

TEXTE

66/2013

Analyse der Unsicherheiten / Bandbreiten in der im PAREST-Projekt verwendeten Kausalkette Emission-Transmission-Immission

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 206 43 200/01
UBA-FB 001524/ANH,29

Analyse der Unsicherheiten / Bandbreiten in der im PAREST-Projekt verwendeten Kausalkette Emission- Transmission-Immission

**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/4541.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:	Oktober 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 AUSWERTESYSTEMATIK	2
3	BANDBREITEN RESULTIEREND AUS DEN UNSICHERHEITEN IN DER PAREST-EMISSIONSDATENBASIS	7
3.1	UNSICHERHEITSBEREICHE DER EMISSIONSDATEN	7
3.2	BANDBREITEN DER IMMISSION	12
4	UNSICHERHEIT IN DER BERECHNUNG DER VERKEHRSEMISSIONEN	25
5	BANDBREITEN RESULTIEREND AUS DER ANWENDUNG UNTERSCHIEDLICHER MODELLE	29
5.1	ÜBERBLICK.....	29
5.2	BANDBREITE DER JAHRESMITTELWERTE 2005	29
5.3	BANDBREITE DER MINDERUNGSPOTENZIALE 2005 BIS 2020	33
5.4	BANDBREITE DER MINDERUNGSPOTENZIALE DES SZENARIOS MFR2020.....	47
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	52
7	LITERATUR	56
8	ANHANG E: ABBILDUNGSVERZEICHNIS	58
9	ANHANG F: TABELLENVERZEICHNIS	60
10	ANHANG: STÄDTISCHE HINTERGRUNDSTATIONEN ZUR BESTIMMUNG DES „AVERAGE EXPOSURE INDICATOR“, AEI.....	61

1 Einleitung

Das Hauptziel des F&E-Vorhabens „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“ (PAREST, siehe www.parest.de) war 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 wurden mit Ausbreitungsrechnungen auf der Basis von Chemie-Aerosol-Transportmodellen bestimmt. Als Ausbreitungsmodell wurde hauptsächlich das im Institut für Meteorologie der Freien Universität mit Unterstützung des Umweltbundesamts entwickelte REM-CALGRID-Modell (RCG-Modell, Stern, 2003; 2004a; 2004b) verwendet.

In diesem Bericht werden die im PAREST-Projekt zur Abschätzung der Unsicherheit bzw. Bandbreiten in der Kausalkette Emission-Transmission-Immission durchgeführten Untersuchungen vorgestellt. Die Untersuchungen beschreiben hauptsächlich die durch die Unsicherheiten in den Emissionsdatenbasen sowie die durch die Anwendung verschiedener Modelle bedingte Bandbreite der Immissionsergebnisse.

Die Unsicherheiten in der Emissionsdatenbasis wurden von Jörß und Handke (2010) analysiert. Die durch die Unsicherheiten der Emissionen verursachte Bandbreite der Immissionen wurde durch Anwendungen des RCG-Modells bestimmt. In diesem Bericht wird zusätzlich noch die Ergebnisbandbreite diskutiert, die sich durch Austausch der Berechnungsmethode für die Verkehrsemissionen ergibt.

Zur Abschätzung der Ergebnisunsicherheit, verursacht durch die Auswahl eines bestimmten Modells, nämlich des RCG-Modells, wurden in PAREST auch andere Modelle eingesetzt. Neben dem RCG-Modell, das standardmäßig mit dem auf Beobachtungen basierenden meteorologischen Treiber TRAMPER betrieben wird (siehe Kerschbaumer, 2010), kamen im PAREST-Projekt auch noch folgende andere Modelle bzw. alternative Modellkombinationen zur Anwendung. Insgesamt wurden eingesetzt:

- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem diagnostischen TRAMPER-System: RCG-TRAMPER, Standardmodellkonfiguration in PAREST,
- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Wettermodell COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes: RCG-COSMO-EU,
- LOTOS-EUROS, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Wettermodell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage, EZMW,
- MUSCAT, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Modell COSMO des Deutschen Wetterdienstes.

Die Anwendung mehrerer Modelle diente der Ermittlung einer Ergebnisbandbreite und zur Ergebnisabsicherung. Mit den verschiedenen Modellen bzw. Modellkombinationen wurden dazu die Emissionsreferenzen 2005 und 2020 (Jörß et al., 2010) und das MFR-Szenario 2020 („Maximum feasible reduction“, siehe Theloke et al., 2010) berechnet.

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

2 Rechenraster und Auswertesystematik

Die für die Bandbreitenabschätzung benutzten 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., 2009, 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.

Die vergleichende Auswertung der Modellergebnisse erfolgt nur für die hoch-aufgelösten Rechnungen im Raster Deutschland Nest 2. Die Auswertung fokussiert zum Einen auf den flächenmäßigen Vergleich der Jahresmittelwerte von NO_2 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/ km^2
- Klasse 2: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte $> 100, < 510$ Einwohner/ km^2
- Klasse 3: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte $> 510, < 945$ Einwohner/ km^2
- Klasse 4: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte > 945 Einwohner/ km^2
- 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 PM2.5 (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 .

Alle Bewertungszahlen (=Konzentrationsänderung oder Immissionsdelta) werden bevölkerungsgewichtet ermittelt. Die Bevölkerungsgewichtung berücksichtigt die Streuung der Immissionsdeltas innerhalb einer Klasse. Ein Immissionsdelta in einem Gebiet mit höherer Bevölkerungsdichte bekommt ein größeres Gewicht als ein Delta in einem Gebiet mit niedriger Bevölkerungsdichte:

$$\Delta C_j = \sum \{(P_i/P) * \Delta C_i\}, i=1, N \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

mit

ΔC_j mittlere, bevölkerungsgewichtete Konzentrationsänderung für die Klasse j

N Anzahl der Gitterzellen in der Klasse j

ΔC_i Konzentrationsänderung in der Zelle i der Klasse j

P_i Bevölkerungsanzahl in Zelle i der Klasse j

P $\sum P_i$, d.h. die Bevölkerungsanzahl summiert über die Gitterzellen 1 bis N der Klasse j

Die Gewichtung mit der zellenspezifischen Bevölkerungsdichte berücksichtigt den Umstand, dass in dicht besiedelten Arealen sehr viel mehr Personen von einem lokalen Minderungspotenzial profitieren als in dünn besiedelten Gebieten. Ein bevölkerungsgewichtetes Minderungspotenzial kann damit unter Umständen in dicht besiedelten Gebieten höher sein als in dünn besiedelten Gebieten, selbst wenn die ungewichtete Minderung niedriger ist.

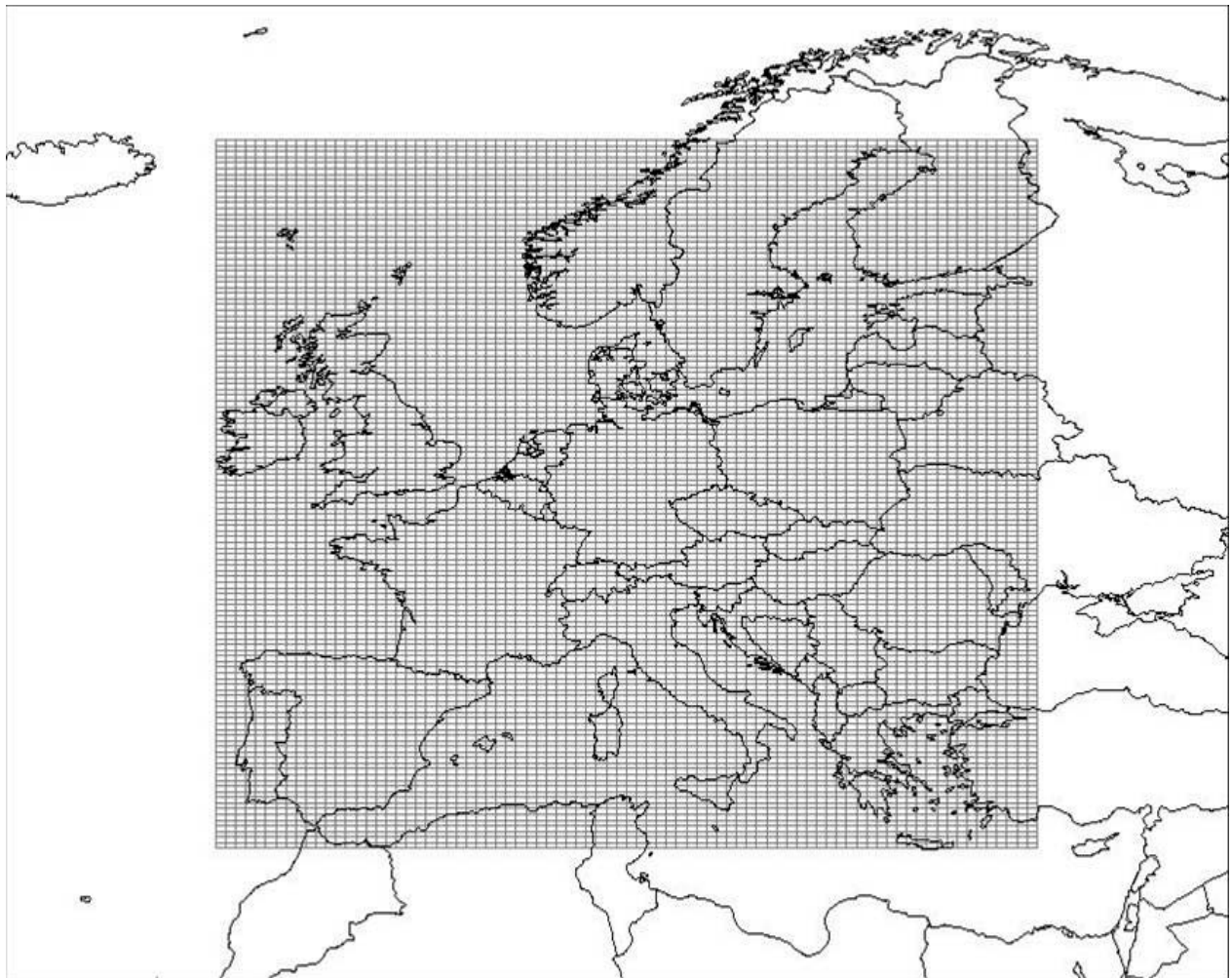


Abbildung 2-1 RCG-Rechengebiet Nest 0 (N0): Europäischer Hintergrund, Auflösung circa 32x28 km², 0.25° Breite, 0.5° Länge, 82 x 125 Gitterzellen, Rechengebiet: -10°W bis 30° Ost, 35.25° N bis 66.0° N

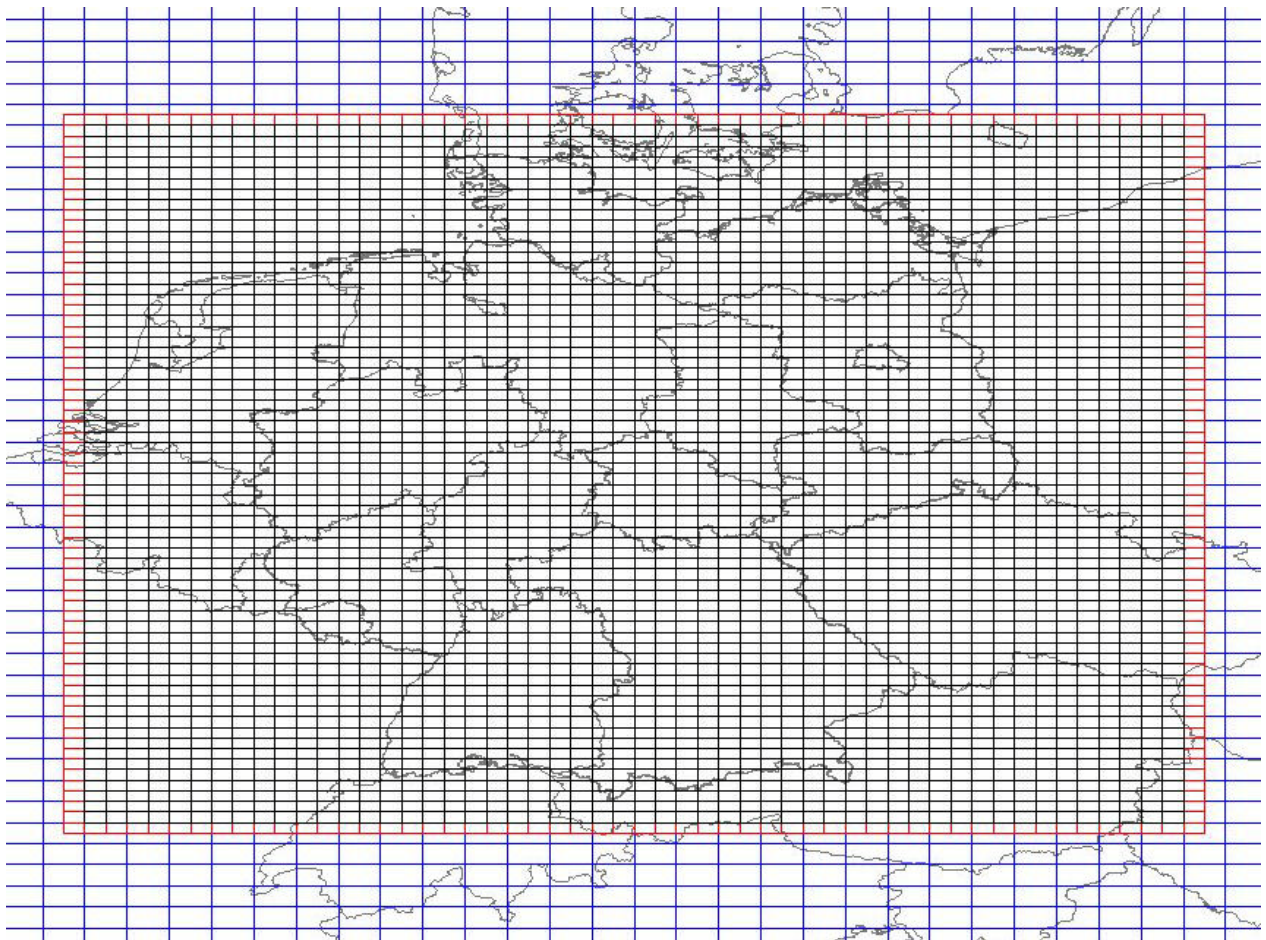


Abbildung 2-2 Nest 1 (N1): Deutschland, Auflösung circa 16 km x 14 km, 0.125° Breite, 0.25° Länge, (N0/2), 54 x 68 Gitterzellen incl. Randreihen (rot), Rechengebiet: 4.0° O bis 17.0° O , 47° N bis 55.25° N

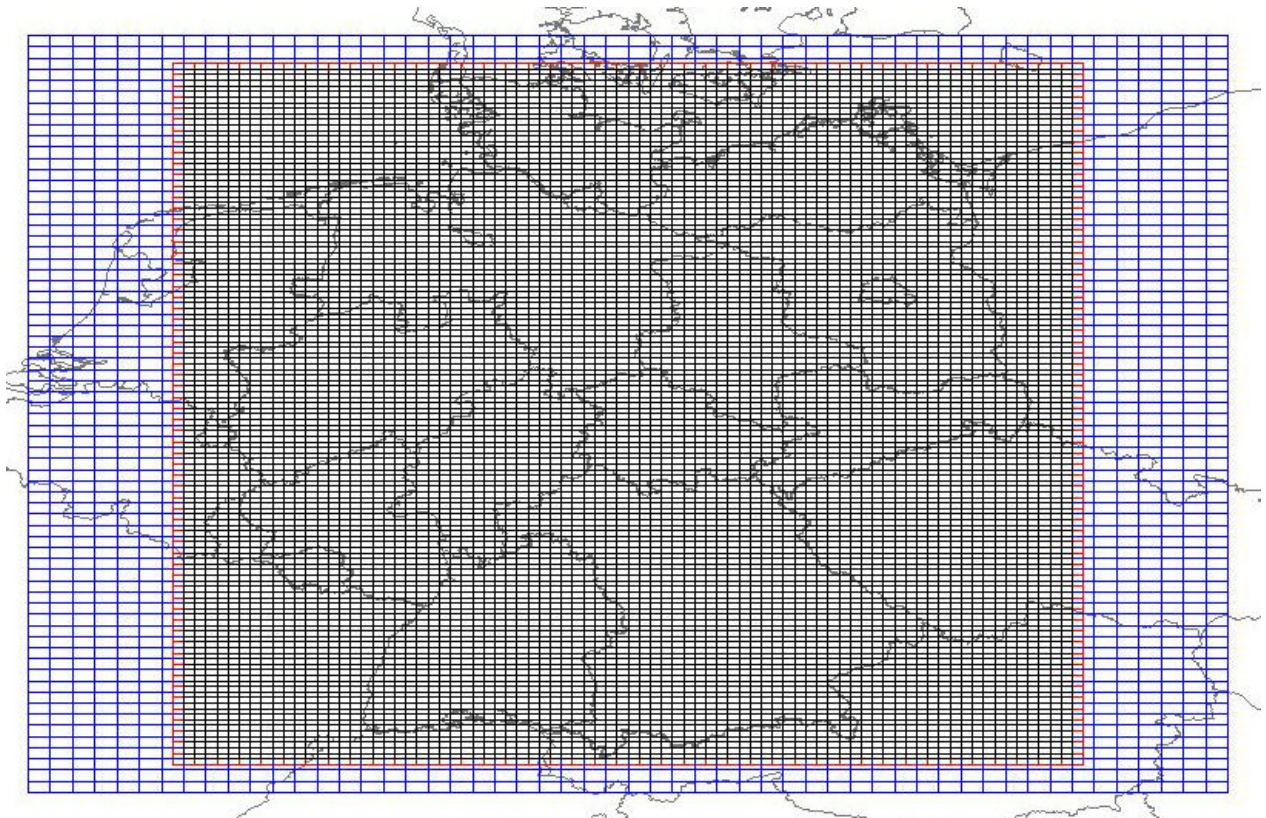
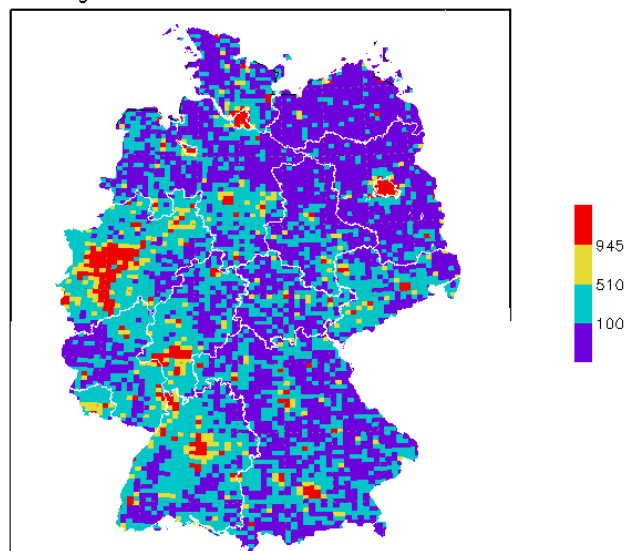


Abbildung 2-3 Nest 2 (N2) Deutschland, Auflösung circa 8 km x 7 km, 0.0625° Breite, 0.125° Länge (N0/4, N1/2), 82 x 126 Gitterzellen incl. Randreihen, Rechengebiet: 5.5° O bis 15.5° O, 47.25° N bis 55.0° N

Bevoelkerungsdichte in 4 Klassen im Raster Nest 2



GrADS: COLA/IGES

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 Bandbreiten resultierend aus den Unsicherheiten in der PAREST-Emissionsdatenbasis

3.1 Unsicherheitsbereiche der Emissionsdaten

Die Unsicherheiten in der PAREST-Emissionsdatenbasis wurden von Jörß und Handke (2010) auf der Basis einer Monte-Carlo-Simulation pro Schadstoff und Verursacherguppe für die deutschen Emissionen ermittelt. Die Ergebnisse dieser Unsicherheitsberechnungen waren dann die Grundlage zur Generation je eines Emissionsdatensatzes für die obere und die untere Schranke des 95%-Konfidenzintervalls der Emissionen. Neben den Datensätzen für das Basisjahr 2005 wurden auch je zwei entsprechende Datensätze für die Prognosejahre 2010, 2015 und 2020 entwickelt. Dazu wurden die für 2005 gefundenen prozentualen Abweichungen der oberen und unteren Emissionsschranke vom Mittelwert auf die Prognosejahre übertragen. Die Unsicherheiten in den Prognosedatensätzen spiegeln damit also nicht die Unsicherheit der Prognose wider, sondern lediglich wie für das Referenzjahr 2005 die Unsicherheiten des retrospektiven Emissionsinventars und die Unsicherheiten in der Emissionsberichtserstattung.

Die nationalen Abschätzungen der oberen und unteren Emissionsschranken wurden entsprechend der Vorgehensweise für die Referenzemissionen räumlich in Deutschland verteilt (Thiruchittampalam et al., 2010). Diese Datensätze bildeten dann die Grundlage für die hier beschriebenen Immissionsberechnungen. Es sei angemerkt, dass die in den Ausbreitungsrechnungen verwendeten Datensätze für die obere und untere Emissionsschranke lediglich die Unsicherheit der deutschen Emissionen reflektieren. Die Emissionen außerhalb von Deutschland bleiben für jede betrachtete Referenz unverändert.

Die Tabelle 3-1 zeigt die aus der Analyse von Jörß und Handke (2010) resultierenden relativen Abweichungen der Emissionen vom Mittelwert des Referenzjahrs 2005. Die Mittelwertemissionen sind die in PAREST zur Maßnahmenbewertung verwendeten Referenzemissionen (Stern, 2010a, 2010b). Die größten Abweichungen nach oben gibt es in der Summe über alle Emissionen für die NO_x - und PM-Emissionen. Nach unten treten die größten Abweichungen bei den NH_3 - und den PM-Emissionen auf. Insgesamt die geringsten Abweichungen werden für die SO_2 -Emissionen ermittelt. Die Unsicherheitsbereiche für die Emissionsreferenzen 2010, 2015 und 2020 (Tabelle 3-2, Tabelle 3-3, Tabelle 3-4) sind denen für die Referenz 2005 ähnlich, was aber auf Grund der Erstellungsweise (siehe oben) zu erwarten ist.

Referenz 2005 (O-M)/M %	NOX	NMVOC	SO2	NH3	PM25	PM10
Energy transformation	16.2	15.0	6.1	16.7	8.9	10.1
Small combustion sources	15.4	13.9	11.1	18.5	8.6	9.5
Industrial combustion	35.9	32.4	14.6	37.7	24.1	20.2
Industrial process emissions	20.9	19.3	13.5	43.7	37.1	44.2
Extraction of fossil fuels		16.8	7.3		31.2	27.5
Solvent and product use		4.7		18.7	33.1	39.6
Road transport gasoline	22.9	22.9	11.8	115.0		
Road transport diesel	8.8	9.3	12.6	13.3	15.3	18.4
Road transport lpg						
Brake and tyrewear					10.4	10.1
Volatilisation losses		26.1				
Traffic resuspension					44.0	15.1
Non road transport	17.1	13.7	12.8	21.9	12.6	15.0
Waste handling and disposal	184.5		96.7		7.8	8.7
Agriculture	169.6	21.2		11.1	33.6	30.6
SUM OVER ALL SECTORS	23.3	11.5	9.4	13.5	18.9	22.9

Referenz 2005 (U-M)/M %	NOX	NMVOC	SO2	NH3	PM25	PM10
Energy transformation	-7.4	-14.6	-6.4	-18.7	-12.1	-11.3
Small combustion sources	-10.6	-24.2	-12.1	-22.9	-10.6	-9.7
Industrial combustion	-14.5	-18.7	-10.8	-26.6	-15.4	-12.5
Industrial process emissions	-10.6	-13.8	-11.2	-24.3	-17.5	-17.9
Extraction of fossil fuels		-19.7	-8.9		-18.5	-17.0
Solvent and product use		-4.5		-18.9	-19.0	-19.8
Road transport gasoline	-14.9	-18.0	-11.2	-33.9		
Road transport diesel	-6.5	-9.6	-12.1	-12.6	-13.2	-13.8
Road transport lpg						
Brake and tyrewear					-13.0	-12.6
Volatilisation losses		-17.2				
Traffic resuspension					-21.6	-18.9
Non road transport	-12.0	-13.7	-10.9	-19.3	-15.2	-15.9
Waste handling and disposal	-23.7		-20.1		-10.9	-10.0
Agriculture	-23.4	-16.6		-12.2	-18.9	-17.8
SUM OVER ALL SECTORS	-9.9	-10.4	-8.8	-12.9	-14.5	-15.6

Tabelle 3-1 Unsicherheitsbereiche der Emissionsreferenz 2005 (Mittelwert) in %. Oben: obere Schranke, unten: untere Schranke.

