

# Arbeitspaket 2

des UFOPLAN-Vorhabens  
„Strategien zur Verminderung der  
Feinstaubbelastung“

**PAREST**

„Immissionsseitige Bewertung von  
Emissionsminderungspotenzialen“  
- Ausbreitungsrechnung -

Rainer Stern

Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie

[rstern@zedat.fu-berlin.de](mailto:rstern@zedat.fu-berlin.de)

## Hauptziel von AP 2

- **Berechnung der immissionsseitigen Auswirkungen (**PM10**, **PM2.5**, **NO<sub>2</sub>**, **O<sub>3</sub>**) der unter Arbeitspaket 1 entwickelten Emissionsreferenzen und Maßnahmenbündel für das Gebiet von Deutschland**
- **Auswirkungen auf zukünftige Grenzwertüberschreitungen**

# Teil 1

- **PM10-Ursachenanalyse auf der Basis hypothetischer Szenarien:  
Ausgangssituation Emissionsreferenz 2005**
- **Konzentrationsentwicklung auf Basis der CLE-Emissionsreferenzen  
2010, 2015 und 2020**
- **Prognose der Luftqualität und Abschätzung von NO<sub>2</sub>-, PM10-, O<sub>3</sub>-  
Grenzwertüberschreitungen bis 2020**
- **Unsicherheiten und Ergebnisbandbreiten**

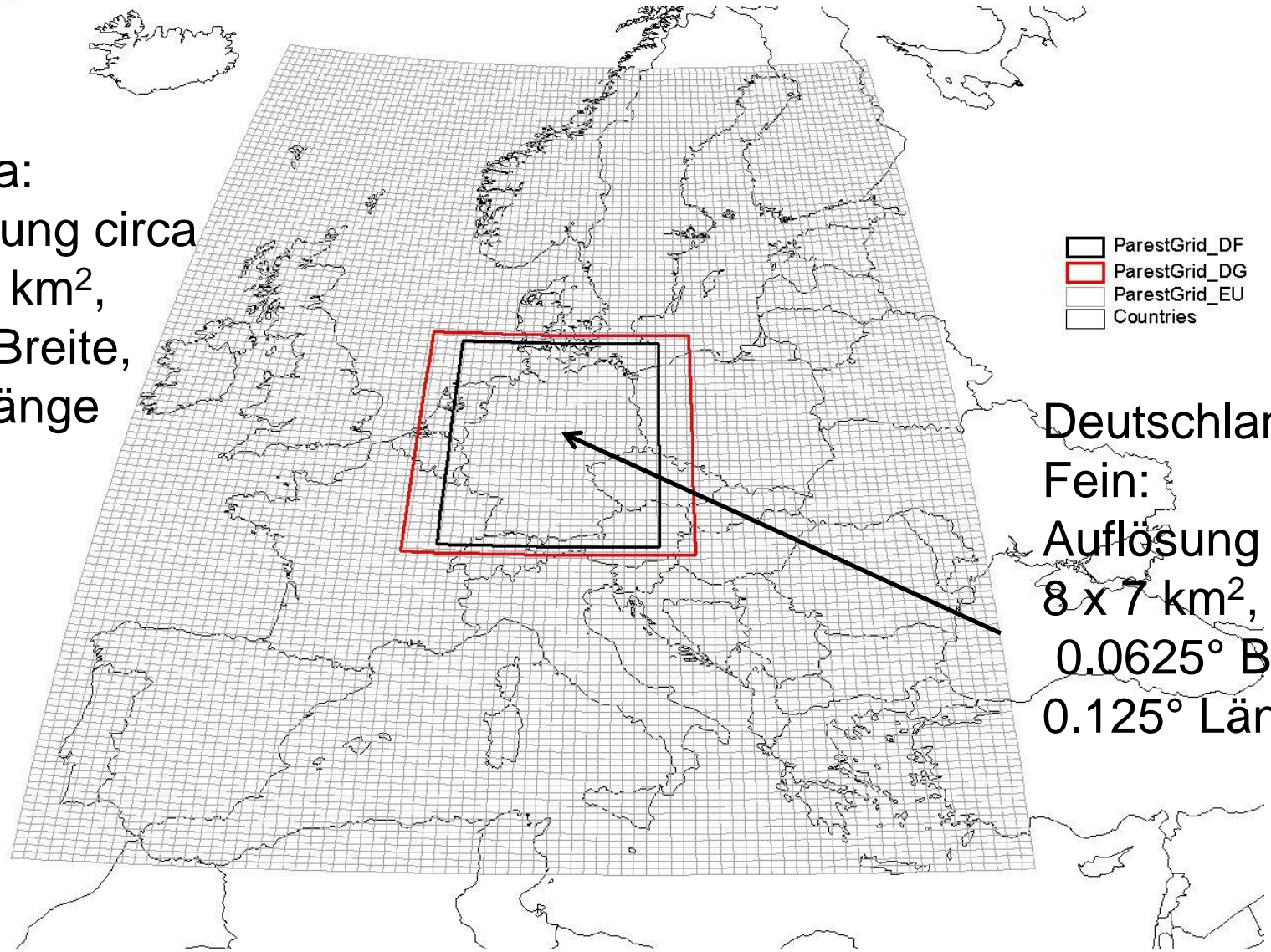
# Teil 2

## PM10 und NO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen

# Modellrechnungen

- **REM-CALGRID (RCG), LOTOS-EUROS, COSMO-MUSCAT**
- **Modellgebiete**
  - Europa, Auflösung circa 32x28 km<sup>2</sup>
  - Deutschland grob, Auflösung circa 16x14 km<sup>2</sup>
  - Deutschland fein, Auflösung circa 8x7 km<sup>2</sup>
- Hypothetische Szenarien, Reale Maßnahmenpakete
- Meteorologisches Referenzjahr: 2005

Europa:  
Auflösung circa  
32x28 km<sup>2</sup>,  
0.25° Breite,  
0.5° Länge



- ▭ ParestGrid\_DF
- ▭ ParestGrid\_DG
- ▭ ParestGrid\_EU
- ▭ Countries

Deutschland  
Fein:  
Auflösung circa  
8 x 7 km<sup>2</sup>,  
0.0625° Breite,  
0.125° Länge

Berechnungen präsentieren den ländlichen Hintergrund bzw.  
Ballungsraum-Hintergrund, keine direkte „hot-spot“-Betrachtung !

# Auswertung der Szenarien/Prognosen

- Standard: **RCG-Ergebnisse**
- Flächenhafte Visualisierung für Deutschland
- Ableitung von 6 mittleren Szenario-Bewertungszahlen
  - in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte:
    - Klasse 1: Bevölkerungsdichte < 100 Einwohner/km<sup>2</sup>
    - Klasse 2: Bevölkerungsdichte > 100, < 510 Einwohner/km<sup>2</sup>
    - Klasse 3: Bevölkerungsdichte > 510, < 945 Einwohner/km<sup>2</sup>
    - Klasse 4: Bevölkerungsdichte > 945 Einwohner/km<sup>2</sup>
  - Deutschland: Mittelung über die Fläche von Deutschland
  - Stationen, Mittelung über die AEI-Stationen (Average Exposure Indicator für PM<sub>2.5</sub>)

# Bevölkerungsdichte in Deutschland Einwohner/Km<sup>2</sup>

Bevoelkerungsdichte in 4 Klassen im Raster Nest 2

**Klasse 1:** Land, geringe Dichte

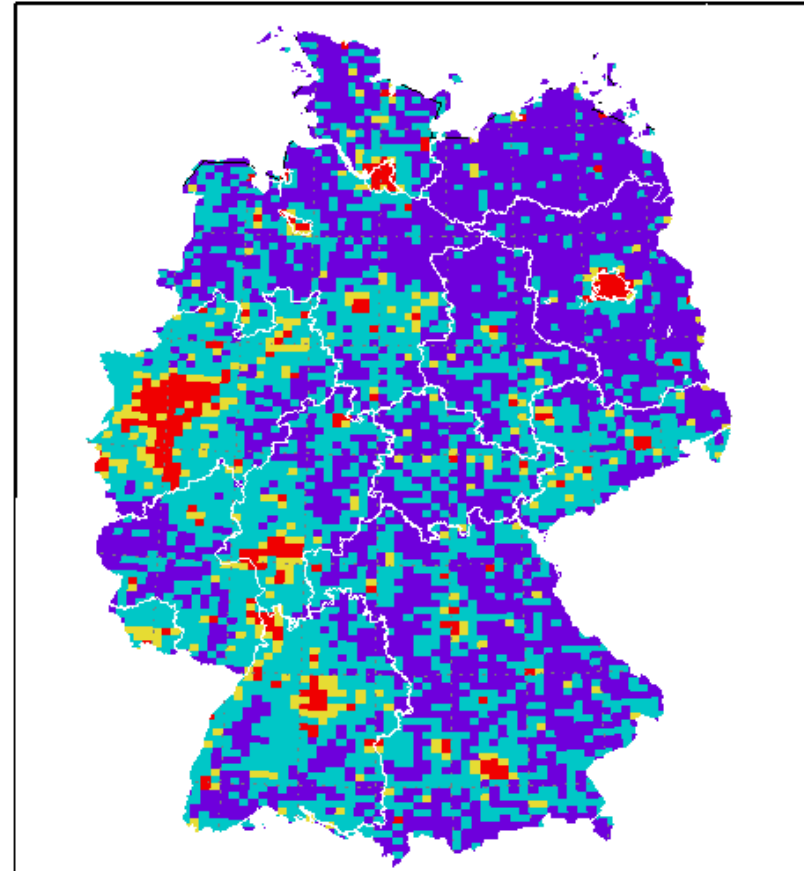
**Klasse 2:** Obere Klassengrenze definiert 50%-Grenze der Bevölkerung

**Klasse 3:** Obere Klassengrenze definiert Untergrenze der Bevölkerungsdichte in Ballungsgebieten

**Klasse 4:** Bevölkerungsdichte in Ballungsgebieten

Bevölkerungsgewichtung  
berücksichtigt die unterschiedlichen Konzentrationsabnahmen innerhalb der Fläche einer Klasse

GRADS: COLA/IGES



# Auswertung der Szenarien/Prognosen

Bevölkerungsgewichtung berücksichtigt die unterschiedlichen Immissionsdeltas innerhalb der Fläche einer Klasse

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

mit

$\Delta C_m$  mittlere, bevölkerungsgewichtete Konzentrationsänderung

$N$  Anzahl der Gitterzellen in jeder Klasse

$\Delta C_i$  Konzentrationsänderung in der Zelle  $i$

$P_i$  Bevölkerungsanzahl in Zelle  $i$

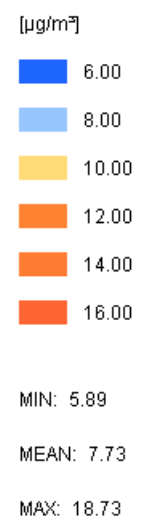
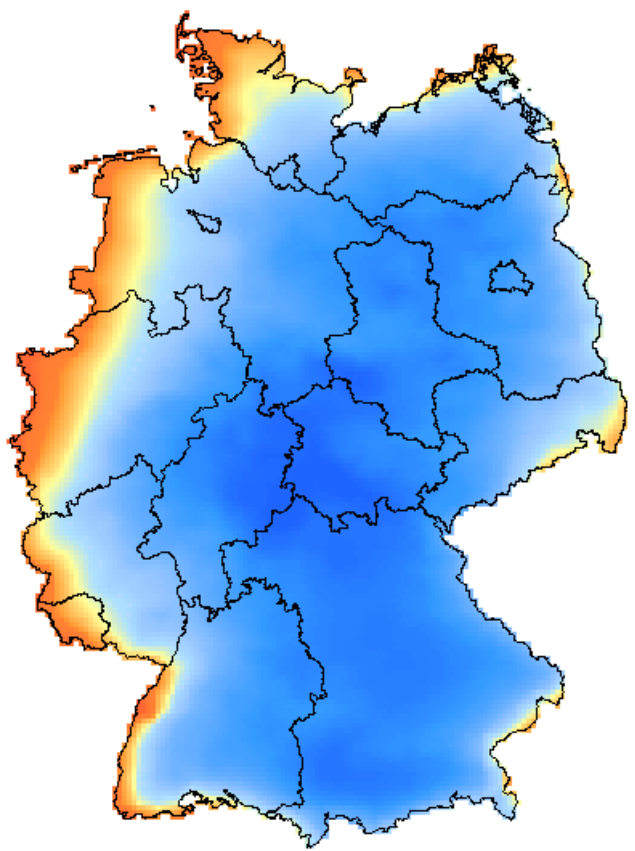
$P = \sum P_i$ , d.h. die Bevölkerungsanzahl summiert über die Gitterzellen 1

bis  $N$

## keine deutschen anthropogenen Emissionen

PM10-Jahresmittelwerte ohne deutsche Emissionen  
6-19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

