

TEXTE

64/2013

Anwendung von chemischen Transport- modellen im Rahmen des PAREST-Projekts

Ergebnisvergleich REM_CALGRID, LOTOS-EUROS
und COSMO-MUSCAT

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 206 43 200/01
UBA-FB 001524/ANH,16

Anwendung von chemischen Transportmodellen im Rahmen des PAREST-Projekts: Ergebnisvergleich REM-CALGRID, LOTOS-EUROS und COSMO-MUSCAT

**Teilbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur
Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST“**

von

Rainer Stern

Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie, Troposphärische
Umweltforschung, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4539.html>
verfügbar.

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

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	Freie Universität Berlin Institut für Meteorologie Troposphärische Umweltforschung Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10 12165 Berlin
Abschlussdatum:	Mai 2010
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/
Redaktion:	Fachgebiet II 4.1 Grundsatzfragen der Luftreinhaltung Johanna Appelhaus

Dessau-Roßlau, Juni 2013

Inhalt

1	EINLEITUNG.....	1
2	RECHENRASTER UND DATENGRUNDLAGE.....	4
3	VERGLEICH DER MODELLERGEBNISSE	9
4	VERGLEICH MIT MESSUNGEN.....	28
4.1	ERSTELLUNG FLÄCHENDECKENDER SCHADSTOFFVERTEILUNGEN UNTER EINBEZIEHUNG VON MESSUNGEN.....	28
4.2	MITTLERE ABWEICHUNG DER MODELLERGEBNISSE VON DEN OI-INTERPOLIERTEN MESSUNGEN.....	34
4.3	VERGLEICH DER TAGESMITTELWERTE UND JAHRESMITTELWERTE AN AUSGEWÄHLTEN STATIONEN	38
5	ZUSAMMENFASSUNG.....	67
6	LITERATUR	69
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	72
8	TABELLENVERZEICHNIS.....	74
9	ANHANG: STÄDTISCHE HINTERGRUNDSTATIONEN ZUR BESTIMMUNG DES „AVERAGE EXPOSURE INDICATOR“, AEI.....	75

1 Einleitung

Das Hauptziel des FE-Vorhabens „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“ (PAREST, siehe www.parest.de) ist es, emissionsmindernde Maßnahmen zur Reduzierung der Feinstaubbelastung zu identifizieren, um die gegenwärtig noch auftretenden Überschreitungen der PM10-Grenzwerte und des geplanten PM2.5-Grenzwerts zukünftig zu vermeiden. Die immissionsseitigen Auswirkungen der geplanten Maßnahmen werden dazu mit Ausbreitungsrechnungen auf der Basis von Chemie-Aerosol-Transportmodellen bestimmt. Als Ausbreitungsmodell wird hauptsächlich das im Institut für Meteorologie der Freien Universität mit Unterstützung des Umweltbundesamts entwickelte REM-CALGRID-Modell (RCG-Modell, Stern, 2003; 2004; Beekmann et al., 2007) verwendet.

Das REM-CALGRID-Modell (RCG) kann zur Berechnung der langfristigen Schadstoffbelastungen in der europaweiten, der nationalen sowie der regional/urbanen Skala eingesetzt werden. Das Modell ermöglicht es, alle in den EU-Richtlinien definierten Luftqualitätswerte zu bestimmen und wurde dazu auf die speziellen Anforderungen von Jahresrechnungen unter Beibehaltung stündlicher Auflösung ausgerichtet. In der praktischen Anwendung bedeutet dies, dass die physikalisch-chemischen Parametrisierungen so gewählt wurden, dass einerseits eine dem Problem angemessene Darstellung der relevanten Prozesse gewährleistet ist und andererseits der Rechenzeitbedarf des Modells eine Erstellung von Jahresläufen auf einem modernen PC gestattet. Die im Vergleich zu komplexeren Modellen, wie z.B. dem EURAD-Modell (Memmesheimer et al., 2004) oder dem CMAQ-Modell (Byun and Ching, 1999), einfacheren Modellierungsansätze des RCG-Modells betreffen hauptsächlich die Behandlung der Wolken und die damit verbundene heterogene Chemie sowie die Aerosolbildung. Während z.B. EURAD oder CMAQ die Nassphasenprozesse sehr detailliert betrachten, begnügt sich RCG mit einfachen Auswaschansätzen. Die Aerosolmodule des EURAD- oder des CMAQ-Modells simulieren den dynamischen Übergang von Spezies aus der Gasphase in die Aerosolphase. In den RCG-Aerosolmodulen wird dagegen immer von einem sofortigen Gleichgewichtszustand zwischen Aerosol- und Gasphase ausgegangen.

Das RCG-Modell wurde in mehreren internationalen Modellvergleichen überprüft ((Hass et al., 2003; van Loon et al., 2004; Cuvelier et al., 2007; van Loon et al., 2007; Vautard et al., 2007; Thunis et al., 2008; Stern et al., 2008). Insgesamt haben alle Modellvergleiche gezeigt, dass die Ergebnisgüte des mittelkomplexen RCG-Modells durchweg vergleichbar mit derjenigen anderer, zum Teil deutlich komplexerer Modelle ist. Dies bestätigt den für das RCG-Modell gewählten mittelkomplexen Modellansatz.

Neben dem RCG-Modell, das standardmäßig mit dem auf Beobachtungen basierenden meteorologischen Treiber TRAMPER (Kerschbaumer und Reimer, 2003; Reimer und Scherer, 1992; Kerschbaumer, 2010a) betrieben wird, kommen im PAREST-Projekt aber auch noch andere Modelle bzw. alternative Modellkombinationen zum Einsatz. Insgesamt werden angewandt:

- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem diagnostischen TRAMPER-System
- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem numerischen Modell COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes
- LOTOS-EUROS, meteorologischer Antrieb mit dem numerischen Modell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage, EZMW
- MUSCAT, meteorologischer Antrieb mit dem numerischen Modell COSMO.

Die Anwendung mehrerer Modelle dient der Ermittlung einer Ergebnisbandbreite und zur Ergebnisabsicherung.

Das LOTOS-EUROS-Modell (www.lotos-euros.nl) entspricht in seiner Komplexität dem RCG-Modell (siehe Stern et al., 2008, Thunis et al., 2008). Das am Leibniz-Institut für Troposphärenforschung entwickelte komplexere Modellsystem COSMO-MUSCAT (Wolke et al., 2004a, 2004b) besteht aus dem online gekoppelten meteorologischen Vorhersagemodell COSMO des Deutschen Wetterdienstes und dem Chemie-Transport-Modell MUSCAT (Multi-Scale Chemistry Aerosol Transport). Dabei kommt ein Kopplungsschema zur Anwendung, das die von MUSCAT benötigten meteorologischen Felder aus dem simultan mitlaufenden meteorologischen Modell COSMO in Zeit und Raum approximiert, wobei die Massenerhaltung gewährleistet wird.

Neben den Emissionen ist der meteorologische Treiber eines Modells die wichtigste externe Komponente. Der meteorologische Antrieb des RCG-Modells wird standardmäßig aus meteorologischen Beobachtungen mit dem am Institut für Meteorologie betriebenen Programmsystem TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research) erstellt (Reimer und Scherer, 1992; Kerschbaumer und Reimer, 2003). Das Analyseverfahren basiert auf einer statistischen Interpolation (Optimale Interpolation) und benutzt die potentielle Temperatur als Vertikalkoordinate. Die planetarische Grenzschicht für neutrale und instabile Schichtungen wird über einen speziellen integralen Ansatz für die Entwicklung der mittäglichen Mischungsschicht, der Mischungsschichthöhe und des Entrainments berechnet. Die Turbulenzterme und Grenzschichtparameter werden mit Teilmodellen der planetarischen Grenzschicht aus den beobachteten bodennahen meteorologischen Variablen bestimmt.

Alternativ kann das RCG-Modell auch mit einem prognostischen Treiber benutzt werden. Im Rahmen des PAREST-Projekts wurde dazu das numerische Vorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes (DWD) COSMO-EU (frühere Bezeichnung: Lokal-Modell LM) mit dem RCG-Modell gekoppelt (Kerschbaumer, 2010a). COSMO-EU ist ein nicht-hydrostatisches Gittermodell mit einer horizontalen Auflösung von ca. 7 km und einer vertikalen Schichtung in einem hybriden Koordinatensystem, das in der Stratosphäre horizontale Modellflächen aufweist, während in der Troposphäre die Höhenflächen der Orographie folgen – und zwar um so genauer, je tiefer die Schicht liegt. Es werden 40 Höhenschichten benutzt, von denen die erste Schicht bei ca. 10 Metern über Grund liegt. Im Gegensatz zu dem gekoppelten COSMO-MUSCAT-System benutzt RCG das COSMO-Modell aber als reines so genanntes „off-line-Modell“, d.h. die meteorologischen Felder werden vorab berechnet und dann in das RCG-Modell eingespeist. Auch das LOTOS-EUROS-Modell arbeitet in diesem „off-line-modus“ und benutzt die meteorologischen Ausgabefelder des Vorhersagemodells des EZMW als reine Eingabedaten.

Auch die numerischen Wettervorhersagemodelle liefern in den meisten Fällen nicht alle von einem chemischen Transportmodell benötigten meteorologischen Daten. Dies gilt insbesondere für Größen wie die Mischungsschichthöhe oder die Schubspannungsgeschwindigkeit als Maß für die mechanische Turbulenz. Diese Größen müssen dann mit separaten Grenzschichtmodellen nachträglich aus vom Wettervorhersagemodell gelieferten Parametern berechnet werden. Dazu gibt es unterschiedliche Ansätze (siehe dazu Kerschbaumer, 2010b). Bei allen hier vorgestellten meteorologischen Treibern werden die Grenzschichtgrößen unterschiedlich nachgerechnet. Dieser Umstand hat natürlich Auswirkungen auf die Ergebnisse des eigentlichen Ausbreitungsmodells, da die Grenzschichtparameter entscheidenden Einfluss auf die Massentransporte im Modell haben. So ist die Schubspannungsgeschwindigkeit zum Einen eine wichtige Größe bei der Berechnung der trockenen Deposition, zum Anderen steuert

sie den vertikalen turbulenten Transport. Bei der Bewertung des folgenden Modellvergleichs muss also berücksichtigt werden, dass der meteorologische Treiber jedes Modells eigentlich aus zwei Teilen besteht: Größen wie Wind, Temperatur, Dichte und Feuchte werden direkt aus den prognostisch bzw. diagnostisch erstellten Feldern übernommen, die Berechnung der Grenzschichtparameter wie Mischungsschichthöhe oder Schubspannungsgeschwindigkeit erfolgt dann nachträglich.

In diesem Bericht werden die Ergebnisse der vier Modellkombinationen anhand der Simulation des meteorologischen Basisjahrs 2005 für ausgewählte deutsche Stationen verglichen. Im nächsten Kapitel werden die dazu verwendeten Datensätze vorgestellt. In Kapitel 3 erfolgt der Vergleich der Modelle untereinander anhand der Flächendarstellungen für Deutschland. Ein Vergleich mit Messungen folgt in Kapitel 4, die Zusammenfassung in Kapitel 5.

Eine zusammenfassende Darstellung aller im Rahmen des F&E-Vorhabens ausgeführten Arbeiten kann in Builtjes et al. (2010) gefunden werden.

2 Rechenraster und Datengrundlage

Die für den Vergleich benutzen europäischen und deutschen Emissionsdaten wurden im Rahmen des PAREST-Projekts erstellt. Grundlage der Modellrechnungen sind die im Arbeitspaket I des FE-Vorhabens entwickelten deutschen Emissionsabschätzungen für das Referenzjahr 2005 (Jörß et al., 2010). Außerhalb von Deutschland wurden die ebenfalls im Rahmen des FE-Vorhabens von der TNO erhobenen Emissionen verwendet (Denier van der Gon et al., 2010). Beide Datensätze enthalten Abschätzungen zu den Kfz-verursachten PM₁₀-Aufwirbelungsemissionen.

Die Anwendung des RCG-Modells erfolgt in den drei Skalen Europa, Deutschland Nest 1, und Deutschland Nest 2. Die Randbedingungen für Nest 1 liefert die europaweite RCG-Anwendung im so genannten Nest 0. Die Randbedingungen für Nest 2 stammen aus der Anwendung des Modells in Nest 1. Abbildung 2-1, Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3 zeigen die drei hier für das RCG-Modell verwendeten Modellgebiete. Nest 1 dient ausschließlich als Puffer zwischen dem Nest 0 für den europäischen Hintergrund und dem Nest 2. Die Modellrechnungen im Nest 2 basieren auf einer Auflösung von 0.0625° Breite und 0.125° Länge. Dies entspricht in Mitteleuropa einer Maschenweite von circa 7 bis 8 km.

Jedes Modell wurde in seiner von den Modellbetreibern definierten Standardversion verwendet. Der Beitrag der Seesalzkomponenten zum PM₁₀ ist bei allen Modellen berücksichtigt. Durch Wind über natürlichen Böden aufgewirbelter Bodengstaub wird dagegen nur im RCG-Modell berechnet. Auch LOTOS-EUROS und MUSCAT wurden genestet angewandt, d.h. die Randbedingungen für die Deutschland-Rechnungen wurden von jedem Modell eigenständig berechnet (für das RCG-Modell siehe dazu Stern, 2009).

Die vergleichende Auswertung der Modellergebnisse erfolgt nur für die hoch-aufgelösten Rechnungen jedes Modells. Die Auswertung fokussiert zum Einen auf den flächenmäßigen Vergleich der Jahresmittelwerte von NO₂, PM_{2.5} und PM₁₀. Dazu wurden alle Modellergebnisse in das Visualisierungssystem FLADIS (Fath et al., 2010) übernommen und einheitlich dargestellt. Die flächenhafte Darstellung der Modellergebnisse erlaubt zwar eine Bewertung für jeden Ort in Deutschland, die vergleichende Bewertung ist aber komplex, da die Spannbreite der Immissionsunterschiede in einem inhomogenen Emissionsgebiet wie Deutschland sehr groß sein kann. Aus diesem Grunde werden zum Anderen 6 Klassen definiert, für die die Modellergebnisse ausgewertet werden. Dazu wird die Fläche Deutschlands in mehrere Klassen eingeteilt:

- Klasse 1: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte < 100 Einwohner/km²
- Klasse 2: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte $> 100, < 510$ Einwohner/km²
- Klasse 3: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte $> 510, < 945$ Einwohner/km²
- Klasse 4: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte > 945 Einwohner/km²
- Klasse 5: Deutschland gesamt

Die Klasse 1 umfasst die ländlichen Gebiete mit einer geringen Bevölkerungsdichte. Die Obergrenze der Klasse 2 definiert die Bevölkerungsdichte, bei der der Median der Verteilung liegt. Die obere Grenze der Klasse 3 bzw. die Untergrenze der Klasse 4 ist die Bevölkerungsdichte, ab der man von einem Ballungsgebiet spricht. Die 6. Bewertungszahl wird aus einer Mittelung der Ergebnisse für die Gitterzellen abgeleitet, in denen die für die Bestimmung des so genannten AEI für PM_{2.5} (Average Exposure Indicator) ausgewählten städtischen Hintergrundstationen liegen. Diese Stationen sind im Anhang zusammengestellt.

Die Einteilung in die Bevölkerungsklassen wurde auf Basis der von der EU erstellten Bevölkerungsverteilung vorgenommen (<http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice>). Diese Daten beschreiben den Bevölkerungsstand von 2001. Die Abbildung 2-4 zeigt die aus den Daten abgeleitete Bevölkerungsdichte in Deutschland aggregiert im hier verwendeten Rechenraster von 0.125° Länge x 0.0625° Breite. In den dicht besiedelten Ballungsräumen Deutschlands liegt die Bevölkerungsdichte in der hier verwendeten Auflösung von circa $8 \times 7 \text{ km}^2$ zwischen circa 5000 bis über 10000 Einwohner pro km^2 .

Eine zeitliche Auswertung im Vergleich mit gemessenen Tagesmittelwerten erfolgt für ausgewählte Stationen in Deutschland. Dazu wurden ausgewählt:

Sechs Hintergrundstationen, für die auch Messungen der Aerosolkomponenten vorliegen:

- Westerland, Waldhof, Zingst, Neuglobsow, Melpitz, Deuselbach

Die NO_2 - und PM_{10} -Tagesmittelwerte werden zusätzlich für zwei hoch belastete Stationen aus dem Ruhrgebiet verglichen:

- Bottrop und Duisburg-Bruckhausen.

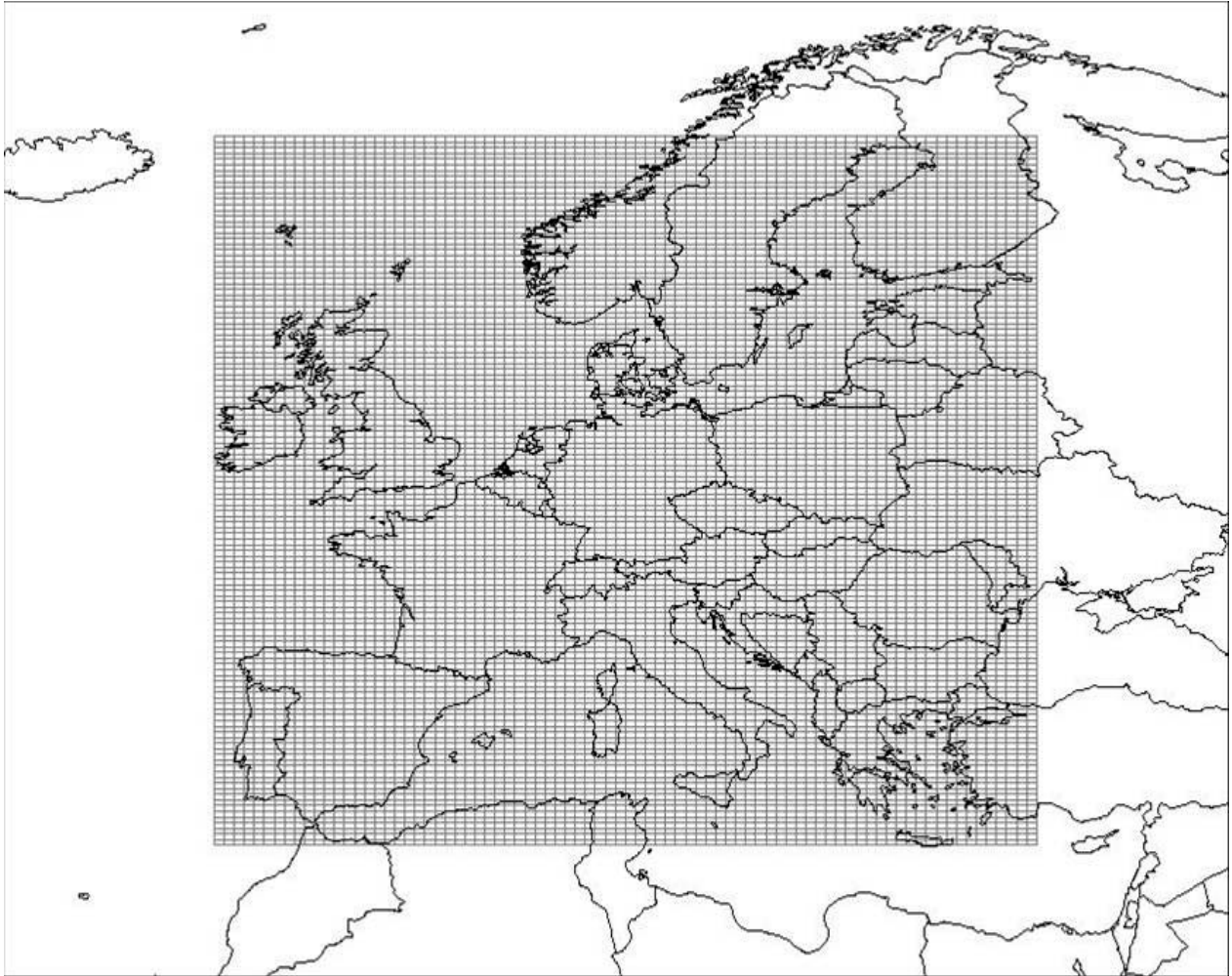


Abbildung 2-1 RCG-Rechengebiet Nest 0 (N0): Europäischer Hintergrund, Auflösung circa 32x28 km², 0.25° Breite, 0.5° Länge, 82 x 125 Gitterzellen, Rechengebiet: -10°W bis 30° Ost, 35.25° N bis 66.0° N

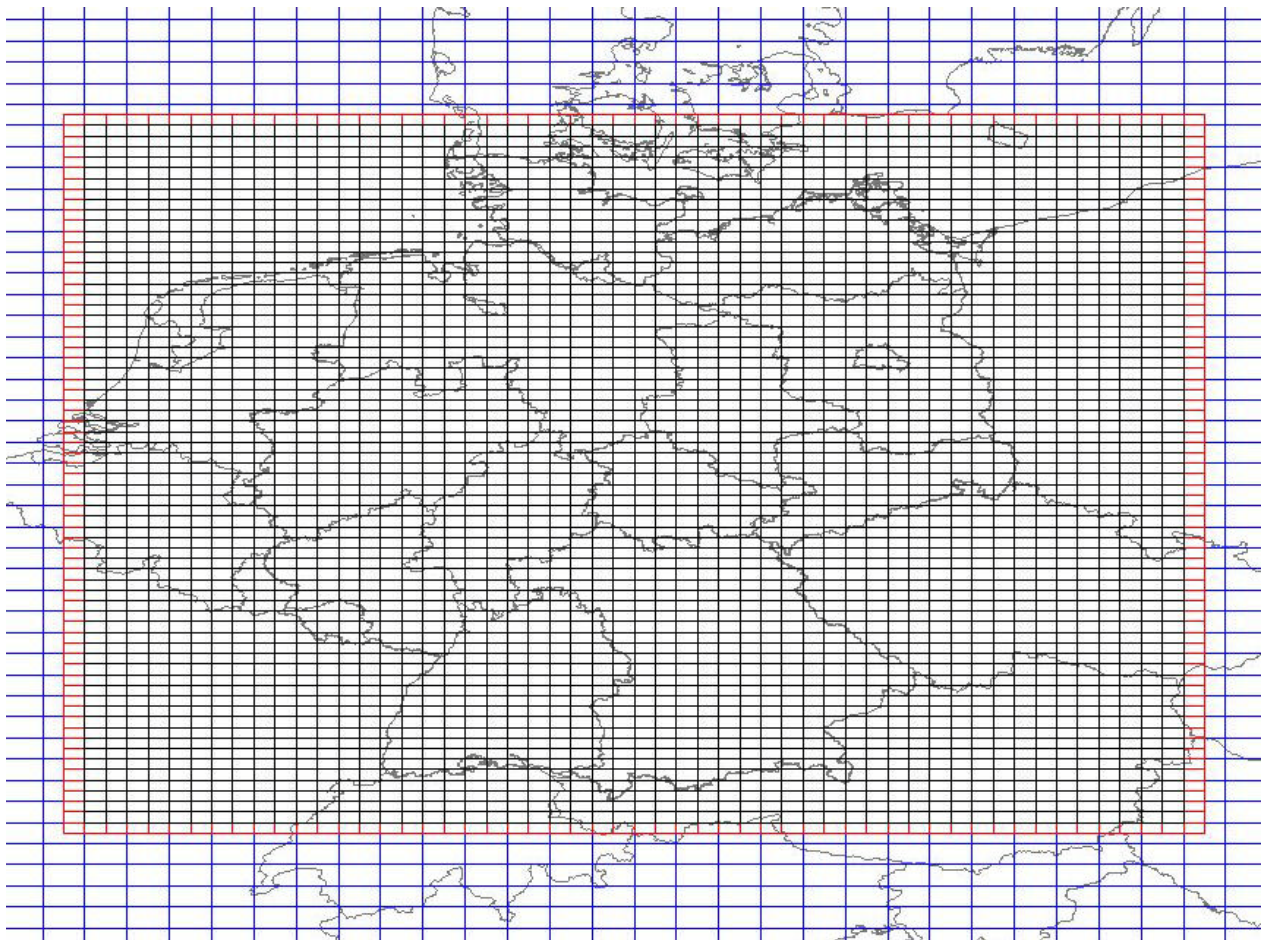


Abbildung 2-2 Nest 1 (N1): Deutschland, Auflösung circa 16 km x 14 km, 0.125° Breite, 0.25° Länge, (N0/2), 54 x 68 Gitterzellen incl. Randreihen (rot), Rechengebiet: 4.0° O bis 17.0° O , 47° N bis 55.25° N

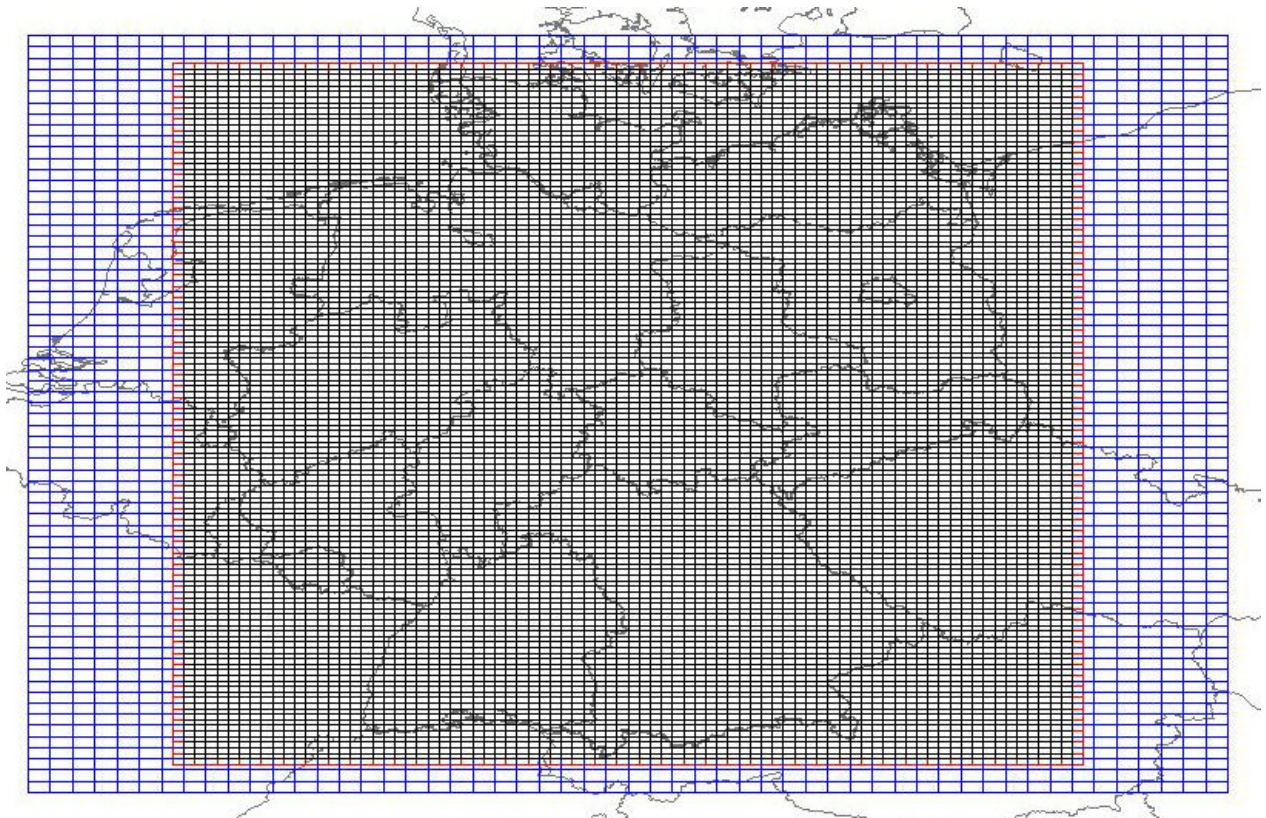
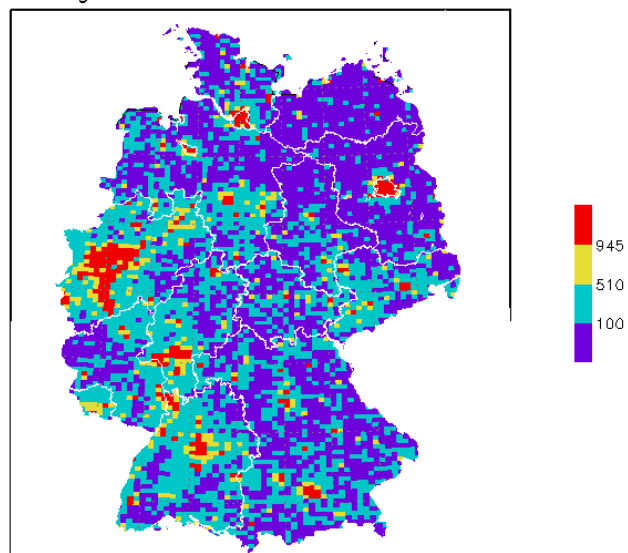


Abbildung 2-3 Nest 2 (N2) Deutschland, Auflösung circa 8 km x 7 km, 0.0625° Breite, 0.125° Länge (N0/4, N1/2), 82 x 126 Gitterzellen incl. Randreihen, Rechengebiet: 5.5° O bis 15.5° O, 47.25° N bis 55.0° N

Bevoelkerungsdichte in 4 Klassen im Raster Nest 2



GRADS: COILA/IOES

2009-05-18-18:53

Abbildung 2-4 Bevölkerungsdichte in Einwohner/km² in 4 Klassen. Zur Klassendefinition siehe Text. Die Auflösung entspricht der Auflösung des Nestes 2, Deutschland fein: 0.0625° Breite, 0.125°, circa 8 km x 7 km.

3 Vergleich der Modellergebnisse

Die folgenden Auswertungen beschreiben die Ergebnisse der Modellberechnungen für:

- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem diagnostischen TRAMPER-System: RCG-TRAMPER
- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem numerischen Modell COSMO-EU: RCG-COSMO-EU oder RCG-LM
- LOTOS-EUROS, meteorologischer Antrieb mit dem numerischen Modell des EZMW
- MUSCAT, meteorologischer Antrieb mit dem numerischen Modell COSMO.

Als meteorologisches Referenzjahr und Emissionsreferenzjahr wurde 2005 gewählt.

Abbildung 3-1 bis Abbildung 3-3 zeigen die berechneten Jahresmittelwerte von NO_2 , PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ für alle 4 Modellkombinationen. Die Verteilung des von den Modellen berechneten PM-Anteils in der Grobfraktion von PM_{10} , $\text{PM}_{10} - \text{PM}_{2.5}$, zeigt die Abbildung 3-4, das Verhältnis PM_{10} zu $\text{PM}_{2.5}$ ist in Abbildung 3-5 zu sehen. In Abbildung 3-6 bis Abbildung 3-8 sind die Auswertungen für Ozon zusammengestellt. Die Tabelle 3-1 zeigt die aus den Abbildungen abgeleiteten Bandbreiten (kleinster, mittlerer und größter Wert in Deutschland) der einzelnen Kenngrößen. Eine mittlere Auswertung in den in Kapitel 2 definierten Klassen relativ zu den RCG-TRAMPER-Ergebnissen kann in Abbildung 3-9 bis Abbildung 3-11 gefunden werden.

