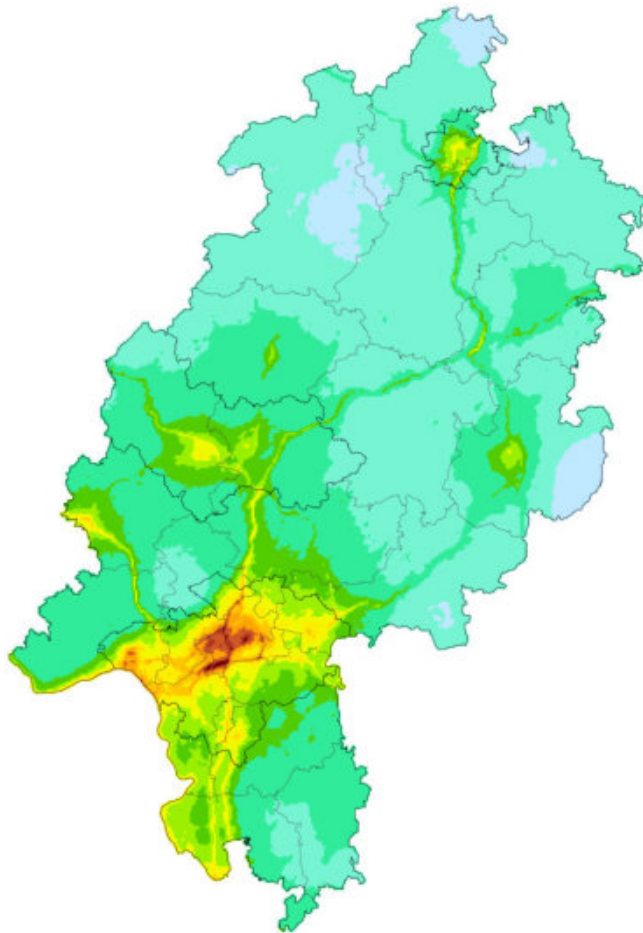


Endbericht

Ausbreitungsberechnungen zur flächen- deckenden Ermittlung der Luftqualität in Hessen als Grundlage der Luftreinhalteplanung



für das

Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz (HMUKLV)

von

IVU Umwelt GmbH
Emmy-Noether-Str. 2
79110 Freiburg



in Zusammenarbeit mit

Dr. E. Reimer, Berlin
Dr. R. Stern, Berlin

Endbericht

Ausbreitungsberechnungen zur flächen- deckenden Ermittlung der Luftqualität in Hessen als Grundlage der Luftreinhalteplanung

für das

Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz (HMUKLV)
Mainzer Straße 80
65189 Wiesbaden

Bearbeitet von:

Florian Pfäfflin
Volker Diegmann
Dr. Lina Neunhäuserer
Heike Wursthorn

IVU Umwelt GmbH
Emmy-Noether-Str. 2
D-79110 Freiburg
Tel: +49 (0) 761 / 88 85 12 - 0
Fax: +49 (0) 761 / 88 85 12 - 12
info@ivu-umwelt.de
www.ivu-umwelt.de

in Zusammenarbeit mit

Dr. E. Reimer, Berlin
Dr. R. Stern, Berlin

Vorgelegt am 25.01.2017

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einführung und Vorgehensweise	9
2	Untersuchungsgebiet	13
3	Bezugsjahr	17
3.1	Einführung	17
3.2	Repräsentativität bezüglich der Emissionen	17
3.3	Repräsentativität bezüglich der meteorologischen Ausprägungen und der Immissionssituation	18
3.4	Festlegung des Bezugsjahrs	26
4	Daten	27
4.1	Straßengeometrien und Verkehrsdaten	27
4.2	Topographie	29
4.3	Landnutzung	31
4.4	Gebäude	34
4.5	Emissionen	34
4.5.1	Industrie	35
4.5.2	Kleingewerbe	35
4.5.3	Gebäudeheizung und Kleinverbraucher	35
4.5.4	Straßenverkehr	36
4.5.5	Schienenverkehr	37
4.5.6	Schiffsverkehr	37
4.5.7	Flughafen Frankfurt Main	38
4.5.7.1	Kfz-Verkehr und stationäre Quellen auf dem Flughafengelände	38
4.5.7.2	Flugverkehr und Triebwerksläufe	38
4.5.8	Biogene Emissionen	41
4.5.9	Gesamtemissionen in Hessen	43
4.5.10	Emissionen außerhalb Hessens	44
4.5.11	Prognose 2020	45
4.6	Luftschadstoff-Messdaten	48
5	Methodik und Durchführung	52
5.1	Meteorologische Eingangsdaten	52
5.2	Ausbreitungsrechnungen für die Vorbelastung	53
5.2.1	Modellbeschreibung	53
5.2.2	Berechnungsskalen	56
5.2.3	Berechnung des Basislaufs mit dem RCG-Modell für alle Nester	59
5.2.4	Szenarienberechnungen mit dem RCG-Modell im Nest 3	59
5.2.5	Immissionsprognose für das Jahr 2020	60
5.3	Kombination mit Messdaten	61
5.3.1	Systembeschreibung	61
5.3.1.1	Kopplung von Mess- und Modelldaten	62

5.3.1.2	Interpolationsverfahren	62
5.3.1.3	Datenassimilation der Modellergebnisse	63
5.3.1.4	Kreuzvalidierung	64
5.3.1.5	Prognoserechnungen	64
5.3.2	Aufbereitung der Messdaten	65
5.3.3	Durchführung der FLADIS-Berechnungen	65
5.3.4	Auswahl des Interpolationsverfahrens	66
5.4	Qualitätssicherung gemäß FAIRMODE	77
5.5	Ausbreitungsrechnungen für die Straßenräume	87
5.5.1	Modellbeschreibung	87
5.5.2	NO ₂ -Gesamtbelastung	88
5.5.3	Überschreitungshäufigkeit des PM ₁₀ -Tagesgrenzwerts	88
5.5.4	Anwendung	90
6	Ergebnisse	97
6.1	Hessen	97
6.1.1	Basisfall 2013	97
6.1.2	Beiträge ausgewählter Quellengruppen	102
6.1.3	Prognose 2020	125
6.1.4	Beiträge ausgewählter Quellengruppen in der Prognose 2020	134
6.2	Straßenabschnitte	145
6.2.1	Vergleich mit Messwerten	145
6.2.2	Gesamtbelastung und Verursacheranteile	146
6.2.2.1	NO ₂	147
6.2.2.2	PM ₁₀	156
6.2.3	Verursacheranteile von Diesel-Kfz und schweren Nutzfahrzeuge	167
7	Zusammenfassung	169
8	Quellenverzeichnis	173

AB B I L D U N G S V E R Z E I C H N I S

Abbildung 2-1:	Untersuchungsgebiet	15
Abbildung 3-1:	Entwicklung der Immissionsbelastung von PM10	20
Abbildung 3-2:	Entwicklung der PM10-Überschreitungstage	21
Abbildung 3-3:	Entwicklung der Immissionsbelastung von Stickstoffdioxid	22
Abbildung 4-1:	Topographie im RCG-Untersuchungsgebiet	30
Abbildung 4-2:	Landnutzung in Hessen gemäß ATKIS	32
Abbildung 4-3:	Emissionsquellen des Flugverkehrs	41
Abbildung 4-4:	Anteile der Quellengruppen an den Gesamtemissionen 2013	44
Abbildung 4-5:	Anteile der Quellengruppen an den Gesamtemissionen 2020	47
Abbildung 4-6:	Lage der in FLADIS verwendeten Hintergrundmessstationen für 2013	49
Abbildung 5-1:	RCG-Modellgebiet der europäischen Skala (Nest 0)	57
Abbildung 5-2:	RCG-Modellgebiete der nationalen Skala (Nest 1)	58
Abbildung 5-3:	Flussdiagramm des Programmsystems FLADIS	61
Abbildung 5-4:	Mittlere NO ₂ -Belastung 2013: RCG-Modellergebnisse ohne und mit Datenassimilation, reine Interpolation der Messwerte	69
Abbildung 5-5:	Mittlere NO ₂ -Belastung 2013: Vergleich der Interpolationsverfahren	70
Abbildung 5-6:	Regression Modell- gegen Messwerte für NO ₂	72
Abbildung 5-7:	Mittlere PM10-Belastung 2013: RCG-Modellergebnisse ohne und mit Datenassimilation sowie Interpolation, reine Interpolation der Messwerte	74
Abbildung 5-8:	Regression Modell- gegen Messwerte für PM10	76
Abbildung 5-9:	DELTA-Tool-Auswertung für die reinen RCG-Modellergebnisse für NO ₂ 2013	79
Abbildung 5-10:	DELTA-Tool-Auswertung für die reinen RCG-Modellergebnisse für PM10 2013	80
Abbildung 5-11:	DELTA-Tool-Auswertung für die reinen RCG-Modellergebnisse für PM2.5 2013	81
Abbildung 5-12:	DELTA-Tool-Auswertung für die reinen RCG-Modellergebnisse für Ozon 2013	82
Abbildung 5-13:	DELTA-Tool-Auswertung für die mittlere NO ₂ -Belastung 2013	84
Abbildung 5-14:	DELTA-Tool-Auswertung für die mittlere PM10-Belastung 2013	85
Abbildung 5-15:	DELTA-Tool-Auswertung für die mittlere Ozon-Belastung 2013	86
Abbildung 5-16:	Statistischer Zusammenhang zwischen dem Jahresmittelwert von PM10 und der Anzahl Tage mit einem PM10-Tagesmittelwert über 50 µg/m ³	89
Abbildung 6-1:	Mittlere NO ₂ -Belastung 2013	99
Abbildung 6-2:	Mittlere PM10-Belastung 2013	100
Abbildung 6-3:	Mittlere PM10-Belastung 2013: Anzahl der Tage mit einem Tagesmittelwert > 50 µg/m ³	101
Abbildung 6-4:	Beitrag der Industrie in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2013	105
Abbildung 6-5:	Relativer Beitrag der Industrie in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2013	106
Abbildung 6-6:	Beitrag von Gebäudeheizung und Kleinverbrauchern in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2013	107
Abbildung 6-7:	Relativer Beitrag von Gebäudeheizung und Kleinverbrauchern in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2013	108

Abbildung 6-8:	Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2013	109
Abbildung 6-9:	Relativer Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2013	110
Abbildung 6-10:	Beitrag des Flughafens Frankfurt in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2013	111
Abbildung 6-11:	Relativer Beitrag des Flughafens Frankfurt in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2013	112
Abbildung 6-12:	Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2013	113
Abbildung 6-13:	Relativer Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2013	114
Abbildung 6-14:	Beitrag der Industrie in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013	115
Abbildung 6-15:	Relativer Beitrag der Industrie in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013	116
Abbildung 6-16:	Beitrag von Gebäudeheizung und Kleinverbrauchern in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013	117
Abbildung 6-17:	Relativer Beitrag von Gebäudeheizung und Kleinverbrauchern in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013	118
Abbildung 6-18:	Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013	119
Abbildung 6-19:	Relativer Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013	120
Abbildung 6-20:	Beitrag des Flughafens Frankfurt in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013	121
Abbildung 6-21:	Relativer Beitrag des Flughafens Frankfurt in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013	122
Abbildung 6-22:	Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013	123
Abbildung 6-23:	Relativer Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013	124
Abbildung 6-24:	Mittlere NO ₂ -Belastung 2020	127
Abbildung 6-25:	Mittlere PM10-Belastung 2020	128
Abbildung 6-26:	Mittlere PM10-Belastung 2020: Anzahl der Tage mit einem Tagesmittelwert > 50 µg/m ³	129
Abbildung 6-27:	Absolute Änderung der NO ₂ -Belastung 2020 gegenüber 2013	130
Abbildung 6-28:	Relative Änderung der NO ₂ -Belastung 2020 gegenüber 2013	131
Abbildung 6-29:	Absolute Änderung der PM10-Belastung 2020 gegenüber 2013	132
Abbildung 6-30:	Relative Änderung der PM10-Belastung 2020 gegenüber 2013	133
Abbildung 6-31:	Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2020	136
Abbildung 6-32:	Relativer Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2020	137
Abbildung 6-33:	Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2020	138
Abbildung 6-34:	Relativer Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur NO ₂ -Belastung im Jahr 2020	139
Abbildung 6-35:	Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2020	140

Abbildung 6-36:	Relativer Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2020	141
Abbildung 6-37:	Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2020	142
Abbildung 6-38:	Relativer Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2020	143
Abbildung 6-39:	Gesamtbelastung und Verursacheranteile NO ₂ absolut im Jahr 2013 für den Ballungsraum Rhein-Main	153
Abbildung 6-40:	Verursacheranteile NO ₂ relativ im Jahr 2013 für den Ballungsraum Rhein-Main	154
Abbildung 6-41:	Gesamtbelastung und Verursacheranteile NO ₂ absolut im Jahr 2013 für Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill sowie den Ballungsraum Kassel	155
Abbildung 6-42:	Verursacheranteile NO ₂ relativ im Jahr 2013 für Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill sowie den Ballungsraum Kassel	156
Abbildung 6-43:	Gesamtbelastung und Verursacheranteile PM10 absolut im Jahr 2013 für den Ballungsraum Rhein-Main	162
Abbildung 6-44:	Verursacheranteile PM10 relativ im Jahr 2013 für den Ballungsraum Rhein-Main	163
Abbildung 6-45:	Gesamtbelastung und Verursacheranteile PM10 absolut im Jahr 2013 für Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill sowie den Ballungsraum Kassel	164
Abbildung 6-46:	Verursacheranteile PM10 relativ im Jahr 2013 für Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill sowie den Ballungsraum Kassel	165

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1:	Stationstypen der für 2009 - 2014 verwendeten Messstationen	19
Tabelle 3-2:	Rang der Messwerte der Jahre 2010 - 2014	23
Tabelle 3-3:	Ergänzende qualitative Aussagen zur Belastungssituation und zur meteorologischen Situation der Jahre 2009 - 2014	24
Tabelle 4-1:	Lage der 64 Straßenabschnitte	28
Tabelle 4-2:	Landnutzung in Hessen gemäß ATKIS	31
Tabelle 4-3:	Parameter zur Abbildung der dynamischen Quelleigenschaften von Flugzeugen als passive Quellen nach Janicke (2005) und Aktualisierung	39
Tabelle 4-4:	Gesamtemissionen und Anteile der Quellengruppen in Hessen für 2013	43
Tabelle 4-5:	Fortschreibungsfaktoren der Emissionen von 2012/2013 nach 2020	45
Tabelle 4-6:	Gesamtemissionen und Anteile der Quellengruppen in Hessen 2020	46
Tabelle 4-7:	Stationen in Hessen und gemessene Stoffe für 2013	50
Tabelle 4-8:	Stationen in den an Hessen angrenzenden Bundesländern und gemessene Stoffe für 2013	51
Tabelle 5-1:	RCG-Modellgebiete	58
Tabelle 5-2:	Modellanteil und Kenngrößen der Kreuzvalidierung für NO ₂	67
Tabelle 5-3:	Modellanteil und Kenngrößen der Kreuzvalidierung für PM ₁₀	67
Tabelle 5-4:	Parameter der 64 Straßenabschnitte	92
Tabelle 5-5:	Weitere Parameter der 64 Straßenabschnitte	94
Tabelle 6-1:	Minimal- und Maximalwerte im Jahr 2013	98
Tabelle 6-2:	Minimal- und Maximalwerte der Beiträge der Quellengruppen	103
Tabelle 6-3:	Minimal- und Maximalwerte 2013 und in der Prognose 2020	125
Tabelle 6-4:	Minimal- und Maximalwerte der Änderungen der Prognose 2020 gegenüber 2013	126
Tabelle 6-5:	Minimal- und Maximalwerte der Beiträge der Quellengruppen der Prognose 2020	134
Tabelle 6-6:	Vergleich von Messwerten 2013 mit der modellierten Gesamtbelastung	145
Tabelle 6-7:	Vergleich von Messwerten der PM ₁₀ -Tagesgrenzwertüberschreitungen 2013 mit aus der Modellierung abgeleiteten Werten	146
Tabelle 6-8:	Gesamtbelastung und Verursacheranteile NO ₂ absolut im Jahr 2013	149
Tabelle 6-9:	Gesamtbelastung und Verursacheranteile NO ₂ relativ im Jahr 2013	151
Tabelle 6-10:	Gesamtbelastung und Verursacheranteile PM ₁₀ absolut im Jahr 2013	158
Tabelle 6-11:	Gesamtbelastung und Verursacheranteile PM ₁₀ relativ im Jahr 2013	160
Tabelle 6-12:	Anteile lokaler Abgasemissionen von schweren Nutzfahrzeugen und Diesel-Kfz an der Immissionsbelastung für ausgewählte Straßenabschnitte	167

1 Einführung und Vorgehensweise

Für die Luftreinhalteplanung des Landes ist Hessen in die Ballungsräume Rhein-Main und Kassel sowie die Gebiete Nord- und Mittelhessen, Lahn-Dill und Südhessen gegliedert. Infolge überschrittener Immissionsgrenzwerte, insbesondere von Stickstoffdioxid (NO₂), an verkehrsbezogenen Messstationen, wurden auf Grundlage von § 47 Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG, 2015) und § 27 der Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV, 2015) für die betroffenen Gebiete und Ballungsräume Luftreinhaltepläne aufgestellt. Infolge anhaltend hoher Immissionswerte und festgestellten Grenzwertüberschreitungen müssen die Luftreinhaltepläne in Teilen fortgeschrieben werden.

Um bei der weiteren Aufstellung bzw. Fortschreibung der Luftreinhaltepläne die zu treffenden Maßnahmen entsprechend des jeweiligen Verursacheranteils der maßgeblichen Emittentengruppen sachgerecht zu bestimmen und deren Wirkung zu bewerten, bedarf es aktualisierter Berechnungen der Immissionsbelastung. Diese Berechnungen sind daher als eine Fortschreibung der bislang durchgeführten Ausbreitungsberechnungen (IVU Umwelt, 2009, 2011a) und Anpassung an die veränderte Emissionssituation zu verstehen.

Ziel des Vorhabens „Ausbreitungsberechnungen zur flächendeckenden Ermittlung der Luftqualität in Hessen als Grundlage der Luftreinhalteplanung“ im Auftrag des hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) war damit zum einen eine flächendeckende Ermittlung der urbanen Immissionsvorbelastung (Hintergrund) in Hessen. Zum anderen war an 64 Verkehrsschwerpunkten in 15 Gemeinden in Hessen die kleinräumige verkehrliche Zusatzbelastung und die Gesamtbelastung zu ermitteln.

Die Berechnungen wurden aufgrund der teilweise starken orographischen Gliederung Hessens und der hohen räumlichen Differenzierung der Emissionen relevanter Quellengruppen mit einer Auflösung von 500 x 500 m² durchgeführt. Die Immissions-Vorbelastung wurde dabei flächendeckend bestimmt

- für das Jahr 2013, den sogenannten Basisfall,
- zur Ermittlung der Beiträge der Quellengruppen
 - Industrie,
 - Gebäudeheizung und Kleinverbraucher,
 - Straßenverkehr,
 - Flughafen Frankfurt Main sowie
 - aller anthropogenen Emissionsquellen in Hessen und
- als Prognose für das Jahr 2020 sowie der dann zu erwartenden Beiträge der Quellengruppen
 - Straßenverkehr und
 - aller anthropogenen Emissionsquellen in Hessen.

Um zu flächendeckenden Aussagen der Luftschadstoffbelastung zu kommen, gibt es zwei grundsätzliche Verfahren. Zum einen kann auf der Basis eines möglichst dichten Messnetzes mit mathematischen Methoden der Interpolation der Raum zwischen den

Anmerkung:

Im Text wird die wissenschaftliche Zahlendarstellung mit dem Punkt als Dezimaltrennzeichen verwendet.

Messpunkten gefüllt werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die flächenhaften Ergebnisse an den Messstellen und in deren näherer Umgebung den gemessenen Werten weitgehend entsprechen. Zum anderen können auf der Basis eines Emissionskatasters und meteorologischer Daten mit Modellen Ausbreitungsrechnungen durchgeführt werden, die flächendeckende Modellergebnisse liefern. Dieses Verfahren hat den Vorteil, in Gebieten, die weit von Messstationen entfernt sind, realistischere Werte zu liefern als eine Interpolation, da Emissionsstrukturen und die Ausbreitung beeinflussende Parameter berücksichtigt werden. Außerdem lassen sich auf Basis von Modellen Szenarien und Prognosen berechnen. Um die jeweiligen Vorteile beider Verfahren zu nutzen, besteht ein dritter Ansatz in der Kombination der beiden Verfahren. In diesem Projekt wurde dieser kombinierte Ansatz gewählt und die Methoden der Ausbreitungsmodellierung auf der Basis von hochauflösenden Emissionskatastern und Daten zur Meteorologie mit denen der Interpolation von gemessenen Schadstoffkonzentrationen in stündlicher Auflösung kombiniert. Die dazu durchgeführten Arbeitsschritte zur Ermittlung der urbanen Immissionsvorbelastung (Hintergrund) sind:

- Festlegung des repräsentativen Jahres,
- Aufbereitung des Emissionskatasters,
- Aufbereitung der Meteorologie,
- Ausbreitungsrechnungen,
- Aufbereitung der Messdaten,
- Interpolation der Messdaten,
- Datenassimilation der Modellergebnisse,
- Kombination von Modell- und Messdaten,
- Qualitätssicherung mit Kreuzvalidierung,
- Berechnung der Szenarien und
- Kartenerstellung.

Für die Ermittlung der kleinräumigen verkehrlichen Zusatzbelastung und der Gesamtbelastung an den 64 Verkehrsschwerpunkten wurden die folgenden Arbeitsschritte durchgeführt:

- Auf- und Übernahme der geometrischen Verhältnisse in den Straßenräumen,
- Übernahme der Kfz-Belastungen,
- Emissionsmodellierung,
- Ausbreitungsrechnungen für die Zusatzbelastung,
- Ermittlung der Gesamtbelastung und
- Auswertung.

Der Einfluss der Szenarien auf die Immissionsbelastung wurde sowohl flächenhaft für Hessen als auch lokal für die ausgewählten Straßenräume betrachtet.

Der hier vorliegende Bericht beschreibt die dazu verwendeten Datengrundlagen und ihre Aufbereitung (Kapitel 4) sowie die durchgeführten Arbeiten zur Ermittlung der Immissionen (Kapitel 5) und enthält eine Zusammenstellung der Ergebnisse (Kapitel 6). Vorangestellt sind neben dieser Einführung die Beschreibung des Untersuchungsgebiets in Kapitel 2 und das Vorgehen zur Auswahl des Bezugsjahrs in Kapitel 3.

Die Aufbereitung der meteorologischen Daten und die Erstellung der Eingangsfelder für die Ausbreitungsrechnung erfolgte dabei mit dem Analysesystem TRAMPER (s. Abschnitt 5.1).

Die Modellierung der Vorbelastung erfolgte mit dem dreidimensionalen chemischen Transportmodell REM/CALGRID (RCG, s. Abschnitt 5.2.1). RCG wird zur Bestimmung der Luftqualität in der europaweiten und der nationalen Raumskala in einer Auflösung von ca. $28 \times 28 \text{ km}^2$ und in der urbanen Raumskala bis zu einer Auflösung von ca. $1 \times 1 \text{ km}^2$ und darunter verwendet. Die Anwendung des RCG-Modells erfolgte im vorliegenden Projekt in vier Skalen bis zu einer Auflösung von circa $440 \times 500 \text{ m}^2$ (s. Abschnitt 5.2.2).

Die Aufbereitung der Messdaten, die Datenassimilation der Modellergebnisse, die Kombination von Modell- und Messdaten sowie die Qualitätssicherung mit Kreuzvalidierung erfolgte mit dem System FLADIS (s. Abschnitt 5.3.1).

Die Zusatz- und Gesamtbelastung in den Straßenabschnitten wurde mit dem Canyon-Plume-Box-Modell (CPB) berechnet. Das CPB-Modell ist ein 2-dimensionales analytisch-empirisches Modell, mit dem die Luftschadstoffimmissionen in einer Straßenschlucht berechnet werden können (s. Abschnitt 5.5.1). Die Vorbelastung wird dazu von den urbanen Ausbreitungsrechnungen bereit gestellt („one-way-nesting“).

Mit Hilfe der beiden Modelle wurden die Beiträge der hessischen Emissionen an der Luftbelastung in verschiedenen Städten und Gemeinden bestimmt. Diese rechnerisch bestimmten Beiträge einzelner Verursachergruppen sollen bei der Erarbeitung von Luftreinhaltungsplänen verwendet werden und eine quantitative Abschätzung der Wirksamkeit möglicher Maßnahmen bezüglich einer Verbesserung der Luftqualität ermöglichen.

2 Untersuchungsgebiet

Das in diesem Projekt betrachtete Gebiet umfasst die Fläche des Landes Hessen, die als Untersuchungsgebiet bezeichnet wird. Da für die Ausbreitungsrechnungen ein rechteckiges Modellgebiet erforderlich ist, wurde als Untersuchungsgebiet des RCG-Modells für die Ausbreitungsrechnung ein Rechteck um Hessen definiert, das als RCG-Untersuchungsgebiet bezeichnet wird. Die Ausbreitungsrechnungen erfolgen aufgrund der Netzsachtelung bis in die europäische Ebene in einem geographischen Koordinatensystem (s. Abschnitt 5.2.1). Diese größeren Gebiete, die das RCG-Untersuchungsgebiet beinhalten, werden als Modellgebiete bezeichnet.

Bei einer Gesamtfläche von 21'115 km² weist Hessen eine räumliche Ausdehnung von maximal ca. 252 km in Nord-Süd-Richtung und ca. 174 km in West-Ost-Richtung auf. Hessen hat insgesamt 1'425 km Binnengrenzen mit den sechs Bundesländern Niedersachsen, Thüringen, Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen (HeStaLa, 2014).

Teilweise verläuft die Landesgrenze Hessens in der Mitte größerer Flüsse. So bildet die Weser im Nordosten einen Teil der Landesgrenze zu Niedersachsen, die Werra im Osten zu Thüringen, der Neckar im Süden auf 13 km zu Baden-Württemberg, der Rhein im Südwesten auf 105 km zu Rheinland-Pfalz und die Diemel im Norden zu Nordrhein-Westfalen (HMULF, 1999). Als weitere ausgedehnte Fließgewässer sind, neben den bereits aufgeführten, zudem Fulda (216 Flusskilometer in Hessen), Lahn (166 km), Eder (129 km), Nidda (90 km) und Main (77 km) (HeStaLa, 2014) zu nennen.

Die topographische Struktur des Landes ist geprägt von seinen Mittelgebirgen, die verschiedene flache Landschaften einschließen. Die höchste Erhebung des Landes ist die Wasserkuppe im Mittelgebirge Rhön mit einer Höhe von 950 m (HeStaLa, 2014).

Klimatisch gehört Hessen zur Klimazone des warm-gemäßigten Regenklimas der mittleren Breiten, die Niederschläge fallen aus den feuchten Luftmassen des Atlantiks, die durch überwiegend westliche Winde das ganze Jahr über herangeführt werden. Aus dem von Nordwest nach Südost abnehmenden ozeanischen Einfluss resultieren milde Winter und nicht zu heiße Sommer (HLUG, 2014). Durch die westliche Hauptwindrichtung fällt der meiste Niederschlag als Steigungsregen im Luv der Berge, während sich die Gebiete in den Windschattenlagen, im Lee der Berge, deutlich trockener zeigen.

Hessen ist von der Fläche das siebtgrößte, von der Bevölkerungszahl das fünftgrößte Bundesland Deutschlands. Mit Stand 31.12.2014 hatte Hessen 6'093'888 Einwohner, hiermit ergibt sich eine Bevölkerungsdichte von 289 Einwohnern pro km². Diese liegt deutlich über dem Bundesdurchschnitt von 227 Einwohnern pro km² (Statistikportal, 2015). Die Bevölkerungsdichte ist in den verschiedenen Regionen unterschiedlich hoch. Die größte Einwohnerdichte findet sich in den kreisfreien Städten (s. u.), wobei 2014 Frankfurt a. M. mit 2'890 Einwohnern pro km² das Maximum bildet. Am geringsten war die Bevölkerungsdichte im Vogelsbergkreis mit 72 Einwohnern pro km² (HeStaLa, 2015).

Gegliedert ist Hessen in 21 Landkreise, die fünf kreisfreien Städte Darmstadt, Frankfurt a. M., Kassel, Offenbach und Wiesbaden sowie in 426 Gemeinden (HeStaLa, 2015). Die Landeshauptstadt ist Wiesbaden.

Im Jahr 2014 wird 42 % der Fläche Hessens landwirtschaftlich genutzt, 40 % der Fläche ist von Wald bedeckt. Siedlungs- und Verkehrsflächen machen einen Anteil von knapp 16 % aus (HeStaLa, 2015).

In der Rückprojektion des in geographischen Koordinaten definierten RCG-Untersuchungsgebiets auf das in Hessen verwendete UTM-Koordinatensystem ergibt sich damit für die Ausbreitungsrechnungen das RCG-Untersuchungsgebiet, das in Abbildung 2-1 dargestellt ist. Die Darstellung aller RCG-Modellgebiete in geographischen Koordinaten findet sich in Abschnitt 5.2.2. Die Auflösung von circa 500 x 500 m² führt zu einem das Land umfassenden Gitter mit 320 x 588, also etwa 190'000, Gitterzellen.

Die zu untersuchenden 64 Straßenabschnitte befinden sich in vier Gebieten mit den folgenden 15 Gemeinden

- im Ballungsraum Rhein-Main
 - Darmstadt,
 - Frankfurt,
 - Hanau,
 - Hofheim am Taunus,
 - Moerfelden-Walldorf,
 - Neu-Isenburg,
 - Offenbach,
 - Rüsselsheim und
 - Wiesbaden,
- im Gebiet Mittel- und Nordhessen
 - Fulda,
 - Limburg und
 - Marburg,
- im Gebiet Lahn-Dill
 - Gießen und
 - Wetzlar.
- sowie im Ballungsraum Kassel
 - Kassel.

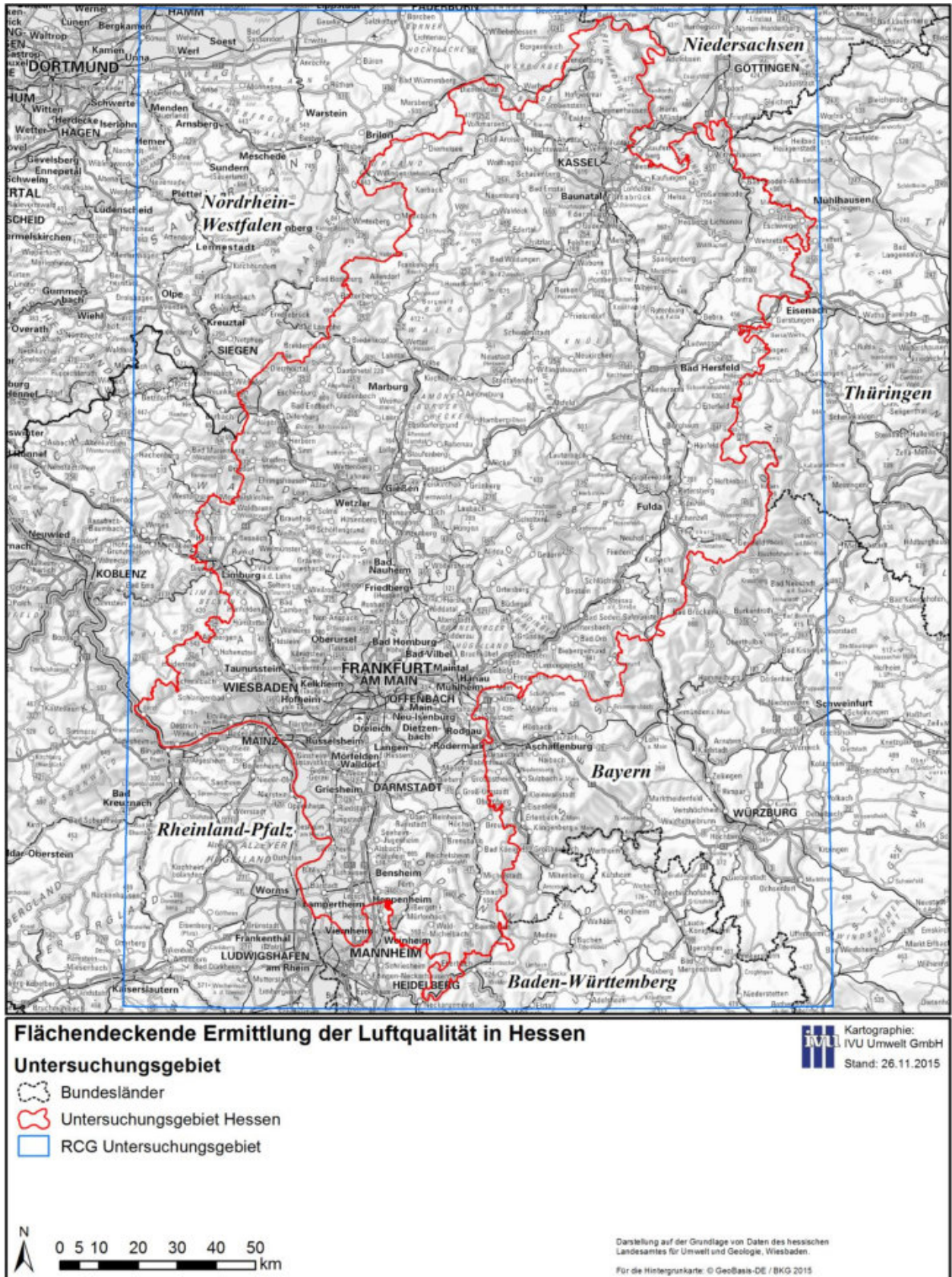


Abbildung 2-1: Untersuchungsgebiet

3 Bezugsjahr

3.1 Einführung

Die Immissionsverhältnisse sollen für ein Bezugsjahr bestimmt werden, das als ein repräsentatives Jahr betrachtet werden kann. Repräsentatives Jahr soll hier nicht in der Weise verstanden werden, dass es sich um ein gemittelttes Jahr handelt, bei dem keine Schwankungen auftreten, denn dies würde bedeuten, dass Kenngrößen, wie z. B. die Anzahl der PM10-Überschreitungstage, die von Einzelereignissen oder Episoden geprägt sind, unterdurchschnittlich ausfallen. Repräsentatives Jahr soll hier vielmehr so verstanden werden, dass dieses Jahr keine extreme Situation abbildet, aber dennoch ausgeprägte Immissionssituationen berücksichtigt werden. Gleichzeitig sollen die Ergebnisse dieses Projekts eine gewisse Aktualität aufweisen und sich nicht auf zu weit zurückliegende Eingangsdaten beziehen.

Bezüglich des Bezugsjahres wird zunächst zwischen dem Bezugsjahr der Emissionsdaten und dem Bezugsjahr bezüglich der meteorologischen Ausprägungen und der Immissionssituation unterschieden. Beide Bezugsjahre müssen nicht unbedingt das gleiche Kalenderjahr sein, sollten aber – da im Projekt auch mit konkreten Immissionsmessdaten gearbeitet wird – nach Möglichkeit nicht mehr als zwei Jahre auseinander liegen. Für die Modellierung und Weiterverarbeitung mit FLADIS ist es mindestens erforderlich, dass die meteorologischen Daten und die Immissionsdaten des gleichen Jahres (Bezugsjahres) verwendet werden.

3.2 Repräsentativität bezüglich der Emissionen

Da Änderungen in den Emissionsdaten im Wesentlichen durch langfristige Trends, die durch technischen Fortschritt, gesellschaftliche Veränderungen und andere allmählich ablaufende Prozesse bestimmt sind, hervorgerufen werden, unterscheiden sich die Emissionsdaten von einem Jahr zum nächsten i. d. R. nicht sehr stark. Dies gilt jedoch nicht, wenn grundlegende Eingangsdaten bei der Emissionsermittlung verändert werden. Dies können z. B. neue Verkehrszählraten, die Inbetriebnahme neuer großer Verkehrsachsen oder das Anfahren und die Stilllegung von großen Industrieanlagen sein, die alle lokal zu deutlichen Änderungen der Emissionen führen können.

In Anlehnung an die Anforderungen der TA Luft (2002), dass Feststellungen über die Immissionsbelastung herangezogen werden dürfen, wenn sie nicht länger als 5 Jahre zurückliegen, wird für das Bezugsjahr der Emissionen zunächst nur festgelegt, ein möglichst kurz zurückliegendes Jahr aus den letzten fünf Jahren mit verfügbaren Daten, also 2010 bis 2014, auszuwählen und sich im Weiteren an der Auswahl des meteorologischen Bezugsjahres zu orientieren. Dies auch vor dem Hintergrund, dass es bei einigen Quellengruppen ohnehin nur Kataster in größeren zeitlichen Abständen bzw. nur für ein konkretes Jahr innerhalb der letzten 5 Jahre gibt und diese damit als für mehrere Jahre gültig betrachtet werden können. Für andere Quellengruppen liegen Emissionskataster potentiell für verschiedene Bezugsjahre in dieser Zeitspanne vor und es können nach der Auswahl eines meteorologischen Bezugsjahres die Emissionen dieses Jahres herangezogen werden.