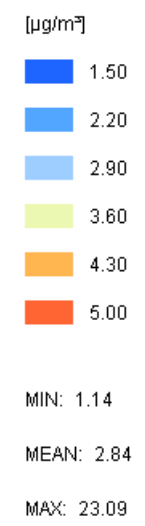
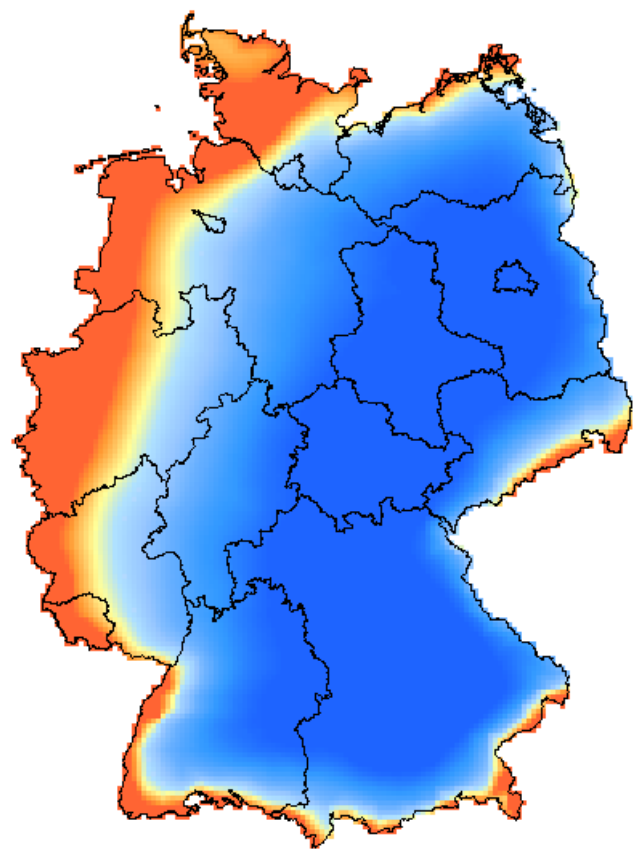
PM10\_HS\_101\_DG05\_RT\_F:JMWW [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



PM10:  
Verhältnis  
Min-Max  
1: 3

NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte ohne deutsche Emissionen  
1.5- 23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

NO2\_HS\_101\_DG05\_RT\_F:JMWW [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



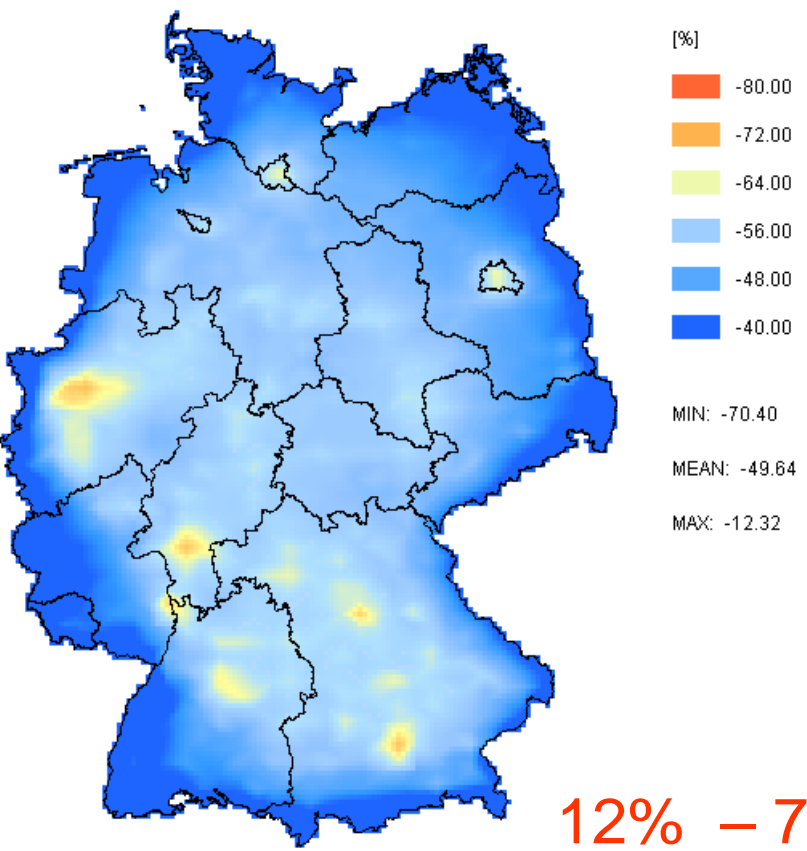
NO<sub>2</sub>:  
Verhältnis  
Min-Max  
1: 20

## keine deutschen anthropogenen Emissionen

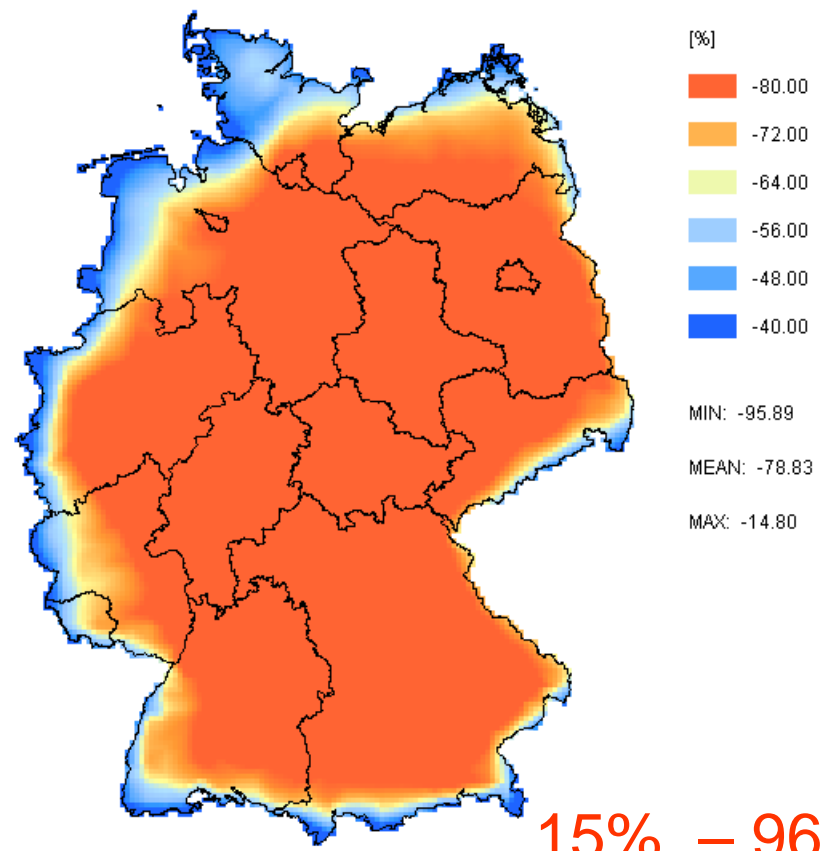
Beitrag der deutschen Emissionen zu PM10 in %

Beitrag der deutschen Emissionen zu NO<sub>2</sub> in %

ReIDiff% ((1.00 \* PM10\_HS\_101\_DG05\_RT\_F::JMW), (1.00 \* PM10\_RS\_100\_DG05\_RT\_F::JMW)) [%]    ReIDiff% ((1.00 \* NO2\_HS\_101\_DG05\_RT\_F::JMW), (1.00 \* NO2\_RS\_100\_DG05\_RT\_F::JMW)) [%]



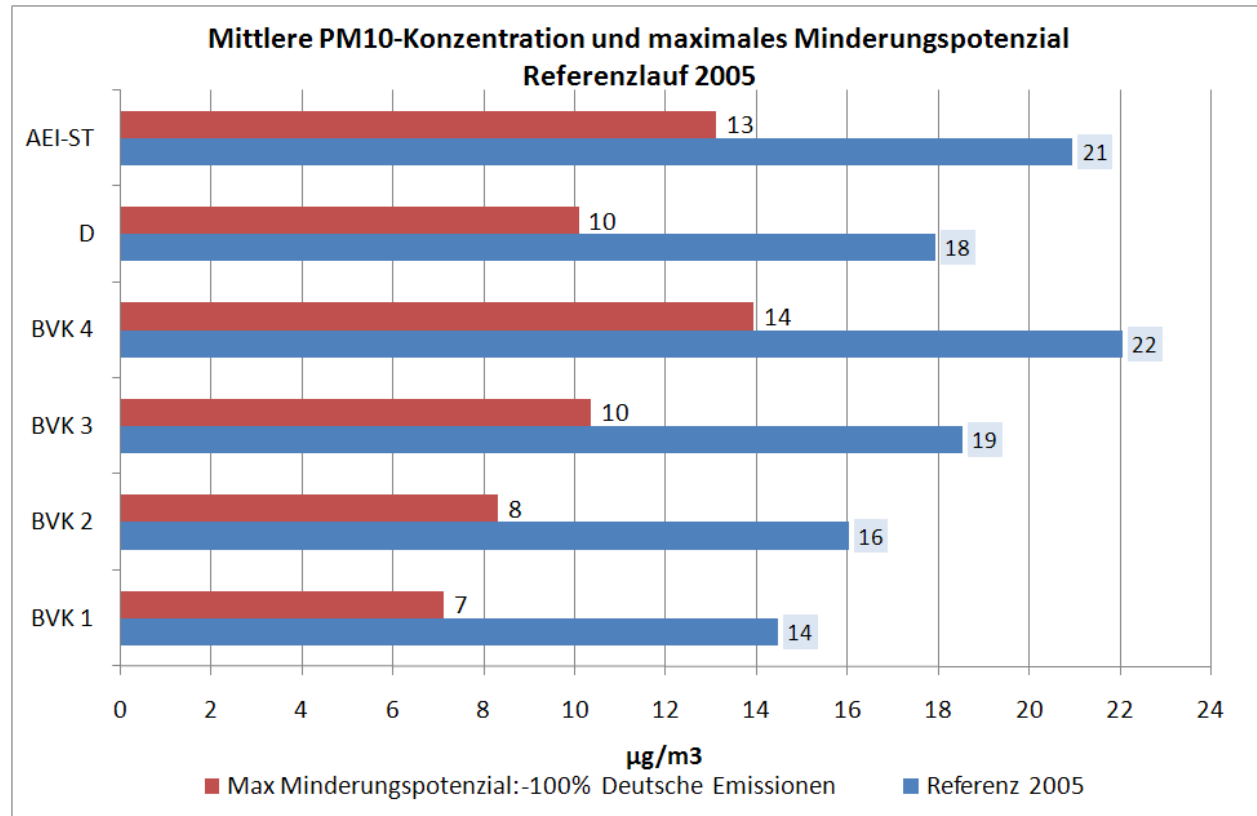
12% – 70 %  
Mittel 50%



15% – 96 %,  
Mittel 79%

# Maximales PM10-Minderungspotenzial Emissionsreferenz 2005

## Mittel über die Bevölkerungsklassen, Deutschland und die AEI-Stationen



Relative Abnahmen zwischen 49% (BVK1) und 63% (BVK4)