Generell werden für die Stoffe NO_2 , PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ mit RCG-Tramper vor allem in den Ballungsgebieten die höchsten Jahresmittelwerte berechnet. Die NO_2 -Jahresmittelwerte von RCG-COSMO-EU, LOTOS und MUSCAT liegen relativ eng zusammen und sind im Mittel um circa 30% niedriger als diejenigen von RCG-TRAMPER (Abbildung 3-1 und Abbildung 3-9). Für PM_{10} sind die Verhältnisse nicht so eindeutig wie für NO_2 . RCG-TRAMPER hat die höchsten Werte in den höher belasteten Ballungsräumen, in den weniger belasteten Regionen liegen die mit MUSCAT berechneten PM_{10} -Jahresmittelwerte aber nahe bei den RCG-TRAMPER-Ergebnissen (Abbildung 3-2 und Abbildung 3-10). LOTOS berechnet eindeutig die niedrigsten PM_{10} -Jahresmittelwerte. Im Schnitt liegen die LOTOS-Werte um circa 40 bis 50% unter den RCG-TRAMPER-Werten (Abbildung 3-10). RCG angetrieben mit dem prognostischen Treiber COSMO-EU (LM-Modell) liefert circa 25% niedrige PM_{10} -Jahresmittelwerte als RCG in Verbindung mit den diagnostischen meteorologischen Daten. Die MUSCAT-Ergebnisse unterscheiden sich vor allem in den Ballungsräumen von den RCG-TRAMPER-Ergebnissen und liegen dort zwischen 15 und 20% niedriger. Die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen LOTOS, MUSCAT und RCG-TRAMPER für die $\text{PM}_{2.5}$ -Jahresmittelwerte sind geringer als diejenigen für die PM_{10} -Jahresmittelwerte (Abbildung 3-3 und Abbildung 3-10). MUSCAT berechnet außerhalb der Ballungsräume leicht höhere $\text{PM}_{2.5}$ -Jahresmittelwerte als RCG-TRAMPER, in den Ballungsräumen dagegen um bis zu 7% niedrigere Werte (Abbildung 3-10). Die mit LOTOS berechneten $\text{PM}_{2.5}$ -Jahresmittelwerte liegen um 30 bis 40% niedriger als die mit RCG-TRAMPER berechneten Werte. Die Unterschiede zwischen RCG-COSMO und RCG-TRAMPER sind dagegen für $\text{PM}_{2.5}$ etwas höher als für PM_{10} . Die größten Unterschiede zu der Referenzrechnung mit RCG-TRAMPER ergeben sich für MUSCAT und LOTOS für die Grobfraktion des PM_{10} ($\text{PM}_{10} - \text{PM}_{2.5}$). Die LOTOS-Jahresmittelwerte für PM_{10} sind um 70 bis 80% nied-

riger als diejenigen von RCG-TRAMPER (Abbildung 3-4 und Abbildung 3-10). MUSCAT berechnet in den Ballungsräumen bis zu 40%, in den ländlicheren Regionen um die 20% niedriger PMCO-Jahresmittelwerte als RCG-TRAMPER. LOTOS weist damit auch die höchsten PM2.5/PM10-Verhältnisse aller Modellkombinationen auf. Bei RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU und MUSCAT liegen die PM2.5-Anteile am PM10 zwischen circa 40 und 85%. Der PM2.5-Anteil bei LOTOS ist dagegen mit Werten zwischen 60 und 95% deutlich höher (Abbildung 3-5 und Tabelle 3-1). Die PM10-Berechnungen von LOTOS und MUSCAT wurden ohne den Beitrag des von Böden aufgewirbelten Staubs durchgeführt, die RCG-Ergebnisse dagegen berücksichtigen diese Quelle. Der Beitrag des Bodestaubs zu den PM10-Konzentrationen ist aber gering. Dies wird später beim Vergleich mit den Messungen noch gezeigt.

Die Ozonjahresmittelwerte von LOTOS sind in den Ballungsräumen geringfügig, in ländlichen Regionen um bis zu 10% niedriger als diejenigen von RCG-TRAMPER (Abbildung 3-6 und Abbildung 3-11). RCG-COSMO-EU und MUSCAT berechnen dagegen in ländlichen Regionen um die 20%, in den Ballungsräumen bis zu 30% höhere Ozonjahresmittelwerte als RCG-TRAMPER. Größere Unterschiede ergeben sich für die AOT40-Werte zum Schutz der Vegetation und die Anzahl von Tagen mit einem maximalen gleitenden 8-h-Mittelwert $>120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. MUSCAT berechnet die niedrigsten AOT40-Werte, die in allen Klassen circa 60% unter den mit RCG-TRAMPER berechneten Werten liegen (Abbildung 3-11). Die mit LOTOS berechneten AOT40-Werte liegen in den Ballungsgebieten um 25 bis 35%, in den anderen Regionen bis zu knapp 50% niedriger als die RCG-TRAMPER-Werte. Höhere AOT40-Werte werden mit RCG-COSMO-EU berechnet. Bei der Anzahl der Tage mit einem maximalen gleitenden 8-h-Mittelwert $>120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liefert LOTOS die niedrigste Anzahl gefolgt von MUSCAT. RCG-COSMO-EU berechnet dagegen mehr Überschreitungstage als RCG-TRAMPER. Es ist bemerkenswert, dass MUSCAT trotz höherer Ozonjahresmittelwerte und höherer 8-h-Mittelwerte niedrigere AOT40-Werte als LOTOS berechnet. Der AOT40-Wert ergibt sich aus der Summation der Konzentrationsdifferenz zwischen dem Rechenwert und $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aller Stundenwerte der Monate Mai, Juni und Juli, sofern diese $> 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sind. Hohe AOT40-Werte kommen damit zustande, wenn das Modell hohe Ozonmaxima berechnet. Die niedrigen AOT40-Werte und die hohen Mittelwerte von MUSCAT bedeuten daher, dass die Tagesamplitude der stündlichen Ozonwerte relativ gering sein muss. Dieser Umstand kann im Rahmen dieser Untersuchung nicht näher beleuchtet werden.

RCG-TRAMPER und RCG-COSMO-EU unterscheiden sich nur in der Art des meteorologischen Antriebs. Daher können die Konzentrationsunterschiede dieser beiden Modellkombinationen ausschließlich durch die Unterschiede in den meteorologischen Daten hervorgerufen werden. RCG-TRAMPER liefert für NO_2 , PM2.5 und PM10 höhere Konzentrationen als RCG-COSMO-EU, was seine Ursache damit in der diagnostischen TRAMPER-Datenbasis haben muss. Auf diesen Punkt wird später noch eingegangen. RCG-COSMO-EU, MUSCAT und LOTOS werden alle mit prognostischen meteorologischen Daten betrieben. Die Auswertung der Modellergebnisse von LOTOS und MUSCAT bezüglich der RCG-COSMO-EU-Ergebnisse zeigen Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13. Es ist offensichtlich, dass die Unterschiede zwischen den NO_2 -Jahresmittelwerten der drei prognostisch angetriebenen Modelle kleiner als 10% sind. Bei den PM10-Jahresmittelwerten liegt LOTOS zwischen 25 bis 35% unter und MUSCAT zwischen 10 und 30% über den Werten von RCG-COSMO-EU. Die tieferen PM10-Werte von LOTOS werden überwiegend durch die sehr niedrigen Konzentrationen in der Grobfraktion PMCO verursacht. MUSCAT berechnet im Vergleich mit RCG-COSMO-EU zwischen 30% (Ballungsgebiete) bis 45% (ländliche Regionen) höhere PM2.5-Jahresmittelwerte, aber zwischen 7% (ländliche Regionen) und 20% (Ballungsgebiete) niedrigere PMCO-Werte.

Die Ozonjahresmittelwerte von MUSCAT liegen im Mittel sehr nahe bei denen von RCG-COSMO-EU (Abbildung 3-14) während LOTOS circa 25% niedrigere Werte berechnet. Trotz der ähnlichen Ozonjahresmittelwerte gibt es bei den AOT40-Werten und den Überschreitungstagen sehr große Unterschiede zwischen MUSCAT und RCG-COSMO-EU mit deutlich niedrigeren Werten für MUSCAT. Auch LOTOS weist niedrigere AOT40-Werte und weniger Überschreitungstage aus als RCG-COSMO-EU. Auf die Unterschiede zwischen LOTOS und MUSCAT wurde schon weiter vorne eingegangen.

Insgesamt liefert RCG-TRAMPER in den Ballungsgebieten für die NO_2 -, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ - und PM_{CO} -Jahresmittelwerte also die höchsten Konzentrationen. RCG-TRAMPER ist die einzige Modellkombination, die eine diagnostische, auf Beobachtungen basierende meteorologische Datenbasis verwendet. Ersetzt man beim RCG-Modell die diagnostische Datenbasis durch die prognostische COSMO-EU-Datenbasis, gleichen sich die NO_2 -Jahresmittelwerte des RCG-Modells stark an diejenigen der beiden Modelle mit prognostischer Meteorologie an. Dies bedeutet, dass die vom diagnostischen Treiber TRAMPER gelieferten meteorologischen Daten und nicht die im RCG-Modell verwendeten physikalisch/chemischen Parametrisierungen die Ursache für die im Vergleich mit den Modellen LOTOS und MUSCAT höheren NO_2 - und PM_{10} -Konzentrationen sind.

Die chemische Behandlung der NO_2 -Bildung und auch die Deposition von NO_2 sind wissenschaftlich abgesichert. Beide Prozesse werden daher in allen Modellen sehr ähnlich parametrisiert. Das gilt nicht in diesem Maße für PM_{10} oder Ozon. PM_{10} besteht aus primär emittierten Partikeln und während des Transports physikalisch/chemisch gebildeten Sekundäraerosolen. Ozon entsteht aus einem komplexen Zusammenspiel der meteorologischen Einflussgrößen mit den anthropogenen und biogenen Vorläuferkonzentrationen. Die anthropogenen Emissionen sind bei allen Modellen dieselben, die biogenen Vorläuferemissionen werden aber unterschiedlich bestimmt. Die physikalisch-chemische Behandlung der Aerosol- und Oxidantienbildung ist in den Modellen zwar ähnlich, aber nicht identisch. Dies gilt auch für die verwendeten Partikel-Depositionsansätze, die für PM_{10} und seine Komponenten sehr viel unsicherer sind als für die Gase. All diese Unsicherheiten führen dazu, dass sich die Konzentrationen von PM_{10} und auch Ozon, insbesondere der Ozongrößen, die durch die berechneten Ozonmaxima bestimmt werden, zwischen den Modellen stärker unterscheiden als die NO_2 -Konzentrationen.

Der Einfluss der Depositionsparametrisierung auf die Konzentrationen zeigt sich deutlich bei der Grobfraktion PM_{CO} , die in allen Modellen eine primäre, d. h. direkt emittierte und nicht chemisch gebildete Komponente ist. LOTOS hat mit Abstand die geringsten PM_{CO} -Konzentrationen, was auf eine im Vergleich zu den anderen Modellen sehr viel größere trockene und möglicherweise auch nasse Deposition für diesen Stoff hinweist. Auch MUSCAT scheint für PM_{CO} niedrigere Depositionsraten zu benutzen als das RCG-Modell. Unterschiedliche mittlere und turbulente Transportraten können nicht die Hauptursache für die großen Unterschiede in den PM_{CO} -Konzentrationen sein, da sich in diesem Falle auch die NO_2 -Konzentrationen stärker unterscheiden müssten.

Der Vergleich RCG-TRAMPER und RCG-COSMO-EU zeigt, dass die Wahl der meteorologischen Daten einen großen Einfluss auf die Modellergebnisse haben kann. Eine genaue Analyse der TRAMPER- und der COSMO-EU-Daten wurde von Kerschbaumer (2010a) durchgeführt. Die Analyse ergab, dass sich die meteorologischen Felder vor allem in den grenschichtrelevanten Parametern unterscheiden:

- Schubspannungsgeschwindigkeiten aus COSMO-EU sind im Durchschnitt doppelt so hoch wie bei TRAMPER,
- nächtliche Grenzschichthöhen im COSMO-EU-Treiber-Datensatz fallen im Gegensatz zu den TRAMPER-Daten nicht unter 300 m,
- windstille Situationen werden bei COSMO-EU über Land deutlich seltener simuliert als bei TRAMPER,
- die Windgeschwindigkeiten über den Meeren werden mit TRAMPER sehr viel niedriger simuliert,
- die Niederschlagssummen über den Meeren sind bei TRAMPER sehr gering.

Sensitivitätsstudien zeigen (Kerschbaumer, 2010a), dass die Unterschiede bei windschwachen Wetterlagen und insbesondere die bei allen Wetterlagen auftretenden Unterschiede in der Schubspannungsgeschwindigkeit die Hauptursache für die Konzentrationsunterschiede zwischen RCG-TRAMPER und RCG-COSMO-EU sind. Die Schubspannungsgeschwindigkeit ist eine wichtige Größe bei der Berechnung der vertikalen Austauschkoefizienten und der Depositionswiderstände. Kleine Werte der Schubspannungsgeschwindigkeit bedingen kleine Austauschkoefizienten, was zu einem geringen vertikalen turbulenten Transport führt. Auch die Depositionsrate ist geringer bei kleinen Werten der Schubspannungsgeschwindigkeit. Damit führen sowohl die niedrigen Windgeschwindigkeiten des TRAMPER-Treibers bei windschwachen Wetterlagen als auch die geringen Werte für die Schubspannungsgeschwindigkeit zu erhöhten Konzentrationen in Bodennähe. Eine weitere Analyse von Kerschbaumer (2010b) zeigt, dass die in LOTOS und in MUSCAT verwendeten Wind- und Schubspannungsgeschwindigkeiten näher bei den Werten des COSMO-EU-Treibers als bei den Werten des TRAMPER-Treibers liegen. Dies erklärt dann auch, warum insbesondere für NO_2 die Ergebnisse von RCG-COSMO-EU, LOTOS und MUSCAT niedriger sind als die Ergebnisse für RCG-TRAMPER. Ähnliches gilt auch für PM_{10} , wobei bei diesem Stoff die unterschiedliche physikalisch/chemische Behandlungsweise die Einflüsse der Schubspannungsgeschwindigkeit zum Teil überdeckt.

	Min	Mean	Max
NO₂			
RCG-TRAMPER	6	15	49
RCG-COSMO-EU	3	10	38
LOTOS-EZMW	4	10	33
COSMO-MUSCAT	2	9	36
PM₁₀			
RCG-TRAMPER	9	16	44
RCG-COSMO-EU	6	12	30
LOTOS-EZMW	5	9	22
COSMO-MUSCAT	7	15	25
PM_{2.5}			
RCG-TRAMPER	8	11	22
RCG-COSMO-EU	6	8	17
LOTOS-EZMW	4	8	15
COSMO-MUSCAT	5	12	17
PM_{2.5}/PM₁₀			
RCG-TRAMPER	0.37	0.73	0.85
RCG-COSMO-EU	0.41	0.69	0.88
LOTOS-EZMW	0.61	0.90	0.96
COSMO-MUSCAT	0.55	0.78	0.84
PMCO			
RCG-TRAMPER	1	4	21
RCG-COSMO-EU	1	4	14
LOTOS-EZMW	0	1	7
COSMO-MUSCAT	2	3	8
O₃			
RCG-TRAMPER	25	49	71
RCG-COSMO-EU	38	59	78
LOTOS-EZMW	24	45	59
COSMO-MUSCAT	38	60	80

Tabelle 3-1 Bandbreiten der berechneten Jahresmittelwerte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) von NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, PMCO (PM₁₀-PM_{2.5}) und Ozon sowie des PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnisses. Min: kleinster Wert in Deutschland; Mean: Mittelwert in Deutschland; Max: Maximaler Wert in Deutschland. Gerundet auf volle $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

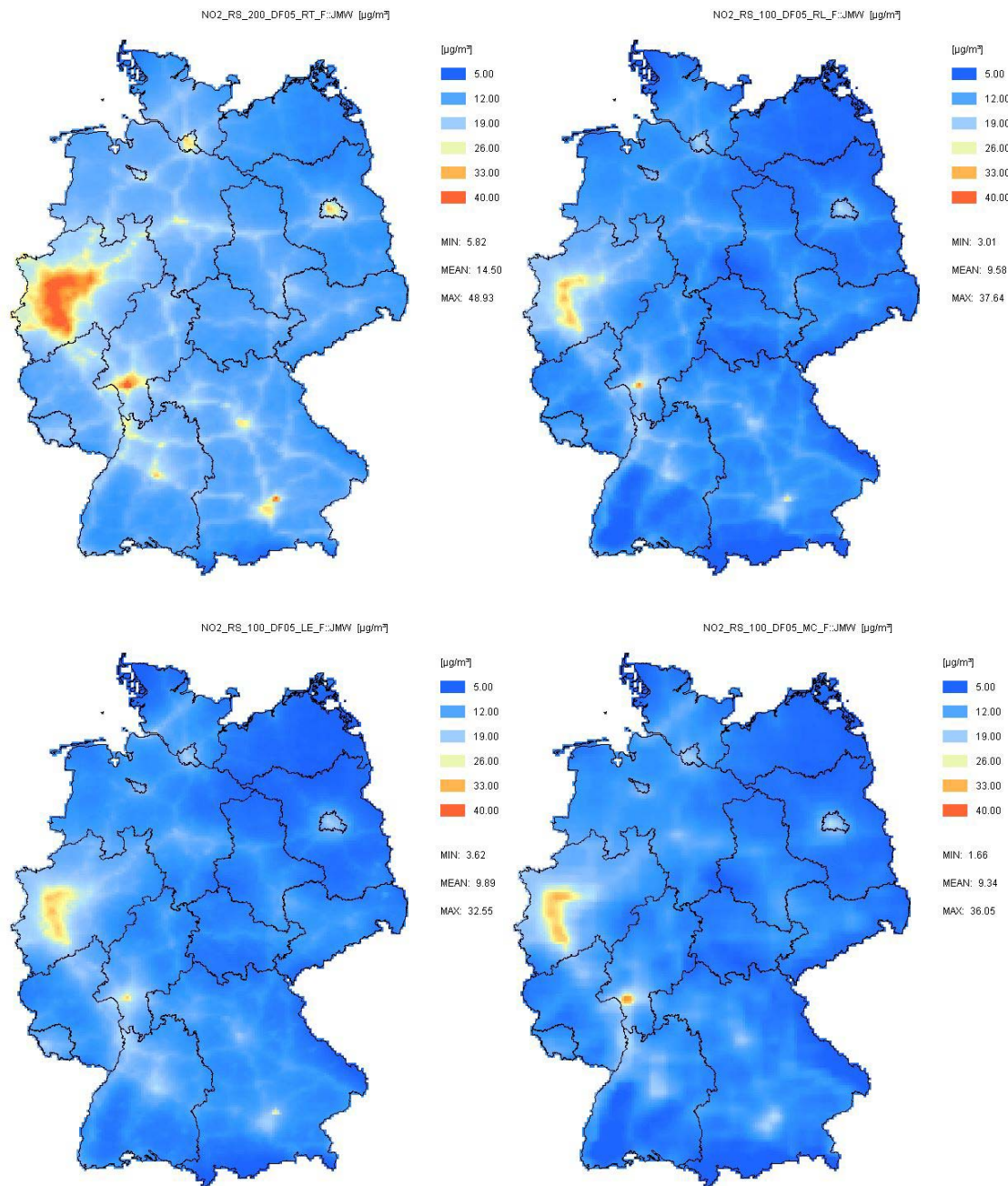


Abbildung 3-1 Berechnete NO₂-Jahresmittelwerte 2005 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

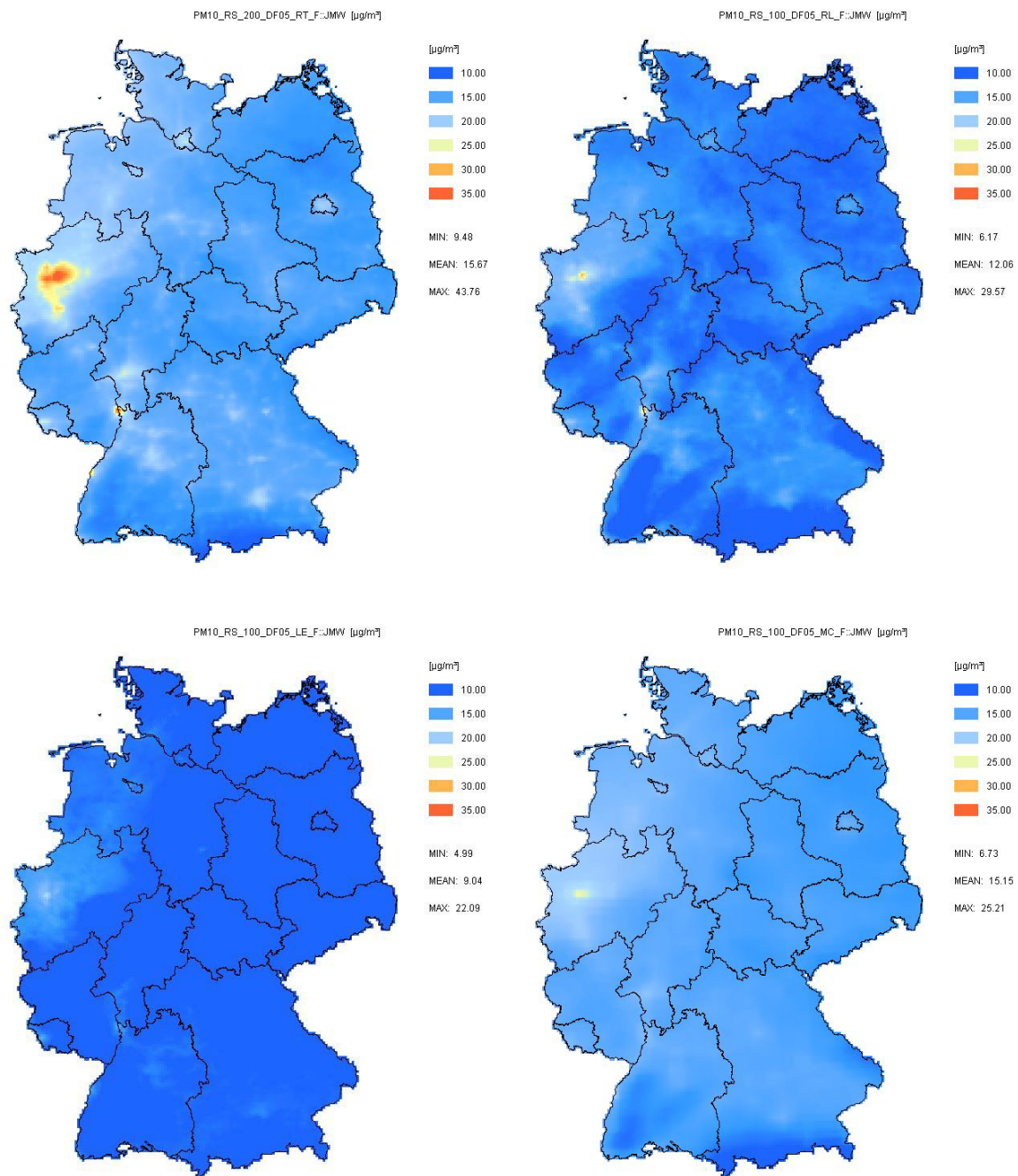


Abbildung 3-2 Berechnete PM10-Jahresmittelwerte 2005 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

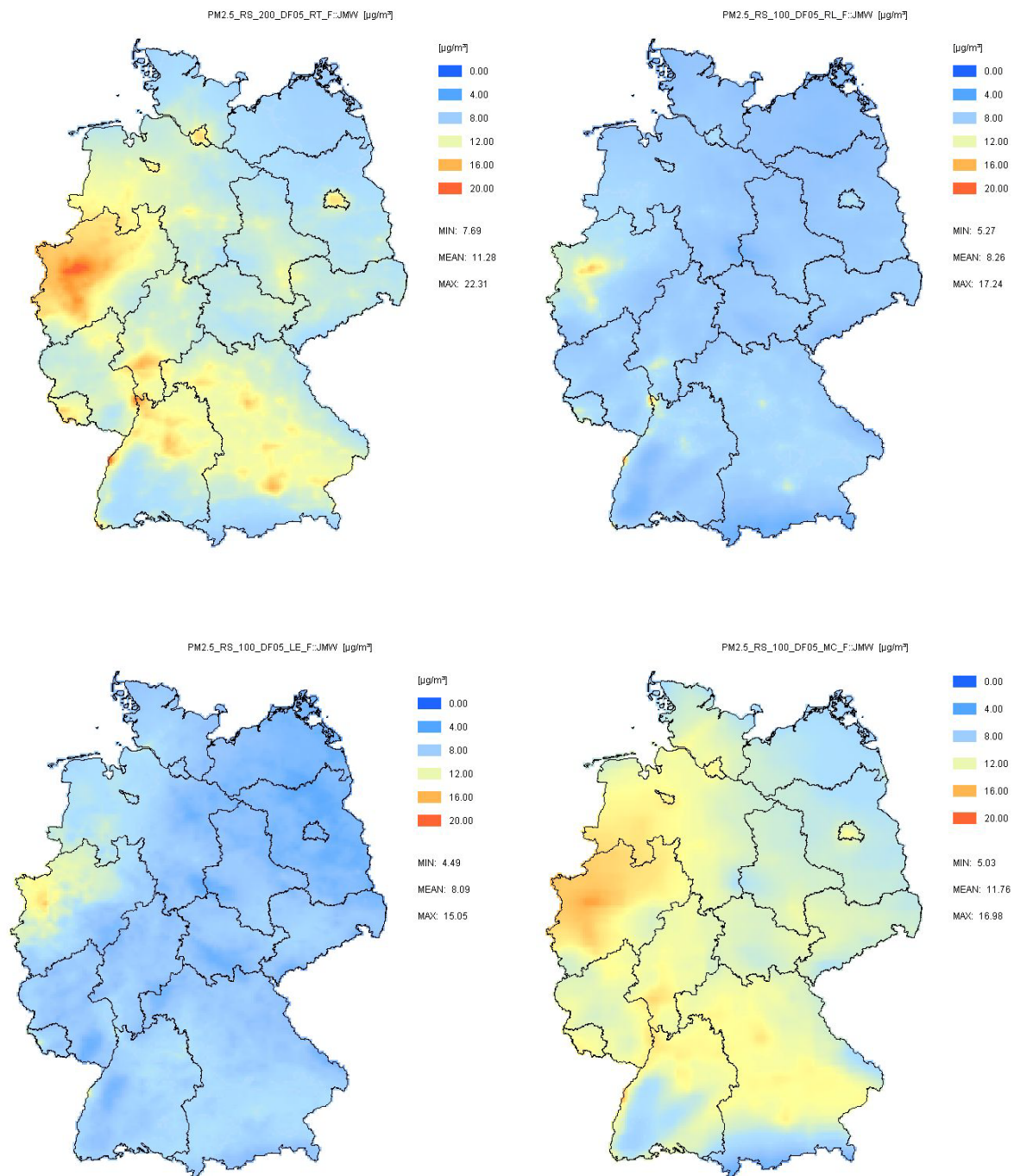


Abbildung 3-3 Berechnete PM2.5-Jahresmittelwerte 2005 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

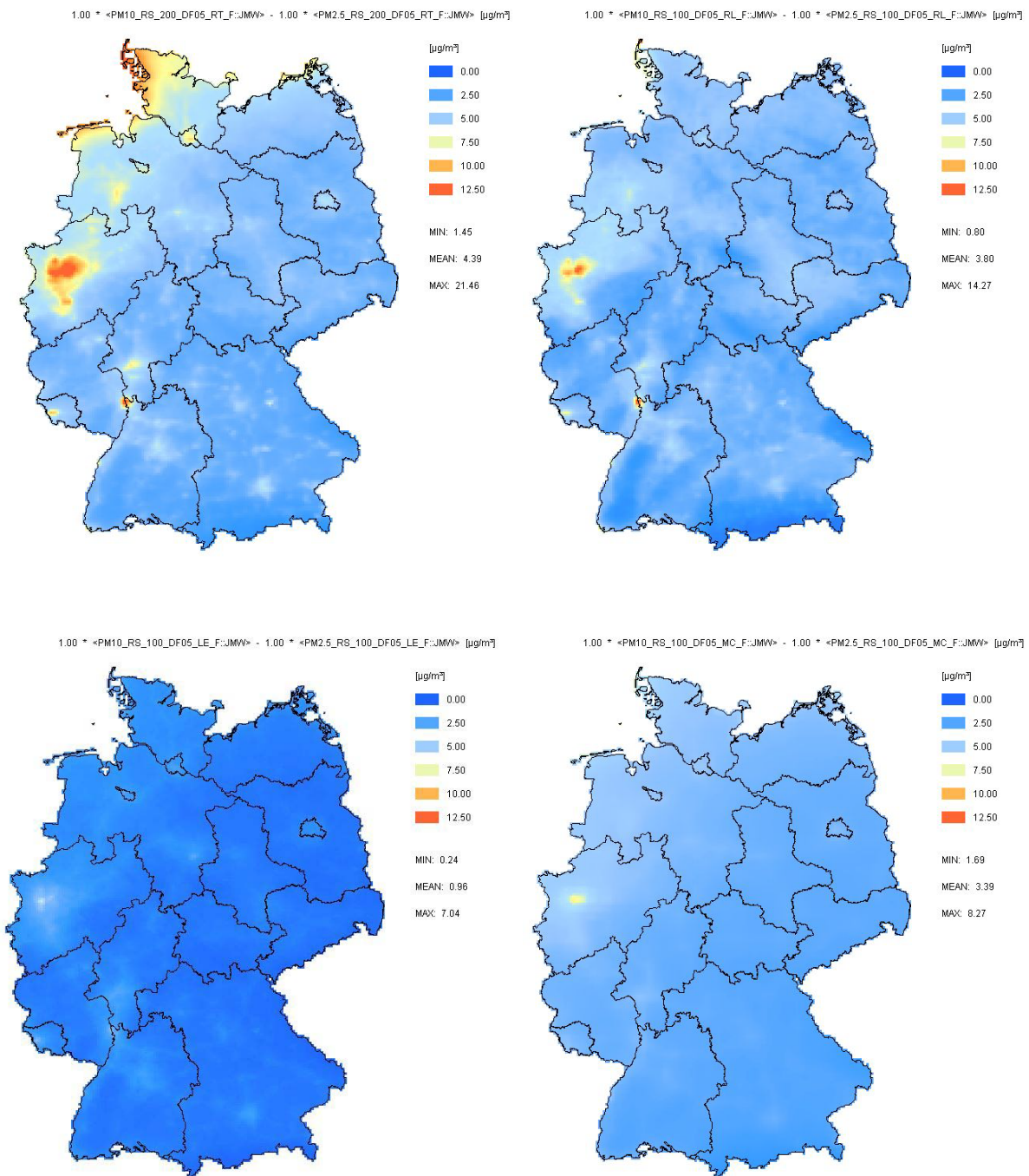


Abbildung 3-4 Berechnete (PM10-PM2.5)-Jahresmittelwerte 2005 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

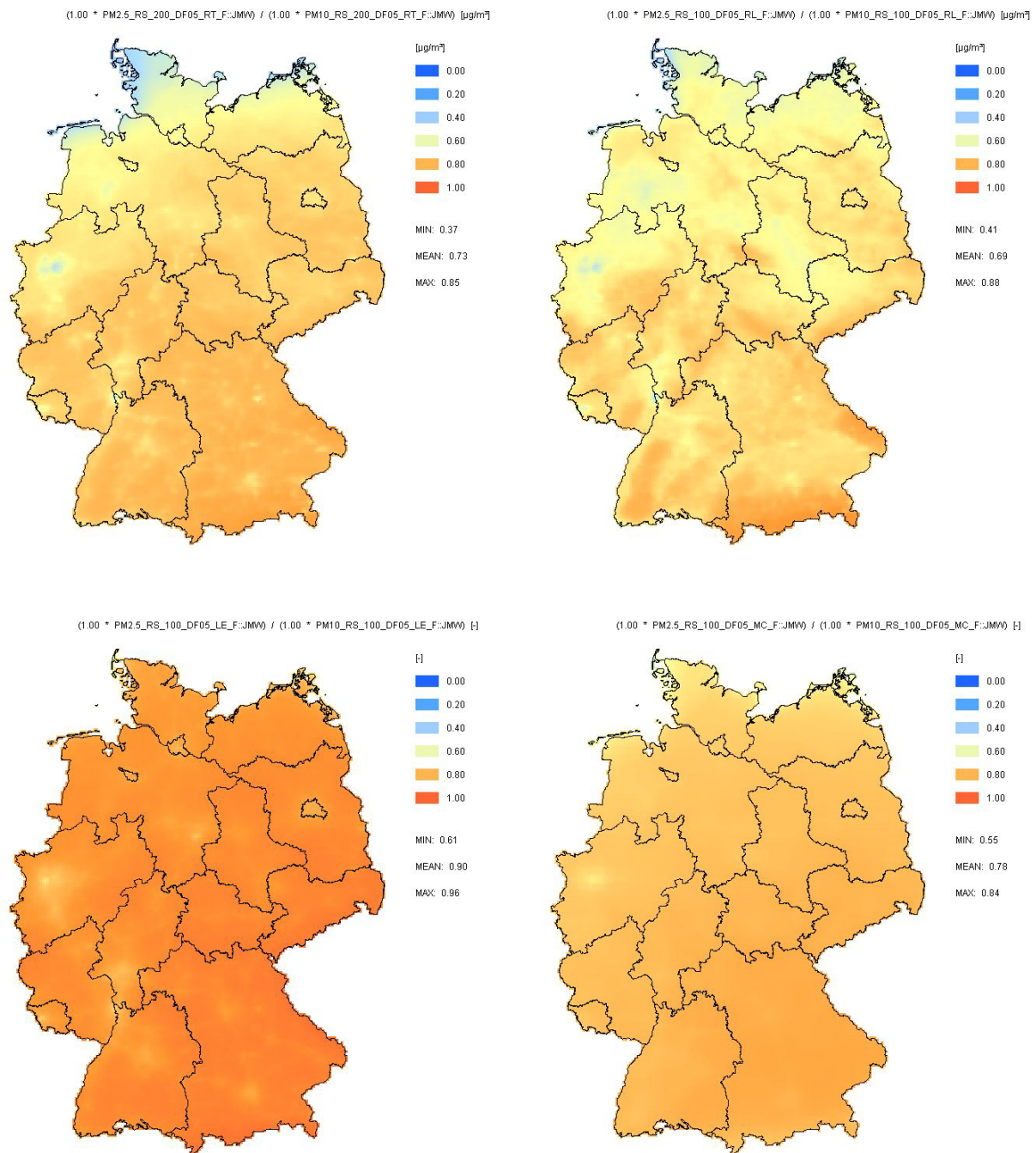


Abbildung 3-5 Berechnetes PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnis. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