3.3 Repräsentativität bezüglich der meteorologischen Ausprägungen und der Immissionssituation

Ein repräsentatives Bezugsjahr kann prinzipiell über zwei Ansätze festgelegt werden. Zum einen können die meteorologischen Ausprägungen der einzelnen Jahre betrachtet werden, zum anderen kann die Immissionssituation an Hintergrundmessstellen analysiert werden. Eine quantitative Festlegung von meteorologischen Kenngrößen für die Auswahl eines repräsentativen Jahres ist für einzelne Standorte zwar theoretisch möglich, erfordert aber umfangreiche Untersuchungen, die den Rahmen hier sprengen, denn die für die Schadstoffausbreitung relevanten meteorologischen Parameter, wie z. B. Verteilungen der Windgeschwindigkeiten oder Austauschbedingungen, stehen aggregiert für einzelne Jahre nur sehr eingeschränkt zur Verfügung. Erschwerend kommt hinzu, dass hier keine repräsentativen Situationen für einzelne Stationen, sondern eine für ganz Hessen repräsentative Situation gesucht wird, die sich aus möglichen Einzelstudien nicht ohne weiteres ableiten lässt.

Bei dem Ansatz über die Immissionssituation werden die meteorologischen Verhältnisse mit betrachtet, da diese die Immissionssituation signifikant mitbestimmen. Die mittlere Luftschadstoffbelastung an nicht durch Einzelquellen direkt beeinflussten Stationen stellt so ein belastbares integrierendes Maß der meteorologischen Parameter, die für die Luftschadstoffausbreitung relevant sind, dar. Aus den obigen Ausführungen zu den Emissionen ergibt sich, dass die Schwankungen der Mittelwerte der Messwerte an diesen Hintergrundstationen, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Jahren beträchtlich sein können, wesentlich durch unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen hervorgerufen werden, auch wenn an einzelnen Stationen im Einzelfall Änderungen in der Emissionsstruktur verantwortlich sein können. Die langfristigen allgemeinen Entwicklungen in den Emissionsstrukturen finden sich natürlich auch in den Mittelwerten der Messungen an den Hintergrundstationen wieder, jedoch nicht in Form von Schwankungen zwischen benachbarten Jahren, sondern als langfristige Trends.

Die Auswahl des Bezugsjahres bezüglich der meteorologischen Ausprägungen und der Immissionssituation erfolgt daher im Wesentlichen anhand der Immissionsverhältnisse, indem die relevanten Kenngrößen der an den Hintergrundstationen gemessenen Luftschadstoffe der zurückliegenden Jahre dargestellt und miteinander verglichen werden, und wird ergänzt durch Betrachtungen der meteorologischen Ausprägungen.

Für die Auswertung der Messdaten an den Messstationen in Hessen wurden von dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) für die Stoffe PM₁₀ und NO₂ Daten der Jahresmittelwerte der Messstationen der zwei Kategorien

- städtischer Hintergrund und
- ländlicher Hintergrund

für die Jahre 2009 - 2014 zur Verfügung gestellt, die für die Auswertung übernommen wurden. In Tabelle 3-1 findet sich eine Übersicht der Stationseinteilung der zugrunde liegenden Stationen, wobei weder an allen Stationen alle Komponenten noch an allen Stationen über den gesamten Zeitraum gemessen wurde.

Tabelle 3-1: Stationstypen der für 2009 - 2014 verwendeten Messstationen in Hessen

Stationstyp	Station
städtischer Hintergrund	Bebra
	Darmstadt
	Flörsheim
	Frankfurt-Höchst
	Frankfurt-Lerchesberg
	Frankfurt-Ost
	Frankfurt-Sindlingen
	Fulda-Mitte
	Hanau
	Kassel-Mitte
	Limburg
	Marburg
	Michelstadt
	Mörfelden
	Raunheim
Wetzlar	
Wetzlar-Köhlersgarten	
Wiesbaden-Süd	
ländlicher Hintergrund	Bad Arolsen
	Burg Herzberg
	Fürth/Odenwald
	Grebenau
	Kellerwald
	Kleiner Feldberg
	Linden
	Riedstadt
	Spessart
	Wasserkuppe
Witzenhausen/Wald	
Zierenberg	

In Abbildung 3-1 ist die Entwicklung der Luftqualität in Hessen für PM10 seit 2009 dargestellt. In den letzten Jahren kann man bei den städtischen und ländlichen Hintergrundmessstationen, trotz vereinzelter Zunahmen zwischen zwei Jahren, einen leicht abnehmenden Trend bei der Immissionsbelastung ausmachen. Erwartungsgemäß liegt die Immissionsbelastung an den ländlichen Hintergrundmessstationen auf vergleichsweise niedrigem Niveau.

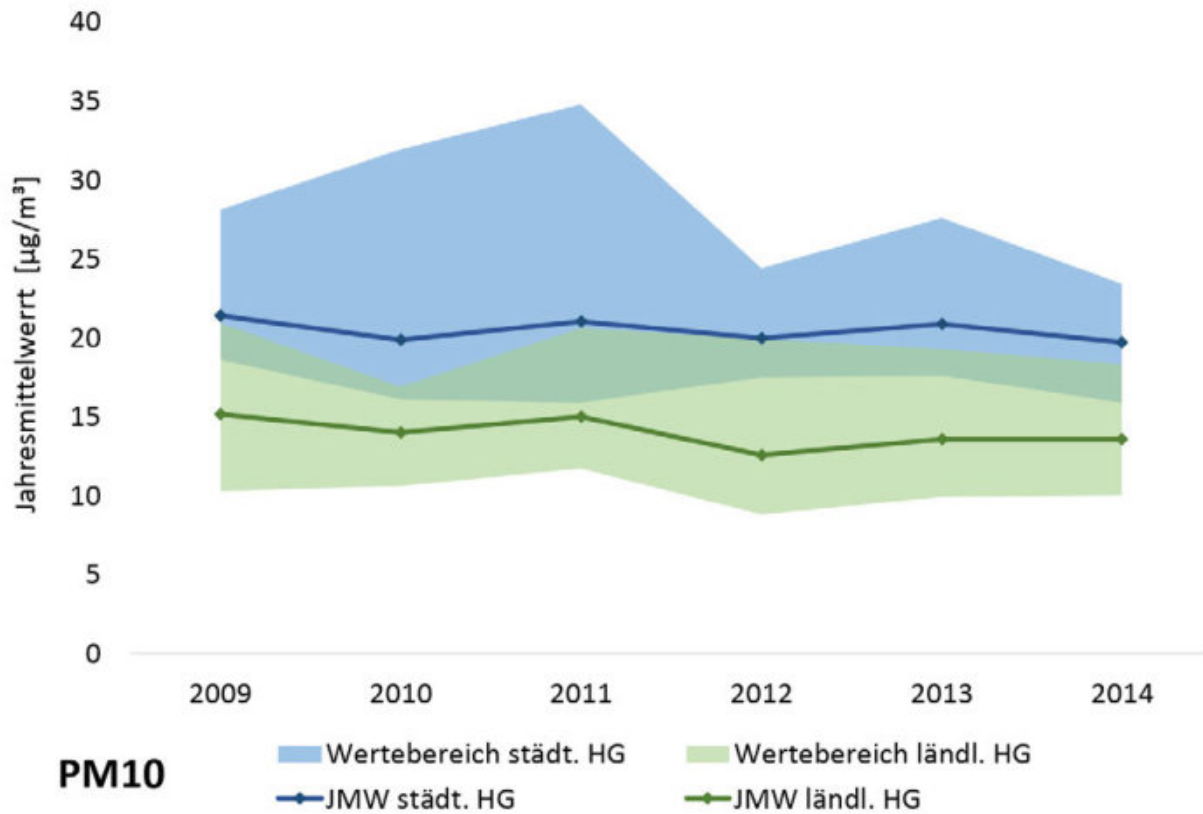


Abbildung 3-1: Entwicklung der Immissionsbelastung von PM10 seit 2009 in Hessen

Abbildung 3-2 zeigt die Entwicklung der PM₁₀-Überschreitungstage (Anzahl der Tage mit einem Tagesmittelwert > 50 µg/m³), die zwischen den einzelnen Jahren größeren Schwankungen unterliegen und es ist kein eindeutiger Trend auszumachen.

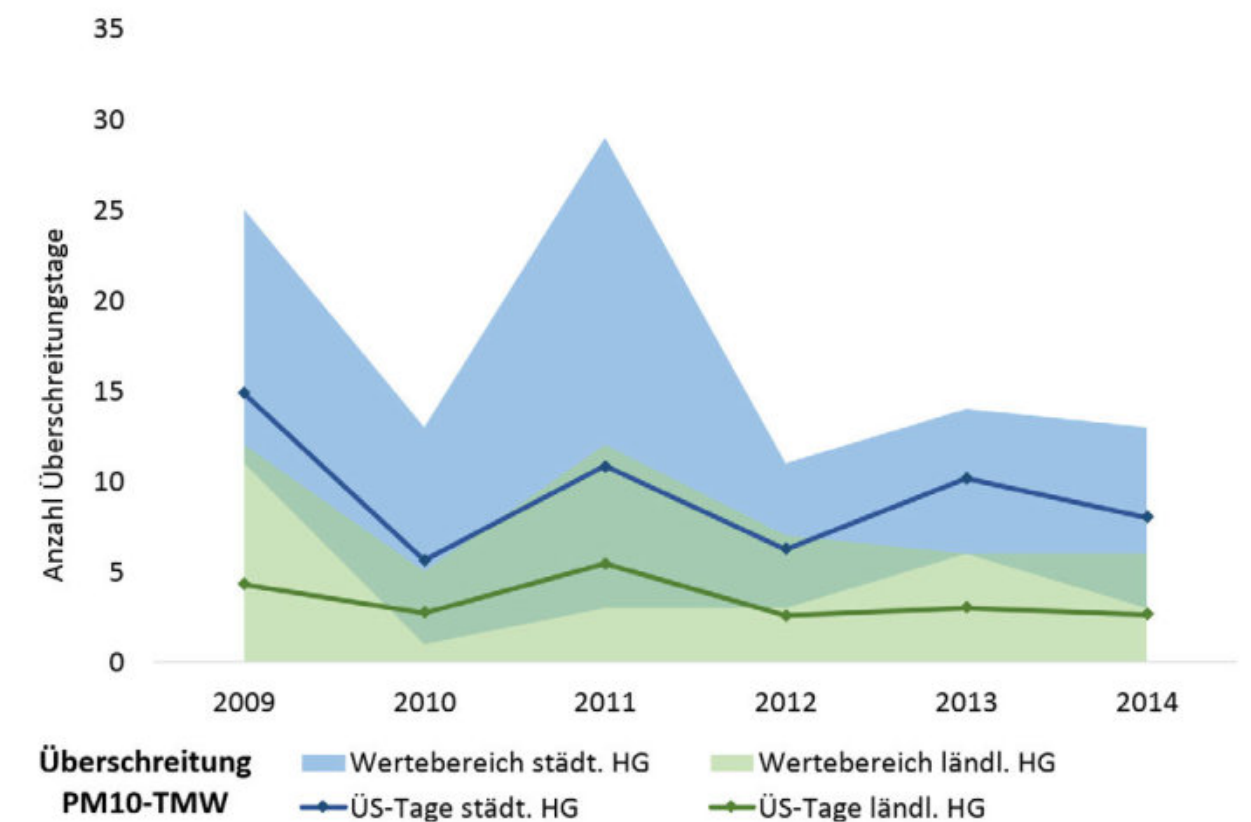


Abbildung 3-2: Entwicklung der PM₁₀-Überschreitungstage seit 2009 in Hessen

In Abbildung 3-3 ist die Entwicklung der Stickstoffdioxid-Konzentration in Hessen seit 2009 dargestellt. Man erkennt sowohl bei den städtischen Hintergrundmessstationen als auch bei den ländlichen auch bei NO_2 einen leicht abnehmenden Trend der Immissionsbelastung. Erwartungsgemäß liegen die Immissionsbelastungen des primär verkehrsbedingten Stickstoffdioxids an der ländlichen Hintergrundmessstation auf deutlich niedrigerem Niveau als an den städtischen.

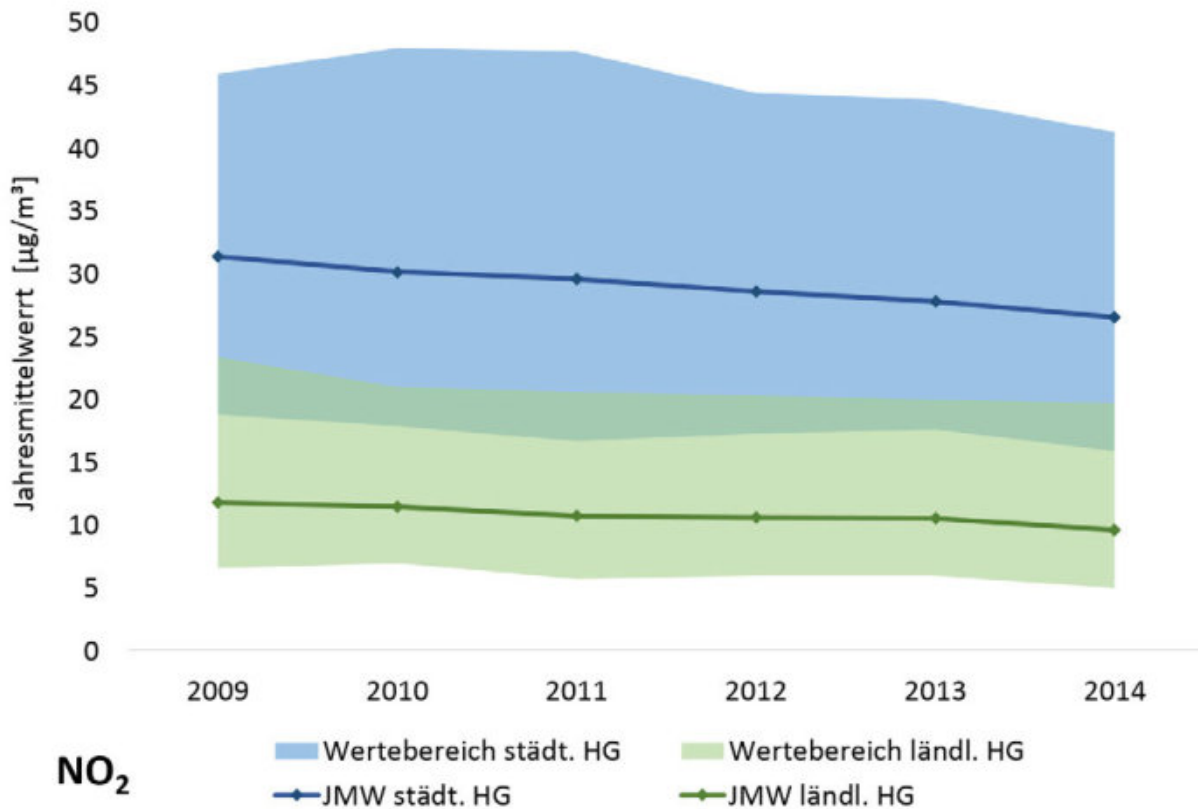


Abbildung 3-3: Entwicklung der Immissionsbelastung von Stickstoffdioxid seit 2009 in Hessen

Aufgrund der Anforderungen der TA Luft (2002), dass Feststellungen über die Immissionsbelastung herangezogen werden dürfen, wenn sie nicht länger als 5 Jahre zurückliegen, findet sich in Tabelle 3-2 ergänzend eine aggregierende Darstellung der Messwerte der Jahre 2010 bis 2014. Dort wurde für jede betrachtete Komponente der Rang des jeweiligen Jahres innerhalb der fünf Jahre gebildet, in dem der niedrigste Jahresmittelwert der jeweiligen Stationskategorie den Rang 1, der nächst höhere den Rang 2 usw. erhalten hat. Die Zahlenwerte wurden zur besseren Differenzierung nach ihrer Höhe wie folgt eingefärbt: ≤ 2 grün, > 2 blau, > 3 orange und > 4 rot. Bei der Interpretation der Ränge ist zu beachten, dass diese eine rein relative Reihung darstellen und nichts über das absolute Belastungsniveau aussagen und ein Unterschied von einer Rangstufe sowohl durch sehr kleine als auch durch große Unterschiede zwischen den Mittelwerten zweier Jahre hervorgerufen werden kann.

Tabelle 3-2: Rang der Messwerte der Jahre 2010 - 2014

	2010	2011	2012	2013	2014
PM10 Jahresmittelwert städt. Hintergrund	2	5	3	4	1
PM10 Jahresmittelwert ländl. Hintergrund	4	5	1	2	2
Mittelwert	3.0	5.0	2.0	3.0	1.5
PM10 Überschreitungstage städt. Hintergrund	1	5	2	4	3
PM10 Überschreitungstage ländl. Hintergrund	3	5	1	4	1
Mittelwert	2.0	5.0	1.5	4.0	2.0
NO ₂ Jahresmittelwert städt. Hintergrund	5	4	3	2	1
NO ₂ Jahresmittelwert ländl. Hintergrund	5	4	2	2	1
Mittelwert	5.0	4.0	2.5	2.0	1.0

1 = niedrigster, ..., 5 = höchster Wert innerhalb der Jahre 2010 - 2014

Die Darstellung in Tabelle 3-2 macht für PM10 und NO₂ aggregierend, deutlich, dass innerhalb der Jahre 2010 - 2014 das Jahr 2014 als eher gering belastet eingestuft werden kann.

Bei PM10 sind im Weiteren 2012 als eher gering, 2010 und 2013 als mittel und 2011 als eher hoch belastet zu betrachten. Bei PM2.5 kann zusätzlich 2012 als eher gering und die Jahre 2010 und 2011 als eher hoch belastet betrachtet werden.

Bei NO₂ kann zusätzlich 2013 als eher gering und ebenfalls die Jahre 2010 und 2011 als eher hoch belastet betrachtet werden, wobei bei NO₂ zwischen den Jahren eher geringe Schwankungen auftreten und in der Rangfolge der generelle, leicht abnehmende, Trend deutlich wird.

In Ergänzung dieser Auswertungen findet sich in der folgenden Tabelle 3-3 eine Zusammenstellung qualitativer Aussagen zur Belastungssituation und zur meteorologischen Situation der Jahre 2009 bis 2014 aus den Lufthygienischen Jahresberichten des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015a), den Berichten des Umweltbundesamtes zur Luftqualität (UBA 2010, 2011, 2012a, 2013, 2014a, 2015) und den Pressemitteilungen des Deutschen Wetterdienstes zum Wettergeschehen dieser Jahre (DWD 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014). Die Aussagen in den Quellen sind für die einzelnen Jahre unterschiedlich umfangreich und für weiter zurück liegende Jahre deutlich gehalten und spiegeln damit wieder, dass diese Thematik in den letzten Jahren intensiver betrachtet und insbesondere kommuniziert wird.

Tabelle 3-3: Ergänzende qualitative Aussagen zur Belastungssituation und zur meteorologischen Situation der Jahre 2009 - 2014
2014
HLUG (2015):

- zu warm und zu trocken, Sonnenscheindauer unterdurchschnittlich
- einige austauscharme Wetterlagen im Frühjahr und im Herbst
- Schönwetterperioden im Juni und Juli
- längere deutlich zu warme Periode von Januar bis April und eine ebenfalls zu warme Periode von September bis Dezember
- viel zu nass im Mai, Juli und August

DWD (2014):

- wärmstes Jahr seit 1881 in Deutschland, dem Beginn regelmäßiger Temperaturmessungen, Zahl der Sonnenscheinstunden etwas über dem Mittel
- teilweise extremer Regen bei Gewittern, insgesamt jedoch etwas zu trocken
- Hessen: mittlere Temperatur 10.3°C, Niederschlagsmenge 754 l/m², mit 1'495 Sonnenstunden das sonnenscheinärmste Bundesland

UBA (2015):

- Jahr mit geringer Feinstaubbelastung, Überschreitungstage hauptsächlich im Frühjahr (Januar bis April)
- keine ausgeprägten PM10-Episoden
- PM10-Jahresmittelwerte leicht über 2012 und 2013, langfristig betrachtet jedoch eines der am wenigsten belasteten Jahre
- keine ausgeprägten Episoden mit hohen Ozonbelastungen

2013
HLUG (2014):

- Temperatur ausgeglichen, zu trocken, Sonnenscheindauer leicht unterdurchschnittlich
- wenige austauscharme Wetterlagen im Frühjahr und im Herbst
- Schönwetterperioden im Juni, Juli und August
- längere zu kalte Perioden von Januar bis Mai sowie eine zu warme bis durchschnittlich temperierte Periode von Juni bis Dezember
- bis auf Mai und die drei Herbstmonate durchweg zu trocken

DWD (2013):

- Temperatur etwas über dem langjährigen Mittel, Niederschlag und Sonnenschein leicht darunter
- im März ungewöhnliche Kälte, sonnig-trockener Sommer mit drei markanten Hitzeperioden
- Hessen: mittlere Temperatur 8.7°C, Niederschlagsmenge 784 l/m², 1'403 Sonnenstunden

UBA (2014a):

- Jahr mit geringer Feinstaubbelastung, Überschreitungstage hauptsächlich im Frühjahr (Januar bis April)
- keine ausgeprägten PM10-Episoden
- PM10-Jahresmittelwerte leicht über 2012, langfristig betrachtet jedoch eines der am wenigsten belasteten Jahre
- keine ausgeprägten Episoden mit hohen Ozonbelastungen

2012
HLUG (2013):

- zu warm und zu trocken, Sonnenscheindauer überdurchschnittlich
- anhaltende austauscharme Wetterlagen im Frühjahr und im Herbst
- Schönwetterperioden im Frühling (Februar bis Mai) und im August bis Oktober

DWD (2012):

- erneut etwas wärmer als das Mittel, Niederschläge und Sonne jedoch nahe dem Mittel

UBA (2013):

- eine der niedrigsten PM10-Belastungen seit 2000 (Anm. der Autoren: das gilt auch noch einschließlich 2014)
- keine extremen Wetterlagen, wie sie im Frühjahr und Herbst 2011 beobachtet wurden
- keine ausgeprägten PM10-Episoden
- PM10-Jahresmittelwerte deutlich unter dem Niveau der Jahre 2009 - 2011
- keine ausgeprägten Episoden mit hohen Ozonbelastungen

- eisige Kälte Anfang Februar, große Hitze im August bei Temperaturen von fast 40 Grad
- Hessen: mittlere Temperatur 9.1°C, Niederschlagsmenge 749 l/m², 1'625 Sonnenstunden

Ozonbelastungen

2011**HLUG (2012):**

- zu warm und viel zu trocken, Sonnenscheindauer überdurchschnittlich
- lang anhaltende austauscharme Wetterlagen im Februar/März und im November/Dezember
- Schönwetterperioden im Frühjahr (März-Mai) und im Spätsommer bzw. Herbst (September-November)
- wechselhafte Witterung im Sommerhalbjahr mit unterdurchschnittlicher Sonnenscheindauer
- insbes. November gekennzeichnet durch mehrere ausgeprägte und lang anhaltende Hochdruckgebiete → intensive austauscharme Wetterlagen

DWD (2011):

- gehörte knapp zu den 5 wärmsten Jahren seit 1881
- außergewöhnliche Hochdrucklagen im Frühjahr
- 11 von 12 Monaten zu warm, nur der Juli zu kühl
- Hessen: mittlere Temperatur 9.6°C, Niederschlagsmenge 659 l/m², 1'793 Sonnenstunden

UBA (2012a):

- insgesamt 9 PM10-Episoden, lang andauernd und intensiv
- PM10 im Mittel höher als 2007 - 2010
- mehrere Episoden kalten Hochdruckwetters Ende Januar bis März und im November
- bereits im März mehr Überschreitungstage als 2012 im ganzen Jahr
- Januar bis Anfang April so viele PM10-Überschreitungstage wie 2005 - 2010 bis zum Herbstende; vor allem im ländlichen Hintergrund
- außergewöhnlich viele Überschreitungstage im November in langer Episode
- keine ausgeprägten Episoden mit hohen Ozonbelastungen

2010**HLUG (2011):**

- Temperatur und Niederschlagsbilanz ausgeglichen, Sonnenscheindauer leicht überdurchschnittlich
- zwei warme Perioden im Frühjahr (März/April) und im Sommer (Juni/Juli)

DWD (2010):

- etwas zu kalt, da nach 13 zu warmen Jahren erstmals leicht unter dem Klimamittel sowie zu nass
- Hessen: mittlere Temperatur 8.1°C, Niederschlagsmenge 772 l/m², 1'520 Sonnenstunden

UBA (2011):

- gegenüber 2000 - 2009 geringe PM10-Belastungen, nur wenig über dem Niveau von 2007 - 2009
- sehr winterlicher Beginn mit häufig östlichen Winden
- Januar und Februar so viele PM10-Überschreitungstage wie 2005 - 2009 bis Ende des Sommers; vor allem im ländlichen Hintergrund
- Jahresende sehr kalt und schneereich
- im Sommer keine ausgeprägten Episoden mit hohen Ozonbelastungen, jedoch eine Hitze- und Trockenwelle im Juli

2009**HLUG (2010):**

- zu warm, Niederschlagsbilanz ausgeglichen, Sonnenscheindauer unterdurchschnittlich
- lang anhaltende Inversionswetterlage im Januar
- wechselhafte Witterung im Sommerhalbjahr
- Schönwetterperioden im Frühjahr und im Spätsommer

DWD (2009):

- etwas zu warm, strenger Winter, vier sehr

UBA (2010):

- PM10 höher als 2008, wieder wie 2007
- austauscharmer, kalter Januar
- vor allem im Norden und Osten: sehr warmer und trockener April mit hohen PM10-Werten
- keine Episoden erhöhter Ozonbelastungen

kalte und acht warme Monate

- Hessen: mittlere Temperatur 9.3°C,
Niederschlagsmenge 748 l/m²,
1'582 Sonnenstunden

HLUG = Berichte des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie zu Jahreskenngrößen;

UBA = Berichte des Umweltbundesamtes zur Luftqualität;

DWD = Pressemitteilungen des Deutschen Wetterdienstes zum Wettergeschehen

3.4 Festlegung des Bezugsjahrs

Die Auswahl des Bezugsjahres erfolgte in Absprache mit dem Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) sowie dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). In der Zusammenführung ergibt sich für die Wahl des Bezugsjahres bezüglich der Immissionssituation auf Basis der Betrachtung der Belastungen an Hintergrundmessstationen, dass das Jahr 2014 für eine repräsentative Situation weniger geeignet ist, da es im Vergleich zu den anderen Jahren gering belastet ist. 2011 erscheint wegen seiner hohen Belastung und den zahlreichen lang anhaltenden austauscharmen Wetterperioden ebenfalls als nicht geeignet. 2012 erscheint ebenfalls nicht besonders gut geeignet, weil auch in diesem Jahr die Partikelbelastung eher gering ist. Gegen 2010 spricht zum einen, dass in diesem Jahr die höchsten NO₂-Immissionen vorliegen bei einem seither leicht abnehmenden Trend und zum anderen, dass es das am weitesten zurückliegende Jahr ist, bei dem von den größten Abweichungen zur gegenwärtigen Emissionssituation auszugehen ist. Weil auch aus den meteorologischen Charakterisierungen keine Ausschlusskriterien für 2013 vorliegen, ergibt sich als Bezugsjahr bezüglich der Meteorologie damit das Jahr 2013. Mit der Festlegung auf 2013 wird ein erst kurz zurückliegendes Bezugsjahr ausgewählt und damit auch dem Kriterium, bezüglich der Emissionen ein möglichst aktuelles Jahr auszuwählen, Rechnung getragen.

Bezüglich der Emissionen (s. Abschnitt 4.5) wird bei den Quellengruppen, die für verschiedene Jahre zur Verfügung stehen, ebenfalls das Bezugsjahr 2013 festgelegt. Für die Quellengruppen, die nur für einzelne Jahre zur Verfügung stehen wird der jeweils aktuelle Datenbestand verwendet.

4 Daten

4.1 Straßengeometrien und Verkehrsdaten

Die Lage der 64 zu untersuchenden Straßenräume in den vier Gebieten und die Daten zu den Straßenraumgeometrien sowie die zugehörigen Verkehrsdaten (die aus verschiedenen Bezugsjahren stammen) und Verkehrssituationen wurden teilweise von den Kommunen an den Auftraggeber geliefert und dem Auftragnehmer bereitgestellt. Sie wurden vom Auftragnehmer, soweit möglich, in Abstimmung mit dem Auftraggeber auf Plausibilität geprüft und gegebenenfalls ergänzt oder korrigiert.

In allen Tabellen und Abbildungen zu den 64 Abschnitten sind die Abschnitte unterteilt nach den Gebietszugehörigkeiten Ballungsraum Rhein-Main, Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill sowie Ballungsraum Kassel jeweils in alphabetischer Sortierung der Städtenamen und innerhalb der Städte nach den Abschnittsbezeichnungen aufgeführt.

Die Lagebeschreibung und die Kfz-Belastung der 64 Abschnitte finden sich in Tabelle 4-1. Zusätzliche Daten, die die Abschnitte beschreiben bzw. weitere Detaillierungen finden sich in Tabelle 5-4 und Tabelle 5-5 in Abschnitt 5.5.4.

Tabelle 4-1: Lage der 64 Straßenabschnitte

ID	Stadt	Straße	Zwischen...	und...	DTV
Ballungsraum Rhein-Main					
1		Bleichstraße	Kasinostraße	Gagernstraße	17'780
2		Heidelberger Straße	Sandbergstraße	Bessunger Straße	17'720
3		Heinrichstraße	Heidelberger Straße	Staufenbergstraße	24'150
4	Darmstadt	Hügelstraße	Wilhelm-Glässig-Straße	Schützenstraße	24'655
5		Kasinostraße	Bleichstraße	Rheinstraße	31'332
6		Nieder-Ramstadter Straße	Kiesstraße	Heinrichstraße	21'573
7		Rhoenring	Eckhardtstraße	Arheilger Straße	23'260
8		Adolf-Haeuser-Straße	Ludwigshafener Straße	Leverkuser Straße	6'685
9		Alte Falterstraße	Fabriciusstraße	Autogenstraße	4'490
10		Bleichstraße	Elefantengasse	Friedberger Tor	20'003
11		Bockenheimer Landstraße	Senckenberger Anlage	Beethovenstraße	24'000
12		Eschersheimer Landstraße I	Fellnerstraße	Bockenheimer Anlage	29'789
13		Eschersheimer Landstraße II	Körberstraße	Hügelstraße	18'314
14		Friedberger Landstraße	Zeisselstraße	Wielandstraße	25'798
15	Frankfurt	Hochstraße	Große Bockenheimer Straße	Kleine Hochstraße	16'389
16		Höhenstraße	Burgstraße	Heidestraße	27'358
17		Königsteiner Straße	Gerlachstraße	Konrad-Glatt-Straße	9'460
18		Lorscher Straße	Arnoldshainer Straße	Alexanderstraße	12'951
19		Mainzer Landstraße	Karlstraße	Francois-Mitterand-Platz	40'583
20		Offenbacher Landstraße	Mümlingstraße	Kinzigstraße	9'959
21		Schweizerstraße	Schaumainkai	Metzlerstraße	15'222
22		Sindlinger Bahnstraße	Lehmkaufstraße	Farbenstraße	6'017
23	Taunusstraße	Am Hauptbahnhof	Moselstraße	9'558	
24		B 45 Hanauer Vorstadt	Hanauer Vorstadt	Eugen-Kaiser-Straße	12'980
25		Barbarossastraße	Freigerichtstraße	Karl-Bierschenk-Straße	17'700
26	Hanau	B 45 Nussallee	Katharina-Belgica-Straße	Fischerhüttenweg	25'960
27		L 3209 Lamboystraße	Paul-Ehrlich-Straße	Karl-Marx-Straße	37'760
28	Hofheim a. Taunus	Elisabethenstraße	Neugasse	Zeilsheimer Straße	10'000
29	Mörfeld.-Walldorf	Westendstraße	Bert-Brecht-Straße	Querstraße	8'400
30	Neu-Isenburg	Frankfurter Straße	Friedrichstraße	Bahnhofsstraße	16'150
31		Bieberer Straße West	Bismarkstraße	Friedhofstraße	9'195
32	Offenbach	Mainstraße Ost	Austraße	Arthur-Zitzer-Straße	20'368
33		Untere Grenzstraße	Lämmerspieler Weg	Schuckertweg	27'204
34		Waldstraße	Friedensstraße	Gustav-Adolf-Straße	19'385
35	Rüsselsheim	Rugbyring	Hamburger Straße	Freiligrathstraße	28'654
36	Wiesbaden	Kaiser-Friedrich-Ring	Wielandstraße	Gutenbergplatz	35'700
37		Schiersteinerstraße	Niederwaldstraße	Kaiser-Friedrich-Ring	26'400

Verkehrsbelastung als durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in Kfz/d (DTV)

Fortsetzung auf nächster Seite

ID	Stadt	Straße	Zwischen...	und...	DTV
Mittel- und Nordhessen					
38		Frankfurter Straße	Wallweg	Im Fischfeld	17'000
39	Fulda	Leipziger Straße	Bosestraße	Moltkestraße	16'800
40		Niesiger Straße	Mackenrodtstraße	An der Steingrube	10'400
41		Petersberger Straße	Lindenstraße	Heinrichstraße	22'100
42		Diezer Straße	Oraniensteiner Weg	Tilemannstraße	21'630
43		Frankfurter Straße	Im Schlenkert	Wiesbadener Straße	19'219
44	Limburg	Schiede I (südlich)	Diezer Straße	Weiersteinstraße	34'417
45		Schiede II (nördlich)	Diezer Straße	Josef-Ludwig-Straße	27'951
46		Stephanshügel	Industriestraße	Holzheimer Straße	6'069
47		Am Grün	Schulstraße	Universitätsstraße	6'735
48	Marburg	Elisabethstraße	Bahnhofstraße	Friedrich-Siebert-Weg	10'827
49		Universitätsstraße	Gutenbergstraße	Am Grün	14'559
Lahn-Dill					
50		Grünberger Straße	Gutenbergstraße	Am Brennofen	23'700
51	Gießen	Neustadt	Albert-Schweitzer-Straße	Pfarrgarten	10'100
52		Südanlage	Frankfurter Straße	Bleichstraße	25'200
53		Westanlage	Gabelsbergerstraße	Bahnhofstraße	26'900
54		Ernst-Leitz-Straße	Kalsmunt / Westhang	Schützenstraße	20'455
55	Wetzlar	Hermannsteiner Straße	Buderusstraße	Steubenstraße	18'675
56		Karl-Kellner-Ring	Neustadt	Sophienstraße	25'536
Ballungsraum Kassel					
57		Brüderstraße	Marställer Platz	Kreuzung Altmarkt	43'900
58		Frankfurter Straße	Beethovenstraße	Mozartstraße	27'100
59		Fünffensterstraße	Neue Fahrt	Obere Königsstraße	16'400
60	Kassel	Holländische Straße	Fichtnerstraße	Wiener Straße	29'900
61		Leipziger Straße	Kunigundishof	Ringhofstraße	17'000
62		Mauerstraße	Kölnische Straße	Poststraße	750
63		Schönfelder Straße	Paul-Nagel-Straße	Sternbergstraße	22'900
64		Wolfhager Straße	Brandaustraße	Mombachstraße	14'900

Verkehrsbelastung als durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in Kfz/d (DTV)

4.2 Topographie

In den Ausbreitungsrechnungen ist die Topographie zu berücksichtigen. Vom HLNUG wurde dafür das digitale Geländemodell mit einer Gitterauflösung von 200 m des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie für Deutschland bereitgestellt (DGM200, BKG, 2015), das in Abbildung 4-1 dargestellt ist.

Zur Bestimmung der Längsneigung in den kleinräumigen Betrachtungen in den Straßenräumen wurde vom HLNUG zusätzlich ein DGM5 mit einer Gitterauflösung von 5 m bereitgestellt.