# PM10-Ursachenanalyse

## Hypothetische Szenarien

- Pro Stoff, alle Verursachergruppen: -100%, -50%, -25%

**NO<sub>x</sub>, NMVOC, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PMCO**

- Pro Verursachergruppe, alle Stoffe: -100%, -50%, -25%

**SNAP 1-10**

- Pro Verursachergruppe, pro Stoff: -100%

**SNAP 1-10**

**PM<sub>10</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>+NMVOC+SO<sub>2</sub>**

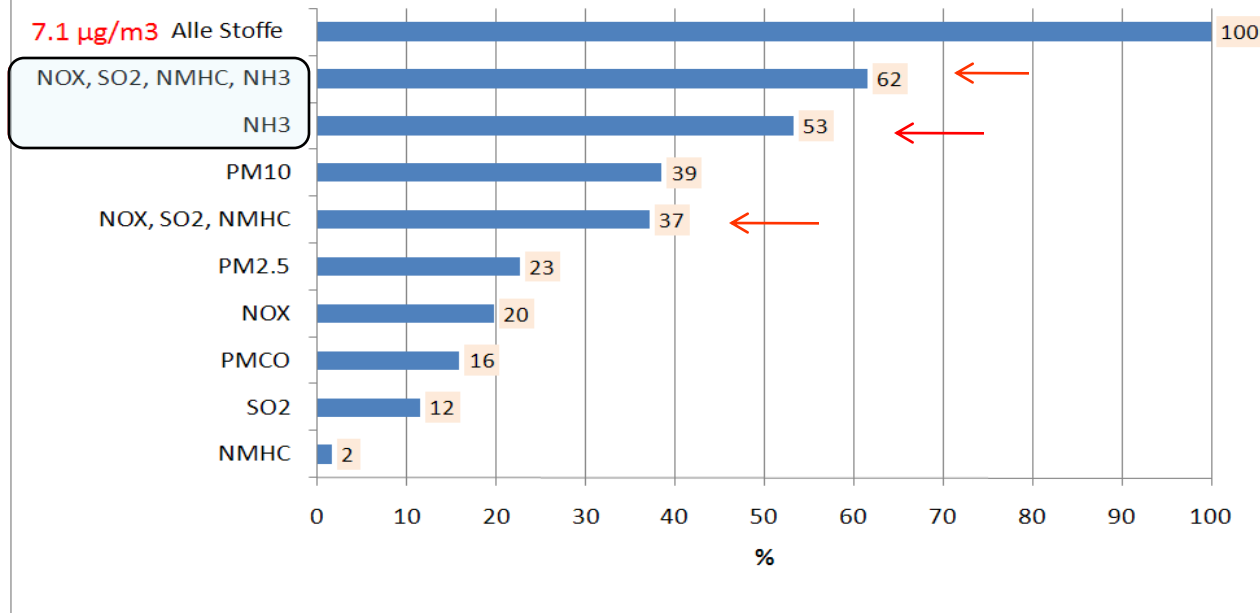


Einzelbeiträge der Vorläufer summieren sich nicht zu 100%  
Das System ist nicht-linear !!!

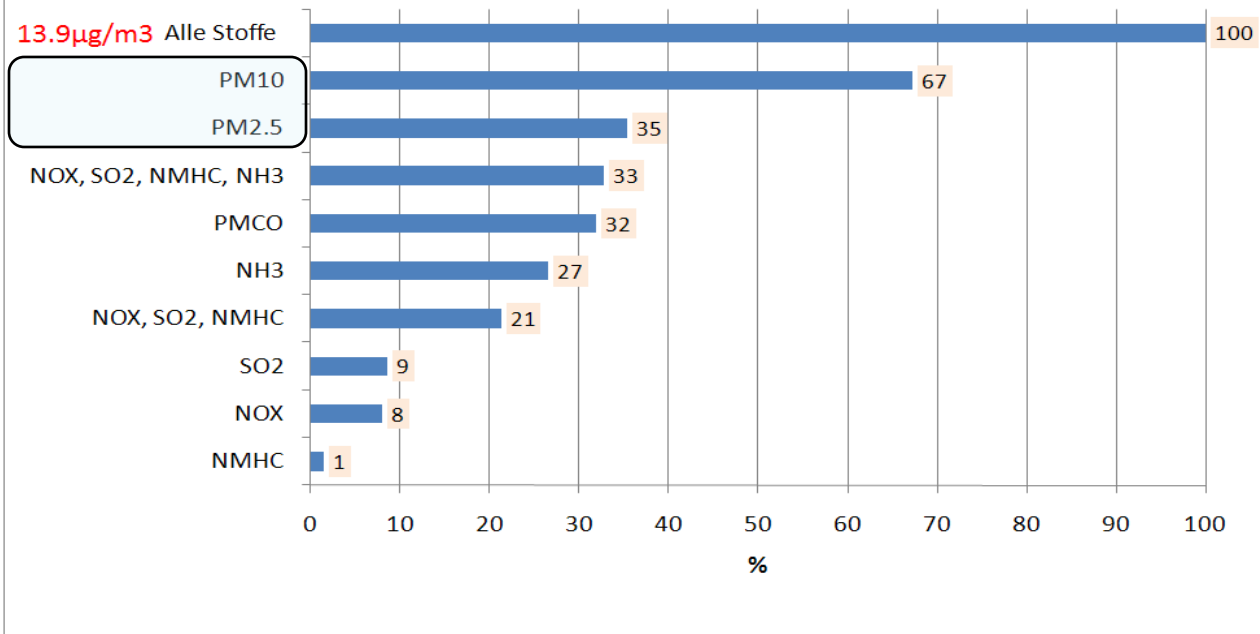
NH3: 53%  
 $\Sigma$ NOX, SO2, NMHC: 37%  
 $\Sigma$ NOX, SO2, NMHC, NH3: 62%

Die Rangfolge des relativen stoffbez. Minderungspotenzials ist unterschiedlich zwischen Land und Stadt

Alle Verursachergruppen Emissionsminderung um 100% in Deutschland  
 Relatives PM10-Minderungspotenzial, bevölkerungsgewichtet BVK1



Alle Verursachergruppen Emissionsminderung um 100% in Deutschland  
 Relatives PM10-Minderungspotenzial, bevölkerungsgewichtet BVK4



# Stoffbezogene Beiträge zum maximalen PM10- Minderungspotenzial: -100% pro Stoff

		-100%	
<b>Städtischer Hintergrund</b>	PM2.5+PMCO	2/3	
max. Minderungspotenzial	NH3,NOx, SO2,NMVOC	1/3	
14 µg/m3			
<b>Ländlicher Hintergrund</b>	NH3,NOx, SO2,NMVOC	2/3	
max. Minderungspotenzial	PM2.5+ PMCO	1/3	
7 µg/m3			

Bei den Vorläufern stellt NH3 den größten Einzelbeitrag  
Es gibt Nicht-Linearität in den Beiträgen

R.Stern, PAREST, 10. Juni 2010 Wie sieht es bei geringeren und damit realistischeren Minderungen aus ?

# Stoffbezogene Beiträge zum maximalen PM10-

## Minderungspotenzial: -100% pro Stoff und -25% pro Stoff

		-100%	-25%
<b>Städtischer Hintergrund</b>	<b>PM2.5+PMCO</b>	<b>2/3</b>	<b>3/4</b>
max. Minderungspotenzial	NH3,NOx, SO2,NMVOC	1/3	1/4
14 µg/m3			
<b>Ländlicher Hintergrund</b>	<b>NH3,NOx, SO2,NMVOC</b>	<b>2/3</b>	<b>1/2</b>
max. Minderungspotenzial	PM2.5+ PMCO	1/3	1/2
7 µg/m3			



Bei -25% Minderung wird die Bedeutung der Vorläufer, insbesondere NH<sub>3</sub>, geringer und die von PM10 größer

# Verursacherbezogene Beiträge zum maximalen PM10-Minderungspotenzial: -100% pro SNAP

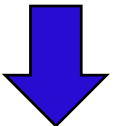
		-100%	
<b>Städtischer Hintergrund</b>	Industrie	1/3	
max. Minderungspotenzial	Straßenverkehr	1/3	
14 µg/m <sup>3</sup>	Landwirtschaft	1/4	
<b>Ländlicher Hintergrund</b>	Landwirtschaft	1/2	
max. Minderungspotenzial	Straßenverkehr	1/4	
7 µg/m <sup>3</sup>	Industrie	1/4	

Industrie: SNAP 1,3,4,5,9

Einzelbeiträge nur Abschätzungen wegen der System-Nichtlinearitäten

# Verursacherbezogene Beiträge zum maximalen PM10-Minderungspotenzial: -100% pro SNAP und -25% pro SNAP

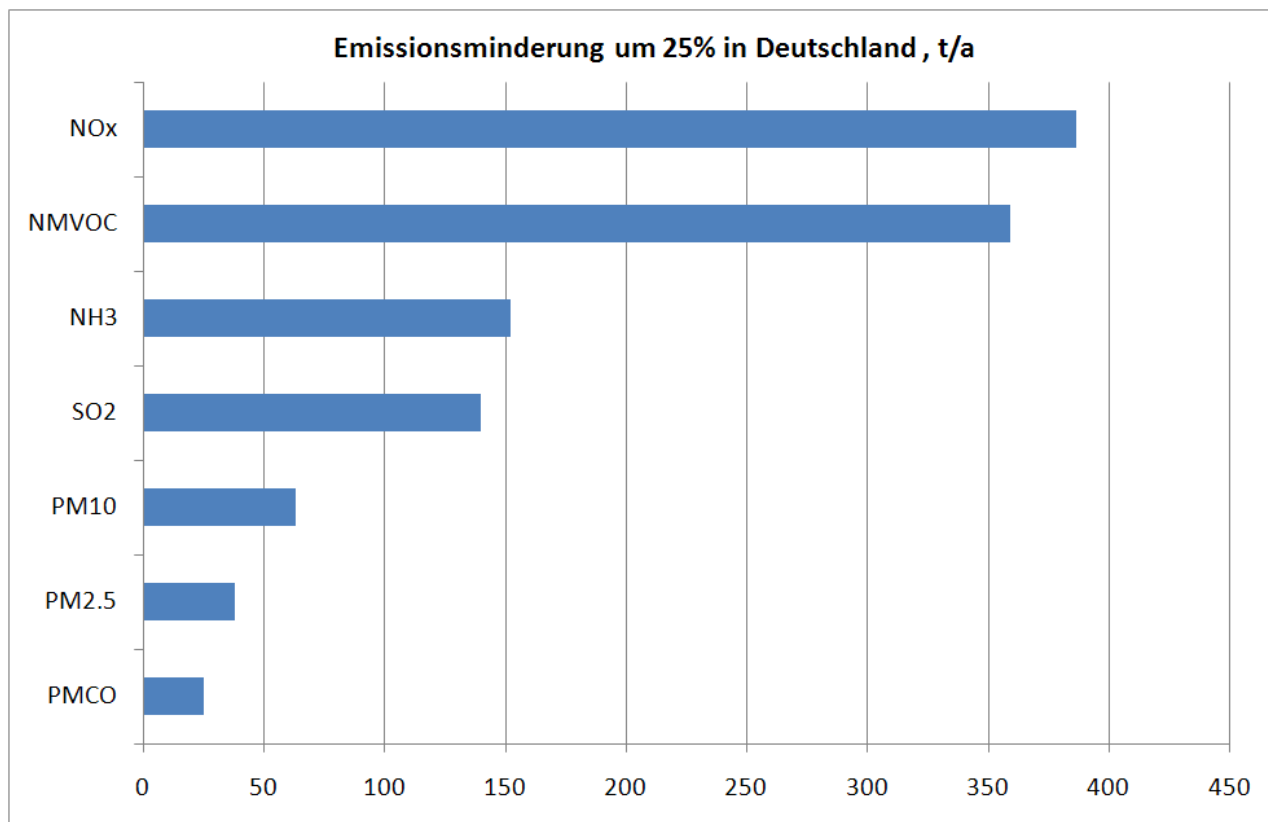
		-100%	-25%
<b>Städtischer Hintergrund</b>	Industrie	1/3	1/3
max. Minderungspotenzial	Straßenverkehr	1/3	1/3
14 µg/m <sup>3</sup>	Landwirtschaft	1/4	1/7
<b>Ländlicher Hintergrund</b>	Landwirtschaft	1/2	1/3
max. Minderungspotenzial	Straßenverkehr	1/4	1/4
7 µg/m <sup>3</sup>	Industrie	1/4	1/5