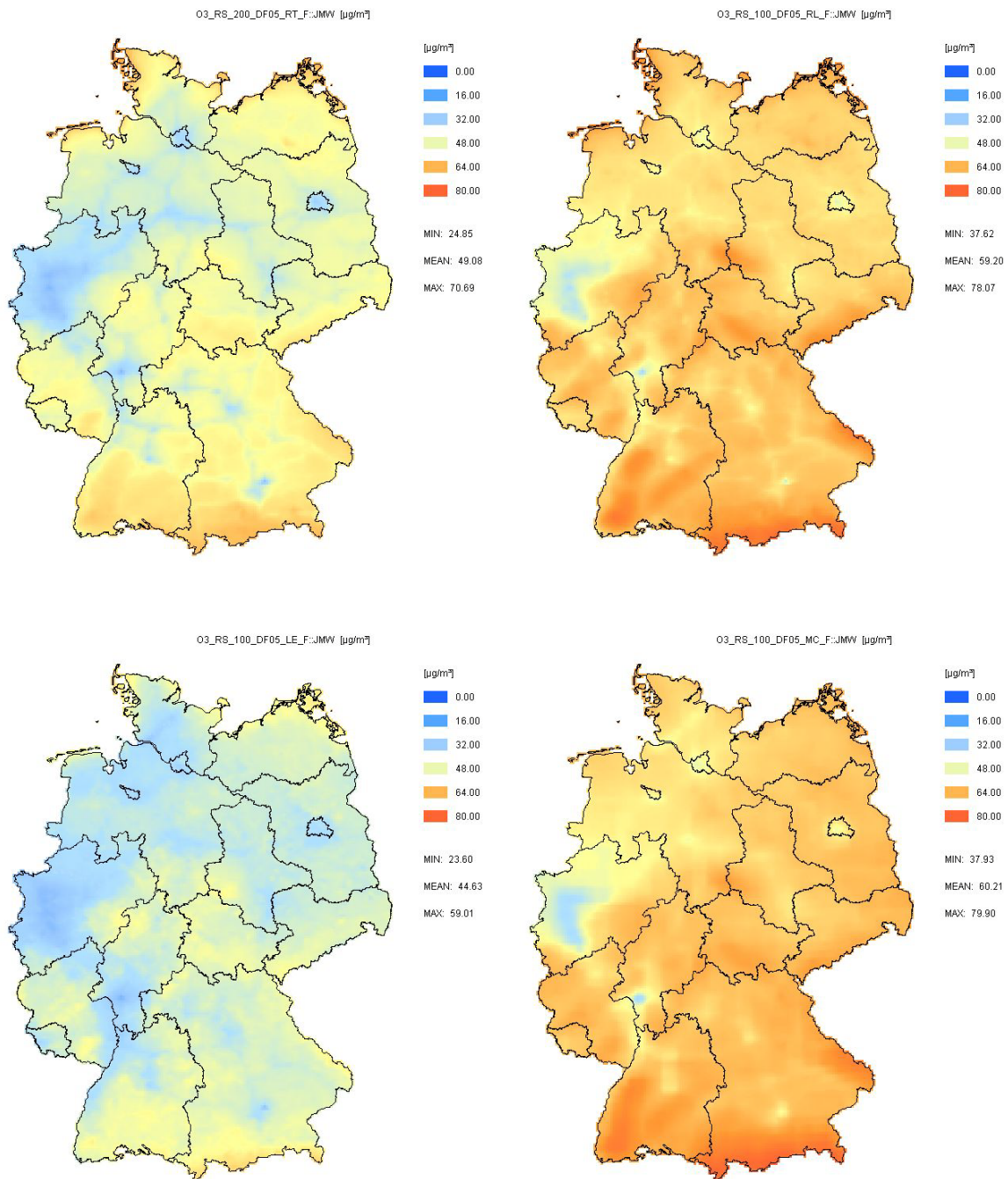


Abbildung 3-6 Berechnete O₃-Jahresmittelwerte 2005 in µg/m³. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

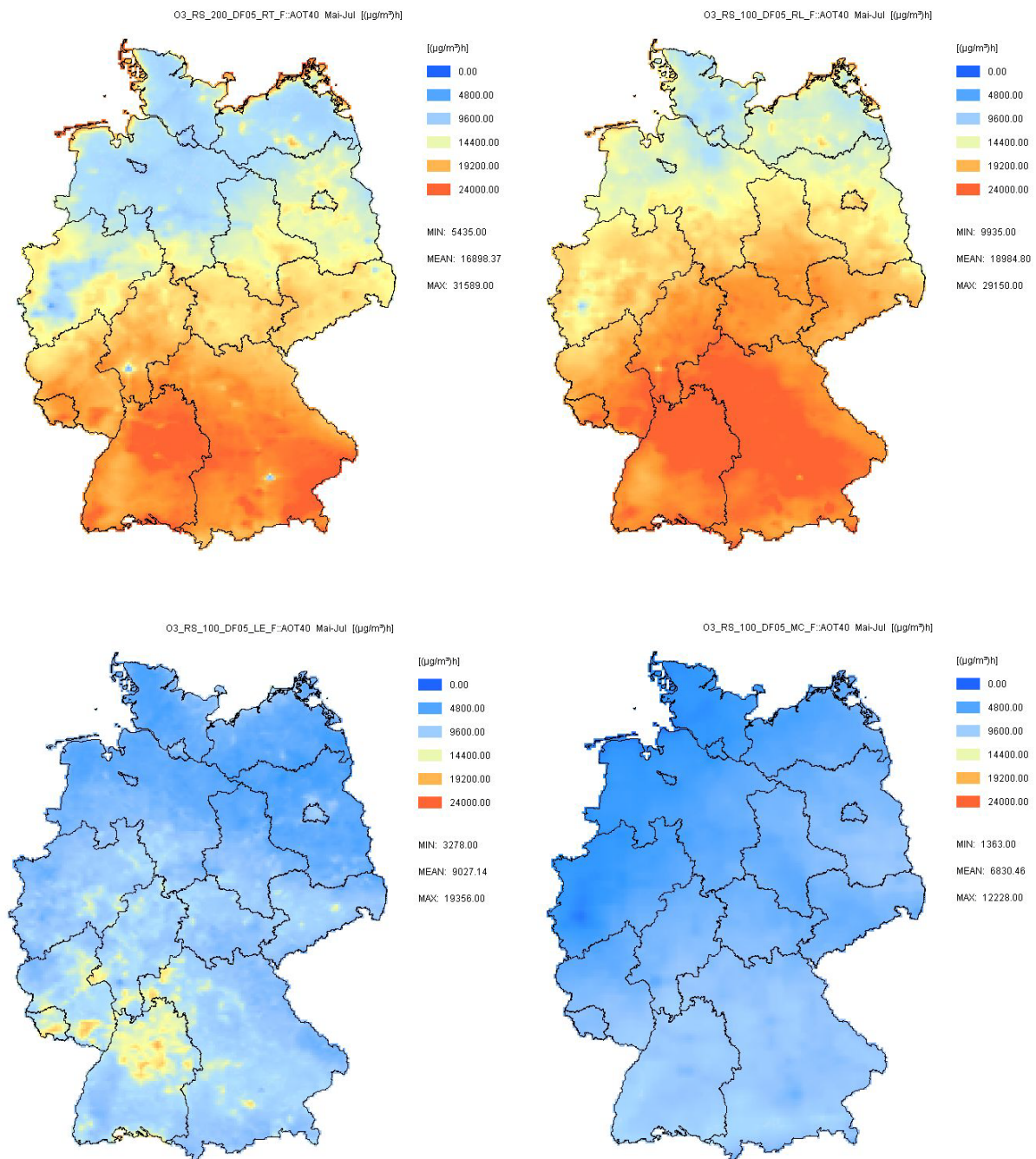


Abbildung 3-7 Berechnete O₃-AOT40-Werte zum Schutz der Vegetation (Mai-Juli) für das Jahr 2005 in µg/m³h. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

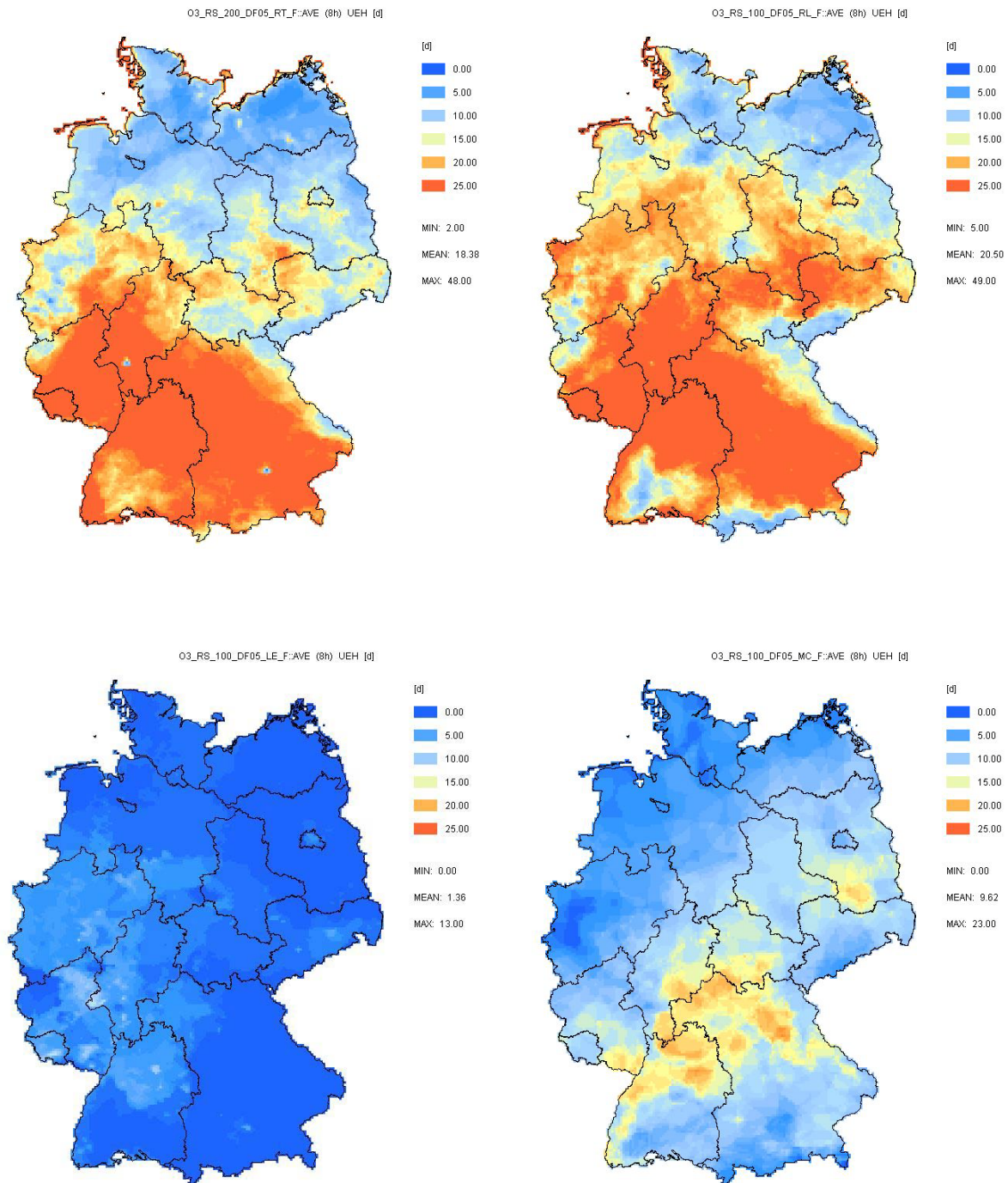


Abbildung 3-8 Berechnete Anzahl von Tagen mit einem maximalen O_3 -8-h-Mittelwert $> 120 \mu g/m^3$. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

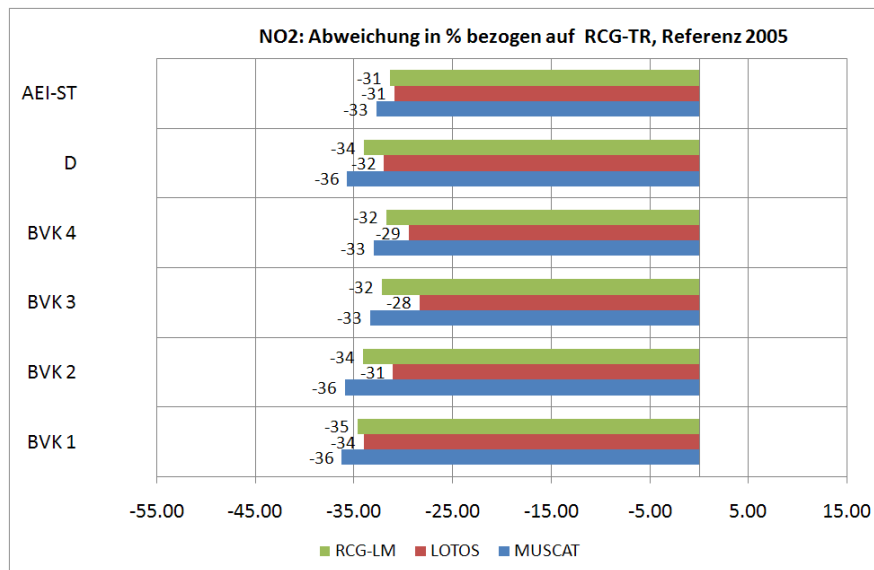


Abbildung 3-9 Mittlere Abweichung der NO₂-Jahresmittelwerte in % der Modelle RCG-LM (COSMO-EU), LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-TRAMPER für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.

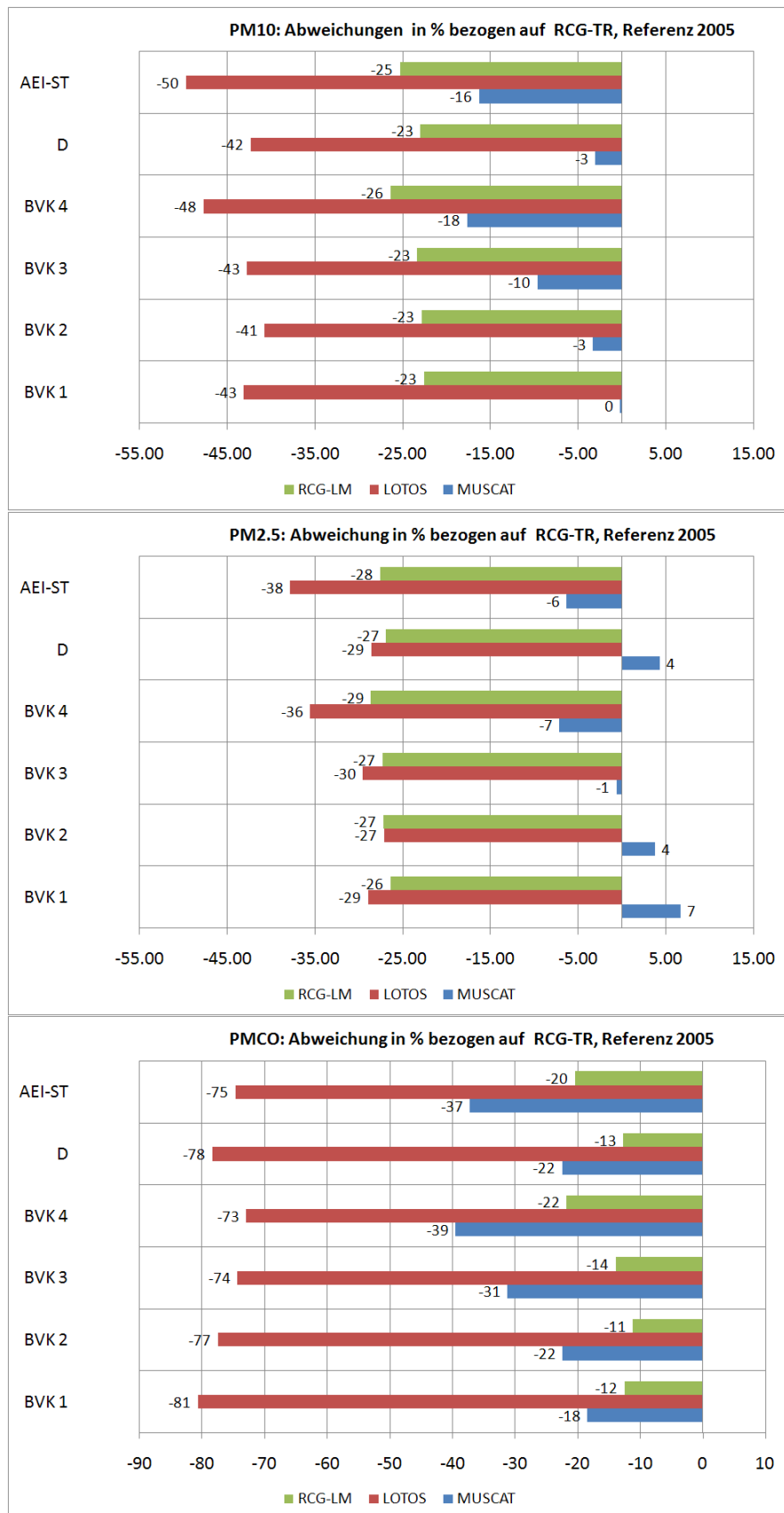


Abbildung 3-10 Mittlere Abweichung der PM10-, PM2.5- und PMCO-Jahresmittelwerte in % der Modelle RCG-LM (COSMO-EU), LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-TRAMPER für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.

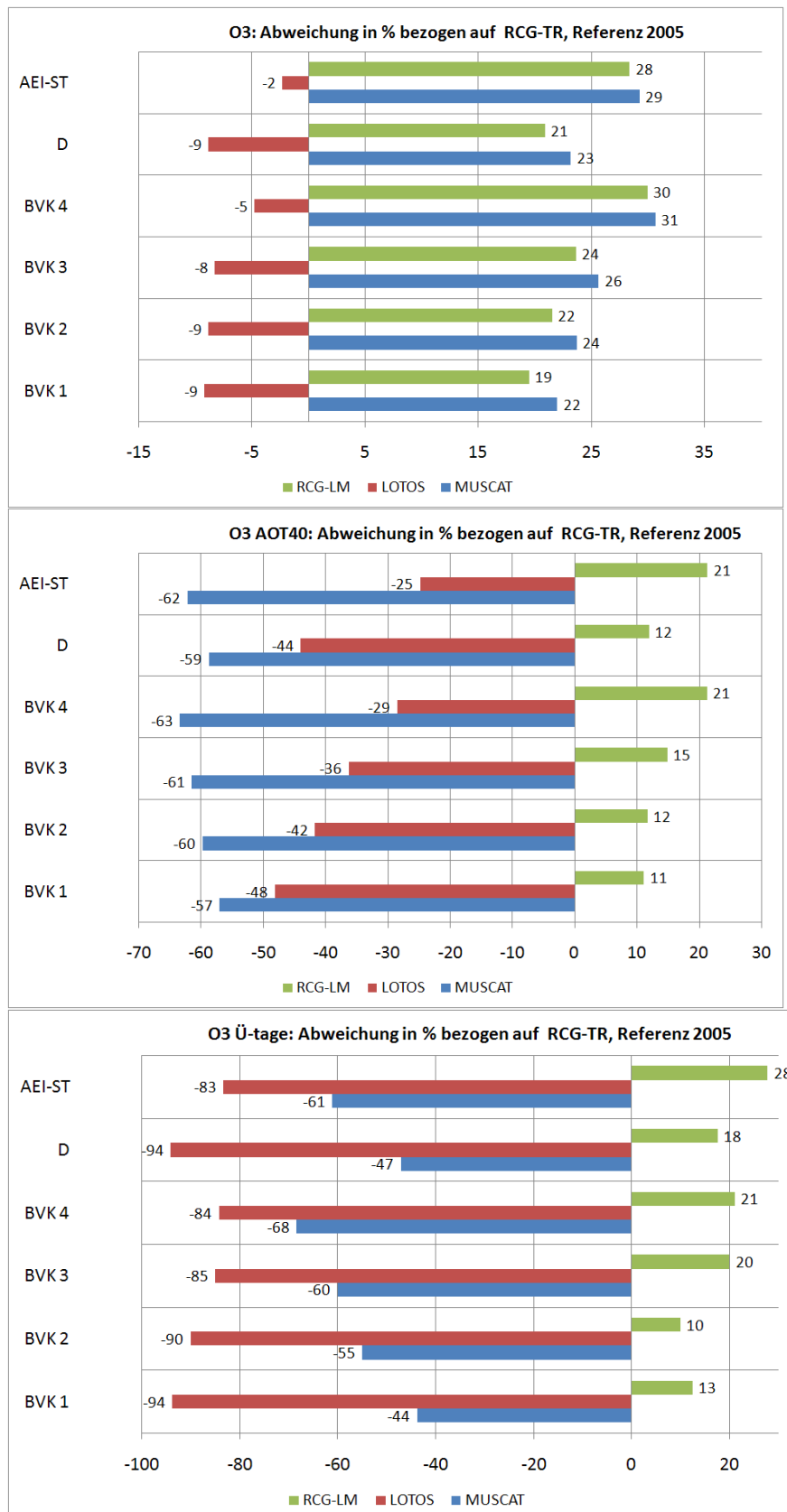


Abbildung 3-11 Mittlere Abweichung der O₃-Jahresmittelwerte, der AOT40-Werte zum Schutz der Vegetation und der Anzahl von Tagen mit einem maximalen 8-h-Mittelwert > 120 µg/m³ in % der Modelle RCG-LM (COSMO-EU), LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-TRAMPER für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.

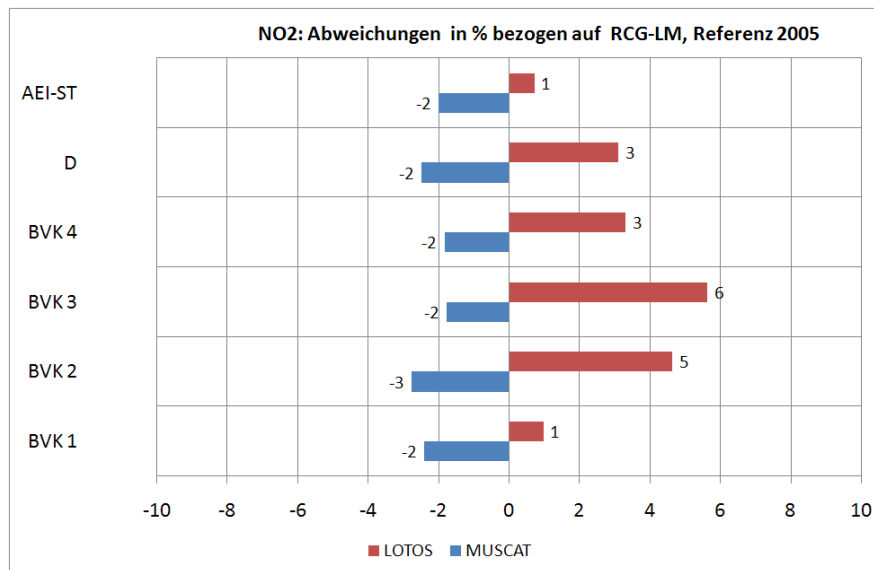


Abbildung 3-12 Mittlere Abweichung der NO₂-Jahresmittelwerte in % der Modelle LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-LM (COSMO-EU) für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.

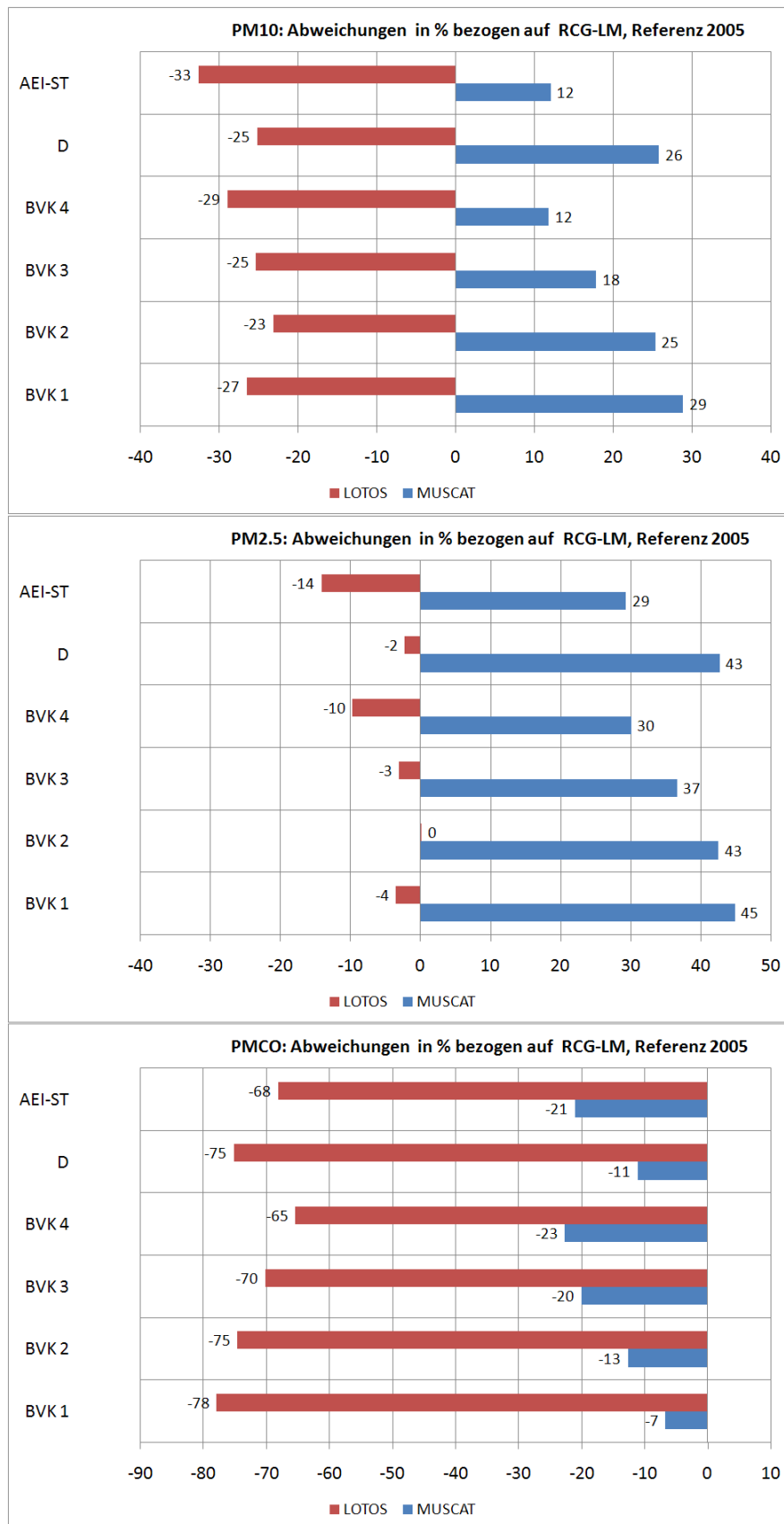


Abbildung 3-13 Mittlere Abweichung der PM10-, PM2.5 und PMCO-Jahresmittelwerte in % der Modelle LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-LM (COSMO-EU) für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.

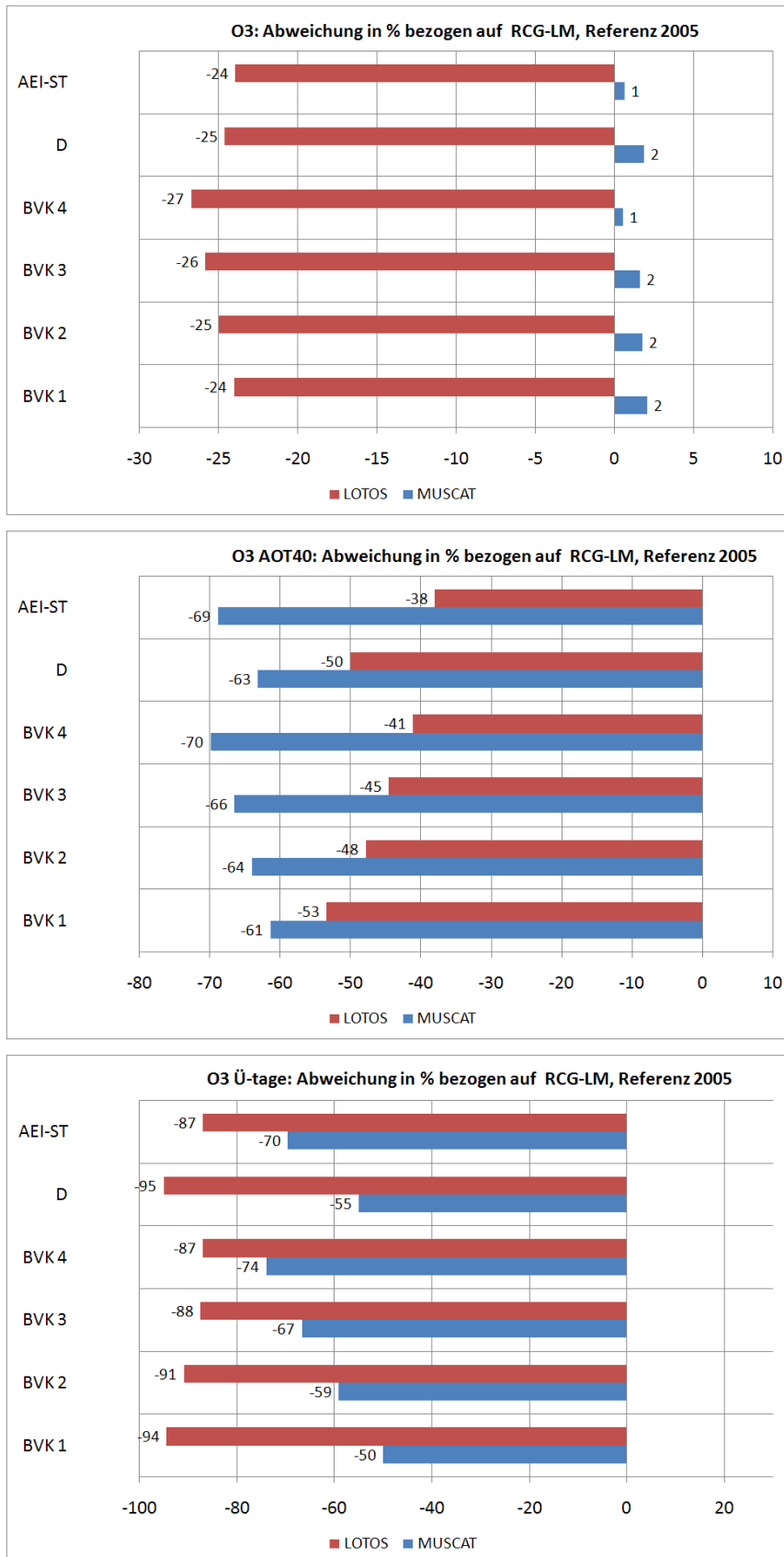


Abbildung 3-14 Mittlere Abweichung der O₃-Jahresmittelwerte, der AOT40-Werte zum Schutz der Vegetation und der Anzahl von Tagen mit einem maximalen 8-h-Mittelwert > 120 µg/m³ in % der Modelle LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-LM (COSMO-EU) für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.