Referenz 2010 (O-M)/M %	NOX	NMVOC	SO2	NH3	PM25	PM10
Energy transformation	16.4	15.1	6.6	16.8	9.1	10.3
Small combustion sources	14.9	13.9	11.4	17.3	8.0	8.8
Industrial combustion	34.7	32.9	15.9	38.0	23.7	19.8
Industrial process emissions	21.5	19.4	13.2	43.5	39.4	46.5
Extraction of fossil fuels		16.8	7.3		31.2	27.5
Solvent and product use		5.1		18.7	33.1	39.6
Road transport gasoline	22.8	22.9	11.6	114.8		
Road transport diesel	9.2	9.2	12.5	13.1	14.8	17.8
Road transport lpg						
Brake and tyrewear					10.4	10.1
Volatilisation losses		24.2				
Traffic resuspension					44.0	15.1
Non road transport	15.8	13.3	16.2	20.8	12.3	14.8
Waste handling and disposal	184.4		94.7		9.0	9.5
Agriculture	169.2	21.2		11.3	33.8	30.5
SUM OVER ALL SECTORS	25.6	11.5	9.9	13.4	19.2	22.8

Referenz 2010 (U-M)/M %	NOX	NMVOC	SO2	NH3	PM25	PM10
Energy transformation	-7.3	-14.6	-6.9	-18.6	-12.3	-11.5
Small combustion sources	-10.3	-24.2	-12.0	-22.8	-10.1	-9.1
Industrial combustion	-14.3	-18.7	-10.9	-26.6	-15.4	-12.5
Industrial process emissions	-10.1	-13.7	-11.2	-24.2	-18.0	-18.4
Extraction of fossil fuels		-19.7	-8.9		-18.5	-17.0
Solvent and product use		-4.8		-18.9	-19.0	-19.8
Road transport gasoline	-14.9	-18.0	-11.2	-33.9		
Road transport diesel	-6.8	-9.4	-12.1	-12.6	-13.0	-13.5
Road transport lpg						
Brake and tyrewear					-13.0	-12.6
Volatilisation losses		-16.8				
Traffic resuspension					-21.6	-18.9
Non road transport	-11.4	-13.5	-11.2	-18.6	-15.0	-15.7
Waste handling and disposal	-23.7		-19.8		-10.4	-9.5
Agriculture	-23.4	-16.6		-12.5	-19.0	-17.8
SUM OVER ALL SECTORS	-10.0	-10.5	-9.0	-13.1	-14.5	-15.7

Tabelle 3-2 Unsicherheitsbereiche der Emissionsreferenz 2010 (Mittelwert) in %. Oben: obere Schranke, unten: untere Schranke.

Referenz 2015 (O-M)/M %	NOX	NM VOC	SO ₂	NH ₃	PM _{2.5}	PM ₁₀
Energy transformation	15.8	14.9	6.6	16.8	9.3	10.5
Small combustion sources	15.2	13.9	11.5	17.5	7.8	8.5
Industrial combustion	34.1	32.7	15.6	38.2	23.7	20.0
Industrial process emissions	22.0	19.1	13.7	43.5	40.3	47.3
Extraction of fossil fuels		16.7	7.3		31.2	27.5
Solvent and product use		5.1		18.7	33.1	39.6
Road transport gasoline	22.8	22.9	11.6	114.7		
Road transport diesel	10.1	9.3	12.5	13.1	14.3	17.2
Road transport lpg						
Brake and tyrewear					10.4	10.1
Volatilisation losses		22.9				
Traffic resuspension					44.0	15.1
Non road transport	15.2	13.5	16.2	20.2	12.3	14.7
Waste handling and disposal	184.6		95.6		8.6	9.1
Agriculture	169.3	21.2		11.5	34.0	30.4
SUM OVER ALL SECTORS	28.7	11.0	9.8	13.3	19.5	23.0

Referenz 2015 (U-M)/M %	NOX	NM VOC	SO ₂	NH ₃	PM _{2.5}	PM ₁₀
Energy transformation	-7.1	-14.6	-6.8	-18.5	-12.6	-11.8
Small combustion sources	-10.4	-24.2	-12.0	-22.8	-10.0	-8.9
Industrial combustion	-14.2	-18.7	-10.8	-26.6	-15.4	-12.6
Industrial process emissions	-10.3	-13.6	-11.5	-24.2	-18.1	-18.5
Extraction of fossil fuels		-19.7	-8.9		-18.5	-17.0
Solvent and product use		-4.8		-18.9	-19.0	-19.8
Road transport gasoline	-15.0	-18.0	-11.1	-33.8		
Road transport diesel	-7.3	-9.4	-12.1	-12.7	-12.7	-13.3
Road transport lpg						
Brake and tyrewear					-13.0	-12.6
Volatilisation losses		-16.7				
Traffic resuspension					-21.6	-18.9
Non road transport	-10.9	-13.4	-11.2	-18.0	-14.9	-15.5
Waste handling and disposal	-23.7		-19.8		-10.0	-10.2
Agriculture	-23.4	-16.6		-12.6	-19.0	-17.7
SUM OVER ALL SECTORS	-10.4	-10.1	-8.9	-13.2	-14.4	-15.7

Tabelle 3-3 Unsicherheitsbereiche der Emissionsreferenz 2015 (Mittelwert) in %. Oben: obere Schranke, unten: untere Schranke.

Referenz 2020 (O-M)/M %	NOX	NMVOC	SO2	NH3	PM25	PM10
Energy transformation	15.3	14.7	6.5	16.7	9.4	10.6
Small combustion sources	15.6	13.8	11.7	17.7	7.6	8.3
Industrial combustion	33.4	32.4	15.2	38.4	23.7	20.2
Industrial process emissions	22.6	18.9	14.2	43.5	41.1	48.1
Extraction of fossil fuels		16.7	7.3		31.2	27.5
Solvent and product use		5.1		18.7	33.1	39.6
Road transport gasoline	22.9	22.2	11.5	114.6		
Road transport diesel	10.3	9.2	12.5	13.1	13.5	16.2
Road transport lpg						
Brake and tyrewear					10.4	10.1
Volatilisation losses		21.3				
Traffic resuspension					44.0	15.1
Non road transport	14.5	13.3	16.3	19.5	12.2	14.5
Waste handling and disposal	184.6		95.3		8.3	8.9
Agriculture	169.3	21.2		11.6	34.2	30.3
SUM OVER ALL SECTORS	30.5	10.5	9.7	13.4	19.6	23.1

Referenz 2020 (U-M)/M %	NOX	NMVOC	SO2	NH3	PM25	PM10
Energy transformation	-6.9	-14.6	-6.8	-18.3	-12.8	-12.0
Small combustion sources	-10.5	-24.2	-12.0	-22.8	-9.9	-8.8
Industrial combustion	-14.2	-18.7	-10.8	-26.6	-15.5	-12.6
Industrial process emissions	-10.6	-13.6	-11.9	-24.2	-18.2	-18.7
Extraction of fossil fuels		-19.7	-8.9		-18.5	-17.0
Solvent and product use		-4.8		-18.9	-19.0	-19.8
Road transport gasoline	-15.1	-17.9	-11.1	-33.8		
Road transport diesel	-7.5	-9.4	-12.1	-12.7	-12.3	-12.8
Road transport lpg						
Brake and tyrewear					-13.0	-12.6
Volatilisation losses		-16.5				
Traffic resuspension					-21.6	-18.9
Non road transport	-10.2	-13.1	-11.2	-17.5	-14.5	-15.2
Waste handling and disposal	-23.7		-19.7		-9.7	-10.0
Agriculture	-23.4	-16.6		-12.8	-19.1	-17.7
SUM OVER ALL SECTORS	-10.4	-9.8	-8.8	-13.3	-14.3	-15.7

Tabelle 3-4 Unsicherheitsbereiche der Emissionsreferenz 2020 (Mittelwert) in %. Oben: obere Schranke, unten: untere Schranke.

3.2 Bandbreiten der Immission

Die immissionsseitigen Auswirkungen der Unsicherheiten in den Emissionsreferenzen wurden durch Anwendungen des RCG-Modells mit den unteren und oberen Emissionsschranken untersucht. Die Abbildung 3-1 zeigt die mit dem RCG-Modell für die obere und untere Emissionsschranke berechneten NO_2 -Jahresmittelwerte als Abweichung von den Mittelwerten berechnet mit der mittleren Emissionsreferenz 2005. Lokal können auf Basis der oberen Emissionsschranke bis zu $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere NO_2 -Konzentrationen berechnet werden. Verwendet man die untere Emissionsschranke, dann können die NO_2 -Jahresmittelwerte im Vergleich zur Referenzsimulation bis zu $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niedriger liegen. Die entsprechende Auswertung für die PM_{10} -Jahresmittelwerte ergibt für die obere Emissionsschranke eine Erhöhung der Jahresmittelwerte um bis zu knapp $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für die untere Emissionsschranke eine Erniedrigung um bis zu $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Abbildung 3-2). Die räumliche Verteilung der Konzentrationsänderungen wird dabei hauptsächlich bestimmt durch die räumliche Verteilung der Emissionsänderung. Diese wiederum wird bestimmt durch die räumliche Verteilung der Emissionen der einzelnen Verursachergruppen und durch die verursachergruppenspezifischen Schwankungsbreiten der Emissionen. Die hohe positive Abweichung von knapp 12% wird beispielsweise verursacht durch die anscheinend große Unsicherheit der industriellen PM_{10} -Emissionen im Bereich Ludwigshafen-Mannheim (Grenzbereich der Länder Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz).

Eine mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für die in Kapitel 2 beschriebenen Bewertungsklassen zeigt Abbildung 3-3 für die NO_2 -Jahresmittelwerte. In ländlichen Regionen (Bevölkerungsklasse 1) beträgt die durch die Unsicherheitsbereiche der Emissionen verursachte Spannbreite der NO_2 -Jahresmittelwerte $4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die für den Referenzfall 2005 berechneten NO_2 -Jahresmittelwerte könnten im Extremfall also $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niedriger (untere Emissionsschwelle) oder $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höher (obere Emissionsschwelle) sein. In Ballungsräumen (Bevölkerungsklasse 4) beträgt die mittlere NO_2 -Spannbreite $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und reicht von $-1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis zu $+3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In Prozenten ausgedrückt könnten die für den Referenzfall berechneten NO_2 -Jahresmittelwerte in ländlichen Regionen auch maximal knapp 9% niedriger oder maximal 25% höher liegen (Abbildung 3-3 unten). In Ballungsräumen umfasst die durch die Emissionsunsicherheiten hervorgerufene relative Bandbreite der NO_2 -Immissionen den Bereich von knapp -7% bis zu knapp +13%. Die relative Spannbreite der Konzentrationen ist damit im Bereich der niedrigen absoluten Konzentrationen (ländliche Regionen) höher als in Bereichen höherer Konzentrationen (Ballungsgebiete).

Die entsprechende Auswertung für die PM_{10} -Jahresmittelwerte zeigt die Abbildung 3-4. Die durch die Emissionsunsicherheit bewirkte Bandbreite der PM_{10} -Jahresmittelwerte ist geringer als die der NO_2 -Jahresmittelwerte. In ländlichen Regionen (Bevölkerungsklasse 1) beträgt sie $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in den Ballungsräumen $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die für den Referenzfall 2005 berechneten PM_{10} -Jahresmittelwerte könnten also in ländlichen Regionen $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niedriger (untere Emissionsschwelle) oder auch $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höher (obere Emissionsschwelle) sein. In Ballungsräumen (Bevölkerungsklasse 4) umfasst die mittlere PM_{10} -Spannbreite den Bereich von $-1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis zu $+3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In Prozenten ausgedrückt bedeutet dies in ländlichen Regionen entweder circa 5% niedrigere oder auch circa 7% höhere PM_{10} -Jahresmittelwerte. In Ballungsräumen umfasst die durch die Emissionsunsicherheiten hervorgerufene relative Bandbreite der PM_{10} -Immissionen den Bereich von knapp -9% bis zu knapp +14%. Die im Vergleich zu den NO_2 -Jahresmittelwerten geringere Bandbreite der PM_{10} -Jahresmittelwerte bei etwa gleich hohen oder für PM_{10} sogar größeren Unsicherheiten der Emissionen (siehe Tabelle 3-1) hat seine Ursache in dem größeren Anteil des grenzüberschreitenden Ferntransports bei den PM_{10} -Konzentrationen. Dies zeigt sich auch darin, dass die Unsicherheitsbereiche für PM_{10} mit zunehmender Bevölkerungsdichte im Gegensatz zu NO_2 eindeutig zunehmen. In Regio-

nen mit höherer Bevölkerungszahl ist der Beitrag der direkt emittierten PM₁₀-Emissionen zu den Konzentrationen deutlich höher als in den dünn besiedelten Gebieten, wo die Konzentrationen eher von den sekundären Aerosolen und damit dem Ferntransport dominiert werden.

Auch für das Referenzjahr 2020, das das Bezugsjahr für die im PAREST-Projekt entwickelten weiterführenden Maßnahmen ist (Theloke et al., 2010; Stern 2010a, 2010b), wurden die Immissionen für die obere und untere Emissionsschranke (Tabelle 3-4) berechnet. Bei ähnlicher räumlicher Verteilung sind die Abweichungen der NO₂- und der PM₁₀-Konzentrationen vom Mittelwert des Referenzfalles 2020 geringer als die entsprechenden Abweichungen für den Referenzfall 2005 (vergleiche Abbildung 3-1 mit Abbildung 3-5, Abbildung 3-2 mit Abbildung 3-6, Abbildung 3-3 oben mit Abbildung 3-7 oben und Abbildung 3-4 oben mit Abbildung 3-8 oben). Dies hat seine Ursache in den niedrigeren Emissionen des Referenzjahres 2020. Die relativen NO₂-Abweichungen für das Referenzjahr 2020 sind vor allem in der Abweichung für die obere Emissionsschranke höher als diejenigen für das Referenzjahr 2005 (vergleiche Abbildung 3-3 unten mit Abbildung 3-7 unten), da die relativen Unsicherheitsbereiche für das Jahr 2020 auch höher sind als für das Jahr 2005 (vergleiche Tabelle 3-1 mit Tabelle 3-4). Bei den PM₁₀-Emissionen sind die relativen Unsicherheitsbereiche von 2020 nahezu identisch mit denen für 2005 (vergleiche Tabelle 3-1 mit Tabelle 3-4). Dementsprechend sind auch die relativen Bandbreiten der PM₁₀-Immissionen für das Referenzjahr 2020 nahezu identisch mit denjenigen für das Jahr 2005 (vergleiche Abbildung 3-4 unten mit Abbildung 3-8 unten).

Die Bewertung der im PAREST-Projekt betrachteten Maßnahmenbündel erfolgte über das mit diesen Maßnahmen erreichbare Minderungspotenzial (Stern, 2010a, 2010b). Die mittleren Referenzemissionen 2010, 2015 und 2020 beschreiben dazu die Emissionssituation, die sich nach der Umsetzung heute bereits beschlossener Maßnahmen in den betreffenden Jahren einstellen soll (CLE-Szenario „current legislation“). Das Minderungspotenzial von der Ausgangssituation 2005 bis zu den Jahren 2010, 2015 und 2020 wurde zur Abschätzung der Potenzialbandbreite daher auch mit den für diese Referenzjahre abgeleiteten unteren und oberen Emissionsschranken berechnet. Die Abbildung 3-9 zeigt dazu für die Bevölkerungsklasse 1 (ländliche Regionen) und die Bevölkerungsklasse 4 (Ballungsgebiete) die absoluten NO₂-Minderungspotenziale für den Emissionsmittelwert sowie die obere und untere Emissionsschranke. Danach hat das für die NO₂-Jahresmittelwerte berechnete Minderungspotenzial für die Emissionsabnahmen von 2005 bis 2020 gemäß dem CLE-Szenario in ländlichen Regionen eine Bandbreite von 5.5 µg/m³ (untere Emissionsschranke) bis 6.5 µg/m³ (obere Emissionsschranke), in Ballungsgebieten eine Bandbreite von 11.7 µg/m³ bis 13.1 µg/m³. Die entsprechende Bandbreite des PM₁₀-Minderungspotenzials reicht von 3.5 µg/m³ bis 4.3 µg/m³ in Ballungsgebieten und 2.8 µg/m³ bis 3.1 µg/m³ in ländlichen Gebieten (Abbildung 3-10).

Die relativen Bandbreiten des Minderungspotenzials 2005 bis 2020 zeigt die Abbildung 3-11 für alle Bewertungsklassen. Die Schwankungsbreite des mittleren NO₂-Minderungspotenzials, d.h. des Potenzials das auf den mittleren Emissionsabschätzungen beruht, reicht in ländlichen Regionen (BVK1) von circa -8% (untere Emissionsschranke) bis circa +10% (obere Emissionsschranke). Die entsprechende Schwankungsbreite des PM₁₀-Minderungspotenzials reicht von circa -5% bis +3%. In Ballungsräumen liegt die relative Schwankungsbreite des mittleren NO₂-Minderungspotenzials zwischen circa -5% und +6%, diejenige des mittleren PM₁₀-Minderungspotenzials zwischen -9% und +13%.

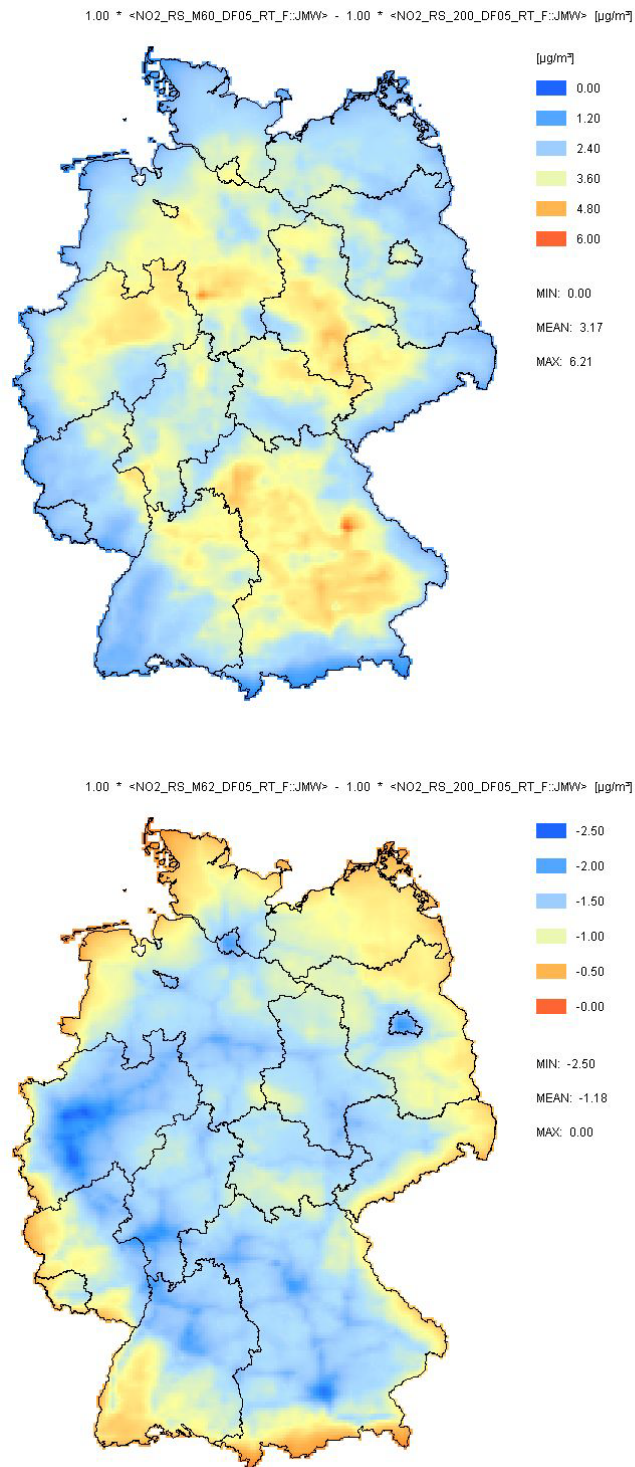


Abbildung 3-1 Abweichungen der NO_2 -Jahresmittelwerte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) von den Werten für den Referenzfall 2005 bei Anwendung der oberen (oben) und der unteren (unten) Emissionsschranke.

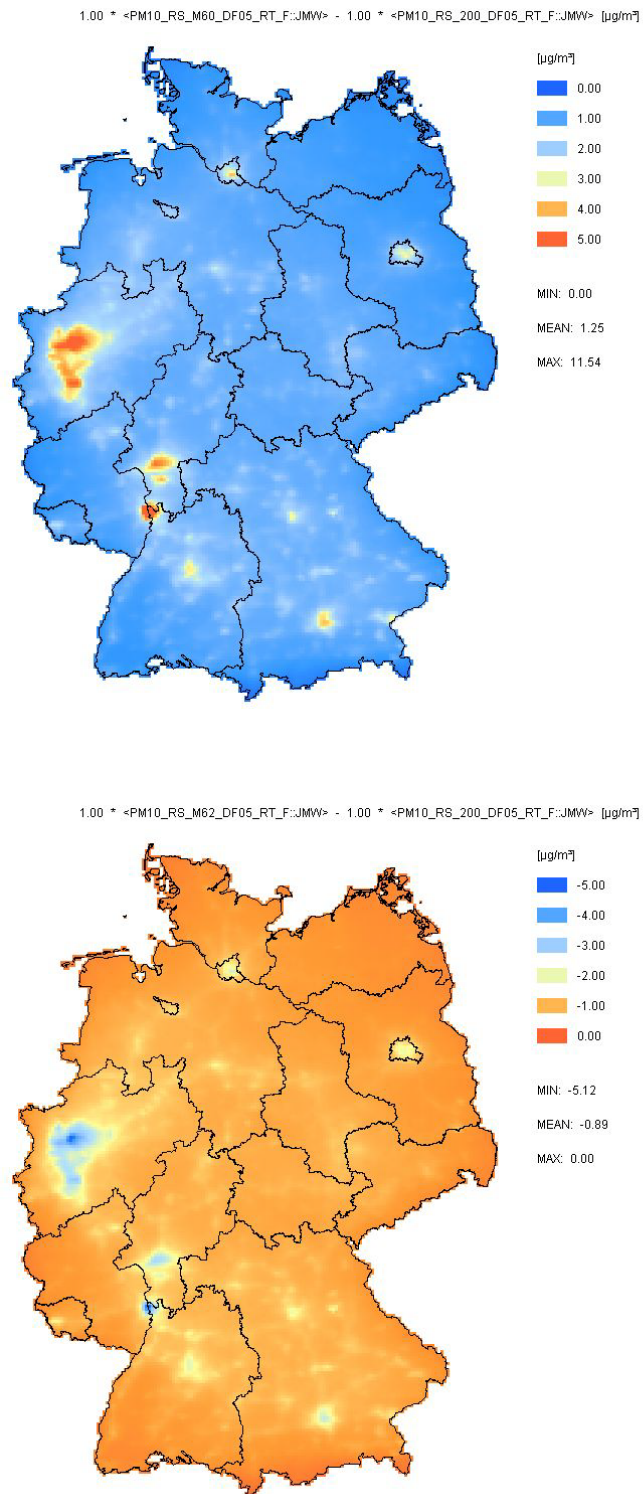


Abbildung 3-2 Abweichungen der PM10-Jahresmittelwerte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) von den Werten für den Referenzfall 2005 bei Anwendung der oberen (oben) und der unteren (unten) Emissionsschranke.

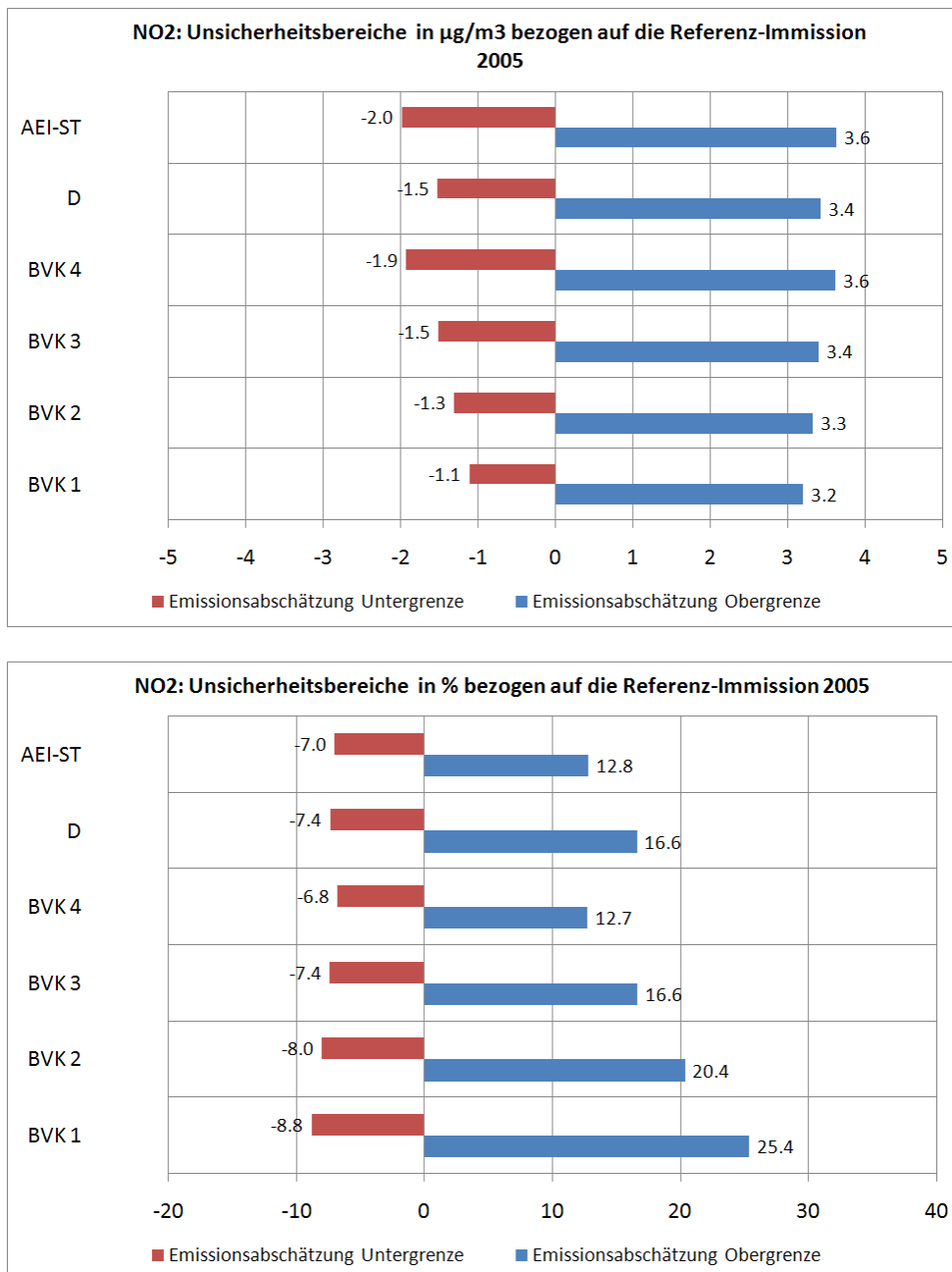


Abbildung 3-3 Absolute (oben) und relative (unten) Unsicherheitsbereiche der NO₂-Jahresmittelwerte abgeleitet aus den Ober- und Unterschranken der Emissionsreferenz 2005. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 2.