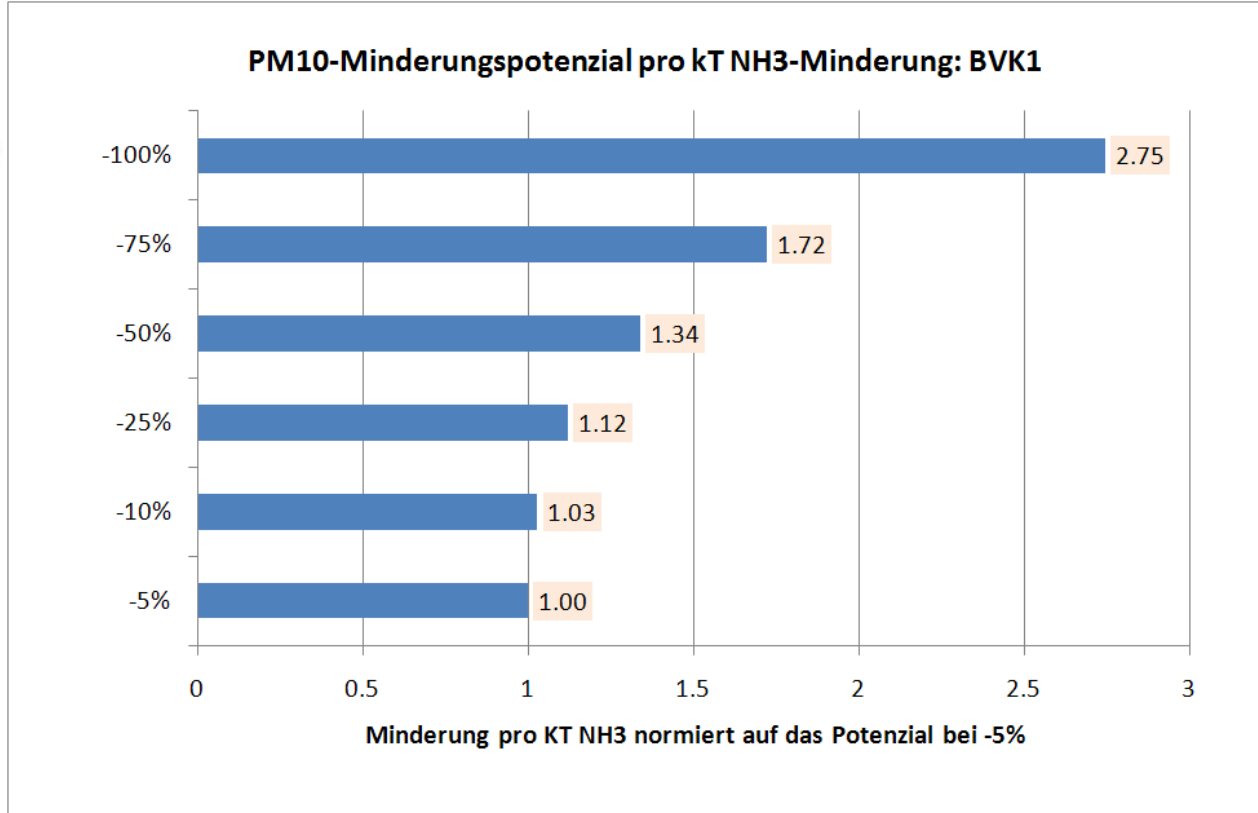


Bei -25% Minderung wird die Bedeutung der Landwirtschaft und damit insbesondere deren NH<sub>3</sub>-Emissionen deutlich geringer

# Bisher: relative Betrachtung

Berechnetes Minderungspotenzial beruht auf unterschiedlichen Emissionsminderungsmengen





Ländlicher Hintergrund

NH<sub>3</sub>-Minderungspotenzial pro kT ist stark abhängig von der Minderungsmenge  
Ähnlich in Ballungsräumen

Gilt auch für NO<sub>2</sub>, aber deutlich schwächer (20%)

- In Ballungsgebieten ist die direkte Minderung von PM<sub>10</sub> die effektivste Maßnahme zur Absenkung der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen  
(PM<sub>10</sub>: ~2/3 bis 3/4 des Potenzials, Vorläufer ~1/3 bis 1/4)
- In ländlichen Gebieten ist die Minderung der Vorläufer effektiver  
(Vorläufer ~2/3 bis 1/2, PM<sub>10</sub> ~ 1/3 bis 1/2 des Potenzials)
- Das PM<sub>10</sub>-Minderungspotenzial pro kT der Vorläufer, insbesondere von NH<sub>3</sub>, ist abhängig von der Reduktionsmenge
- Bei -25%-Minderung ist das PM<sub>10</sub>-Minderungspotenzial 1 kT PM<sub>2.5</sub>-Emission circa 5x höher als das 1 kT NH<sub>3</sub>-Emission

## Zusammenfassung

- In Ballungsgebieten liefern Industrie und Verkehr etwa gleiche hohe Beiträge (je  $\sim 1/3$ ) zum PM10, Landwirtschaft etwa  $1/4$
- In ländlichen Gebieten liefert die Landwirtschaft ( $\text{NH}_3$ ) den größten Einzelbeitrag ( $\sim 1/2$ ) zum PM10 gefolgt von Verkehr und Industrie ( $\sim 1/4$  bis  $1/5$ )

Das Minderungspotenzial pro kT der Vorläufer, insbesondere von  $\text{NH}_3$ ,

ist abhängig von der Reduktionsmenge, d.h.

rel. Beitrag Landwirtschaft sinkt mit abnehmender Minderungsmenge

# Welche Immissionsminderungen sind in Deutschland erreichbar mit dem CLE-Szenario ?

**Berechnungen der Immissionsänderungen mit dem RCG-Modell für 2010, 2015, 2020**

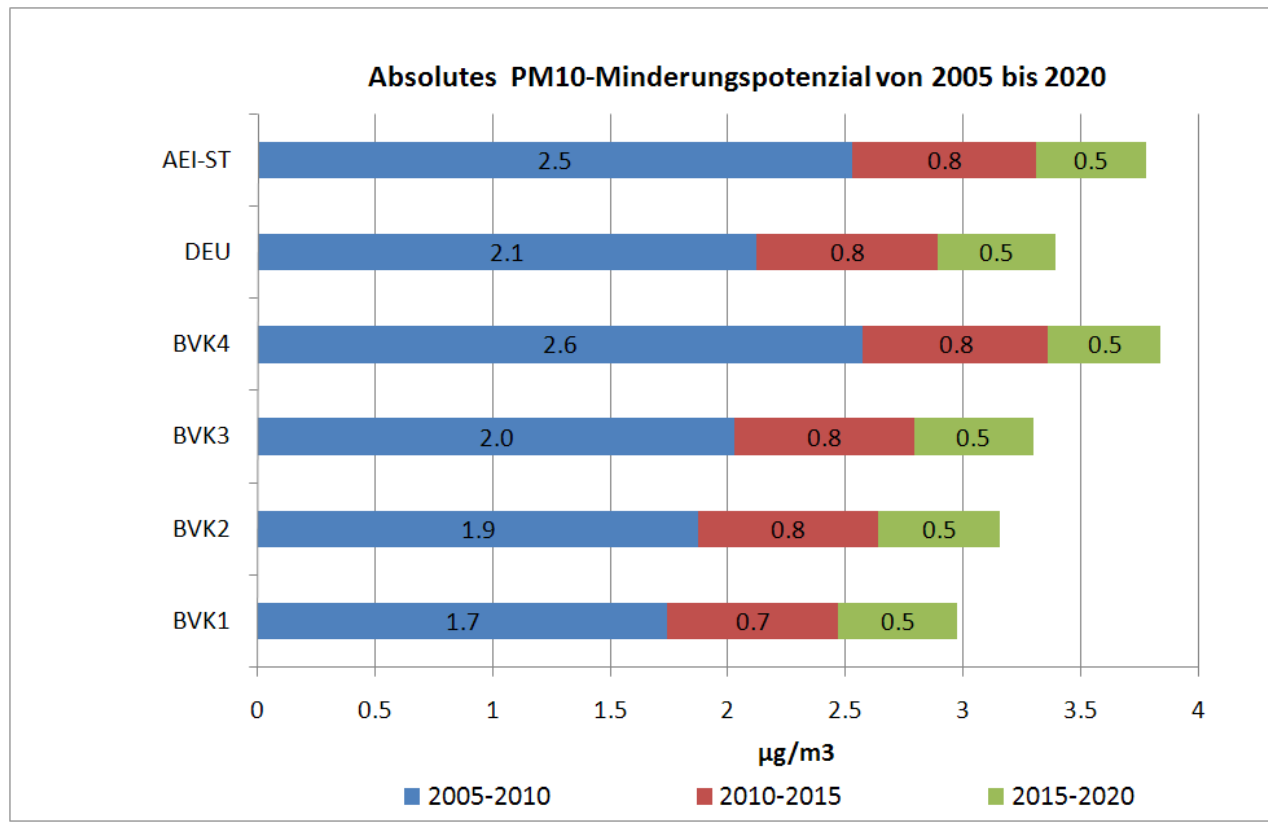
**Europäischer Hintergrund entsprechend dem NEC6-CP-Szenario (Climate and Energy Package)  
(Emissionsprojektion für die NEC-Direktive)**

# Referenz 2020: Emissionsminderung bezogen auf die Referenz 2005

Change 2005-2020 %	NOX	NMVOC	SOX	NH3	PM25	PM10
Energy transformation	-0.3	1.2	-11.3		-9.0	-8.8
Small combustion sources	-8.2	12.3	-53.7		10.6	10.9
Industrial combustion	-8.8	5.1	-3.4		-13.6	-15.9
Industrial process emissions	-25.7	-10.0	-22.5	1.0	-26.8	-18.5
Extraction of fossil fuels		-51.8			-11.1	-4.5
Solvent and product use		7.7				
Road transport gasoline	-78.7		-50.0			
Road transport diesel	-75.4	17.5		60.0	-90.0	-90.0
Road transport lpg						
Brake and tyrewear					12.3	12.2
Volatilisation losses		-53.4				
Traffic resuspension					8.2	9.4
Non road transport	-35.7				-64.5	-64.5
Waste handling and disposal	0.0					
Agriculture	1.9	0.0		1.0	0.0	8.2
<b>SUM OVER ALL SECTORS</b>	<b>-41.4</b>	<b>-3.9</b>	<b>-19.1</b>	<b>0.4</b>	<b>-25.3</b>	<b>-13.1</b>

Keine Emissionsminderung bei NH3 !!

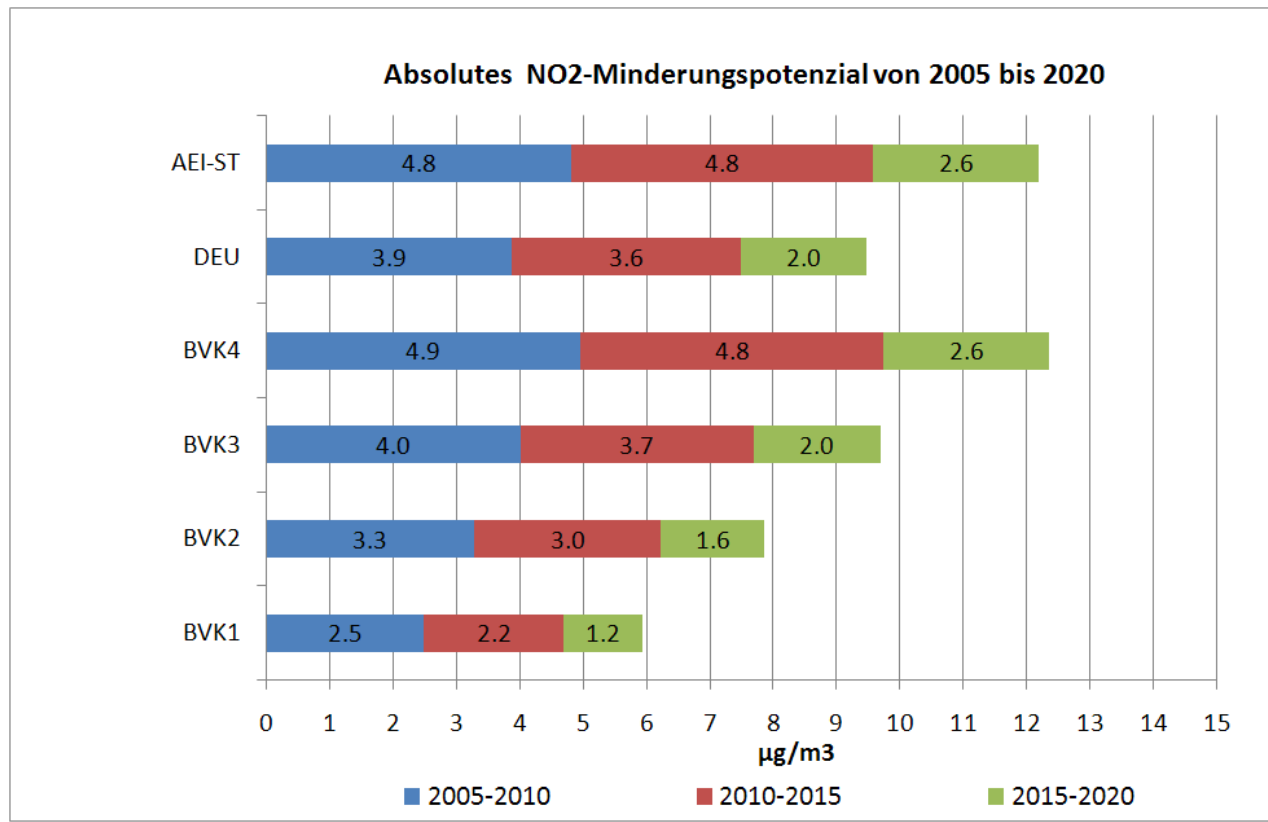
# Durch die Maßnahmen des CLE-Szenarios bis 2020 erreichbare PM10-Minderungen