4 Vergleich mit Messungen

Bisher wurden die Modellergebnisse lediglich untereinander verglichen. In diesem Kapitel erfolgt die Bewertung anhand ausgewählter Messungen. Für RCG-TRAMPER und RCG-COSMO-EU liegen Zeitreihenauswertungen für alle deutschen Stationen vor, für LOTOS und MUSCAT nur für die ausgewählten Hintergrundstationen und zwei industriell geprägte Stationen (siehe Kapitel 2). Eine mittlere Auswertung in den definierten Klassen auf Basis von Messungen ist nicht ohne weiteres möglich, da dazu die Messdichte zu gering ist. Einen Ausweg bietet die Datenassimilation, d.h. die Verknüpfung von Messungen mit Modellrechnungen zur Erstellung flächendeckender Schadstoffverteilungen. Diese Methodik wird neben dem direkten Vergleich der Modellergebnisse am Ort der Messung zur Bestimmung mittlerer Abweichungen zwischen Rechnung und Messung verwendet.

4.1 Erstellung flächendeckender Schadstoffverteilungen unter Einbeziehung von Messungen

Datenassimilationstechniken, d.h. die Kombination von Messungen und Rechnungen, werden benutzt, um die Nachteile der Modellrechnung, die nicht überall die aus Messungen abgeleitete Immissionsstruktur in Höhe und Lage richtig wiedergibt, aufzuheben. Ein solches Verfahren wird hier eingesetzt, das an Orten wo Messungen vorliegen, in erster Linie die gemessenen Konzentrationsverteilungen und dort wo keine Messungen vorliegen, die mit einem Modell ermittelten Schadstoffverteilungen zur Erstellung von Immissionsfeldern verwendet. Die verwendete Methodik ist die so genannte Optimale Interpolation (OI), die auch in dem diagnostischen Analysesystem TRAMPER (Reimer und Scherer, 1992) zur Erstellung der meteorologischen Eingabedaten für das RCG-Modell benutzt wird.

Die OI basiert auf einer Verknüpfung von stündlichen Messungen und stündlichen Modellergebnissen. Die OI benutzt die Modellergebnisse als Hintergrundfeld, in das die Messungen integriert werden (siehe auch Stern, 2010). Dazu werden Repräsentativitätsgebiete der Messungen aus den statistisch abgeleiteten Strukturen (räumliche Autokovarianz) gewonnen. Rechenergebnisse werden dann stärker außerhalb dieser Gebiete benutzt. Zur Interpolation wird über das Gebiet ein Raster mit einer Seitenlänge von circa 8 km gelegt. Wie bei den meisten gitterbezogenen Interpolationsverfahren kommt es dadurch zu einer Nivellierung singulärer Ereignisse im Raster, d.h. ein Messwert kann nicht direkt abgebildet werden, da er zum Einen selten auf einem Interpolationsgitterpunkt liegt und es zum Anderen durch den Einfluss umliegender Messungen zu einer Nivellierung des Konzentrationsfeldes kommt, falls nicht alle Messungen in einer Region dasselbe Konzentrationsniveau aufweisen. Die gewonnenen Karten geben die Konzentrationsverhältnisse mit der Mittelwertcharakteristik der räumlichen Auflösung von ca. 8 km x 8 km an. Dadurch werden hohe Messwerte, die nur an einer Station auftreten (sog. „hot-spots“), in den flächenhaften Darstellungen für ganz Deutschland nicht erfasst. Bei der Interpolation werden nur Stationen verwendet, die nicht im direkten Einflussbereich lokaler Emissionen liegen. Verkehrsnahe Messungen werden daher in der OI nicht berücksichtigt.

Die mit der OI erstellte Schadstoffverteilung wird benutzt, um eine mittlere Bewertung der Modellergebnisse für die definierten 6 Bewertungsklassen zu ermöglichen. Das OI-Feld wird dazu als Messfeld interpretiert. Der Unterschied zwischen dem OI-Feld und dem reinen Modellergebnis ist dann die Abweichung der Berechnung von der Messung. Für jede Modellrechnung wird dazu ein OI-Feld konstruiert, das immer auf demselben Messdatensatz beruht, aber als Hintergrund die jeweilige Modellrechnung (also RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS oder MUSCAT) verwendet. Dieser Ansatz gewährleistet, dass am Ort von Messungen diese auch in die mittlere Bewertung eingehen. In Regionen, wo keine Messungen

vorliegen, gehen in die OI-Analyse verstärkt die jeweiligen Modellergebnisse ein. Dadurch wird der Modellfehler in den Regionen gering gehalten, in denen das Feld von den Modellergebnissen dominiert wird.

Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 zeigen als Beispiel für die Umsetzung der Methodik die gemessenen und berechneten NO₂-bzw. PM₁₀-Jahresmittelwerte für RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU sowie die OI-Ergebnisse mit RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS bzw. MUSCAT als Hintergrund. Die Messstationen wurden zu diesem Vergleich eingeteilt in ländliche Hintergrundkonzentrationen (PM₁₀-Jahresmittelwerte bis circa 20 µg/m³; NO₂-Jahresmittelwerte bis circa 15 µg/m³), ländlicher Hintergrund belastet bis städtisch/industrieller Hintergrund (PM₁₀-Jahresmittelwerte von 20 µg/m³ bis circa 25 µg/m³; NO₂-Jahresmittelwerte von 15 µg/m³ bis circa 25 µg/m³) und städtisch/industrieller Hintergrund belastet (PM₁₀-Jahresmittelwerte größer 25 µg/m³; NO₂-Jahresmittelwerte größer 25 µg/m³). Verkehrsstationen oder verkehrsnahen Stationen wurden in diesem Vergleich nicht berücksichtigt, da die hier verwendete Skala den Repräsentativitätsbereich solcher Stationen weit überschreitet. Stationen im industriellen Umfeld wurden dagegen sowohl in dem Vergleich Messung-Rechnung als auch in der OI berücksichtigt, da i.A. davon ausgegangen werden kann, dass der Einflussbereich industrieller Anlagen größer ist als der einer Straßenschlucht.

Die gemessenen NO₂-Jahresmittelwerte werden von der RCG-Rechnung in Verbindung mit dem meteorologischen Treiber TRAMPER in allen Konzentrationsbereichen unter- und überschätzt (Abbildung 4-1 oben links). Bei Verwendung des Treibers auf Basis der COSMO-EU-Daten kommt es nahezu an allen Stationen zu Unterschätzungen der Messungen (Abbildung 4-1 oben rechts). Wie schon erwähnt, kann diese Auswertung für MUSCAT und LOTOS nicht gemacht werden. Da die NO₂-Konzentrationen vom LOTOS und MUSCAT aber im Mittel nahe an den Konzentrationen von RCG-COSMO-EU liegen (siehe Kapitel 3), kann davon ausgegangen werden, dass auch diese beiden Modelle wie RCG-COSMO-EU eher eine Unterschätzung der Messungen zeigen. RCG-TRAMPER unterschätzt einen Großteil der PM₁₀-Messungen, RCG-COSMO-EU die allermeisten PM₁₀-Messungen. Überschätzungen gibt es bei RCG-TRAMPER an einigen sehr niedrigen ländlichen Hintergrundstationen und in den höheren Konzentrationsbereichen an industriell geprägten Stationen im Ruhrgebiet. Die Überschätzung der Konzentrationen in der Nähe von industriellen Anlagen kann seine Ursache in einer Überschätzung der industriellen Emissionen haben. Eine andere Erklärung ist eine zu geringe turbulente Vermischung der Schadstoffe in RCG-TRAMPER, da die Überschätzungen bei der RCG-Anwendung mit den COSMO-EU-Daten nicht auftreten.

Die Anwendung der OI-Methodik vermindert die große Streuung der Rechenwerte von RCG-TRAMPER beträchtlich (Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2, jeweils Mitte links). Die zu hohen Werte der reinen RCG-Rechnung werden in der OI nach unten korrigiert, zu niedrige Werte werden angehoben. In der OI mit den RCG-COSMO-EU-Ergebnissen als Hintergrund werden die Modellergebnisse nach oben korrigiert (Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2, jeweils Mitte rechts). Alle vier OI-Anwendungen führen zu einer sehr ähnlichen Verteilung der NO₂-bzw. PM₁₀-Konzentrationen an den Messorten. In den belasteten Stadtgebieten tendiert auch die OI noch zu einer Unterschätzung der Beobachtungen, da die Konzentration an einem Gitterpunkt aus allen Messwerten in der Umgebung bestimmt wird, was zu einer Unterschätzung einzelner hoher Beobachtungswerte führt, falls diese Beobachtung nicht durch ähnliche hohe Messungen in der näheren Umgebung gestützt wird.

Abbildung 4-3 zeigt die Verteilung der NO₂-Jahresmittelwerte in Deutschland für die vier OI-Anwendungen. Generell sind die Verteilungen sehr ähnlich. Der etwas höhere Hintergrund für die OI auf der Basis von RCG-TRAMPER ist aber insbesondere in den Ballungsräumen er-

kennbar. Es sei noch angemerkt, dass die OI in Regionen, wo die verfügbaren Messungen hauptsächlich in den Stadtgebieten liegen, zu einer räumlichen Überbetonung dieser Messungen führen kann, falls die Stationen überwiegend in kleineren Städten liegen. Die hier verwendete Maschenweite beträgt circa 8 km. Dies bedeutet, dass der Repräsentativitätsbereich einer Messung nicht kleiner als 8 km sein kann. Die Abbildung von Messungen aus Städten, deren räumliche Ausdehnung deutlich geringer als 8 km ist, erfolgt in der OI dann immer für die gesamte Zelle, in die die betreffende Station fällt.

Die für NO₂ getroffenen Aussagen zur OI können auch auf die PM₁₀- und O₃-Verteilungen übertragen werden. Die hier diskutierten OI-Felder werden im folgenden Kapitel zur Abschätzung der mittleren Abweichung der Modellergebnisse von den Messungen herangezogen.

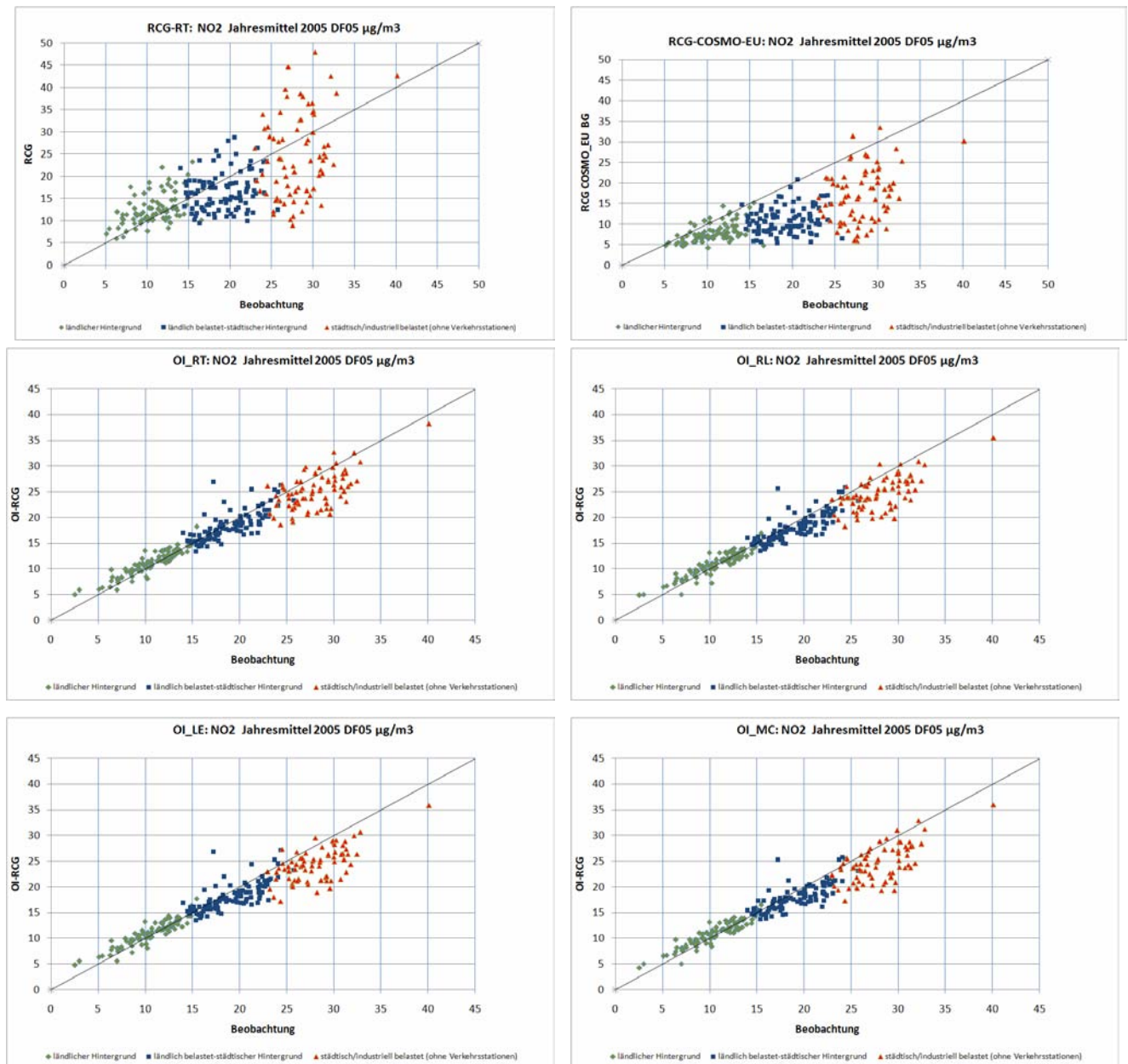


Abbildung 4-1 Berechnete und gemessene NO₂-Jahresmittelwerte in µg/m³. Oben links: RCG-TRAMPER. Oben rechts: RCG-COSMO-EU. Mitte links: OI mit RCG-TRAMPER als Hintergrund. Mitte rechts: OI mit RCG-COSMO-EU als Hintergrund. Unten links: OI mit LOTOS als Hintergrund. Unten rechts: OI mit MUSCAT als Hintergrund.

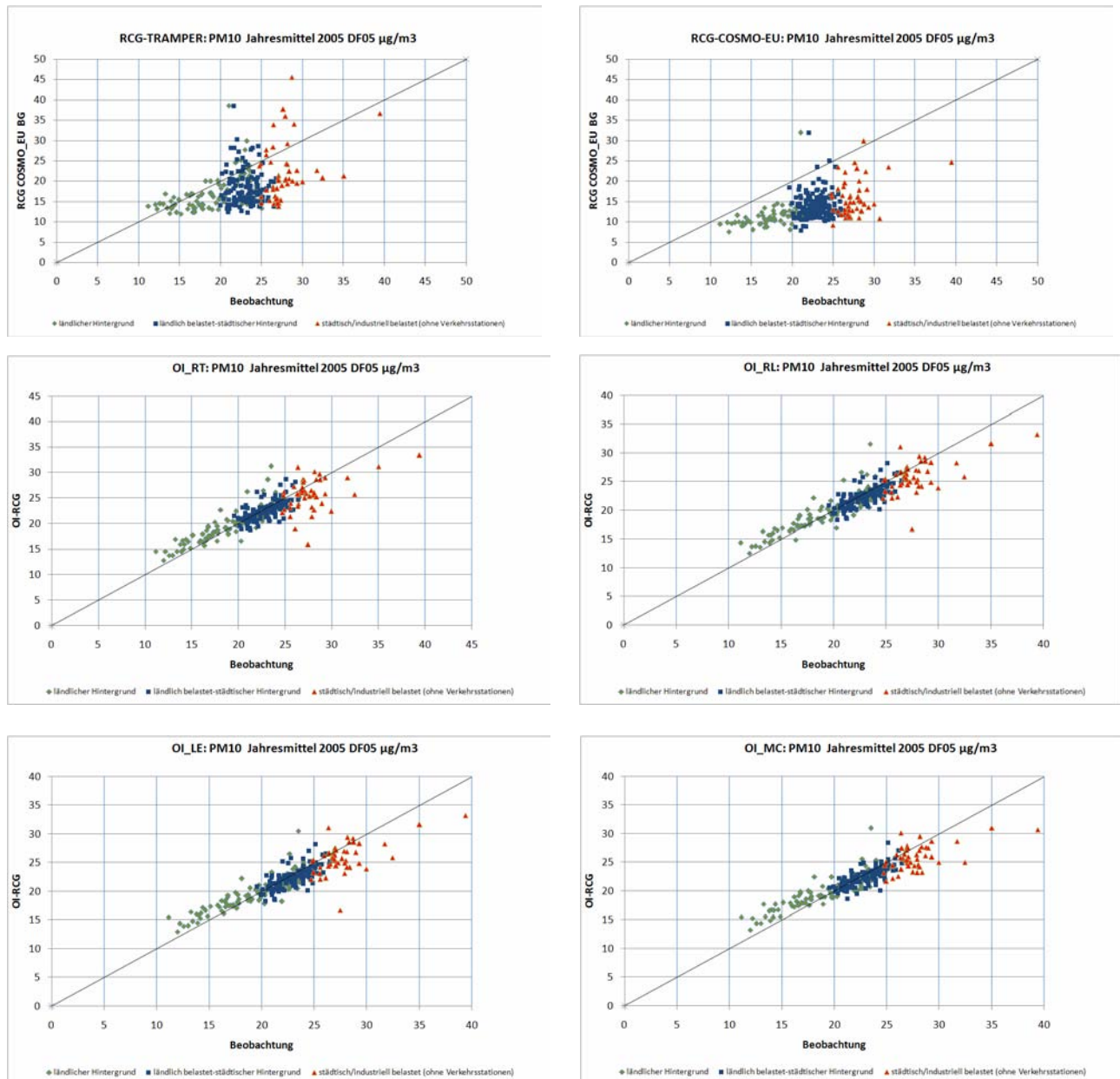


Abbildung 4-2 Berechnete und gemessene PM10-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Oben links: RCG-TRAMPER. Oben rechts: RCG-COSMO-EU. Mitte links: OI mit RCG-TRAMPER als Hintergrund. Mitte rechts: OI mit RCG-COSMO-EU als Hintergrund. Unten links: OI mit LOTOS als Hintergrund. Unten rechts: OI mit MUSCAT als Hintergrund.

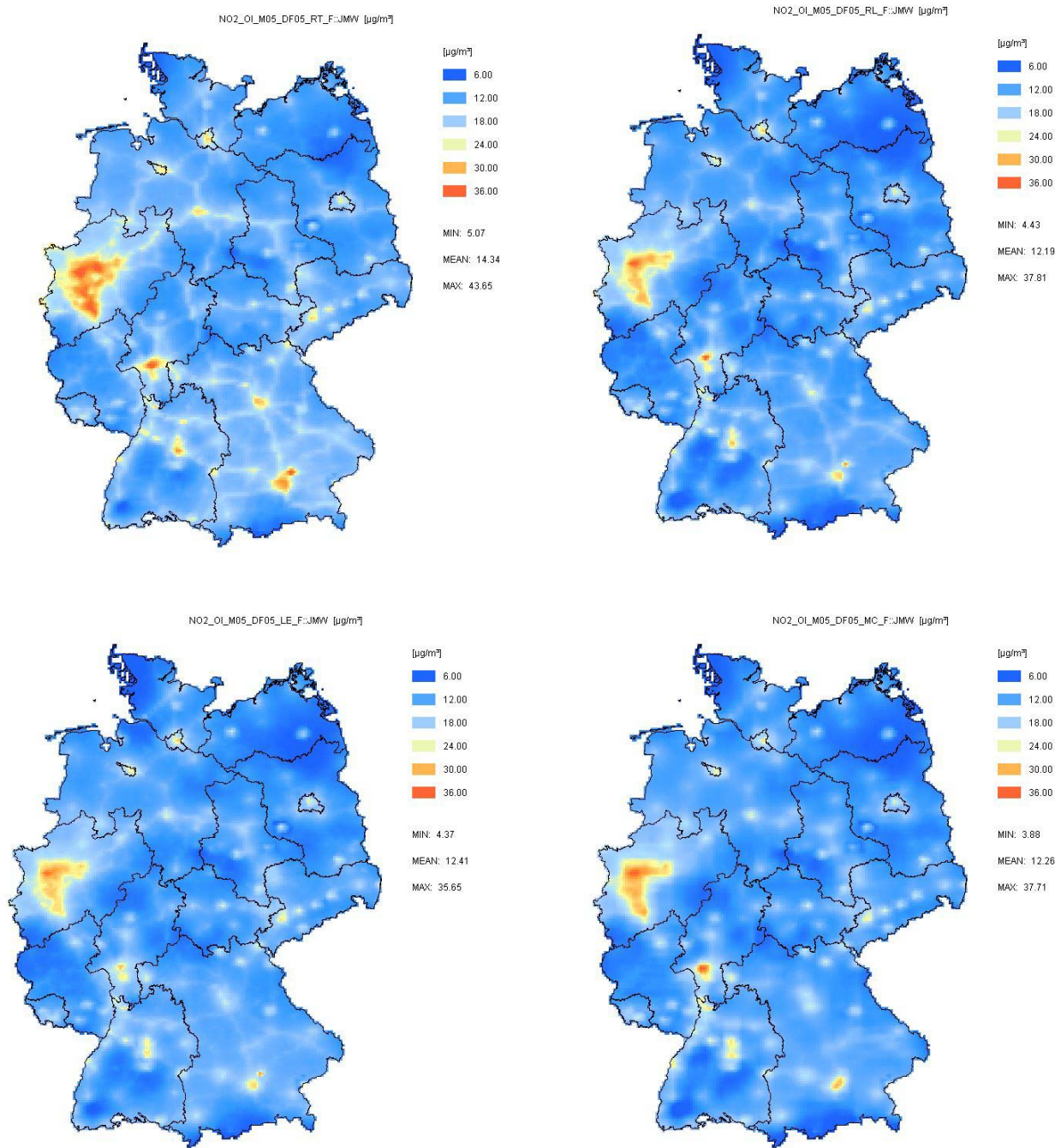


Abbildung 4-3 NO₂-Jahresmittelwerte 2005 in µg/m³ abgeleitet mit der OI-Methodik. Oben links: Hintergrund RCG-TRAMPER. Oben rechts: Hintergrund RCG-COSMO-EU. Unten links: Hintergrund LOTOS. Unten rechts: Hintergrund MUSCAT.

4.2 Mittlere Abweichung der Modellergebnisse von den OI-interpolierten Messungen

Die Modellergebnisse von RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS und MUSCAT sowie die OI-Anwendungen mit den jeweiligen Modellhintergründen wurden in den 6 Bewertungsklassen gemittelt und verglichen. Die Abweichung zwischen der Mittelung der OI-Ergebnisse und der Mittelung der Modellergebnisse kann als Abweichung der Modellfelder von OI-interpolierten Messfeldern interpretiert werden.

Abbildung 4-4 zeigt die mittlere Abweichung der PM₁₀- und der NO₂-Jahresmittelwerte von den jeweiligen OI-Referenzen, die Abbildung 4-5 die entsprechende mittlere Abweichung für die Ozon-Kenngrößen Jahresmittelwert, AOT₄₀-Wert zum Schutz der Vegetation und Anzahl der Tage mit einem maximalen gleitenden 8-h-Mittelwert $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die größten mittleren Abweichungen von den OI-Referenzen weisen die PM₁₀-Ergebnisse des LOTOS-Modells auf. In allen Bewertungsklassen werden die PM₁₀-Jahresmittelwerte um circa 50% unterschätzt. Eine circa 30 bis 35%ige Unterschätzung ergibt sich für RCG-COSMO-EU. MUSCAT unterschätzt die PM₁₀-Konzentrationen in Ballungsräumen um circa 10 bis 20%, in den ländlicheren Regionen um circa 15 bis 20%. Die mittleren Abweichungen der Modellkombination RCG-TRAMPER von den als Messfeld interpretierten OI-Analysen sind vergleichbar mit den MUSCAT-Abweichungen. Eine deutliche Zweiteilung der Ergebnisse zeigt sich für die NO₂-Jahresmittelwerte. Die Modellkombination RCG-TRAMPER überschätzt als einziges Modell die gemessene NO₂-Verteilung, insbesondere in Ballungsgebieten, wo im Mittel circa 10% höhere NO₂-Jahresmittelwerte berechnet werden. Alle anderen drei Modellkombinationen unterschätzen die gemessene NO₂-Verteilung in etwa gleicher Größenordnung (circa 10 bis knapp 20% in Ballungsräumen, circa 20 bis knapp 30% in eher ländlichen Regionen). In dieser Zweiteilung der Ergebnisse zeigt sich wieder deutlich der Einfluss der Schubspannungsgeschwindigkeit, deren niedrigen Werte beim meteorologischen Treiber TRAMPER zu höheren Konzentrationen führen.

RCG-TRAMPER und LOTOS unterschätzen die O₃-Jahresmittelwerte um circa 5 bis 10% bzw. um 10 bis 15%. Überschätzungen von circa 5 bis 10% werden mit RCG-COSMO-EU und MUSCAT berechnet. Die Zunahme der Ozonwerte des RCG-Modells bei dem Wechsel vom TRAMPER-Treiber zum COSMO-EU-Treiber ist in erster Linie eine Folge der dadurch zunehmenden turbulenten Mischung. Die Abnahme der Konzentration der Primärstoffe wie NO durch die erhöhte Turbulenz führt zu einer Abnahme der Auswirkungen des Titrationseffekts, da durch die geringeren NO-Konzentrationen weniger Ozon in NO₂ umgewandelt wird. Dies führt zu höheren Ozonkonzentrationen und niedrigeren NO₂-Konzentrationen. Aus diesem Grunde erhöht sich durch den Treiberwechsel auch die Überschätzung der AOT₄₀-Werte von circa 5 bis 15% für RCG-TRAMPER auf circa 25 bis 40% für RCG-COSMO mit den höchsten Überschätzungen in den Ballungsräumen. LOTOS und insbesondere MUSCAT unterschätzen die AOT₄₀-Werte beträchtlich (Abbildung 4-5). Dies gilt auch für die Anzahl der Tage mit einem maximalen 8-h-Mittelwert $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Auf den Umstand, dass MUSCAT trotz einer leichten Überschätzung der Ozonjahresmittelwerte sehr niedrige AOT₄₀-Werte aufweist, wurde bereits hingewiesen.

In der räumlich gemittelten Auswertung werden die beobachteten PM₁₀-Jahresmittelwerte von allen Modellen unterschätzt. Es lässt sich festhalten, dass die Modellkombination RCG-TRAMPER im zeitlichen (Jahr) und räumlichen (Bewertungsklassen) Mittel die geringsten Abweichungen von den OI-interpolierten Messfeldern für PM₁₀, NO₂ und Ozon aufweist. Dies ist in erster Linie auf die Verwendung des diagnostischen meteorologischen Treibers TRAMPER zurückzuführen, dessen Parametrisierungsansätze für die Grenzschichtvariablen

zu einem geringeren vertikalen Austausch und damit zu höheren Konzentrationen in Bodennähe führen als die entsprechenden Ansätze der meteorologischen Treiber auf der Basis prognostischer Modellergebnisse.

Die systematische Unterschätzung von PM₁₀-Jahresmittelwerten, insbesondere der Konzentrationen während Episoden mit erhöhtem Feinstaubeintrag, ist ein übliches Phänomen bei der Modellierung der PM₁₀-Belastung, das zum Einen darin begründet ist, dass nicht alle PM₁₀-Quellen mit ihren Emissionen bekannt sind und auch die Qualität der verfügbaren anthropogenen Partikel-Emissionsdaten geringer ist als diejenige der klassischen Schadstoffe wie z. B. NO_x und SO₂. Partikelemissionen aus landwirtschaftlichen Aktivitäten, windbedingte Staubaufwirbelung von naturbelassenen Böden oder in Stadtgebieten (z. B. aus Baustellentätigkeit oder Wiederaufwirbelung durch den Kfz-Verkehr) sowie biogene Aerosole sind ungenau, unvollständig oder gar nicht erfasst, da die Emissionsprozesse wegen der Abhängigkeit der Emissionen von den meteorologischen Bedingungen und der Beschaffenheit des Untergrunds schwer zu beschreiben sind oder die Verursacher nicht bekannt sind. Auch die gasförmigen Primäremissionen, die zu den organischen und anorganischen Sekundäraerosolen führen, stehen nur zum Teil zur Verfügung (z. B. biogen emittierte Isoprene und Terpene, aber auch anthropogen verursachte NH₃-Emissionen). Zum Anderen sind die physikalisch/chemischen Prozesse, die zur Bildung und dynamischen Entwicklung von Aerosolen führen, wegen der extrem inhomogenen Eigenschaften der Aerosole bzgl. Größe, Masse, Oberfläche und Zusammensetzung nur zum Teil bekannt oder können wegen ihrer Komplexität im Rahmen dreidimensionaler Modell Anwendungen nur vereinfachend behandelt werden. Ein weiterer Grund für die allgemeine Unterschätzung gravimetrischer PM₁₀-Beobachtungen ist der Wassergehalt der Proben, der bis zu 30% der Gesamtmasse betragen kann (Putaud et al., 2004). Dieser Wassergehalt ist in Modellrechnungen nicht berücksichtigt, da die für das Wiegen der Proben vorgeschriebenen Bedingungen (50% relative Feuchte, 20°C) nicht reproduziert werden können (s. z. B. Tsyro, 2005). Die Ergebnisse mehreren internationaler Modellvergleiche zeigen, dass all diese Unsicherheiten in den meisten Modellrechnungen mit chemischen Transportmodellen zu einer Unterschätzung der beobachteten PM₁₀-Masse führen (Stern et al., 2008; Sartelet et al., 2007; Vautard et al., 2007).

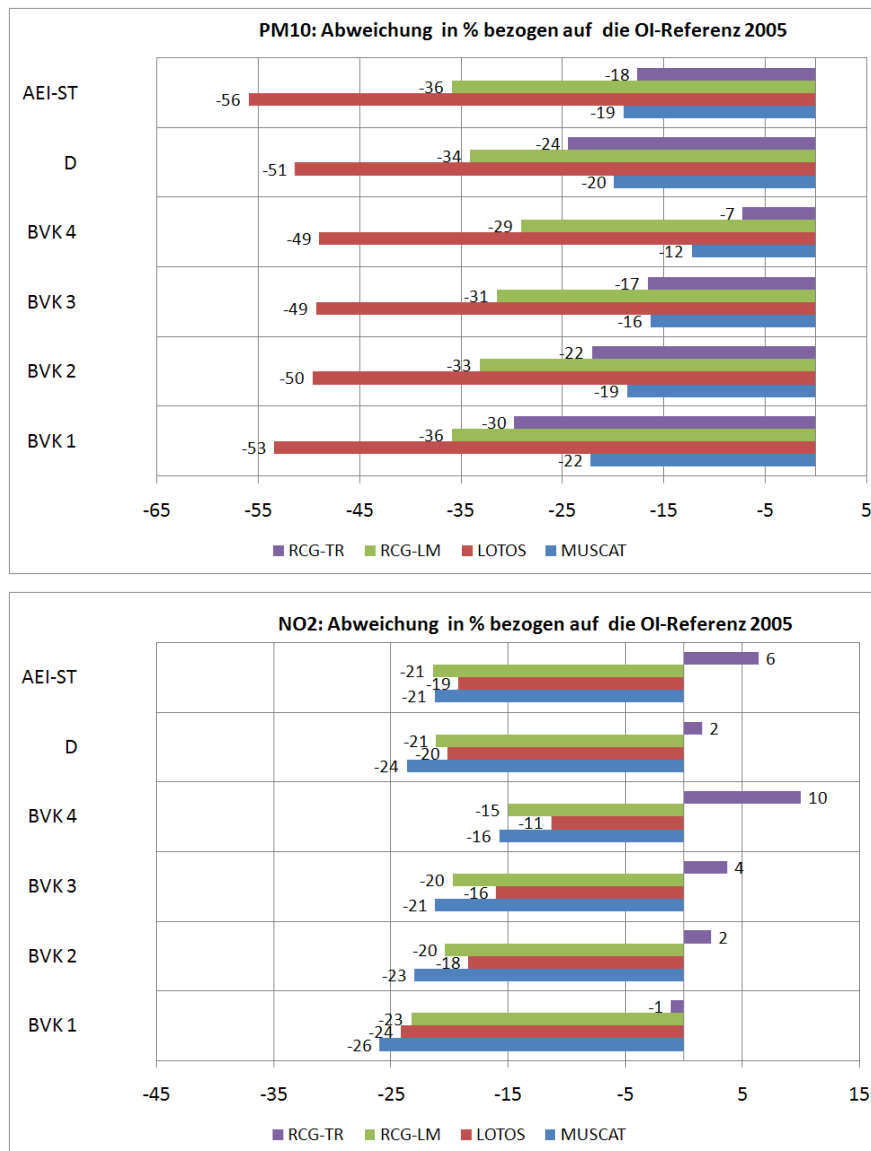


Abbildung 4-4 Mittlere Abweichung der PM10-, und NO₂-Jahresmittelwerte in % der Modelle RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU (RCG-LM), LOTOS und MUSCAT von den jeweiligen OI-Referenzen für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.