Abbildung 3-4 Absolute (oben) und relative (unten) Unsicherheitsbereiche der PM10-Jahresmittelwerte abgeleitet aus den Ober- und Unterschranken der Emissionsreferenz 2005. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 2.

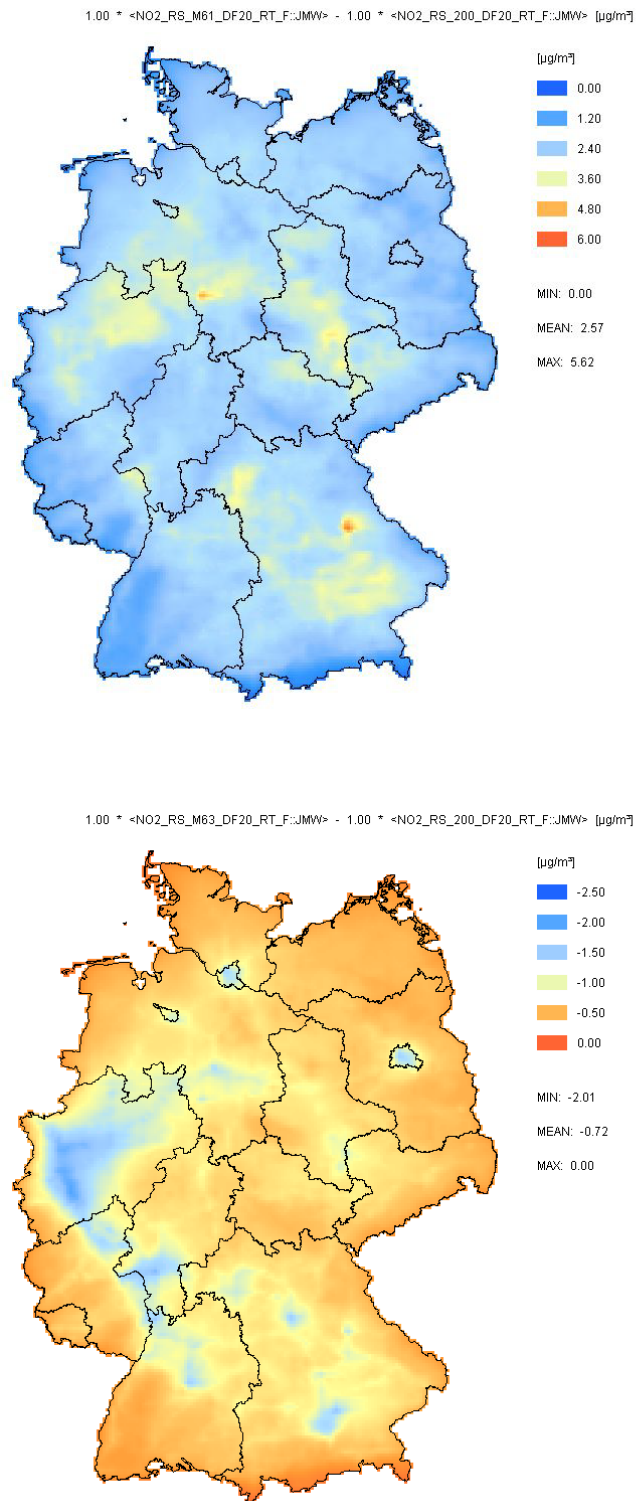


Abbildung 3-5 Abweichungen der NO_2 -Jahresmittelwerte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) von den Werten für den Referenzfall 2020 bei Anwendung der oberen (oben) und der unteren (unten) Emissionsschranke.

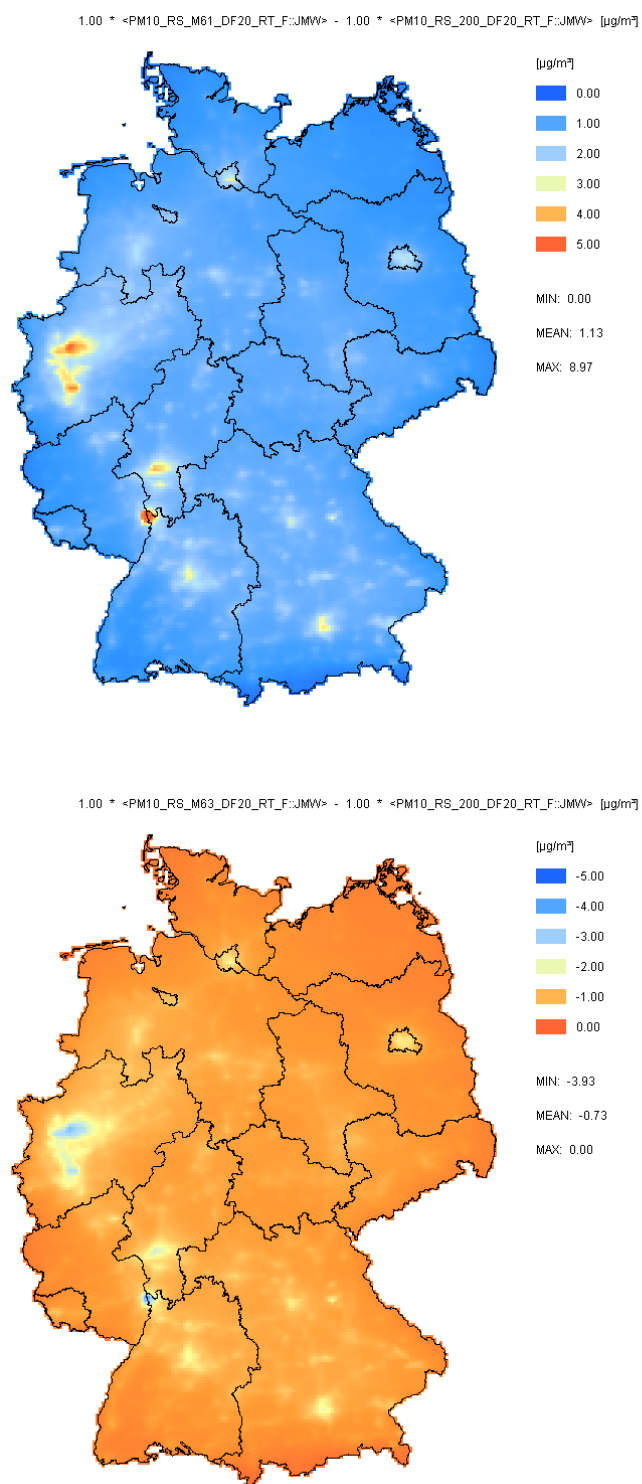


Abbildung 3-6 Abweichungen der PM10-Jahresmittelwerte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) von den werten für den Referenzfall 2020 bei Anwendung der oberen (oben) und der unteren (unten) Emissionsschranke.

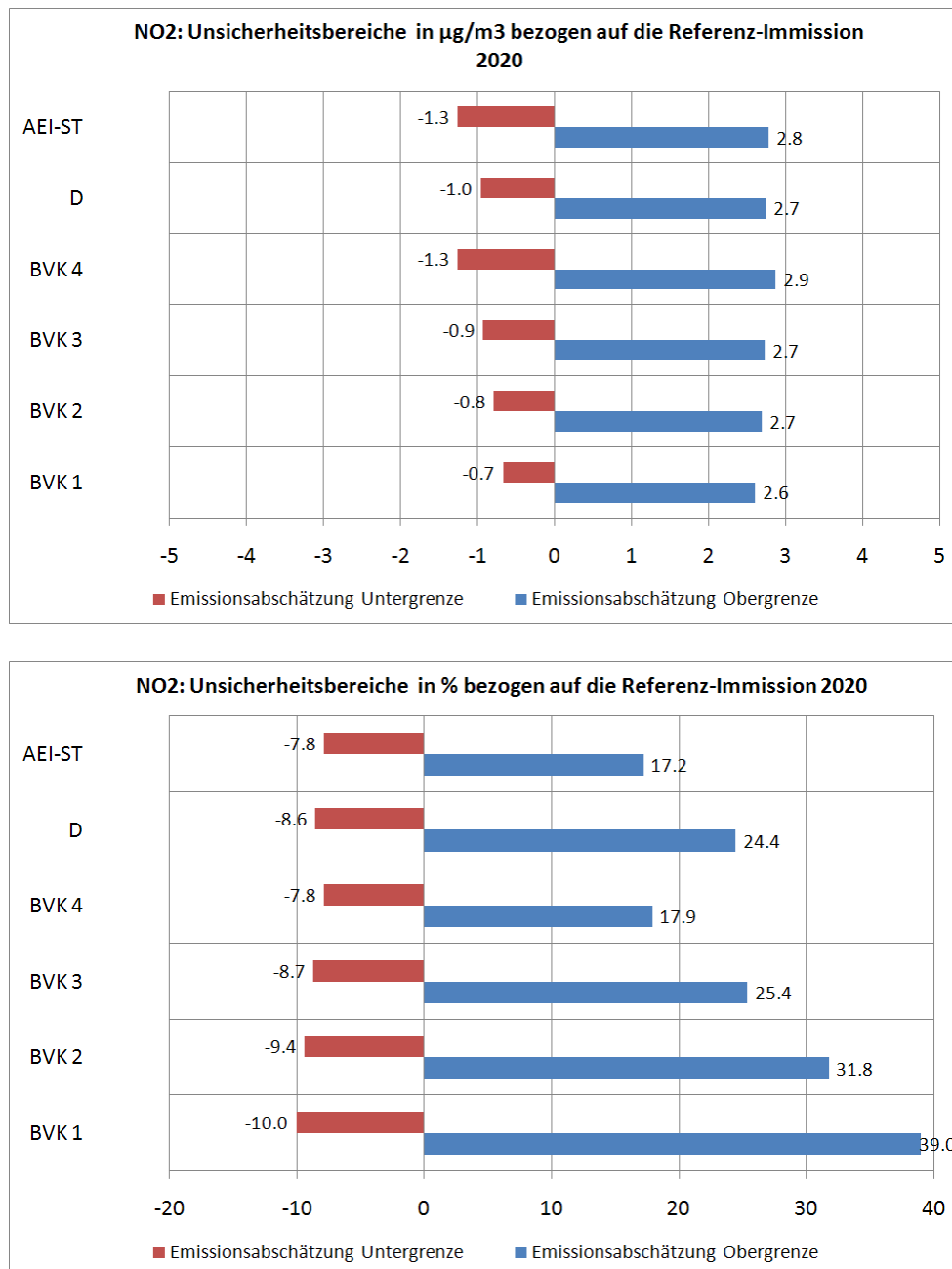


Abbildung 3-7 Absolute (oben) und relative (unten) Unsicherheitsbereiche der NO₂-Jahresmittelwerte abgeleitet aus den Ober- und Unterschranken der Emissionsreferenz 2020. Mittlere Auswertung für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 2.

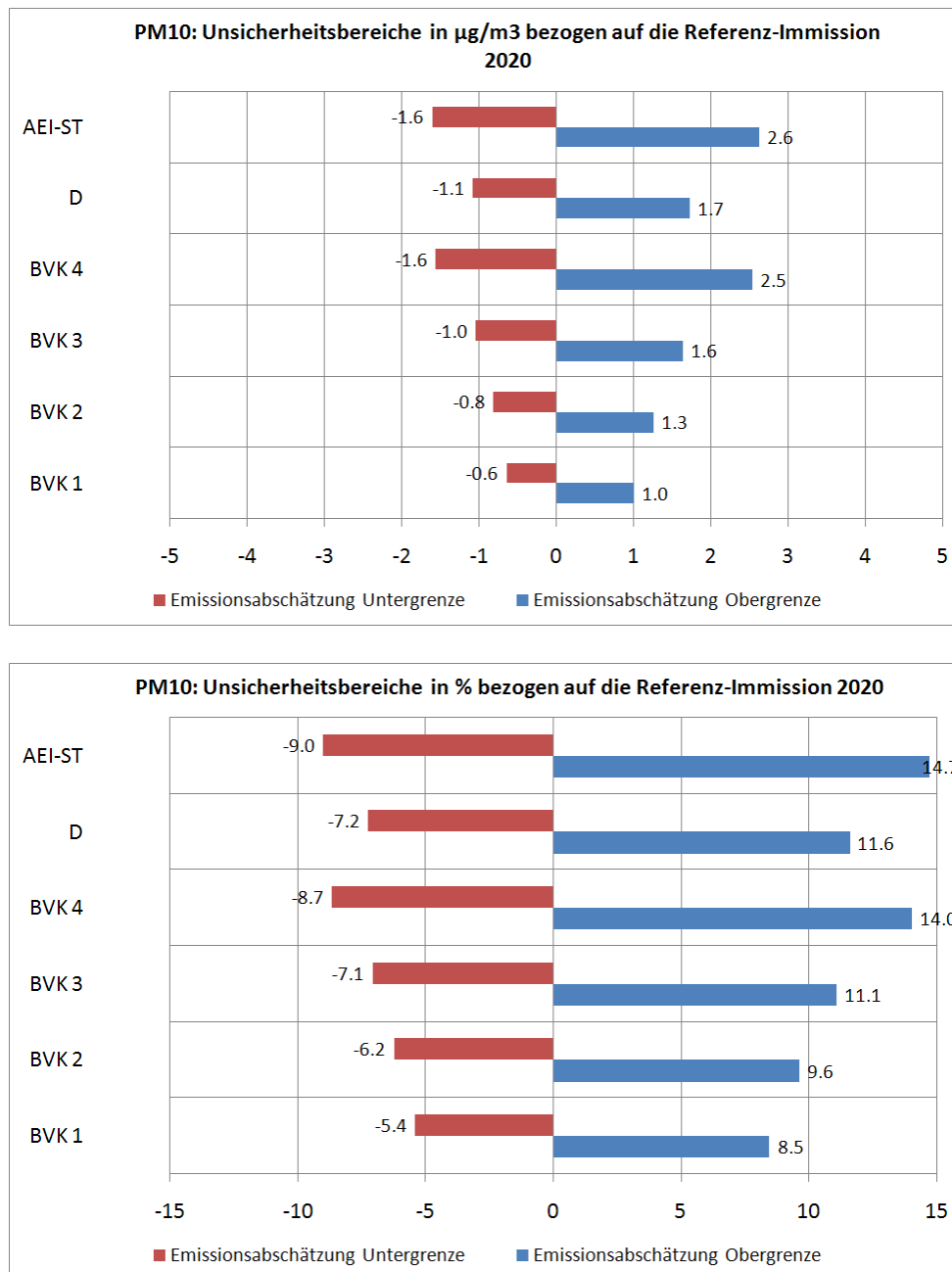


Abbildung 3-8 Absolute (oben) und relative (unten) Unsicherheitsbereiche der PM10-Jahresmittelwerte abgeleitet aus den Ober- und Unterschranken der Emissionsreferenz 2020. Mittlere Auswertung für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 2.

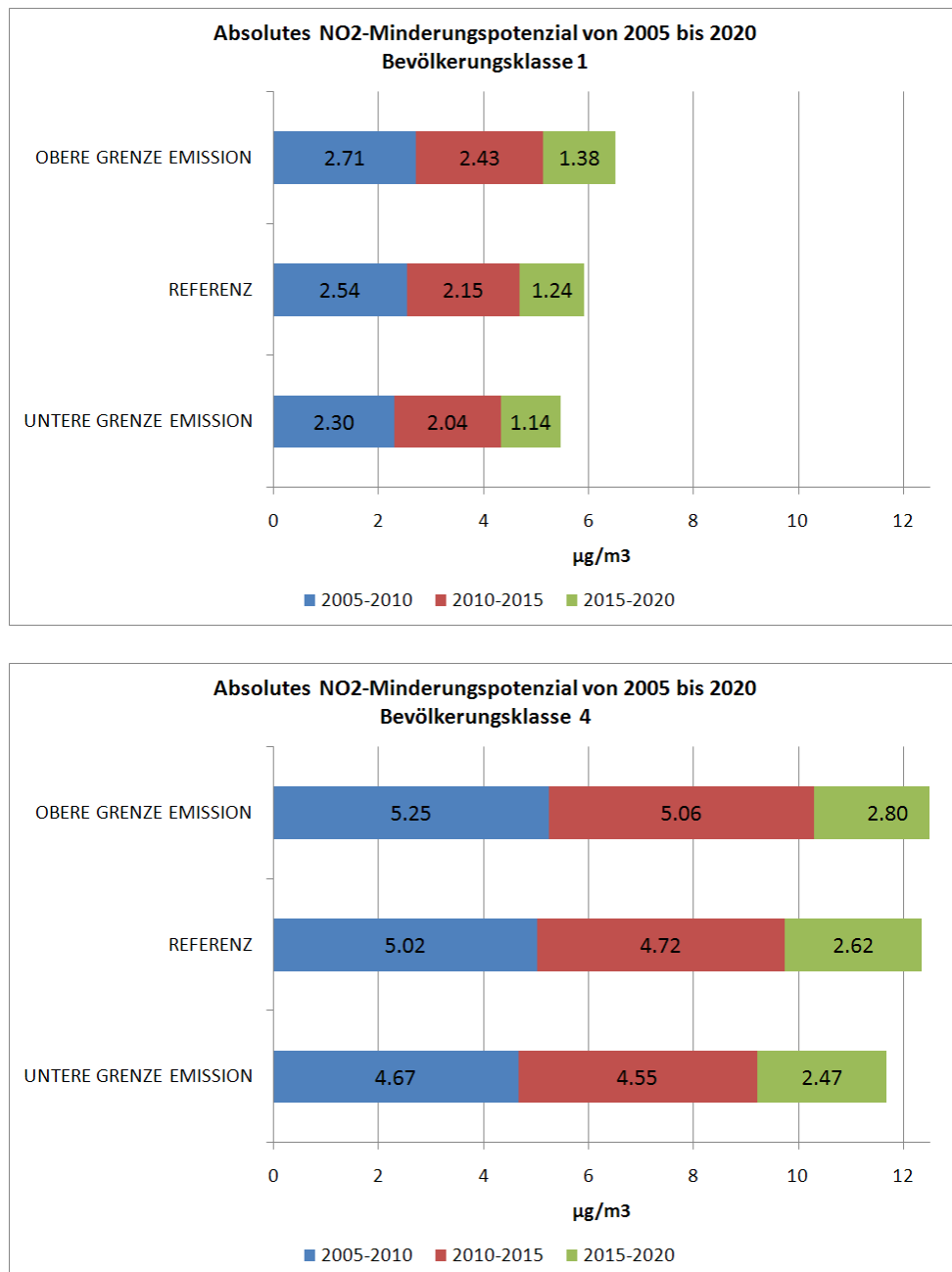


Abbildung 3-9 Absolute NO₂-Immissionsminderungen in µg/m³, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2010, 2010 bis 2015, 2015 bis 2020 erreicht werden können. Mittlere Emissionsreferenz sowie obere und untere Grenzen der Emission (Emissionsschranken). Oben: Mittlere Auswertung für Bevölkerungsklasse 1, unten für Bevölkerungsklasse 4.

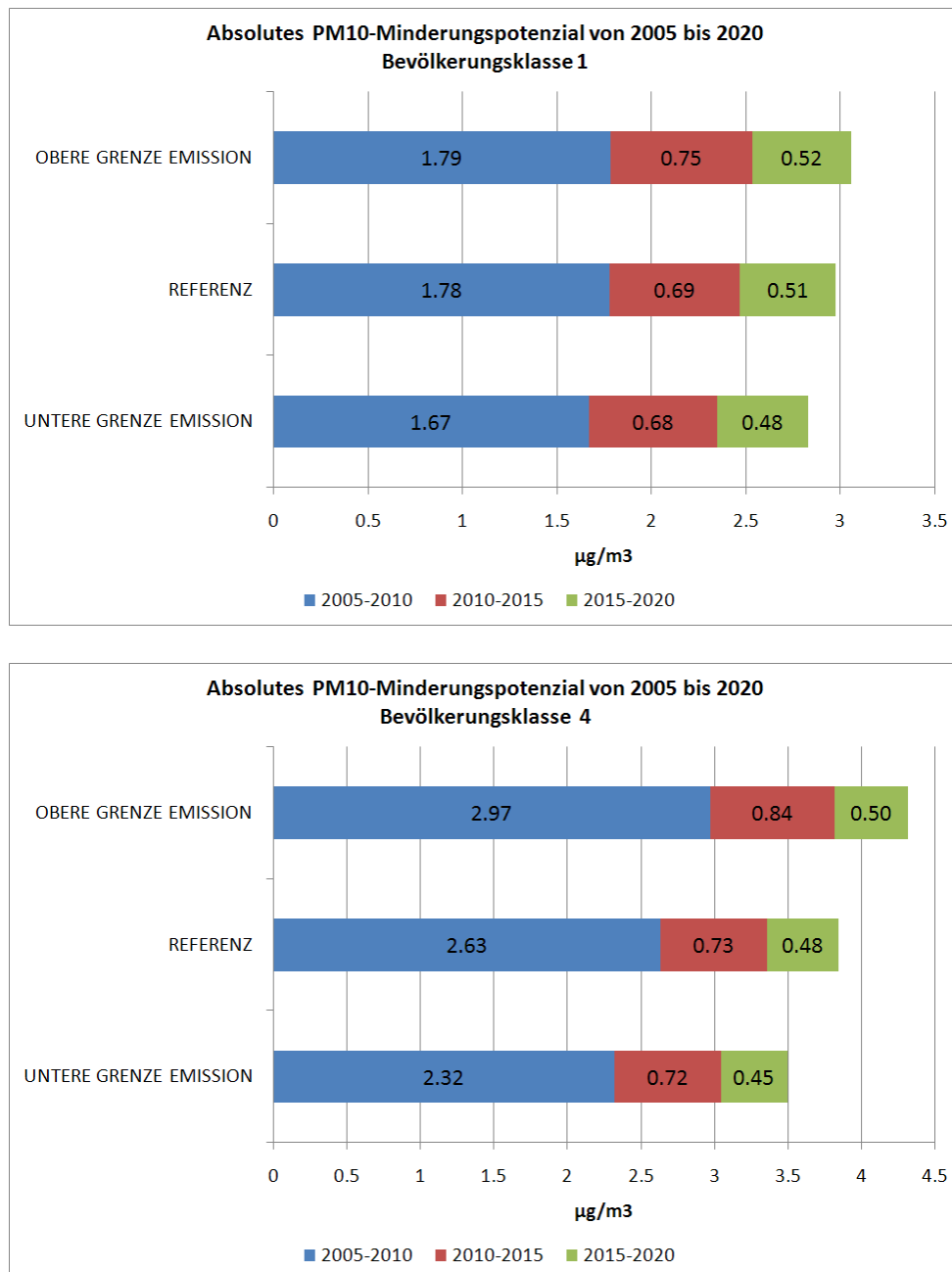


Abbildung 3-10 Absolute PM10-Immissionsminderungen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2010, 2010 bis 2015, 2015 bis 2020 erreicht werden können. Mittlere Emissionsreferenz sowie obere und untere Grenzen der Emission (Emissionsschranken). Oben: Mittlere Auswertung für Bevölkerungsklasse 1, unten für Bevölkerungsklasse 4.