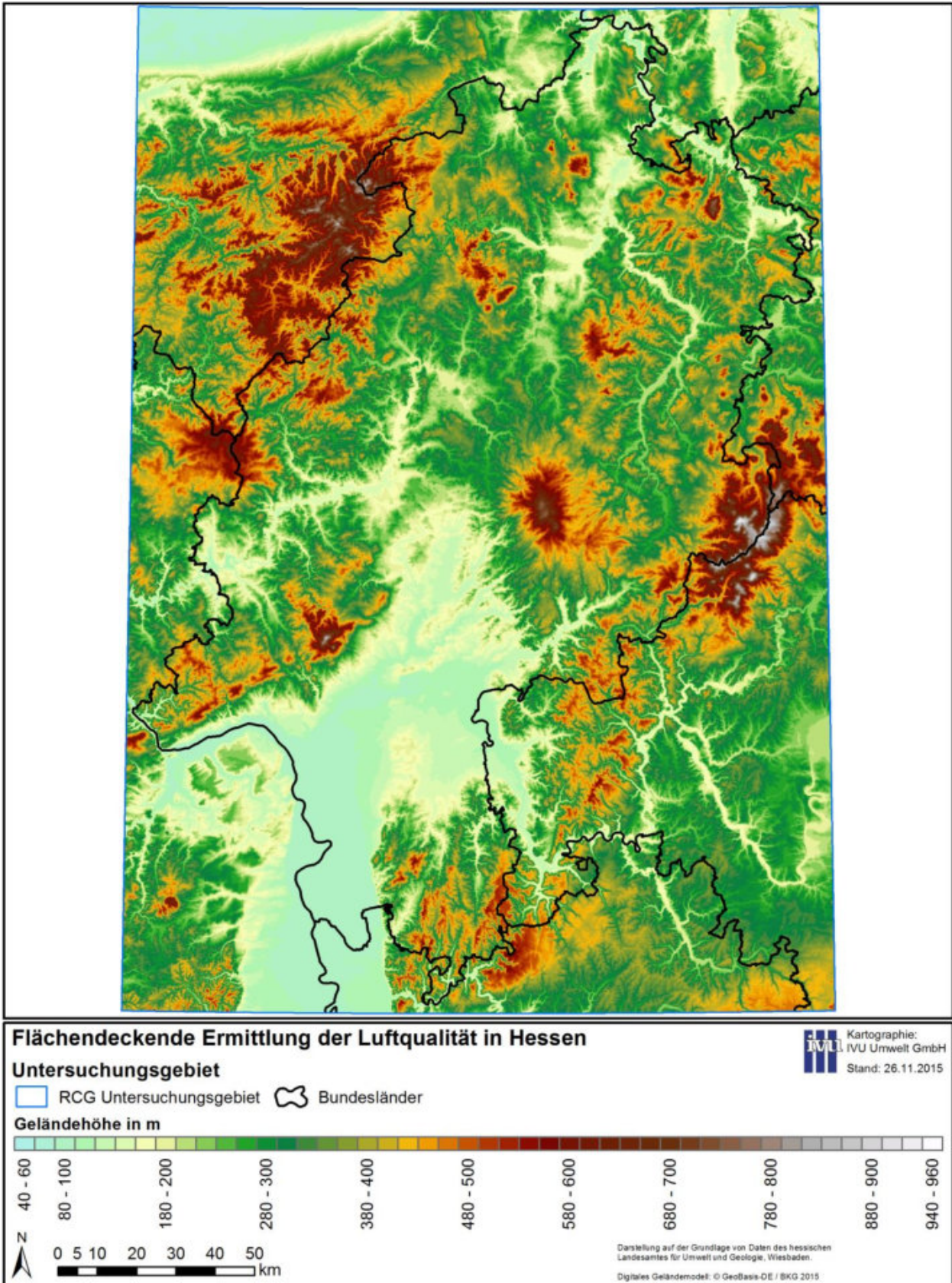


Abbildung 4-1: Topographie im RCG-Untersuchungsgebiet

4.3 Landnutzung

Daten zur Land- bzw. Flächennutzung werden im Rahmen des Projekts für die Erstellung der meteorologischen Felder, für die Ausbreitungsmodellierung und für die räumliche Verteilung aggregierter Emissionsdaten benötigt. Als Landnutzungsdaten wurden vom HLNUG eine aggregierte Flächennutzung auf Basis des Basis-DLM bzw. DLM25 aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) mit Stand 2014 in einer aggregierten Form mit 10 Nutzungsklassen sowie in einer ergänzenden Differenzierung der Nutzungsklasse „Siedlung“ bereitgestellt.

Die 10 aggregierten Nutzungsklassen sind mit ihren jeweiligen Anteilen an der Gesamtfläche in Tabelle 4-2 zusammengestellt und in Abbildung 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-2: Landnutzung in Hessen gemäß ATKIS

Nutzungsart	Anteil
Acker	28.3 %
Mischwald	22.3 %
Grünland	16.2 %
Nadelwald	11.4 %
Siedlung	10.7 %
Laubwald	9.3 %
Gewässer	0.6 %
Verkehr	0.5 %
Sonderkultur	0.3 %
Sonstiges	0.3 %

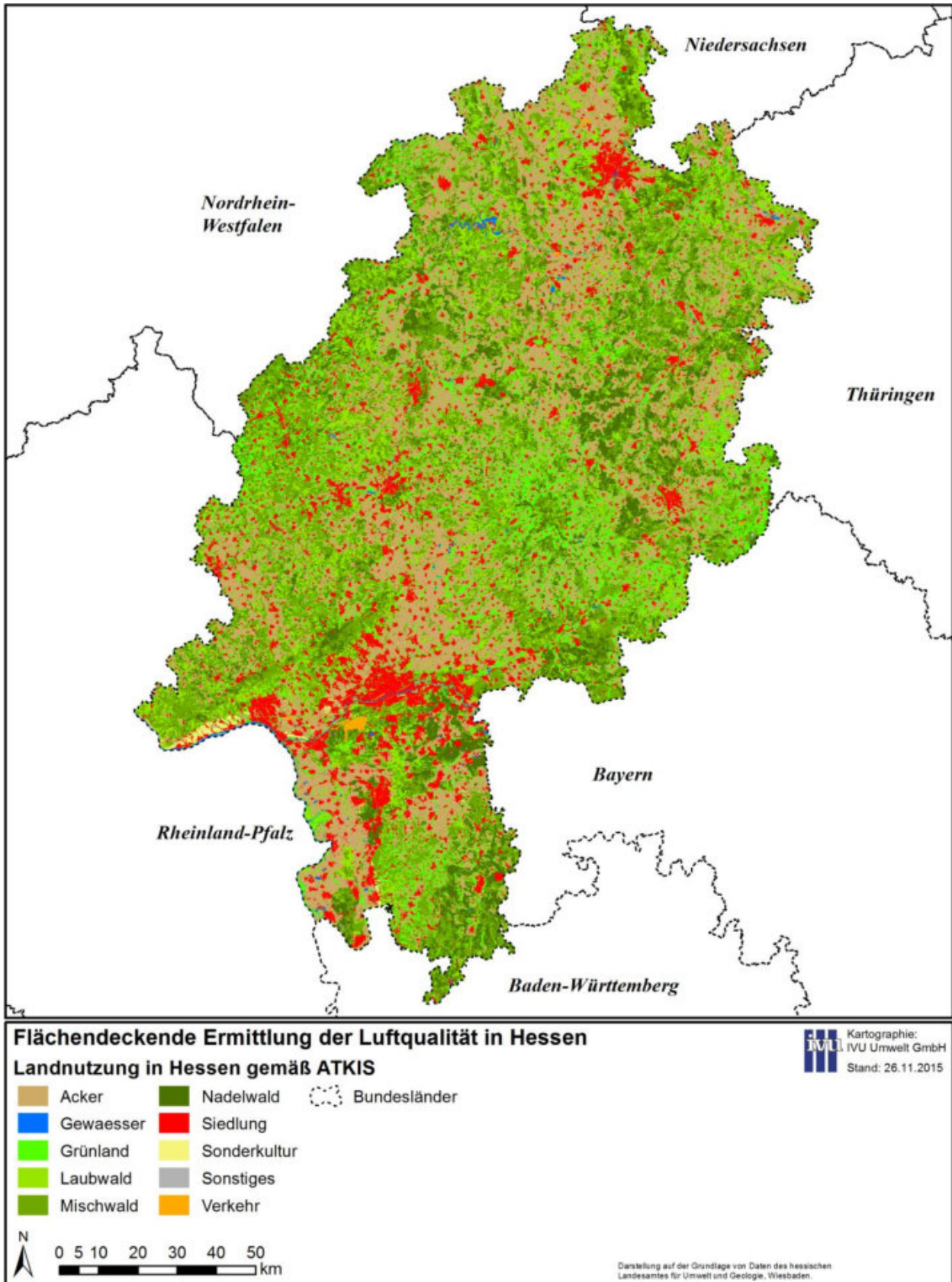


Abbildung 4-2: Landnutzung in Hessen gemäß ATKIS

Diese Daten wurden für die Bereiche des Nest 3, die in Hessen liegen, mit den Gitterzellen der RCG-Modellierung verschnitten und für jede Gitterzelle der relative Anteil der Nutzungsarten an der Fläche der Gitterzelle ermittelt und den neun RCG-Landnutzungsklassen

- städtische Flächen und Verkehrsflächen,
 - Ackerbau,
 - Grünland,
 - Laubwald,
 - Nadelwald,
 - Mischwald,
 - Gewässer,
 - Sand oder Fels sowie
 - Gehölze und Buschwerk
- zugeordnet.

Für die räumliche Disaggregation von flächenbezogenen Emissionsangaben (s. Abschnitt 4.5) wurden die differenzierteren ATKIS-Daten verwendet. Dabei wurden die gemeindebezogenen Emissionsdaten nach verschiedenen Aufteilungsverhältnissen auf die Flächen der folgenden vier ATKIS-Objektarten innerhalb der jeweiligen Gemeinde verteilt:

- Wohnbaufläche (Objektart 41001): Baulich geprägte Fläche einschließlich der mit ihr im Zusammenhang stehenden Freiflächen (z. B. Vorgärten, Ziergärten, Zufahrten, Stellplätze und Hofraumflächen), die ausschließlich oder vorwiegend dem Wohnen dient.
- Industrie- und Gewerbefläche (Objektart 41002): Fläche, die vorwiegend industriellen oder gewerblichen Zwecken dient.
- Fläche gemischter Nutzung (Objektart 41003): Bebaute Fläche einschließlich der mit ihr im Zusammenhang stehenden Freifläche (Hofraumfläche, Hausgarten), auf der keine Art der baulichen Nutzung vorherrscht. Solche Flächen sind insbesondere ländlich-dörflich geprägte Flächen mit land- und forstwirtschaftlichen Betrieben, Wohngebäuden u.a. sowie städtisch geprägte Kerngebiete mit Handelsbetrieben und zentralen Einrichtungen für die Wirtschaft und die Verwaltung.
- Fläche besonderer funktionaler Prägung (Objektart 41007): Baulich geprägte Fläche einschließlich der mit ihr im Zusammenhang stehenden Freifläche, auf denen vorwiegend Gebäude und/oder Anlagen zur Erfüllung öffentlicher Zwecke oder historische Anlagen vorhanden sind.

Als Grundlage für die räumliche Disaggregation wurden die RCG-Gitterzellen des Rechengitters mit der feinsten räumlichen Auflösung (Nest 3, s. Abschnitt 5.2.2) mit den Gemeindegrenzen verschnitten, was zu 148'621 Teilflächen in Hessen führt, die jeweils eindeutig zu einer Gemeinde und einer RCG-Gitterzelle gehören. In einem weiteren Schritt wurden diese Flächen mit den genannten ATKIS-Nutzungsflächen verschnitten, was zu 163'245 Teilflächen führt, die jeweils eine Nutzungsart haben und eindeutig zu einer Gemeinde und einer RCG-Gitterzelle gehören.

Für jede dieser Teilflächen wurde der Anteil $A_{N,G}$ berechnet, den sie an der Gesamtfläche der Nutzungsart N der Gemeinde G hat. Mit diesen $A_{N,G}$ können dann die flächenhaften Emissionen der Gemeinden, die mit quellengruppenspezifischen Verteilungs-

schlüsseln für die einzelnen Nutzungsarten gewichtet werden (s. Abschnitt 4.5), multipliziert werden und man erhält damit für jede Teilfläche die absoluten Emissionen $E_{N,G,Q}$ der Quellengruppe Q aus der Gemeinde G bezüglich der Nutzungsart N .

Da das RCG-Modell innerhalb einer Gitterzelle nicht weiter räumlich differenziert, kann man dann für eine Quellengruppe Q die $E_{N,G,Q}$ aller Teilflächen innerhalb einer RCG-Gitterzelle summieren und an das Modell für jede Gitterzelle diese Summen übergeben.

Für die räumliche Disaggregation der Emissionen von Landwirtschaft und Nutztierhaltung wurde auf die Ackerflächen aus ATKIS zurückgegriffen, die ebenfalls mit der oben beschriebenen Methodik aufbereitet wurden.

4.4 Gebäude

Für die räumliche Verteilung der gemeindeweise aggregierten Emissionsdaten der Gebäudeheizung und Kleinverbraucher wurde nicht allein auf die Landnutzung zurückgegriffen, sondern eine Verteilung auch über die Gebäudevolumina durchgeführt (s. Abschnitt 4.5.3). Dazu wurde vom HLNUG ein Level-of-Detail-1-Gebäudemodell (LoD1, auch als „Klötzchenmodell“ bezeichnet) für Hessen mit insgesamt 4'753'241 Gebäuden bereitgestellt. Dieses Gebäudemodell wurde auch im Rahmen der Ermittlung der geometrischen Parameter der Straßenabschnitte (s. Abschnitt 5.5.4) verwendet.

4.5 Emissionen

Zur Berechnung der Vorbelastung im RCG-Untersuchungsgebiet mit dem RCG-Modell wurde ein möglichst detaillierter und aktueller Emissionsdatensatz für die Stoffe NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO , NMVOC , SO_2 und NH_3 benötigt. Innerhalb Hessens wurden die vom HLNUG für Hessen als GIS-Datensätze oder Tabellen mit Angaben zur räumlichen Lage zur Verfügung gestellten Emissionsdaten sowie ergänzende Datenlieferungen Dritter verwendet. Außerhalb von Hessen wurden die im Rahmen des FE-Projekts „Luftqualität 2020/2030“ (UBA, 2014b) erhobenen Emissionen verwendet.

In den folgenden Abschnitten sind die verwendeten Eingangsdaten und die durchgeführten Arbeitsschritte und räumlichen (Dis-)Aggregationen für die Verwendung in der Ausbreitungsmodellierung beschrieben sowie die Emissionsmengen für das Untersuchungsgebiet Hessen in Tabelle 4-4 in Abschnitt 4.5.9 zusammengestellt.

Für Hessen liegen aus dem landesweiten Emissionskataster sowie aus ergänzenden Datenlieferungen Dritter Angaben zu den folgenden Quellengruppen bzw. Einzelgruppen vor:

- Industrie,
- Kleingewerbe,
- Gebäudeheizung und Kleinverbraucher (Hausbrand),
- Straßenverkehr,
- Schienenverkehr,
- Schiffsverkehr,
- Flughafen Frankfurt Main und
- biogene Quellen.

4.5.1 Industrie

Die Emissionen der Quellengruppe Industrie beinhalten die Emissionen der Betriebe mit genehmigungsbedürftigen Anlagen nach dem Anhang zur 4. BImSchV (2015), die nach der 11. BImSchV (2013) verpflichtet sind, eine Emissionserklärung abzugeben. Diese wurden für das Bezugsjahr 2012 als Tabelle mit insgesamt 4650 Datensätzen bereitgestellt, die u. a. Angaben zur Lage der Quelle, zu den Jahresemissionsmengen der einzelnen Stoffe und zu den Quelleigenschaften Höhe, Fläche, Volumenstrom, Abgastemperatur und Sektor in Form von NACE-Codes enthalten.

Die Lage der Quellen wurde in das geographische Koordinatensystem des RCG-Modells projiziert und mit den genannten Attributen für die Verwendung in RCG als Punktquellen exportiert.

4.5.2 Kleingewerbe

Die Emissionen der Quellengruppe Kleingewerbe beinhalten die Emissionen von nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen des hessischen Kleingewerbes. Das umfasst zum einen nicht genehmigungsbedürftige Anlagen, die unter die 2. und 31. BImSchV (2015) fallen aber Schwellenwerte überschreiten. Zum anderen sind übrige Prozesse und Vorgänge (maschinell oder personell) enthalten, die NMVOC-Emissionen durch den Einsatz von Lösemitteln in anderen nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen bzw. Betriebsstandorten verursachen (IE, 2015). Diese Emissionen wurden als kreisbezogene Summenwerte für das Bezugsjahr 2012 bereitgestellt.

Für die Verwendung in der Ausbreitungsmodellierung wurden diese kreisbezogenen Emissionsdaten räumlich disaggregiert. Dazu wurden die Emissionen entsprechend Abschnitt 4.3

- zu 75 % auf Industrie- und Gewerbeflächen und
- zu 25 % auf Flächen gemischter Nutzung

verteilt, für die einzelnen RCG-Gitterzellen summiert und an das Modell übergeben.

4.5.3 Gebäudeheizung und Kleinverbraucher

Als Emissionen der Gebäudeheizung und Kleinverbraucher werden Emissionen aus Feuerungsanlagen erfasst, für die keine immissionsschutzrechtliche Genehmigung nach der 4. BImSchV (2015) benötigt wird. Die Feuerungsanlagen dienen überwiegend der Heizung und Warmwasserbereitung in privaten und öffentlichen Gebäuden, aber auch der Wärmeerzeugung im Industrie- und Gewerbebereich. Sie wurden als gemeindebezogene Summenwerte der einzelnen Stoffe, getrennt für private Haushalte und sonstige Verbraucher, für das Bezugsjahr 2012 bereitgestellt.

Für die räumliche Verteilung wurde auf Landnutzung und Gebäude zurückgegriffen. Zunächst wurden die Gebäude mit den Gemeinden und den ATKIS-Nutzungsflächen verschnitten und jedem Gebäude zugewiesen, in welcher Gemeinde und in welchem der drei Nutzungsgebiete

- Wohnbaufläche
- Industrie- und Gewerbefläche
- Fläche gemischter Nutzung

es liegt.

Für alle Gebäude wurden die Volumina ermittelt und für jede Gemeinde das summarische Volumen aller Gebäude der jeweiligen Nutzungsart ermittelt. Die Volumina der gemischten Nutzung wurden dabei hälftig auf die beiden Nutzungsklassen Wohnbau- sowie Industrie- und Gewerbefläche aufgeteilt. Für jedes Gebäude wurde dann der relative Anteil am Gesamtvolumen der Gebäude seiner Nutzungsklasse (Wohnbaufläche oder Industrie- und Gewerbefläche) in seiner Gemeinde bestimmt. Dieser Anteil wurde für jeden Stoff mit den bereitgestellten summarischen Gemeindeemissionen der privaten Haushalte (bezüglich Wohnbauflächen) und der sonstigen Verbraucher (bezüglich Industrie- und Gewerbeflächen) multipliziert und so die gemeindebezogenen Emissionen auf die Gebäude verteilt.

Für die Verwendung in RCG wurden die so mit Emissionen belegten Einzelgebäude mit den RCG-Gitterzellen verschnitten und die Emissionen entsprechend anteilig auf die RCG-Gitterzellen verteilt.

In der gelieferten Gebäudedatei gibt es in den Bereichen von sieben Gemeinden östlich von Frankfurt (Heusenstamm, Maintal, Mühlheim a. M., Obertshausen, Rodgau, Rödermark und Schöneck) einen ca. 1.5 km breiten von Nord nach Süd laufenden Streifen, in dem die Gebäude fehlen. Für diese sechs Gemeinden wurden die Emissionen nicht wie oben beschrieben über die Gebäudevolumina, sondern in analoger Form direkt über die Nutzungsflächen verteilt.

4.5.4 Straßenverkehr

Für den Straßenverkehr wurden die für eine Emissionsberechnung attribuierten 454'876 Linienquellen des hessischen Katasters übergeben. Für den zentralen Bereich des Ballungsraums Rhein-Main wurden anhand einer Datenlieferung von Hessen Mobil (2016) die im Emissionskataster für den Straßenverkehr hinterlegten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten überprüft und teilweise angepasst.

Für alle Strecken wurde eine Emissionsberechnung entsprechend IVU Umwelt (2014a) mit IMMIS^{em} Version 6 (IVU Umwelt, 2016) für das Bezugsjahr 2013 durchgeführt.

Das Modell basiert auf dem Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs Version 3.2 (HBEFA) des Umweltbundesamts (INFRAS, 2014) und der Richtlinie VDI 3782 Blatt 7 (KRdL, 2003). Es berechnet auf Basis von intern modellierten oder vorgegebenen Verkehrsqualitäten Emissionen des Straßenverkehrs inklusive der für die NO₂-Modellierung (s. Abschnitt 5.5.2) benötigten NO₂-Direktemissionen. Ergänzt wird die Emissionsberechnung um ein Modell zur Abbildung von Kaltstartzuschlägen entsprechend der Richtlinie VDI 3782 Blatt 7 (KRdL, 2003). Die Modellierung der nicht-motorbedingten Partikel-Emissionen durch Aufwirbelung von auf der Straßenoberfläche liegenden Partikeln und von Reifen- und Bremsabrieb ist für PM₁₀ und PM_{2.5} entsprechend der aktuellen Erkenntnisse auf Basis der Verkehrssituationen nach Düring et al. (2011, 2012) integriert. Die PM₁₀-Emissionen werden dabei mit einem dort entwickelten, auf Messwerten basierenden, Ansatz modelliert. Ein solcher Ansatz ist für die PM_{2.5}-Emissionen wegen fehlender systematischer Messwerte nicht möglich und daher werden diese auf Basis eines Ansatzes aus EMEP/CORINAIR (EEA, 2007) berechnet.

Für die Verwendung in RCG wurden die Linienquellen mit den RCG-Gitterzellen verschnitten und die Emissionen entsprechend anteilig auf die RCG-Gitterzellen verteilt.

4.5.5 Schienenverkehr

Die Emissionen des Schienenverkehrs wurden über den Auftraggeber von DB Umwelt (2015) für das Bezugsjahr 2013 als Linienquellen für 1'080 Streckenabschnitte in Hessen sowie als Flächenquellen für 5 Rangierbahnhöfe bereitgestellt.

Da im Südosten Hessens, wo zwischen Rüdesheim und Bacharach der Rhein im engen Rheintal die Landesgrenze zu Rheinland-Pfalz bildet, sowohl links- als auch rechtsrheinisch relevante Bahnstrecken im Rheintal verlaufen, wurden die linksrheinischen Bahnstrecken in diesem Bereich ebenfalls aus den DB-Daten übernommen und als „hessische“ Emissionen betrachtet.

Für die Verwendung in RCG wurden die Linienquellen und die Rangierbahnhöfe mit den RCG-Gitterzellen verschnitten und die Emissionen entsprechend anteilig auf die RCG-Gitterzellen verteilt.

4.5.6 Schiffsverkehr

Die Emissionen des Schiffsverkehrs für den Rhein wurden vom Auftraggeber für das Bezugsjahr 2010 für die Stoffe NO_x, PM₁₀, PM_{2.5} und NMVOC als Summenwerte des Flussabschnitts, der die Landesgrenze zu Rheinland-Pfalz bildet, bereitgestellt (LfU, 2011). Um das betrachtete Stoffspektrum konsistent erweitern zu können und eine mit den übrigen für Deutschland verwendeten Schiffsemissionen konsistente Datenbasis zu erhalten, wurden die sich daraus ergebenden längenspezifischen Emissionsfaktoren zunächst mit den in TREMOD 5.61 (IFEU, 2012, 2015) für 2013 auf diesen Flussabschnitten verwendeten verglichen. Für die vier in beiden Datensätzen vorhandenen Stoffe NO_x, PM₁₀, PM_{2.5} und NMVOC wurden die Emissionsfaktoren in Abstimmung mit dem Auftraggeber jeweils auf den Mittelwert der beiden Datenquellen gesetzt. Für die drei Stoffe CO, SO₂ und NH₃, für die in LfU (2011) keine Angaben vorliegen, wurden die entsprechenden Emissionsfaktoren nach IFEU (2015) angesetzt. Zusätzlich wurde die in IFEU (2015) enthaltene Differenzierung der spezifischen Emissionen südlich und nördlich von Bingen übernommen. Die so ermittelten Jahresemissionen wurden entlang der beiden Flussabschnitte des Rheins jeweils gleichmäßig verteilt. Damit sind auf dem Rhein nicht nur die durch hessische Schiffe verursachten Emissionen erfasst, sondern die des gesamten Schiffsverkehrs.

Als Grundlage für die Emissionen des Schiffsverkehrs auf dem Main diente zum einen die in Matthias (2013) durchgeführte Ermittlung des Energiebedarfs und der Emissionen für NO_x, Partikel und CO für die 19 Streckenabschnitte zwischen den Schleusen Kostheim und Krotzenburg, die auch in der 2. Fortschreibung des Luftreinhalteplans für den Ballungsraum Rhein-Main, Teilplan Offenbach (HMUKLV, 2014) angesetzt wurde.

Die dort durchgeführten Berechnungen wurden auf das Jahr 2013 angepasst und für weitere Schadstoffe ergänzt. Dazu wurden zunächst die Schiffsbewegungen für 2013 (GDWS, 2015) zu den Werten für 2012 aus Matthias (2013) in Beziehung gesetzt. Aufgrund der geringen Veränderungen (Gütermenge -1 %, Tragfähigkeitstonnen -4 %, Anzahl Fahrzeuge -6 %) wurde angesichts der sonstigen Unsicherheiten bei der Aufstellung von Schiffsemissionskatastern auf eine Fortschreibung der Basiszahlen verzichtet und der in Matthias (2013) ermittelte Energieeinsatz auch für 2013 angesetzt. Um auch hier das betrachtete Stoffspektrum konsistent erweitern zu können und eine mit den übrigen für Deutschland verwendeten Schiffsemissionen konsistente Datenbasis zu erhalten, wurden zunächst die Emissionsfaktoren des mittleren Schiffsbestands für 2013, wie sie in TREMOD 5.61 (IFEU, 2012, 2015) verwendet werden, für diesen Energiebedarf angesetzt. In einem weiteren Schritt wurden die sich daraus ergebenden längen-

spezifischen Emissionsfaktoren dann mit den in TREMOD 5.61 (IFEU, 2012, 2015, 2016) für 2013 auf diesen Flussabschnitten verwendeten verglichen und, in Abstimmung mit dem Auftraggeber, ebenfalls die Emissionsfaktoren jeweils auf den Mittelwert der beiden Datenquellen gesetzt. Zusätzlich wurde die in IFEU (2015, 2016) enthaltene Differenzierung der spezifischen Emissionen westlich und östlich von Offenbach übernommen. Die Lage der entsprechenden Wasserstraßenabschnitte aus IFEU (2015, 2016) wurde aus WSV (2016) übernommen. Die so ermittelten Jahresemissionen wurden entlang der beiden Flussabschnitte des Mains jeweils gleichmäßig verteilt.

Für die Verwendung in RCG wurden die beschriebenen Linienquellen des Rheins und des Mains mit den RCG-Gitterzellen verschnitten und die Emissionen entsprechend anteilig auf die RCG-Gitterzellen verteilt.

4.5.7 Flughafen Frankfurt Main

Die Emissionen des Flughafens Frankfurt Main wurden von der Fraport AG für das Bezugsjahr 2013 in Form zweier Datenpakete bereitgestellt.

4.5.7.1 Kfz-Verkehr und stationäre Quellen auf dem Flughafengelände

Die Emissionen des Kfz-Verkehrs und der stationären Quellen auf dem Flughafengelände wurden als Punkt-, Linien- und Flächenquellen zusammen mit einer mittleren zeitlichen Verteilung bereitgestellt (MUVEDA, 2016). Eine der Punktquellen war nicht im landesweiten Kataster der Industriequellen (s. Abschnitt 4.5.1) enthalten und wurde entsprechend dem dortigen Vorgehen für die Verwendung in RCG als Punktquelle exportiert.

Die Linienquellen des Kfz-Verkehrs auf dem Flughafengelände und im Umland wurden mit dem landesweiten Kataster des Kfz-Verkehrs (s. Abschnitt 4.5.4) abgeglichen, und in letzterem die Emissionen der Strecken, die im Flughafendatensatz enthalten waren, auf Null gesetzt um Doppelzählungen zu vermeiden. Die Kfz-Linienquellen wurden mit den RCG-Gitterzellen verschnitten und die Emissionen entsprechend anteilig auf die RCG-Gitterzellen verteilt.

Die weiteren stationären Quellen wurden in Form eines regelmäßigen 100 x 100 m² Rasters bereitgestellt. Dieses wurde mit den RCG-Gitterzellen verschnitten und die Emissionen entsprechend anteilig auf die RCG-Gitterzellen verteilt.

4.5.7.2 Flugverkehr und Triebwerksläufe

Die Emissionen des Flugverkehrs bis 914 m (3000 Fuß) Höhe über Grund und der Triebwerksläufe wurden in Form von LASPORT-Datensätzen (Janicke, 2014) bereitgestellt. Zur Umsetzung der Quellen des Flugverkehrs wurde eine Methodik angesetzt, die es erlaubt, die speziell für die Anwendung mit LASPORT aufbereiteten Daten des Flugbetriebs mit ihren relevanten dynamischen Quelleigenschaften mit möglichst geringem Informationsverlust in die Gitterstruktur des Eulermodells RCG zu überführen. Grundlage des hier verwendeten Verfahrens ist der in Janicke (2005) beschriebene sogenannte „Smooth & Shift“-Ansatz zur Abbildung von dynamischen Quelleigenschaften, wie z. B. Turbulenz oder Impuls des Triebwerkabgasstrahls, durch räumliche Verteilung bzw. Ausweitung der Emissionsquellen und deren Verwendung als passive Quellen. Auf Basis dieses Ansatzes wurden vom Ingenieurbüro Janicke die LASPORT-Quelldateien mit dynamischen Quelleigenschaften entsprechend Janicke (2005) – mit teilweise aktualisierten Parametern – in passive Quellen umgewandelt und zur Verfügung gestellt (Jani-

cke, 2016). Die dafür gesetzten Parameterwerte sind in Tabelle 4-3 zusammengestellt. Zusätzlich wurde die mittlere Abgasfahnenüberhöhung der Hilfsaggregate (Auxiliary Power Units - APU) auf 30 m gesetzt. Für den in Janicke (2005) beschriebenen horizontalen Versatz der Emissionen von 360 m entgegen der Flugrichtung aufgrund der gerichteten Abgasgeschwindigkeit bei ClimbOut und TakeOff ist eine Verschiebung der Stützpunkte der die Flugrouten repräsentierenden Linienstücke nötig. Dies kann bei der Umwandlung von passiven Quellen in LASPORT nicht direkt umgesetzt werden und findet sich daher in der Datenlieferung Janicke (2016) nicht wieder. Dieser geometrische Versatz wurde bei der Bereitstellung der Quellen für das RCG-Format (s. weiter unten) berücksichtigt.

Tabelle 4-3: Parameter zur Abbildung der dynamischen Quelleigenschaften von Flugzeugen als passive Quellen nach Janicke (2005) und Aktualisierung

Parameter	Einheit	Approach	Idle	TakeOff	ClimbOut
Abgas-Austrittsgeschwindigkeit	m/s	0	0	0	0
Geschwindigkeitsfluktuation σ_{lon} entlang der Flugrichtung	m/s	0	0	0	0
Geschwindigkeitsfluktuation σ_{hor} senkrecht zur Flugrichtung	m/s	0	0	0	0
Geschwindigkeitsfluktuation σ_{ver} senkrecht zu σ_{lon} und σ_{hor}	m/s	0	0	0	0
Abbauzeit der Austrittsgeschwindigkeit und ihrer Fluktuationen	s	0	0	0	0
Horizontaler Versatz der Emissionen aufgrund gerichteter Abgasgeschwindigkeit Flugzeuge der Kategorie J1 (groß, mittel, klein)	m	0	0	-360	-360
Horizontale Ausdehnung der Linienquellen, die die Flugzeugemissionen darstellen	m	390	190	720	660
Vertikale Ausdehnung der Linienquellen, die die Flugzeugemissionen darstellen	m	100	50	180	170
Vertikaler Versatz der Emissionen aufgrund von Wirbeln an den Flügelspitzen	m	-100	0	0	-100
Flugzeuge der Kategorie J2 (Geschäfts-, Regional-, Turboprop-, Kolbenmotorflugzeuge)					
Horizontale Ausdehnung der Linienquellen, die die Flugzeugemissionen darstellen	m	200	100	360	330
Vertikale Ausdehnung der Linienquellen, die die Flugzeugemissionen darstellen	m	50	25	90	80
Vertikaler Versatz der Emissionen aufgrund von Wirbeln an den Flügelspitzen	m	-50	0	0	-50

Mit der Datenlieferung Janicke (2016) lag ein vollständiger Datensatz der Flugverkehrsquellen als passive Emissionsquellen (ohne den horizontalen Versatz von -360 m) mit Punkt-, Linien- und Flächenquellen vor. Die Flugrouten der einzelnen Flugzeugkategorien sind dabei als eine Folge von Linienquellen abgebildet. Für jede Quelle enthalten diese Dateien die Emission pro Flugzeug. In einer weiteren Datei sind die Anzahl der Flugzeuge auf dieser Quelle bzw. Teilroute pro Stunde enthalten. Insgesamt sind für den Flugverkehr zeitlich differenzierte Verteilungen für 117 Quellengruppen vorhanden.

Für die Verwendung im RCG-Modell müssen alle Emissionsdaten als Punktquellen vorliegen bzw. es muss bekannt sein, in welcher Gitterzelle eine Quelle emittiert. Dazu mussten alle Punktquellen aus den LASAT-Daten extrahiert und in RCG-konforme Punktquellen im geographischen Koordinatensystem gewandelt werden.

Alle Linien- und Flächenquellen aus den Daten mussten in RCG-konforme Punktquellen im geographischen Koordinatensystem überführt werden. Die Flächenquellen wurden

dazu durch eine Punktmenge abgebildet. Dies geschah in Form eines regelmäßigen Gitters, bei dem alle 100 m in x- und y-Richtung ein Emissionspunkt gesetzt wurde. Um die Quellform genauer abzubilden, wurde das Punktgitter für jede Quelle individuell gleichmäßig verteilt und so gewählt, dass bei Quellen, die durch mehrere Punktreihen abgebildet wurden, der Abstand vom Quellrand zur ersten Emissionspunktreihe höchstens 25 m betrug. Für jeden Emissionspunkt einer Flächenquelle wurde die Emission auf den Wert „Gesamtemission der Quelle/Gesamtzahl der Emissionspunkte der Quelle“ gesetzt. Jeder Quellpunkt wurde zudem mit einer vertikalen Ausdehnung entsprechend seinen Quelleigenschaften versehen. Bei der Verwendung im RCG-Modell wurde diese Information ausgewertet und die Emissionen der einzelnen Quellpunkte dynamisch auf die entsprechenden vertikalen Schichten des Eulermodells verteilt.

Die Linienquellen des Flugverkehrs, also die Flugzeugbewegungen am Boden und in der Luft, wurden ebenfalls als Punktmenge abgebildet. Dazu wurde entlang einer Quelle alle 100 m ein Punkt gesetzt. Horizontal wurden die Quellen ebenfalls im 100 m-Abstand gleichmäßig aufgelöst, wobei auch hier bei Quellen, die durch mehrere Punktreihen abgebildet wurden, die erste Punktreihe höchstens 25 m vom Quellrand entfernt war. Für jeden Emissionspunkt einer Linienquelle wurde die Emission auf den Wert „Gesamtemission der Quelle/Gesamtzahl der Emissionspunkte der Quelle“ gesetzt. Insgesamt ergaben sich so für den Flugverkehr über 150'000 Quellpunkte.

Da in der Datenlieferung der in Janicke (2005) beschriebene horizontale Versatz der Emissionen von 360 m entgegen der Flugrichtung bei ClimbOut und TakeOff nicht enthalten ist, wurde dieser bei der Generierung der Punktquellen für die Flugrouten von ClimbOut und TakeOff berücksichtigt und die entsprechenden Punkte um 360 m entgegen der Flugrichtung verschoben.

Auch jeder Quellpunkt auf einer Flugroute wurde mit einer vertikalen Ausdehnung entsprechend seinen Quelleigenschaften versehen, die bei der Verwendung im RCG-Modell ausgewertet und bei der Verteilung der Emissionen der einzelnen Quellpunkte auf die entsprechenden vertikalen Schichten des Eulermodells berücksichtigt wurde. In Abbildung 4-3 sind die Emissionspunkte des Flugverkehrs mit ihrer vertikalen Ausdehnung als „Emissions-Säulen“ dargestellt.