3.9 µg/m³  
-18%

2.9 µg/m³  
-20%

# Durch die Maßnahmen des CLE-Szenarios bis 2020 erreichbare NO<sub>2</sub>-Minderungen



12.3 µg/m<sup>3</sup>  
-44%

5.9 µg/m<sup>3</sup>  
-47%

# Prognose der Luftqualität 2015 und 2020

## Schritt 1:

**1.A RCG, Basislauf 2005 und Prognose-Lauf 2015 und 2020**

**1.B Ableitung von ortsspezifischen Immissionsdeltas**

## Schritt 2:

**2.A Erstellung von Feldern mit der OI-Methodik (Verknüpfung von Messung u. Rechnung für das Referenzjahr 2005)**

**2.B Verminderung des OI-Feldes um das (absolute) Immissionsdelta aus 1.B**

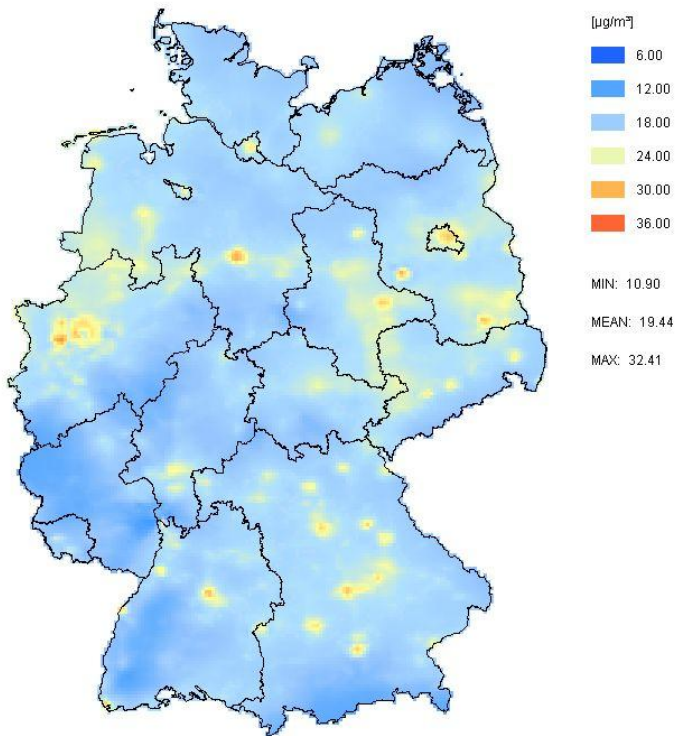
**Immissionsdelta aus Schritt 1 beschreibt ausschließlich die**

**Minderungspotenziale der erfassten Emissionen**

# PM10-Jahresmittelwerte aus OI Entwicklung nach CLE

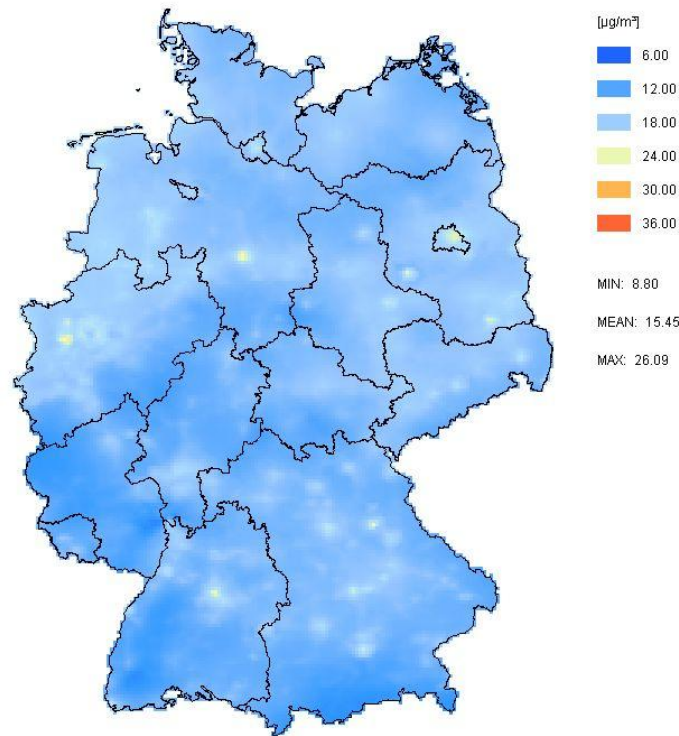
2005

PM10\_OI\_M05\_DF05\_RT\_F::JMW [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



2020

PM10\_OI\_M05\_DF20\_RT\_F::JMW [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

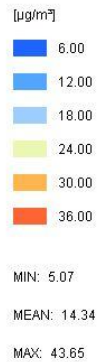
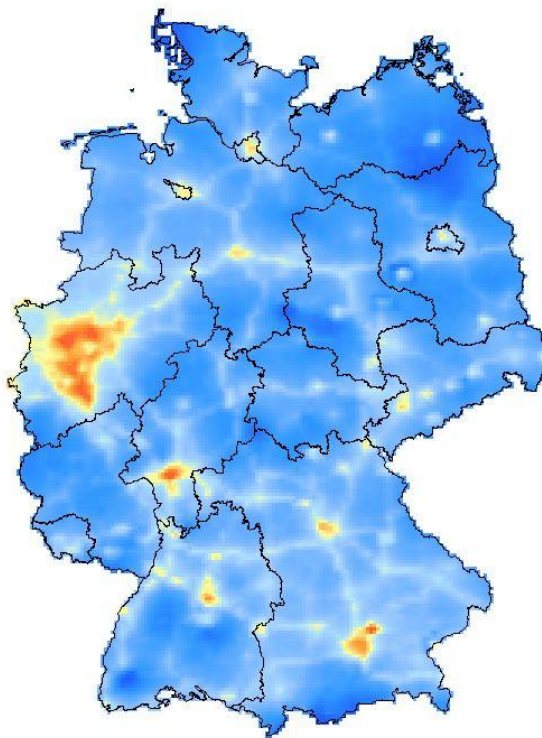


Abnahmen zwischen 2 – 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
Meteorologisches Referenzjahr 2005

# NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte aus OI Entwicklung nach CLE

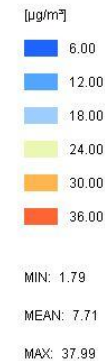
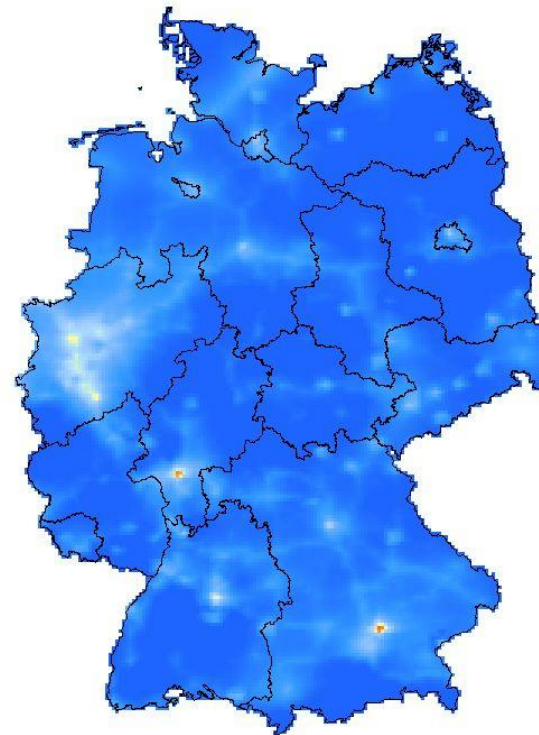
2005

NO<sub>2</sub>\_OI\_M05\_DF05\_RT\_F::JMW [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



2020

NO<sub>2</sub>\_OI\_M05\_DF20\_RT\_F::JMW [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]



Abnahmen zwischen 2 – 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
Meteorologisches Referenzjahr 2005

# Grenzwertüberschreitungen an hot-spots (Verkehrsnaher Stationen)

Empirischer Ansatz ausgehend von der Messung:

$$C_S = C_M - C_H$$

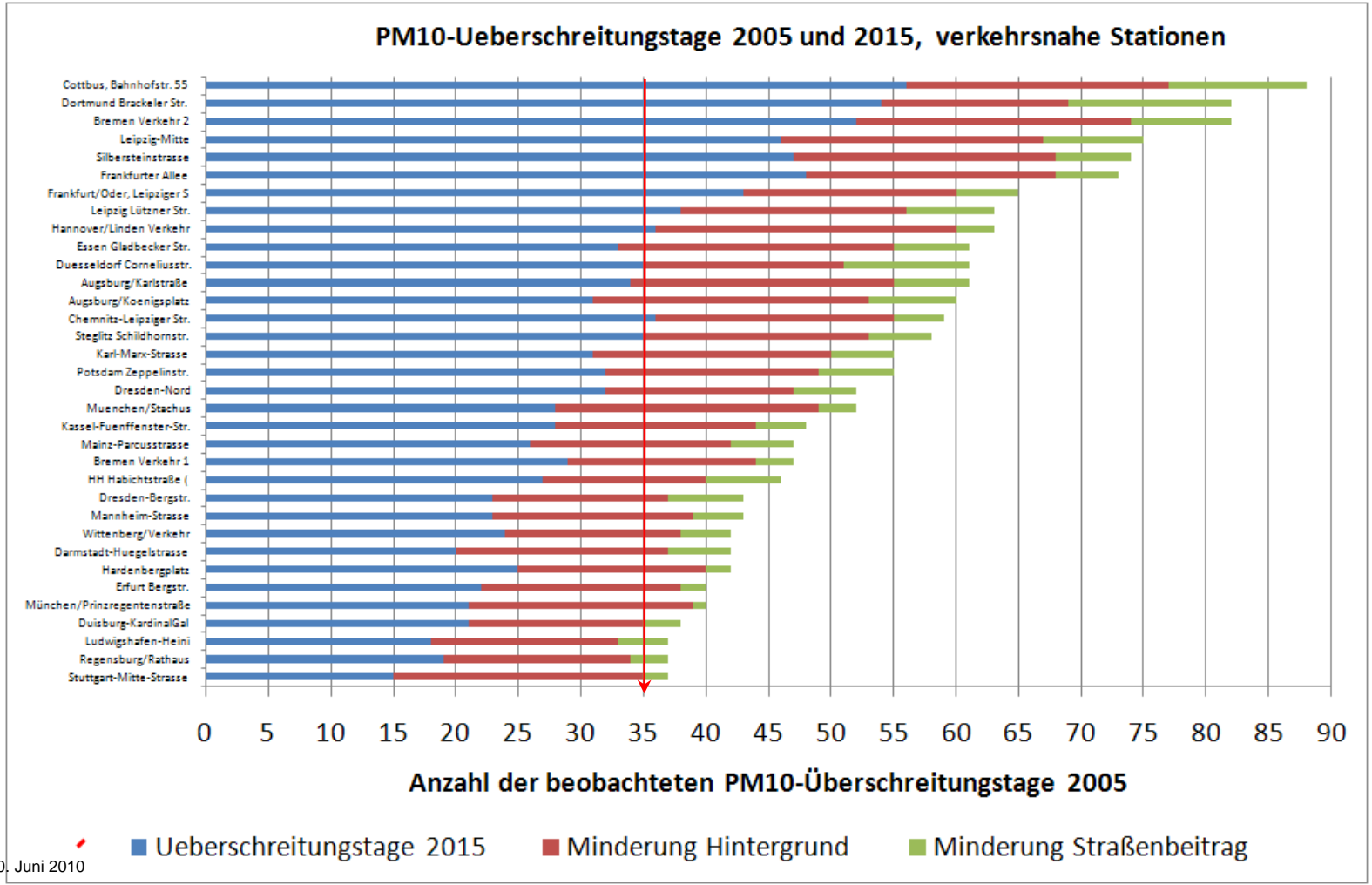
$C_M$  = Gemessene Konzentration an der Straße,  $C_H$  = Hintergrundkonzentration aus OI