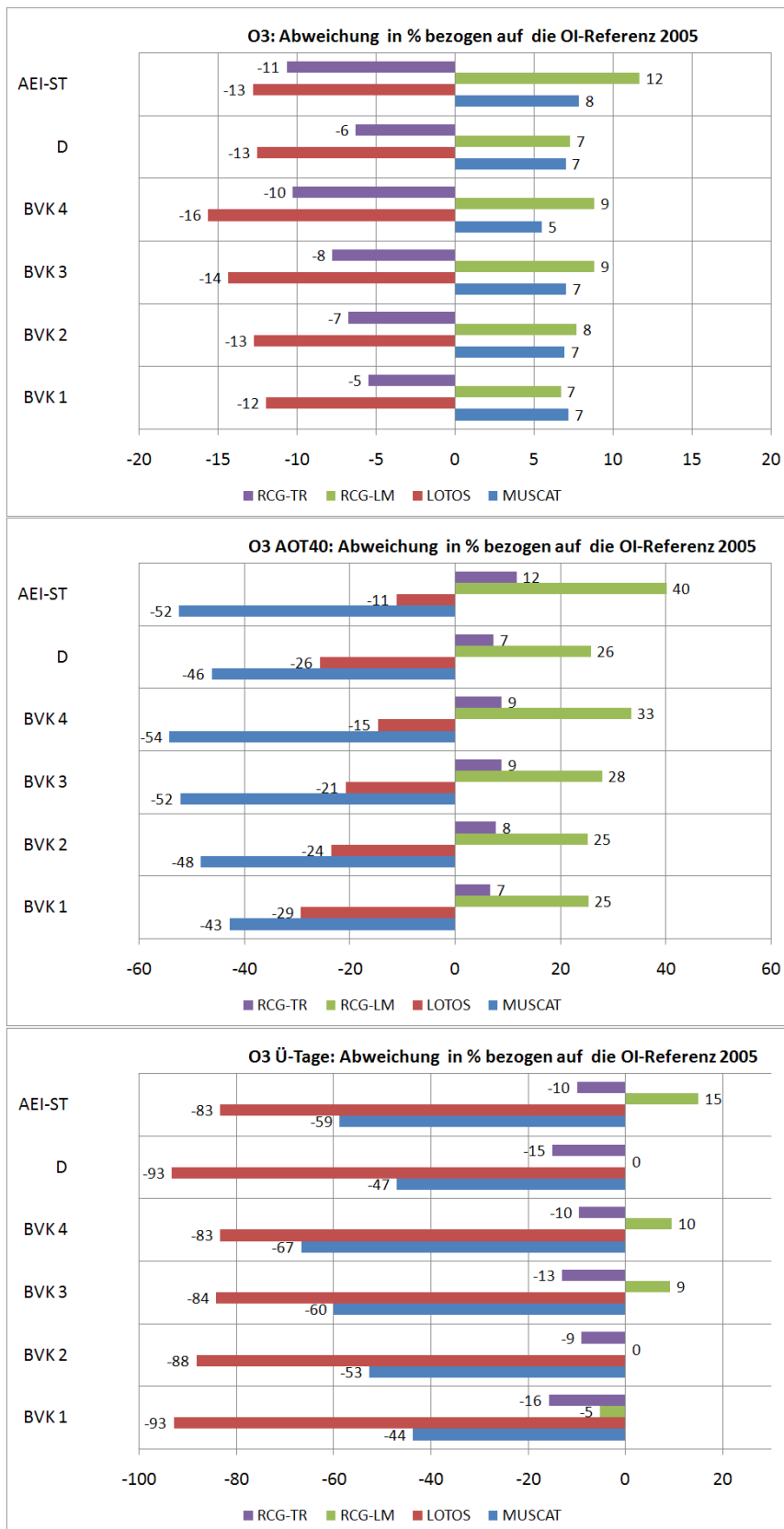


Abbildung 4-5 Mittlere Abweichung der O₃-Jahresmittelwerte, der AOT40-Werte zum Schutz der Vegetation und der Anzahl von Tagen mit einem maximalen 8-h-Mittelwert > 120 µg/m³ in % der Modelle RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU (RCG-LM), LOTOS und MUSCAT von den jeweiligen OI-Referenzen für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.

4.3 Vergleich der Tagesmittelwerte und Jahresmittelwerte an ausgewählten Stationen

Eine zeitliche Auswertung im Vergleich mit gemessenen Tagesmittelwerten erfolgt für ausgewählte Stationen in Deutschland. An sechs Hintergrundstationen stehen für solch einen Vergleich neben PM₁₀ (nur 5 Stationen), PM_{2.5} (nur 2 Stationen) und NO₂ (nur 5 Stationen) auch Messungen der Aerosolkomponenten zur Verfügung:

- Westerland, Waldhof, Zingst, Neuglobsow, Melpitz, Deuselbach

Die NO₂- und PM₁₀-Tagesmittelwerte werden für zwei hoch belastete Stationen aus dem Ruhrgebiet verglichen:

- Bottrop und Duisburg-Bruckhausen.

Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-12 zeigen den Vergleich der an den Hintergrundstationen berechneten und beobachteten Tagesmittelwerte als Streudiagramme für verschiedene Stoffe. Die niedrigen beobachteten NO₂-Tagesmittelwerte werden von allen Modellen überschätzt (Abbildung 4-6). Auffällig ist die große Streuung der NO₂-Tagesmittelwerte mit einer Tendenz zur Überschätzung für die Ergebnisse mit RCG-TRAMPER. RCG-TRAMPER überschätzt viele der beobachteten NO₂-Tagesmittelwerte in den unteren Konzentrationsbereichen, erfasst als einzige Modellkombination aber auch die hohen gemessenen Tagesmittelwerte, die insbesondere von LOTOS und MUSCAT deutlich unterschätzt werden. Dies zeigt sich auch in den Kenngrößen der statistischen Auswertung (Tabelle 4-1). Die große Streuung der RCG-TRAMPER-Ergebnisse um die Messungen führt für die 5 Stationen zu einem Mittelwert, der um circa 1.5 µg/m³ oder 23% höher ist als der Mittelwert aus der Messung. Alle anderen Modellkombinationen unterschätzen den Mittelwert in der Größenordnung der Überschätzung von RCG-TRAMPER. Die große Streuung der RCG-TRAMPER-Ergebnisse zeigt sich auch in der Standardabweichung (STD), die deutlich höher ist als diejenige der anderen Modelle. Die auf Basis des TRAMPER-Treibers berechneten Grenzschichtvariablen führen an einzelnen Tagen zu Konzentrationen, die in dieser Höhe nicht gemessen werden. Dies gilt für NO₂ insbesondere in den Wintermonaten, in denen RCG-TRAMPER zwar im Gegensatz zu den anderen Modellen hohe gemessene NO₂-Tagesmittelwerte oft reproduzieren kann, aber an Tagen mit niedrigeren NO₂-Messungen öfters auch zu deutlichen Überschätzungen neigt. Es hat den Anschein, dass die winterlichen Stabilitätsverhältnisse im TRAMPER-Treiber eine zu geringe Varianz mit einer Überbetonung der Anzahl stabiler Wetterlagen aufweisen. Dazu zeigt die Abbildung 4-13 als Beispiel die gemessenen und berechneten Verläufe der NO₂-Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Es ist offensichtlich, dass die Unterschiede zwischen den Winter- und Sommerkonzentrationen bei RCG-TRAMPER am ausgeprägtesten sind, es im Vergleich mit den Messungen aber auch zu Überschätzungen im Winter kommt. Auffällig ist das fast gleiche Winter-Sommer-Niveau der MUSCAT-Ergebnisse, was sich auch in dem flachen Verlauf der Punktwolke im MUSCAT-Streudiagramm widerspiegelt (Abbildung 4-6).

Die hohen beobachteten PM₁₀-Tagesmittelwerte werden von keinem Modell reproduziert (Abbildung 4-7 und Abbildung 4-14). In den unteren gemessenen Konzentrationsbereichen tendiert RCG-TRAMPER zu mehr Überschätzungen als die anderen Modellkombinationen, was wieder auf die unterschiedlichen Stabilitätsverhältnisse im diagnostischen Treiber TRAMPER und den prognostischen Treibern COSMO und EZMW zurückzuführen ist. Die extremen Überschätzungen in der RCG-TRAMPER-Anwendung treten alle an der Station

Westerland auf und werden durch hohe Beiträge der Seesalzkomponenten verursacht. In der RCG-COSMO-EU-Anwendung sind die Überschätzungen in den unteren Konzentrationsbereichen sehr viel geringer als bei RCG-TRAMPER. Auch die drastische Überschätzung der Seesalzanteile in Westerland ist nahezu verschwunden. Dieser Rückgang ist wieder eine Folge des stärkeren vertikalen Austauschs oder auch unterschiedlicher Windrichtungen. RCG-TRAMPER und MUSCAT unterschätzen den über die 5 Stationen gemittelten PM₁₀-Jahresmittelwert um circa 10 bis 20%, die anderen beiden Modellkombinationen um 40 bis über 50% (Tabelle 4-1). Die geringere Unterschätzung der Jahresmittelwerte von RCG-TRAMPER und MUSCAT wird aber nur bedingt durch eine bessere Simulation der hohen Tagesmittelwerte sondern eher durch eine größere Anzahl von Überschätzungen im unteren Konzentrationsbereich hervorgerufen (Abbildung 4-7). PM_{2.5}-Tagesmittelwerte liegen nur für 2 Stationen vor, Melpitz und Waldhof. Die gemessenen Tagesmittelwerte werden von allen Modellen in nahezu allen Konzentrationsbereichen unterschätzt. Lediglich RCG-TRAMPER und MUSCAT zeigen in den unteren Konzentrationsbereichen an manchen Tagen Überschätzungen der gemessenen PM_{2.5}-Tagesmittelwerte (Abbildung 4-8). Im Mittel über die 2 untersuchten Stationen unterschätzt RCG-TRAMPER die PM_{2.5}-Jahresmittelwerte um circa 30%, RCG-COSMO-EU und LOTOS um circa 50% und MUSCAT um circa 15% (Tabelle 4-2). Die höheren Werte für MUSCAT sind auch deutlich in den Streudiagrammen (Abbildung 4-8) und in der Zeitreihe Melpitz (Abbildung 4-15) zu erkennen. PM_{2.5} besteht zu einem großen Teil aus den anorganischen sekundären Aerosolen Sulfat, Nitrat und Ammonium, für die ebenfalls Messungen vorliegen. Die Streudiagramme für diese Komponenten zeigen Abbildung 4-9 bis Abbildung 4-11, die Zeitreihen für Melpitz sind in Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-18 zusammengestellt. Die Sulfatbildung wird besonders von LOTOS unterschätzt, das nur circa 50% der gemessenen Sulfatmittelwerte erreicht (Tabelle 4-4). RCG-COSMO-EU unterschätzt im Mittel um circa 25%, Muscat um circa 20%. Die RCG-TRAMPER-Ergebnisse für die Sulfat-Tagesmittelwerte streuen zwar auch stark um die Messungen, im Mittel ergibt sich aber keine Unter- oder Überschätzung. RCG-TRAMPER und insbesondere MUSCAT überschätzen im Mittel die NH₄- und die NO₃-Konzentrationen, LOTOS zeigt im Mittel über die 6 Stationen kaum Unter- oder Überschätzungen während RCG-COSMO leicht unterschätzt. Die berechneten NO₃-Tagesmittelwerte streuen bei allen Modellen stärker als die SO₄ oder NH₄-Tagesmittelwerte.

Sulfat entsteht aus der Oxidation des Schwefeldioxids wobei der Hauptoxidationspfad über die Nassphase läuft. Dieser Prozess wird in allen Modellen nur vereinfacht und unterschiedlich dargestellt, was eine Erklärung für die unterschiedlich hohen Sulfatkonzentrationen ist. Die Berechnung der NO₃- und NH₄-Aerosole erfolgt in allen Modellen mit Hilfe eines Aerosolmoduls, das von einem thermodynamischen Gleichgewichtszustand zwischen der Aerosol- und der Gasphase ausgeht. Aerosoldynamische Prozesse wie Koagulation oder Kondensation von Spurengasen an existierende Partikel werden in keinem der Modelle betrachtet. Die Menge des gebildeten Nitrats und Ammoniums hängt dann ab von der Temperatur, der Feuchte und den Konzentrationen von Ammoniak, Salpetersäure und Sulfat. Alle diese Größen haben in den verschiedenen Modellen unterschiedliche Werte, was dann auch trotz ähnlicher physikalischer Behandlung zu unterschiedlichen Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen führt. Das komplexe Zusammenwirken der meteorologischen Einflussgrößen und der Konzentrationen in der Gasphase kann dann dazu führen, dass LOTOS trotz einer Unterschätzung der Sulfatkonzentrationen im Mittel näher an den gemessenen NH₄- und NO₃-Konzentrationen liegt als die anderen Modelle.

Im Mittel werden die PM_{2.5}-Konzentrationen von allen Modellen stärker unterschätzt als die sekundären anorganischen Aerosole. Wesentliche andere Bestandteile von PM_{2.5} sind das primäre EC (Elementarer Kohlenstoff) und OC (Organischer Kohlenstoff) sowie die sekundären organischen Aerosole (SOA). Für diese Komponenten liegen sehr wenige Messungen vor,

da deren messtechnische Erfassung außerordentlich schwierig ist (Putaud et al., 2004). Auch in der Modellrechnung ist die Behandlung dieser Komponenten schwierig, da die Emissionsabschätzungen für EC und OC ungenau sind und die physikalisch/chemischen Prozesse, die zur Bildung der organischen Aerosole führen, nur zum Teil bekannt sind (Simpson et al., 2007). Für die Station Melpitz liegen aber Messungen für EC und OM (Organisches Material, Summe aus OC und SOA) vor. Den Vergleich dieser Messungen mit den Modellergebnissen zeigen Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20. Die gemessenen EC- und OM-Konzentrationen werden von allen Modellen drastisch unterschätzt, was dann auch zu der Unterschätzung von PM_{2.5} und PM₁₀ beiträgt. Die etwas geringere OM-Unterschätzung von MUSCAT in Verbindung mit den im Mittel zu hohen NO₃- und NH₄-Konzentrationen führen dann zu den im Vergleich mit den anderen Modellen höheren PM_{2.5}-Konzentrationen.

Den Vergleich der berechneten und gemessenen Jahresmittelwerte der sekundären Aerosole an den 6 Hintergrundstationen zeigt die Abbildung 4-22. Für Sulfat ist offensichtlich, dass LOTOS an allen Stationen die gemessenen Konzentrationen um circa 50% unterschätzt. RCG-TRAMPER unterschätzt an 5 Stationen geringfügig und überschätzt eine Station (Deuselbach), was dann zu der sehr guten mittleren Übereinstimmung führt (Tabelle 4-4). Die gemäß Tabelle 4-4 sehr gute mittlere Übereinstimmung der NO₃-Simulation von LOTOS stimmt für die einzelnen Stationen nur bedingt. Westerland wird von LOTOS stark unterschätzt und Deuselbach stark überschätzt. Ansonsten treffen die aus den statistischen mittleren Auswertungen abgeleiteten relativen Aussagen über die verschiedenen Modelle aber auch auf die einzelnen Stationen zu. Auffällig ist, dass die Messungen der Station Deuselbach für Nitrat und Ammonium, aber auch für Sulfat (außer LOTOS) von allen Modellen überschätzt werden.

Abbildung 4-12 zeigt die Streudiagramme der gemessenen und berechneten maximalen 8-h-Mittelwerte für Ozon an 5 Hintergrundstationen, Abbildung 4-21 die entsprechenden Zeitreihen für die Station Melpitz. RCG-TRAMPER und RCG-COSMO simulieren den Verlauf dieser Größe in den niedrigen und den hohen Konzentrationsbereichen am genauesten. Die Unterschätzung der Mittelwerte durch RCG-TRAMPER im mittleren Konzentrationsbereich wird durch die Verwendung des COSMO-Treibers stark vermindert, da durch die stärkere Vermischung in Bodennähe weniger Ozon durch NO abgebaut wird. Diese Auswirkungen auf den Titrationseffekt wurden bereits diskutiert. Sie wirken am stärksten in Gebieten mit höheren NO_x-Emissionen, wo die Ozonkonzentrationen eher niedrig sind. Die Verminderung des Titrationseffekts durch erhöhten turbulenten Austausch ist damit auch die Ursache der im Vergleich zu RCG-TRAMPER höheren mittleren Ozonwerte der RCG-COSMO-EU-Anwendung. LOTOS unterschätzt die Ozonwerte generell in nahezu allen Konzentrationsbereichen, insbesondere ist LOTOS aber nicht imstande, die hohen gemessenen Ozonwerte abzubilden. Wegen dieser durchgehenden Unterschätzung ergibt sich für LOTOS auch die größte mittlere Abweichung (BIAS) zwischen Messung und Rechnung (Tabelle 4-3). MUSCAT zeigt eine verstärkte Häufung der Mittelwerte um den 80 µg/m³-Konzentrationsbereich, was an den 5 Hintergrundstationen zu einer Überschätzung der niedrigen Konzentrationen führt. Dieser Umstand erklärt auch die im Vergleich zu den anderen Modellen niedrige Korrelation (Tabelle 4-3).

Das Verhalten der Modelle an zwei stark durch industrielle Emissionen geprägte Stationen zeigen Abbildung 4-24 bis Abbildung 4-26. An der Station Duisburg-Bruckhausen reproduziert RCG-TRAMPER die Höhe der gemessenen NO₂- und PM₁₀-Konzentrationen von allen Modellen am besten. An einzelnen Tagen zeigt sich aber auch hier die schon mehrfach diskutierte Überschätzung der Messung, die wahrscheinlich durch einen zu geringen vertikalen Austausch verursacht wird. An der Messstation Bottrop ist es umgekehrt: RCG-TRAMPER überschätzt nahezu durchgängig die beobachteten Konzentrationen während die anderen Mo-

dellkombinationen das gemessene Konzentrationsniveau deutlich besser simulieren. Ob die Überschätzung von RCG-TRAMPER durch einen lokal zu geringen turbulenten Austausch, durch möglicherweise zu hohe Emissionen oder das Zusammenspiel beider Effekte verursacht wird, kann ohne eine Detailanalyse der Umgebungsverhältnisse an den Stationen nicht geklärt werden. Es muss auch berücksichtigt werden, dass durch die Maschenweite der Modelle in Gebieten mit hoher Emissionsdichte eine Station in der Rechnung unter Umständen von Quellen beeinflusst wird, die sich bei bestimmten Windrichtungen im Luv des Messgerätes befinden und damit keinen Konzentrationsbeitrag liefern können. Eine solche Überschätzung des Emissionseinflusses kann dann einerseits zu Überschätzungen der gemessenen Konzentrationen führen (RCG-TRAMPER), andererseits bei eher unterschätzenden Modellen (RCG-COSMO) das Konzentrationsniveau auf die Höhe der Messung heben. Wegen der Vielfalt der Einflussgrößen wird daher auch kein Modell durchgängig für alle Stoffe an allen Messstationen die „beste“ Simulation liefern.

Zusammenfassend zeigt die Abbildung 4-27 noch die gemessenen und berechneten PM10- und NO₂-Jahresmittelwerte an den 5 Hintergrundstationen und den 2 industriellen Stationen. Die im Vergleich zu den anderen Modellen höheren NO₂-Jahresmittelwerte der RCG-TRAMPER-Simulation zeigen sich an allen Stationen. Auch die eben diskutierte Problematik der Über- und Unterschätzung an den beiden Industriestationen ist deutlich zu erkennen. RCG-TRAMPER und MUSCAT liefern an den meisten Stationen die höchsten PM10-Jahresmittelwerte, das LOTOS-Modell die niedrigsten Werte. Das untere Diagramm der Abbildung 4-27 zeigt die RCG-TRAMPER-Simulation mit und ohne den Beitrag des aufgewirbelten Bodensstaubs. Das RCG-Modell berücksichtigt als einziges Modell diesen Prozess. Es ist offensichtlich, dass die im RCG-Modell verwendete einfache Parametrisierung der Aufwirbelung von Bodensstaub keinen großen Beitrag zu den PM10-Konzentrationen liefert. Damit bleiben die vergleichenden Aussagen zu den Modellergebnissen in vollem Umfang gültig.

5 Stations				
NO₂	RCG-T	RCG-LM	LOTOS	MUSCAT
OBS MEAN	7.58	7.58	7.59	7.58
CALC MEAN	9.1	6.16	5.88	6.28
RATIO CALC/OBS	1.23	0.84	0.79	0.85
STD OBS	5.53	5.53	5.53	5.53
STD CALC	6.25	4.02	3.38	2.82
STD CALC/STD OBS	1.14	0.73	0.61	0.52
BIAS	1.52	-1.42	-1.71	-1.3
RESIDUAL	3.89	2.71	2.94	3.27
CORRELATION R2	0.43	0.63	0.55	0.4
RMSQE	5.5	3.8	4.28	4.7
RMSQE/OBSMEAN	0.75	0.5	0.56	0.62
% within +/- 50%	58.37	74.35	73.99	65.75
No of Data Sets	1574	1574	1570	1574

5 Stations				
PM₁₀	RCG-T	RCG-LM	LOTOS	MUSCAT
OBS MEAN	18.16	18.16	18.17	18.16
CALC MEAN	15.08	11.11	8.29	15.8
RATIO CALC/OBS	0.84	0.62	0.46	0.89
STD OBS	10.59	10.59	10.6	10.59
STD CALC	8.33	5.81	4.25	6.27
STD CALC/STD OBS	0.79	0.55	0.4	0.59
BIAS	-3.09	-7.05	-9.88	-2.37
RESIDUAL	8.04	8.19	10.14	6.7
CORRELATION R2	0.22	0.33	0.36	0.3
RMSQE	11.35	11.27	13.24	9.49
RMSQE/OBSMEAN	0.63	0.63	0.73	0.53
% within +/- 50%	65.96	65.12	44.6	73.36
No of Data Sets	1786	1786	1781	1786

Tabelle 4-1 Statistische Auswertung der Tagesmittelwerte für NO₂ und PM₁₀. RCG-T: RCG-TRAMPER, RCG-LM: RCG-COSMO-EU sowie LOTOS und MUSCAT. Mittlere Auswertung über die 5 Hintergrundstationen Melpitz, Waldhof, Zingst, Westerland und Neuglobsow. Alle Tagesmittelwerte 2005.

PM2.5	RCG-T	RCG-LM	LOTOS	MUSCAT
OBS MEAN	15.51	15.51	15.51	15.51
CALC MEAN	10.78	7.77	7.45	12.93
RATIO CALC/OBS	0.71	0.51	0.49	0.85
STD OBS	9.8	9.8	9.82	9.8
STD CALC	6.19	4.95	4.48	6.94
STD CALC/STD OBS	0.63	0.5	0.46	0.71
BIAS	-4.73	-7.74	-8.06	-2.58
RESIDUAL	6.34	7.94	8.18	5.71
CORRELATION R2	0.43	0.55	0.51	0.38
RMSQE	8.89	10.46	10.93	8.42
RMSQE/OBSMEAN	0.57	0.68	0.7	0.55
% within +/- 50%	71.77	52.73	47.65	73.02
No of Data Sets	706	706	704	706

Tabelle 4-2 Statistische Auswertung der Tagesmittelwerte für PM2.5. RCG-T: RCG-TRAMPER, RCG-LM: RCG-COSMO-EU sowie LOTOS und MUSCAT. Mittlere Auswertung über 2 Hintergrundstationen Melpitz und Waldhof. Alle Tagesmittelwerte 2005.

O3	RCG-T	RCG-LM	LOTOS	MUSCAT
OBS MEAN	74.83	74.83	74.87	74.83
CALC MEAN	72.08	78.31	52.73	72.12
RATIO CALC/OBS	0.96	1.05	0.7	0.97
STD OBS	26.72	26.72	26.74	26.72
STD CALC	29.84	24.23	17.99	21.51
STD CALC/STD OBS	1.13	0.91	0.68	0.8
BIAS	-2.75	3.48	-22.14	-2.71
RESIDUAL	16.99	14.64	23.63	18.9
CORRELATION R2	0.55	0.58	0.52	0.32
RMSQE	21.27	18.07	28.95	23.31
RMSQE/OBSMEAN	0.29	0.24	0.39	0.31
% within +/- 50%	86.22	89.33	87.43	86.29
No of Data Sets	1717	1717	1712	1717

Tabelle 4-3 Statistische Auswertung der maximalen 8-h-Mittelwerte für O3. RCG-T: RCG-TRAMPER, RCG-LM: RCG-COSMO-EU sowie LOTOS und MUSCAT. Mittlere Auswertung über 5 Hintergrundstationen Melpitz, Waldhof, Neuglobsow, Westerland, Zingst. Alle Mittelwerte 2005

SO4	RCG-T	RCG-LM	LOTOS	MUSCAT
OBS MEAN	2.64	2.64	2.64	2.64
CALC MEAN	2.55	1.95	1.36	2.12
RATIO CALC/OBS	0.99	0.76	0.53	0.82
STD OBS	1.73	1.73	1.74	1.73
STD CALC	1.91	1.72	0.92	1.67
STD CALC/STD OBS	1.1	0.99	0.53	0.96
BIAS	-0.1	-0.69	-1.28	-0.53
RESIDUAL	1.25	1.25	1.41	1.06
CORRELATION R2	0.31	0.38	0.45	0.49
RMSQE	1.75	1.7	1.86	1.48
RMSQE/OBSMEAN	0.69	0.66	0.7	0.57
% within +/- 50%	58.15	56.27	44.71	67.21
No of Data Sets	1989	1989	1984	1989
NO3	RCG-T	RCG-LM	LOTOS	MUSCAT
OBS MEAN	2.77	2.77	2.77	2.77
CALC MEAN	2.71	1.82	2.38	3.67
RATIO CALC/OBS	1.11	0.73	0.97	1.56
STD OBS	2.52	2.52	2.52	2.52
STD CALC	2.56	1.61	2.22	3.54
STD CALC/STD OBS	1.15	0.71	0.96	1.57
BIAS	-0.06	-0.96	-0.4	0.9
RESIDUAL	1.82	1.57	1.62	2.22
CORRELATION R2	0.25	0.38	0.39	0.32
RMSQE	2.81	2.34	2.29	3.34
RMSQE/OBSMEAN	1.15	0.88	0.92	1.46
% within +/- 50%	44.67	46.99	41.92	38.51
No of Data Sets	1989	1989	1984	1989
NH4	RCG-T	RCG-LM	LOTOS	MUSCAT
OBS MEAN	1.31	1.31	1.31	1.31
CALC MEAN	1.62	1.16	1.22	1.66
RATIO CALC/OBS	1.37	0.98	1.02	1.42
STD OBS	1.23	1.23	1.23	1.23
STD CALC	1.22	0.97	0.89	1.34
STD CALC/STD OBS	1.09	0.85	0.78	1.2
BIAS	0.32	-0.15	-0.09	0.35
RESIDUAL	0.82	0.53	0.67	0.83
CORRELATION R2	0.42	0.63	0.47	0.45
RMSQE	1.2	0.77	0.99	1.24
RMSQE/OBSMEAN	1.04	0.6	0.81	1.08
% within +/- 50%	46.97	65.62	54.69	48
No of Data Sets	2152	2152	2146	2152

Tabelle 4-4 Statistische Auswertung der Tagesmittelwerte für SO₄, NO₃, NH₄. RCG-T: RCG-TRAMPER, RCG-LM: RCG-COSMO-EU sowie LOTOS und MUSCAT. Mittlere Auswertung über die 6 Hintergrundstationen Melpitz, Waldhof, Zingst, Westerland, Neuglobsow, Deuselbach. Alle Tagesmittelwerte 2005.