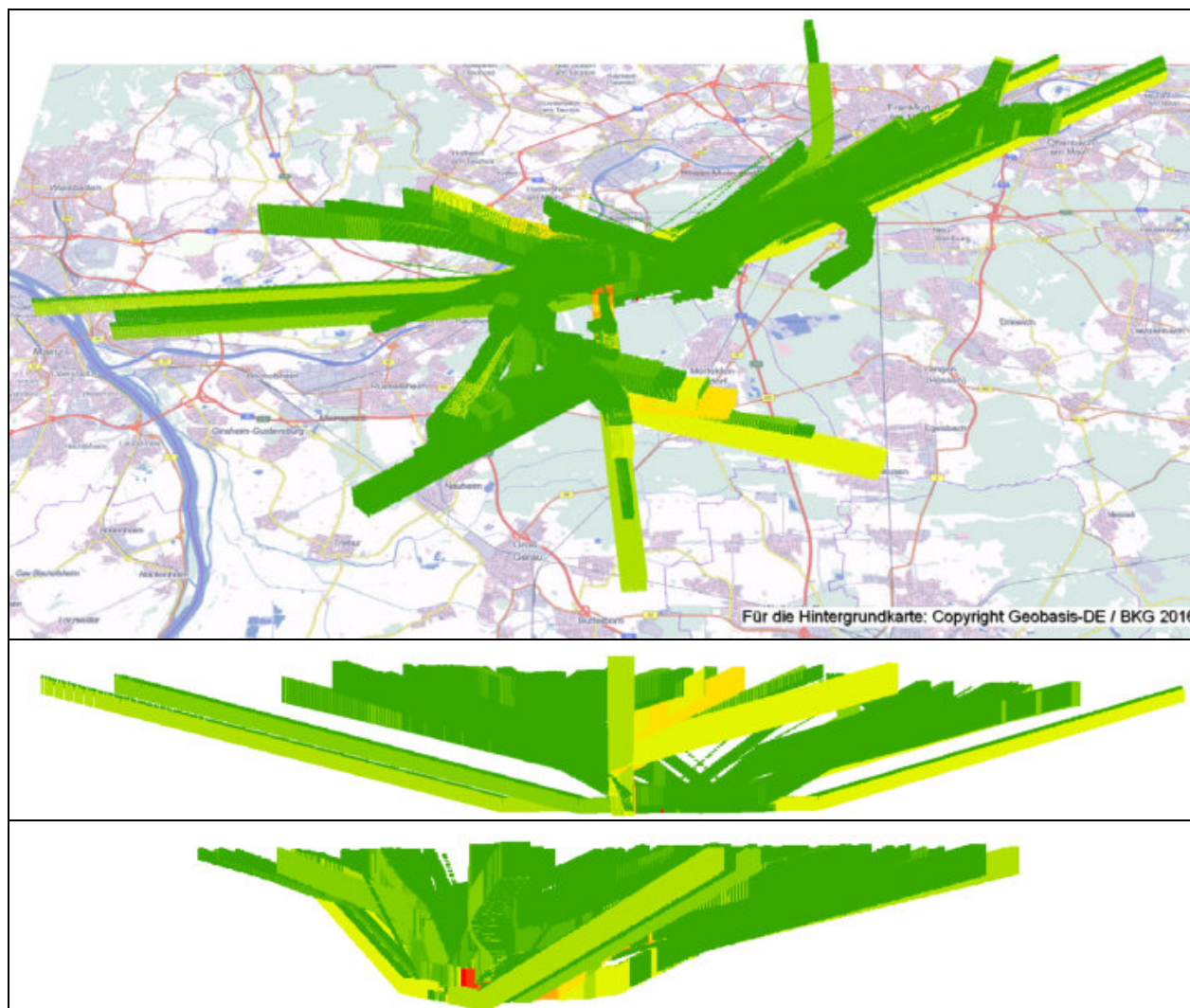


Abbildung 4-3: Emissionsquellen des Flugverkehrs in 5facher Überhöhung als Punktquellen mit vertikaler Ausdehnung entsprechend den Quelleigenschaften eingefärbt nach Emissionsstärke pro Punkt von grün = gering bis rot = hoch. Oben: Schrägsicht von Süden; Mitte: Ansicht von Süden; Unten: Ansicht von Nordwesten.

Die Abbildung der Emissionen in der Datenlieferung als Emission pro Flugzeug auf jeder Route/Quelle und Anzahl der Flugzeuge pro Zeiteinheit in einer separaten Datei musste für die Verwendung in RCG ebenfalls umgewandelt werden in Jahresemissionen pro Quelle und insgesamt 117 Ganglinien mit der zeitlichen Verteilung der Emission in stündlicher Auflösung.

4.5.8 Biogene Emissionen

Die biogenen Emissionen wurden getrennt für die Teilgruppen

- Landwirtschaft für das Bezugsjahr 2012 und
- Wälder (ohne konkretes Bezugsjahr)

als kreisbezogene Summenwerte der einzelnen Stoffe bereitgestellt.

Zunächst wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber festgelegt, die NMVOC-Emissionen der Teilgruppe „natürliche Vegetation“ nicht aus den gemeindebezogenen

Daten zu verwenden, sondern auf Basis der Landnutzungsanteile der RCG-Gitterzellen direkt vom RCG-Modell berechnen zu lassen. Biogene Emissionen durch Pflanzen werden in RCG während des Modelllaufes auf der Basis der Landnutzungsdaten, der lokalen Temperatur und der lokalen Einstrahlungsverhältnisse nach der Methodik von Simpson et al. (1995, 1999) stündlich berechnet und liegen explizit als Emissionen von Isopren und Mono-Terpen (und nicht nur als Gesamtmenge NMVOC) vor. Da diese Emissionen sehr stark temperatur- und strahlungsabhängig sind und damit großen zeitlichen Schwankungen unterliegen, müssen sie für den im Modell verwendeten chemischen Algorithmus in stündlicher Auflösung vorliegen und konsistent zur verwendeten Landnutzungsdatenbasis und insbesondere der meteorologischen Datenbasis sein, was sich über eine räumliche und zeitliche Disaggregation der gemeindebezogenen Jahreswerte nicht erreichen lässt.

Als Gesamtemission an NMVOC aus natürlicher Vegetation im Jahr 2013 ergeben sich aus der zeitlich und räumlich differenzierten Berechnung in RCG 56'267 t für das Modellgebiet des Nest 3. Skaliert man diese mit dem Flächenanteil von Hessen am Modellgebiet Nest 3 erhält man ca. 26'800 t, die – trotz der zahlreichen Annahmen und Unsicherheiten bei der Modellierung dieser Quellengruppe und der vorgenommenen Skalierung – sehr gut mit den 30'800 t aus dem Emissionskataster Hessen übereinstimmen.

Für die räumliche Disaggregation der gemeindebezogenen Emissionen von Landwirtschaft und Nutztierhaltung wurden die Emissionen auf die Acker- bzw. Grünlandflächen aus ATKIS verteilt, die entsprechend Abschnitt 4.3 ermittelt und mit den RCG-Gitterzellen verschnitten wurden, und anschließend für die einzelnen RCG-Gitterzellen summiert und an das Modell übergeben.

4.5.9 Gesamtemissionen in Hessen

In Tabelle 4-4 sind die Emissionen der einzelnen Quellengruppen und ihre Anteile an den Gesamtemissionen in Hessen für die sieben betrachteten Stoffe NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NMVOC, SO₂ und NH₃ zusammengestellt. In Abbildung 4-4 findet sich eine grafische Darstellung der Anteile der Quellengruppen. Beim Flughafen Frankfurt ist zu beachten, dass hier nicht nur bodennahe Emissionen, sondern Emissionen bis zu einer Höhe von 914 m über Grund enthalten sind.

Tabelle 4-4: Gesamtemissionen und Anteile der Quellengruppen in Hessen für 2013

Emissionen 2013 [t/a]	NO_x	PM₁₀	PM_{2.5}	CO	NMVOC	SO₂	NH₃
Industrie	11'991	957.0	460.4	6'888	3'332	2'649.5	51.7
Kleingewerbe	-	-	-	-	9'337	-	-
Gebäudehgz. u. Kleinverbraucher	7'136	1'929.8	1'832.5	56'648	2'520	1'920.8	-
Verkehr gesamt	49'081	4'280.5	1'808.5	83'472	4'986	313.2	1'387.8
<i>davon Straßenverkehr</i>	41'674	3'257	1'728	79'585	4'293	68	1'384
<i>davon Schienenverkehr</i>	517	900.4	9.3	56	26	0.3	-
<i>davon Schiffsverkehr</i>	2'307	54.8	25.6	452	101	0.8	1.2
<i>davon Flughafen Frankfurt</i>	4'584	68.3	45.2	3'379	566	243.6	2.2
Biogene Quellen	5'181	1'279.1	199.0	-	33'389	-	20'304.1
<i>davon Landwirtschaft und Viehhaltung</i>	5'181	1'279.1	199.0	-	6'607	-	20'304.1
<i>davon natürliche Vegetation (RCG)</i>	-	-	-	-	26'782	-	-
Summe	73'390	8'446.3	4'300.4	147'009	53'564	4'883.5	21'743.6

Anteile 2013 [%]	NO_x	PM₁₀	PM_{2.5}	CO	NMVOC	SO₂	NH₃
Industrie	16.3 %	11.3 %	10.7 %	4.7 %	6.2 %	54.3 %	0.2 %
Kleingewerbe	-	-	-	-	17.4 %	-	-
Gebäudehgz. u. Kleinverbraucher	9.7 %	22.8 %	42.6 %	38.5 %	4.7 %	39.3 %	-
Verkehr gesamt	66.9 %	50.7 %	42.1 %	56.8 %	9.3 %	6.4 %	6.4 %
<i>davon Straßenverkehr</i>	56.8 %	38.6 %	40.2 %	54.1 %	8.0 %	1.4 %	6.4 %
<i>davon Schienenverkehr</i>	0.7 %	10.7 %	0.2 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	-
<i>davon Schiffsverkehr</i>	3.1 %	0.6 %	0.6 %	0.3 %	0.2 %	0.0 %	0.0 %
<i>davon Flughafen Frankfurt</i>	6.2 %	0.8 %	1.1 %	2.3 %	1.1 %	5.0 %	0.0 %
Biogene Quellen	7.1 %	15.1 %	4.6 %	-	62.3 %	-	93.4 %
Summe	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

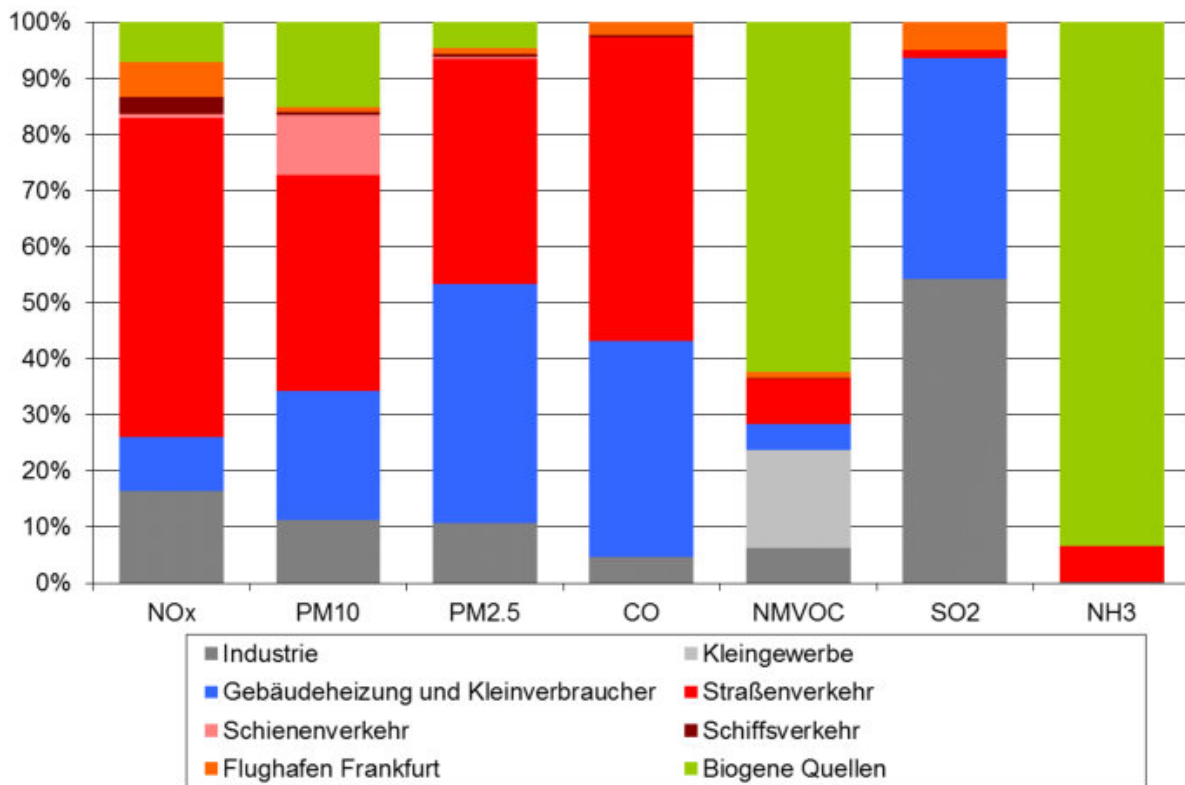


Abbildung 4-4: Anteile der Quellengruppen an den Gesamtemissionen in Hessen 2013

4.5.10 Emissionen außerhalb Hessens

Für die Modellierung mit RCG, die in der europäischen Skala beginnt und bei der auch das feinste Gitter noch Zellen außerhalb Hessens beinhaltet, sind auch Emissionsdaten für diese Gebiete erforderlich.

Außerhalb von Deutschland wurden die im Rahmen des FE-Projekts „Luftqualität 2020/2030“ (UBA, 2014b) für das Referenzjahr 2005 erhobenen Emissionen verwendet. Die deutschen und die europäischen Emissionen beruhen auf den von den europäischen Ländern an EMEP gelieferten Emissionsabschätzungen. Diese nationalen Angaben wurden für das Projekt „Luftqualität 2020/2030“ räumlich verteilt (Europa in einer Gitterauflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite, Deutschland in einer Auflösung von 0.03125° Länge und 0.015625° Breite, (circa 2 x 2 km²) siehe UBA 2014b). Zur Erzeugung der Emissionen für das Jahr 2013 wurden die Referenzemissionen in allen Ländern außer Deutschland mit den aus dem EMEP-Programm erhältlichen nationalen Summen für die einzelnen Luftschadstoffe (CEIP, 2015) auf 2013 skaliert. Die Skalierung der Emissionen außerhalb Deutschlands erfolgte für alle Verursacherguppen in gleicher Weise, da verursacherspezifische Emissionsentwicklungen nicht vorliegen. In Deutschland selbst basiert die Fortschreibung auf verursacherguppen- und stoffabhängigen Faktoren, die aus den Datenbasen des Projekts „Luftqualität 2020/2030“ abgeleitet wurden. Diese Daten wurden in den Rechnungen in Nest 0 bis Nest 3 für alle Gebiete außerhalb von Hessen verwendet. Bei RCG-Gitterzellen, die teilweise inner- und außerhalb Hessens liegen, wurden die Emissionen aus Hessen entsprechend dem außerhalb liegenden Flächenanteil um die Emissionen aus dem UBA-Projekt ergänzt.

4.5.11 Prognose 2020

Für das Prognose-Szenario mussten die Emissionsdaten auf das Jahr 2020 fortgeschrieben werden. Dazu wurden Daten aus dem Projekt „Luftqualität 2020/2030“ (UBA, 2014b) genutzt¹. Für den Flugverkehr des Flughafens Frankfurt wurden von der FRAPORT AG Hochrechnungsfaktoren für Flugzeugemissionen von 2013 nach 2020 auf Basis der dort erwarteten Zunahme der Flugbewegungen bereitgestellt (FRAPORT, 2016) und diese für die Quellengruppe Flughafen Frankfurt übernommen. Für NH₃ wurde dabei kein Wert bereitgestellt und dort der Wert aus „Luftqualität 2020/2030“ angesetzt. Damit ergeben sich die in Tabelle 4-5 aufgeführten quellengruppenspezifischen Faktoren für die Fortschreibung der Emissionen der einzelnen Schadstoffe, mit denen die Emissionen von 2012 bzw. 2013 nach 2020 fortgeschrieben wurden.

Tabelle 4-5: Fortschreibungsfaktoren der Emissionen von 2012/2013 nach 2020

Quellengruppe	NO _x	PM10	PM25	CO	NMVOC	SO ₂	NH ₃
Industrie, Kleingewerbe	0.97	1.06	1.10	0.96	1.11	0.87	1.11
Gebäudehgz. u. Kleinverbraucher	0.97	0.78	0.77	0.96	0.95	0.85	0.92
Straßenverkehr	0.61	0.99	0.79	0.63	0.70	0.95	0.75
Schienenverkehr, Schiffsverkehr	0.81	0.67	0.67	0.97	0.71	0.61	1.05
Flughafen Frankfurt	1.16	1.13	1.13	1.13	1.09	1.14	1.25
Landwirtschaft und Viehhaltung	1.06	0.97	0.97	1.00	1.00	1.00	1.02
Natürliche Quellen	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Auf Basis dieser Faktoren ergeben sich die in Tabelle 4-6 zusammengestellten und als Verhältnisse in Abbildung 4-5 dargestellten Emissionen der einzelnen Quellengruppen in Hessen im Jahr 2020. Summarisch ergeben sich damit Abnahmen zwischen 9 % bei PM10 und 22 % bei NO_x und CO, keine Veränderung bei NMVOC sowie leichte Zunahmen in Höhe von 1 % bei NH₃.

¹ Nach gegenwärtigem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass die in diesen Prognosedaten enthaltenen NO_x-Emissionsfaktoren von Euro-6-Diesel-Pkw zu niedrig sind und daher die angesetzte Minderung der NO_x-Emissionen des Kfz-Verkehrs diesbezüglich zu groß ist.

Tabelle 4-6: Gesamtemissionen und Anteile der Quellengruppen in Hessen 2020

Emissionen 2020 [t/a]	NO_x	PM10	PM2.5	CO	NMVOC	SO₂	NH₃
Industrie	11'589	1'012.4	506.4	6'638	3'702	2'294.8	57.3
Kleingewerbe	-	-	-	-	10'374	-	-
Gebäudehgz. u. Kleinverbraucher	6'912	1'508.8	1'418.2	54'189	2'393	1'625.6	-
Verkehr gesamt	33'135	3'929.1	1'448.3	54'356	3'707	344.0	1'039.6
<i>davon Straßenverkehr</i>	25'513	3'213.7	1'373.9	50'059	3'001	65.3	1'035.6
<i>davon Schienenverkehr</i>	419	601.6	6.2	55	18	0.2	-
<i>davon Schiffsverkehr</i>	1'873	36.6	17.1	437	72	0.5	1.3
<i>davon Flughafen Frankfurt</i>	5'331	77.2	51.1	3'805	616	278.0	2.7
Biogene Quellen	5'479	1'235.4	192.4	-	33'389	-	20'786.6
<i>davon Landwirtschaft und Viehhaltung</i>	5'479	1'235.4	192.4	-	6'607	-	20'786.6
<i>davon natürliche Vegetation(RCG)</i>	-	-	-	-	26'782	-	-
Summe	57'116	7'685.7	3'565.2	115'183	53'565	4'264.4	21'883.5
Veränderungen zu 2013 [%]	-22.2%	-9.0%	-17.1%	-21.6%	0.0%	-12.7%	0.6%

Anteile 2020 [%]	NO_x	PM10	PM2.5	CO	NMVOC	SO₂	NH₃
Industrie	20.3 %	13.2 %	14.2 %	5.8 %	6.9 %	53.8 %	0.3 %
Kleingewerbe	-	-	-	-	19.4 %	-	-
Gebäudehgz. u. Kleinverbraucher	12.1 %	19.6 %	39.8 %	47.0 %	4.5 %	38.1 %	-
Verkehr gesamt	58.0 %	51.1 %	40.6 %	47.2 %	6.9 %	8.1 %	4.8 %
<i>davon Straßenverkehr</i>	44.7 %	41.8 %	38.5 %	43.5 %	5.6 %	1.5 %	4.7 %
<i>davon Schienenverkehr</i>	0.7 %	7.8 %	0.2 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	-
<i>davon Schiffsverkehr</i>	3.3 %	0.5 %	0.5 %	0.4 %	0.1 %	0.0 %	0.0 %
<i>davon Flughafen Frankfurt</i>	9.3 %	1.0 %	1.4 %	3.3 %	1.1 %	6.5 %	0.0 %
Biogene Quellen	9.6 %	16.1 %	5.4 %	-	62.3 %	-	95.0 %
Summe	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

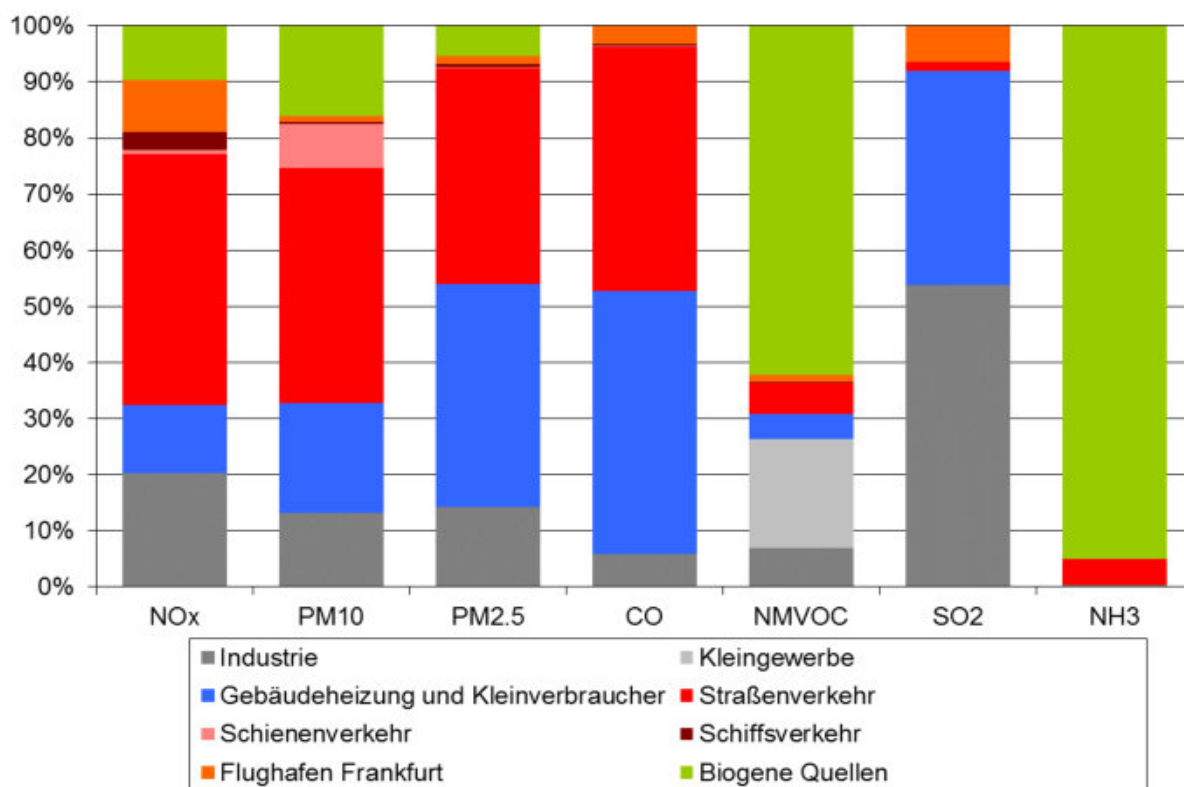


Abbildung 4-5: Anteile der Quellengruppen an den Gesamtemissionen in Hessen 2020

4.6 Luftschadstoff-Messdaten

Als Eingangsgrößen für die flächendeckende Ermittlung der Immissions-Vorbelastung in Hessen mit dem Programmsystem FLADIS (s. Abschnitt 5.3.1) wurden neben den Ergebnissen der RCG-Ausbreitungsrechnungen Schadstoff-Messdaten in stündlicher Auflösung für das Bezugsjahr 2013 (Abschnitt 3) benötigt. Zur Ermittlung der Vorbelastung wurden ausschließlich Messstationen des städtischen, vorstädtischen und ländlichen Hintergrunds herangezogen. Verkehrsnahe Messstationen wurden nicht verwendet, da diese sehr direkt von einer Quelle beeinflusst werden und nur eine geringe räumliche Repräsentativität haben, die unterhalb der Gitterauflösung der Vorbelastungsrechnung liegt.

Die Schadstoff-Messdaten werden in FLADIS einer Interpolation unterzogen, deren Ergebnis bei der Berechnung der Vorbelastung in FLADIS weiterverwendet wird (s. Abschnitt 5.3.1). Eine Interpolation von Messdaten ist streng genommen nur innerhalb der konvexen Hülle² der zur Verfügung stehenden Messdaten möglich. Außerhalb dieser konvexen Hülle werden Daten extrapoliert. Das Extrapolationsverhalten ist stark davon abhängig, welche Daten dabei verwendet wurden. Um die Fläche des Landes Hessen möglichst umfassend mit interpolierten Werten abdecken zu können, wurden für die Interpolation nicht nur Messdaten von Stationen innerhalb Hessens verwendet, sondern zusätzlich Messdaten von Stationen um Hessen herum, d. h. aus den angrenzenden Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Bayern und Niedersachsen. Im ebenfalls an Hessen angrenzenden Thüringen gibt es keine Messstation, die innerhalb des RCG-Untersuchungsgebietes liegt und für die Berechnungen der Immissions-Vorbelastung mit FLADIS herangezogen werden könnte.

Vom HLNUG wurden die Messdaten der Stationen in Hessen für das Jahr 2013 für die Schadstoffe NO₂, PM₁₀, NO_x und Ozon³ in stündlicher Auflösung zur Verfügung gestellt. Die Stationen und Daten der angrenzenden Bundesländer wurden für 2013 aus der AirBase-Datenbank extrahiert (ETC/ACM, 2013). Abbildung 4-6 gibt eine Übersicht über die Lage der in FLADIS verwendeten Hintergrundmessstationen in und um Hessen.

In Tabelle 4-7 und Tabelle 4-8 sind die in FLADIS verwendeten Messstationen innerhalb Hessens bzw. um Hessen herum aufgelistet, und es ist angegeben, welche der Stoffe NO₂, PM₁₀, NO_x und Ozon jeweils in stündlicher Auflösung gemessen wurden. Für die Stationen in Tabelle 4-7 wurde der Stationstyp aus der Messstellenbeschreibung des HLNUG übernommen. Für die Stationen der AirBase-Datenbank in Tabelle 4-8 wurde die Stationsklassifizierung nach Eol (Exchange of Information) übernommen.

Innerhalb Hessens liegen die Messzeitreihen für die Schadstoffe NO₂, PM₁₀, NO_x und Ozon fast vollständig an allen Stationen in stündlicher Auflösung vor, lediglich an drei Stationen des ländlichen Hintergrunds (Spessart, Burg Herzberg und Linden) wird kein PM₁₀ gemessen. Die AirBase-Daten liegen für NO₂ an 19 Stationen, für PM₁₀ an 15 Stationen, für NO_x an 16 Stationen und für Ozon an 18 Stationen in stündlicher Auflösung vor.

² Die konvexe Hülle ist die Randlinie der kleinsten Fläche, die alle Messstationen beinhaltet und für die gilt, dass alle geraden Verbindungen zwischen zwei beliebigen Punkten innerhalb dieser Fläche vollständig innerhalb dieser Fläche liegen.

³ Zur Berechnung der NO₂-Gesamtbelastung im Rahmen der Ausbreitungsrechnungen für die Straßenräume (s. Abschnitt 5.5.2) wurden Vorbelastungszeitreihen für die Schadstoffe NO_x und Ozon benötigt, für die daher im Basisfall ebenfalls FLADIS-Berechnungen durchgeführt wurden (s. Abschnitt 5.3).

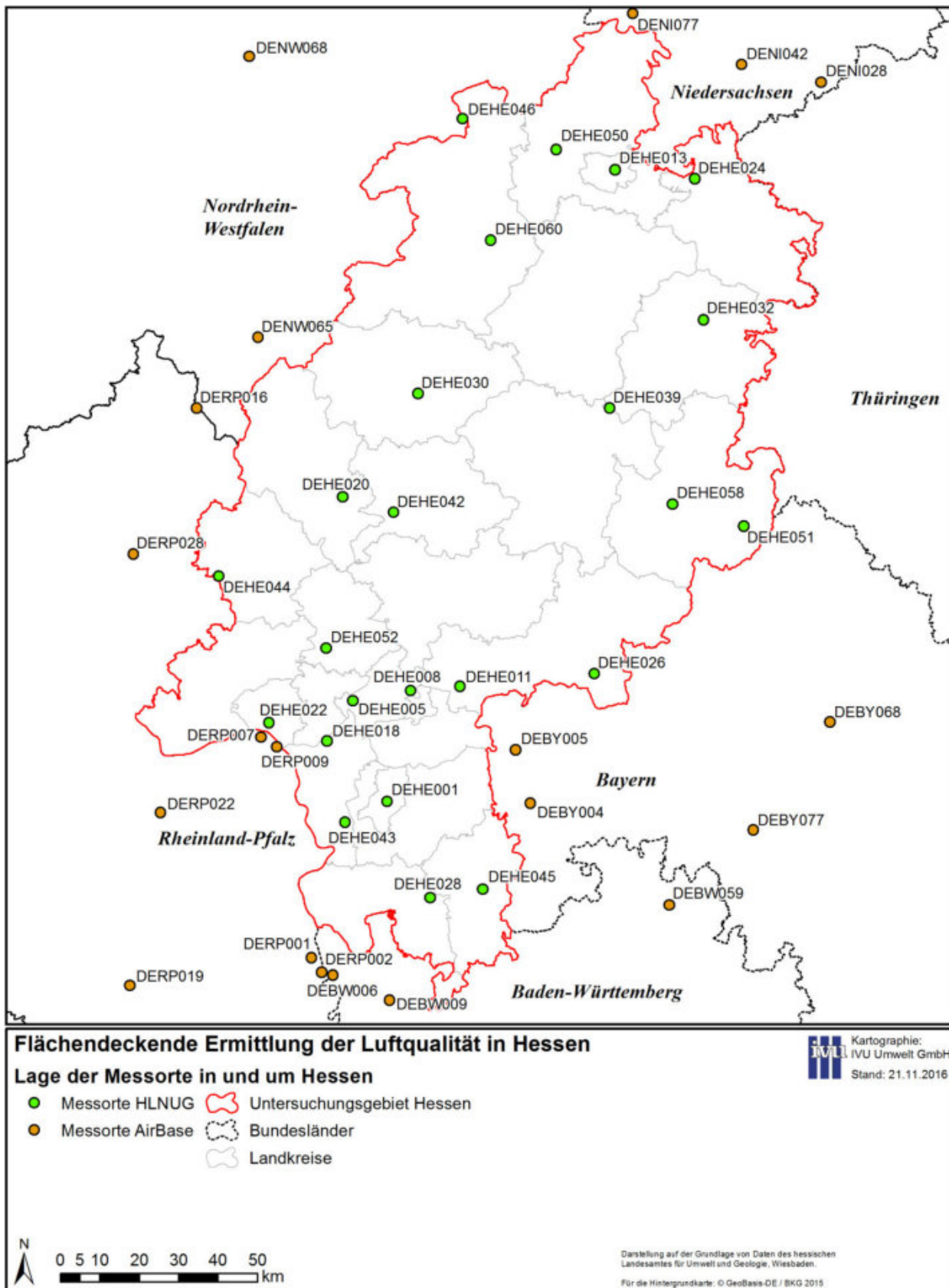


Abbildung 4-6: Lage der in FLADIS verwendeten Hintergrundmessstationen in und um Hessen für 2013

Tabelle 4-7: Stationen in Hessen und gemessene Stoffe für 2013

Code	Stationsname	Stationstyp nach HLNUG	NO ₂	PM10	NO _x	Ozon
DEHE001	Darmstadt	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE005	Frankfurt-Höchst	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE008	Frankfurt-Ost	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE011	Hanau	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE013	Kassel-Mitte	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE018	Raunheim	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE020	Wetzlar	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE022	Wiesbaden-Süd	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE024	Witzenhausen-Wald	ländlicher Hintergrund	X	X	X	X
DEHE026	Spessart	ländlicher Hintergrund	X	-	X	X
DEHE028	Fürth-Odenwald	ländlicher Hintergrund	X	X	X	X
DEHE030	Marburg	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE032	Bebra	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE039	Burg Herzberg	ländlicher Hintergrund	X	-	X	X
DEHE042	Linden	ländlicher Hintergrund	X	-	X	X
DEHE043	Riedstadt	ländlicher Hintergrund	X	X	X	X
DEHE044	Limburg	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE045	Michelstadt	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE046	Bad Arolsen	ländlicher Hintergrund	X	X	X	X
DEHE050	Zierenberg	ländlicher Hintergrund	X	X	X	X
DEHE051	Wasserkuppe	ländlicher Hintergrund	X	X	X	X
DEHE052	Kleiner Feldberg	ländlicher Hintergrund	X	X	X	X
DEHE058	Fulda-Mitte	städtischer Hintergrund	X	X	X	X
DEHE060	Kellerwald	ländlicher Hintergrund	X	X	X	X

Tabelle 4-8: Stationen in den an Hessen angrenzenden Bundesländern und gemessene Stoffe für 2013

Bundesland	Code	Stationsname	Stations- klassifizie- rung nach EOI	NO ₂	PM10	NO _x	Ozon
Baden- Württemberg	DEBW006	Mannheim-Mitte	städt. HG	X	X	-	X
Baden- Württemberg	DEBW009	Heidelberg	städt. HG	X	X	-	X
Baden- Württemberg	DEBW059	Tauberbischofsheim	vorstädt. HG	X	X	-	X
Bayern	DEBY004	Kleinwallstadt Hofstetter Straße	ländl. HG	X	-	X	X
Bayern	DEBY005	Aschaffenburg Bussardweg	vorstädt. HG	X	-	X	X
Bayern	DEBY068	Schweinfurt Obertor	städt. HG	X	X	X	X
Bayern	DEBY077	Würzburg Kopfklinik	vorstädt. HG	-	X	-	X
Niedersachsen	DENI028	Eichsfeld	vorstädt. HG	X	X	X	X
Niedersachsen	DENI042	Göttingen	vorstädt. HG	X	X	X	X
Niedersachsen	DENI077	Solling-Süd	ländl. HG	X	X	X	X
Nordrhein- Westfalen	DENW065	Netphen Rothaargebirge	ländl. HG	X	X	X	X
Nordrhein- Westfalen	DENW068	Soest-Ost	ländl. HG	X	X	X	X
Rheinland-Pfalz	DERP001	Ludwigshafen-Oppau	städt. HG	X	X	X	X
Rheinland-Pfalz	DERP002	Ludwigshafen-Mitte	städt. HG	X	-	X	-
Rheinland-Pfalz	DERP007	Mainz-Mombach	städt. HG	X	X	X	X
Rheinland-Pfalz	DERP009	Mainz-Zitadelle	städt. HG	X	X	X	-
Rheinland-Pfalz	DERP016	Westerwald-Herdorf	ländl. HG	X	X	X	X
Rheinland-Pfalz	DERP019	Kaiserslautern- Rathaus	städt. HG	X	X	X	X
Rheinland-Pfalz	DERP022	Bad Kreuznach- Bosenheimer	städt. HG	X	-	X	X
Rheinland-Pfalz	DERP028	Westerwald- Neuhäusel	ländl. HG	X	-	X	X

HG: Hintergrund

5 Methodik und Durchführung

5.1 Meteorologische Eingangsdaten

Die Erstellung der drei-dimensionalen meteorologischen Eingangsdaten für die RCG-Modellierung (s. Abschnitt 5.2.1) wurde mit dem an der FU Berlin entwickelten diagnostischen Analysesystem TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Procedures for Environmental Research; Reimer & Scherer, 1992; Kerschbaumer & Reimer, 2003) vorgenommen. Das TRAMPER-System basiert auf einer Optimalen Interpolation der verfügbaren meteorologischen Daten. Der Interpolation zugrunde gelegt wurden die meteorologischen Datensätze des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Form von Radiosonden- und Pilotmeldungen der synoptischen Aerologiestationen sowie stündliche und dreistündliche Beobachtungen von Teilen der synoptischen Beobachtungsnetze der in der World Meteorological Organisation (WMO) organisierten Wetterdienste. Die meteorologischen Felder wurden in einem Teleskopverfahren auf die gewünschte Auflösung interpoliert, wobei über verschiedene Grenzschichtmodule (Massekonsistenz, Hang-, Berg- und Talwind usw.) eine Anpassung an die hoch aufgelöste Topographie und Landnutzung erfolgte.

Das angewandte Analyseverfahren besteht im Kern aus einer statistischen Interpolation (Optimale Interpolation) beobachteter und abgeleiteter Feldgrößen auf isentropen Flächen am Gitterpunkt und einem physikalischen Abgleich der Felder mittels Variationsrechnung.

Die dreidimensional analysierten Variablen sind

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

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

Zweidimensional werden dargestellt

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

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

- Analysen der Boden- und Radiosondenbeobachtungen,
- zeitliche Interpolation auf stündliche Zwischentermine und
- Berechnung der Grenzschichtvariablen.