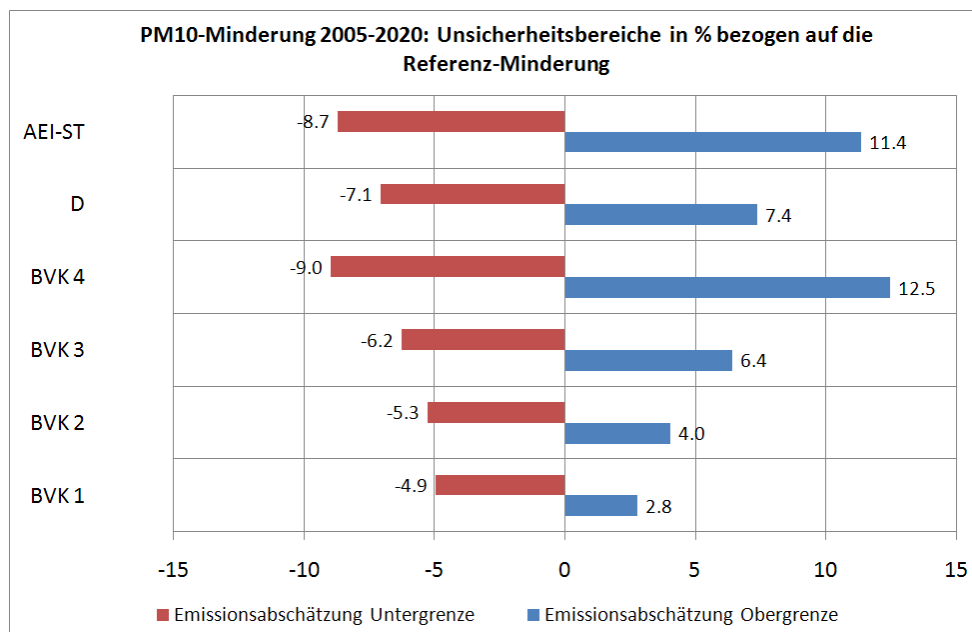
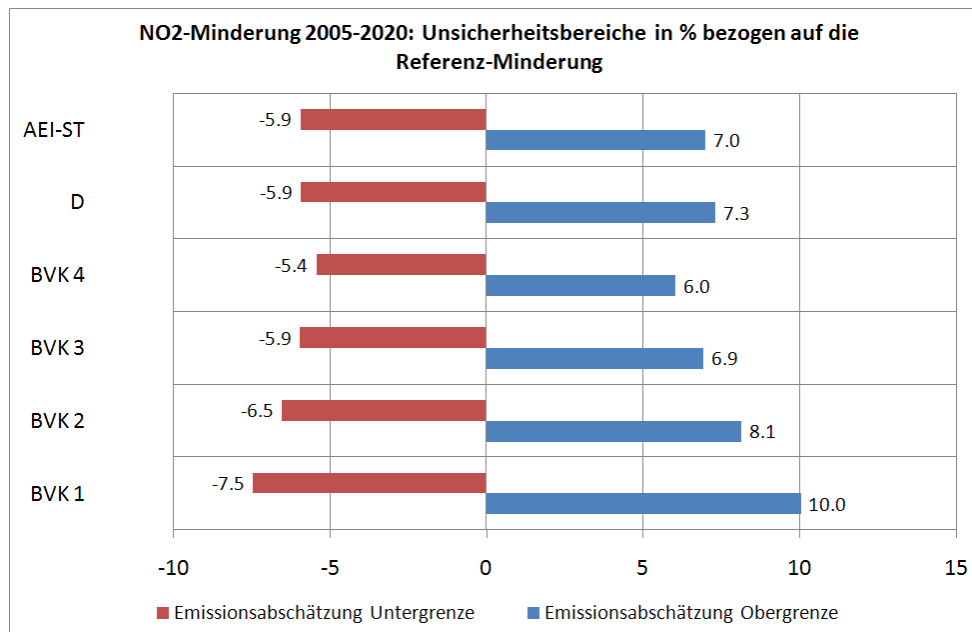


Abbildung 3-11 Relative Abweichungen des NO₂- und PM₁₀-Minderungspotenzials 2005 bis 2020 für die obere und untere Emissionsschwelle bezogen auf das Minderungspotenzials basierend auf den Referenzemissionen

4 Unsicherheit in der Berechnung der Verkehrsemissionen

Die Berechnung der Verkehrsemissionen erfolgte im PAREST-Projekt mit einer modifizierten Version des vom Umweltbundesamt verwendeten Verkehrsmodells TREMOD 4.17 (Transport Emission Model, hier genannt TREMOD 4.17M) auf der Grundlage der Emissionsfaktoren des HBEFA 2.1. Alternativ dazu wurden im Rahmen des Projekts auch Emissionsdatensätze erstellt, in denen die Verkehrsemissionen mit dem Modell TREMOVE, Version 2.7 berechnet wurden (Kugler et al., 2010). TREMOVE ist das Verkehrsmodell, das von der Europäischen Kommission für die Entwicklung von Verkehrsszenarien verwendet wird.

Die mit TREMOVE 2.7 berechneten Auspuffemissionen für die Stoffe NO_x , SO_2 und PM_{10} sind deutlich höher und für die Kohlenwasserstoffe deutlich niedriger als die mit TREMOD 4.17M berechneten Emissionen (Kugler et al., 2010; Stern, 2010e). Beim PM_{10} gibt es in der Summe der Emissionen nur geringe Änderungen (Erhöhung um 2%), da die höheren PM_{10} -Auspuffemissionen von TREMOVE durch die niedrigeren PM_{10} -Emissionen für Brems- und Reifenabrieb kompensiert werden. Die höheren NO_x -Verkehrsemissionen von TREMOVE führen bei den Gesamtemissionen für Deutschland in der Referenz 2005 zu circa 13% höheren NO_x -Emissionen. Für die Referenz 2020 berechnen sich auf Basis von TREMOVE in Deutschland circa 23% höhere NO_x -Emissionen und 4% niedrigere PM_{10} -Emissionen. Die relativen Abnahmen von 2005 nach 2020 fallen nach TREMOVE 2.7 für die Auspuffemissionen also niedriger aus als nach TREMOD 4.17M. Damit stellt auch die Methodik der Berechnung der Verkehrsemissionen eine Unsicherheit dar, die in den im letzten Kapitel diskutierten Emissionsbandbreiten nicht erfasst ist. In der Summe aller Emissionen liegen die Abweichungen, hervorgerufen durch den Austausch der Berechnungsmethodik für die Verkehrsemissionen, innerhalb der im letzten Kapitel diskutierten Bandbreiten, da ja auch nur die Verkehrsemissionen und nicht die Emissionen der anderen Verursachergruppen betroffen sind. Betrachtet man aber nur die Unsicherheiten der Verkehrsemissionen so ist offensichtlich, dass der Austausch der Berechnungsmethodik bei den NO_x -Emissionen für das Jahr 2020 zu einer weit größeren Bandbreite führen kann, als wenn man nur die Berechnungsparameter einer Methodik, nämlich TREMOD 4.17M, variiert: Gemäß Tabelle 3-4 umfasst die Unsicherheit der NO_x -Emissionen für Dieselfahrzeuge im Referenzjahr 2020 den Bereich von circa -7.5% bis +10.3%. Berechnet man die Emissionen der Dieselfahrzeuge mit TREMOVE 2.7, führt dies aber für das Jahr 2020 zu 145% höheren NO_x -Emissionen. Da die Unterschiede für 2005 deutlich geringer sind, wirkt sich die Änderung der Methodik zur Berechnung der Verkehrsemissionen hauptsächlich auf die Prognose und damit das NO_2 -Minderungspotenzial aus.

Eine ausführliche Diskussion der Immissionsunterschiede, die sich aus der Verwendung der beiden Verkehrsmodelle ergeben, kann in Stern (2010e) gefunden werden. Hier werden diese Ergebnisse nur soweit aufgegriffen, wie es zur Bewertung der daraus resultierenden Immissionsbandbreite notwendig ist.

Entsprechend den unterschiedlichen Emissionsabschätzungen für den Verkehr sind die Unterschiede in den berechneten Konzentrationen für PM_{10} gering und für NO_2 beträchtlich. In ländlichen Regionen ergeben sich mit den Verkehrsemissionen nach TREMOVE für die Referenz 2005 im Mittel circa $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere NO_2 -Jahresmittelwerte, in städtischen Regionen im Mittel zwischen 2 bis $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere NO_2 -Jahresmittelwerte als mit den Verkehrsemissionen nach TREMOD.

Für die Referenz 2020 werden in ländlichen Regionen mit den Verkehrsemissionen nach TREMOVE im Mittel circa $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere, in städtischen Regionen zwischen 3 und $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere NO_2 -Jahresmittelwerte berechnet als mit den Verkehrsemissionen nach TREMOD. Die Unterschiede in den PM_{10} -Jahresmittelwerten sind wie für die Referenz 2005 gering.

Die für die beiden Berechnungsmethoden der Verkehrsemissionen ermittelten PM10-Minderungspotenziale von 2005 nach 2020 sind vergleichbar (Abbildung 4-1). Damit erhöht sich der Unsicherheitsbereich des Minderungspotenzials für PM10 nicht, wenn man die Verkehrsemissionen anstatt mit dem Verkehrsmodell TREMOD 4.17M mit dem Verkehrsmodell TREMOVE 2.7 berechnet. Für das NO₂-Minderungspotenzial gilt dies nur begrenzt (Abbildung 4-2). In ländlichen Regionen liegt das auf der Basis von TREMOVE 2.7 berechnete Minderungspotenzial zwar nahe bei dem mittleren Potenzial auf der Basis von TREMOD 4.17M, in Ballungsgebieten ist das TREMOVE 2.7-Minderungspotenzial aber deutlich geringer als das Minderungspotenzial, das auf den mittleren Referenzemissionen beruht. Es ist sogar geringer als das für die untere Emissionsschranke berechnete Potenzial, obwohl in dem TREMOVE 2.7-Lauf alle Emissionen außer den Verkehrsemissionen dem mittleren Stand entsprechen. Dies bedeutet, dass allein der Austausch der Berechnungsmethodik der Verkehrsemissionen eine NO₂-Ergebnisbandbreite bewirken kann, die in der Größenordnung der hier als Summe für alle Verursachergruppen berechneten Emissionsbandbreite liegt.

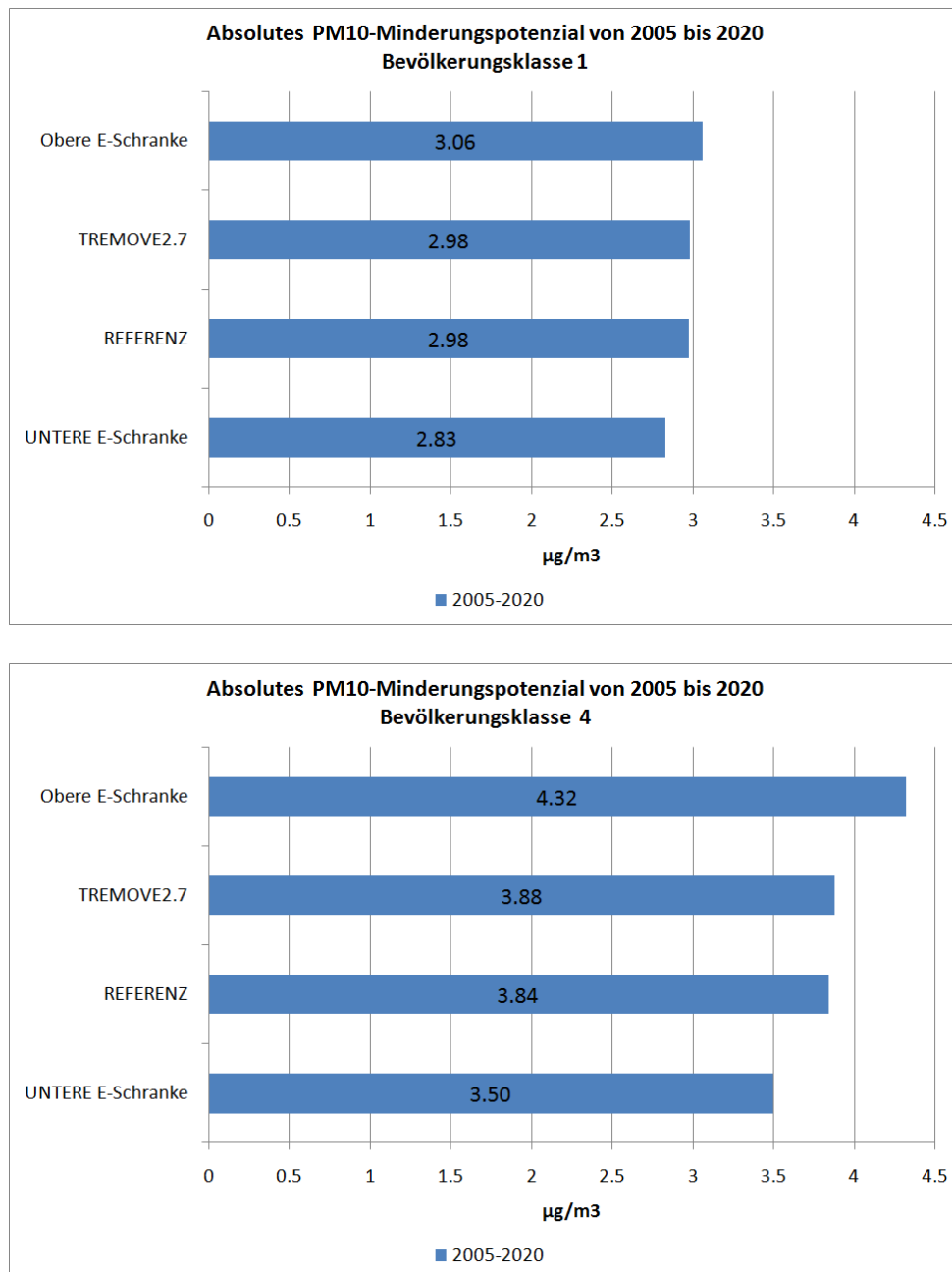


Abbildung 4-1 Absolute PM10-Immissionsminderungen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 erreicht werden können. Mittlere Emissionsreferenz, obere und untere Schranken der Emission sowie mittlere Emissionsreferenz mit der Berechnung der Verkehrsemissionen nach TREMOVE2.7. Oben: Mittlere Auswertung für Bevölkerungsklasse 1, unten für Bevölkerungsklasse 4.

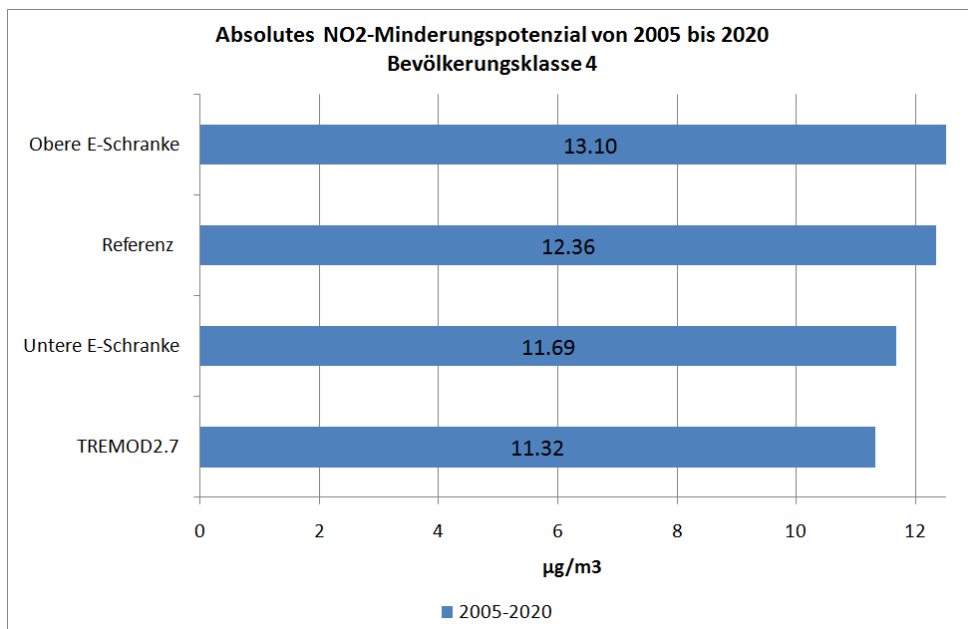
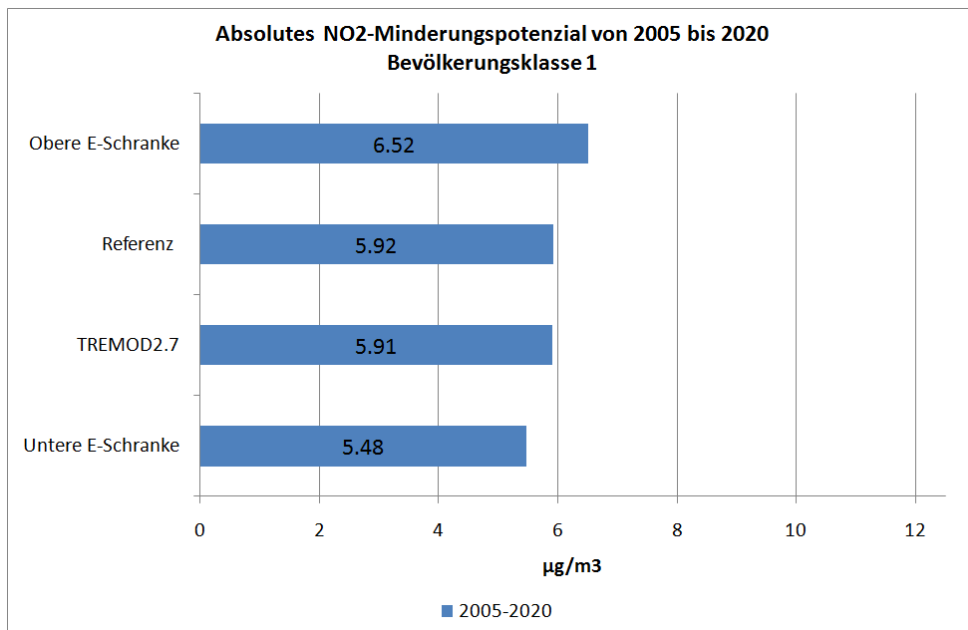


Abbildung 4-2 Absolute NO₂-Immissionsminderungen in µg/m³, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 erreicht werden können. Mittlere Emissionsreferenz, obere und untere Schranken der Emission sowie mittlere Emissionsreferenz mit der Berechnung der Verkehrsemissionen nach TREMOVE2.7. Oben: Mittlere Auswertung für Bevölkerungsklasse 1, unten für Bevölkerungsklasse 4.

5 Bandbreiten resultierend aus der Anwendung unterschiedlicher Modelle

5.1 Überblick

Im PAREST-Projekt wurden folgende Modelle bzw. Modellkombinationen eingesetzt:

- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem diagnostischen TRAMPER-System: RCG-TRAMPER, Standardmodellkonfiguration in PAREST
- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Wettermodell COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes: RCG-COSMO-EU
- LOTOS-EUROS, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Wettermodell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage, EZMW
- MUSCAT, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Modell COSMO des Deutschen Wetterdienstes: COSMO-MUSCAT.

Eine Beschreibung der Modelle bzw. der Modellkombinationen und eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse für die Referenzsimulation 2005 kann in Stern (2010f) gefunden werden. Hier werden diese Ergebnisse wieder nur soweit aufgegriffen, wie es zur Bewertung der daraus resultierenden Immissionsbandbreite notwendig ist. Zur Diskussion der horizontalen Feldverteilungen der verschiedenen Modellanwendungen und des direkten Vergleichs der Modellergebnisse mit Messungen sei auf Stern (2010f) verwiesen. Hier sollen nur mittlere Auswertungen für die in Kapitel 2 definierten Bewertungsklassen diskutiert werden.

5.2 Bandbreite der Jahresmittelwerte 2005

Der Vergleich der mit den vier unterschiedlichen Modellkombinationen berechneten Jahresmittelwerte für die Emissionsreferenz 2005 ist in Abbildung 5-1 zusammengefasst. Die Abbildung zeigt die relativen Abweichungen vom Mittelwert, gebildet aus allen Einzelergebnissen. Für den PM₁₀-Jahresmittelwert streuen die Einzelergebnisse um circa 35% um den Mittelwert. Die niedrigsten Werte berechnet das Modell LOTOS, die höchsten Werte das Modell RCG-TRAMPER. Bei den NO₂-Jahresmittelwerten liefert RCG-TRAMPER im Mittel deutlich höhere Konzentrationen als die anderen Modelle. Die Streuung um den Mittelwert reicht von circa -15% bis +35%. Die in PAREST standardmäßig verwendete Modellkonfiguration RCG-TRAMPER liegt damit am oberen Ende der Ergebnisbandbreite. Hauptursache der höheren Konzentrationen ist die Verwendung des auf Beobachtungen basierenden meteorologischen Treibers TRAMPER, der im Gegensatz zu den prognostischen Treibern der anderen Modelle zu Werten einiger Grenzschichtvariablen führt, die hohe Konzentrationen begünstigen (Stern, 2010f). Insgesamt sind die Bandbreiten der Immissionsergebnisse bedingt durch die Anwendung verschiedener Modelle größer als die Bandbreiten verursacht durch die Unsicherheiten in den Emissionsdaten (ermittelt mit einer Modellanwendung).

Die relativen Abweichungen der PM₁₀- und NO₂-Modellergebnisse von durch Interpolation erstellten Messfeldern (siehe dazu Stern, 2010f) für das Referenzjahr 2005 zeigt die Abbildung 5-2. In der räumlich gemittelten Auswertung werden die beobachteten PM₁₀-Jahres-

mittelwerte von allen Modellen 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 interpolierten Messfeldern für PM10, NO₂ (und auch Ozon) auf. Die Abweichung der PM10-Modellergebnisse von den Beobachtungen liegt im Bereich von circa -55% bis -10%, für die NO₂-Modellergebnisse in einem Bereich von circa -25% bis +10%. Es sei noch angemerkt, dass die hier ermittelten Abweichungen der Modellergebnisse von Beobachtungen mittlere Auswertungen für die Bewertungsklassen repräsentieren. Im Einzelfall, d.h. im direkten Vergleich von Stationsbeobachtungen mit den entsprechenden Modellergebnissen, können die Abweichungen größer sein und unter speziellen meteorologischen Bedingungen insbesondere bei PM10 auch den Faktor 2 (100%) erreichen (siehe dazu Stern (2010f) und auch Stern et al., 2008).

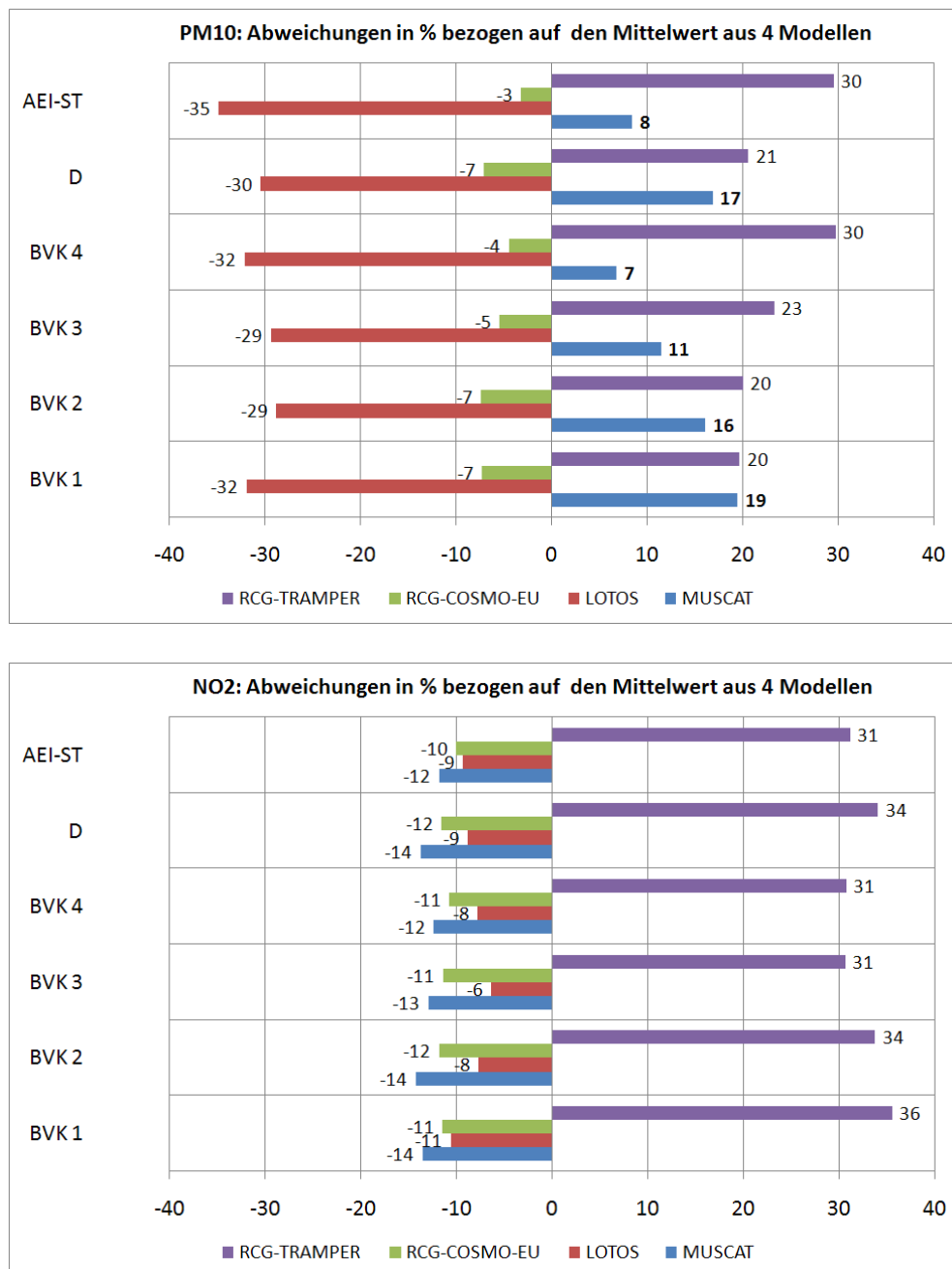


Abbildung 5-1 Relative Abweichungen der berechneten PM10- und NO₂-Jahresmittelwerte jedes Modells vom Mittelwert gebildet aus den einzelnen Modellergebnissen. Mittlere Auswertungen für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 2.