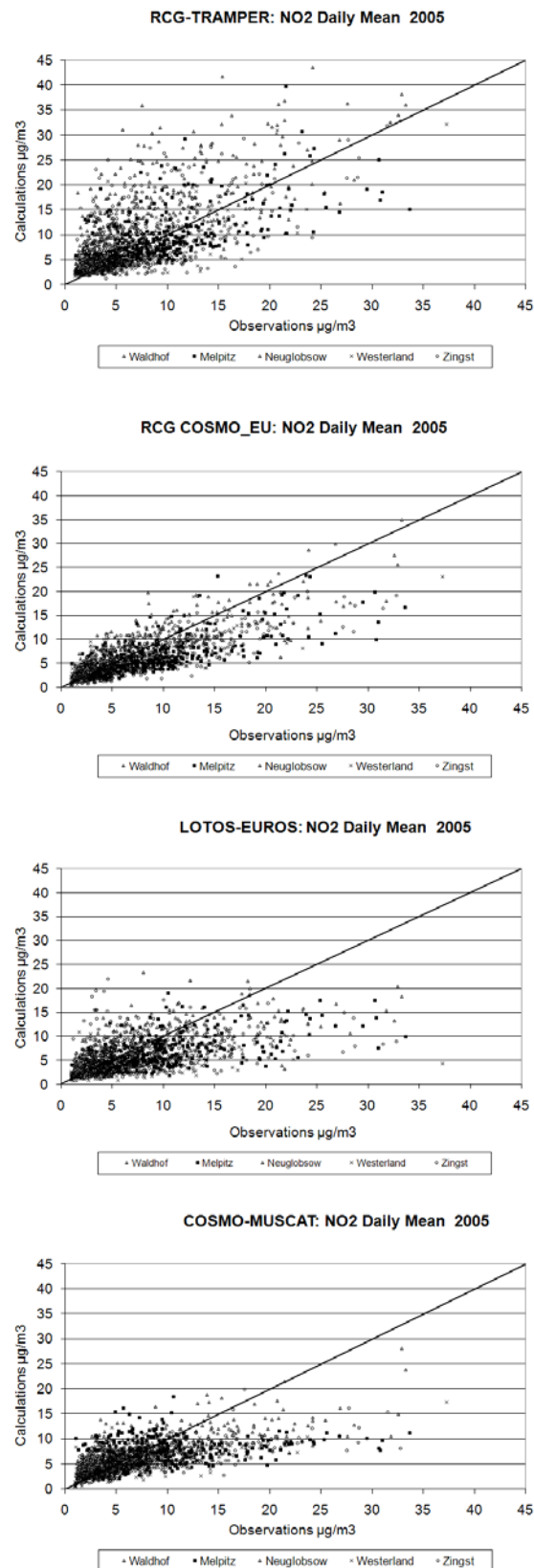


Abbildung 4-6 Berechnete und beobachtete NO₂-Tagesmittelwerte an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

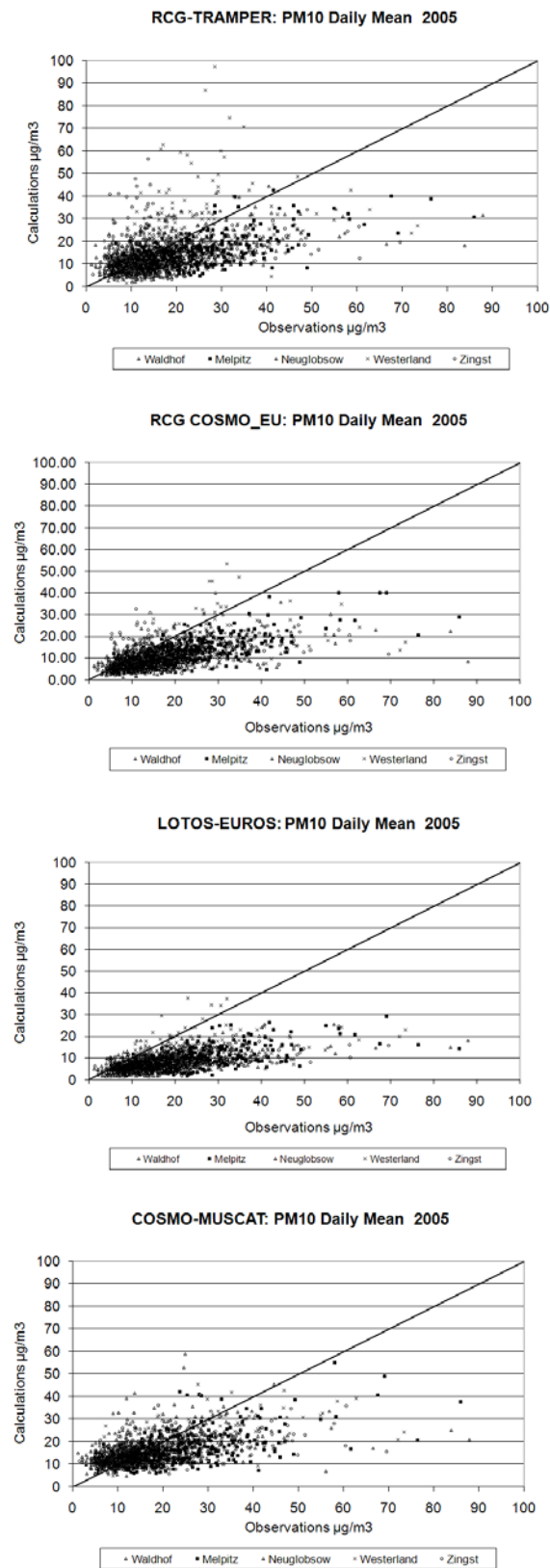


Abbildung 4-7 Berechnete und beobachtete PM10-Tagesmittelwerte an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

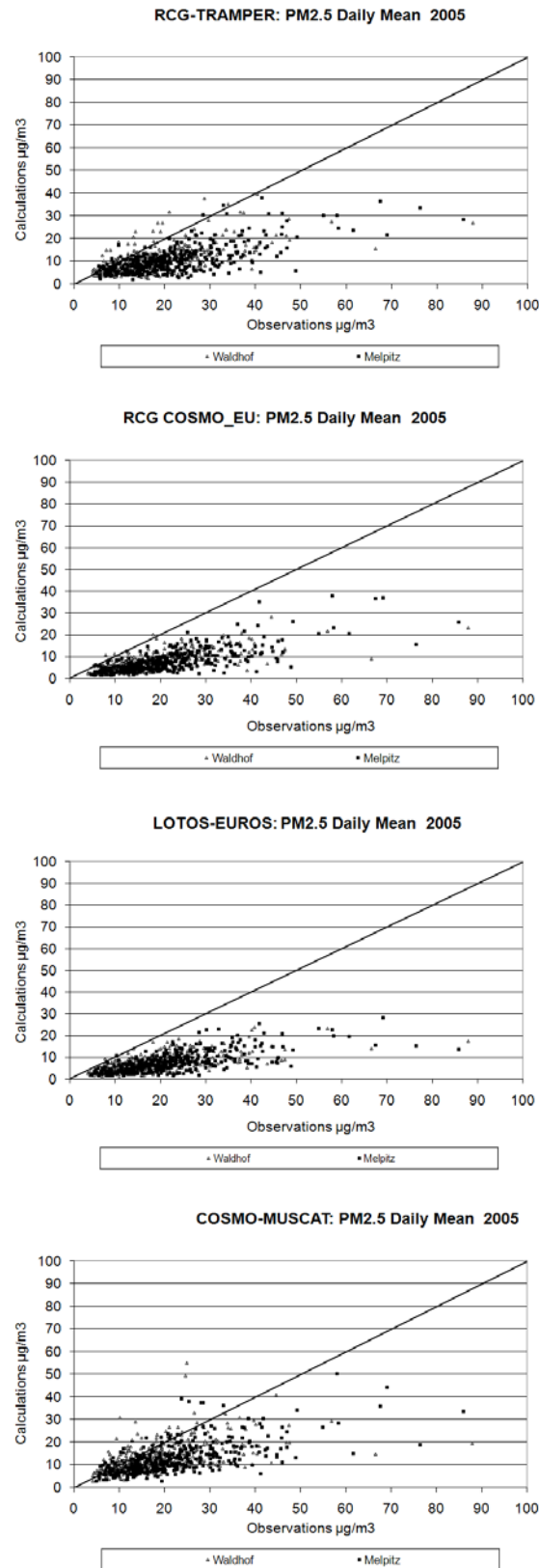


Abbildung 4-8 Berechnete und beobachtete PM2.5-Tagesmittelwerte an 2 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

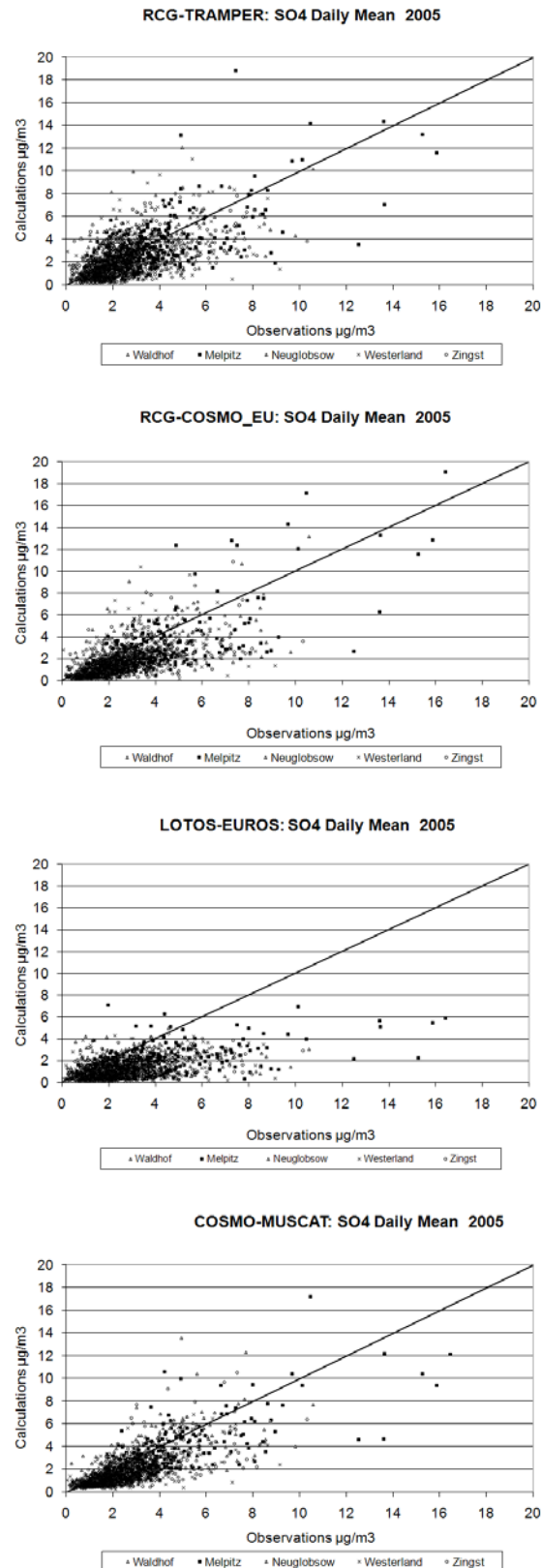


Abbildung 4-9 Berechnete und beobachtete SO₄-Tagesmittelwerte an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

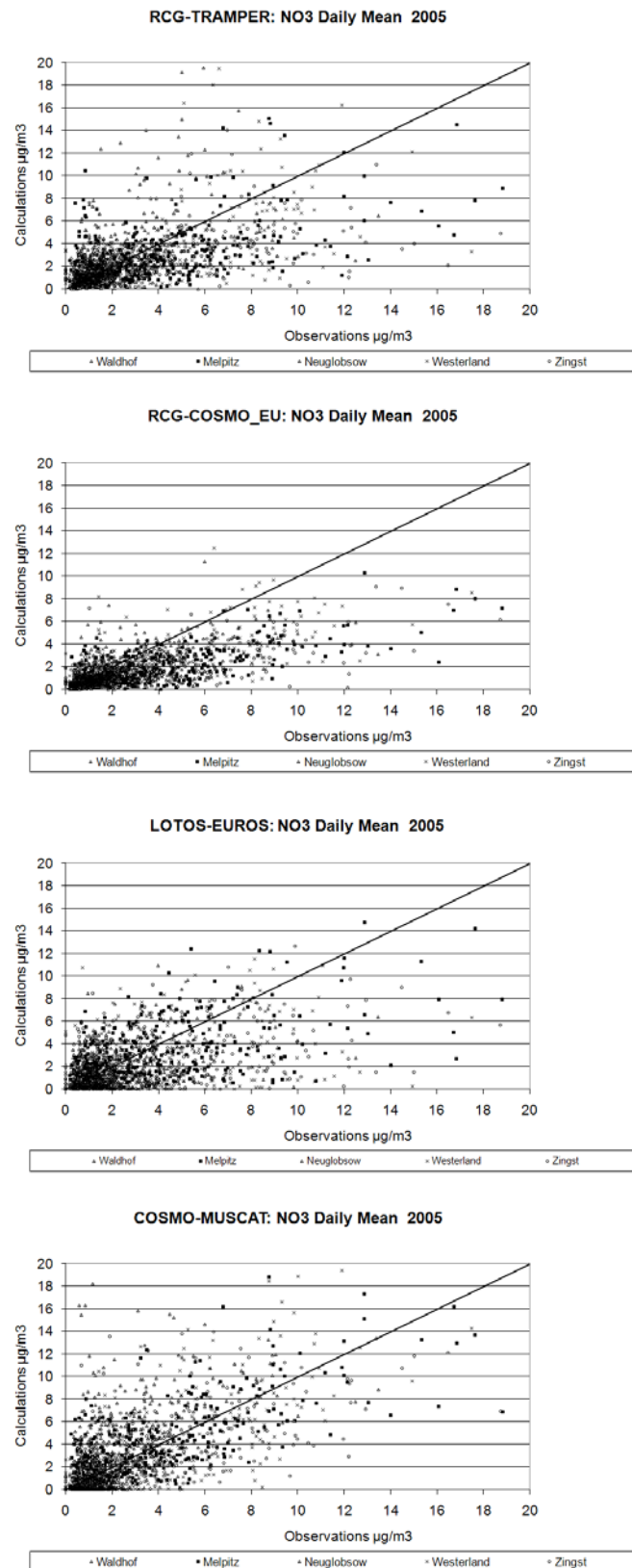


Abbildung 4-10 Berechnete und beobachtete NO₃-Tagesmittelwerte an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

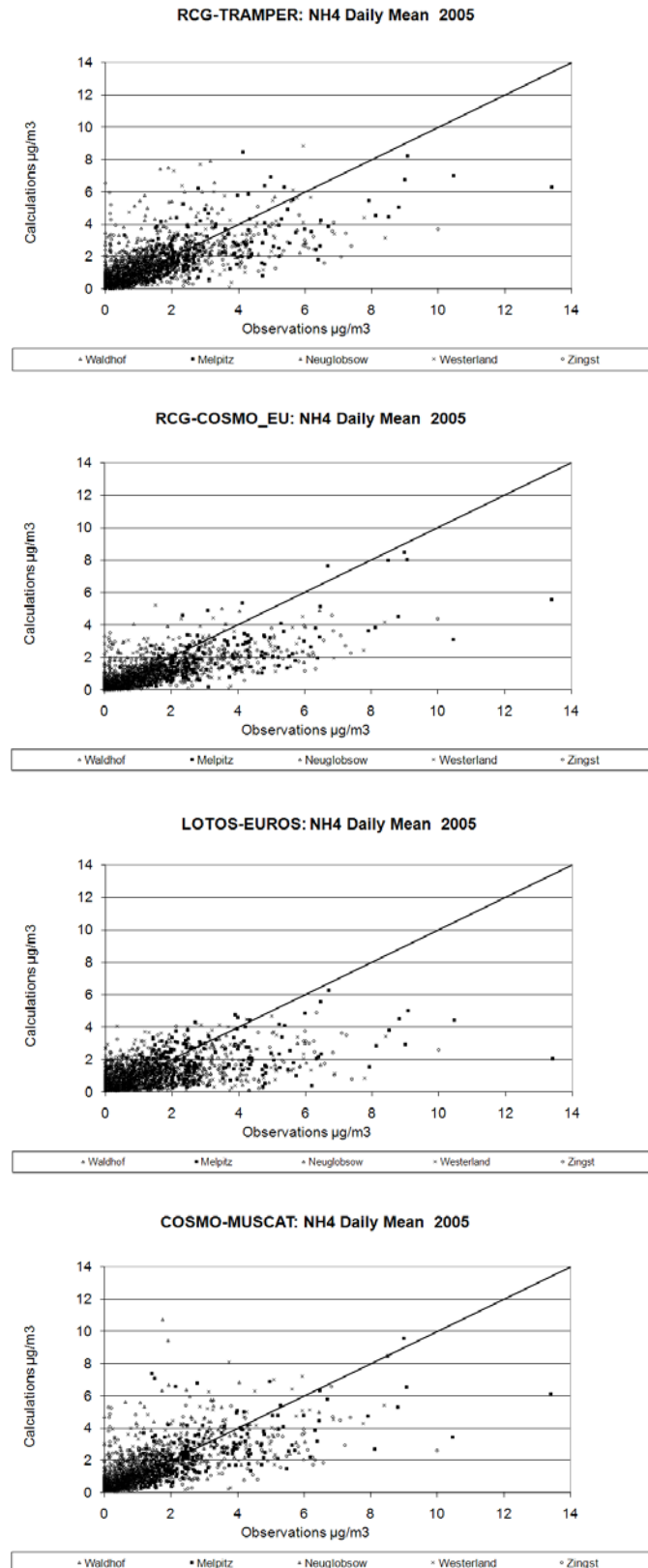


Abbildung 4-11 Berechnete und beobachtete NH₄-Tagesmittelwerte an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

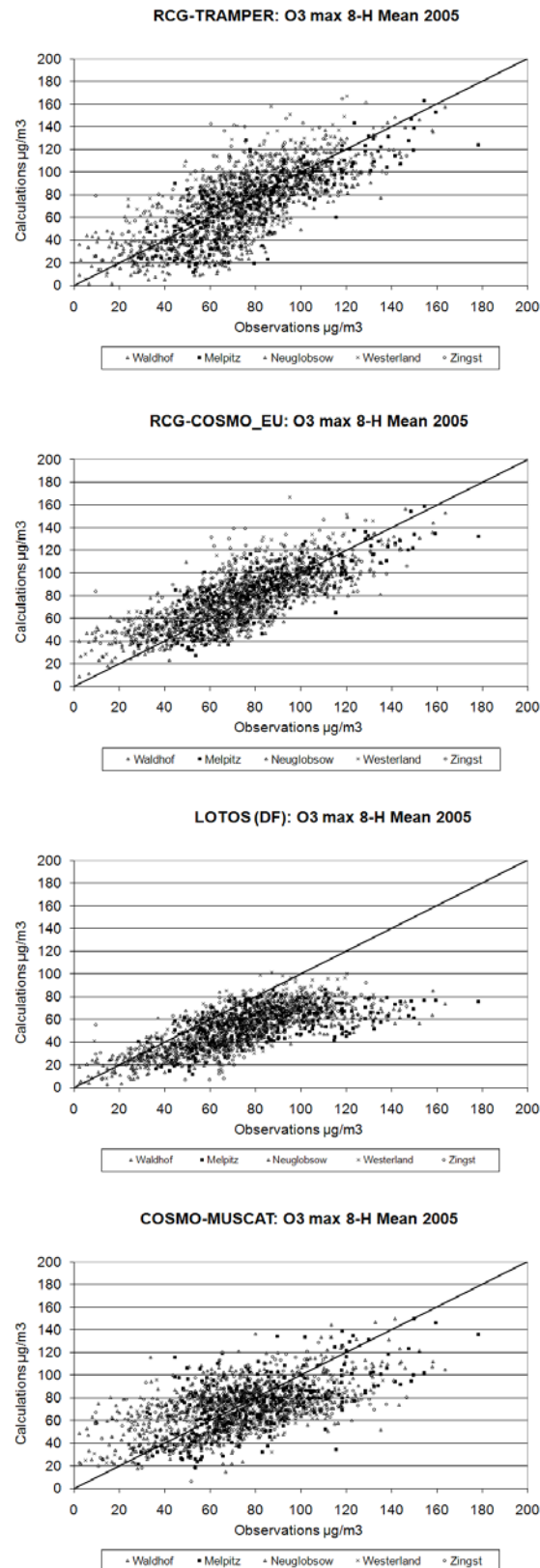


Abbildung 4-12 Berechnete und beobachtete maximale 8-h-Mittelwerte O₃ an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

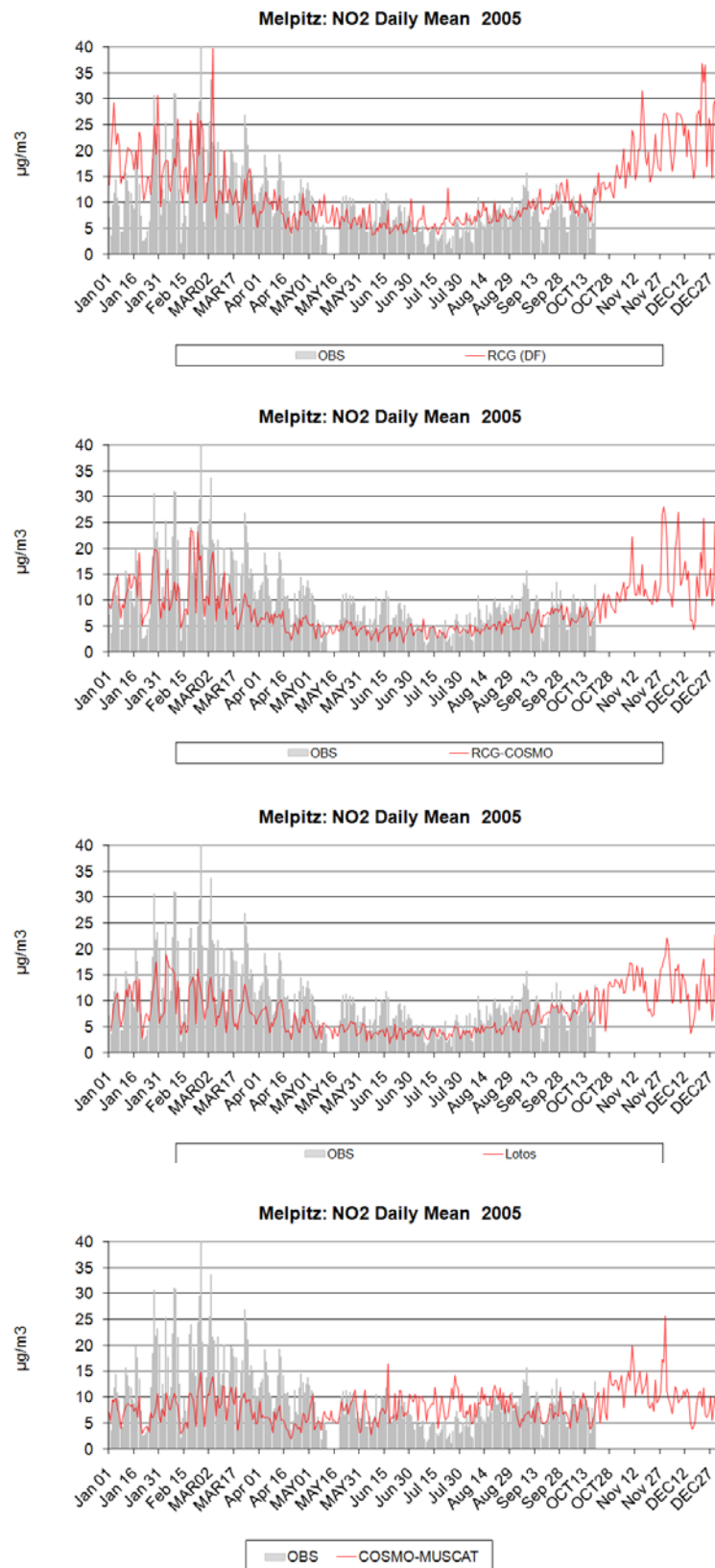


Abbildung 4-13 Berechnete und beobachtete NO₂-Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

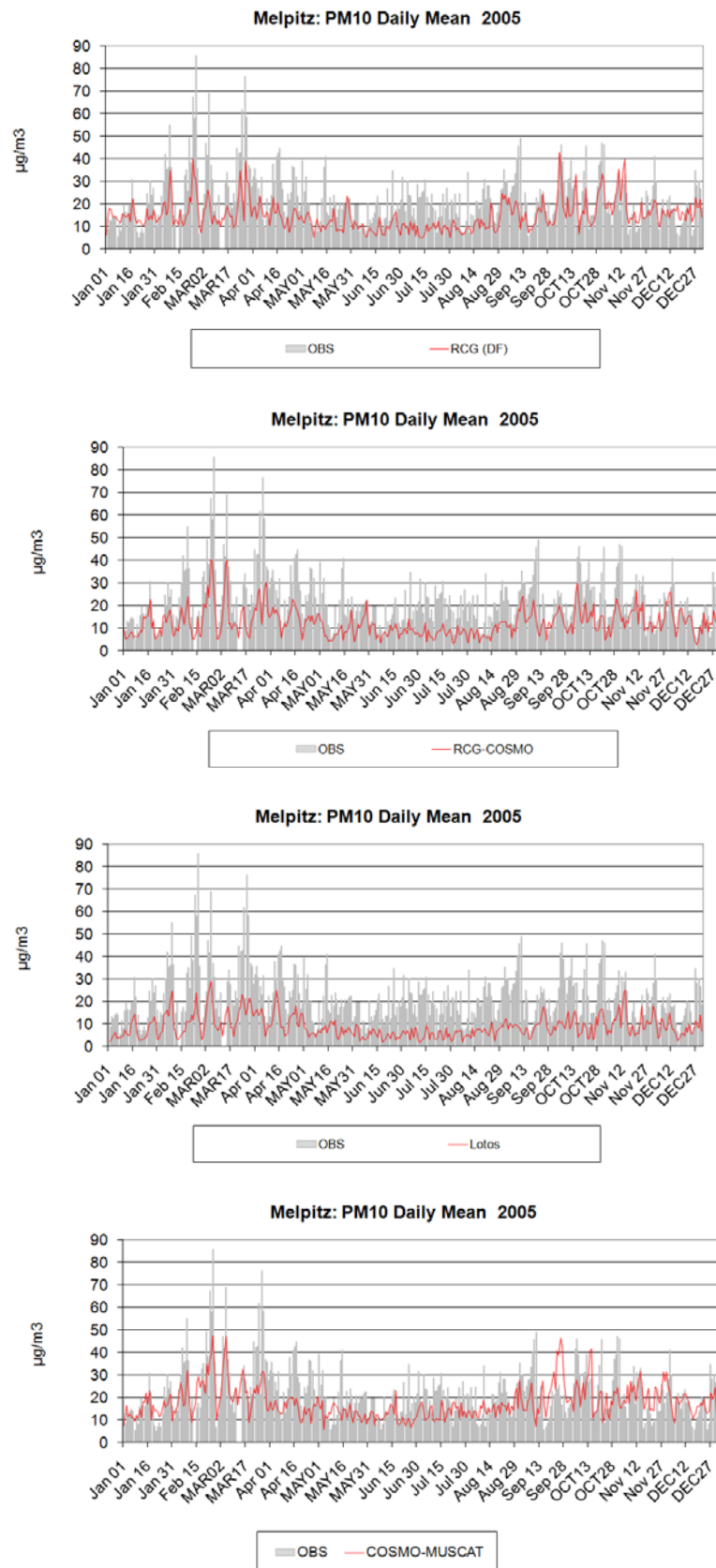


Abbildung 4-14 Berechnete und beobachtete PM10-Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

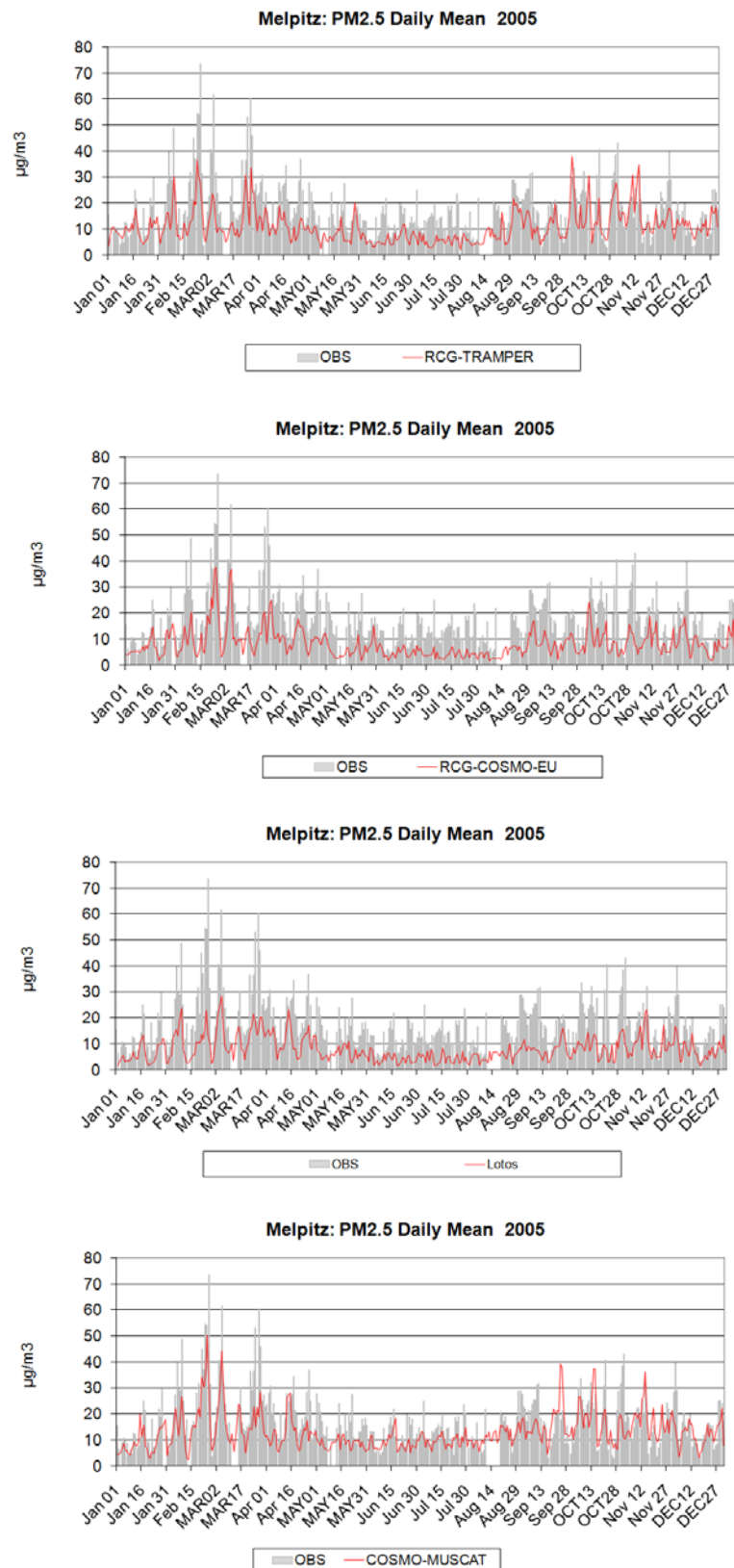


Abbildung 4-15 Berechnete und beobachtete PM2.5-Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

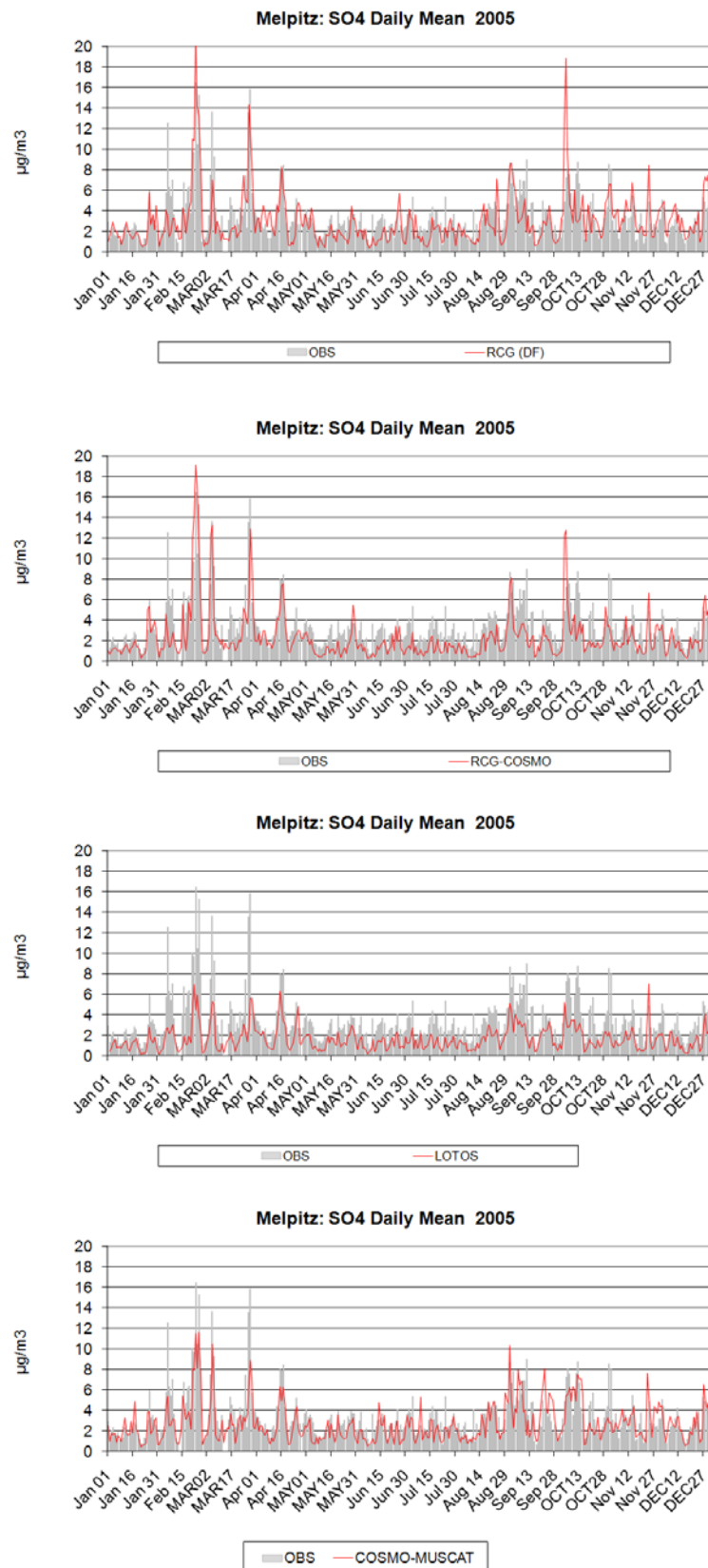


Abbildung 4-16 Berechnete und beobachtete SO_4 -Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

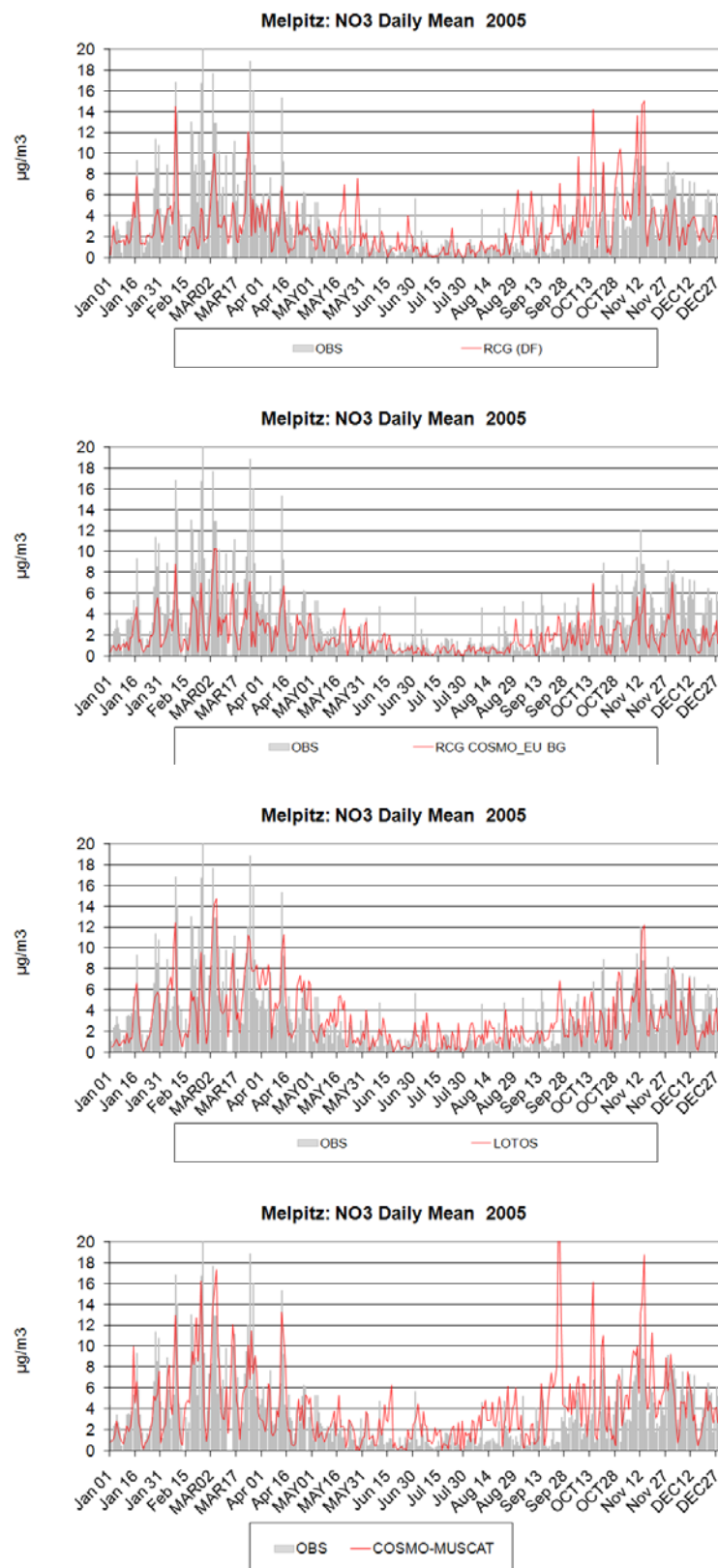


Abbildung 4-17 Berechnete und beobachtete NO_3 -Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