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

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

Für die kleinräumigen Analysen werden charakteristische orographische Effekte des untersuchten Gebietes in die 3-dimensionale Strömung integriert, insbesondere Hangwind- und Barriereneffekte. Der generalisierte Hang- und Talwind ist abhängig von der gegebenen Überströmung, wobei Kaltluftzufuhr implizit durch die 3D-Temperaturentwicklung der Beobachtungen enthalten ist. Dabei werden mit Hilfe von Strömungsadaptationsalgorithmen alle Windfelder im orographisch gegliederten Gelände angepasst. Gegenüber einem prognostisch-numerischen Modellierungsansatz hat die diagnostische Methode des TRAMPER-Systems den Vorteil, dass sie sich wesentlich auf vorhandene meteorologische Messungen stützt.

Pro Tag wurden zusammenhängend 24 Analysen ausgeführt. Die Ausgangsfelder wurden aus der großräumigen Analyse erstellt und im feinen Gitter mit den vorhandenen Daten korrigiert. Dabei wurden alle isentropen Flächen neu angepasst, um eine optimale vertikale Auflösung der Felder in dem kleinen Gebiet zu erhalten.

Die Grenzschichtgrößen wurden in stündlicher Folge berechnet, wobei die Topographie in der Bestrahlung beachtet wurde. Die Mischungshöhe wurde in diesem Zusammenhang einer speziellen Glättung unterzogen, um im Gegensatz zur sehr detaillierten Topographie und Landnutzung eine generalisiertere Grenzschichthöhe zu erhalten, die kleinere Täler nicht zu stark berücksichtigt.

Das diagnostische Strömungsmodul arbeitet in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird das mittlere Strömungsgrundfeld der Modellregion erzeugt und an das thermodynamisch und topographisch bedingte Strömungsverhalten adaptiert. Im zweiten Schritt werden Stationsmessdaten mit räumlich begrenzter Wichtung in das Grundfeld integriert und die vertikale Geschwindigkeitskomponente physikalisch adaptiert. Das endgültige Strömungsfeld wird mittels eines iterativen Verfahrens zur Massenerhaltung gezwungen.

5.2 Ausbreitungsrechnungen für die Vorbelastung

5.2.1 Modellbeschreibung

Die rechnerische Bestimmung der Beiträge von bestimmten Emittentengruppen zu den NO₂- und PM₁₀-Immissionen erfordert die Anwendung eines chemischen Transportmodells, da NO₂ überwiegend über chemische Prozesse gebildet wird. Auch die PM₁₀-Immission wird nicht nur durch die direkten PM₁₀-Emissionen verursacht, sondern zu einem großen Teil durch die sekundäre Aerosolbildung, in der aus gasförmigen Vorläuferstoffen wie NO₂, SO₂ und NH₃ sekundäre Partikel wie Sulfate, Nitrate und Ammonium entstehen.

Das hier verwendete chemische Transportmodell ist REM-CALGRID (RCG), das an der FU Berlin entwickelt wurde (Stern, 2003, 2006a, 2010c; Stern et al., 2008). Das RCG-Modell wurde inzwischen mehrfach auf Bundes- und Länderebene im Rahmen der Erstellung von Luftreinhalteplänen und der Berechnung von Hintergrundkonzentrationen (z. B. IVU Umwelt, 2006, 2009, 2011a, 2012a, 2012b, 2014b), der Maßnahmenanalyse oder zur Analyse grenzüberschreitender Schadstofftransporte (Stern, 2006b, 2010a, 2010b) eingesetzt und ist das Ausbreitungsmodell im vom Umweltbundesamt beauftragten PAREST-Projekt zur Entwicklung von Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung (Buitjes et al., 2010; Stern, 2013) und dem Nachfolgeprojekt „Luftqualität 2020/2030“ (UBA, 2014b).

Das RCG-Modell berechnet die Konzentration von Schadstoffen an einem oder mehreren Orten in Abhängigkeit von der Emission, von physikalischen und chemischen Prozessen während des Transportvorgangs in der Atmosphäre sowie von meteorologischen und topographischen Einflüssen. Dazu wird der relevante Ausbreitungsraum, der ganz Europa oder auch nur eine Stadt oder ein Emittentengebiet umfassen kann, mit einem dreidimensionalen Gitter überspannt, in dessen Gitterzellen die Berechnung der Konzentrationen erfolgt. Das RCG-Modell betrachtet alle in den EU-Richtlinien für Luftqualität festgelegten Schadstoffe wie z. B. Feinstaub, Stickstoffoxide oder Ozon. Die Berechnung der Konzentrationen erfolgt auf Stundenbasis für das ganze Jahr.

Emissionen der Stoffgruppen SO_x , NO_x , CO, NH_3 , PM10, PM2.5 und VOC müssen dem Modell in Form von Punkt- oder Flächenquellen vorgegeben werden. Für die Punktquellen wird aus den Kenndaten der Quelle und lokalen meteorologischen Größen eine effektive Schornsteinhöhe bestimmt. Die Übergabe der Emissionen erfolgt dann in die dazugehörige Modellschicht. Flächen- und Punktquellen werden im Modell als Volumenquellen behandelt, d. h. die Emissionen verteilen sich unmittelbar in der betreffenden Gitterzelle.

Das Modell verlangt jahresspezifische Emissionsdaten für alle benötigten Spezies unterteilt nach Verursachergruppen. Für jede Verursachergruppe werden im Modell ausgehend von den Jahreswerten stündliche Emissionen abgeleitet. Die dazu verwendeten Monats-, Wochentag- und Stundenfaktoren berücksichtigen die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Emissionen der einzelnen Verursachergruppen.

Bei den Kohlenwasserstoffen verlangt das Modell die Gesamtemissionen für die definierten Verursachergruppen und ein zu jeder Verursachergruppe gehöriges Kohlenwasserstoffprofil, das die prozentualen Anteile der spezifischen Kohlenwasserstoffe an der Gesamtemission der Verursachergruppe angibt. Jeder Kohlenwasserstoff wird dann den entsprechenden Klassen des verwendeten chemischen Mechanismus (CBM-IV) zugeordnet. Biogene VOC- und NO_x -Emissionen, Seesalzemissionen sowie die Aufwirbelung von Staub aus naturbelassenen Böden werden stündlich modellintern mit Hilfe von Landnutzungsdaten und entsprechenden Emissionsfaktoren berechnet.

Mit den RCG-Simulationsrechnungen lassen sich die Ursachen für Luftbelastungen analysieren und die Beiträge von unterschiedlichen Emittenten zur Luftqualität bestimmen. Die Anwendung von sogenannten genesteten Feldern erlaubt es, je nach Fragestellung und Gebietsgröße unterschiedlich hohe räumliche Auflösung abzubilden.

Es muss erwähnt werden, dass die Modellierung der PM10-Immissionen auch heute noch mit beträchtlichen Schwierigkeiten verbunden ist. Generell werden die zeitweise beobachteten hohen PM10-Konzentrationen von den Modellen in den meisten Fällen nicht reproduziert. Dies betrifft sowohl nur lokal gemessene kurzzeitige Spitzenkonzent-

rationen als auch durch Ferntransport verursachte großflächigere Konzentrationsanstiege.

Die systematische Unterschätzung insbesondere der hohen beobachteten PM₁₀-Konzentrationen ist ein übliches Phänomen bei der Modellierung der PM₁₀-Belastungen. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass nicht alle PM₁₀-Quellen mit ihren Emissionen bekannt sind, und auch die Qualität der verfügbaren anthropogenen Partikel-Emissionsdaten geringer ist als diejenige der klassischen Schadstoffe wie z. B. NO_x und SO₂. Partikelemissionen aus landwirtschaftlichen Aktivitäten, windbedingte Staubaufwirbelung von naturbelassenen Böden oder in Stadtgebieten (z. B. aus Baustellentätigkeit oder Wiederaufwirbelung durch den Kfz-Verkehr) sowie biogene Aerosole sind unvollständig oder gar nicht erfasst, da diese Emissionen zum Teil stark von den meteorologischen Bedingungen und der Beschaffenheit des Untergrundes abhängen. Auch die gasförmigen Primäremissionen, die zu den organischen und anorganischen Sekundäraerosolen führen, stehen nur zum Teil zur Verfügung (z. B. biogen emittierte Isoprene und Terpene, aber auch anthropogen verursachte NH₃-Emissionen).

Die Ergebnisse mehrerer internationaler Modellvergleiche zeigen, dass diese Unsicherheiten in den meisten Modellrechnungen mit chemischen Transportmodellen in der Regel zu einer Unterschätzung der beobachteten PM₁₀-Masse führen (Stern et al., 2008; Sartelet et al., 2007; Vautard et al., 2007; Whyatt et al., 2007, Bessagnet et al., 2016). Das allgemeine PM₁₀-Konzentrationsniveau wird von den Modellen in den meisten Fällen auch reproduziert, die an einzelnen Tagen auftretenden hohen Spitzenwerte werden aber nicht erreicht und die mögliche Nicht-Erfassung beobachteter lokaler und auch großflächig auftretender Spitzenwerte bleibt ein generelles Problem der Modellrechnung.

5.2.2 Berechnungsskalen

Die Anwendung des RCG-Modells erfolgte in den 4 Skalen:

- europäische Skala in einer Auflösung von circa 28 x 32 km² (Modellgebiet Nest 0),
- nationale Skala in einer Auflösung von circa 7 x 8 km² (Deutschland, Modellgebiet Nest 1),
- regionale Skala in einer Auflösung von 2 x 2 km² (Hessen und Randgebiete umliegender Bundesländer, Modellgebiet Nest 2)
- urbane/regionale Skala mit hoher Auflösung von circa 440 x 500 m² (Hessen und Randgebiete der umliegenden Bundesländer, RCG-Untersuchungsgebiet Nest 3).

Die europaweite Rechnung liefert dabei die Hintergrundkonzentrationen für die nationale Skala (Nest 1) und diese wiederum die Hintergrundkonzentrationen für die regionale Skala mit 2 km Auflösung (Nest 2). Die Randbedingungen für die hoch aufgelösten Hessen-Rechnungen (Nest 3) werden dann aus den Ergebnissen für Nest 2 abgeleitet („one-way-nesting“).

Die vom Modell benötigten meteorologischen Daten für das Bezugsjahr 2013 wurden für alle Skalen mit TRAMPER erstellt (s. Abschnitt 5.1). Da die eigentliche Anwendung des Modells für Hessen genestet in der europaweiten Anwendung erfolgen muss, wurde das RCG-Untersuchungsgebiet für Hessen in das Horizontalgitter des übergeordneten Nestes eingepasst, um eine direkte Übergabe der Randbedingungen zu ermöglichen. Dies ist nur in einem geographischen Koordinatensystem möglich, da die großräumigen Datenbasen und damit alle überregionalen Rechnungen nur in solch einem System vorliegen. Der Betrieb des RCG-Modells erfolgte damit in einem geographischen Koordinatensystem und dementsprechend auch die Aufbereitung der Eingangsdaten und die Bereitstellung der unmittelbaren Modellergebnisse. Die Umsetzung der Modellergebnisse in das UTM32-Koordinatensystem erfolgte dann im Rahmen der Kombination der Modelldaten mit den Messdaten (s. Abschnitt 5.3).

Das RCG-Modell wurde für die europaweite Rechnung für das in Abbildung 5-1 gezeigte Modellgebiet angewendet. Die horizontale Auflösung beträgt in einem geographischen Koordinatensystem 0.5° Länge und 0.25° Breite (circa 28 x 32 km²). Die Rechnung für Deutschland in der nationalen Skala (Nest 1) erfolgt in dem Gebiet, das in Abbildung 5-2 dargestellt ist, mit einer Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite (ca. 7 x 8 km²). Das Nest 2 dient lediglich dazu, den Sprung in den Maschenweiten von Nest 1 zu Nest 3 zu verkleinern. Dieses Nest hat daher eine Auflösung von 0.03125° Länge und 0.015625° Breite (2 x 2 km²) und ist nur geringfügig größer als Nest 3.

Nest 3 umfasst Hessen und die an Hessen angrenzenden Teilgebiete der benachbarten Bundesländer. Die Berechnungen im Nest 3 für Hessen erfolgen dann im geographischen Koordinatensystem für Gitterzellen mit 1/128° Länge und 1/256° Breite (circa 440 x 500 m²). Diese Auflösung führt zu einem das Land umfassenden Gitter mit 320 x 588, also etwa 190'000, Gitterzellen. Das Nest 3 ist das eigentliche Untersuchungsgebiet (s. Kapitel 2) und ebenfalls in Abbildung 5-2 sowie in Abbildung 2-1 im UTM32-Koordinatensystem dargestellt.

In Tabelle 5-1 sind die genauen Maße der Modellgebiete zusammengestellt. Die Anwendung des Modells erfolgte in den oben genannten Skalen, wobei nur die Ergebnisse der regionalen Skala mit hoher Auflösung (Nest 3) betrachtet werden. Die unterste Gitterzelle des Modells hat eine vertikale Ausdehnung von 25 m. Die für diese unterste Gitterzelle berechneten Konzentrationen wurden ausgewertet.

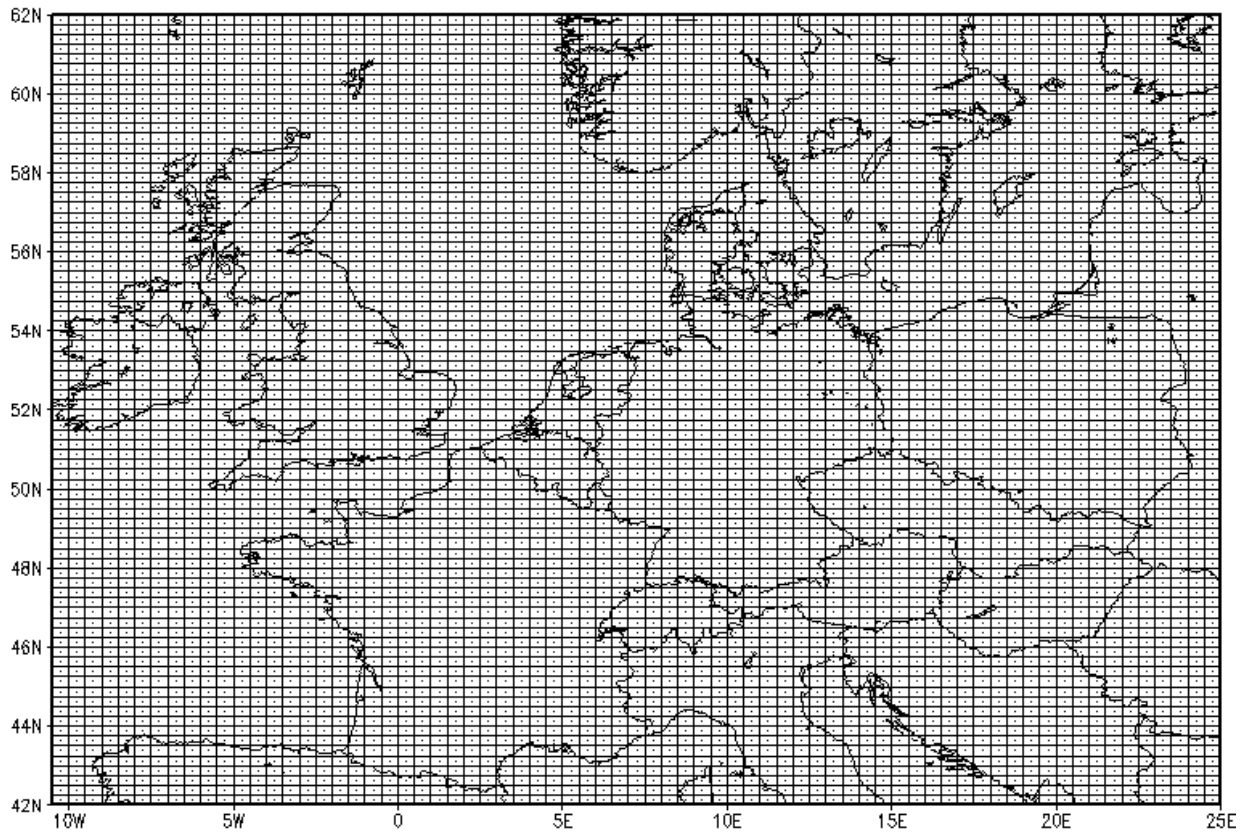


Abbildung 5-1: RCG-Modellgebiet der europäischen Skala (Nest 0) mit einer Auflösung von 0.5° Länge und 0.25° Breite

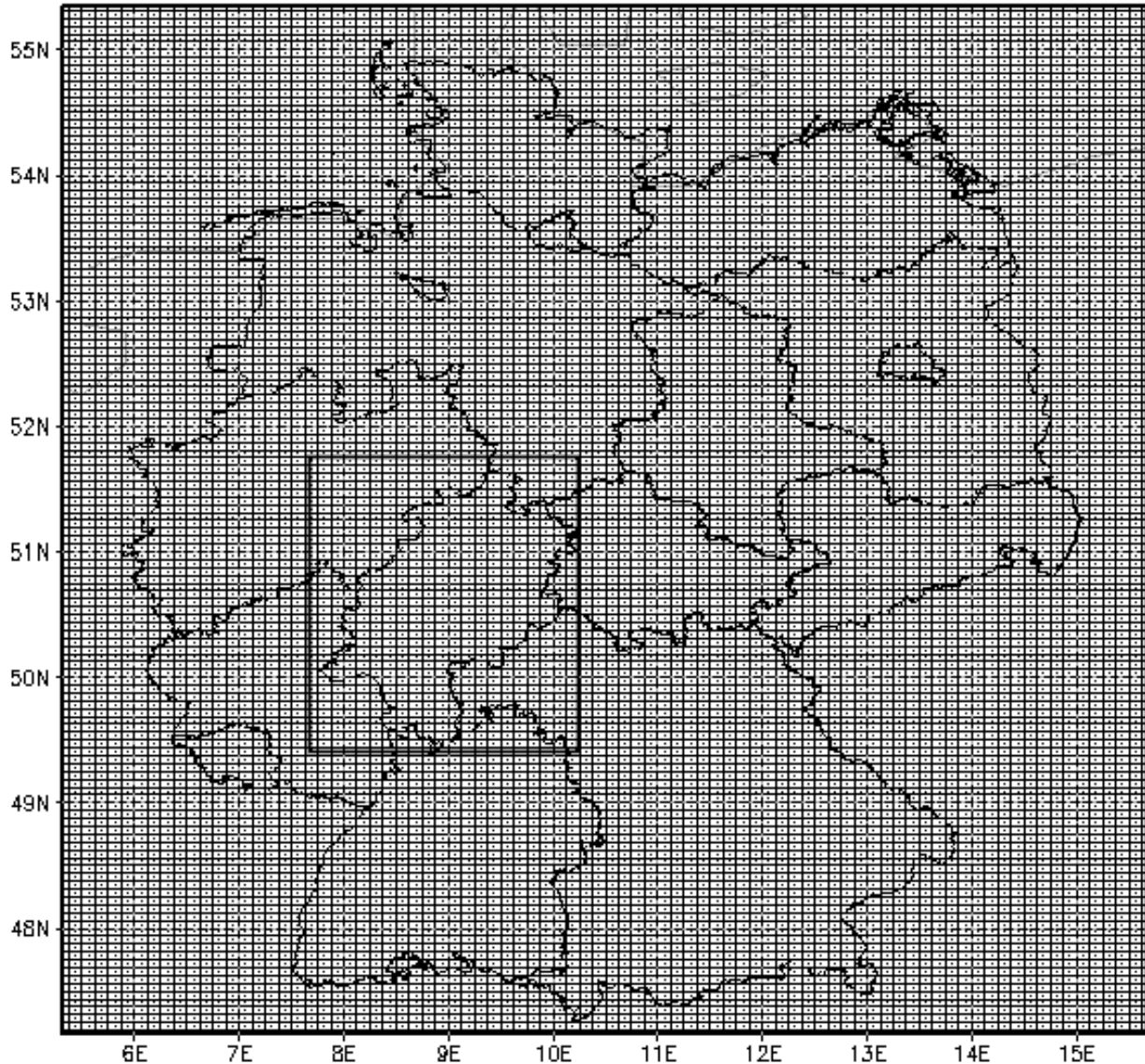


Abbildung 5-2: RCG-Modellgebiete der nationalen Skala (Nest 1) mit einer Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite und dem durch den schwarzer Rahmen ange deuteten Nest 3

Tabelle 5-1: RCG-Modellgebiete

Gebiet	Ausdehnung	Auflösung
Nest 0: Westliches Europa	-10° W bis 25° O 42° N bis 62° N	0.5° Länge, ca. 28 km 0.25° Breite, ca. 32 km
Nest 1: Deutschland	5.5° O bis 15.5° O 47.25° N bis 55° N	0.125° Länge, ca. 7 km 0.0625° Breite, ca. 8 km
Nest 2: Hessen und Randgebiete umliegender Bundesländer in grober Auflösung	7.5° O bis 10.5° O 49.1875° N bis 51.875° N	0.03125° Länge, ca. 2 km 0.015625° Breite, ca. 2 km
Nest 3: Hessen und Randgebiete umliegender Bundesländer und Staaten in hoher Auflösung	7.75° O bis 10.25° O 49.375° N bis 51.6875° N	0.0078125° Länge, ca. 438 m 0.00390625° Breite, ca. 500 m

Bei den Landnutzungs-, Topographie- und Emissionsdaten wurde im Nest 2 und Nest 3 innerhalb von Hessen auf die vom HLNUG für Hessen bereitgestellten Daten zurückge-

griffen, die zusammengestellt und an die vom RCG-Modell verlangten Datenformate angepasst wurden (s. Kapitel 4).

Außerhalb von Hessen wurden im Nest 2 und Nest 3 die Emissionsdaten aus dem Projekt „Luftqualität 2020/2030“ (UBA, 2014b) verwendet, die in einer Auflösung von 0.03125° Länge und 0.015625° Breite vorliegen (s. Abschnitt 4.5.10). Diese Emissionsdatensätze wurden auf die jeweilige Auflösung von Nest 2 und Nest 3 herunter gebrochen.

5.2.3 Berechnung des Basislaufs mit dem RCG-Modell für alle Nester

Aus der beschriebenen Vorgehensweise ergeben sich für die Anwendung des RCG-Modells folgende Arbeitsschritte:

- Übernahme der dreidimensionalen meteorologischen Datenbasis (Wind, Temperatur, Feuchte, Bedeckung, Mischungsschichthöhe und weiterer Grenzschichtparameter) für das Nest 0 und Nest 1,
- Durchführung des Basislaufs für das Bezugsjahr 2013 in der europäischen Skala (Nest 0) und Bereitstellung der Randbedingungen für Nest 1,
- Durchführung des Basislaufs für das Bezugsjahr 2013 in der nationalen Skala und Bereitstellung der Randbedingungen für das Nest 2,
- Übernahme der dreidimensionalen meteorologischen Datenbasis (Wind, Temperatur, Feuchte, Bedeckung, Mischungsschichthöhe und weiterer Grenzschichtparameter) für das Nest 2,
- Durchführung des Basislaufs für das Bezugsjahr 2013 in der überregionalen Skala (Nest 2) und Bereitstellung der Randbedingungen für das Nest 3,
- Übernahme der dreidimensionalen meteorologischen Datenbasis (Wind, Temperatur, Feuchte, Bedeckung, Mischungsschichthöhe und weiterer Grenzschichtparameter) für das Nest 3,
- Übernahme der für Hessen erstellten Daten zur Landnutzung, Topographie und der Emissionen für Nest 3,
- Durchführung des Basislaufs für das Bezugsjahr 2013 für Nest 3 mit Hintergrundkonzentrationen abgeleitet aus den Ergebnissen der übergeordneten Modellanwendungen (Nest 0, 1 und 2),
- Überprüfung der Ergebnisse und
- Bereitstellung der berechneten Hintergrundkonzentrationen zur Auswertung und Kombination mit den Messdaten (s. Abschnitt 5.3) sowie zur Ermittlung der Gesamtbelastung (s. Abschnitt 5.4).

5.2.4 Szenarienberechnungen mit dem RCG-Modell im Nest 3

Im Rahmen des Projektes wurden fünf Szenarienrechnungen für Verursacheranalysen oder Maßnahmenplanungen im Nest 3 durchgeführt zur Bestimmung der Beiträge

- der Quellengruppe Industrie,
- der Quellengruppe Gebäudeheizung und Kleinverbraucher,
- der Quellengruppe Straßenverkehr,
- der Quellengruppe Flughafen Frankfurt Main sowie
- der anthropogenen Emissionen Hessens insgesamt.

Für die Anwendungen des RCG-Modells in diesen Szenarienrechnungen im Nest 3 waren jeweils folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Erstellung der emissionsseitigen Eingabedaten für das jeweilige Szenario und Übernahme der Daten im Nest 3,
- Durchführung der Berechnung,
- Bewertung der Ergebnisse und
- Bereitstellung der Ergebnisse für Nest 3 für die weitere Bearbeitung und Auswertung (s. Abschnitt 5.3).

In diesen Szenarien wurden ausschließlich die Emissionen in Hessen betrachtet. Die Emissionen außerhalb von Hessen blieben unverändert.

5.2.5 Immissionsprognose für das Jahr 2020

Die Immissionsprognose für das Jahr 2020 wurde zum einen für die Gesamtsituation mit allen Quellen und zum anderen als zwei Szenarienrechnungen zur Bestimmung der Beiträge

- der Quellengruppe Straßenverkehr sowie
- der anthropogenen Emissionen Hessens insgesamt

im Nest 3 durchgeführt. Dazu waren für die Anwendung des RCG-Modells folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Erstellung der emissionsseitigen Eingabedaten für die Prognose 2020 und für die Szenarien im Nest 3,
- Durchführung der Berechnung für den europäischen Hintergrund, das überregionale Nest 1, das regionale Nest 2 in grober Auflösung und das regionale Nest 3,
- Berechnung der Szenarien im Nest 3,
- Bewertung der Ergebnisse und
- Bereitstellung der Ergebnisse für Nest 3 für die weitere Bearbeitung und Auswertung (s. Abschnitt 5.3).

Emissionsprognosen für das Jahr 2020 liegen für Europa und das überregionale Nest 1 aus UBA (2014b) vor. Diese Daten wurden verwendet, um die für den Basisfall verwendeten Emissionen im Nest 2 und 3 auf 2020 zu skalieren (s. Abschnitt 4.5.11).

Für die Immissionsprognose 2020 wurden auch die Emissionsveränderungen in Europa und in den anderen Bundesländern Deutschlands berücksichtigt. Im Gegensatz zu den quellengruppenspezifischen Szenarien, die sich ausschließlich auf die Emissionen Hessens beschränken, musste für die Immissionsprognose 2020 daher die gesamte Kette von Nest 0 bis Nest 3 berechnet werden.

5.3 Kombination mit Messdaten

5.3.1 Systembeschreibung

Die Berechnung der landesweiten Vorbelastung wurde mit dem System FLADIS (Diegmann & Wiegand, 2000; IVU Umwelt, 2013) durchgeführt. FLADIS bietet die Möglichkeit, die flächenhafte Vorbelastung entweder durch reine Interpolation aus Punktmessungen abzuleiten oder durch Kopplung der Interpolationsergebnisse mit Modellergebnissen einer Ausbreitungsrechnung. Durch die Kombination von Interpolations- und Modellergebnissen werden insbesondere in Gebieten mit geringer Messdichte zusätzliche Informationen (z. B. Orographie, Meteorologie, Emissionsstruktur) für die Flächen-darstellung genutzt.

Abbildung 5-3 zeigt das Ablaufschema von FLADIS. Für jeden Zeitschritt, für den Daten vorliegen, wird wahlweise eine reine Interpolation von Messdaten oder eine gewichtete Kopplung der Interpolationsergebnisse mit Modellergebnissen gemäß Abschnitt 5.3.1.1 durchgeführt. Es stehen verschiedene Interpolationsverfahren zur Verfügung, von denen die am häufigsten eingesetzten Verfahren in Abschnitt 5.3.1.2 näher erläutert werden. Modellergebnisse können sowohl von internen als auch von externen Modellen bezogen werden. Als interne Modelle sind ein Bilanzierungsansatz und ein lineares statistisches Verfahren implementiert. Externe Modelle wie z. B. RCG, LASAT, EURAD oder IMMIS^{net} können über definierte Schnittstellen angebunden werden. Werden interpolierte Messdaten und Modelldaten miteinander kombiniert, so stellt FLADIS die Option zur Verfügung, vor der Kopplung eine Datenassimilation für die Modelldaten durchzuführen, d. h., die Modelldaten gegen die Messdaten zu ziehen. Als Assimilationsverfahren wird in FLADIS die Optimale Interpolation eingesetzt (Abschnitt 5.3.1.3). Im vorliegenden Projekt wird die gewichtete Kopplung interpolierter Messwerte mit RCG-Modelldaten, die zuvor einer Datenassimilation unterzogen wurden, eingesetzt (Abschnitt 5.3.3).

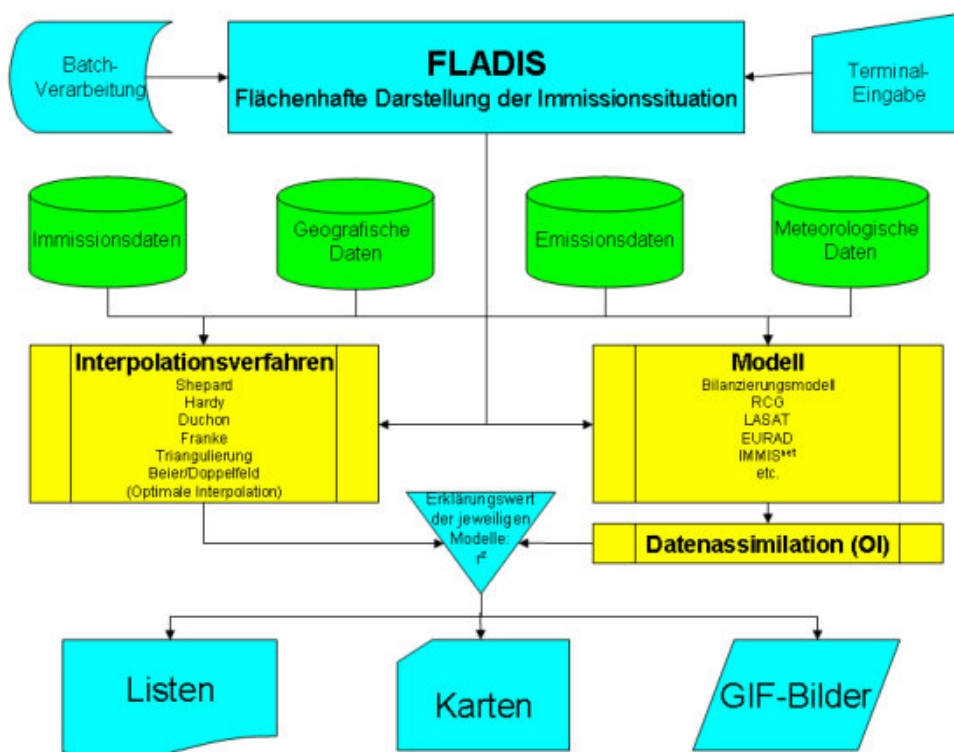


Abbildung 5-3: Flussdiagramm des Programmsystems FLADIS

Um das für die gegebene Datengrundlage am besten geeignete Interpolationsverfahren ermitteln zu können, ist in FLADIS ein Kreuzvalidierungsverfahren entsprechend der VDI-Richtlinie 4280 Blatt 5 implementiert (Abschnitt 5.3.1.4).

Zur Berechnung der flächenhaften Vorbelastung in einem Prognosejahr, für das nur Modell- und keine Messdaten vorliegen, bietet FLADIS die Delta-Methode (Stern, 2006a, Abschnitt 5.3.1.5) an, die auf Basis von Ausbreitungsrechnungen für ein Basis- und das Prognosejahr eine Abschätzung der im Prognosejahr an den Stationen des Messnetzes zu erwartenden Messwerte vornimmt. Die mit Hilfe der Delta-Methode prognostizierten Messdaten werden dann gemäß Abschnitt 5.3.1.1 mit den Modellergebnissen der Ausbreitungsrechnung für das Prognosejahr gekoppelt.

Da FLADIS die flächenhafte Vorbelastung in der zeitlichen Auflösung der Eingangsdaten interpoliert, im Rahmen dieses Projekts also in stündlicher Auflösung, kann FLADIS während der Vorbelastungsrechnung alle in der EU-Richtlinie 2008/50/EG aufgeführten Kenngrößen wie Stundenmittel, Tagesmittel, Jahresmittel und Überschreitungshäufigkeiten sowie deren Unsicherheiten ebenso wie Perzentilwerte ermitteln.

5.3.1.1 Kopplung von Mess- und Modelldaten

Die Kopplung E_{Kopp} von Interpolationsergebnissen E_I und Modellergebnissen E_M erfolgt für jeden betrachteten Zeitschritt über eine lineare Wichtungsfunktion:

$$E_{Kopp} = (1 - a) \cdot E_I + a \cdot E_M$$

Zur Bestimmung des Wichtungsfaktors a wird in FLADIS der Korrelationskoeffizient zwischen den gemessenen Konzentrationen und den Modellergebnissen an den Messstationsorten verwendet. Der Korrelationskoeffizient sagt jedoch allein noch nichts darüber aus, ob der Zusammenhang zwischen den Modellergebnissen und den Messungen signifikant ist. Daher wird zusätzlich als Signifikanztest ein Student-Test durchgeführt. Nur wenn dieser Test eine Signifikanz zeigt, wird der berechnete Korrelationskoeffizient als Wichtungsfaktor benutzt. Die Korrelation ist als signifikant definiert, wenn beim Signifikanztest eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % unterschritten wird.

5.3.1.2 Interpolationsverfahren

Als Interpolationsverfahren für die räumliche Verteilung der Messwerte bietet FLADIS verschiedene Optionen an, u. a.

- Shepard-Verfahren,
- Hardy-Verfahren,
- lineare Interpolation nach Triangulierung und
- Optimale Interpolation.

Bei den Shepard-Verfahren, auch als IDW (Inverse Distance Weighting)-Verfahren bezeichnet, ergibt sich der Wert an einem beliebigen Ort im Interpolationsgebiet als Summe der Messwerte im Gebiet, die jeweils mit einer Wichtungsfunktion multipliziert werden. Die Wichtungsfunktionen sind so konstruiert, dass der Einfluss eines Messwertes auf einen Interpolationspunkt mit zunehmender Entfernung abnimmt. Es werden globale und lokale Ansätze unterschieden. Im globalen Fall wirkt eine Wichtungsfunktion im gesamten Modellgebiet, im lokalen Fall nur im vorgegebenen Radius.

Die Hardysche Multiquadrikenmethode gehört zu den radialen Basisfunktionsmethoden, die auf sogenannten radialen Funktionen beruhen, die vom Abstand zwischen Interpolationspunkt und Messpunkt abhängig sind.

Bei der Interpolation nach Triangulierung wird zunächst für das Interpolationsgebiet eine Delaunay-Triangulierung der Messpunkte durchgeführt, die auf Voronoi-Diagrammen basiert, und anschließend werden die Messwerte auf den so entstandenen Dreiecksflächen linear interpoliert.

Die Optimale Interpolation (OI) schließlich ist kein Interpolationsverfahren im eigentlichen Sinne, d. h., sie zielt nicht auf die Wiedergabe stützstellentreuer Werte, sondern auf die Beschreibung der mittleren Feldstrukturen der darzustellenden Größe in der Skala des Interpolationsrasters. Die Wiedergabe stützstellentreuer Werte ist gegebenenfalls möglich, jedoch im Allgemeinen weder zu erwarten noch vom Verfahren zu gewährleisten. Die OI kommt aus dem Bereich der Geostatistik und wurde von Gandin (1965) in die Meteorologie eingeführt, um Beobachtungswerte in Modellrechnungen einfließen zu lassen, sie liefert daher nur in Kombination mit einem Modellhintergrund sinnvolle Ergebnisse. Die OI zieht gewissermaßen die Modellergebnisse gegen die Messwerte und wird daher häufig auch zur Datenassimilation verwendet, so z. B. auch in FLADIS (Abschnitt 5.3.1.3).

Die Optimale Interpolation beruht auf der Theorie der Prognose stochastischer Prozesse und erlaubt es, die räumlichen Beziehungen der Messwerte untereinander zu quantifizieren. Gleichzeitig kann ein möglicher Beobachtungsfehler an den Stationen berücksichtigt werden. Während bei einer Kombination von Interpolations- und Modellergebnissen, wie in der oben beschriebenen Wichtungsfunktion (Abschnitt 5.3.1.1), die Wichtung einheitlich für das gesamte Feld durchgeführt wird, korrigiert die OI die Modellergebnisse räumlich differenziert in Abhängigkeit von Struktur und Einflussbereich der Messdaten.