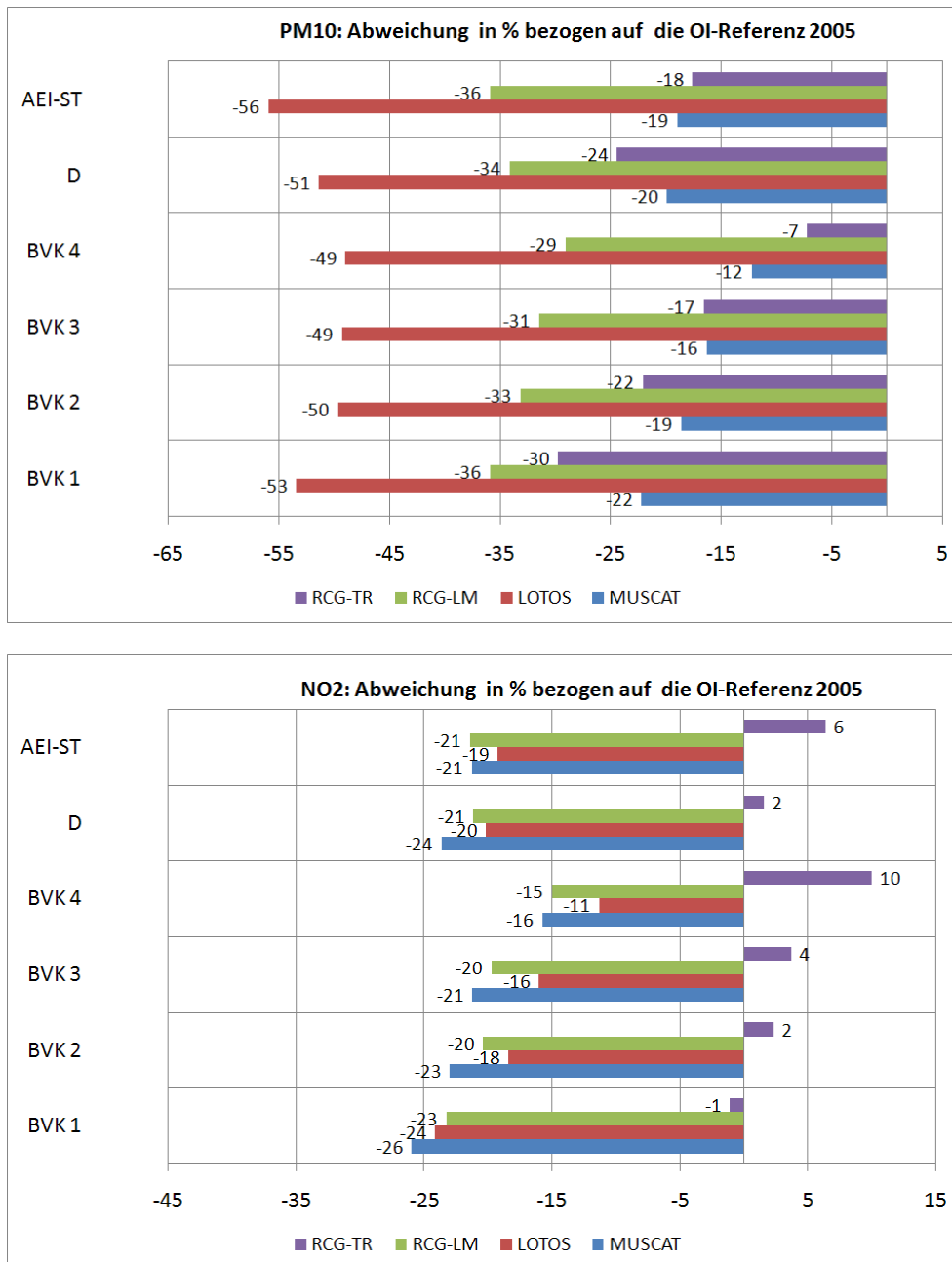


Abbildung 5-2 Mittlere Abweichung der PM10 und NO₂-Jahresmittelwerte in % der Modelle RCG-TRAMPER (RCG-TR), RCG-COSMO-EU (RCG-LM), LOTOS-EUROS und COSMO-MUSCAT von interpolierten Messungen (OI-Referenz) für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.

5.3 Bandbreite der Minderungspotenziale 2005 bis 2020

Der Schwerpunkt der Auswertungen in PAREST lag auf der relativen Bewertung der Wirksamkeit von emissionsmindernden Maßnahmen. Zur Absicherung der Ergebnisse ist es also wichtig, dass die verschiedenen Modelle in ihren relativen Aussagen zu ähnlichen Ergebnissen kommen. Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 zeigen die absoluten und relativen Änderungen der PM10-Jahresmittelwerte in Deutschland für die Emissionsentwicklung vom Referenzjahr 2005 zum Referenzjahr 2020. Die Spannbreite der mit den verschiedenen Modellen berechneten PM10-Konzentrationsänderungen ist in Tabelle 5-1 zusammengestellt. Die lokal maximal erreichbaren Abnahmen der PM10-Konzentrationen (für alle Modelle im Ruhrgebiet) schwanken zwischen $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (RCG-TRAMPER) und $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (LOTOS-EUROS), die über ganz Deutschland gemittelten Abnahmen zwischen $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (COSMO-MUSCAT) und $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (LOTOS-EUROS). Die Unterschiede zwischen den relativen Änderungen sind deutlich geringer. Die Bandbreite reicht für die maximalen Abnahmen von 33% (COSMO-MUSCAT) bis 25% (LOTOS-EUROS), für die deutschlandweit gemittelten Abnahmen von 24% (COSMO-MUSCAT) bis 19% (RCG-COSMO-EU). Auf die Ursachen der Unterschiede soll hier nicht eingegangen werden. Dazu sei auf Stern (2010f) verwiesen.

Die entsprechenden Darstellungen für die NO_2 -Jahresmittelwerte zeigen Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 sowie Tabelle 5-2. Übereinstimmend berechnen alle Modelle die stärksten NO_2 -Konzentrationsabnahmen im Ruhrgebiet und den anderen großen Ballungsräumen sowie im Umfeld der Hauptverkehrsachsen. Die lokal maximal erreichbaren Abnahmen der NO_2 -Konzentrationen reichen von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (LOTOS-EUROS) bis $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (RCG-TRAMPER), die über ganz Deutschland gemittelten Abnahmen von $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (LOTOS-EUROS, COSMO-MUSCAT) bis $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (RCG-TRAMPER). Auch bei den NO_2 -Abnahmen sind die Unterschiede zwischen den relativen Änderungen wieder deutlich geringer. Die Bandbreite reicht für die maximalen Abnahmen von 67% (RCG-COSMO-EU) bis 60% (LOTOS-EUROS), für die deutschlandweit gemittelten Abnahmen von 42% (LOTOS-EUROS) bis 47% (RCG-TRAMPER).

PM10: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Max. Abnahme	Mittl. Abnahme	Min. Abnahme
RCG-TRAMPER	$-11 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$-3 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$
RCG-COSMO-EU	$-7 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$-1 \mu\text{g}/\text{m}^3$
LOTOS-EUROS	$-5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$-1 \mu\text{g}/\text{m}^3$
COSMO-MUSCAT	$-6 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$-4 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$
PM10: %			
RCG-TRAMPER	-29%	-20%	-8%
RCG-COSMO-EU	-29%	-19%	-9%
LOTOS-EUROS	-25%	-20%	-6%
COSMO-MUSCAT	-33%	-24%	-12%

Tabelle 5-1 Bandbreiten der Abnahmen der PM10-Jahresmittelwerte der Emissionsreferenz 2020 in Deutschland bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Gerundet auf volle $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. volle %. Abgeleitet aus Abbildung 5-3 bzw. Abbildung 5-4.

NO ₂ : µg/m ³	Max. Abnahme	Mittl. Abnahme	Min. Abnahme
RCG-TRAMPER	-20 µg/m ³	-7 µg/m ³	-2 µg/m ³
RCG-COSMO-EU	-15 µg/m ³	-4 µg/m ³	-1 µg/m ³
LOTOS-EUROS	-10 µg/m ³	-4 µg/m ³	-1 µg/m ³
COSMO-MUSCAT	-12 µg/m ³	-4 µg/m ³	-1 µg/m ³
NO ₂ : %			
RCG-TRAMPER	-66%	-47%	-12%
RCG-COSMO-EU	-67%	-46%	-13%
LOTOS-EUROS	-60%	-42%	-4%
COSMO-MUSCAT	-62%	-43%	-16%

Tabelle 5-2 Bandbreiten der Abnahmen der NO₂-Jahresmittelwerte der Emissionsreferenz 2020 in Deutschland bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Gerundet auf volle µg/m³ bzw. volle %. Abgeleitet aus Abbildung 5-5 bzw. Abbildung 5-6.

Eine mittlere Auswertung der mit den einzelnen Modellen berechneten PM10-Minderungspotenziale zeigt die Abbildung 5-7. Die Bandbreite der über die ländlichen Regionen gemittelten Abnahmen reicht von 1.7 µg/m³ (LOTOS-EUROS) bis zu 3.6 µg/m³ (COSMO-MUSCAT), die entsprechende Bandbreite für Ballungsgebiete von 2.3 µg/m³ (LOTOS-EUROS) bis 4.0 µg/m³ (COSMO-MUSCAT). Die entsprechenden relativen Abnahmen sind in Abbildung 5-8 zusammengestellt. Im Mittel über alle Modellanwendungen wird in Ballungsräumen für den Zeitraum 2005 bis 2020 eine bevölkerungsgewichtete Abnahme der PM10-Jahresmittelwerte von 19.5% prognostiziert. Auch in den mittleren Auswertungen wird deutlich, dass die Unterschiede zwischen den Modellergebnissen bei einer relativen Betrachtung sehr viel geringer sind als bei einer absoluten Betrachtung.

Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 zeigen die mittleren absoluten und relativen Abnahmen der NO₂-Jahresmittelwerte aufgrund der Emissionsminderungen, die bis zum Jahre 2020 umgesetzt sein sollen. Die Spannbreite der absoluten Abnahmen reicht für die mittlere Ballungsrumbetrachtung von 6.4 µg/m³ (33%) für LOTOS bis zu 12.4 µg/m³ (44%) für RCG-TRAMPER.

In Abbildung 5-11 bis Abbildung 5-14 sind die Streuungen der einzelnen Modellergebnisse um das mittlere absolute und das mittlere relative Minderungspotenzial von 2005 bis 2020 zusammengestellt. In den Ballungsräumen liegen die berechneten absoluten PM10-Minderungspotenziale in dem Streubereich von -27% bis +27% (Abbildung 5-11), die entsprechenden relativen Minderungspotenziale in dem Streubereich von -14% bis +14% (Abbildung 5-13) um das jeweils aus allen Modellanwendungen berechnete mittlere Minderungspotenzial. Die Streuung ist größer für die NO₂-Minderungspotenziale: Sie umspannt für die Ballungsräume den Bereich von -25% bis +41% für die absoluten Minderungspotenziale (Abbildung 5-12) und -19% bis +11% für die relativen Minderungspotenziale (Abbildung 5-14). Die Unterschiede in den relativen Ergebnissen der Modelle sind also geringer als die in den absoluten Ergebnissen.

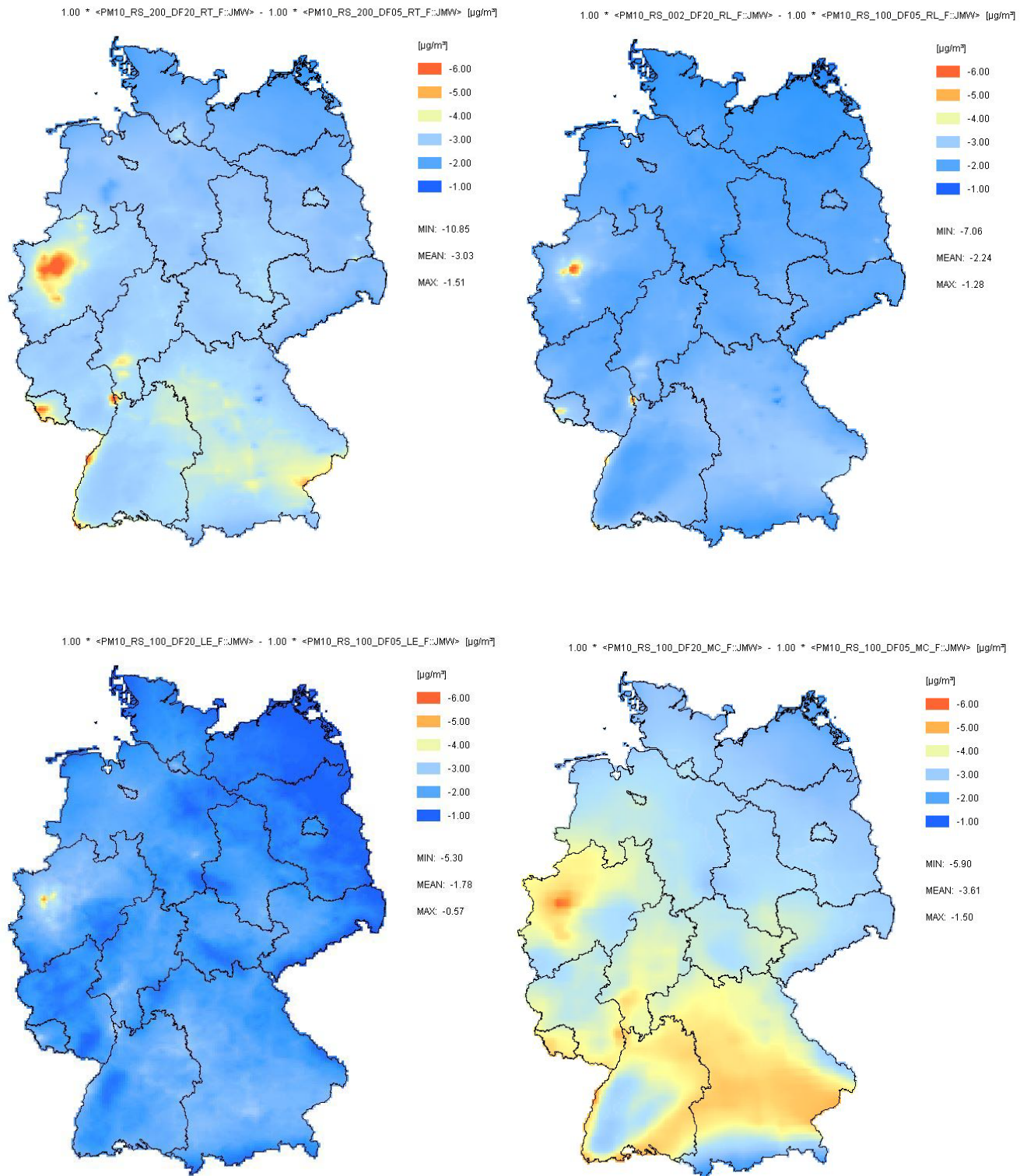


Abbildung 5-3 Änderung der PM10-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (absolutes Immissionsdelta) der Emissionsreferenz 2020 bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EUROS; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

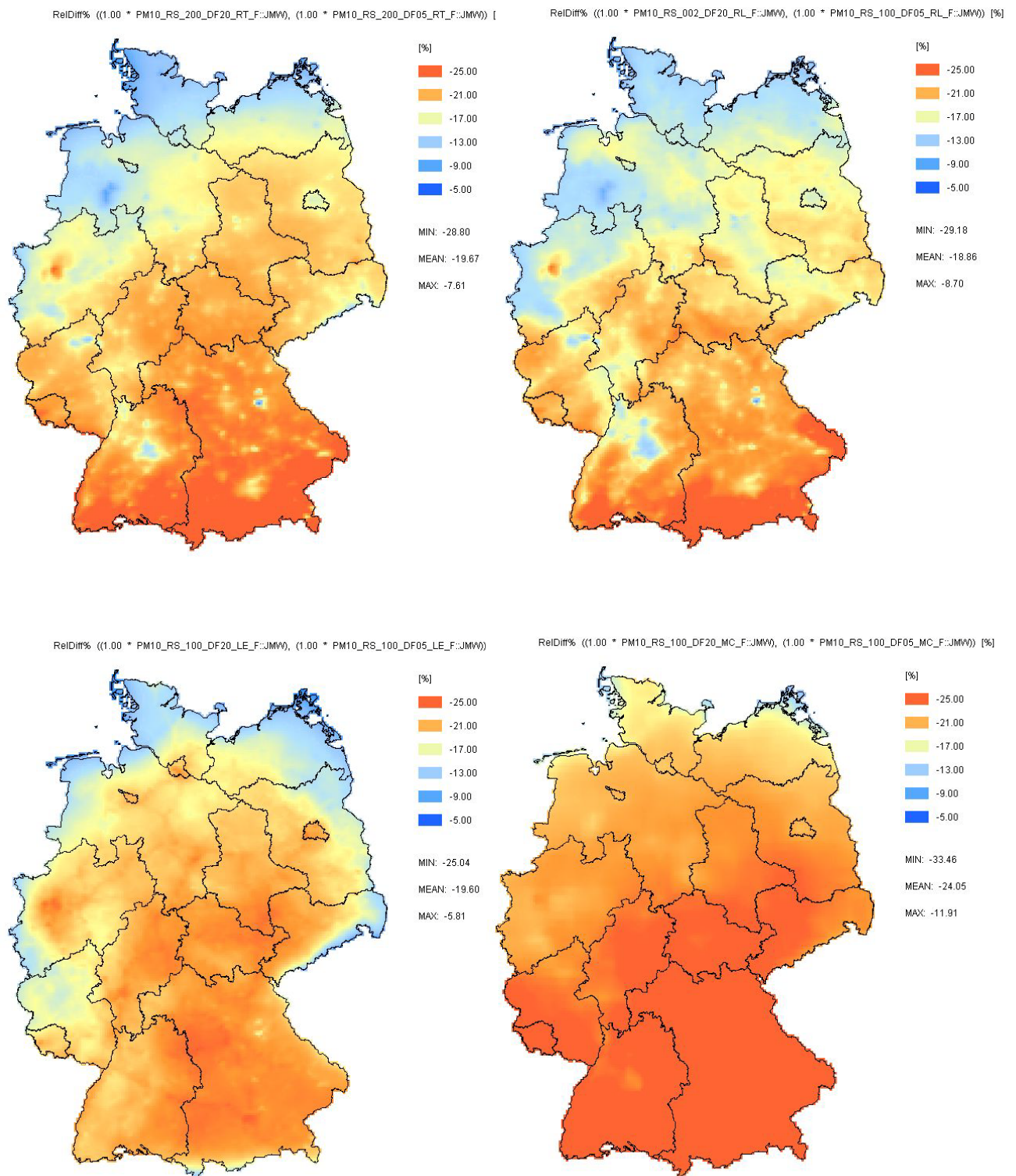


Abbildung 5-4 Änderung der PM10-Jahresmittelwerte in % (relatives Immissionsdelta) der Emissionsreferenz 2020 bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EUROS; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

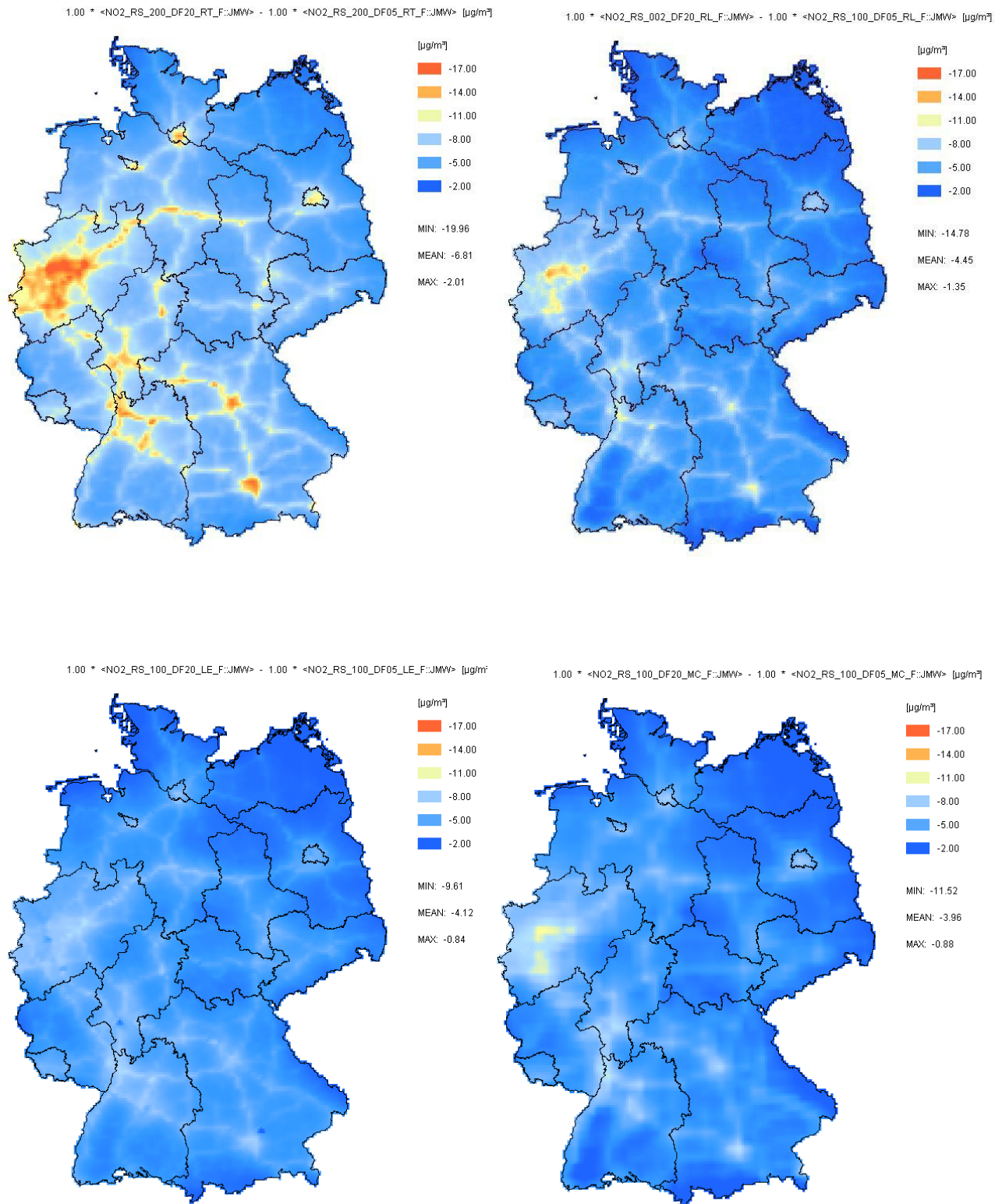


Abbildung 5-5 Änderung der NO₂-Jahresmittelwerte in µg/m³ (absolutes Immissionsdelta) der Emissionsreferenz 2020 bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EUROS; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

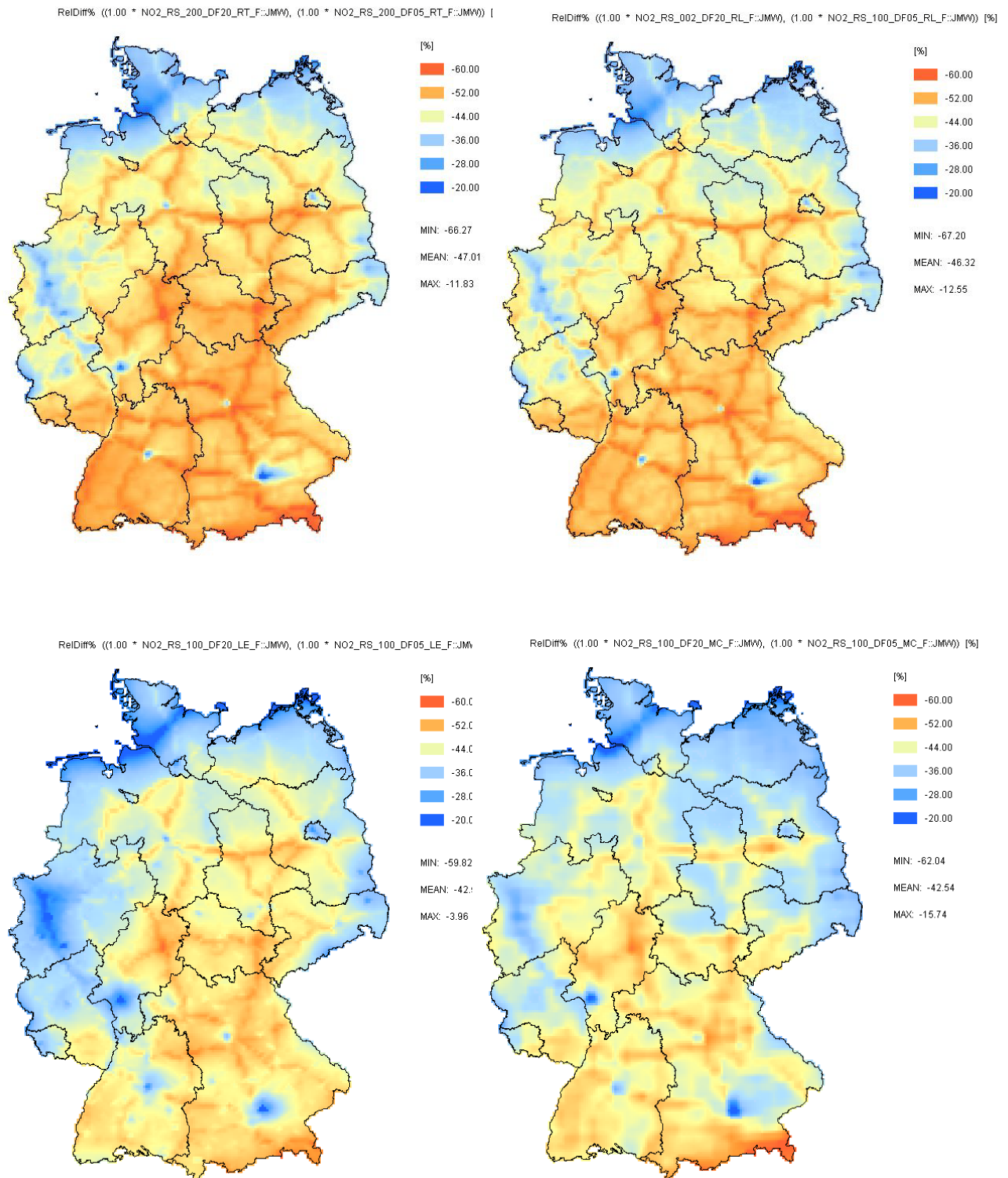


Abbildung 5-6 Änderung der NO₂-Jahresmittelwerte in % (relatives Immissionsdelta) der Emissionsreferenz 2020 bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EUROS; unten rechts: COSMO-MUSCAT.