$C_S$  (Zusatzbelastung) wird durch die Emissionen des Straßenverkehrs verursacht

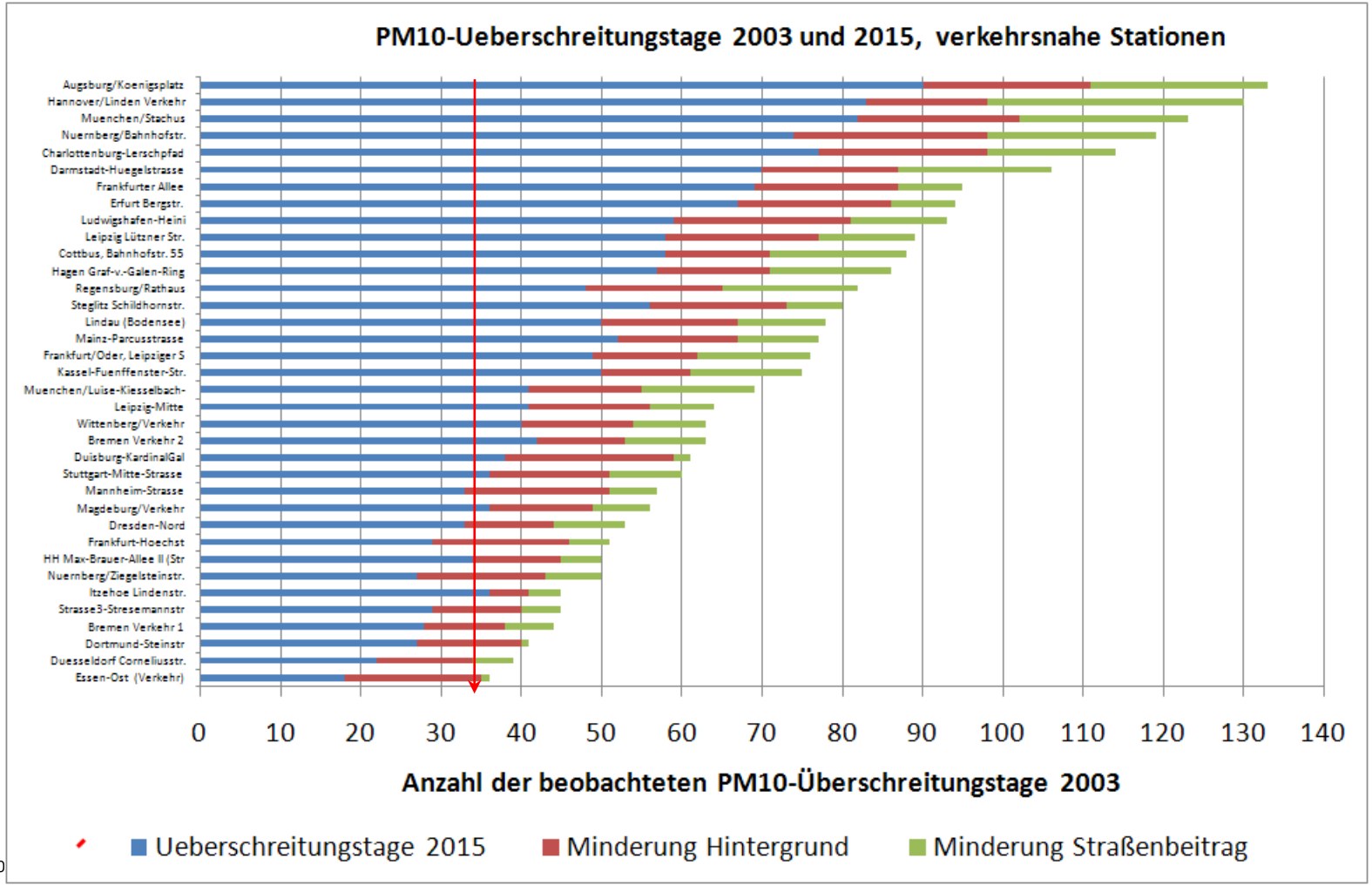
## PM10- und NO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale (Jahresmittelwert) :

- Hintergrund: aus OI-Berechnungen 2015 , 2020
- Zusatzbelastung: aus relativen Abnahmen der Verkehrsemissionen
  - PM10-Überschreitungstage: aus stat. Beziehung mit Mittelwert
  - NO<sub>2</sub>: spezielle Annahmen zur Direktemission, photochem. NO<sub>2</sub>-Bildung

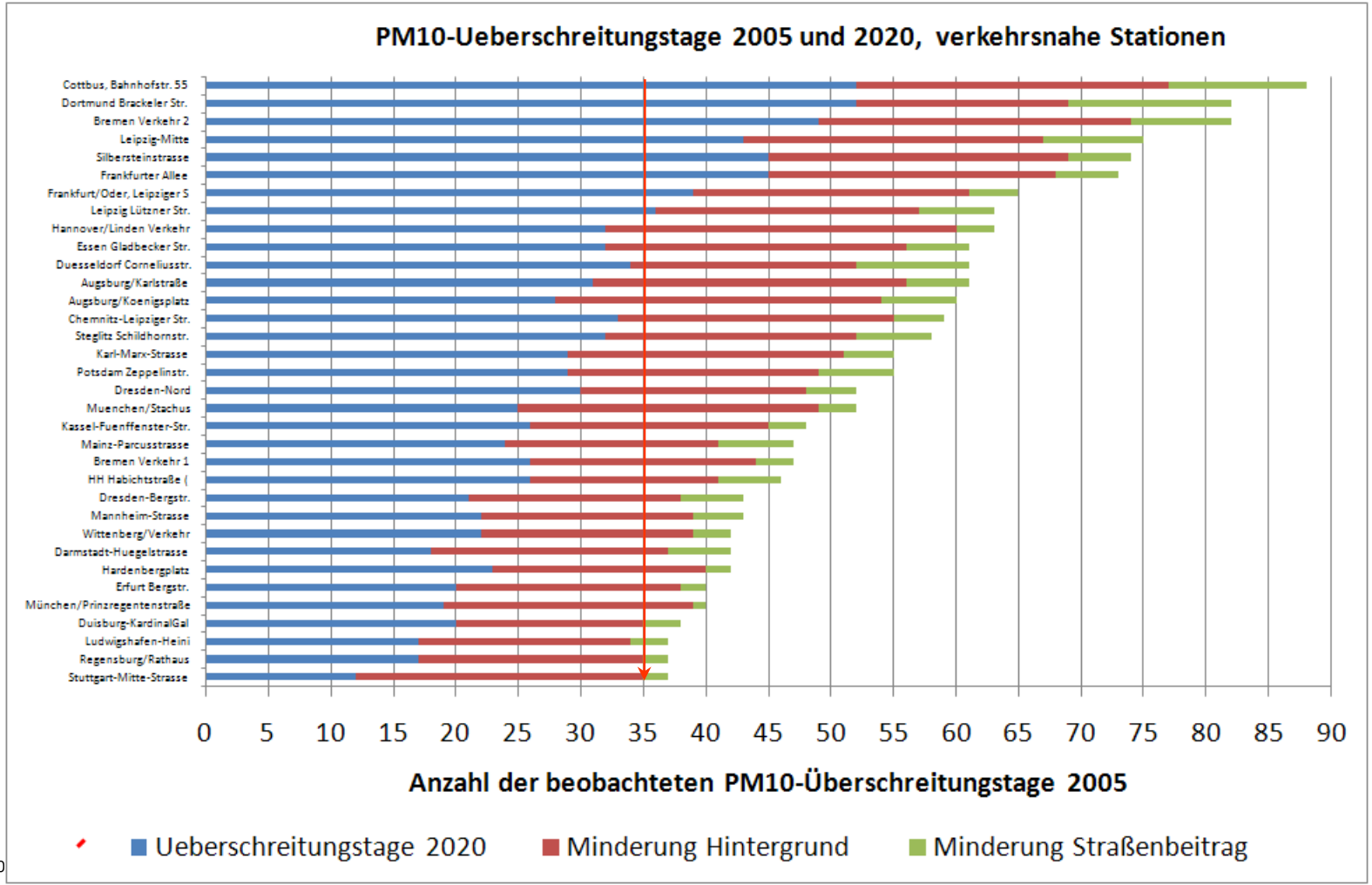
# PM10-Überschreitungstage 2015 Meteorologische Referenz 2005



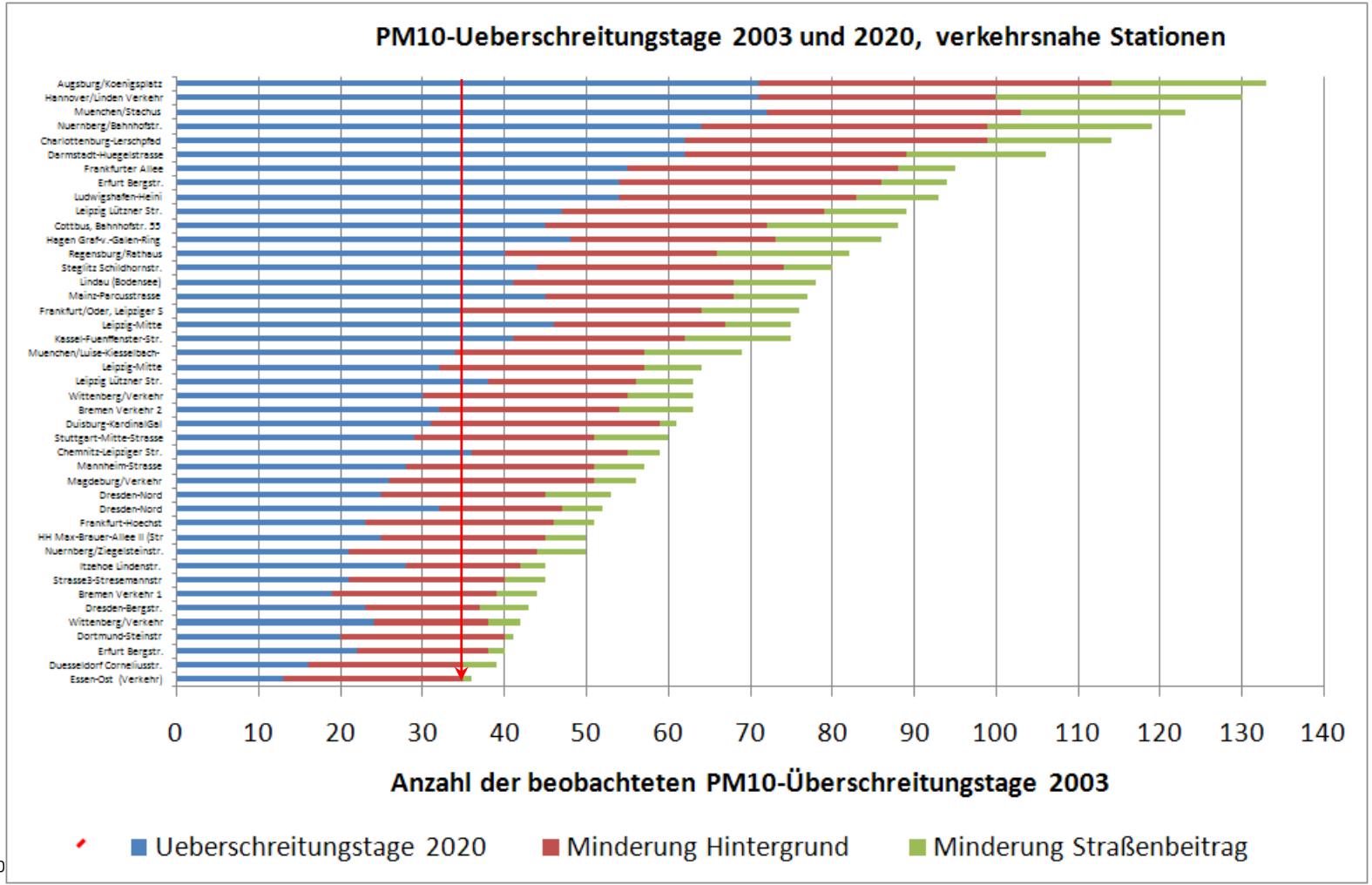
# PM10-Überschreitungstage 2015 Meteorologische Referenz 2003