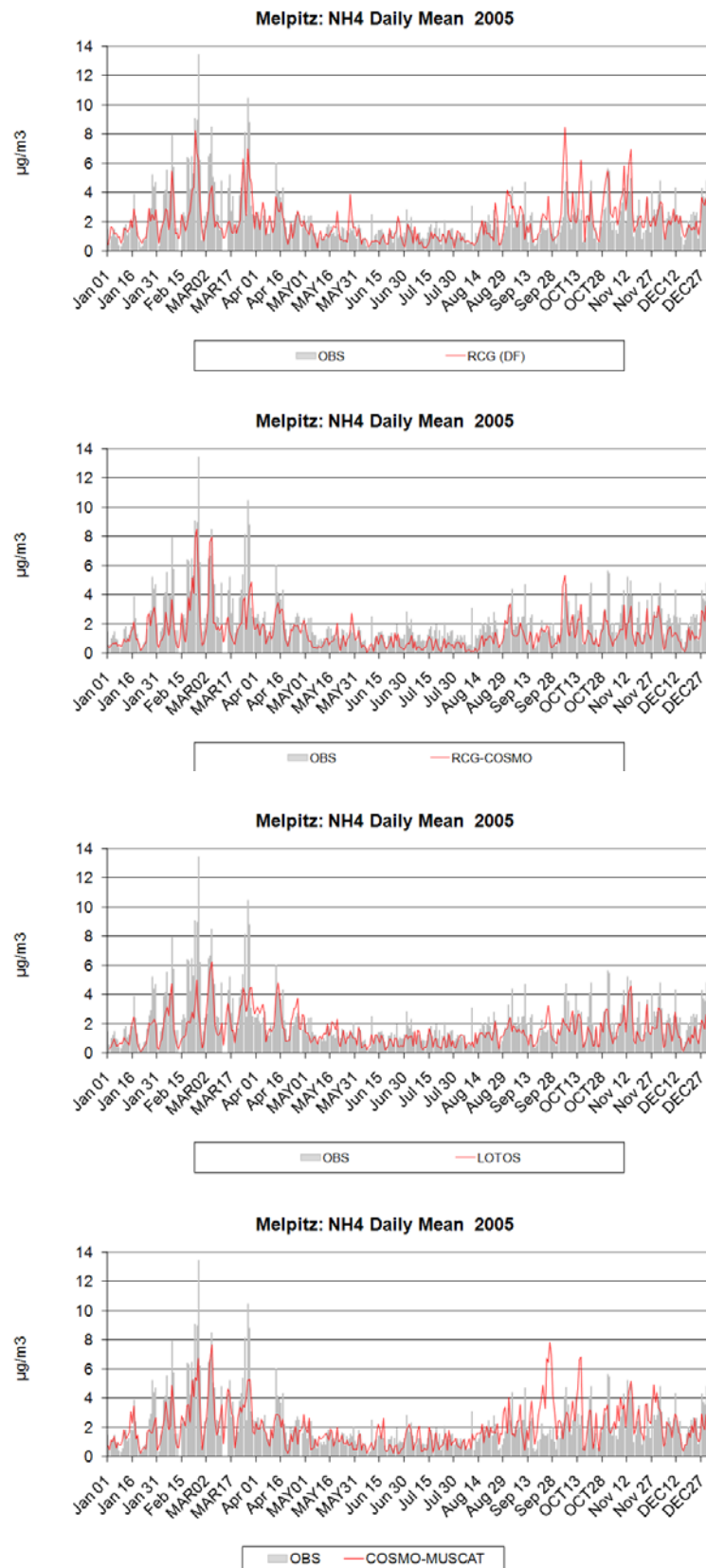


Abbildung 4-18 Berechnete und beobachtete NO_3 -Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

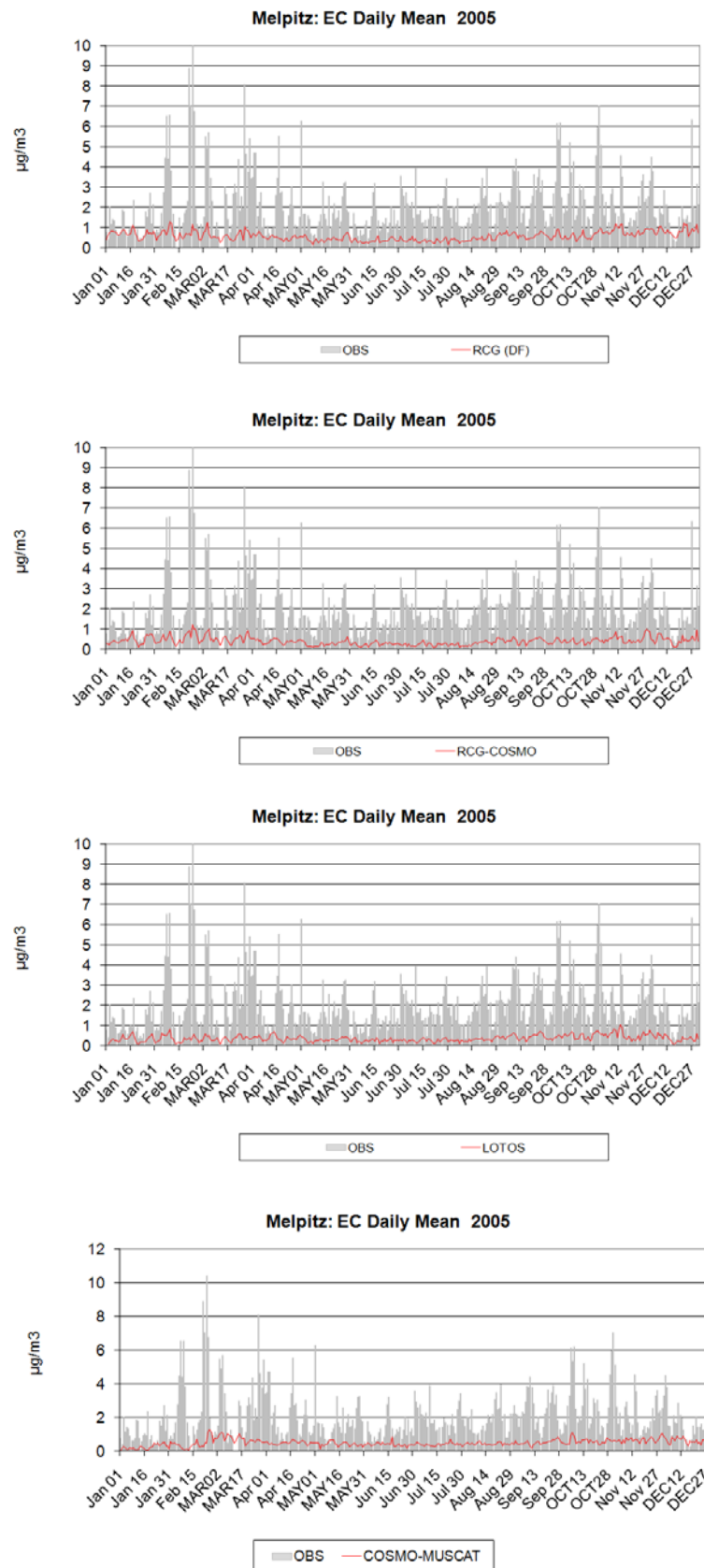


Abbildung 4-19 Berechnete und beobachtete EC-Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

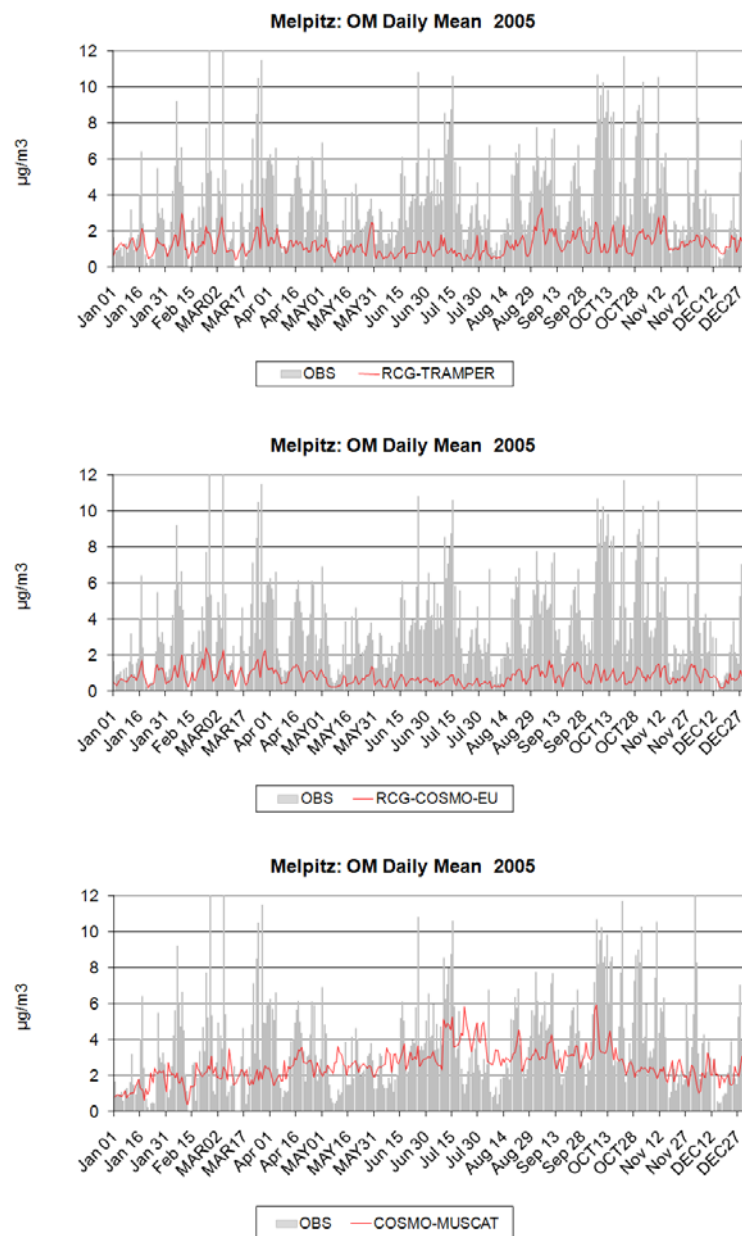


Abbildung 4-20 Berechnete und beobachtete OM-Tagesmittelwerte an der Station Melpitz (OM= primäres organisches Material+sekundäre organische Aerosole). Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, MUSCAT. LOTOS lieferte keine Information für diese Größe.

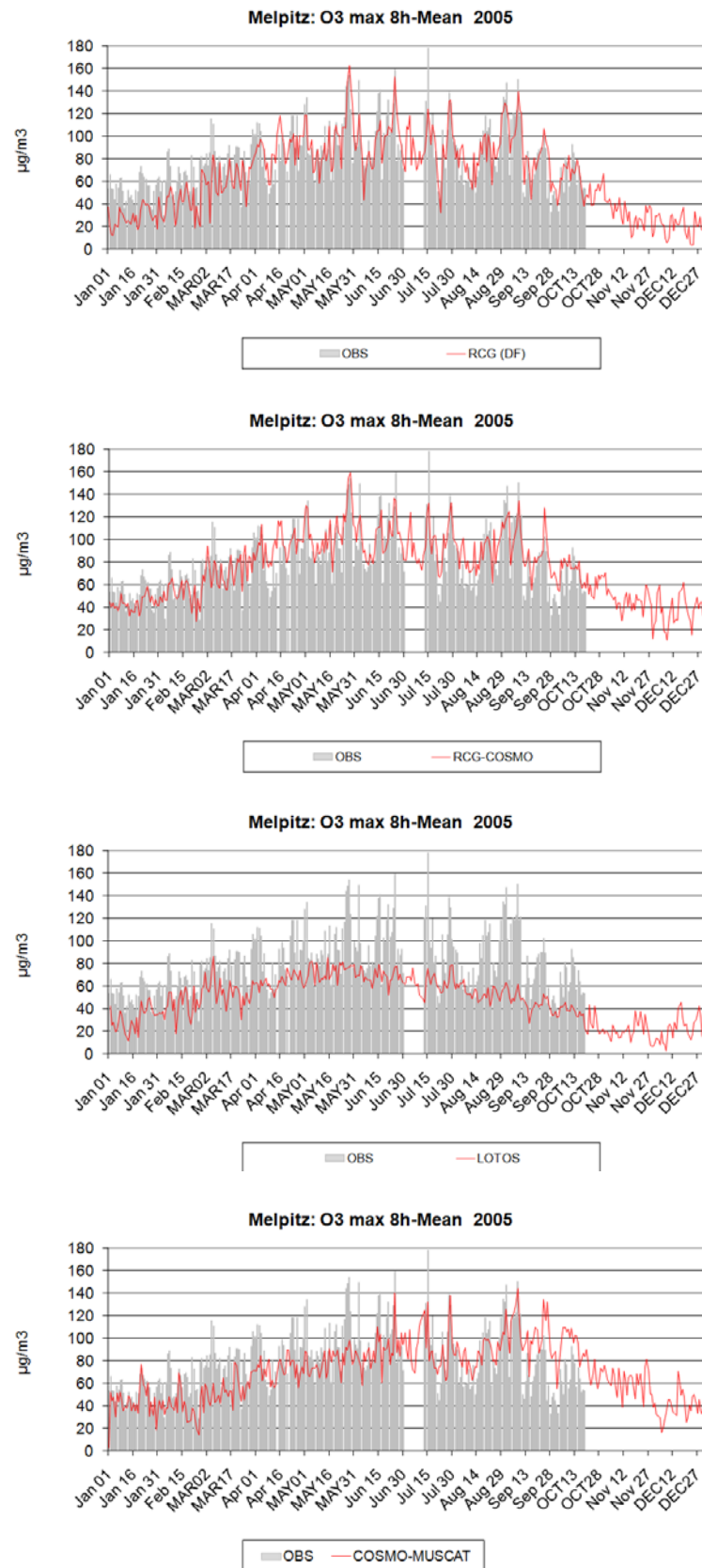


Abbildung 4-21 Berechnete und beobachtete maximal 8-h-Mittelwerte für O_3 an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

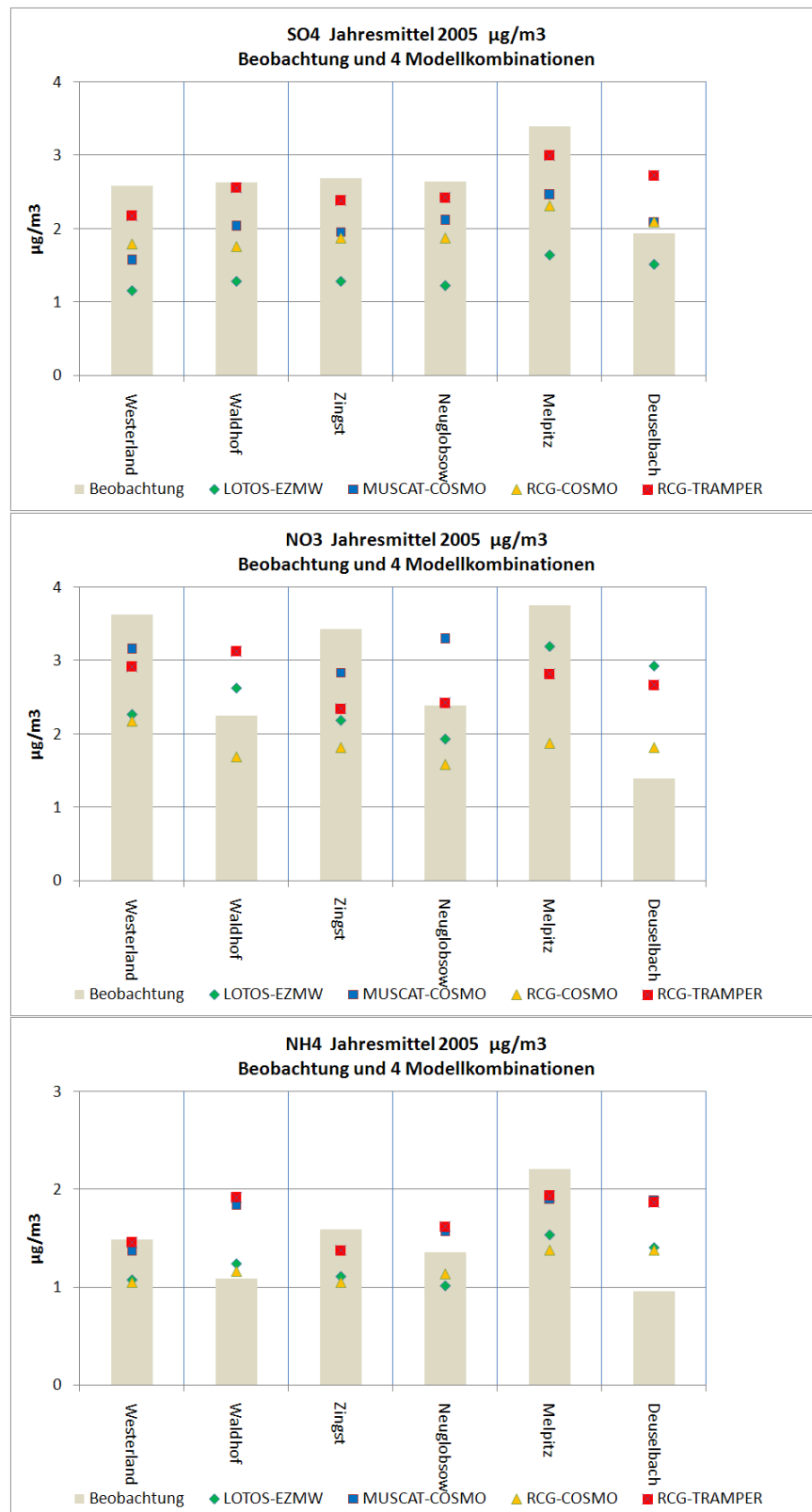


Abbildung 4-22 Berechnete und beobachtete SO₄⁻, NO₃⁻ und NH₄-Jahresmittelwerte an 6 Hintergrundstationen.

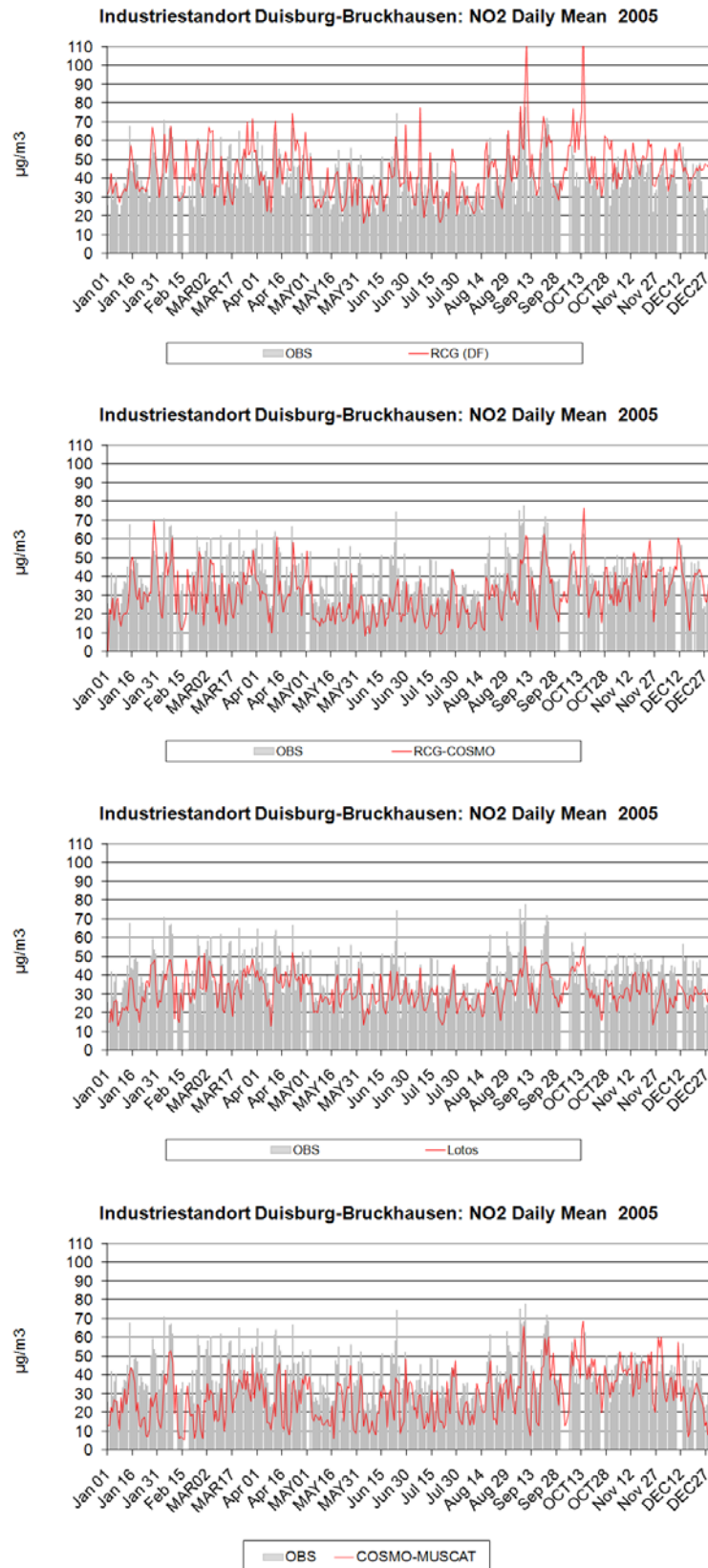


Abbildung 4-23 Berechnete und beobachtete NO₂-Tagesmittelwerte an der Station Duisburg-Bruckhausen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

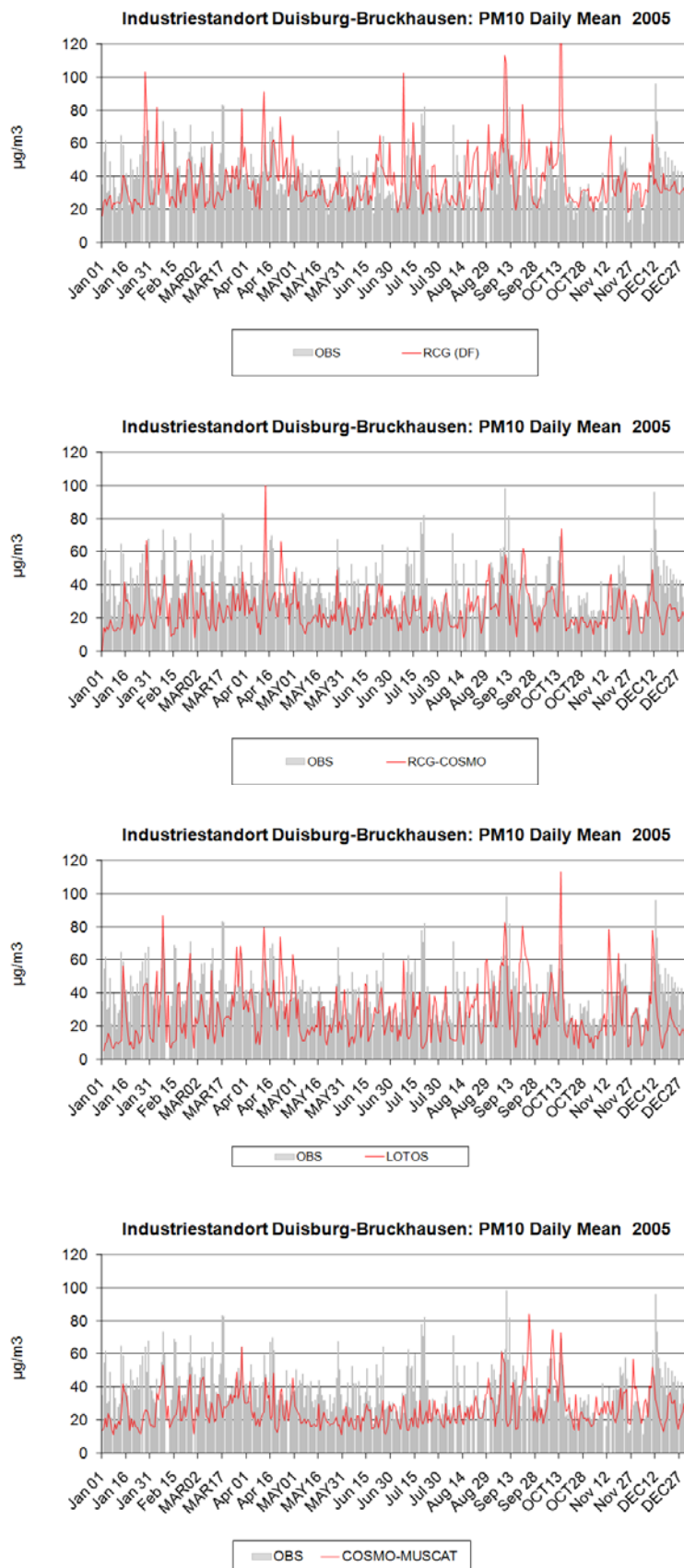


Abbildung 4-24 Berechnete und beobachtete PM10-Tagesmittelwerte an der Station Duisburg-Bruckhausen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

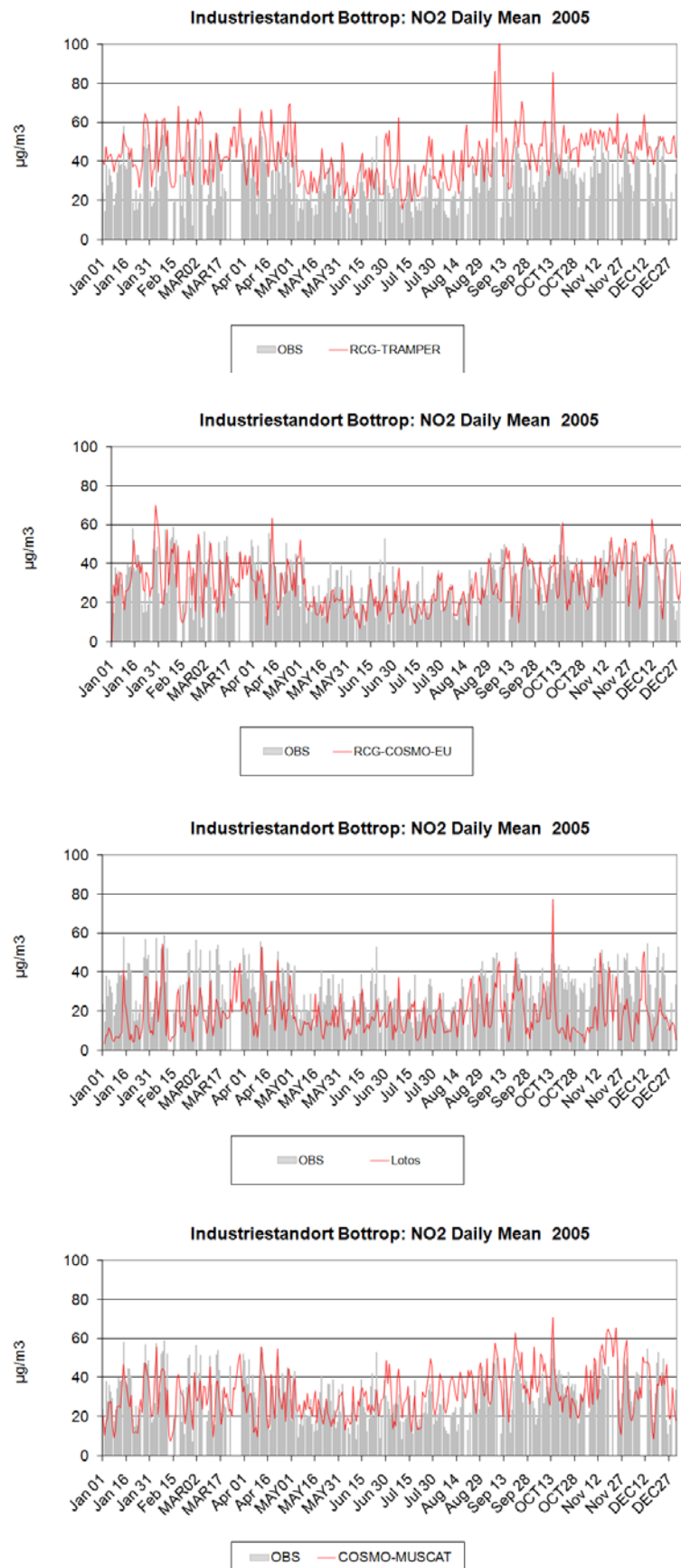


Abbildung 4-25 Berechnete und beobachtete NO₂-Tagesmittelwerte an der Station Bottrop. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

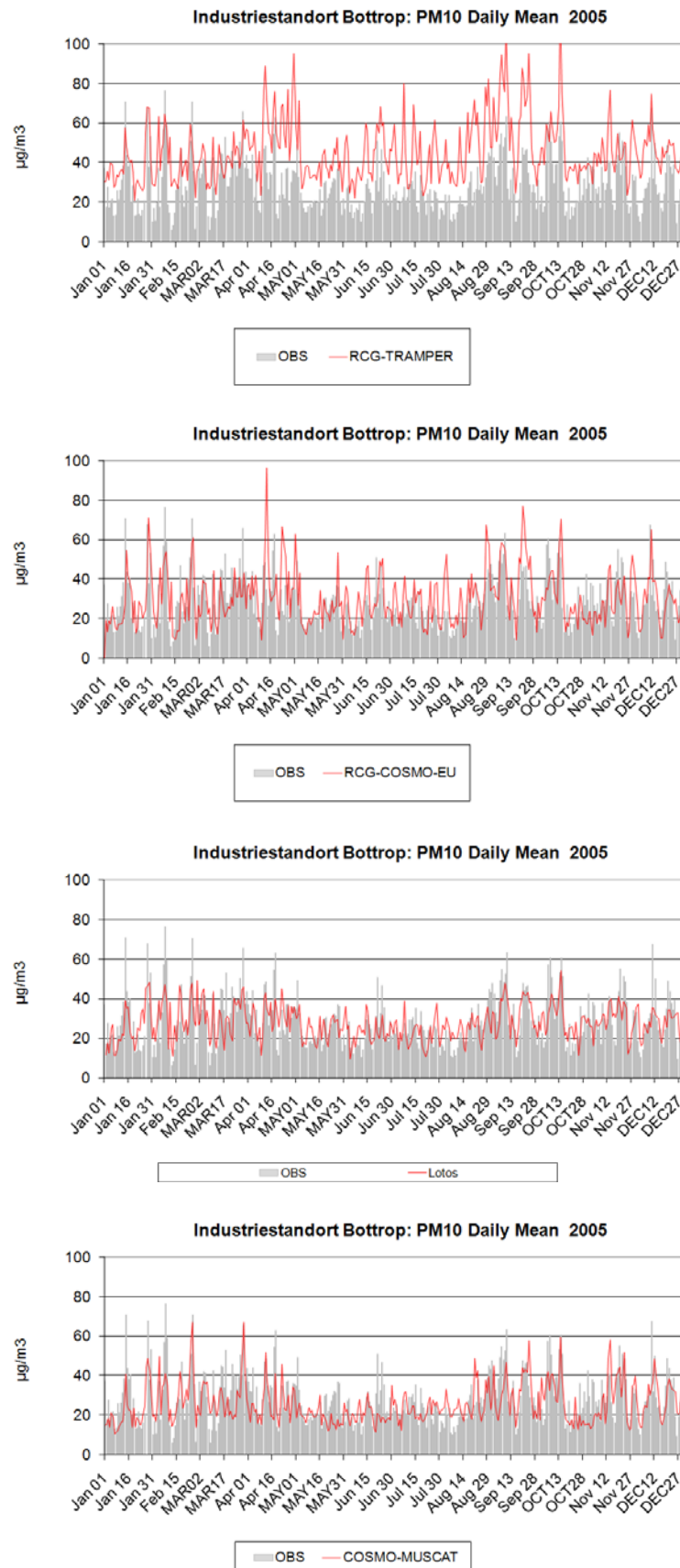


Abbildung 4-26 Berechnete und beobachtete PM10-Tagesmittelwerte an der Station Bottrop. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.