Die räumliche Interpolation findet bei der in FLADIS implementierten OI auf der Grundlage eines empirisch geschätzten Kovarianzmodells statt. Für die Bestimmung der empirischen Kovarianzwerte stehen die klassische Momentenmethode und eine gegenüber Ausreißern und Abweichungen von der Normalverteilung robustere Schätzung nach Cressie (1993) zur Verfügung. Die die Schätzwerte approximierende Kovarianzfunktion kann exponentiell, Gauß'schen oder sphärischen Typs sein.

5.3.1.3 Datenassimilation der Modellergebnisse

Um bei der Kombination von Modell und Messung gemäß Abschnitt 5.3.1.1 einen möglichst hohen Anteil der Modellergebnisse und damit der in die Modellierung eingeflossenen Informationen (Orographie, Emissionsstruktur etc.) zu erhalten, bietet sich eine Kalibrierung der Modellergebnisse mit den Messdaten an, um gegebenenfalls auftretende Differenzen zwischen Messungen und Modell zu reduzieren.

Die Frage der Kalibrierung von Modelldaten mit Messdaten ist ein klassisches Einsatzgebiet der Datenassimilation, die hierfür z. B. in der Meteorologie routinemäßig eingesetzt wird. Die in FLADIS implementierte und in Abschnitt 5.3.1.2 beschriebene OI gehört zu den Assimilationsverfahren, die zu diesem Zweck verwendet werden.

Dabei werden im ersten Schritt die Modelldaten durch einen OI-Lauf an die Messdaten herangezogen. Die auf diese Weise kalibrierten Modellergebnisse dienen dann als Modellfeld für die eigentliche Interpolation mit Modellhintergrund zur flächenhaften Darstellung der Messwerte in FLADIS. Zur anschließenden Interpolation kann wiederum unter

allen in FLADIS implementierten Verfahren frei gewählt werden, jedoch mit einer Einschränkung: eine Mehrfachanwendung der OI, d. h. ein oder mehrere Assimilationsschritte und ein Interpolationsschritt, ist grundsätzlich möglich und eine iterative Datenassimilation in der Meteorologie auch durchaus üblich. Sie kann jedoch für bodennahe Immissionsfelder, die im Allgemeinen weniger glatt sind als meteorologische Felder, problematisch werden, wenn keine eindeutige Kovarianzkurve mehr bestimmt werden kann. Es wird daher empfohlen, nur einen Assimilationsschritt mit der OI durchzuführen und für die folgende Interpolation eines der anderen Interpolationsverfahren, gekoppelt mit dem Ergebnisfeld der Datenassimilation als Modellhintergrund, zu wählen.

5.3.1.4 Kreuzvalidierung

Mit Hilfe des statistischen Verfahrens der Kreuzvalidierung ermöglicht FLADIS zum einen Aussagen über die Güte der berechneten flächenhaften Darstellung in Abhängigkeit vom angewendeten Berechnungsverfahren. Zum anderen liefert es Angaben zum Einfluss einzelner Stationen auf die flächenhafte Darstellung und unterstützt so die Optimierung des in die Berechnung eingeflossenen Messnetzes.

In FLADIS ist das „leave-one-out“-Verfahren zur Kreuzvalidierung implementiert. Die angewendete Methodik entspricht der VDI Richtlinie 4280 Blatt 5 „Ermittlung der Unsicherheit räumlicher Beurteilungen der Luftqualität“ (KRdL, 2009).

Das „leave-one-out“-Verfahren beruht darauf, dass für jeden betrachteten Zeitschritt reihum jede Station aus dem Datensatz ausgeschlossen und der Wert an ihrer Stelle durch das jeweilige Interpolationsverfahren bestimmt wird. Aus der Differenz zwischen dem Wert, den das Modell an der Stelle der ausgelassenen Station im Mittel über alle betrachteten Zeitschritte errechnet, und dem entsprechend gemittelten Messwert der ausgelassenen Station wird die relative Abweichung an der Station berechnet. Je größer die relative Abweichung an einem Stationsort, desto größer ist der Einfluss der Station auf die flächenhafte Darstellung. Abschließend wird über alle Stationen die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSQ, root mean square error) sowie die mittlere relative Abweichung (MRA) ermittelt. Je kleiner diese beiden Werte sind, desto höher ist (im Vergleich mit den Kreuzvalidierungsergebnissen für andere Interpolationsverfahren) die Güte der berechneten flächenhaften Darstellung einzuordnen.

5.3.1.5 Prognoserechnungen

Die in FLADIS implementierte Delta-Methode nach Stern (2006a) dient dazu, Messreihen eines Bezugsjahrs mit Hilfe von Modellprognoserechnungen so zu modifizieren, dass sie eine Beschreibung und flächenhafte Darstellung der zukünftigen Immissionssituation in einem Modellgebiet erlauben. Dazu werden im ersten Schritt die für das Prognosejahr zu erwartenden Messwerte für jeden Einzelwert der zugrunde liegenden Basismessreihe mit der Delta-Methode bestimmt. Die so prognostizierten Messwerte werden im zweiten Schritt wie eine herkömmliche Messreihe ohne oder mit Modellhintergrund des Prognosejahres in die Fläche interpoliert.

Die Abschätzung zukünftiger Messwerte an Stationsorten durch Modellprognosen beruht auf der Überlegung, dass eine direkte Übertragung der Prognoserechnungen auf diskrete Orte zwar schwierig ist, weil die berechneten zeitlichen und räumlichen Konzentrationsverteilungen nicht immer mit gemessenen Werten übereinstimmen, dass aber davon auszugehen ist, dass die wesentlichen ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse vom Modell hinreichend genau erfasst werden und daher die berechnete Immissionsänderung, die sich zwischen den Modellrechnungen für ein Be-

zugsjahr und ein Prognosejahr ergibt, zur Prognose der mittleren Änderung der Messwerte an den Stationsorten und darauf aufbauend zur Bewertung von Maßnahmen verwendet werden kann.

Dazu wird zunächst aus den Stundenwerten der Konzentrationen des Basislaufs eine klassifizierte Häufigkeitsverteilung gebildet. Anschließend wird jeder Klasse des Basislaufs eine klassenspezifische mittlere Änderung zugeordnet, die sich berechnet als Mittelwert aller Änderungen, die die dieser Klasse zugeordneten Stundenwerte des Basislaufs in der Prognoserechnung erfahren. Auf diese Weise wird der Zeit- und Ortsbezug der einzelnen Stundenwerte aufgegeben. Die zu erwartenden Messwerte können nun abgeschätzt werden, indem zu jedem einzelnen Messwert des Bezugsjahrs die berechnete klassenspezifische Änderung für diesen Wert addiert wird. Beobachtete Konzentrationen, die höher als der höchste berechnete Wert sind, werden nur um die der höchsten Klasse zugeordneten Änderung modifiziert. Die prognostizierte Zeitreihe behält damit die zeitliche Struktur der Basismessreihe, das Konzentrationsniveau jeder einzelnen Messung ist aber um den Betrag verändert, der durch die Prognoserechnung vorgegeben wird.

Bei der Interpretation der Prognoseergebnisse ist zu berücksichtigen, dass insbesondere die prognostizierten Messwerte nur generalisierte Aussagen erlauben, da durch die Bildung der klassifizierten Häufigkeitsverteilung und durch die Zuordnung der klassenspezifischen mittleren Änderungen der Zeit- und Ortsbezug der Einzelwerte aufgegeben wird und so auch nicht wieder herzustellen ist.

5.3.2 Aufbereitung der Messdaten

Die in Abschnitt 4.6 beschriebenen Schadstoff-Messdaten für NO₂ und PM₁₀ sowie NO_x und Ozon wurden in das FLADIS-Format konvertiert. In Abstimmung mit dem HLNUG wurden folgende Nachweisgrenzen verwendet:

- NO₂: 1.1475 µg/m³ entsprechend 0.6 ppb
- PM₁₀: 1 µg/m³
- Ozon: 2.39437 µg/m³ entsprechend 1.2 ppb

Dabei wurden Werte größer gleich der negativen Nachweisgrenze und kleiner als die positive Nachweisgrenze auf die halbe Nachweisgrenze gesetzt. Werte kleiner der negative Nachweisgrenze wurden auf Fehlwert gesetzt und im Weiteren nicht verwendet. Für NO_x wurde keine Nachweisgrenze gesetzt.

Die FLADIS-Rechnungen wurden in MEZ (ohne Berücksichtigung der Sommerzeit) durchgeführt. Da sämtliche Messdaten aus Abschnitt 4.6 ebenfalls in MEZ vorlagen, war keine Konvertierung der Daten hinsichtlich der Zeitzone erforderlich.

5.3.3 Durchführung der FLADIS-Berechnungen

Die landesweite Vorbelastung in Hessen wurde mit FLADIS für die Schadstoffe NO₂ und PM₁₀ sowie NO_x und Ozon zunächst für den Basisfall mit Bezugsjahr 2013 in 500 m Auflösung ermittelt. Dabei wurden die in Abschnitt 4.6 beschriebenen Schadstoff-Messdaten interpoliert und mit den Ergebnissen der RCG-Ausbreitungsrechnungen aus Abschnitt 5.2 gemäß Abschnitt 5.3.1.1 gekoppelt. Die RCG-Ergebnisse wurden vor der Kopplung einer Datenassimilation unterzogen, wie sie in Abschnitt 5.3.1.3 beschrieben ist. Die für die Datenassimilation in FLADIS eingesetzte OI wurde mit der klassischen Momentenmethode zu Bestimmung der empirischen Kovarianzwerte und einer sphäri-

schen Kovarianzfunktion zur Approximation der empirischen Kovarianzwerte (Abschnitt 5.3.1.2) angewendet. Zudem wurde in FLADIS eine Transformation der im geographischen Koordinatensystem verorteten RCG-Ergebnisse auf UTM-Koordinaten sowie eine Umrechnung auf in UTM-Koordinaten quadratische Zellen in 500 m Auflösung vorgenommen. Somit liegen die FLADIS-Ergebnisse in UTM-Koordinaten vor.

Um das für die vorliegende Datenbasis am besten geeignete Interpolationsverfahren zu bestimmen, wurden die Rechnungen im Basisfall für die Schadstoffe NO₂ und PM₁₀ jeweils mit den in Abschnitt 5.3.1.2 beschriebenen Interpolationsverfahren durchgeführt und mit Hilfe der Kreuzvalidierung nach Abschnitt 5.3.1.4 bewertet. Das Shepard-Verfahren wurde dabei in einer globalen und einer lokalen Variante eingesetzt. Im lokalen Fall wurde ein Radius von 130 km für die Wichtungsfunktion vorgegeben, um die Fläche Hessens mit den vorhandenen Stationen lückenlos abdecken zu können. Weiterhin wurde beim Shepard-Verfahren der Exponent der Wichtungsfunktion sowohl für den globalen als auch für den lokalen Ansatz zwischen 2 und 4 variiert. Die Auswahl des Interpolationsverfahrens wird in Abschnitt 5.3.4 näher erläutert.

Die Darstellung der zukünftigen landesweiten Vorbelastung im Jahr 2020 wurde mit Hilfe der Delta-Methode (Abschnitt 5.3.1.5) auf Basis der RCG-Prognoserechnungen (Abschnitt 5.2.5) für 2020, des RCG-Basislaufs für 2013 und der Schadstoff-Messdaten aus Abschnitt 4.6 berechnet, wobei das im Basisfall am besten geeignete Interpolationsverfahren verwendet wurde.

Die FLADIS-Rechnungen für die Schadstoffe NO_x und Ozon wurden nur für den Basisfall durchgeführt und dienten ausschließlich der Erzeugung von Immissions-Vorbelastungsdaten für die Berechnung der NO₂-Gesamtbelastung im Rahmen der Ausbreitungsrechnungen für die Straßenräume in Abschnitt 5.5.2. Für diese FLADIS-Rechnungen wurde ebenfalls das Interpolationsverfahren verwendet, das sich für die Schadstoffe NO₂ und PM₁₀ als das am besten geeignete erwiesen hat.

5.3.4 Auswahl des Interpolationsverfahrens

Im Folgenden wird der Einfluss des Interpolationsverfahrens auf die flächenhafte Darstellung der Immissionssituation in Hessen diskutiert und bewertet, um die Eigenschaften der verschiedenen Ansätze zu verdeutlichen und die Wahl des für die Erstellung der landesweiten Vorbelastung (Abschnitt 6.1) verwendeten Verfahrens zu begründen.

Basis der Bewertung der Interpolationsverfahren sind die Kenngrößen der Kreuzvalidierung, RMSQ (root mean square error) und MRA (mittlere relative Abweichung), entsprechend Abschnitt 5.3.1.4. In Tabelle 5-2 bis Tabelle 5-3 sind die genannten Kenngrößen der verschiedenen Verfahren zusammen mit dem Modellanteil, der sich aus dem Wichtungsfaktor a gemäß Abschnitt 5.3.1.1 ergibt, für die betrachteten Schadstoffe NO₂ und PM₁₀ aufgeführt.

Der Modellanteil, d. h. der Anteil, der aus den assimilierten RCG-Modellergebnissen in das Gesamtergebnis einfließt, ist mit knapp 72 % (NO₂) bzw. rund 63 % (PM₁₀) relativ hoch. Der Modellanteil ist unabhängig vom Interpolationsverfahren, da er sich aus dem Korrelationskoeffizienten zwischen den gemessenen Konzentrationen und den (assimilierten) RCG-Modellergebnissen an den Messstationsorten bestimmt (siehe Abschnitt 5.3.1.1). Der hohe Modellanteil ist wesentlich in der Datenassimilation begründet, der die RCG-Modellergebnisse vor der Kopplung mit den interpolierten Messwerten unterzogen werden. Beispielhaft zeigt Tabelle 5-2 für NO₂ und das globale Shepard-Verfahren mit Exponent 2, dass der Modellanteil deutlich niedriger (bei rund 44 %) liegt,

wenn die interpolierten Messwerte mit dem RCG-Modellergebnis ohne Datenassimilation (DA) gekoppelt werden.

Eine Auswertung der in Tabelle 5-2 bis Tabelle 5-3 angegebenen Kennwerte der Kreuzvalidierung zeigt, dass jeder zusätzliche Berechnungsschritt gegenüber der reinen Interpolation die Kennwerte und damit die Güte der berechneten flächenhaften Darstellung verbessert. Eine Kopplung mit den RCG-Modellergebnissen ohne Datenassimilation verringert RMSQ und MRA gegenüber den entsprechenden Werten der reinen Interpolation, und eine Datenassimilation der RCG-Modellergebnisse vor der Kopplung mit den interpolierten Messwerten bewirkt eine weitere Verringerung. Das Interpolationsverfahren selbst ist im vorliegenden Fall bei beiden Schadstoffen – zumindest bei Kopplung mit den assimilierten RCG-Modellergebnissen – von untergeordneter Bedeutung, weil der Modellanteil hoch ist. Daher liegen die RMSQ- und MRA-Werte der einzelnen Interpolationsverfahren relativ nah beieinander.

Das Verfahren mit den niedrigsten RMSQ- und MRA-Werten ist sowohl für NO₂ als auch für PM₁₀ das globale Shepard-Verfahren mit Exponent 2, gefolgt vom lokalen Shepard-Verfahren mit Exponent 2.

Tabelle 5-2: Modellanteil und Kenngrößen der Kreuzvalidierung für NO₂

Interpolationsverfahren	Modellanteil [%]	RMSQ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	MRA [%]
Kopplung Messung-Modell nach DA			
Hardy	71.7	4.9	27.7
Shepard global, Exponent = 2	71.7	4.4	25.0
Shepard lokal, Exponent = 2, Radius = 130 km	71.7	4.6	26.2
Shepard global, Exponent = 4	71.7	4.9	28.0
Shepard lokal, Exponent = 4, Radius = 130 km	71.7	5.0	29.2
Triangulierung	71.7	5.0	28.1
reine Interpolation			
Shepard global, Exponent = 2	ohne Modell	10.1	69.2
Kopplung Messung-Modell ohne DA			
Shepard global, Exponent = 2	44.4	6.8	38.0

Tabelle 5-3: Modellanteil und Kenngrößen der Kreuzvalidierung für PM₁₀

Interpolationsverfahren	Modellanteil [%]	RMSQ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	MRA [%]
Kopplung Messung-Modell nach DA			
Hardy	63.1	2.9	15.8
Shepard global, Exponent = 2	63.1	2.6	14.5
Shepard lokal, Exponent = 2, Radius = 130 km	63.1	2.8	15.3
Shepard global, Exponent = 4	63.1	2.9	15.8
Shepard lokal, Exponent = 4, Radius = 130 km	63.1	2.9	16.1
Triangulierung	63.1	2.8	15.6
reine Interpolation			
Shepard global, Exponent = 2	ohne Modell	4.3	23.5

In Abbildung 5-4 sind für NO₂ das reine RCG-Modellergebnis, das RCG-Modellergebnis nach Datenassimilation sowie als Beispiel das Ergebnis einer reinen Interpolation, hier mit dem globalen Shepard-Verfahren mit Exponent 2, dargestellt.

Bei den Abbildungen dieses Abschnitts wurden die Klasseneinteilungen entsprechend dem in Abschnitt 6.1 beschriebenen Vorgehen für die Ergebnisdarstellung vorgenommen. Da hier teilweise andere Wertebereiche auftreten, unterscheiden sich die Klassengrenzen teilweise von denen in Abschnitt 5.4. Um innerhalb dieses Abschnitts eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurden hier die Ergebnisse aus Abschnitt 6.1 jeweils

nochmals in den Klasseneinteilungen der erweiterten Wertebereiche dieses Abschnitts mit dargestellt.

Vergleicht man die Konzentrationsverteilungen der reinen RCG-Ergebnisse mit denen der interpolierten Messwerte, so weisen beide erhöhte Werte im Raum Frankfurt auf. Dieser Bereich erstreckt sich bis Hanau im Osten, Darmstadt im Süden und Wiesbaden im Westen. Auffällig ist im Vergleich zum einen, dass die interpolierten Messwerte in den Bereichen Fulda und Wetzlar deutlich höhere Werte zeigen, als RCG an diesen Stellen erreicht, und zum andere grundsätzlich die deutlich weitere Verteilung höherer Konzentrationswerte bei den interpolierten Messwerten und im Gegensatz dazu das deutlich großflächigere Auftreten von Konzentrationswerten unter $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei den reinen RCG-Modellergebnissen. Das durch die reine Interpolation der Messungen erzeugte Konzentrationsfeld deckt sich nicht mit dem berechneten Feld, das die Emissionsstruktur in Verbindung mit den die Ausbreitung bestimmenden meteorologischen Parametern wiedergibt. Die großflächige Verteilung höherer Konzentrationswerte im interpolierten Feld ist eine Folge der geringen Anzahl der für die Interpolation zur Verfügung stehenden Stationen, wodurch der Einfluss der städtischen Hintergrundstationen, die die Mehrzahl dieser Stationen stellen, überbetont wird. Die rein auf Messungen beruhende Interpolation „kennt“ im Gegensatz zur Modellrechnung keine Emissionsstruktur. Deshalb kann z. B. das in den RCG-Ergebnissen deutlich erkennbare Netz der Autobahnen von den interpolierten Messwerten auch nicht wiedergegeben werden. Ein hoher Einfluss der RCG-Modellergebnisse auf das Gesamtergebnis ist also wünschenswert.

Dies wird, wie in Tabelle 5-2 gezeigt, durch die Datenassimilation der RCG-Ergebnisse erreicht. Die assimilierten RCG-Modellergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Datenassimilation zieht die RCG-Modellergebnisse im Bereich der Stationen gegen die Messwerte (in Abbildung 5-4 beispielsweise im Bereich der Stationen Wetzlar (DEHE020), Fulda (DEHE058) und Marburg (DEHE030) zur Lage der Station siehe Abbildung 4-6), behält aber die grundlegende Struktur der RCG-Modellergebnisse bei.

Abbildung 5-5 zeigt für NO_2 das Ergebnis der Kopplung der interpolierten Messwerte mit dem assimilierten RCG-Modellergebnis für drei grundsätzlich unterschiedliche Interpolationsverfahren aus Tabelle 5-2. Wie bereits beschrieben, ist der Einfluss des Interpolationsverfahrens auf das Gesamtergebnis aufgrund des hohen Modellanteils gering. Die Struktur der RCG-Modellergebnisse bleibt weiterhin erhalten, es findet gegenüber dem assimilierten RCG-Modellfeld in Abbildung 5-4 eine leichte Anhebung des Konzentrationsniveaus statt.

Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse bietet sich für die Erstellung der landesweiten Vorbelastung (Abschnitt 6.1) das Verfahren an, das gemäß Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3 für NO_2 und für PM_{10} die niedrigsten RMSQ- und MRA-Werte aufweist, das globale Shepard-Verfahren mit Exponent 2. Abbildung 5-5, oben links, zeigt demnach das Gesamtergebnis, das in Abschnitt 6.1 die landesweite Vorbelastung in Hessen für das Bezugsjahr 2013 darstellt.

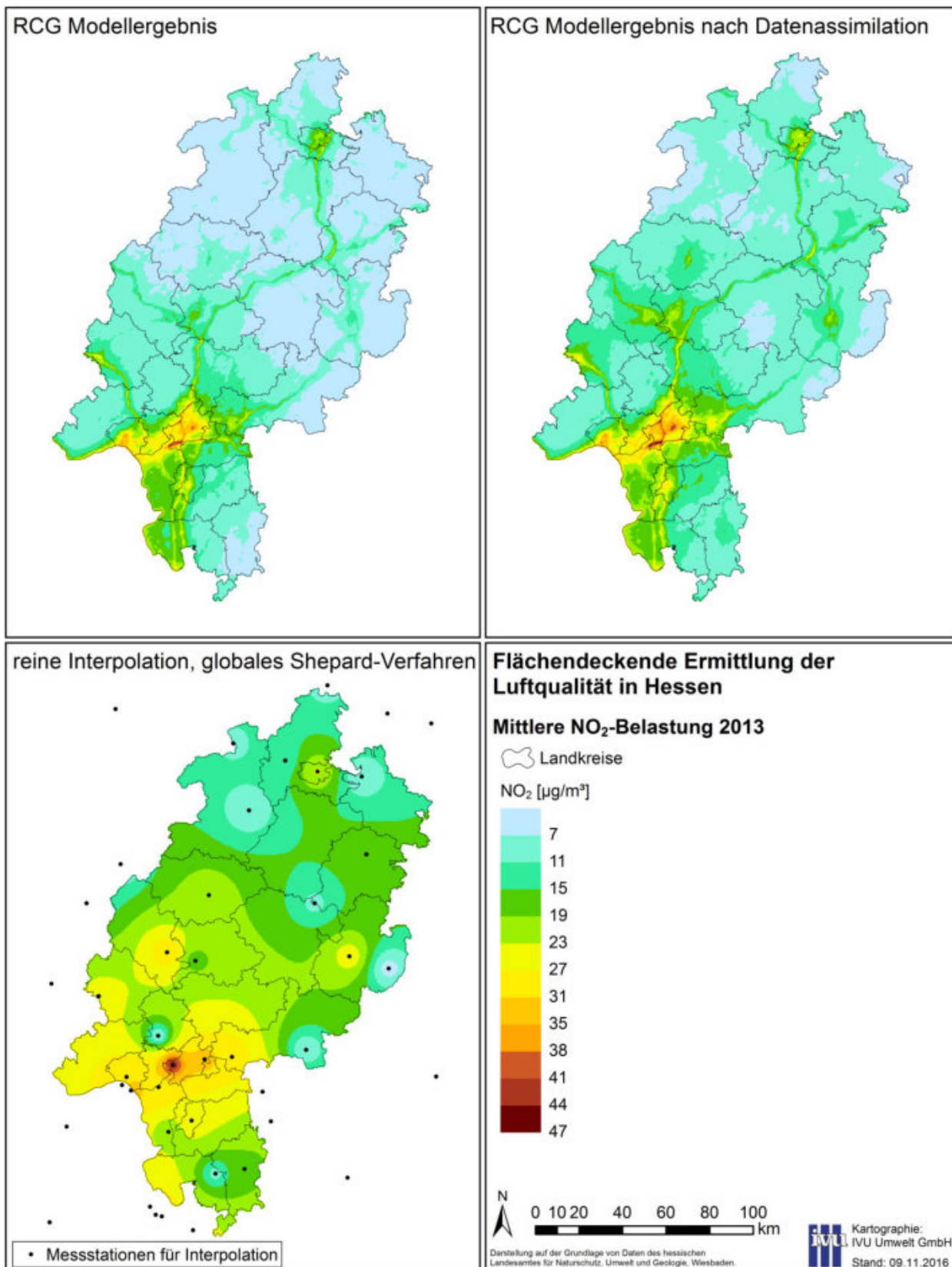


Abbildung 5-4: Mittlere NO₂-Belastung 2013: RCG-Modellergebnis, RCG-Modellergebnis nach Datenassimilation und Ergebnis der reinen Interpolation der Messwerte mit dem globalen Shepard-Verfahren mit Exponent=2

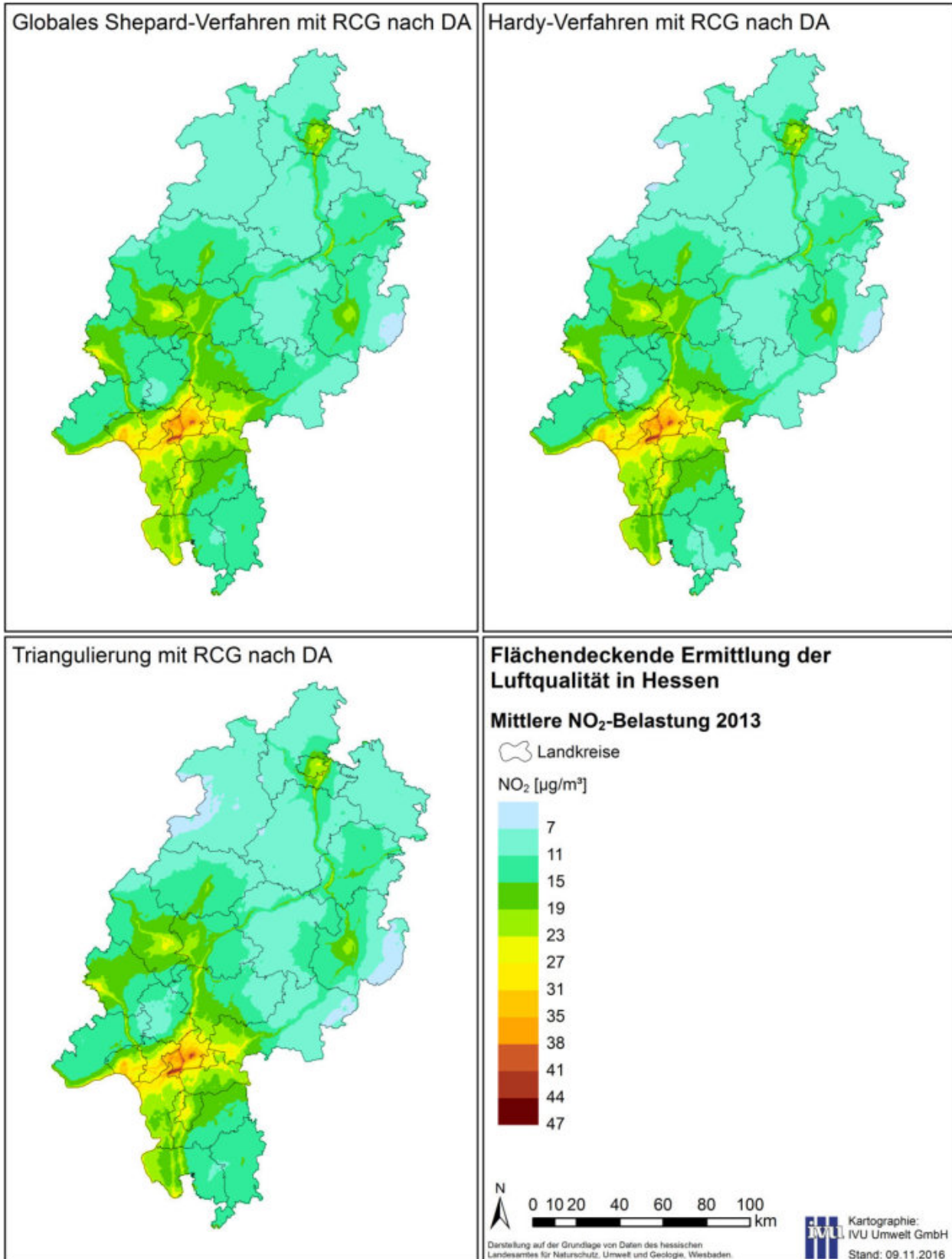


Abbildung 5-5: Mittlere NO₂-Belastung 2013: Ergebnis der Kopplung der interpolierten Messwerte mit dem RCG-Modellergebnis nach Datenassimilation (DA). Vergleich der Interpolationsverfahren Shepard global mit Exponent 2, Hardy sowie Triangulierung

In Abbildung 5-6 sind für NO₂ die RCG-Modellergebnisse ohne und mit Datenassimilation sowie die Ergebnisse der Kopplung von vier Interpolationsverfahren aus Tabelle 5-2 mit den assimilierten RCG-Modellergebnissen an den Messorten gegen die Messwerte aufgetragen. Dabei wurden alle in Tabelle 4-7 aufgeführten Stationsorte verwendet. Weiterhin ist in Abbildung 5-6 das Ergebnis der linearen Regression angegeben und das Datenqualitätsziel der 39. BImSchV für Modellergebnisse (Unsicherheit von maximal 30 % für den NO₂-Jahresmittelwert) eingezeichnet.

Demnach weisen bereits die reinen RCG-Modellergebnisse für NO₂ an den Messorten ein Bestimmtheitsmaß von knapp 80 % auf. Das 30 %-Datenqualitätsziel wird allerdings nicht an allen Stationen erreicht. Durch Datenassimilation steigt das Bestimmtheitsmaß auf 91 %, das 30 %-Datenqualitätsziel wird an allen Stationen eingehalten. Kopplung der assimilierten RCG-Modellergebnisse mit den interpolierten Messwerten erhöht das Bestimmtheitsmaß auf knapp 97 %, das 30 %-Datenqualitätsziel wird auch bei dieser Vorgehensweise an allen Stationen eingehalten. Der Einfluss des Interpolationsverfahrens auf das Bestimmtheitsmaß spiegelt sich aufgrund des hohen Modellanteils erst in der dritten Nachkommastelle wieder.

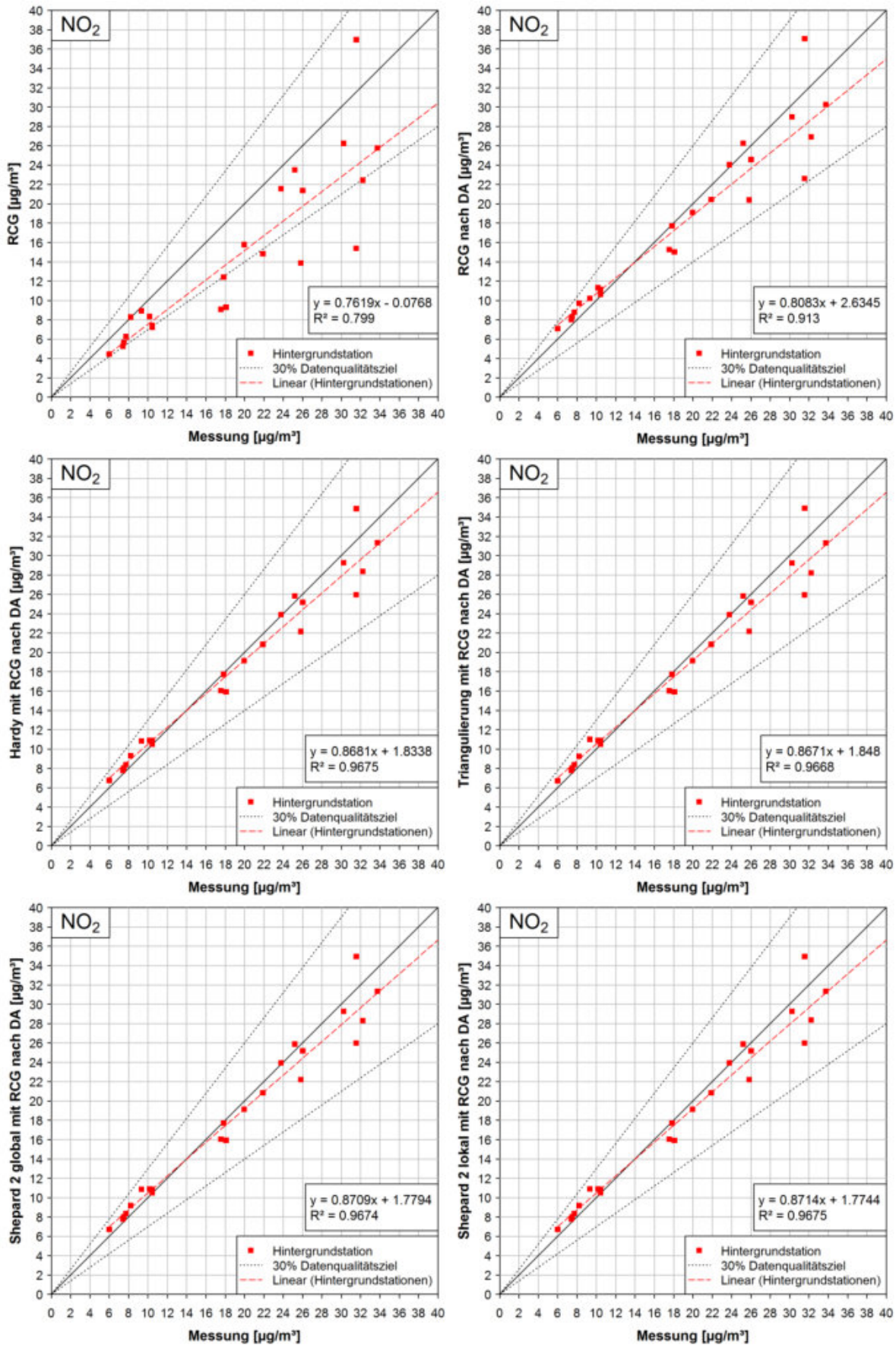


Abbildung 5-6: Regression Modell- bzw. Gesamtergebnis an den Messorten gegen Messwerte für NO₂

In Abbildung 5-7 sind für PM₁₀ das reine RCG-Modellergebnis, das Ergebnis einer reinen Interpolation mit dem globalen Shepard-Verfahren mit Exponent 2 sowie das Ergebnis der Kopplung der mit Shepard global mit Exponent 2 interpolierten Messwerte mit dem RCG-Modellergebnis nach Datenassimilation dargestellt. Letzteres entspricht dem Ergebnis, das in Abschnitt 6.1 die landesweite Vorbelastung in Hessen für das Bezugsjahr 2013 darstellt. Auch hier verhalten sich reines RCG-Modellergebnis, Ergebnis der reinen Interpolation und Ergebnis der Kopplung zueinander wie die zuvor diskutierten NO₂-Ergebnisfelder. Die reinen RCG-Modellergebnisse zeigen ein insgesamt niedrigeres PM₁₀-Konzentrationsniveau als das Interpolationsergebnis, wobei lokal einzelne in geringer Höhe emittierende PM₁₀-Quellen zu einzelnen Spitzen in der mit RCG berechneten Konzentrationsverteilung führen (s. auch Abschnitt 6.1). Durch Datenassimilation und Kopplung wird das PM₁₀-Konzentrationsniveau gegenüber den reinen RCG-Modellergebnissen angehoben und im Bereich der Messstationen gegen die Messwerte gezogen. Die wesentlich durch die Emissionsverteilung vorgegebene kleinräumige Struktur der RCG-Modellergebnisse bleibt im Gesamtergebnis erhalten.

