwelt.de

INFRAS, 2004: HBEFA Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 2.1. Im Auftrag der UBA Berlin / BUWAL Bern / UBA Wien; Februar 2004

IVU, 2004: Ausbreitungsrechnungen mit dem Canyon-Plume-Box-Modell als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main. Bericht von IVU Umwelt GmbH für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie.

Ostmann, C., Stern, R., Wiegand, G. (1996). Canyon Plume Box Modell, Version 3, Release 8, Handbuch. IVU Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung mbH. Abschlussbericht zum FE-Vorhaben 104 02 811 des Umweltbundesamts, Berlin.

Stern, R. (2003). Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“.

Stern, R., Kerschbaumer, A., Fath, J., (2003). Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID auf die Region Berlin-Brandenburg. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 29943 246 auf dem Gebiet des Umweltschutzes „Entwicklung eines Modellsystems für das Zusammenspiel von Messung und Rechnung für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität“.

Stern, R., Kerschbaumer, A., Reimer, E. (2004). Ausbreitungsrechnungen mit dem chemischen Transportmodell REM-CALGRID als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main. Bericht der Arbeitsgruppe TRUMF am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie im Unterauftrag der IVU Umwelt GmbH.

Yamartino, R. J., Wiegand, G. (1986): Development and Evaluation of Simple Models for the Flow, Turbulence and Pollutant Concentration Fields within an Urban Street Canyon Atmospheric Environment Vol.20, No.11, pp 2137-2156; 1986