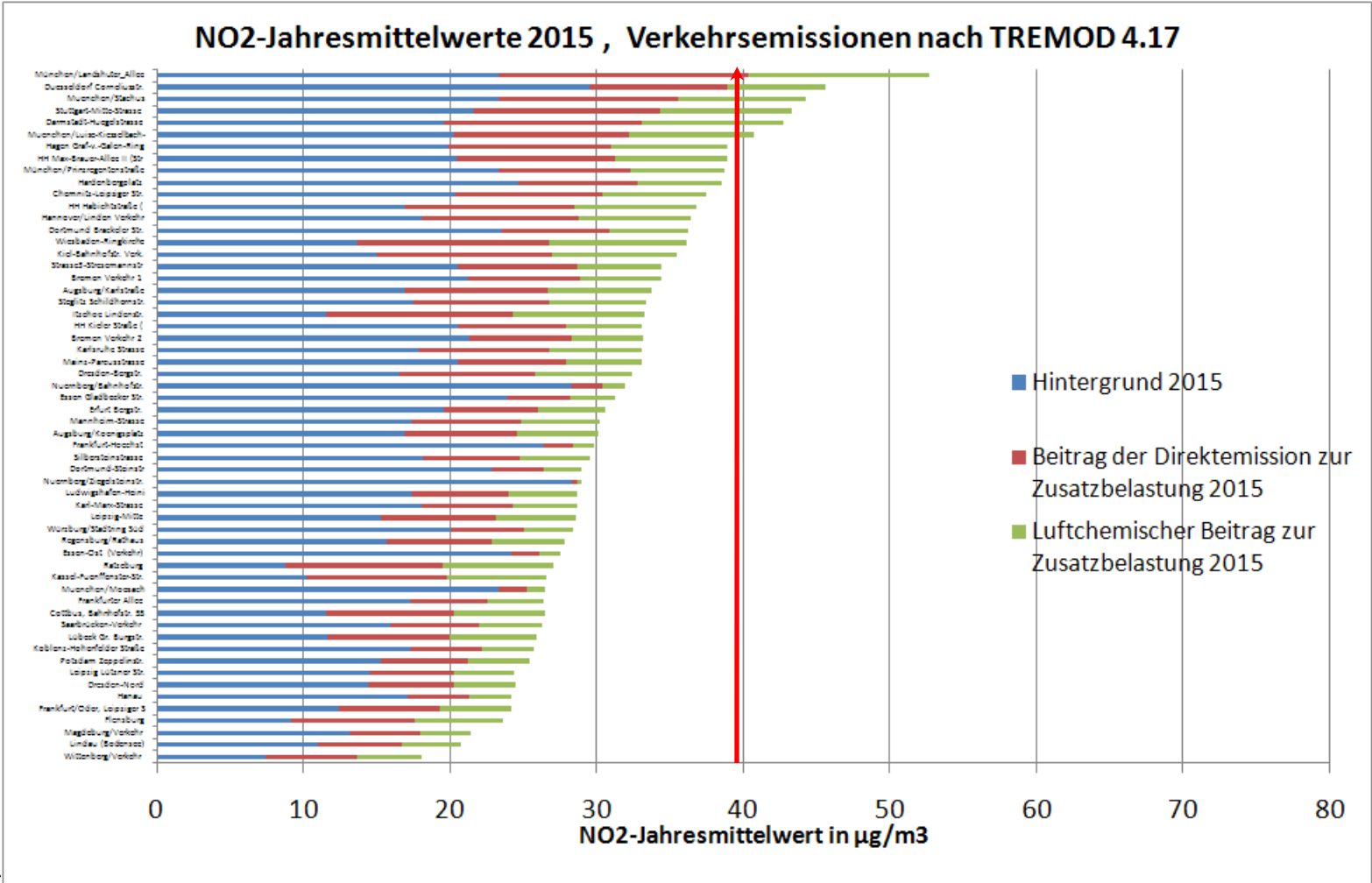
# PM10-Überschreitungstage 2020 Meteorologische Referenz 2005



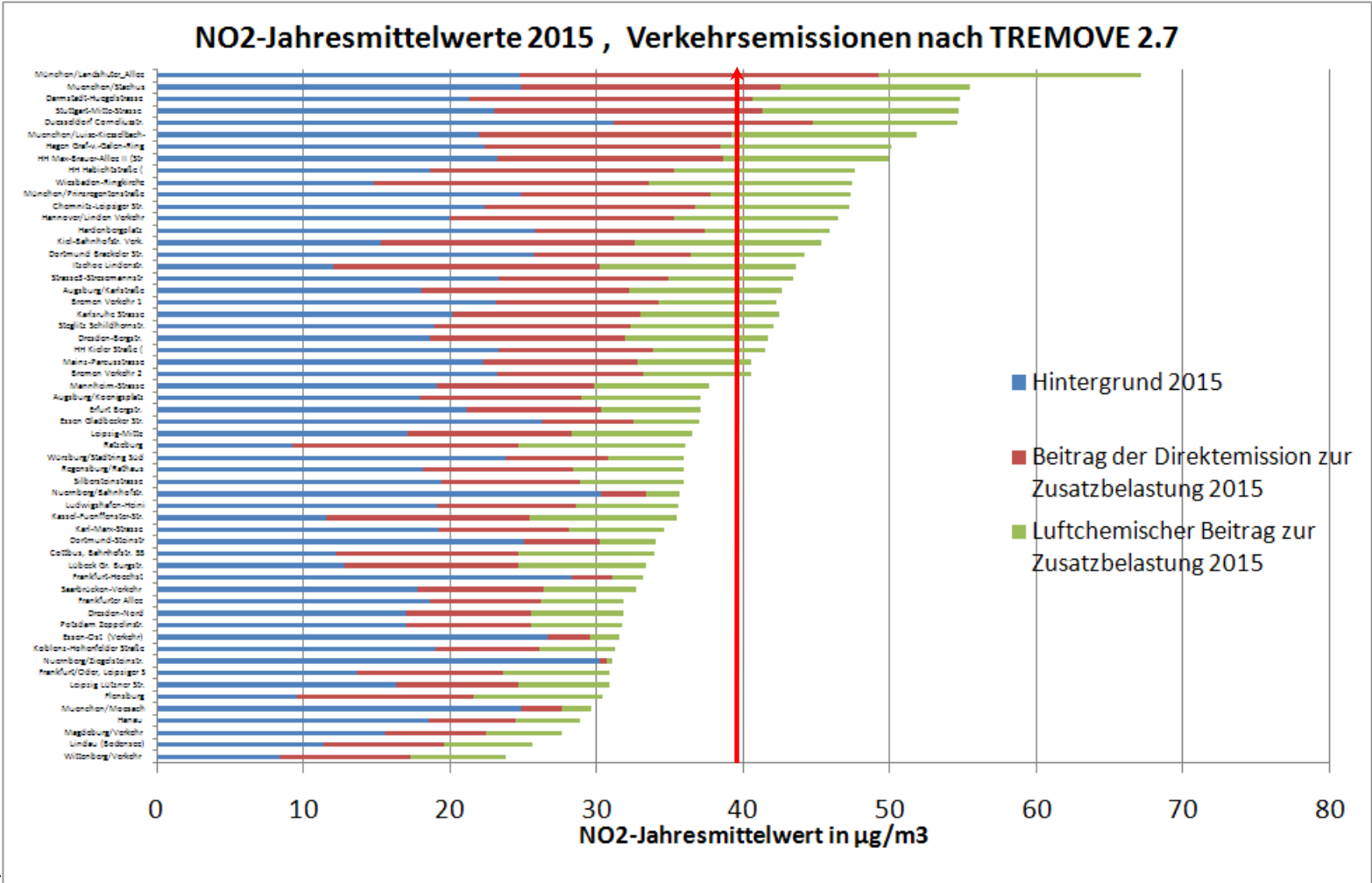
# PM10-Überschreitungstage 2020 Meteorologische Referenz 2003



# NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte 2015 Meteorologische Referenz 2005



# NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte 2015 Meteorologische Referenz 2005



# Grenzwertverletzungen an verkehrsnahen Stationen

## PM10

**2015: Mehr als 55 Überschreitungstage in 2005 (mittlere met. Bedingungen)**

**2020: Mehr als 60 Überschreitungstage in 2005 (mittlere met. Bedingungen)**

## NO<sub>2</sub>

**2015: Jahresmittelwert > 50 µg/m<sup>3</sup> in 2005 (mittlere met. Bedingungen)**

**2020: Jahresmittelwert > 60 µg/m<sup>3</sup> in 2005 (mittlere met. Bedingungen)**

# PM<sub>2.5</sub>

Indikator f. durchschnittliche Exposition (AEI-Average Exposure Indicator) ist  
der Jahresmittelwert im Mittel über 36 städtischen Hintergrundstationen:

Ausgangskonzentration AK (Mittel 2008-2010)

Reduzierungsziel bis 2020 in %

Klasse 1: AK < 8.5 µg/m <sup>3</sup>	0
Klasse 2: 8.5 µg/m <sup>3</sup> ≥ AK < 13 µg/m <sup>3</sup>	10
<b>Klasse 3: 13 µg/m<sup>3</sup> ≥ AK &lt; 18 µg/m<sup>3</sup></b>	<b>15</b>
Klasse 4: 18 µg/m <sup>3</sup> ≥ AK < 22 µg/m <sup>3</sup>	20
Klasse 5: AK ≥ 22 µg/m <sup>3</sup>	Alle angemessenen Maßnahmen um 18 µg/m <sup>3</sup> zu erreichen

# Zusammenfassung Grenzwertüberschreitungen

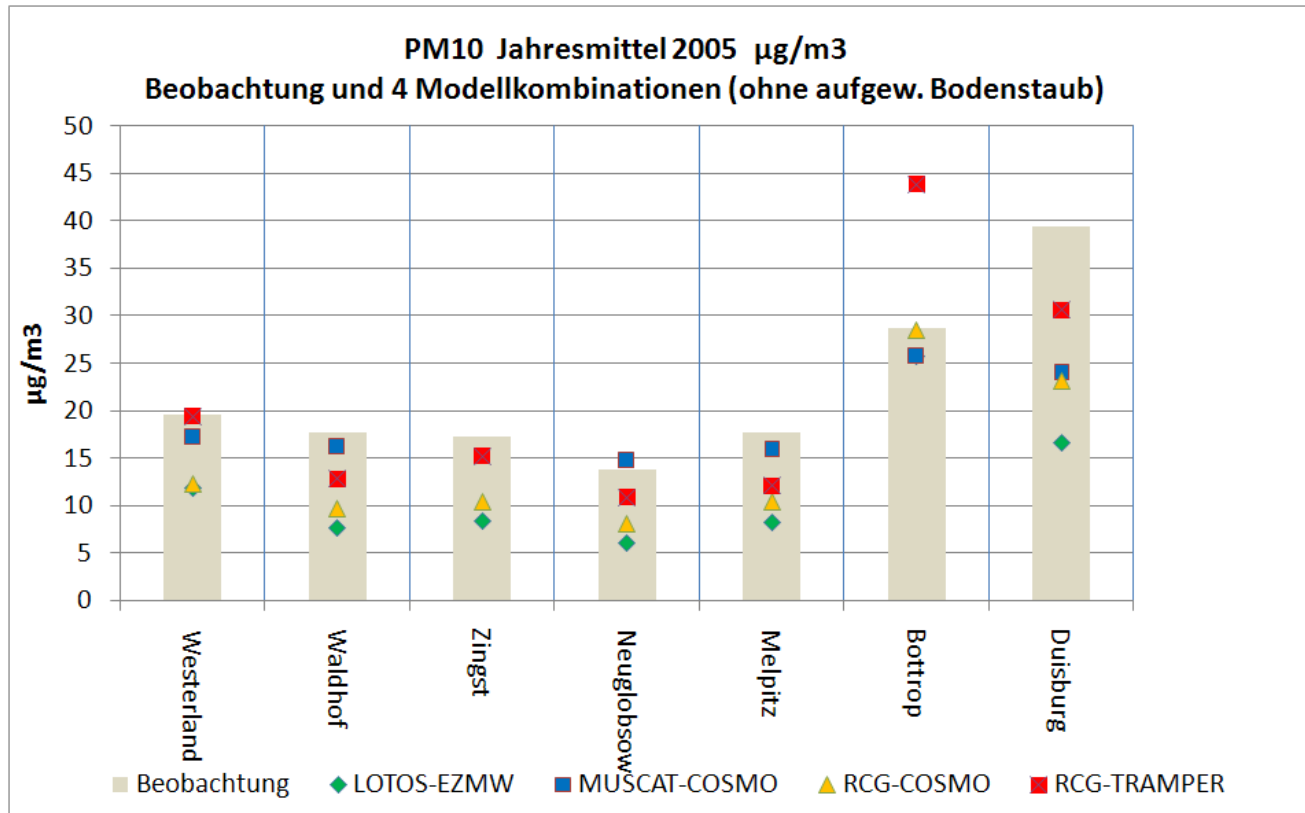
Die Emissionsminderungen des CLE-Szenarios reichen mit großer Wahrscheinlichkeit nicht aus zur 100%igen Einhaltung der Grenzwerte für