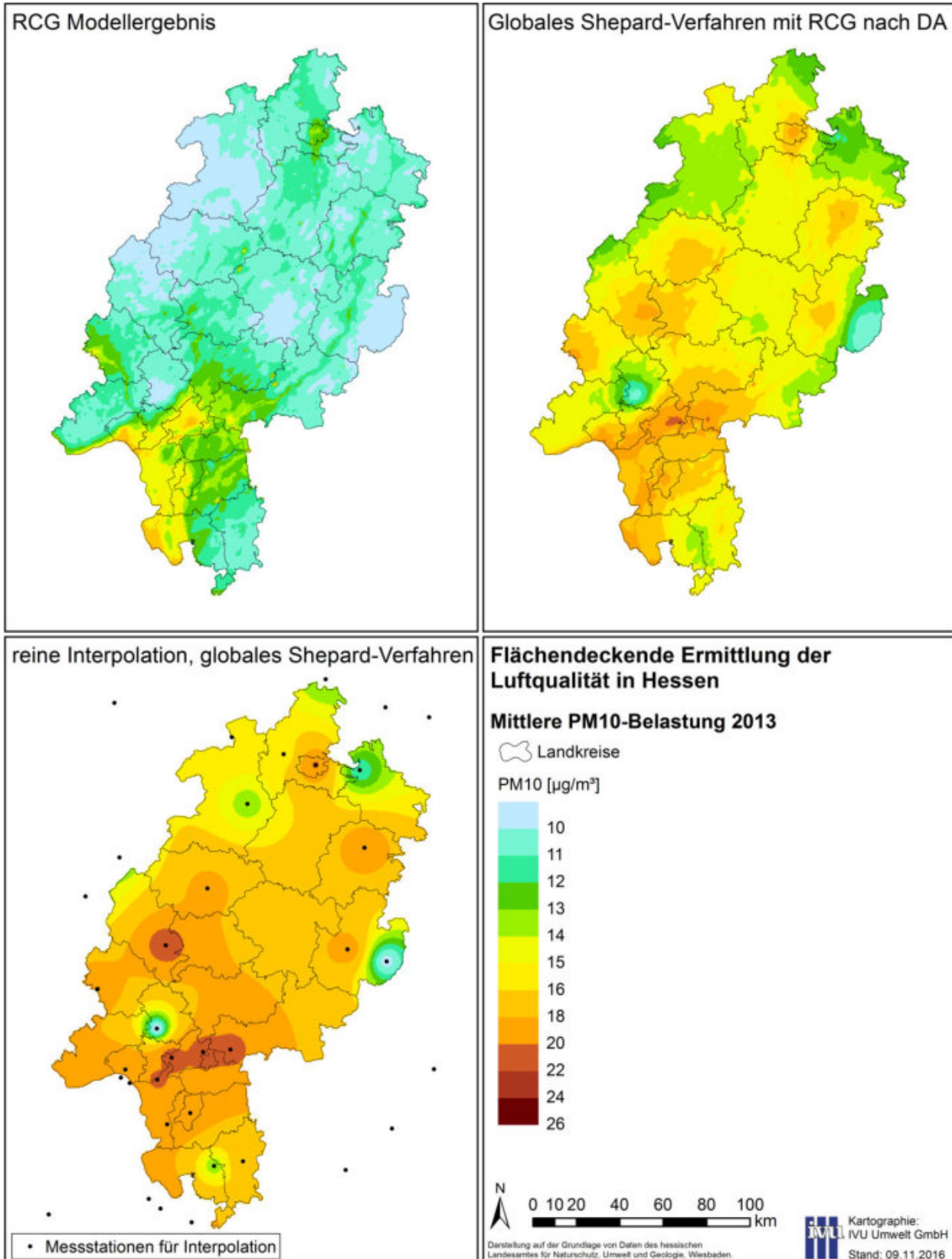


Abbildung 5-7: Mittlere PM10-Belastung 2013: RCG-Modellergebnis, Ergebnis der reinen Interpolation der Messwerte mit Shepard global mit Exponent 2 und Ergebnis der Kopplung der mit Shepard global mit Exponent 2 interpolierten Messwerte mit dem RCG-Modellergebnis nach Datenassimilation (DA)

Abbildung 5-8 zeigt für PM₁₀ die RCG-Modellergebnisse ohne und mit Datenassimilation sowie die Ergebnisse der Kopplung der mit dem globalen Shepard-Verfahren mit Exponent 2 interpolierten Messwerte mit den assimilierten RCG-Modellergebnissen an den Messorten, aufgetragen gegen die Messwerte. Weiterhin ist in Abbildung 5-8 jeweils das Ergebnis der linearen Regression angegeben. Für PM₁₀ ist nicht das Datenqualitätsziel der 39. BImSchV für PM₁₀-Modellergebnisse mit maximal 50 % Unsicherheit angegeben, da dies bei einer aufwendigen Modellierung für Hintergrundstationen, wie sie hier vorliegt, i. d. R. immer erfüllt wird. Stattdessen ist das strengere NO₂-Datenqualitätsziel von 30 % eingezeichnet.

Die reinen RCG-Modellergebnisse an den Messorten weisen für PM₁₀ ein Bestimmtheitsmaß von rund 70 % auf. Dabei werden, wie schon anhand von Abbildung 5-7 dargestellt, die PM₁₀-Messwerte vor allem unterschätzt, und zwar umso mehr, je höher der Messwert ist. Das verschärfte Datenqualitätsziel von 30 % wird von den reinen RCG-Modellergebnissen für PM₁₀ nicht an allen Stationsorten eingehalten. Durch Datenassimilation der RCG-Modellergebnisse steigt das Bestimmtheitsmaß für PM₁₀ auf rund 93 %, das verschärfte Datenqualitätsziel wird von PM₁₀ jetzt an allen Stationen eingehalten, wobei niedrige Messwerte jetzt tendenziell eher überschätzt werden. Die Kopplung der assimilierten RCG-Modellergebnisse mit den interpolierten Messwerten erhöht das Bestimmtheitsmaß auf knapp 97 % für PM₁₀, das verschärfte Datenqualitätsziel wird von PM₁₀ auch bei dieser Vorgehensweise an allen Stationsorten eingehalten. Die Steigung der Regressionsgraden steigt von 0.65 auf 0.78, d. h. das Maß der Über- und Unterschätzung verringert sich deutlich gegenüber den RCG-Modellergebnissen nach Datenassimilation.

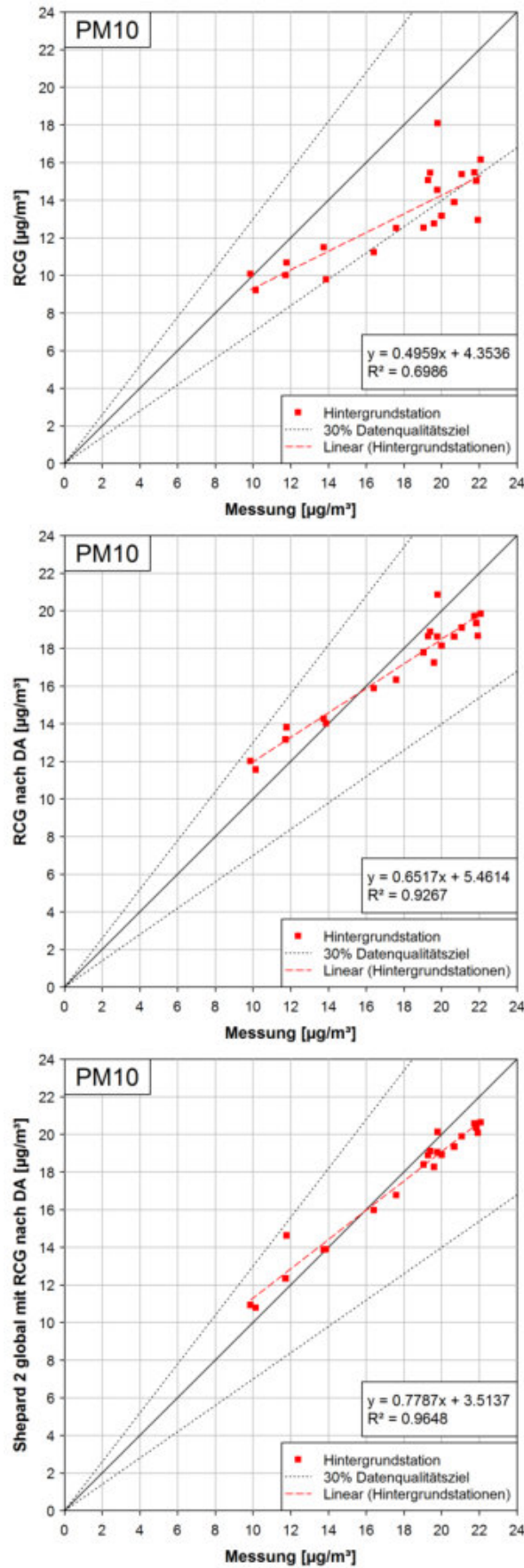


Abbildung 5-8: Regression Modell- bzw. Gesamtergebnis an den Messorten gegen Messwerte für PM10

5.4 Qualitätssicherung gemäß FAIRMODE

FAIRMODE (Forum for air quality modelling in Europe, <http://fairmode.jrc.ec.europa.eu>) ist ein europäisches Forum zur Modellierung der Luftqualität und zum Austausch von Erfahrungen und Ergebnissen von Luftqualitäts-Modellierungen. In FAIRMODE werden u. a. in Arbeitsgruppe 1 (WG1 „Assessment“) Verfahren und Methoden entwickelt, um Modellevaluierungen zu harmonisieren. In diesem Rahmen werden auch Modellqualitätsziele festgelegt und vom Joint Research Centre der EU in Ispra (JRC) in Form des DELTA-Tools (Thunis & Cuvelier, 2016) ein Analysewerkzeug bereitgestellt, mit dem Modellierungen nach diesen Methoden im Vergleich mit Messungen statistisch bewertet werden können.

Die Auswertung der hier erzeugten Modellierungsergebnisse erfolgte mit dem DELTA-Tool Version 5.4 im „Benchmark-Modus“ für die Stoffe NO₂ (Stundenmittelwerte), PM₁₀ (Tagesmittelwerte), PM_{2.5} (Tagesmittelwerte), und Ozon (maximaler gleitender 8-Stundenmittelwert). Im Benchmark-Modus werden zusammenfassende Bewertungen anhand von Gütekriterien für verschiedene statistische Indikatoren erstellt. Diese Gütekriterien sind fest im Tool implementiert und können damit vom Benutzer nicht verändert werden (Thunis & Cuvelier, 2016; FAIRMODE, 2016). Die wichtigsten im Benchmark-Mode verwendeten statistischen Indikatoren sind:

- Mittlerer quadratischer Fehler (RMSE),
- Korrelationskoeffizient (R),
- Normierte Mittlere Abweichung (NMB),
- Normierte mittlere Standardabweichung (NMSD) und
- Zentrierter mittlerer quadratischer Fehler (CRMSE).

Die mathematischen Formulierungen dieser Größen können Thunis et al. (2012), FAIRMODE (2016) und Thunis & Cuvelier (2016) entnommen werden. Die Qualität von Modellergebnissen wird abgeschätzt mit Hilfe eines aggregierenden Modellierungsqualitäts-Indikators („modelling quality indicator“, MQI), der mit einem festgelegten Modellierungsqualitäts-Ziel („modelling quality objective“, MQO) verglichen wird. Zusätzlich werden weitere Modellierungsgüte-Indikatoren („modelling performance indicator“, MPI) und entsprechende Vergleichskriterien („modelling performance criteria“, MPC) definiert und damit die an die Modelle zu stellenden Genauigkeitsanforderungen bezüglich ihres Einsatzes für Fragestellungen in der Luftreinhaltung für die einzelnen statistischen Indikatoren festgelegt. Die MQI und MPI werden in Abhängigkeit von den Messunsicherheiten der einzelnen Schadstoffkomponenten bestimmt, d. h. den Modellergebnissen wird ein Toleranzbereich zugeordnet, der vom Unsicherheitsbereich der Messungen abhängt.

Die Beurteilung der Modellgüte über den MQI wird dann anhand dreier Kategorien vorgenommen:

- $MQI \leq 0.5$. Der Unterschied zwischen Modellergebnissen und Messungen an einer Station ist kleiner als die Messunsicherheit. Die Modellergebnisse liegen damit im Mittel im Bereich der Messunsicherheit und erfüllen das Modellqualitätsziel. Eine Verbesserung der Modellgüte im Sinne einer „besseren“ Abbildung der Messungen ist nicht möglich.
- $0.5 < MQI \leq 1$. Der Unterschied zwischen Modellergebnissen und Messungen an einer Station ist größer als die Messunsicherheit, die Unsicherheitsbereiche von Modellergebnissen und Beobachtungen überdecken sich. Damit ist das Modellergebnis noch in dem geforderten Bereich und erfüllt das Modellqualitätsziel.
- $MQI > 1$. Die Unterschiede zwischen Modellergebnissen und Beobachtungen sind signifikant. Das Modellqualitätsziel ist nicht erreicht.

Der MQI gibt einen allgemeinen Überblick zur Güte einer Modellierung. Die zusätzlichen Parameter ermöglichen eine detailliertere Beurteilung der Güte und zeigen damit mögliche Aspekte einer Verbesserung der Modellierung auf. Die entscheidende Rolle bei allen statistischen Parametern spielt die Definition der Normierungsgröße, also des Unsicherheitsbereichs der Messungen. Für die Ableitung dieses Unsicherheitsbereiches wird auf die o. g. Quellen verwiesen. Die normierte Auswertung der statistischen Parameter wird in den Benchmark-Reports des DELTA-Tools in einem zentralen Diagramm zum MQI und diversen zusammenfassenden Statistiken zu den einzelnen MPI dargestellt.

An dieser Stelle muss betont werden, dass mit den dort entwickelten Methoden nicht ein Modell an sich in seiner Güte bewertet wird, sondern die ganze, konkret in der jeweiligen Untersuchung eingesetzte, Modellierungskette von der Erstellung und Verwendung der meteorologischen Daten über die Emissionen bis hin zur Ausbreitungsmodellierung und ggf. auch Datenassimilation. Dementsprechend wird auch von „modelling quality/performance“ und nicht von „model quality/performance“ gesprochen.

In Abbildung 5-9 bis Abbildung 5-12 werden die Benchmark-Reports für die reinen RCG-Modellergebnisse dargestellt. Der Überblicksparameter MQI ist in der linken oberen Ecke im sogenannten „Target plot“ dargestellt und wird in grün aufgeführt, wenn das Modellierungsqualitätsziel (MQO) erreicht wird. Ebenso wird in der unteren Hälfte des Benchmark-Reports für die weiteren Parameter durch grüne Punkte signalisiert, dass die übrigen Qualitätsziele erreicht sind. Für die genaue Bedeutung und Interpretation der Parameter wird auf FAIRMODE (2016) und Thunis & Cuvelier (2016) verwiesen. Wie den vier Benchmark-Reports entnommen werden kann, werden für die reinen Modellergebnisse (ohne Kombination mit den Messwerten) alle Qualitätsziele für alle mit dem DELTA-Tool im Benchmark-Modus prüfbar Stoffe erreicht.

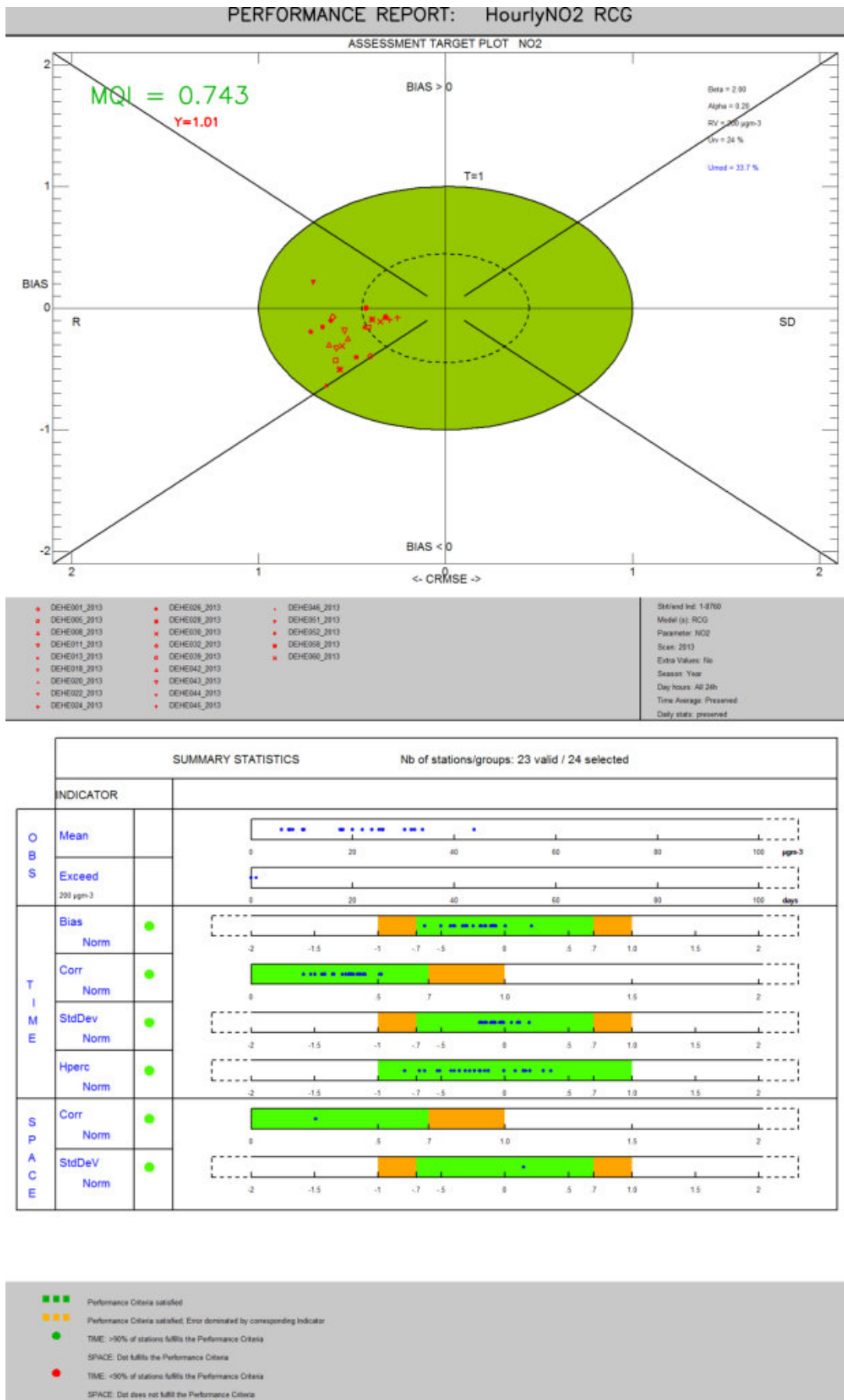


Abbildung 5-9: Benchmark-Report der DELTA-Tool-Auswertung für die reinen RCG-Modellergebnisse für NO₂ 2013

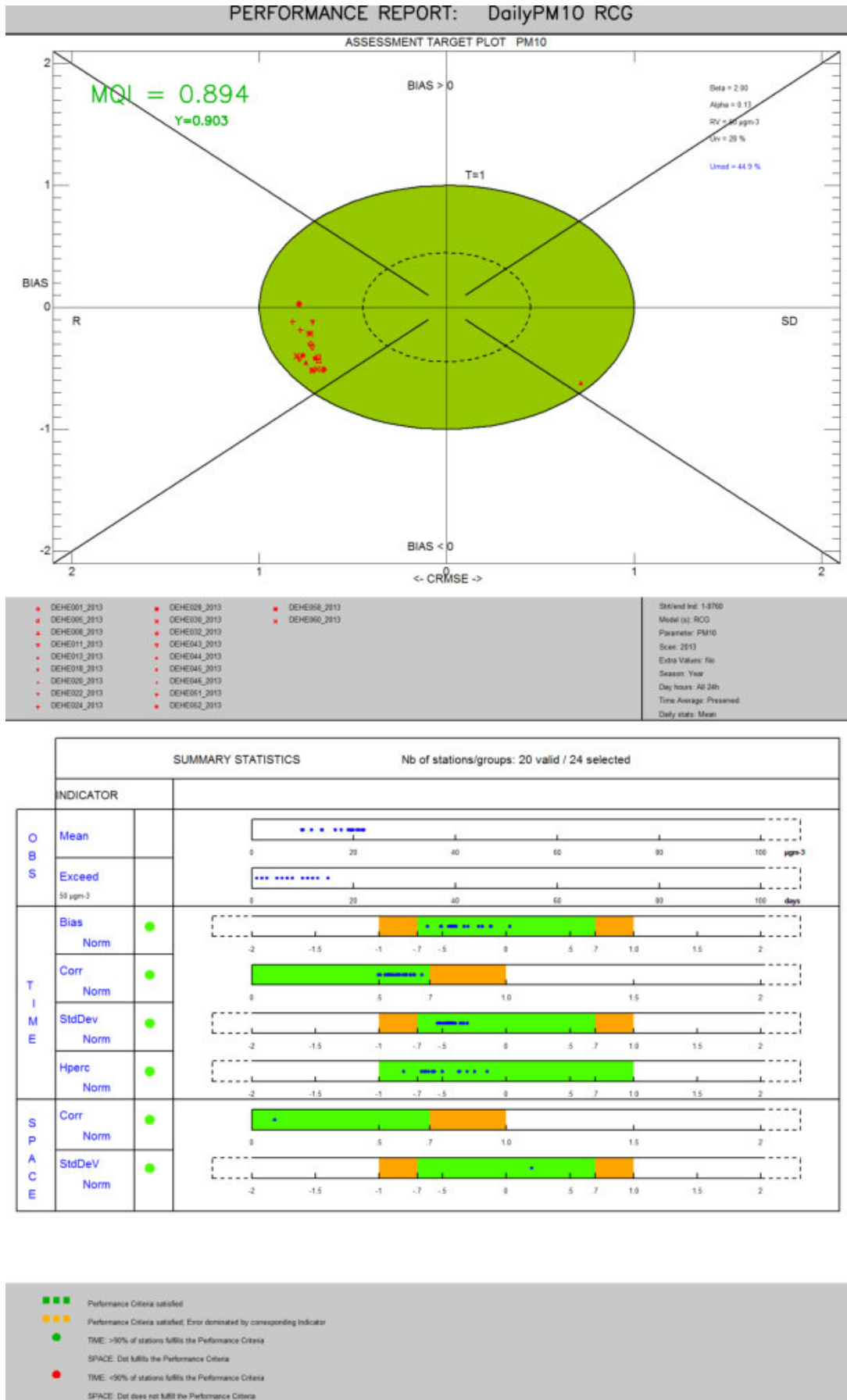


Abbildung 5-10: Benchmark-Report der DELTA-Tool-Auswertung für die reinen RCG-Modellergebnisse für PM10 2013

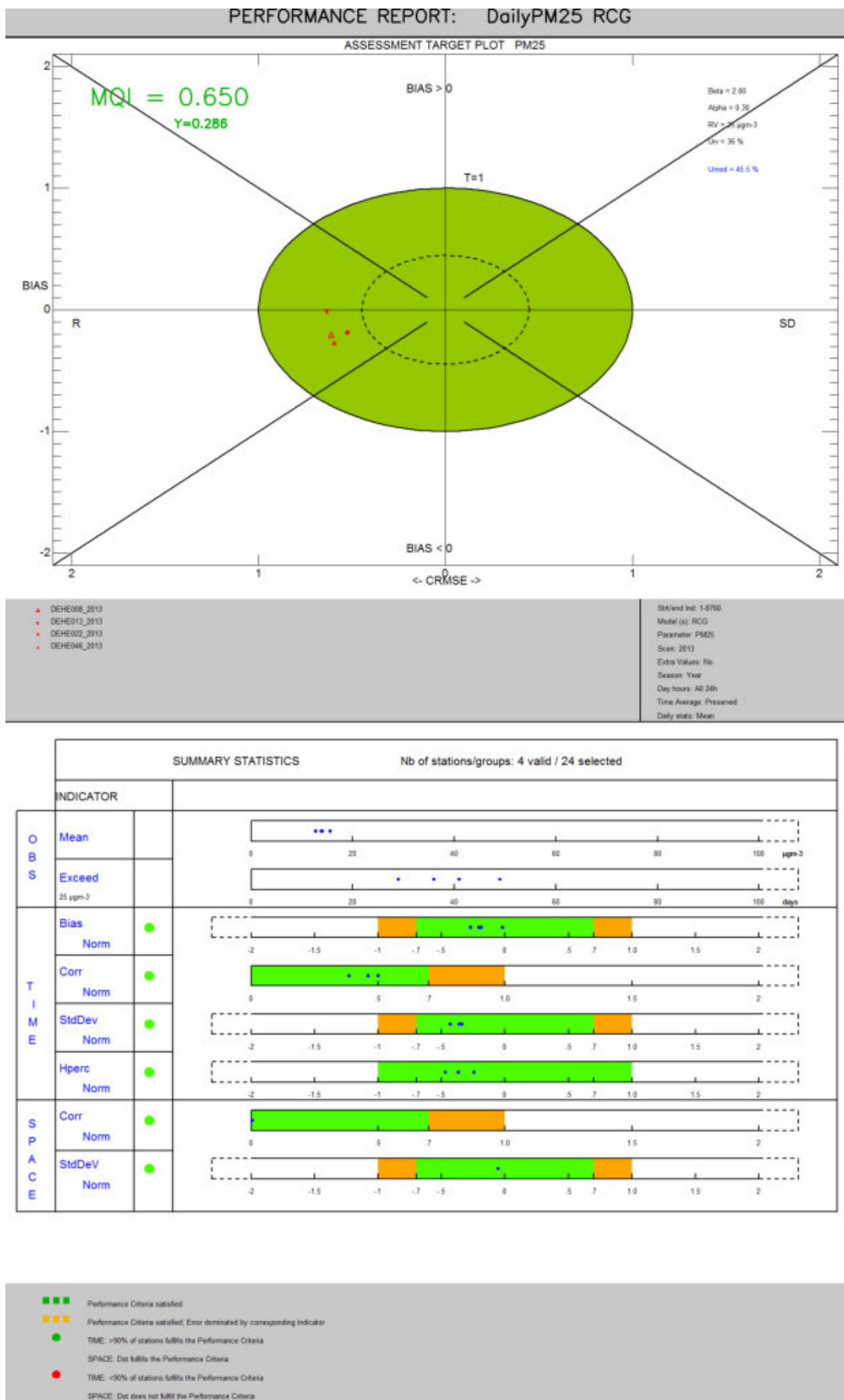


Abbildung 5-11: Benchmark-Report der DELTA-Tool-Auswertung für die reinen RCG-Modellergebnisse für PM2.5 2013

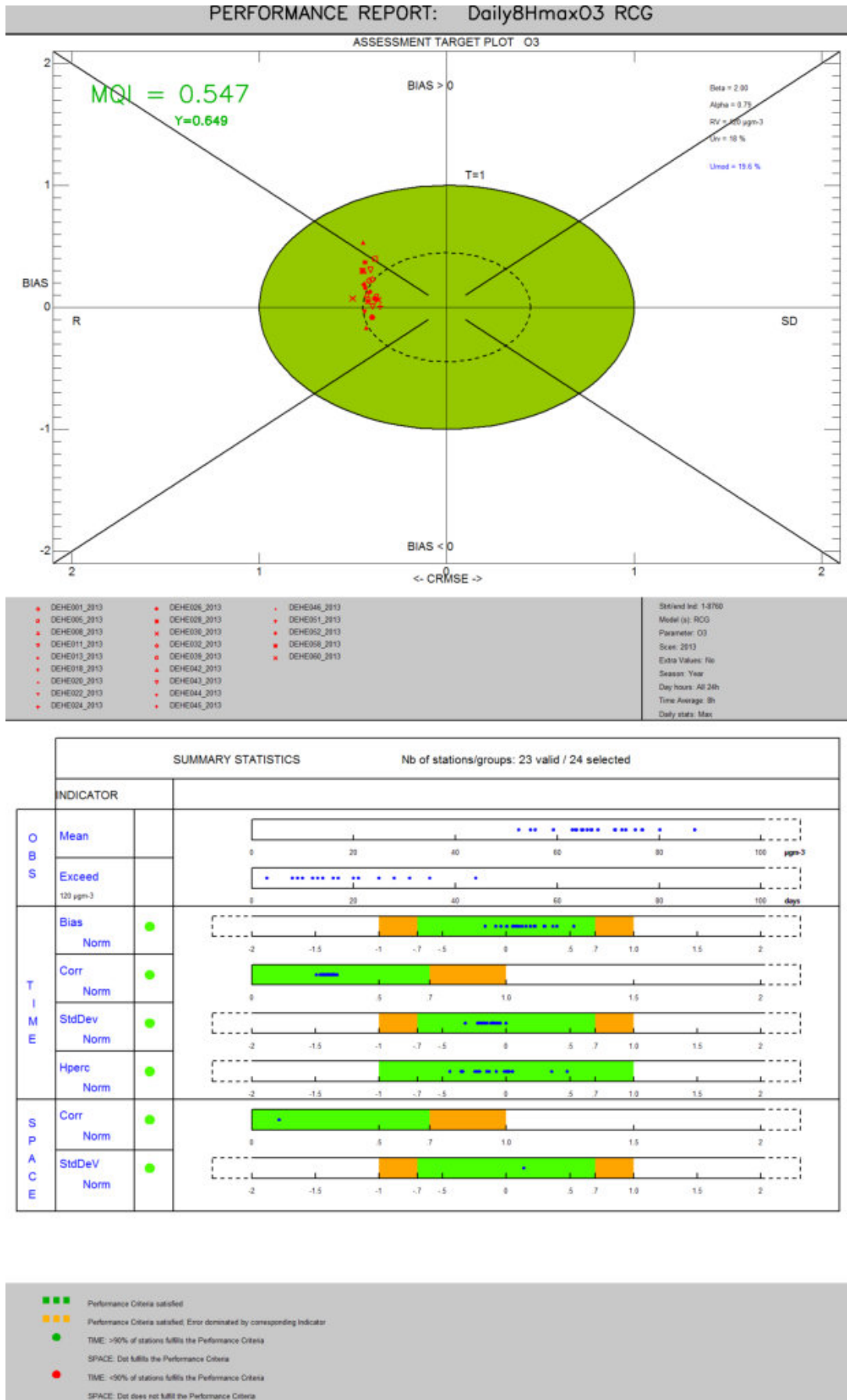


Abbildung 5-12: Benchmark-Report der DELTA-Tool-Auswertung für die reinen RCG-Modellergebnisse für Ozon 2013

In Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-15 werden die die Benchmark-Reports für die hier berechneten mittleren Belastungen (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten entsprechend Abschnitt 5.3) dargestellt⁴. Als Qualitätsprüfung zur grundsätzlichen Eignung ist dies natürlich von geringer Aussagekraft, da an die Messwerte angepasste Modellwerte mit Messwerten verglichen werden.

Der Unterschied in der Erfüllung der Kriterien im Vergleich mit den reinen Modellergebnissen zeigt aber, ergänzend zu den Ausführungen in Abschnitt 5.3.4, nochmals deutlich, dass die hier durchgeführte Kombination mit den Messdaten eine deutliche Qualitätsverbesserung mit sich bringt. Wie diesen drei Benchmark-Reports entnommen werden kann, werden für die Vorbelastungswerte erwartungsgemäß auch alle Qualitätsziele erreicht. Der qualitative Unterschied besteht vor allem in den nun signifikant geringeren Werten für MQI, die nun alle deutlich kleiner als 0.5 sind bzw. darin, dass nun alle Datenpunkte im inneren gestrichelten Oval des „Target plots“ liegen und also die Abweichung zwischen Modellergebnissen und Messungen an allen Stationen kleiner als die Messunsicherheit ist. Die Modellergebnisse liegen damit im Mittel im Bereich der Messunsicherheit und eine Verbesserung der Güte der Modellierung im Sinne einer „besseren“ Abbildung der Messungen ist nicht möglich.

⁴ Für PM_{2.5} gibt es keine Darstellung, weil für diese Komponente keine Ermittlung der mittleren Belastungen mit FLADIS durchgeführt wurde.

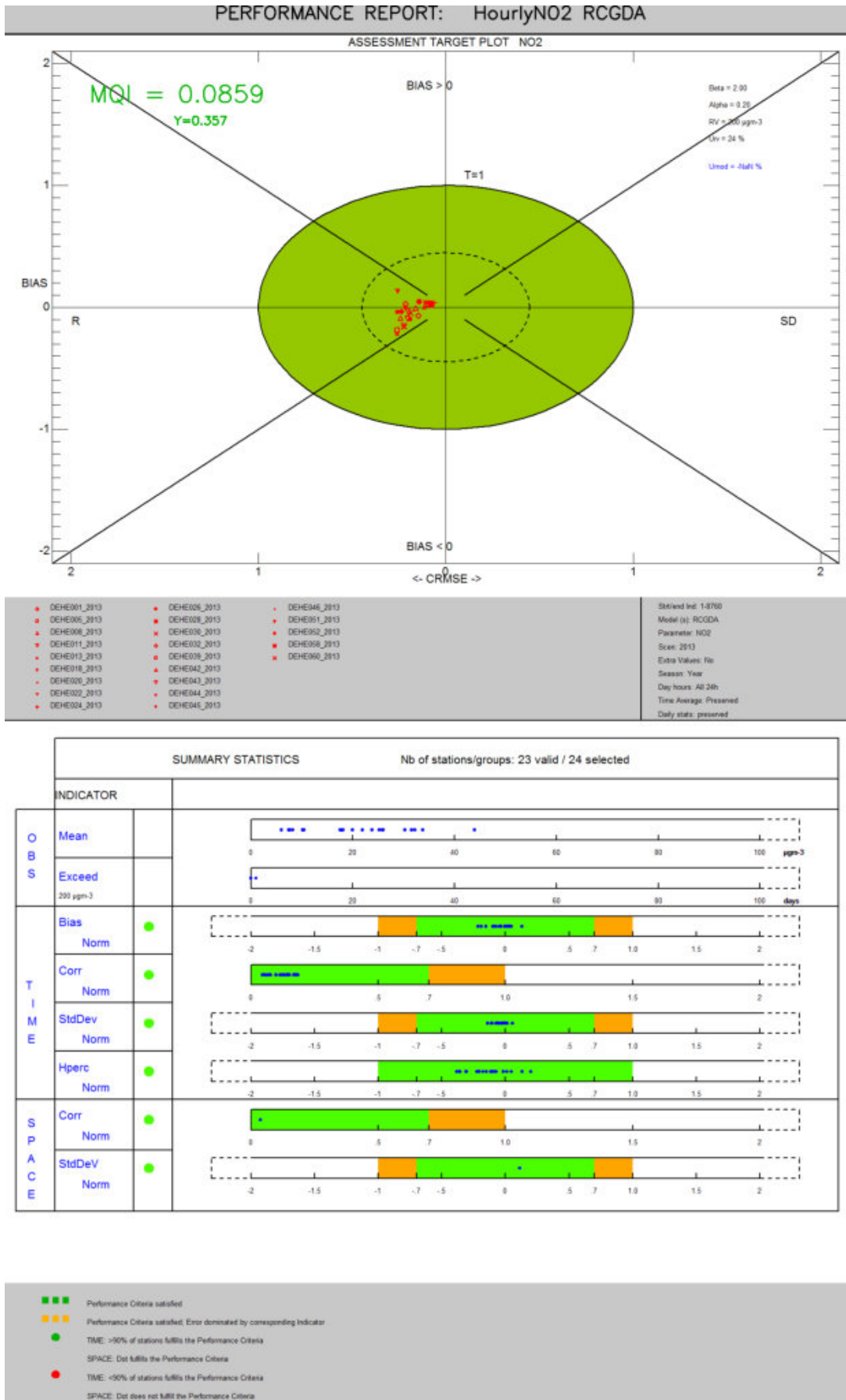


Abbildung 5-13: Benchmark-Report der DELTA-Tool-Auswertung für die mittlere NO₂-Belastung 2013