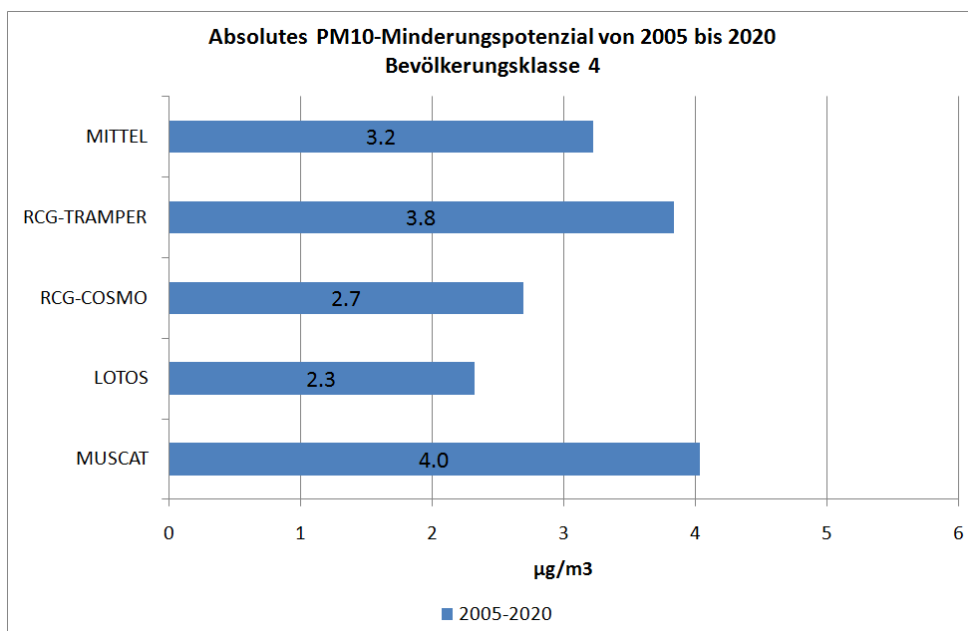
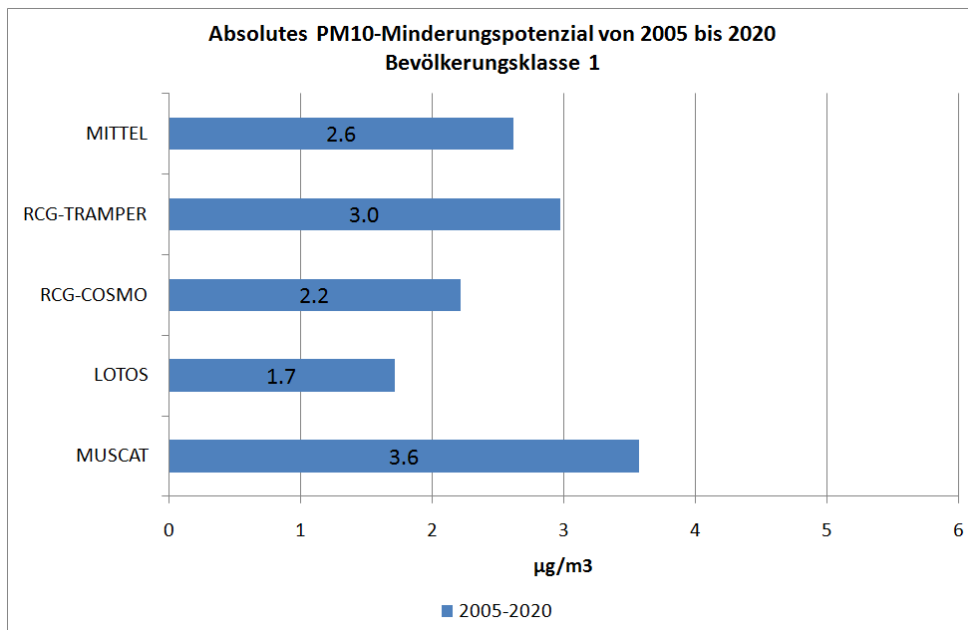


Abbildung 5-7 Absolute Abnahmen der PM10-Jahresmittelwerte, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (CLE-Referenzszenario) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1) und Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4). Mittel: Mittelwert des Minderungspotenzials berechnet aus den Einzelergebnissen der 4 Modellanwendungen.

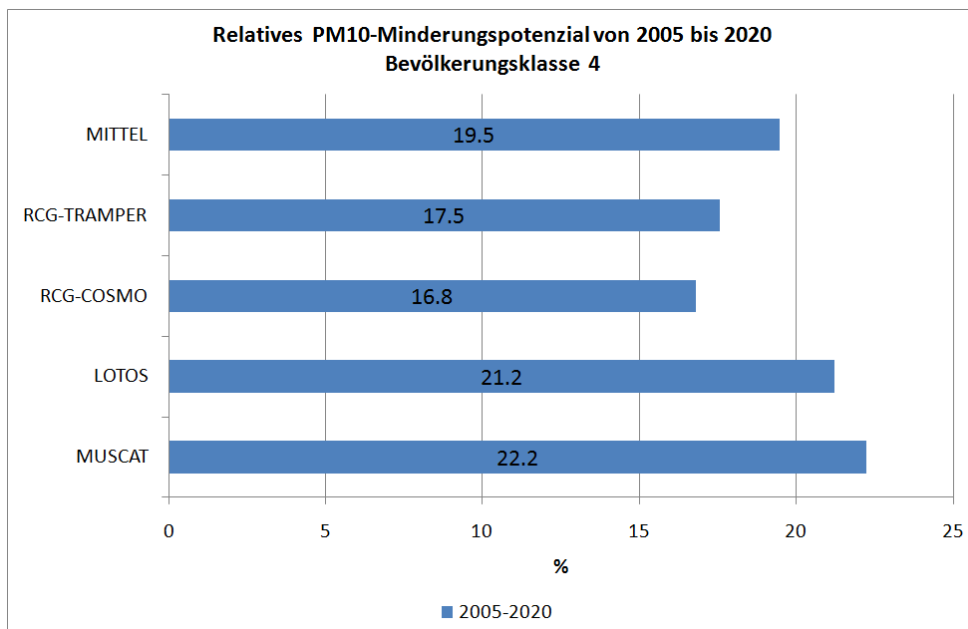
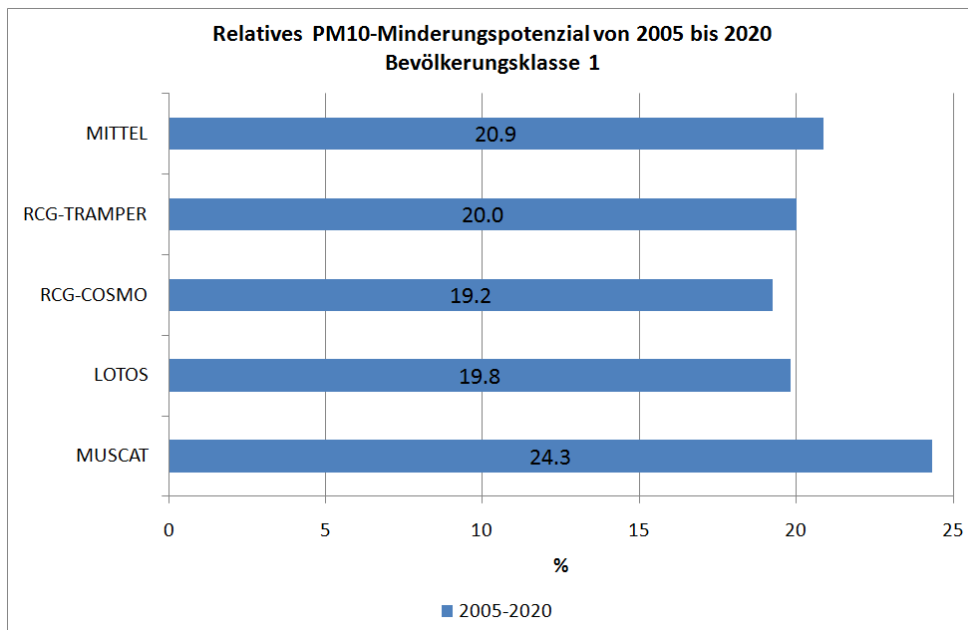


Abbildung 5-8 Relative Abnahmen der PM10-Jahresmittelwerte, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (CLE-Referenzszenario) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1) und Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4). Mittel: Mittelwert des Minderungspotenzials berechnet aus den Einzelergebnissen der 4 Modell-anwendungen.

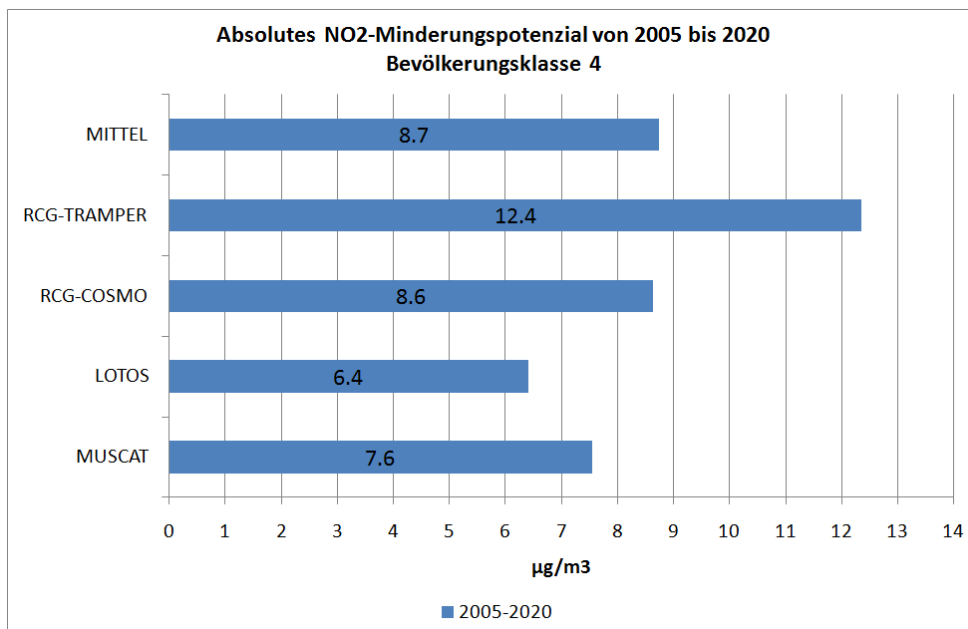
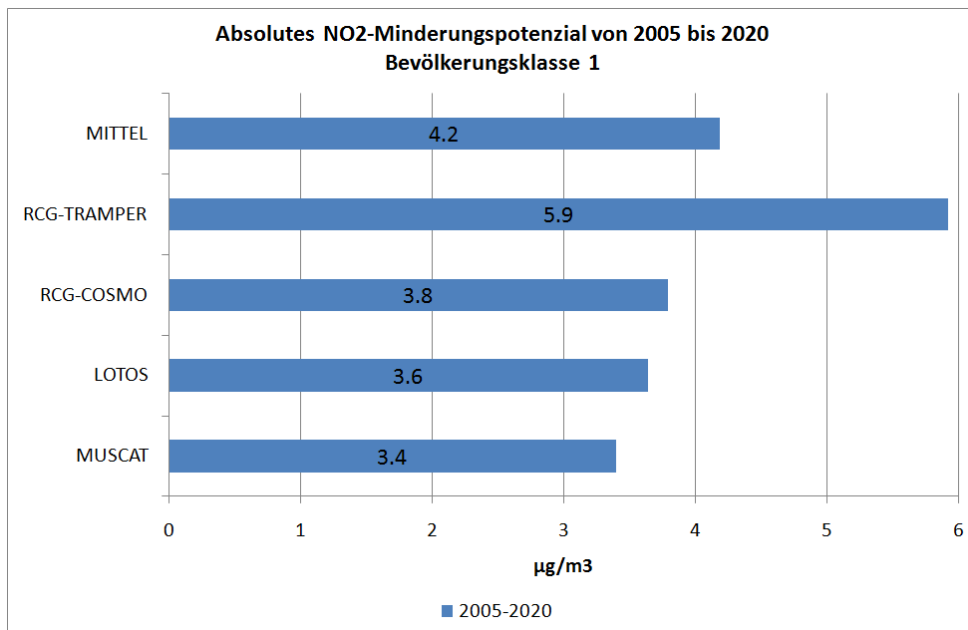


Abbildung 5-9 Absolute Abnahmen der NO₂-Jahresmittelwerte, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (CLE-Referenzszenario) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1) und Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4). Mittel: Mittelwert des Minderungspotenzials berechnet aus den Einzelergebnissen der 4 Modell-anwendungen.

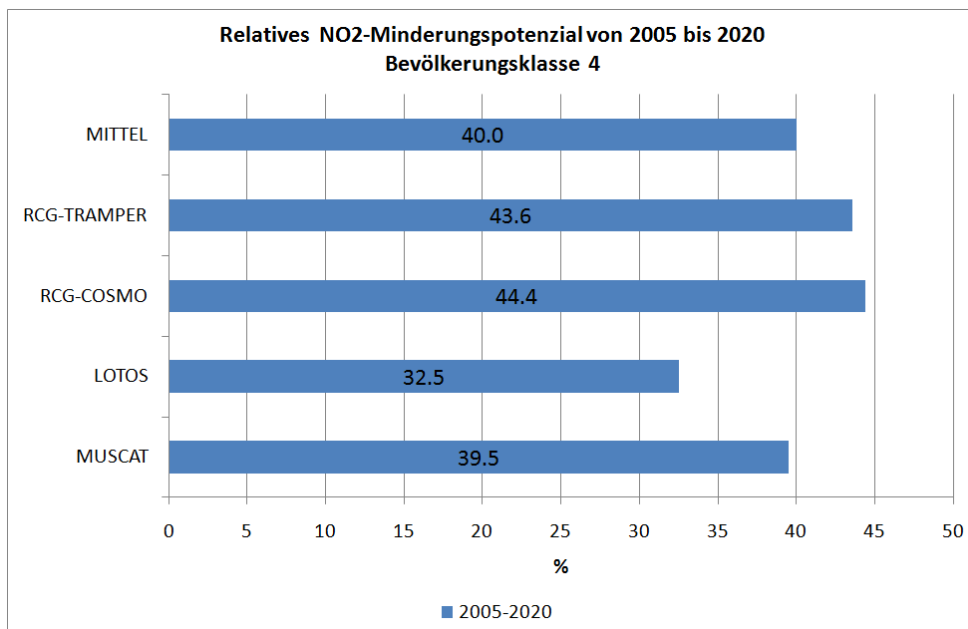
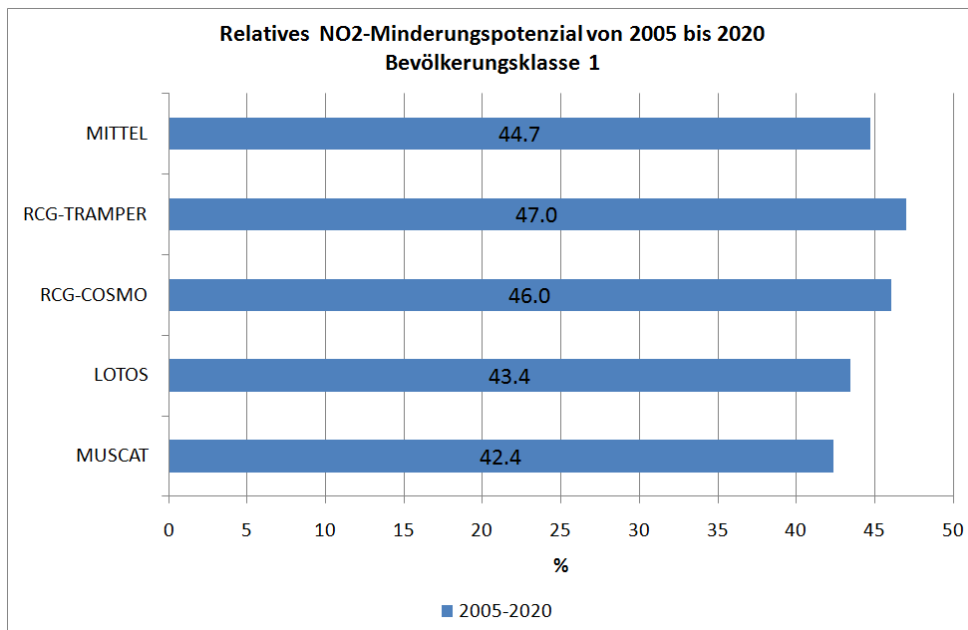


Abbildung 5-10 Relative Abnahmen der NO₂-Jahresmittelwerte, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (CLE-Referenzszenario) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1) und Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4). Mittel: Mittelwert des Minderungspotenzials berechnet aus den Einzelergebnissen der 4 Modell-anwendungen.

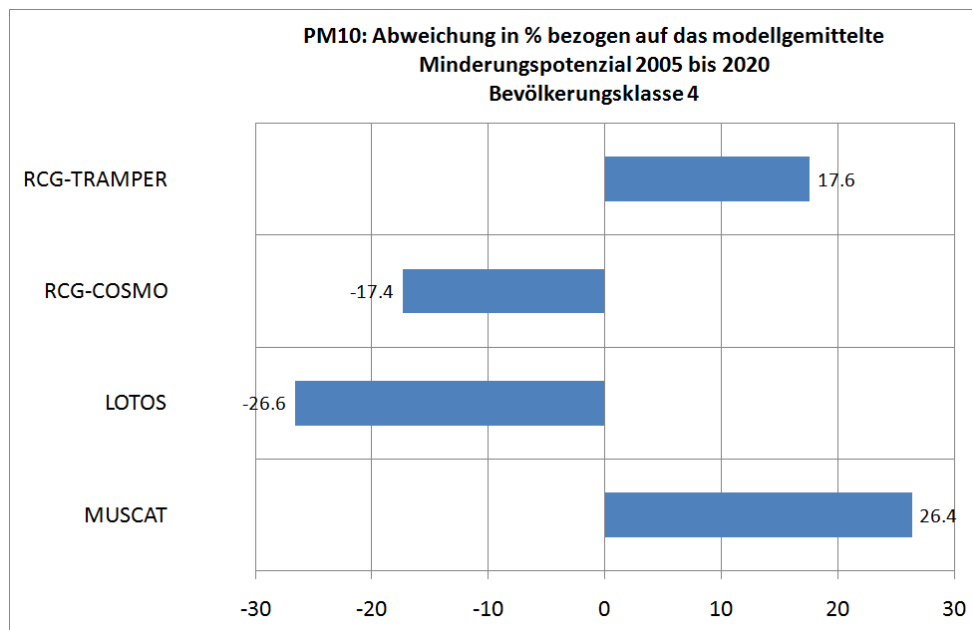
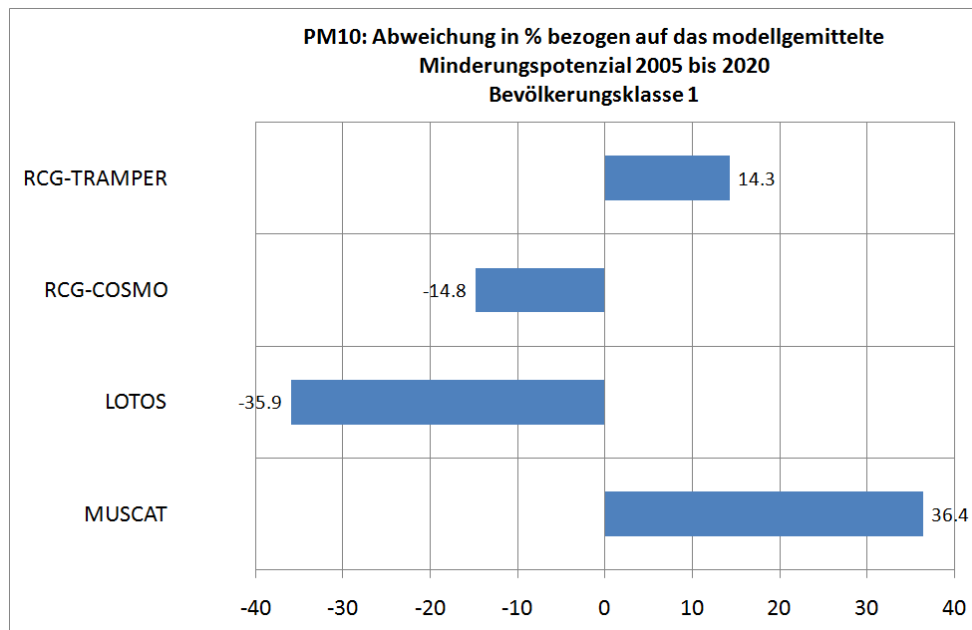


Abbildung 5-11 Streuung (%) des absoluten Minderungspotenzials der PM10-Jahresmittelwerte um das aus allen Modellergebnissen gemittelte absolute Minderungspotenzial.

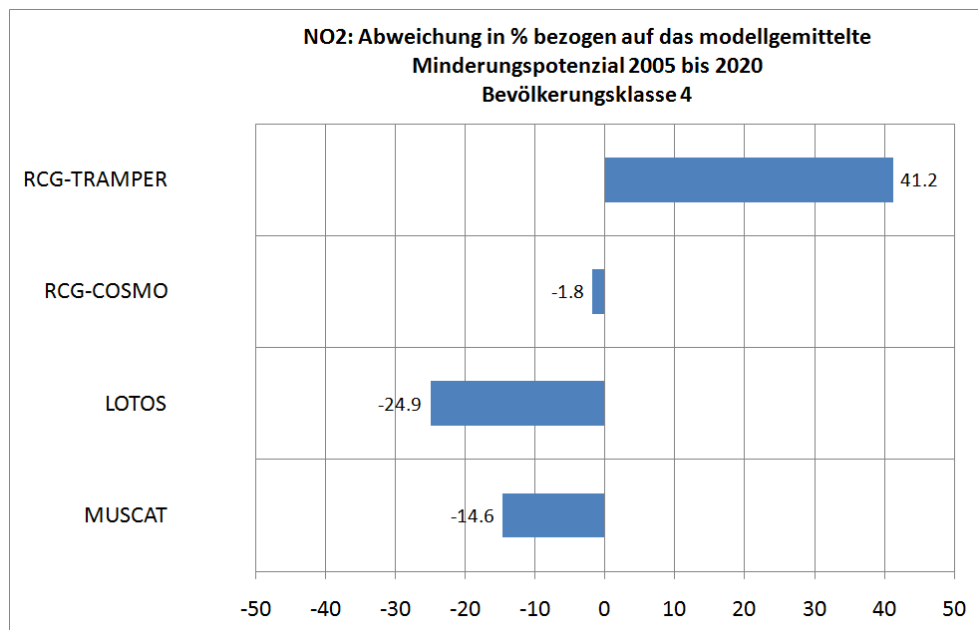
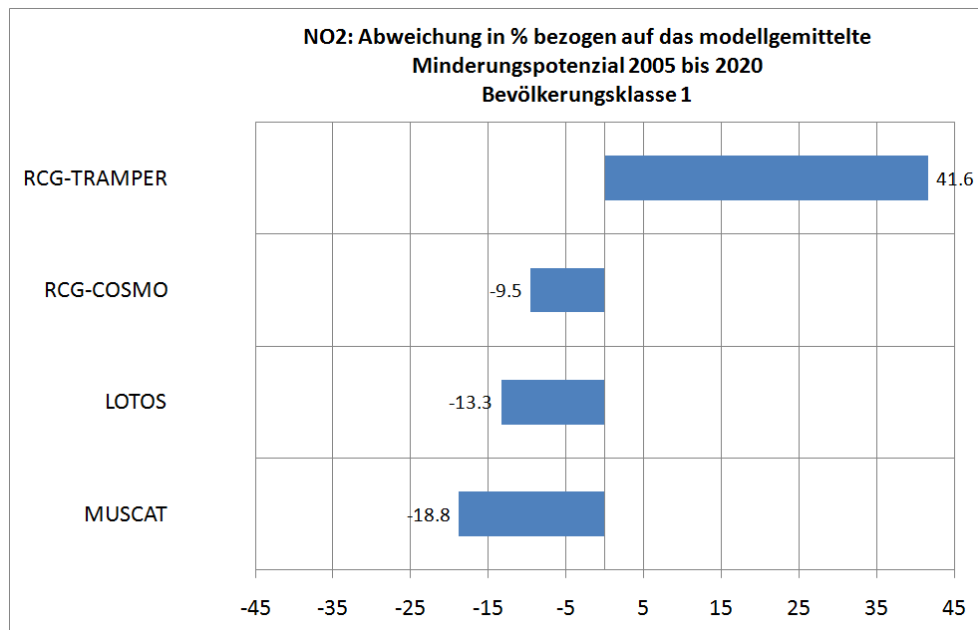


Abbildung 5-12 Streuung (%) des absoluten Minderungspotenzials der NO₂-Jahresmittelwerte um das aus allen Modellergebnissen gemittelte absolute Minderungspotenzial.