- **PM10 (35 Überschreitungstage des Kurzfristgrenzwerts, einzuhalten bis 2011)**
  - **NO<sub>2</sub> (Jahresmittelwert 40 µg/m<sup>3</sup>, einzuhalten bis 2015 )**
  - **O<sub>3</sub> (AOT40, 25 Überschreitungstage des 8-h-Mittelwerts 120 µg/m<sup>3</sup>)**
- und reichen ebenso wahrscheinlich nicht aus,
- **das nationale Ziel zur Minderung der PM2.5-Jahresmittelwerte (-15% bis 2020) zu erreichen**

## Unsicherheiten/Bandbreiten

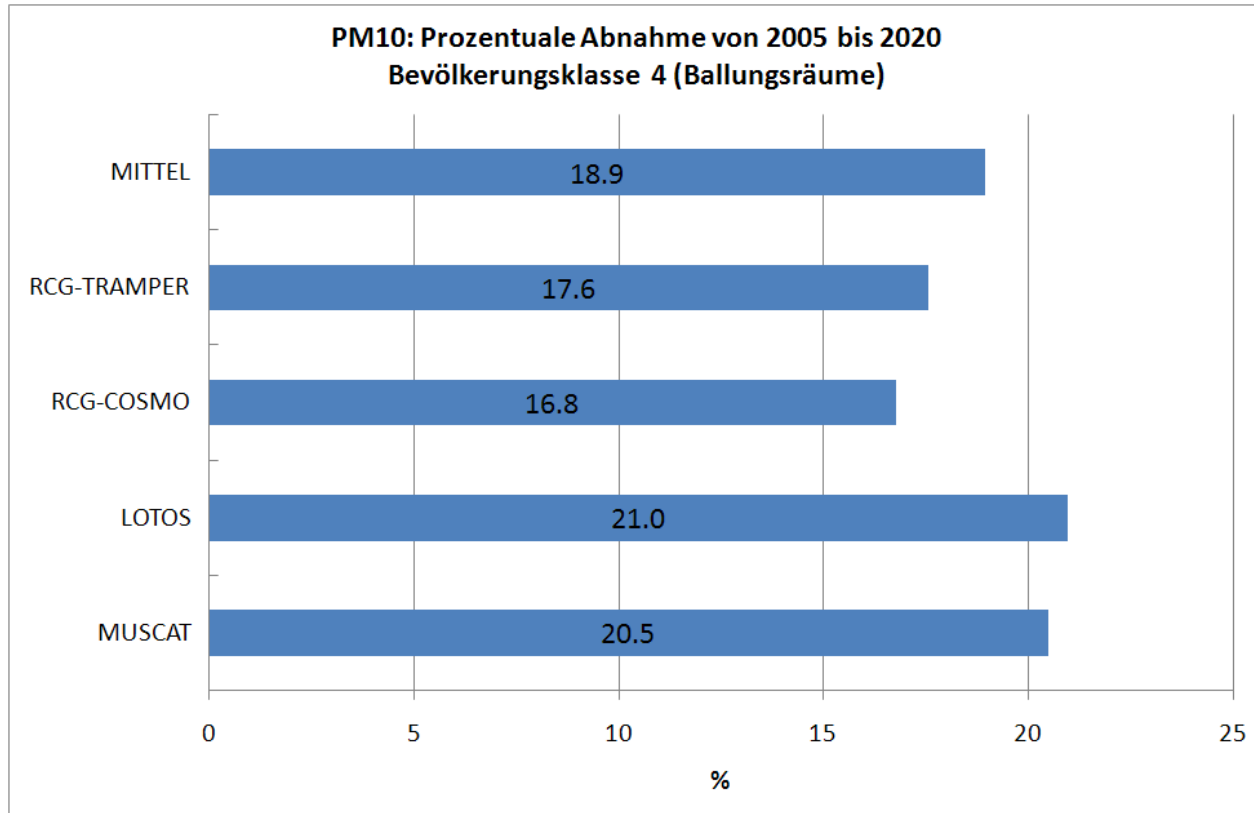
- **Referenz 2005, 2020, MFR 2020 mit 4 Modellkombinationen**  
**RCG-TRAMPER, RCG-COSMO, LOTOS-EUROS, COSMO-**  
**MUSCAT**
- **Obere und untere Bandbreiten der Emissionsreferenzen**  
**2005, 2010, 2015, 2020**
- **Verschiedene meteorologische Referenzjahre: 2003, 2005,**  
**2006**

# Berechnete und gemessene PM10-Jahresmittelwerte



RCG-TRAMPER am höchsten, LOTOS am niedrigsten

# Berechnete PM10-Abnahmen 2005 bis 2020 in %

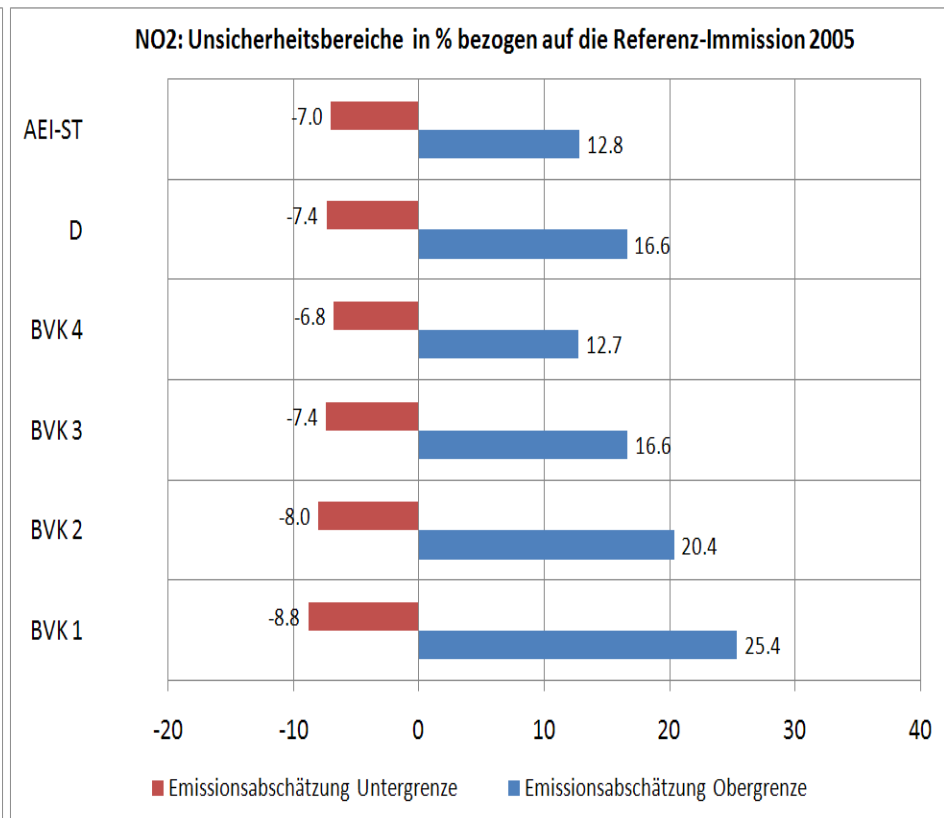
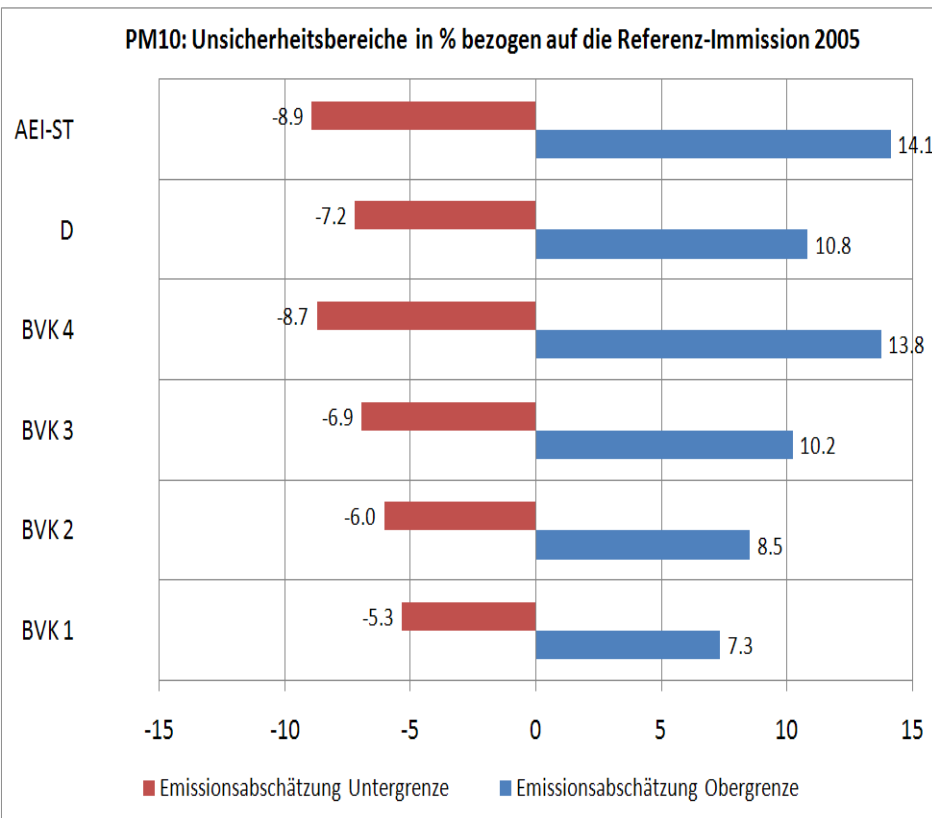


Unterschiede zwischen den Modellen:  
ca. 10% bezogen auf das Ensemble-Mittel

Spannbreite 17 bis 21 % Abnahme bis 2020

# Rel. Änderung der PM10-Jahresmittelwerte bzgl. der Emissionsreferenz 2005

## Emissionsuntergrenze u. Emissionsobergrenze



**Ballungsraum: Abweichungen von -9% bis +13%**

## Modellvergleich:

- Bezogen auf das Ensemble-Mittel unterscheiden sich die Modellergebnisse um circa +/- 30%
- RCG-TRAMPER liegt am oberen Ende der absoluten Ergebnisbandbreite
- RCG-TRAMPER hat die geringsten mittleren Abweichungen von den Messungen
- Relative Aussagen unterscheiden sich um +/- 20%

## Bandbreitenberechnungen mit RCG-TRAMPER

- Emissionsunsicherheiten: PM10-Ergebnisbandbreite -10 bis +15%
- Meteorologische Unterschiede : PM10-Bandbreite +/-15%