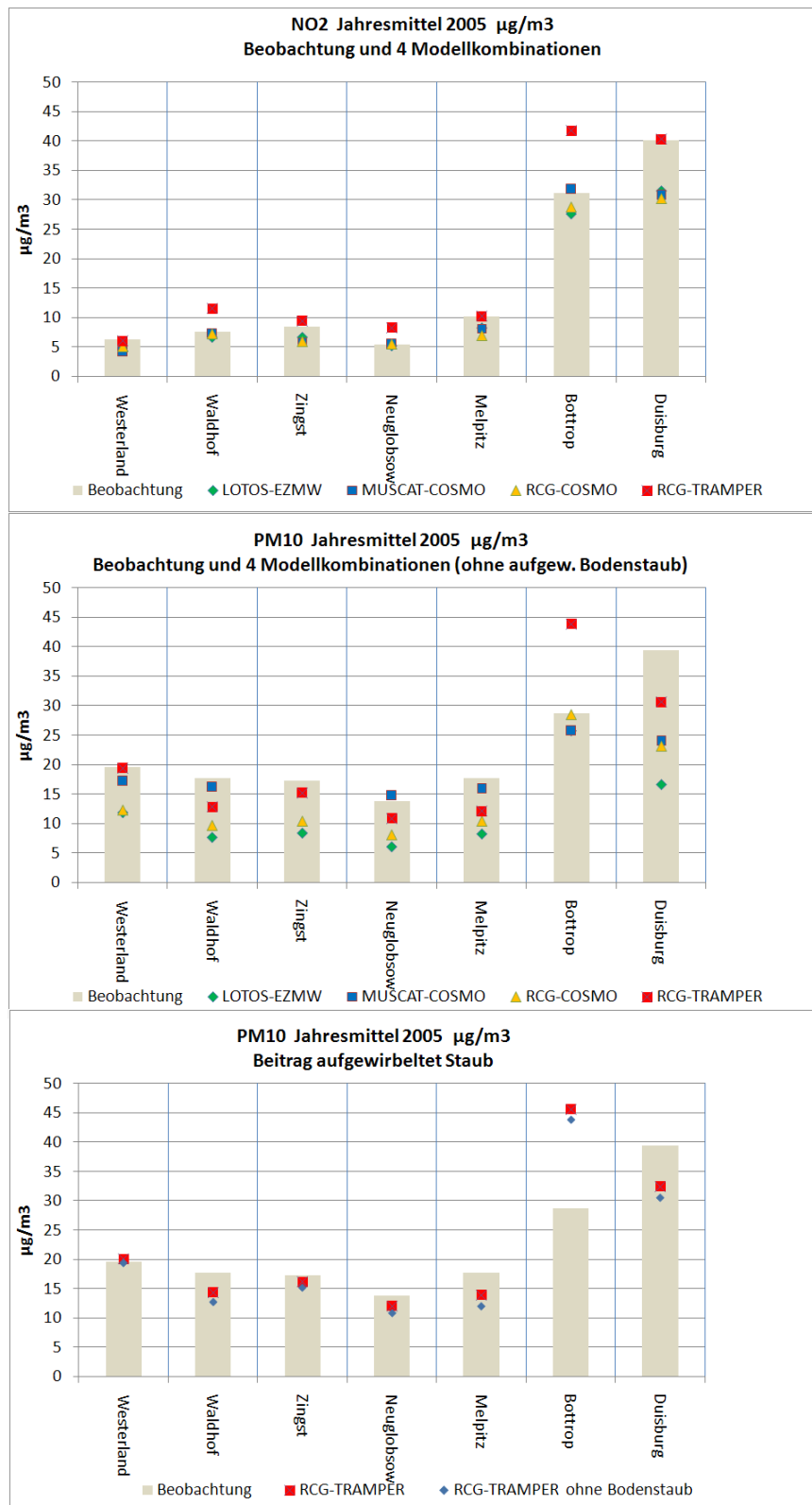


Abbildung 4-27 Berechnete und beobachtete NO₂- und PM₁₀-Jahresmittelwerte an 5 Hintergrundstationen und 2 industriell belasteten Stationen für RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS und MUSCAT. Alle Berechnungen ohne den Beitrag des aufgewirbelten Bodenstaubs. Unten: Beitrag des aufgewirbelten Bodenstaubs, nur RCG-TRAMPER.

5 Zusammenfassung

Im PAREST-Projekt kamen neben dem RCG-Modell zur Ermittlung einer Ergebnisbandbreite und zur Ergebnisabsicherung auch noch andere Modelle bzw. alternative Modellkombinationen zur Anwendung:

- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem diagnostischen TRAMPER-System,
- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem numerischen Modell COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes,
- LOTOS-EUROS, meteorologischer Antrieb mit dem numerischen Modell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage, EZMW,
- MUSCAT, meteorologischer Antrieb mit dem numerischen Modell COSMO.

In diesem Bericht wurden die Ergebnisse der vier Modellkombinationen anhand der Simulation des meteorologischen Basisjahrs 2005 für die Modellergebnisse in Deutschland verglichen. Die allen Modellanwendungen zugrunde liegende horizontale Auflösung beträgt 0.125° Länge und 0.0625° Breite oder circa $7 \text{ km} \times 8 \text{ km}$. Die Bewertung der Modellergebnisse basiert im Wesentlichen auf einer mittleren Auswertung für Deutschland, dessen Fläche dazu in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte in einer Anzahl von Klassen aggregiert wird. Es werden diskutiert:

- die klassengemittelten Modellergebnisse untereinander,
- die klassengemittelten Modellergebnisse im Vergleich mit ebenfalls klassengemittelten Messfeldern, die mit Hilfe der Methodik der Optimalen Interpolation aus den deutschen Messungen erstellt wurden,
- die Modellergebnisse im direkten Vergleich mit Messungen an ausgewählten Stationen.

Die Modellkombination RCG-TRAMPER liefert in den Ballungsräumen für die NO_2 -, PM_{10} - $\text{PM}_{2.5}$ - und PM_{CO} -Jahresmittelwerte, in ländlichen Regionen für die NO_2 -, PM_{10} -, und PM_{CO} -Jahresmittelwerte die höchsten Konzentrationen. RCG-TRAMPER ist die einzige Modellkombination, die eine diagnostische, auf Beobachtungen basierende meteorologische Datenbasis verwendet. Ersetzt man beim RCG-Modell die diagnostische Datenbasis durch die prognostische COSMO-EU-Datenbasis, gleichen sich vor allem die NO_2 -Jahresmittelwerte, in geringerem Umfang auch die PM_{10} -Jahresmittelwerte des RCG-Modells stark an diejenigen der beiden Modelle mit prognostischer Meteorologie an. Dies bedeutet, dass die vom diagnostischen Treiber TRAMPER gelieferten meteorologischen Daten und nicht die im RCG-Modell verwendeten physikalisch/chemischen Parametrisierungen die Hauptursache für die im Vergleich mit den Modellen LOTOS und MUSCAT höheren NO_2 - und PM_{10} -Konzentrationen der Modellkombination RCG-TRAMPER sind.

Die Hauptursache für die Konzentrationsunterschiede zwischen RCG-TRAMPER und RCG-COSMO-EU liegt in unterschiedlichen Eingangswerten für die Windgeschwindigkeit bei windschwachen Wetterlagen und für die Schubspannungsgeschwindigkeit, ein Maß für die mechanisch induzierte Turbulenz in der Grenzschicht. Die Schubspannungsgeschwindigkeit ist eine wichtige Größe bei der Berechnung der vertikalen Austauschkoefizienten und der Depositionswiderstände. Kleine Werte der Schubspannungsgeschwindigkeit bedingen kleine

Austauschkoeffizienten, was zu geringem vertikalen turbulenten Transport führt. Auch die Depositionsrates ist geringer bei kleinen Werten der Schubspannungsgeschwindigkeit. Damit führen sowohl die niedrigen Windgeschwindigkeiten des TRAMPER-Treibers bei wind-schwachen Wetterlagen als auch die geringeren Werte für die Schubspannungsgeschwindigkeit zu erhöhten Konzentrationen in Bodennähe.

In der räumlich gemittelten Auswertung werden die beobachteten PM10-Jahresmittelwerte von allen Modellen insbesondere in den oberen Konzentrationsbereichen unterschätzt. Die gemessenen NO₂-Jahresmittelwerte werden von RCG-TRAMPER im Mittel überschätzt, alle anderen Modellkombinationen unterschätzen. Die Modellkombination RCG-TRAMPER weist im zeitlichen (Jahr) und räumlichen (Bewertungsklassen) Mittel von allen untersuchten Modellergebnissen die geringsten Abweichungen von den OI-interpolierten Messfeldern für PM10, NO₂ und auch Ozon auf. Dies ist in erster Linie auf die Verwendung des diagnostischen meteorologischen Treibers TRAMPER zurückzuführen, dessen Parametrisierungsansätze für die Grenzschichtvariablen zu einem geringeren vertikalen Austausch und damit zu höheren Konzentrationen in Bodennähe führen als die entsprechenden Ansätze der meteorologischen Treiber auf der Basis prognostischer Modellergebnisse.

Der Vergleich berechneter und gemessener Tagesmittelwerte zeigt, dass die Streuung der Ergebnisse für die Modellkombination RCG-TRAMPER aufgrund der diagnostischen meteorologischen Eingangsdaten größer ist als die Streuung der Ergebnisse der mit prognostischen meteorologischen Daten arbeitenden Modelle. Die Varianz der RCG-TRAMPER-Modellergebnisse ist daher auch für die meisten Stoffe näher an der Varianz der Messungen als bei den anderen Modellkombinationen. Die in den Messungen auftretende Konzentrationsbandbreite wird von RCG-TRAMPER besser erfasst, im Einzelfall kann es aber zu größeren Abweichungen von den Messungen kommen als bei den anderen Modellkombinationen. Diese größere Ergebnisbandbreite ist der Grund, warum RCG-TRAMPER in einer zeitlich und räumlich gemittelten Auswertung die geringste systematische Abweichung (Bias) von den PM10- und NO₂-Messungen zeigt. Dies rechtfertigt die Entscheidung, im PAREST-Projekt die Modellkombination RCG-TRAMPER als Standardmodell zur Bestimmung der immissionsseitigen Auswirkungen von emissionsmindernden Maßnahmen zu verwenden, impliziert aber nicht, dass RCG-TRAMPER im Sinne einer prozessorientierten Modellanwendung im Vergleich mit den anderen Modellkombinationen die bessere Wahl wäre. Wegen der Vielfalt der meteorologischen, physikalischen und chemischen Einflussgrößen, die in den Modellen auf die unterschiedlichste Art und Weise parametrisiert werden, wird kein Modell durchgängig für alle Stoffe an allen Messstationen die „beste“ Simulation liefern. Auch eine statistische Auswertung von Modellergebnissen hilft hier nur begrenzt weiter, da es keine durchgängige objektive Bewertung der verschiedenen statistischen Maße gibt. RCG-TRAMPER weist zwar die geringste mittlere Abweichung von den Messungen auf, dafür sind die Korrelationskoeffizienten zum Teil niedriger als bei den anderen Modellkombinationen. Eine allgemeine rangmäßige Bewertung von Modellen ähnlicher Komplexität ist daher außerordentlich schwierig, wenn nicht unmöglich.

6 Literatur

Beekmann, M., Kerschbaumer, A., Reimer, E., Stern, R., Möller, D. (2007)

PM Measurement Campaign HOVERT in the Greater Berlin area: model evaluation with chemically specified observations for a one year period. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 55-68.

Builtjes, P., W. Jörß, W., R. Stern, J. Theloke (2010)

Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung . PAREST-Endbericht, Schlussbericht an das Umweltbundesamt zum Forschungsvorhabens FKZ 206 43 200/01

Byun, D. and J. Ching (1999)

Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA/600/R-99/030. US EPA.

C. Cuvelier, P. Thunis, R. Vautard, M. Amann, B. Bessagnet, M. Bedogni, R. Berkowicz, J. Brandt, F. Brocheton, P. Builtjes, A. Coppalle, B. Denby, G. Douros, A. Graf, O. Hellmuth, C. Honoré, A. Hodzic, J. Jonson, A. Kerschbaumer, F. de Leeuw, E. Minguzzi, N. Moussiopoulos, C. Pertot, G. Pirovano, L. Rouil, M. Schaap, R. Stern, L. Tarrason, E. Vignati, M. Volta, L. White, P. Wind, A. Zuber (2007).

CityDelta: A model intercomparison study to explore the impact of emission reductions in European cities in 2010. *Atmospheric Environment* 41, 189-207.

Denier van der Gon, H.A.C., A.J.H. Visschedijk, H. van der Brugh, R. Droge (2010)

A high resolution European emission data base for the year 2005. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, TNO, Niederlande.

Fath, J. , Kerschbaumer, A., Stern, R. (2010)

Archivierung der im Rahmen des Parest-Projekts erzeugten Immissionsfelder. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Hass, H., van Loon, M., Kessler, C., Matthijssen, J., Sauter, F., Stern, R., Zlatev, R., Langner, J., Fortescu, V., Schaap, M. (2003)

Aerosol Modeling: Results and Intercomparison from European Regional-scale Modeling Systems. A contribution to the EUROTRAC-2 subproject GLOREAM. EUROTRAC report 2003. www.trumpf.de

Jörß, W., U. Kugler, J. Theloke (2010)

Beschreibung des Referenzemissionsdatensatzes für das Forschungsprojekt PAREST. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT.

Kerschbaumer, A. und Reimer, E. (2003)

Erstellung der Meteorologischen Eingangsdaten für das REM/Calgrid-Modell: Modellregion Berlin-Brandenburg. Abschlussbericht zum UBA-Forschungsvorhaben 29943246. Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie.

Kerschbaumer, A. (2010a)

Abhängigkeit der RCG-Simulationen von unterschiedlichen meteorologischen Treibern. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Kerschbaumer, A. (2010b)

Meteorologie – Vergleich zum besseren Verständnis der unterschiedlichen Schadstoffkonzentrations-simulationen mit verschiedenen Chemie-Transport-Modellen. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Memmesheimer, M., E. Friese, A. Ebel, H. J. Jakobs, H. Feldmann, C. Kessler, G. Piekorz, (2004)

Long- term simulations of particulate matter in Europe on different scales using sequential nesting of a regional model, *Int. J. for Environment and Pollution* 22, 108 - 132.

Putaud, J., F. Raesa, R. Van Dingenen, E. Brüggemann, M. Facchini, S. Decesari, S. Fuzzi, R. Gehrig, C. Hueglin, P. Laj, G. Lorbeer, W. Maenhaut, N. Mihalopoulos, K. Mueller, X. Querol, S. Rodriguez, J. Schneider, G. Spindler, H. ten Brink, K. Torseth, A. Wiedensohler (2004)

A European aerosol phenomenology - 2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmospheric Environment* 38, 2579–2595.

Reimer, E. and B. Scherer (1992)

An operational meteorological diagnostic system for regional air pollution analysis and long term modeling, in *Air Pollution Modelling and its Application IX*, eds. H. v. Dop und G. Kallos, NATO Challenges of Modern Society, Kluwer Academic/Plenum Publisher, New York.

Sartelet, K., E. Debry, K. Fahey, Y. Roustan, M. Tombette, and B. Sportisse (2007)

Simulation of aerosols and gas-phase species over Europe with the POLYPHEMUS system. part I : model-to-data comparison for 2001. *Atmospheric Environment*, 41, 6116-6131.

Simpson, D., K. E. Yttri, Z. Klimont, K. Kupiainen, A. Caseiro, A. Gelencsér, C. Pio, H. Puxbaum, and M. Legrand (2007)

Modeling carbonaceous aerosol over Europe: Analysis of the CARBOSOL and EMEP EC/OC campaigns, *J. Geophys. Res.*, 112, D23S14, doi:10.1029/2006JD008158.

Stern, R. (2003)

Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID. Abschlussbericht zum F& E-Vorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“.

Stern, R. (2004)

Weitere Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM-CALGRID für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität und ihrer Tochterrichtlinien. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben 201 43 250 des Umweltbundesamts „Anwendung modellgestützter Beurteilungssysteme für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität und ihrer Tochterrichtlinien“

Stern, R., Builtjes, P., Schaap, M., Timmermans, R., Vautard, R., Hodzic, A., Memmesheimer, M., Feldmann, H., Renner, E., Wolke, R., Kerschbaumer, A., (2008)

A model inter-comparison study focussing on episodes with elevated PM10 concentrations. *Atmospheric Environment* 42 4567-4588. 2008.

Stern, R. (2009)

Auswirkungen der verschiedenen NEC-Abschätzungen auf die Immissionen in Deutschland. . Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010)

Prognose der Luftqualität und Abschätzung von Grenzwertüberschreitungen in Deutschland für die Referenzjahre 2010, 2015 und 2020. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Thunis, P., C. Cuvelier, P. Roberts, L. White, L. Post, L. Tarrasón, S. Tsyro, R. Stern, A. Kerschbaumer, L. Rouil, B. Bessagnet, R. Bergström, M. Schaap, G.A.C. Boersen, P.J.H. Builtjes (2008)

EURODELTA-II. Evaluation of a Sectoral Approach to Integrated Assessment Modelling including the Mediterranean Sea. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy. EUR 23444 EN - 2008

Tsyro, S.G. (2005)

To what extent can aerosol water explain the discrepancy between model calculated and gravimetric PM10 and PM2.5? Atmos. Chem. Phys., 5, 515-532.

Van Loon, L., Vautard, R., Schaap, M., Bergström, R., Bessagnet, B., Brandt, J., Builtjes, P., Christensen, J., Cuvelier, K., Jonson, J., Langner, J., Roberts, L., Rouil, L., Stern, R., Tarrasón, L. Thunis, P., Vignati, P., White, L., Wind, P. (2007)

Evaluation of long-term ozone simulations from seven regional air quality models and their ensemble average. Atmospheric Environment 41, 2083-2097

Van Loon, M., M. Roemer, P. Builtjes, 2004. Model Inter-comparison in the framework of the review of the Unified EMEP model. TNO-Report R 2004/282.**Vautard, R., P. Builtjes, P. Thunis, K. Cuvelier, M. Bedogni, B. Bessagnet, C. Honoré, N. Mousiopoulos, M. Schaap, R. Stern, L. Tarrason, M. van Loon (2007)**

Evaluation and intercomparison of Ozone and PM10 simulations by several chemistry-transport models over 4 European cities within the City-Delta project, 2007. Atmospheric Environment 41, 173-188.

Wolke, R., O. Knöth, O. Hellmuth, W. Schröder, E. Renner (2004a)

The parallel model system LM-MUSCAT for chemistry-transport simulations: Coupling scheme, parallelization and applications. G.R. Joubert, W.E. Nagel, F.J. Peters and W.V. Walter (Ed.). In Parallel Computing: Software Technology, Algorithms, Architectures, and Applications. Elsevier, 363-370.

Wolke, R., Hellmuth, O., Knöth, O., Schröder, W., Heinrich, B., Renner, E. (2004b)

The chemistry-transport modeling system LM-MUSCAT: Description and CITYDELTA applications. C. Borrego and S. Incecik (Ed.). In Air Pollution Modeling and its Application XVI, Kluwer Academic / Plenum Publishers, 427-439.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 RCG-Rechengebiet Nest 0 (N0): Europäischer Hintergrund, Auflösung circa 32x28 km ² , 0.25° Breite, 0.5° Länge, 82 x 125 Gitterzellen, Rechengebiet: -10°W bis 30° Ost, 35.25° N bis 66.0° N	6
Abbildung 2-2 Nest 1 (N1): Deutschland, Auflösung circa 16 km x 14 km, 0.125° Breite, 0.25° Länge, (N0/2), 54 x 68 Gitterzellen incl. Randreihen (rot), Rechengebiet: 4.0° O bis 17.0° O, 47° N bis 55.25° N	7
Abbildung 2-3 Nest 2 (N2) Deutschland, Auflösung circa 8 km x 7 km, 0.0625° Breite, 0.125° Länge (N0/4, N1/2), 82 x 126 Gitterzellen incl. Randreihen, Rechengebiet: 5.5° O bis 15.5° O, 47.25° N bis 55.0° N	8
Abbildung 2-4 Bevölkerungsdichte in Einwohner/km ² in 4 Klassen. Zur Klassendefinition siehe Text. Die Auflösung entspricht der Auflösung des Nestes 2, Deutschland fein: 0.0625° Breite, 0.125°, circa 8 km x 7 km. 8	
Abbildung 3-1 Berechnete NO ₂ -Jahresmittelwerte 2005 in µg/m ³ . Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.	14
Abbildung 3-2 Berechnete PM10-Jahresmittelwerte 2005 in µg/m ³ . Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.	15
Abbildung 3-3 Berechnete PM2.5-Jahresmittelwerte 2005 in µg/m ³ . Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.	16
Abbildung 3-4 Berechnete (PM10-PM2.5)-Jahresmittelwerte 2005 in µg/m ³ . Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.	17
Abbildung 3-5 Berechnetes PM2.5/PM10-Verhältnis. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.	18
Abbildung 3-6 Berechnete O ₃ -Jahresmittelwerte 2005 in µg/m ³ . Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.	19
Abbildung 3-7 Berechnete O ₃ -AOT40-Werte zum Schutz der Vegetation (Mai-Juli) für das Jahr 2005 in µg/m ³ h. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.	20
Abbildung 3-8 Berechnete Anzahl von Tagen mit einem maximalen O ₃ -8-h-Mittelwert > 120 µg/m ³ . Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EZMW; unten rechts: COSMO-MUSCAT.	21
Abbildung 3-9 Mittlere Abweichung der NO ₂ -Jahresmittelwerte in % der Modelle RCG-LM (COSMO-EU), LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-TRAMPER für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.	22
Abbildung 3-10 Mittlere Abweichung der PM10-, PM2.5- und PMCO-Jahresmittelwerte in % der Modelle RCG-LM (COSMO-EU), LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-TRAMPER für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.	23
Abbildung 3-11 Mittlere Abweichung der O ₃ -Jahresmittelwerte, der AOT40-Werte zum Schutz der Vegetation und der Anzahl von Tagen mit einem maximalen 8-h-Mittelwert > 120 µg/m ³ in % der Modelle RCG-LM (COSMO-EU), LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-TRAMPER für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.	24
Abbildung 3-12 Mittlere Abweichung der NO ₂ -Jahresmittelwerte in % der Modelle LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-LM (COSMO-EU) für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.	25
Abbildung 3-13 Mittlere Abweichung der PM10-, PM2.5 und PMCO-Jahresmittelwerte in % der Modelle LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-LM (COSMO-EU) für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.	26
Abbildung 3-14 Mittlere Abweichung der O ₃ -Jahresmittelwerte, der AOT40-Werte zum Schutz der Vegetation und der Anzahl von Tagen mit einem maximalen 8-h-Mittelwert > 120 µg/m ³ in % der Modelle LOTOS und MUSCAT von den Jahresmittelwerten RCG-LM (COSMO-EU) für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.	27
Abbildung 4-1 Berechnete und gemessene NO ₂ -Jahresmittelwerte in µg/m ³ . Oben links: RCG-TRAMPER. Oben rechts: RCG-COSMO-EU. Mitte links: OI mit RCG-TRAMPER als Hintergrund. Mitte rechts: OI mit RCG-COSMO-EU als Hintergrund. Unten links: OI mit LOTOS als Hintergrund. Unten rechts: OI mit MUSCAT als Hintergrund.	31
Abbildung 4-2 Berechnete und gemessene PM10-Jahresmittelwerte in µg/m ³ . Oben links: RCG-TRAMPER. Oben rechts: RCG-COSMO-EU. Mitte links: OI mit RCG-TRAMPER als Hintergrund. Mitte rechts: OI mit RCG-COSMO-EU als Hintergrund. Unten links: OI mit LOTOS als Hintergrund. Unten rechts: OI mit MUSCAT als Hintergrund.	32
Abbildung 4-3 NO ₂ -Jahresmittelwerte 2005 in µg/m ³ abgeleitet mit der OI-Methodik. Oben links: Hintergrund RCG-TRAMPER. Oben rechts: Hintergrund RCG-COSMO-EU. Unten links: Hintergrund LOTOS. Unten rechts: Hintergrund MUSCAT.	33

Abbildung 4-4 Mittlere Abweichung der PM ₁₀ -, und NO ₂ -Jahresmittelwerte in % der Modelle RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU (RCG-LM), LOTOS und MUSCAT von den jeweiligen OI-Referenzen für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.	36
Abbildung 4-5 Mittlere Abweichung der O ₃ -Jahresmittelwerte, der AOT ₄₀ -Werte zum Schutz der Vegetation und der Anzahl von Tagen mit einem maximalen 8-h-Mittelwert > 120 µg/m ³ in % der Modelle RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU (RCG-LM), LOTOS und MUSCAT von den jeweiligen OI-Referenzen für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.	37
Abbildung 4-6 Berechnete und beobachtete NO ₂ -Tagesmittelwerte an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	45
Abbildung 4-7 Berechnete und beobachtete PM ₁₀ -Tagesmittelwerte an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	46
Abbildung 4-8 Berechnete und beobachtete PM _{2.5} -Tagesmittelwerte an 2 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	47
Abbildung 4-9 Berechnete und beobachtete SO ₄ -Tagesmittelwerte an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	48
Abbildung 4-10 Berechnete und beobachtete NO ₃ -Tagesmittelwerte an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	49
Abbildung 4-11 Berechnete und beobachtete NH ₄ -Tagesmittelwerte an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	50
Abbildung 4-12 Berechnete und beobachtete maximale 8-h-Mittelwerte O ₃ an 5 Hintergrundstationen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	51
Abbildung 4-13 Berechnete und beobachtete NO ₂ -Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	52
Abbildung 4-14 Berechnete und beobachtete PM ₁₀ -Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	53
Abbildung 4-15 Berechnete und beobachtete PM _{2.5} -Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	54
Abbildung 4-16 Berechnete und beobachtete SO ₄ -Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	55
Abbildung 4-17 Berechnete und beobachtete NO ₃ -Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	56
Abbildung 4-18 Berechnete und beobachtete NO ₃ -Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	57
Abbildung 4-19 Berechnete und beobachtete EC-Tagesmittelwerte an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	58
Abbildung 4-20 Berechnete und beobachtete OM-Tagesmittelwerte an der Station Melpitz (OM= primäres organisches Material+sekundäre organische Aerosole). Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, MUSCAT. LOTOS lieferte keine Information für diese Größe.	59
Abbildung 4-21 Berechnete und beobachtete maximal 8-h-Mittelwerte für O ₃ an der Station Melpitz. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	60
Abbildung 4-22 Berechnete und beobachtete SO ₄ -, NO ₃ - und NH ₄ -Jahresmittelwerte an 6 Hintergrundstationen.	61
Abbildung 4-23 Berechnete und beobachtete NO ₂ -Tagesmittelwerte an der Station Duisburg-Bruckhausen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	62
Abbildung 4-24 Berechnete und beobachtete PM ₁₀ -Tagesmittelwerte an der Station Duisburg-Bruckhausen. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	63
Abbildung 4-25 Berechnete und beobachtete NO ₂ -Tagesmittelwerte an der Station Bottrop. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	64
Abbildung 4-26 Berechnete und beobachtete PM ₁₀ -Tagesmittelwerte an der Station Bottrop. Von oben nach unten: RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS, MUSCAT.	65
Abbildung 4-27 Berechnete und beobachtete NO ₂ - und PM ₁₀ -Jahresmittelwerte an 5 Hintergrundstationen und 2 industriell belasteten Stationen für RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS und MUSCAT. Alle Berechnungen ohne den Beitrag des aufgewirbelten Bodenstaubs. Unten: Beitrag des aufgewirbelten Bodenstaubs, nur RCG-TRAMPER.	66

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Bandbreiten der berechneten Jahresmittelwerte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) von NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} - $\text{PM}_{2.5}$) und Ozon sowie des $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ -Verhältnisses. Min: kleinster Wert in Deutschland; Mean: Mittelwert in Deutschland; Max: Maximaler Wert in Deutschland. Gerundet auf volle $\mu\text{g}/\text{m}^3$	13
Tabelle 4-1 Statistische Auswertung der Tagesmittelwerte für NO_2 und PM_{10} . RCG-T: RCG-TRAMPER, RCG-LM: RCG-COSMO-EU sowie LOTOS und MUSCAT. Mittlere Auswertung über die 5 Hintergrundstationen Melpitz, Waldhof, Zingst, Westerland und Neuglobsow. Alle Tagesmittelwerte 2005.	42
Tabelle 4-2 Statistische Auswertung der Tagesmittelwerte für $\text{PM}_{2.5}$. RCG-T: RCG-TRAMPER, RCG-LM: RCG-COSMO-EU sowie LOTOS und MUSCAT. Mittlere Auswertung über 2 Hintergrundstationen Melpitz und Waldhof. Alle Tagesmittelwerte 2005.	43
Tabelle 4-3 Statistische Auswertung der maximalen 8-h-Mittelwerte für O_3 . RCG-T: RCG-TRAMPER, RCG-LM: RCG-COSMO-EU sowie LOTOS und MUSCAT. Mittlere Auswertung über 5 Hintergrundstationen Melpitz, Waldhof, Neuglobsow, Westerland, Zingst. Alle Mittelwerte 2005.	43
Tabelle 4-4 Statistische Auswertung der Tagesmittelwerte für SO_4 , NO_3 , NH_4 . RCG-T: RCG-TRAMPER, RCG-LM: RCG-COSMO-EU sowie LOTOS und MUSCAT. Mittlere Auswertung über die 6 Hintergrundstationen Melpitz, Waldhof, Zingst, Westerland, Neuglobsow, Deuselbach. Alle Tagesmittelwerte 2005.	44

9 Anhang: Städtische Hintergrundstationen zur Bestimmung des „Average Exposure Indicator“, AEI

DEBB021	Potsdam-Zentrum
DEBB064	Cottbus
DEBE010	Berlin-Wedding-Amrumer Strasse
DEBE034	Berlin-Neukoelln-Nansenstrasse
DEBE068	Berlin-Brückenstraße
DEBW013	Stuttgart Bad Cannstatt
DEBW081	Karlsruhe-Nordwest
DEBY039	Muenchen/Lothstrasse
DEBY058	Nuernberg/Muggenhof
DEBY099	Augsburg/LfU
DEHB002	Bremen-Ost
DEHE008	Frankfurt-Ost
DEHE013	Kassel-Mitte
DEHE022	Wiesbaden-Sued
DEHH008	Hamburg Sternschanze
DEHH059	Hamburg Wilhelmsburg
DEMV019	Güstrow
DEMV021	Rostock-Warnemünde
DENI038	Osnabrueck
DENI054	Hannover/Linden
DENW008	Dortmund2
DENW024	Essen-Vogelheim
DENW038	Mülheim-Styrum
DENW053	Köln-Chorweiler
DENW067	Bielefeld
DENW071	Düsseldorf-Loerick
DENW094	Aachen-Burtscheid
DENW095	Muenster-Geist
DENW114	Wuppertal-Langerfeld
DERP009	Mainz-Zitadelle
DESH023	Lübeck-St. Jürgen
DESL012	Saarbruecken-City
DESN085	Dresden-HerzoginGarten
DEST050	Halle/Nord
DEST077	Magdeburg/West
DETH020	Erfurt Kraempferstr.