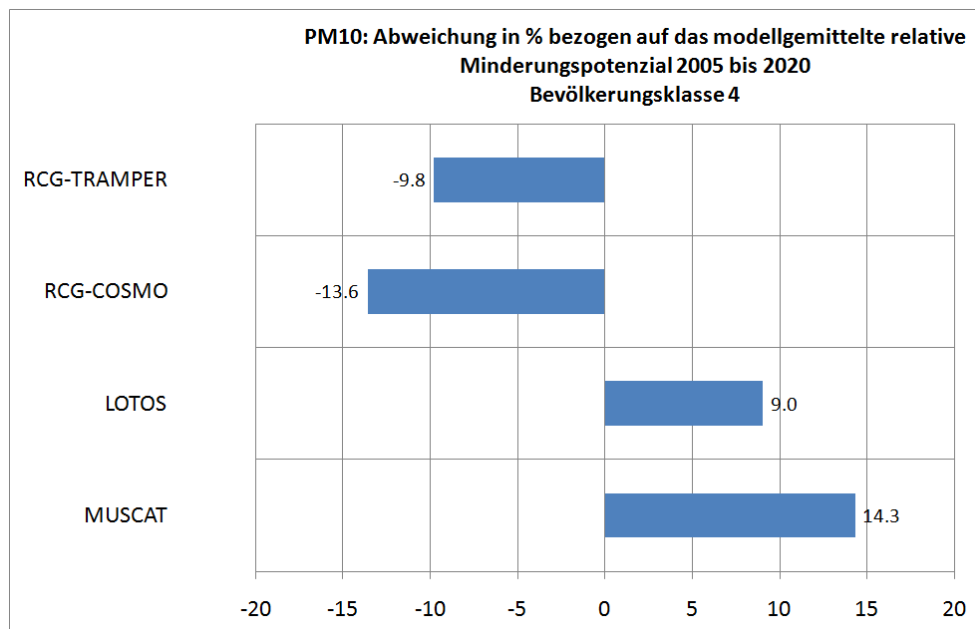
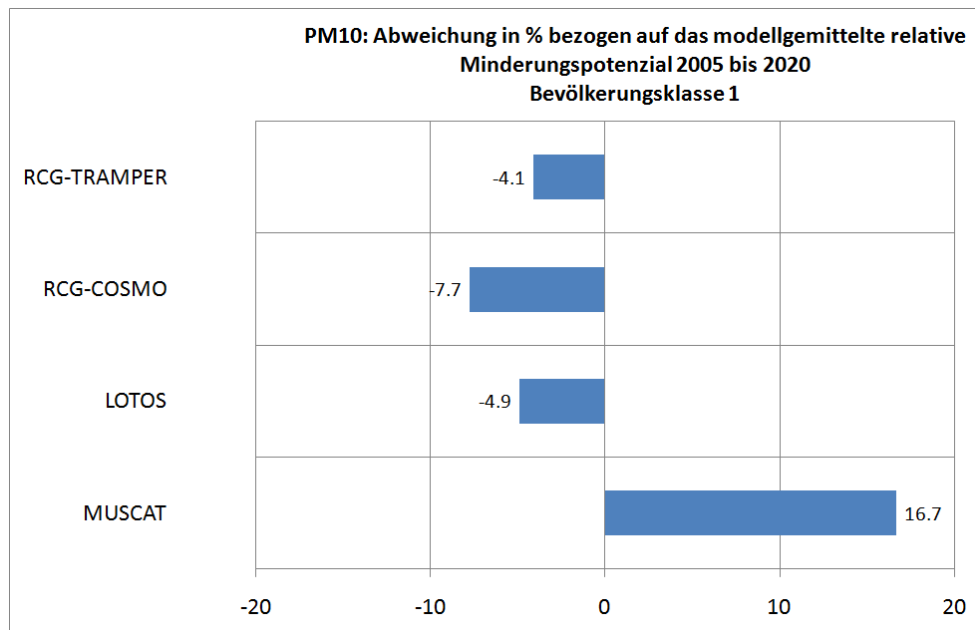


Abbildung 5-13 Streuung (%) des relativen Minderungspotenzials der PM10-Jahresmittelwerte um das aus allen Modellergebnissen gemittelte relative Minderungspotenzial.

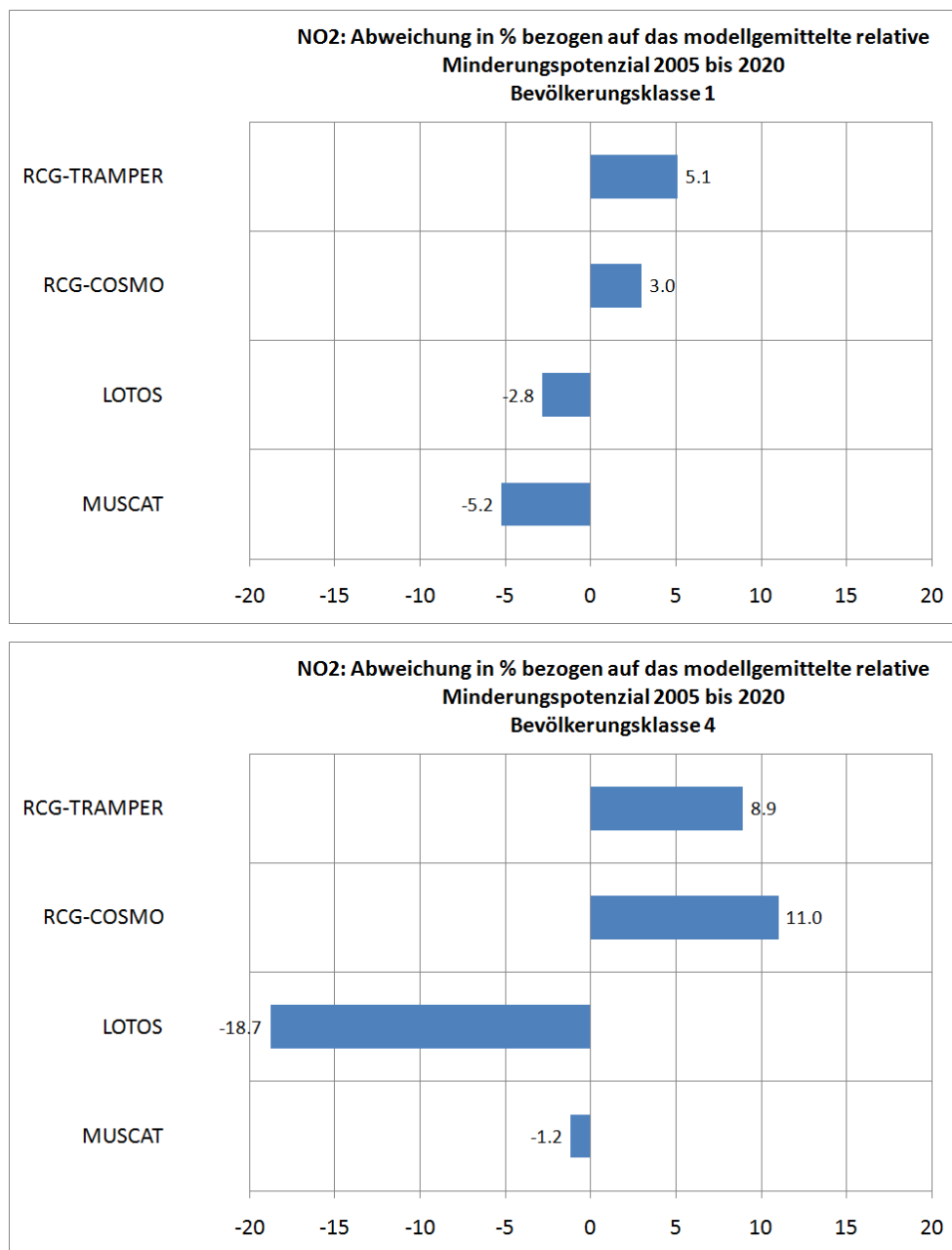


Abbildung 5-14 Streuung (%) des relativen Minderungspotenzials der NO₂-Jahresmittelwerte um das aus allen Modellergebnissen gemittelte relative Minderungspotenzial.

5.4 Bandbreite der Minderungspotenziale des Szenarios MFR2020

Das umfassendste im PAREST-Projekt betrachtete Maßnahmenbündel ist das so genannte MFR-Szenario („Maximum Feasible Reduction“). Dieses Szenario umfasst alle technischen und nicht-technischen Einzelmaßnahmen, die noch zusätzlich zu den bereits in der Emissionsreferenz 2020 umgesetzten Maßnahmen ergriffen werden könnten (Theloke et al., 2010). Dieses Szenario wurde ebenfalls mit allen Modellkombinationen berechnet.

Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 zeigen die durch das CLE-Szenario 2020 und zusätzlich die durch das MFR-Szenario 2020 erreichbaren Minderungspotenziale für die PM₁₀- und NO₂-Jahresmittelwerte. Für PM₁₀ (Abbildung 5-15) liegen die durch das MFR2020-Szenario erreichbaren Minderungen in ländlichen Regionen zwischen 0.2 µg/m³ (RCG-COSMO) und 0.8 µg/m³ (COSMO-MUSCAT). In Ballungsräumen begrenzen RCG-COSMO und RCG-TRAMPER die Bandbreite der PM₁₀-Minderungspotenziale: 0.6 µg/m³ bis 1.1 µg/m³, womit die Bandbreite etwas geringer ist als in ländlichen Regionen. Die Modelle mit geringeren Minderungspotenzialen für das CLE-Szenario 2020 berechnen insgesamt auch geringere zusätzliche Potenziale für das Szenario MFR2020. Ähnliches gilt auch für NO₂ (Abbildung 5-16). Das Modell mit dem höchsten Minderungspotenzial für das CLE2020-Szenario (RCG-TRAMPER) berechnet auch die höchsten zusätzlichen Minderungspotenziale für das MFR2020-Szenario (0.6 µg/m³ in ländlichen Regionen, 2.1 µg/m³ in Ballungsräumen). Die Bandbreite der zusätzlichen Minderungspotenziale reicht dabei in ländlichen Regionen von 0.4 µg/m³ bis 0.6 µg/m³ und in den Ballungsgebieten von 1.5 µg/m³ bis 2.1 µg/m³. Das MFR-Szenario 2020 führt damit in Ballungsgebieten zu einer Verstärkung des PM₁₀-Minderungspotenzials des CLE2020-Szenarios im Bereich von 23% bis 31% (Abbildung 5-17) und zu einer Verstärkung des entsprechenden NO₂-Minderungspotenzials im Bereich von 17% bis 29% (Abbildung 5-18). Die höchsten relativen Verstärkungen werden mit dem LOTOS-EUROS-Modell berechnet, die niedrigsten mit RCG-COSMO-EU.

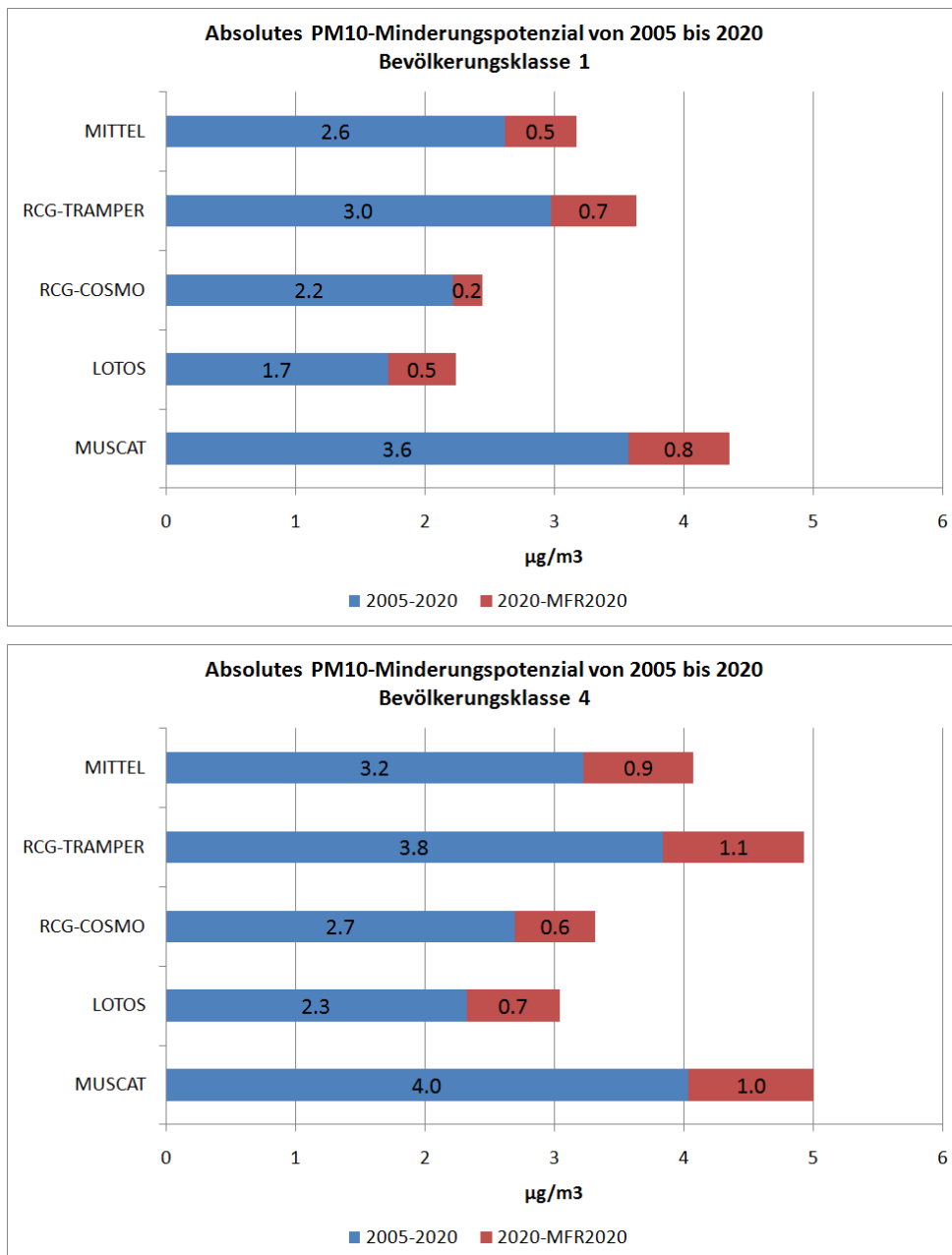


Abbildung 5-15 Absolute Abnahmen der PM10-Jahresmittelwerte, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (CLE-Referenzszenario) und dem zusätzlichen MFR-Szenario 2020 erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1) und Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4). Mittel: Mittelwert des Minderungspotenzials berechnet aus den Einzelergebnissen der 4 Modellanwendungen.

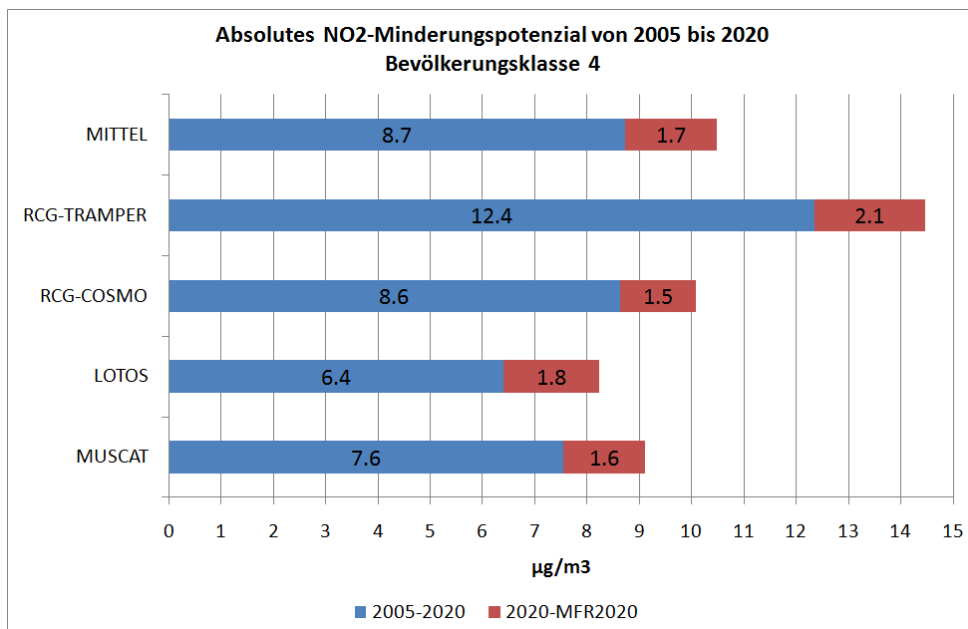
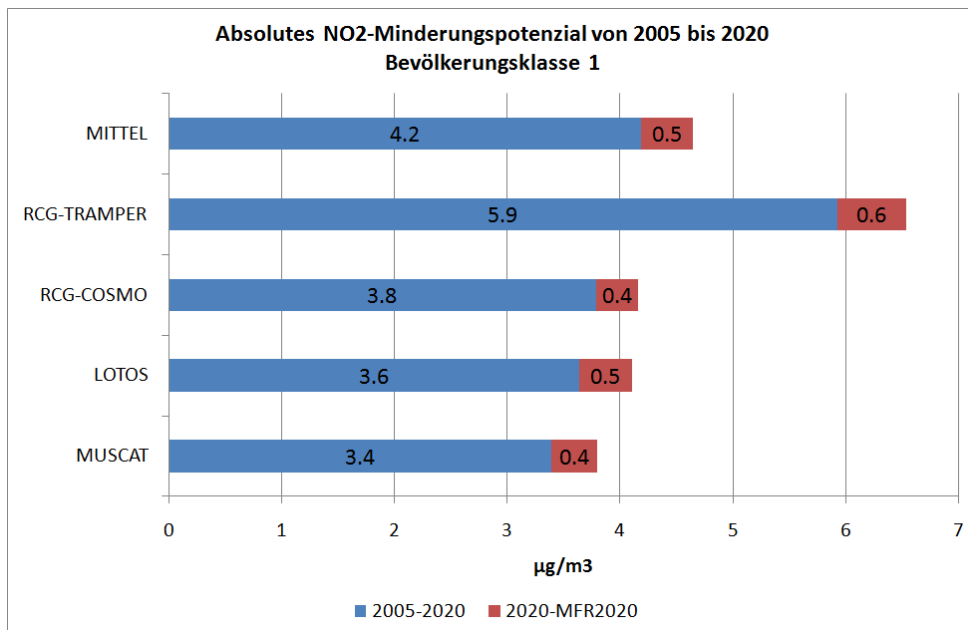


Abbildung 5-16 Absolute Abnahmen der NO₂-Jahresmittelwerte, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (CLE-Referenzszenario) und dem zusätzlichen MFR-Szenario 2020 erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1) und Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4). Mittel: Mittelwert des Minderungspotenzials berechnet aus den Einzelergebnissen der 4 Modellanwendungen.

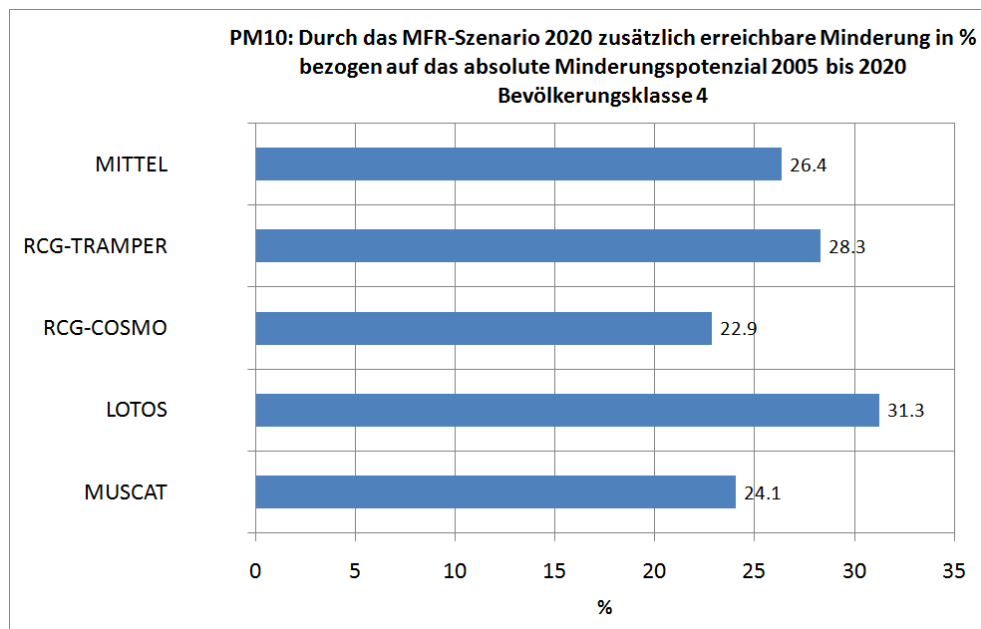
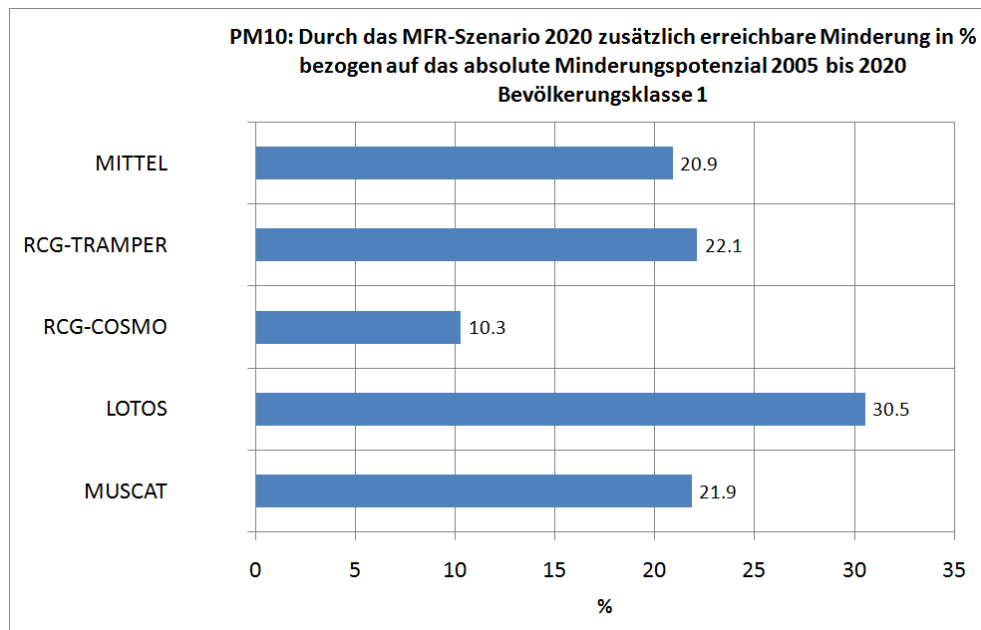


Abbildung 5-17 Zusätzliches Minderungspotenzial des Szenarios MFR2020 in % bezogen auf die durch das CLE-Szenario 2020 erreichbaren absoluten Minderungen der PM10-Jahresmittelwerte.

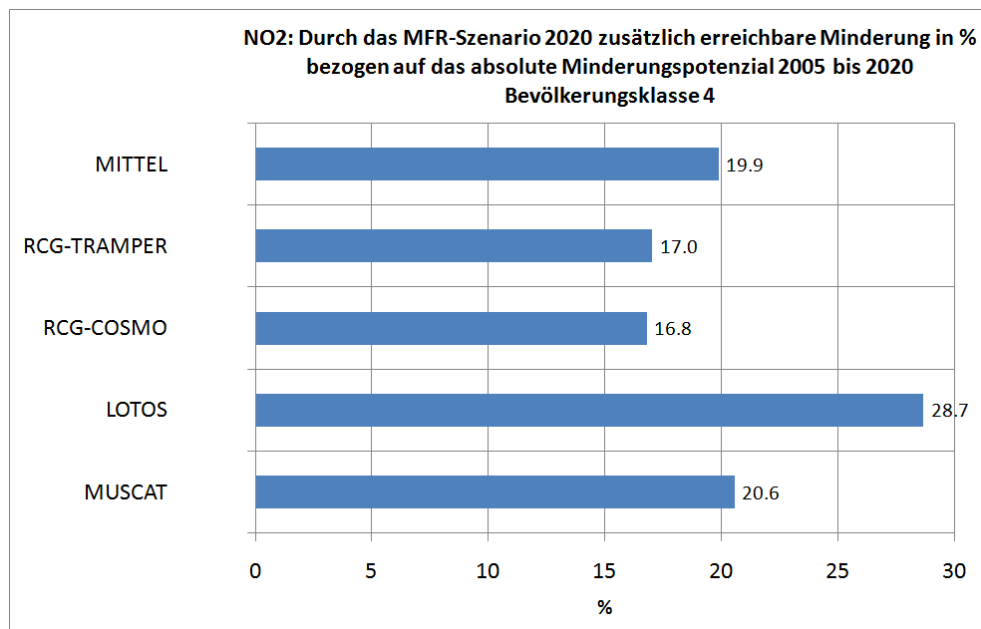
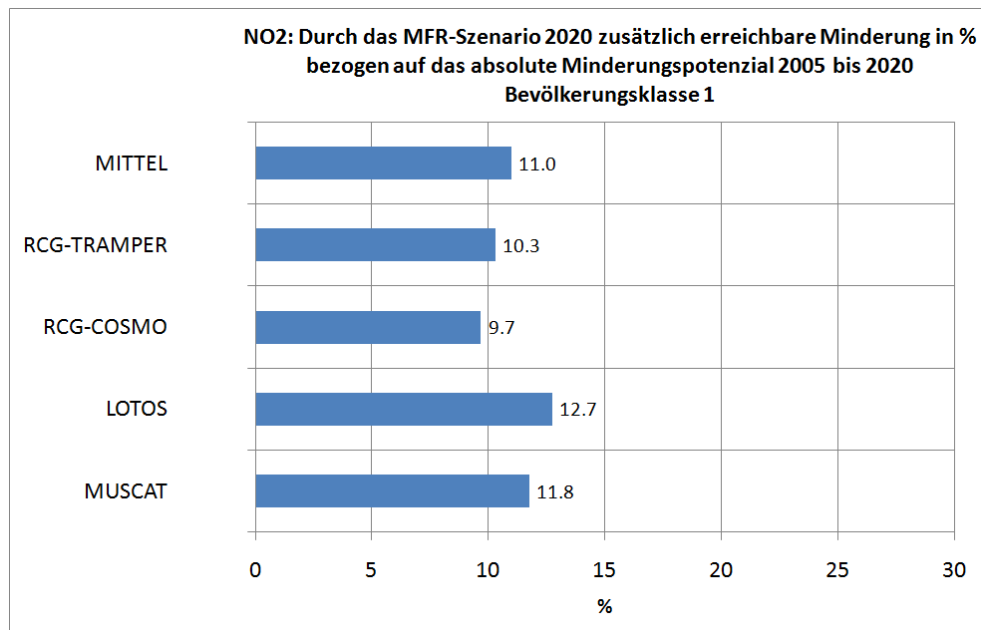


Abbildung 5-18 Zusätzliches Minderungspotenzial des Szenarios MFR2020 in % bezogen auf die durch das CLE-Szenario 2020 erreichbaren absoluten Minderungen der NO₂-Jahresmittelwerte.

6 Zusammenfassung

In diesem Bericht wurden die im PAREST-Projekt zur Abschätzung der Unsicherheit in der Kausalkette Emission-Transmission-Immission durchgeführten Untersuchungen vorgestellt. Diese umfassen hauptsächlich die durch die Unsicherheiten in den Emissionsdatenbasen sowie die durch die Anwendung verschiedener Modelle bedingte Bandbreite der Immissionsergebnisse.

Neben dem RCG-Modell, das standardmäßig mit dem auf Beobachtungen basierenden meteorologischen Treiber TRAMPER betrieben wird, kamen im PAREST-Projekt auch noch andere Modelle bzw. alternative Modellkombinationen zum Einsatz. Insgesamt wurden angewandt:

- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem diagnostischen TRAMPER-System: RCG-TRAMPER, Standardmodellkonfiguration in PAREST
- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Wettermodell COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes: RCG-COSMO-EU
- LOTOS-EUROS, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Wettermodell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettersvorhersage, EZMW
- MUSCAT, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Modell COSMO des Deutschen Wetterdienstes.

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

Die immissionsseitigen Auswirkungen der Unsicherheiten in den Emissionsreferenzen wurden ausschließlich durch Anwendungen des RCG-TRAMPER-Modells mit den im PAREST-Projekt erstellten unteren und oberen Emissionsschranken untersucht. Diese Unsicherheitsabschätzungen beziehen sich nur auf die deutschen Emissionen. Die Referenzemissionen außerhalb von Deutschland blieben bei dieser Betrachtung daher unverändert. Die größten Emissionsabweichungen nach oben gibt es in den Referenzen 2005, 2010, 2015 und 2020 in der Summe über alle Emissionen für die NO_x - und PM_{10} -Emissionen. Nach unten treten die größten Abweichungen bei den NH_3 - und den PM -Emissionen auf. Insgesamt die geringsten Abweichungen werden für die SO_2 -Emissionen ermittelt. Im Mittel sind die möglichen Abweichungen nach oben größer als diejenigen nach unten.

Die durch die Unsicherheitsbereiche der Emission verursachten Immissionsbandbreiten der Referenzen 2005, 2010, 2015 und 2020 wurden für die PM_{10} - und die NO_2 -Jahresmittelwerte berechnet.

In ländlichen Regionen beträgt die durch die Unsicherheitsbereiche der Emissionen verursachte mittlere Bandbreite der NO_2 -Jahresmittelwerte $4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, die der PM_{10} -Jahresmittelwerte $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die für den Referenzfall 2005 berechneten NO_2 -Jahresmittelwerte könnten damit im Extremfall der unteren Emissionsschwelle im Mittel $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niedriger (PM_{10} -Jahresmittelwerte $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oder im Falle der oberen Emissionsschwelle um $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höher liegen (PM_{10} -Jahresmittelwerte $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

In Ballungsräumen beträgt die mittlere NO_2 -Spannbreite $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und reicht von $-1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis zu $+3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für die PM_{10} -Jahresmittelwerte wird eine Immissionsbandbreite von $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet, womit die auf den mittleren Emissionen beruhende Immissionsreferenz

2005 in Ballungsräumen bis zu $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niedriger oder bis zu $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höher ausfallen könnte.

In Prozenten ausgedrückt könnten die für den Referenzfall berechneten NO_2 -Jahresmittelwerte in ländlichen Regionen auch maximal knapp 9% niedriger oder maximal 25% höher liegen. Der entsprechende Bereich für die PM_{10} -Jahresmittelwerte reicht von -5% bis +7%. In Ballungsräumen umfasst die durch die Emissionsunsicherheiten hervorgerufene relative Bandbreite der NO_2 -Immissionen den Bereich von knapp -7% bis zu knapp +13%, derjenige der PM_{10} -Immissionen den Bereich von -9% bis knapp +14%.

Die für die Emissionsreferenz 2020 ermittelten Immissionsbandbreiten sind absolut betrachtet niedriger als diejenigen für die Emissionsreferenz 2005, was auf die niedrigeren Emissionen der Referenz 2020 zurückzuführen ist. Die relativen Bandbreiten sind aber denen für die Referenz 2005 ähnlich.

Das Minderungspotenzial von der Ausgangssituation 2005 bis zu den Jahren 2010, 2015 und 2020 wurde zur Abschätzung der Potenzialbandbreite auch mit den für diese Referenzjahre abgeleiteten unteren und oberen Emissionsschranken berechnet. Die relative Schwankungsbreite des mittleren NO_2 -Minderungspotenzials, d.h. des Potenzials das auf den mittleren Emissionsabschätzungen beruht, reicht in ländlichen Regionen von circa -8% (untere Emissionsschranke) bis circa +10% (obere Emissionsschranke). Die entsprechende Schwankungsbreite des PM_{10} -Minderungspotenzials reicht von circa -5% bis +3%. In Ballungsräumen liegt die relative Schwankungsbreite des mittleren NO_2 -Minderungspotenzials zwischen -5% und +6%, diejenige des mittleren PM_{10} -Minderungspotenzials zwischen -9% und +13%.

Auch die Methodik der Berechnung der Verkehrsemissionen stellt eine Unsicherheit dar, die in den oben diskutierten Emissionsbandbreiten nicht erfasst ist. Die Berechnung der Verkehrsemissionen erfolgte im PAREST-Projekt mit einer modifizierten Version des vom Umweltbundesamt verwendeten Verkehrsmodells TREMOD 4.17 (Transport Emission Model, hier genannt TREMOD 4.17M). Alternativ dazu wurden im Rahmen des Projekts auch Emissionsdatensätze erstellt, in denen die Verkehrsemissionen mit dem europäischen Modell TREMOVE, Version 2.7 berechnet wurden.

Die mit den beiden unterschiedlichen Berechnungsmethoden der Verkehrsemissionen ermittelten PM_{10} -Minderungspotenziale von 2005 nach 2020 sind vergleichbar. Damit erhöht sich der Unsicherheitsbereich des Minderungspotenzials für PM_{10} nicht, wenn man die Verkehrsemissionen anstatt mit dem Verkehrsmodell TREMOD 4.17M mit dem Verkehrsmodell TREMOVE 2.7 berechnet. Für das NO_2 -Minderungspotenzial gilt dies nur begrenzt. In ländlichen Regionen liegt das auf der Basis von TREMOVE 2.7 berechnete Minderungspotenzial zwar nahe bei dem mittleren Potenzial auf der Basis von TREMOD 4.17M, in Ballungsgebieten ist das TREMOVE 2.7-Minderungspotenzial aber deutlich geringer als das Minderungspotenzial, das auf den mittleren Referenzemissionen unter Verwendung von TREMOD 4.17M beruht. Dies bedeutet, dass die auf Basis der mit TREMOVE 2.7 berechneten Verkehrsemissionen prognostizierten NO_2 -Abnahmen geringer sind als diejenigen auf Basis von TREMOD 4.17M. Das mit den TREMOVE-Verkehrsemissionen berechnete NO_2 -Minderungspotenzial ist sogar etwas geringer als das für die untere Emissionsschranke berechnete Potenzial, obwohl in dem TREMOVE 2.7-Lauf alle Emissionen außer den Verkehrsemissionen dem mittleren Stand entsprechen. Dies bedeutet, dass allein der Austausch der Berechnungsmethodik der Verkehrsemissionen eine Ergebnisbandbreite bewirken kann, die in der Größenordnung der hier als Summe für alle Verursachergruppen berechneten Emissionsbandbreite liegt.

Die Beurteilung der mit den vier unterschiedlichen Modellkombinationen berechneten Jahresmittelwerte für die Emissionsreferenz 2005 erfolgte zum Einen durch die Ermittlung der Abweichungen vom Ensemblemittel, zum Anderen durch den Vergleich mit Messungen.

Für den PM10-Jahresmittelwert streuen die Modellergebnisse um circa -35% bis +30% um das Ensemblemittel, d.h. den Mittelwert berechnet aus allen Einzelergebnissen. Die niedrigsten Werte berechnet das Modell LOTOS-EUROS, die höchsten Werte das Modell RCG-TRAMPER. Bei den NO₂-Jahresmittelwerten reicht die Streuung um den Mittelwert von circa -15% bis +35%. Die in PAREST standardmäßig verwendete Modellkonfiguration RCG-TRAMPER liegt damit am oberen Ende der Ergebnisbandbreite. Hauptursache der höheren Konzentrationen ist die Verwendung des auf Beobachtungen basierenden meteorologischen Treibers TRAMPER, der im Gegensatz zu den prognostischen Treibern der anderen Modelle zu Werten einiger Grenzschichtvariablen führt, die hohe Konzentrationen begünstigen.

In der räumlich gemittelten Auswertung werden die beobachteten PM10-Jahresmittelwerte 2005 von allen Modellen 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 interpolierten Messfeldern für PM10, NO₂ (und auch Ozon) auf. Insgesamt umfasst die Bandbreite aller Modellergebnisse bei den PM10-Jahresmittelwerten einen Bereich von circa -55% bis -10%, bei den NO₂-Jahresmittelwerten einen Bereich von circa -25% bis +10%. Diese Abweichungen der Modellergebnisse von Beobachtungen beziehen sich auf mittlere Auswertungen für die Bewertungsklassen. Im Einzelfall, d.h. im direkten Vergleich von Stationsbeobachtungen mit den entsprechenden Modellergebnissen, können die Abweichungen größer sein und unter speziellen meteorologischen Bedingungen insbesondere bei PM10 auch den Faktor 2 (100%) erreichen.

In einem weiteren Schritt wurden die Bandbreiten der Minderungspotenziale 2005 bis 2020 bestimmt. Die verschiedenen Modelle prognostizieren bis 2020 eine Abnahme der PM10-Jahresmittelwerte zwischen 19% und 24% in ländlichen Regionen und zwischen 17% und 22% in Ballungsräumen. Die Bandbreite der ermittelten Abnahmen der NO₂-Jahresmittelwerte umfasst den Bereich von 42% bis 47% für ländliche Regionen und 33% bis 44% für Ballungsräume. Bezogen auf die aus allen Einzelergebnissen bestimmten mittleren relativen Abnahmen bedeutet dies für die bis 2020 erreichbaren Minderungspotenziale einen Unsicherheitsbereich von -20% bis +20%.

Das umfassendste im PAREST-Projekt betrachtete Maßnahmenbündel ist das so genannte MFR-Szenario („Maximum Feasible Reduction“). Dieses Szenario umfasst alle technischen und nicht-technischen Einzelmaßnahmen, die noch zusätzlich zu den bereits in der Emissionsreferenz 2020 für das CLE-Szenario umgesetzten Maßnahmen ergriffen werden könnten. Dieses Szenario wurde ebenfalls mit allen Modellkombinationen berechnet. Die Modelle prognostizieren für das MFR2020-Szenario in Ballungsräumen eine weitere Abnahme der PM10-Jahresmittelwerte zwischen 23% und 31% und der NO₂-Jahresmittelwerte zwischen 17% und 29%. Die höchsten relativen Verstärkungen werden mit dem LOTOS-EUROS-Modell, die geringsten mit dem RCG-COSMO-EU-Modell berechnet. Das im PAREST-Projekt verwendete Standard-Modell RCG-TRAMPER berechnet in Ballungsräumen eine mit dem MFR2020-Szenario erreichbare Verstärkung des CLE2020-Minderungspotenzials von 28% für die PM10-Jahresmittelwerte und 17% für die NO₂-Jahresmittelwerte.

Die Bandbreiten der mit den Maßnahmen des CLE-Szenarios und des CLE-Szenarios+MFR2020 bis 2020 erreichbaren relativen Minderungen sind nochmals in der Tabelle 6-1 zusammengefasst.

PM10-Jahresmittelwerte	Bandbreite der Modell- ergebnisse	Standardmodell RCG-TRAMPER
Relative Abnahme bis 2020, CLE-Szenario	17% bis 22%	18%
Relative Abnahme bis 2020, CLE-Szenario+MFR2020	21% bis 28%	23%
NO₂-Jahresmittelwerte		
Relative Abnahme bis 2020, CLE-Szenario	33% bis 44%	44%
Relative Abnahme bis 2020, CLE-Szenario+MFR2020	43% bis 52%	51%

Tabelle 6-1 Die auf Basis der Modellergebnisse RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS-EUROS und COSMO-MUSCAT ermittelte Bandbreite der relativen PM10- und NO₂-Minderungspotenziale für die Emissionsänderungen 2005 bis 2020.

Insgesamt ergibt sich für die berechneten Jahresmittelwerte infolge der Unsicherheiten in der Emissionsdatenbasis eine PM10-Bandbreite von circa -10% bis +15% und eine NO₂-Bandbreite von circa -10% bis +25%. Die Bandbreiten der Immissionsergebnisse infolge der Anwendung verschiedener Modelle umfasst für PM10 den Bereich von -35% bis +30%, für NO₂ den Bereich von circa -15% bis +35%, jeweils bezogen auf das Ensemble-Mittel. Sie sind damit größer als die Bandbreiten verursacht durch die Unsicherheiten in den Emissionsdaten (ermittelt mit einer Modellanwendung). Die Bandbreiten sind bei einer relativen Auswertung der Modellergebnisse insgesamt deutlich geringer als bei einer absoluten Auswertung.

7 Literatur

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

Denier van der Gon, H.A.C., A.J.H. Visschedijk, H. van der Brugh (2009). Gridded European emission data for the projection years 2010, 2015 and 2020 based on the IIASA GAINS NEC scenarios. TNO-report TNO-034-UT-2009-02306_RPT-ML. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, TNO, Niederlande.

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.

Jörß, W., U. Kugler, J. Theloke (2010). Emissionen im PAREST-Referenzszenario 2005 – 2020. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT

Jörß, W. und V. Handke (2010). Unsicherheiten der PAREST-Referenz-Emissionsdatenbasis. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT.

Kerschbaumer, A. (2010). 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.

Kugler, U., Jörß, W., Theloke, J. (2010). Verkehrsemissionsmodellierung für PAREST – Modellvergleich und alternative Szenarien, Juni 2010. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, IER-Universität Stuttgart.

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

Stern, R. (2004a). Großräumige PM10-Ausbreitungsmodellierung: Abschätzung der gegenwärtigen Immissionsbelastung in Europa und Prognose bis 2010. KRdL-Experten-Forum "Staub und Staubinhaltsstoffe", 2004-11-11/10, Düsseldorf, VDI-KRdL-Schriftenreihe 33, 2004

Stern, R. (2004b). Weitere Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM-CALGRID für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität und ihrer Tochterrichtlinien. Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben 201 43 250 des Umweltbundesamts „Anwendung modellgestützter Beurteilungssysteme für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität und ihrer Tochterrichtlinien“

Stern, R. (2006). Der Beitrag des Ferntransports zu den PM₁₀- und den NO₂-Konzentrationen in Deutschland unter besonderer Betrachtung der polnischen Emissionen: Eine Modellstudie. Abschlussbericht zu dem F&E-Vorhaben 204 42 202/03 „Analyse und Bewertung der Immissionsbelastung durch Feinstaub in Deutschland durch Ferntransporte“ und zu dem F&E-Vorhaben 202 43 270 „Entwicklung von Modellen zur Identifizierung von Schadstoffquellen - insbesondere im Verkehrsbereich- im Rahmen der 22. BImSchV - Dokumentation,

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. (2010a). Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: PM₁₀- und PM_{2.5}-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren Reduzierung der 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. (2010b). Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: NO₂- und O₃-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren Reduzierung der 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. (2010c). 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.

Stern, R. (2010d). Anwendung des RCG-Modells auf die Ballungsräume Berlin, München, Ruhrgebiet. 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. (2010e). Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: Verkehrsmodell TREMOD und Verkehrsmodell TREMOVE. 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. (2010f). Anwendung von chemischen Transportmodellen im Rahmen des PAREST-Projekts: Ergebnisvergleich REM-CALGRID, LOTOS-EUROS und MUSCAT-COSMO. 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.

Theloke, J., U. Kugler, W. Jörß, B. Thiruchittampalam, T. Kampffmeyer, M., Uzbasich, U. Dämmgen, P. Builtjes, R. Stern (2010). Beschreibung der maßnahmenbasierten und hypothetischen Maßnahmenbündel in PAREST. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Thiruchittampalam, B., Köble, R., Theloke, J., Kugler, U., Uzbasich, M., Kampffmeyer, T. (2010). Berechnung von räumlich hochaufgelösten Emissionen für Deutschland. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

8 Anhang E: 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	4
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.....	5
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	6
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.....	6
Abbildung 3-1 Abweichungen der NO ₂ -Jahresmittelwerte (µg/m ³) von den Werten für den Referenzfall 2005 bei Anwendung der oberen (oben) und der unteren (unten) Emissionsschranke. ...	14
Abbildung 3-2 Abweichungen der PM10-Jahresmittelwerte (µg/m ³) von den Werten für den Referenzfall 2005 bei Anwendung der oberen (oben) und der unteren (unten) Emissionsschranke. ...	15
Abbildung 3-3 Absolute (oben) und relative (unten) Unsicherheitsbereiche der NO ₂ -Jahresmittelwerte abgeleitet aus den Ober- und Unterschranken der Emissionsreferenz 2005. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 2.	16
Abbildung 3-4 Absolute (oben) und relative (unten) Unsicherheitsbereiche der PM10-Jahresmittelwerte abgeleitet aus den Ober- und Unterschranken der Emissionsreferenz 2005. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 2.	17
Abbildung 3-5 Abweichungen der NO ₂ -Jahresmittelwerte (µg/m ³) von den Werten für den Referenzfall 2020 bei Anwendung der oberen (oben) und der unteren (unten) Emissionsschranke. ...	18
Abbildung 3-6 Abweichungen der PM10-Jahresmittelwerte (µg/m ³) von den Werten für den Referenzfall 2020 bei Anwendung der oberen (oben) und der unteren (unten) Emissionsschranke. ...	19
Abbildung 3-7 Absolute (oben) und relative (unten) Unsicherheitsbereiche der NO ₂ -Jahresmittelwerte abgeleitet aus den Ober- und Unterschranken der Emissionsreferenz 2020. Mittlere Auswertung für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 2.	20
Abbildung 3-8 Absolute (oben) und relative (unten) Unsicherheitsbereiche der PM10-Jahresmittelwerte abgeleitet aus den Ober- und Unterschranken der Emissionsreferenz 2020. Mittlere Auswertung für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 2.	21
Abbildung 3-9 Absolute NO ₂ -Immissionsminderungen in µg/m ³ , die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2010, 2010 bis 2015, 2015 bis 2020 erreicht werden können. Mittlere Emissionsreferenz sowie obere und untere Grenzen der Emission (Emissionsschranken). Oben: Mittlere Auswertung für Bevölkerungsklasse 1, unten für Bevölkerungsklasse 4.....	22
Abbildung 3-10 Absolute PM10-Immissionsminderungen in µg/m ³ , die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2010, 2010 bis 2015, 2015 bis 2020 erreicht werden können. Mittlere Emissionsreferenz sowie obere und untere Grenzen der Emission (Emissionsschranken). Oben: Mittlere Auswertung für Bevölkerungsklasse 1, unten für Bevölkerungsklasse 4.....	23
Abbildung 3-11 Relative Abweichungen des NO ₂ - und PM10-Minderungspotenzials 2005 bis 2020 für die obere und untere Emissionsschwelle bezogen auf das Minderungspotenzials basierend auf den Referenzemissionen.....	24
Abbildung 4-1 Absolute PM10-Immissionsminderungen in µg/m ³ , die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 erreicht werden können. Mittlere Emissionsreferenz, obere und untere Schranken der Emission sowie mittlere Emissionsreferenz mit der Berechnung der Verkehrsemissionen nach TREMOVE2.7. Oben: Mittlere Auswertung für Bevölkerungsklasse 1, unten für Bevölkerungsklasse 4.....	27
Abbildung 4-2 Absolute NO ₂ -Immissionsminderungen in µg/m ³ , die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 erreicht werden können. Mittlere Emissionsreferenz, obere und	

untere Schranken der Emission sowie mittlere Emissionsreferenz mit der Berechnung der Verkehrsemissionen nach TREMOVE2.7. Oben: Mittlere Auswertung für Bevölkerungsklasse 1, unten für Bevölkerungsklasse 4.....	28
Abbildung 5-1 Relative Abweichungen der berechneten PM10- und NO ₂ -Jahresmittelwerte jedes Modells vom Mittelwert gebildet aus den einzelnen Modellergebnissen. Mittlere Auswertungen für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 2.	31
Abbildung 5-2 Mittlere Abweichung der PM10 und NO ₂ -Jahresmittelwerte in % der Modelle RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU (RCG-LM), LOTOS und MUSCAT von interpolierten Messungen (OI-Referenz) für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen.....	32
Abbildung 5-3 Änderung der PM10-Jahresmittelwerte in µg/m ³ (absolutes Immissionsdelta) der Emissionsreferenz 2020 bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EUROS; unten rechts: COSMO-MUSCAT.....	35
Abbildung 5-4 Änderung der PM10-Jahresmittelwerte in % (relatives Immissionsdelta) der Emissionsreferenz 2020 bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EUROS; unten rechts: COSMO-MUSCAT.....	36
Abbildung 5-5 Änderung der NO ₂ -Jahresmittelwerte in µg/m ³ (absolutes Immissionsdelta) der Emissionsreferenz 2020 bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EUROS; unten rechts: COSMO-MUSCAT.....	37
Abbildung 5-6 Änderung der NO ₂ -Jahresmittelwerte in % (relatives Immissionsdelta) der Emissionsreferenz 2020 bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Oben links: RCG-TRAMPER; oben rechts: RCG-COSMO-EU; unten links: LOTOS-EUROS; unten rechts: COSMO-MUSCAT.....	38
Abbildung 5-7 Absolute Abnahmen der PM10-Jahresmittelwerte, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (CLE-Referenzszenario) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1) und Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4). Mittel: Mittelwert des Minderungspotenzials berechnet aus den Einzelergebnissen der 4 Modellanwendungen.	39
Abbildung 5-8 Relative Abnahmen der PM10-Jahresmittelwerte, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (CLE-Referenzszenario) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1) und Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4). Mittel: Mittelwert des Minderungspotenzials berechnet aus den Einzelergebnissen der 4 Modellanwendungen.	40
Abbildung 5-9 Absolute Abnahmen der NO ₂ -Jahresmittelwerte, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (CLE-Referenzszenario) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1) und Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4). Mittel: Mittelwert des Minderungspotenzials berechnet aus den Einzelergebnissen der 4 Modellanwendungen.	41
Abbildung 5-10 Relative Abnahmen der NO ₂ -Jahresmittelwerte, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (CLE-Referenzszenario) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Auswertung für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1) und Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4). Mittel: Mittelwert des Minderungspotenzials berechnet aus den Einzelergebnissen der 4 Modellanwendungen.	42
Abbildung 5-11 Streuung (%) des absoluten Minderungspotenzials der PM10-Jahresmittelwerte um das aus allen Modellergebnissen gemittelte absolute Minderungspotenzial.....	43
Abbildung 5-12 Streuung (%) des absoluten Minderungspotenzials der NO ₂ -Jahresmittelwerte um das aus allen Modellergebnissen gemittelte absolute Minderungspotenzial.	44
Abbildung 5-13 Streuung (%) des relativen Minderungspotenzials der PM10-Jahresmittelwerte um das aus allen Modellergebnissen gemittelte relative Minderungspotenzial.....	45
Abbildung 5-14 Streuung (%) des relativen Minderungspotenzials der NO ₂ -Jahresmittelwerte um das aus allen Modellergebnissen gemittelte relative Minderungspotenzial.....	46

9 Anhang F: Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Unsicherheitsbereiche der Emissionsreferenz 2005 (Mittelwert) in %. Oben: obere Schranke, unten: untere Schranke.	8
Tabelle 3-2 Unsicherheitsbereiche der Emissionsreferenz 2010 (Mittelwert) in %. Oben: obere Schranke, unten: untere Schranke.	9
Tabelle 3-3 Unsicherheitsbereiche der Emissionsreferenz 2015 (Mittelwert) in %. Oben: obere Schranke, unten: untere Schranke.	10
Tabelle 3-4 Unsicherheitsbereiche der Emissionsreferenz 2020 (Mittelwert) in %. Oben: obere Schranke, unten: untere Schranke.	11
Tabelle 5-1 Bandbreiten der Abnahmen der PM ₁₀ -Jahresmittelwerte der Emissionsreferenz 2020 in Deutschland bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Gerundet auf volle $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. volle %. Abgeleitet aus Abbildung 5-3 bzw. Abbildung 5-4.....	33
Tabelle 5-2 Bandbreiten der Abnahmen der NO ₂ -Jahresmittelwerte der Emissionsreferenz 2020 in Deutschland bezogen auf die Emissionsreferenz 2005. Gerundet auf volle $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. volle %.....	34
Tabelle 6-1 Die auf Basis der Modellergebnisse RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS-EUROS und COSMO-MUSCAT ermittelte Bandbreite der relativen PM ₁₀ - und NO ₂ -Minderungspotenziale für die Emissionsänderungen 2005 bis 2020.	55

10 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.