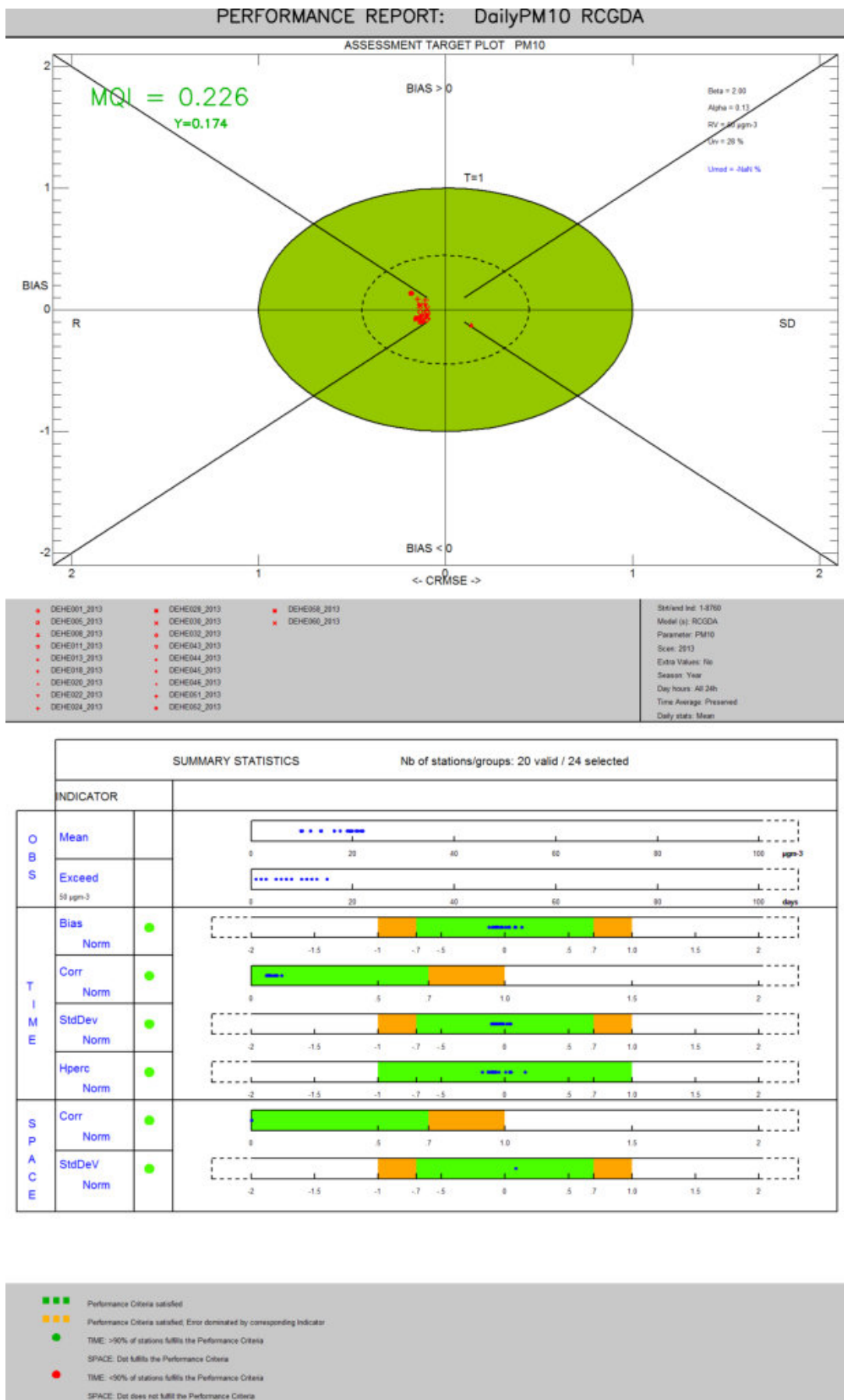


Abbildung 5-14: Benchmark-Report der DELTA-Tool-Auswertung für die mittlere PM10-Belastung 2013

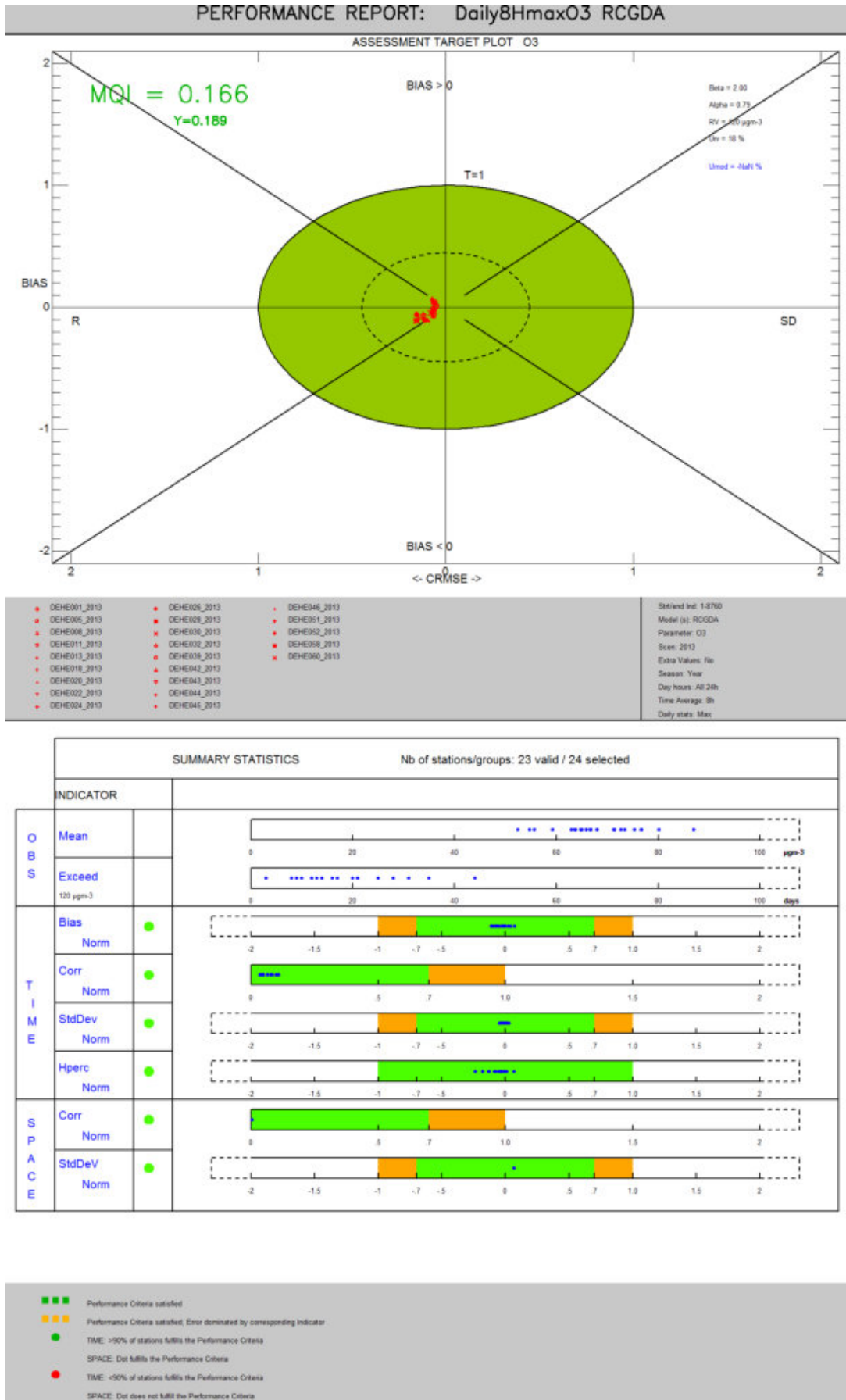


Abbildung 5-15: Benchmark-Report der DELTA-Tool-Auswertung für die mittlere Ozon-Belastung 2013

5.5 Ausbreitungsrechnungen für die Straßenräume

5.5.1 Modellbeschreibung

Mit dem analytisch-empirischen Ausbreitungsmodell CPB (Canyon Plume Box, Yamartino & Wiegand, 1986; IVU 1996a, b; IVU Umwelt, 2011b) können die verkehrsbedingten Luftschadstoffimmissionen in einem Straßenraum berechnet werden. Das Modell beruht auf physikalischen Prinzipien und wurde hinreichend an gemessenen Immissionsdaten überprüft.

CPB kann einen weiten Bereich von Schluchtgeometrien behandeln, wie etwa unterschiedliche Bebauungshöhen auf beiden Seiten. Das Modell besteht im Wesentlichen aus drei Teilen,

- einem Strömungsmodul, das die für den Transport der Schadstoffe im Straßenraum benötigten Windfelder bereitstellt,
- einem empirischen Turbulenzmodul, das die für die turbulente Ausbreitung der Schadstoffe im Straßenraum benötigten Größen bereitstellt und
- einem Ausbreitungsmodul, das aus einem Dispersionsmodell für Anströmung quer zur Straße und einem Modell für straßenparallele Anströmung besteht. Kriterium für das interne Umschalten zwischen beiden Modellen ist die Turbulenzintensität am Boden der Straßenschlucht.

Das Ausbreitungsmodul ist der Kern des CPB-Modells. Es setzt sich aus einer Reihe von Untermodellen zusammen, die die Berücksichtigung von verschiedenen, die Schadstoffdispersion beeinflussenden Mechanismen erlauben.

Diese Mechanismen sind

- anfängliche, fahrzeuginduzierte Durchmischung,
- Dispersion der Schadstoffwolke entlang des Wirbels,
- Rezirkulation der Schadstoffe,
- Frischlufteinfall nahe der Luvwand zur Berücksichtigung der advektiven Belüftung des Straßenraums,
- Korrekturen für Diffusion mit dem Wind,
- Reflektion der Schadstoffe an den Schluchtwänden und
- Mäandern der Windrichtung.

CPB ist ein Straßenraum-Ausbreitungsmodell, das umfangreich validiert wurde und in der Implementierung IMMIS^{cpb} z. B. auch in IVU Umwelt (2011a, b) zum Einsatz kam. Es enthält mehrere Photochemie-Module, die es erlauben, NO₂-Immissionen zu berechnen.

Die Emissionen des Straßenverkehrs wurden in stündlicher Auflösung mit dem Modell IMMIS^{em,h} Version 6 (IVU Umwelt, 2016) berechnet. Das Modell basiert auf dem „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs Version 3.2 (HBEFA) des Umweltbundesamts (INFRAS, 2014). Es berechnet auf Basis einer intern modellierten oder vorgegebenen Verkehrsqualität Emissionen des fahrenden Verkehrs, Zuschläge für Kalt- und Kühlstart sowie zusätzlich die nicht-motorbedingten PM₁₀-Emissionen (s. Abschnitt 4.5.4).

5.5.2 NO₂-Gesamtbelastung

Die Ermittlung der Gesamtbelastung von NO₂ im quellnahen Bereich ist modelltechnisch schwierig, denn NO₂ ist ein chemisch reaktiver Stoff, der in der Atmosphäre einer Reihe von Reaktionen mit unterschiedlichen Stoffen unterliegt. Die NO₂-Konzentration in der Straßenschlucht setzt sich zusammen aus der NO₂-Vorbelastung, dem durch den Kfz-Verkehr direkt emittierten NO₂ und dem durch chemische Umwandlungen produzierten oder eliminierten NO₂. Die chemischen Reaktionen, an denen NO₂ beteiligt ist, unterscheiden sich dabei in ihrer Geschwindigkeit und ihrer Komplexität (IVU Umwelt, 2011b; KRdL, 2015).

Die für mikroskalige Modellierung eingesetzten Modelle berechnen in der Regel die Ausbreitung von NO_x und nicht von NO₂. Dies ist u. a. darin begründet, dass Abbildung der Komplexität der gesamten photochemischen Prozesse im Straßenraum, insbesondere im Hinblick einer operationellen Modellierung, nicht wirklich erforderlich ist, da der NO-NO₂-Ozon-Zyklus sehr schnell abläuft. Die Ermittlung der NO₂-Belastung erfolgt für diese Modelle daher üblicherweise im Nachgang zur Ausbreitungsmodellierung auf Basis der berechneten NO_x-Werte und einer diesen photochemischen Zyklus beschreibenden Parametrisierung. Im hier vorliegenden Projekt wird dazu der Ansatz nach Hertel & Berkowicz (1989) verwendet.

Eingangsdaten für die NO₂-Berechnung in stündlicher Auflösung nach diesem Ansatz sind stündliche Werte der berechneten NO_x-Zusatzbelastung, der Überdach- bzw. Hintergrundkonzentrationen von NO, NO₂ und Ozon, der NO₂-Zusatzbelastung, die sich aus den NO₂-Direktemissionen des Kfz-Verkehrs ergibt, der Überdach-Windgeschwindigkeit, der Temperatur sowie der Globalstrahlung. All diese Eingangsdaten stehen in stündlicher Auflösung für jede betrachtete Straßenschlucht aus den modellierten Meteorologiefeldern, den RCG-Ausbreitungsrechnungen bzw. der daraus abgeleiteten Vorbelastung, der stündlichen Emissionsmodellierung mit IMMIS^{em} und der CPB-Ausbreitungsrechnung zur Verfügung. Als Ergebnis werden stündliche Werte der NO₂-Gesamtbelastung berechnet, die zu Jahresmittelwerten aggregiert werden.

5.5.3 Überschreitungshäufigkeit des PM₁₀-Tagesgrenzwerts

Zur Bestimmung der Anzahl an Tagen mit Überschreitungen des ab 2005 gültigen Tagesgrenzwerts von PM₁₀ wird in IVU Umwelt (2006) ein Ansatz auf der Basis des Jahresmittelwerts von PM₁₀ aufgezeigt. Eine Darstellung dieser Funktion findet sich in Abbildung 5-16. Bei einem Jahresmittelwert von 30 µg/m³ wird der Grenzwert von 35 Überschreitungen im Jahr erreicht. Eine Minderung des Jahresmittelwerts im Bereich von 30 µg/m³ um 1 µg/m³ führt zu einer Reduktion um 3 bis 4 Überschreitungstage. Eine Reduktion von 30 µg/m³ auf 28 µg/m³ führt zu einer Reduktion um ca. 7 Überschreitungstage.

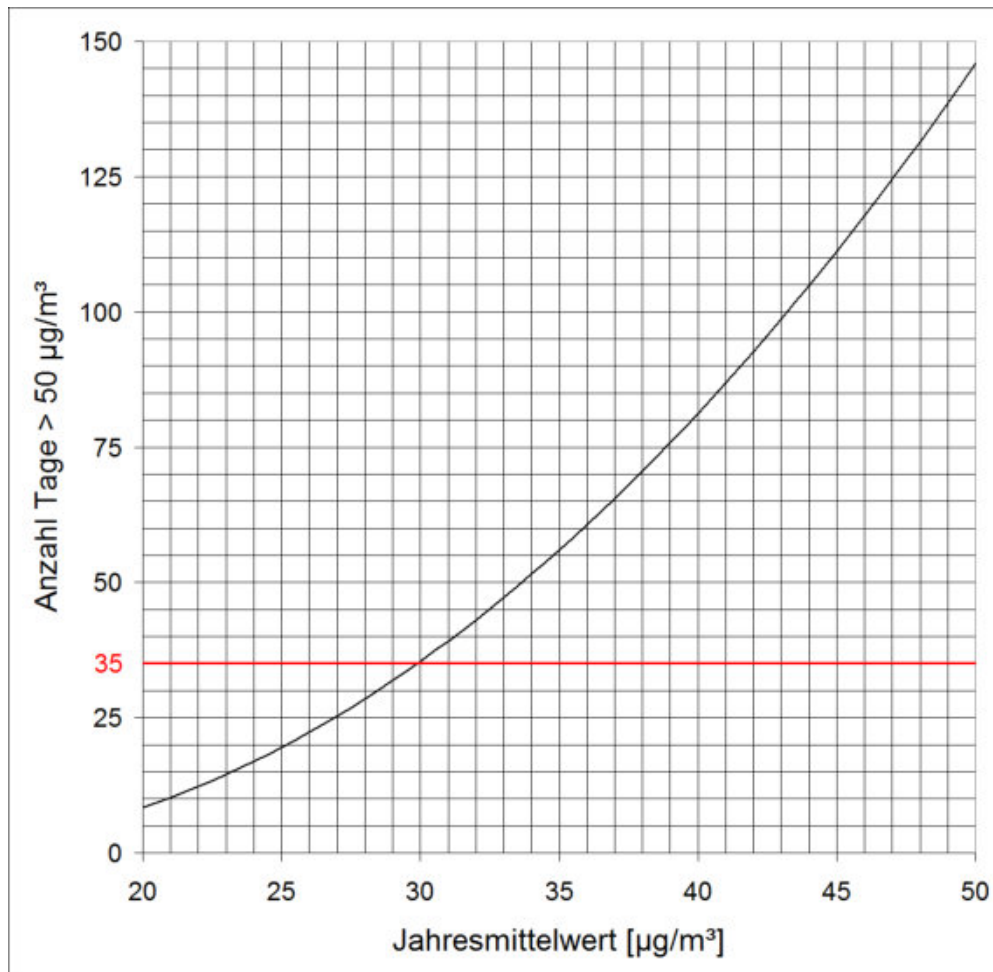


Abbildung 5-16: Statistischer Zusammenhang zwischen dem Jahresmittelwert von PM10 und der Anzahl Tage mit einem PM10-Tagesmittelwert über 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

5.5.4 Anwendung

Für die Berechnung der Immissionsbelastung an den 64 Aufpunkten in den Straßenräumen wurde IMMIS^{cpb} angewendet. Die Vorbelastungen (Überdach-Konzentrationen) der Stoffe PM₁₀, NO, NO₂ und Ozon sowie die benötigten meteorologischen Eingangsdaten wurden in stündlicher Auflösung aus den Ergebnissen des RCG-Modells bzw. der daraus abgeleiteten Vorbelastung und den meteorologischen Feldern entnommen. Dabei wurden für jeden Straßenabschnitt die Werte der Gitterzelle angesetzt, in der der jeweilige Abschnittsmittelpunkt liegt.

Die Berechnungen mit IMMIS^{cpb} basieren auf den vom HLNUG bereitgestellten Eingangsdaten entsprechend Tabelle 4-1. Für einige Abschnitte lagen fahrtrichtungsbezogene Verkehrsdaten vor, die in IMMIS^{cpb} berücksichtigt werden können. Diese Differenzierung ist in Tabelle 5-4 und Tabelle 5-5, die die Tabelle 4-1 ergänzen, aufgeführt. Dabei ist bei allen richtungsgetrenten Parametern mit „1“ jeweils die Fahrtrichtung entsprechend der Straßenabschnittsdefinition aus Tabelle 4-1 bezeichnet und mit „2“ die Gegenrichtung. Bei Abschnitten, wo die Spalte „2“ keine Werte enthält, handelt es sich entweder um eine Einbahnstraße, oder es lagen querschnittsbezogene Daten vor. Alle Verkehrsbelastungen wurden gleichmäßig auf die Spuren der jeweiligen Fahrtrichtung bzw. des Querschnitts verteilt.

Die Höhen der Randbebauung und der Abstand der Randbebauung wurde teilweise vom Auftraggeber bereitgestellt. Anhand von Luftbildauswertungen und unter Verwendung des bereitgestellten Gebäudemodells wurden die Werte geprüft und gegebenenfalls angepasst sowie fehlende Werte ergänzt. Die Lage der einzelnen Fahrspuren wurde über Luftbildauswertungen festgelegt und ist in den Spalten „Spurx“ dokumentiert, wobei jeweils der Abstand der Spurmittle von der Bebauung in Fahrtrichtung links und die Spurbreite angegeben ist.

Die Emissionen für die 64 betrachteten Straßenabschnitte wurde auf Basis des aktuellen Handbuchs für Emissionsfaktoren 3.2 (HBEFA; INFRAS, 2014) mit dem stündlichen Emissionsmodell IMMIS^{em,h} (IVU Umwelt, 2016 und Abschnitt 4.5.4) für das Bezugsjahr 2013 als spurfeine Zeitreihen ermittelt.

Die wichtige Eingangsgröße der Verkehrsqualität in Form der Aufteilung der Fahrzeuge auf die vier Verkehrsqualitätsstufen LOS 1 - 4 des HBEFA erfolgte in der Regel mit dem Kapazitätsmodell von IMMIS^{em,h}. Aktuelle Untersuchungen, z. B. IVU Umwelt (2014b) oder Rauterberg-Wulff et al. (2015), zeigen, dass insbesondere im innerstädtischen Bereich die Verkehrsqualitätsermittlung über Standard-Kapazitäten im Zusammenspiel mit der im HBEFA hinterlegten Verkehrsqualität „LOS 4“ Kapazitätsengpässe und insbesondere die Situation in Aufstellbereichen von Ampeln bezüglich der Störung des Verkehrsablaufs und in der Konsequenz bezüglich des Emissionsniveaus unterschätzt. Es gibt dabei auch Hinweise, dass sogar eine Erweiterung der HBEFA-Systematik um ein „LOS 5“ erforderlich ist, um Stausituationen korrekt abzubilden. Eine detaillierte Ermittlung der Verkehrsqualitäten erfordert jedoch einen großen Aufwand, der den Rahmen des vorliegenden Projekts gesprengt hätte. Um dem geschilderten Sachverhalt etwas Rechnung zu tragen, wurden die Standardkapazitäten für das Staumodell um 12.5% reduziert. Zusätzlich wurde im Aufstellbereich von Ampeln bei den folgenden Straßenabschnitten nach einer Plausibilitätsprüfung die Kapazitäten um weitere 12.5% reduziert:

- Offenbach Bieberer Straße West,
- Offenbach Mainstraße Ost,

- Offenbach Untere Grenzstraße,
- Wiesbaden Schiersteinerstraße,
- Fulda Petersberger Straße,
- Limburg Frankfurter Straße,
- Limburg Schiede (Schiede I, südl.),
- Limburg Schiede (Schiede II, nördl) und
- Gießen Westanlage.

Für sechs der sieben hier betrachteten Straßenabschnitte in Darmstadt wurden in IVU Umwelt (2014b) detailliert Verkehrsqualitäten ermittelt, die hier direkt übernommen wurden. Schließlich wurde entsprechend IVU Umwelt (2011a) in der Universitätsstraße in Marburg aufgrund der Bushaltestellen bei der Verkehrsqualität 30% auf LOS 4 und in der Mauerstraße in Kassel aufgrund der dortigen Bus- und Haltestellensituation je 50% auf LOS 3 und 4 gesetzt.

Für jeden Abschnitt wurden auf Basis der stündlichen Emissionen die Zeitreihen der Konzentrationen an je einem Rezeptorpunkt auf jeder Straßenseite berechnet. Für die Auswertung wurde jeweils der höhere Jahresmittelwert der beiden Zeitreihen verwendet. Die Lage der Rezeptoren wurde so festgelegt, dass sie beiderseits der Fahrbahn einen Abstand von einem 1 m zum Fahrbahnrand aufweisen. Damit ist näherungsweise die Mitte des Gehweges repräsentiert. Lagen zwischen Gehweg und Fahrbahn noch Parkflächen, Radwege oder andere Flächen, so wurde dies bei der Berechnung der Rezeptorposition entsprechend berücksichtigt. Die Position der Rezeptoren ist in den Spalten „Rez1“ und „Rez2“ dokumentiert. Für Abschnitte, in denen eine Messstation oder ein Passivsammler vorhanden ist (siehe Abschnitt 6.2.1), wurde für die entsprechende Position ein dritter Rezeptor gemäß der Spalte „Rez3“ als Berechnungspunkt definiert und für den Vergleich mit Messwerten und als Auswertepunkt für den Abschnitt herangezogen.

Tabelle 5-4: Parameter der 64 Straßenabschnitte. Näheres siehe Text.

ID Stadt	Straße	DTV	Spuren	Verkehrssituation	Tempolimit	Längsneigung	Einbahn	Höhe links	Höhe rechts	Breite	Porosität	Ausrichtung
Ballungsraum Rhein-Main												
1	Bleichstr.	17'780	4	HVS	50	0.8	ja	12.0	12.0	25.0	17	78
2	Heidelberger Str.	17'720	4	HVS	50	-0.5	-	17.5	14.0	22.0	24	3
3	Heinrichstr.	24'150	3	HVS	50	4.1	-	12.0	13.0	26.0	32	78
4	Darmstadt Hügelstr.	24'655	3	HVS	50	1.5	ja	15.5	17.5	15.0	19	79
5	Kasinostr.	31'332	6	HVS	50	0	-	18.5	22.0	23.0	27	169
6	Nieder-Ramstädter Str.	21'573	4	HVS	50	2	-	16.5	15.0	20.5	10	147
7	Rhoenring	23'260	2	HVS	50	1.8	-	19.0	19.5	33.0	37	109
8	Adolf-Haeuser-Str.	6'685	2	HVS	50	0.3	-	22.0	22.0	12.0	50	67
9	Alte Falterstr.	4'490	1	HVS	50	0	ja	14.0	10.5	13.5	10	2
10	Bleichstr.	20'003	4	HVS	50	0	ja	22.0	26.5	21.5	27	128
11	Bockenheimer Landstr.	24'000	4	HVS	50	0	-	25.0	26.0	37.0	26	95
12	Eschersheimer Landstr. I	29'789	5	HVS	50	0	-	30.0	24.0	25.0	10	157
13	Eschersheimer Landstr. II	18'314	4	HVS	50	0.6	-	12.5	15.5	30.5	18	145
14	Friedberger Landstr.	25'798	4	HVS	50	0	-	20.5	21.5	27.0	30	1
15	Hochstr.	16'389	3	HVS	50	0	ja	22.0	21.0	14.5	10	50
16	Höhenstr.	27'358	4	HVS	50	0	-	19.0	20.0	21.5	26	144
17	Königsteiner Str.	9'460	2	HVS	50	0	-	16.5	16.0	22.0	14	144
18	Lorscher Str.	12'951	2	HVS	50	0	-	16.0	16.0	17.0	10	137
19	Mainzer Landstr.	40'583	4	HVS	50	0	-	26.5	30.0	30.0	23	59
20	Offenbacher Landstr.	9'959	2	HVS	50	0	-	14.0	14.0	18.0	10	78
21	Schweizerstr.	15'222	4	HVS	50	0	-	21.0	26.0	26.0	23	151
22	Sindlinger Bahnstr.	6'017	2	HVS	50	0	-	10.0	10.0	13.0	21	164
23	Taunusstr.	9'558	3	HVS	50	0	ja	29.0	25.5	20.0	10	61
24	B 45 Hanauer Vorstadt	12'980	2	HVS	50	0.5	ja	14.5	15.0	13.0	10	166
25	Barbarossastr.	17'700	3	HVS	50	0.2	-	12.0	12.0	23.0	22	26
26	B 45 Nussallee	25'960	4	HVS	50	0	-	20.5	16.5	45.0	33	44
27	L 3209 Lamboystr.	37'760	5	HVS	50	0	-	20.0	17.5	27.0	10	79
28	Hofheim Elisabethenstr.	10'000	2	HVS	50	6	-	13.5	10.0	10.5	23	24
29	Mörf.-Wld. Westendstr.	8'400	2	ES	40	0	-	10.0	10.0	9.0	39	47
30	N.-Isenbg. Frankfurter Str.	16'150	2	HVS	50	1	-	13.0	13.5	19.0	17	0
31	Bieberer Str. West	9'195	2	HVS	50	0	-	16.5	15.5	15.0	20	116
32	Mainstr. Ost	20'368	3	HVS	50	0	-	17.5	17.5	15.0	50	77
33	Untere Grenzstr.	27'204	4	HVS	50	0	-	12.0	15.0	30.0	24	169
34	Waldstr.	19'385	4	HVS	50	0	-	15.0	15.0	31.5	10	159
35	Rüsselslh. Rugbyring	28'654	4	HVS	50	0	-	9.0	10.5	40.0	54	177
36	Wiesbaden Kaiser-Friedrich-Ring	35'700	6	HVS	50	0	-	25.5	25.0	41.0	27	116
37	Schliersteinerstr.	26'400	5	HVS	50	0	-	25.0	25.0	34.0	26	35

DTV in [Kfz/d], Längsneigung in [%], Höhe und Breite in [m], Porosität in [%], Ausrichtung in [°], Verkehrssituationen: Hauptverkehrsstraße (HVS), Erschließungsstraße (ES). Höhe ist die Gebäudehöhe links und rechts des Straßenabschnitts, Breite der Abstand zwischen den Gebäudefronten, Porosität der Baulückenanteil des Straßenabschnitts.

Fortsetzung auf nächster Seite

ID Stadt	Straße	DTV	Spuren	Verkehrssituation	Tempolimit	Längsneigung	Einbahn	Höhe links	Höhe rechts	Breite	Porosität	Ausrichtung
Mittel- und Nordhessen												
38	Frankfurter Str.	17'000	2	HVS	50	0	-	12.0	13.0	24.0	38	0
39	Leipziger Str.	16'800	4	HVS	50	0	-	15.5	19.0	23.5	10	48
40	Niesiger Str.	10'400	2	HVS	50	0	-	15.0	10.5	23.0	42	12
41	Petersberger Str.	22'100	4	HVS	50	0	-	22.0	18.0	21.0	10	91
42	Diezer Str.	21'630	2	HVS	50	0	-	14.0	14.0	22.0	24	56
43	Frankfurter Str.	19'219	4	HVS	50	4	-	10.5	10.5	18.0	32	145
44	Schiede I (südlich)	34'417	5	HVS	50	0	-	14.0	14.0	23.0	10	138
45	Schiede II (nördlich)	27'951	4	HVS	50	0	-	16.0	17.0	27.0	29	7
46	Stephanshügel	6'069	2	HVS	50	0	-	6.8	13.5	8.0	17	64
47	Am Grün	6'735	1	HVS	50	1	ja	14.5	13.5	8.0	21	6
48	Elisabethstr.	10'827	2	HVS	50	-1	ja	18.0	18.5	14.0	10	156
49	Universitätsstr.	14'559	4	HVS	50	1	-	17.0	17.0	20.5	10	77
Lahn-Dill												
50	Grünberger Str.	23'700	5	HVS	50	0	-	13.5	13.5	24.0	10	73
51	Neustadt	10'100	2	HVS	50	0	-	20.0	15.0	12.0	10	119
52	Südanlage	25'200	5	HVS	50	0	-	23.5	15.5	24.0	10	104
53	Westanlage	26'900	4	HVS	50	0	-	18.0	21.5	21.0	23	146
54	Ernst-Leitz-Str.	20'455	3	HVS	50	0	-	27.5	36.5	38.0	10	78
55	Hermannsteiner Str.	18'675	2	HVS	50	0	-	12.0	13.0	17.0	10	134
56	Karl-Kellner-Ring	25'536	4	HVS	50	0	-	13.5	12.0	24.0	10	18
Ballungsraum Kassel												
57	Brüderstr.	43'900	6	HVS	50	-3	-	15.5	22.5	28.0	30	56
58	Frankfurter Str.	27'100	4	HVS	50	-1	-	16.0	19.0	32.0	10	21
59	Fünfensterstr.	16'400	4	HVS	50	-1	-	20.0	30.0	31.0	10	136
60	Holländische Str.	29'900	5	HVS	50	-1	-	18.0	19.5	30.0	10	137
61	Leipziger Str.	17'000	2	HVS	50	0	-	10.5	12.0	27.0	10	116
62	Mauerstr.	750	2	HVS	50	-2.2	-	25.0	19.0	15.0	10	40
63	Schönfelder Str.	22'900	2	HVS	50	4	-	20.5	20.5	18.0	23	176
64	Wolfhager Str.	14'900	2	HVS	50	-2	-	13.5	14.5	15.0	23	114

DTV in [Kfz/d], Längsneigung in [°], Höhe und Breite in [m], Porosität in [%], Ausrichtung in [°], Verkehrssituationen: Hauptverkehrsstraße (HVS), Erschließungsstraße (ES). Höhe ist die Gebäudehöhe links und rechts des Straßenabschnitts, Breite der Abstand zwischen den Gebäudefronten, Porosität der Baulückenteil des Straßenabschnitts.

Tabelle 5-5: Weitere Parameter der 64 Straßenabschnitte. Näheres siehe Text.

ID	Stadt	Straße	DTV		Slkw		Ltkw	Bus	Krad	Spuren		Spurlage (Abstand von Bebauung in Fahrtrichtung links; Breite)						Rezeptoren (Abstand; Höhe)		
			1	2	1	2				1	2	Spur1	Spur2	Spur3	Spur4	Spur5	Spur6	Rez1	Rez2	Rez3
Ballungsraum Rhein-Main																				
1		Bleichstr.	17780	-	4.3	10.0	1.0	1.0	1.0	4	0	12.4; 2.8	15.2; 2.8	18; 2.8	20.8; 2.8	23.2; 2	5; 2	23.2; 2		
2		Heidelberger Str.	17720	-	1.8	5.0	1.0	1.0	1.0	2	2	5.5; 3	8.5; 3	13.5; 3	16.5; 3	1; 2	1; 2	21; 2		
3		Heinrichstr.	24150	-	1.1	3.0	1.0	1.0	1.0	2	2	10.5; 3	13.5; 3	16.5; 3	19; 2	7; 2	7; 2	19; 2		
4	Darmstadt	Hügelstr.	24655	-	2.4	4.0	0.3	1.6	3	0	4; 3	7; 3	10; 3	13; 3	16; 3	1; 2	1.5; 2	13.5; 2	12.5; 2	
5		Kasinostr.	31332	-	1.8	3.0	1.0	1.0	1.0	2	4	4; 3	7; 3	10; 3	13; 3	0.75; 2	0.75; 2	21.5; 2		
6		Nieder-Ramstadter Str.	21573	-	1.6	2.4	1.1	1.1	1.0	2	2	4; 3	7; 3	10; 3	13; 3	1.5; 2	1.5; 2	19; 2		
7		Rhoer-Ring	23260	-	2.1	5.6	1.0	6.1	1	1	2	4; 3	7; 3	10; 3	13; 3	9.5; 2	9.5; 2	25; 2		
8		Adolf-Haueuser-Str.	6585	-	1.4	5.3	7.4	1.0	1.0	1	1	4.25; 3.5	7.75; 3.5			1.5; 2	1.5; 2	10.5; 2	1.5; 2	
9		Alte Falterstr.	4490	-	1.2	5.9	2.3	1.0	1.0	1	0	6.75; 4.5				1.5; 2	1.5; 2	12; 2		
10		Bleichstr.	20003	-	2.0	1.3	0.7	1.0	1.0	4	0	6.25; 3	9.25; 3	12.25; 3	15.25; 3	2.75; 2	2.75; 2	18.75; 2		
11		Bockenheim Landstr.	12505	11495	1.4	1.6	3.0	2.4	1.0	2	2	11.5; 3	14.5; 3	17.5; 3	20.5; 3	9; 2	9; 2	23; 2		
12		Eschersheimer Landstr. I	12805	16984	1.5	1.2	3.4	0.2	1.0	2	3	7.25; 3	10.25; 3	13.25; 3	16.25; 3	2.25; 2	2.25; 2	24.13; 2		
13		Eschersheimer Landstr. II	18314	-	1.2	4.4	0.1	1.0	1.0	2	2	5.5; 3	8.5; 3	11.5; 3	14.5; 3	1; 2	1; 2	29.5; 2		
14		Friedberger Landstr.	15107	10691	1.0	1.2	3.0	0.6	1.4	2	2	9; 3	12; 3	15; 3	18; 3	4; 2	4; 2	25.5; 2	21; 2	
15		Hochstr.	16389	-	2.2	3.2	0.1	1.0	1.0	3	0	4.5; 3	7.5; 3	10.5; 3	13; 2	2; 2	2; 2	13; 2		
16	Frankfurt	Höhenstr.	16548	10810	1.6	2.0	3.0	0.8	1.0	2	2	6.5; 3	9.5; 3	12.5; 3	15.5; 3	1; 2	1; 2	20.75; 2		
17		Königsteiner Str.	5850	3610	1.8	0.7	3.0	2.1	1.0	1	1	9; 4	13; 4	17; 4	21; 3	1.5; 2	1.5; 2	20.5; 2		
18		Lorscher Str.	5454	7497	1.5	0.7	3.1	0.0	1.0	1	1	6.75; 3.5	10.25; 3.5	13.75; 3.5	17.25; 3.5	1.5; 2	1.5; 2	20.5; 2		
19		Mainzer Landstr.	25180	15403	1.6	1.6	1.2	0.1	1.0	2	2	9; 3	12; 3	15; 3	18; 3	3.8; 2	3.8; 2	26.2; 2		
20		Offenbacher Landstr.	5097	4862	1.0	0.9	5.5	0.5	1.0	1	1	7.5; 3	10.5; 3	13.5; 3	16.5; 3	2.5; 2	2.5; 2	15.5; 2		
21		Schweizerstr.	10407	4815	1.7	1.3	4.2	0.0	1.0	2	2	6.5; 3	9.5; 3	12.5; 3	15.5; 3	1.5; 2	1.5; 2	23.5; 2		
22		Sindlinger Bahnstr.	2951	3066	1.3	1.1	3.3	5.4	1.0	1	1	5; 3	8; 3	11; 3	14; 3	0.75; 2	0.75; 2	12.25; 2		
23		Taunusstr.	9558	-	1.5	3.0	0.8	1.0	1.0	3	0	5.5; 3	8.5; 3	11.5; 3	14.5; 3	0.75; 2	0.75; 2	16.5; 2		
24		B 45 Hanauer Vorstadt	12980	-	3.0	14.0	2.0	5.0	2	0	5; 3	8; 3	11; 3	14; 3	2.5; 2	2.5; 2	10.5; 2			
25	Hanau	Barbarossastr.	9118	8582	2.4	3.6	8.0	0.0	1.5	1	2	8.60; 3.4	12; 3.4	15.4; 3.4	18.4; 3.4	3.9; 2	3.9; 2	20.1; 2		
26		B 45 Nussallee	25960	-	3.0	5.0	1.0	1.0	1.0	2	2	18.5; 3	21.5; 3	24.5; 3	27.5; 3	16; 2	16; 2	30; 2		
27		L 3209 Lamboysstr.	37760	-	3.8	5.0	1.0	1.0	1.0	2	3	5.5; 3	8.5; 3	11.5; 3	14.5; 3	3; 2	3; 2	24; 2		
28	Hofheim	Elisabethenstr.	10000	-	1.9	5.0	0.9	1.0	1.0	1	1	2.85; 2.7	5.55; 2.7			0.75; 2	0.75; 2	9.7; 2		
29	Mörf.-Wld.	Westendstr.	5000	3400	4.2	3.8	3.0	0.5	0.7	1	1	3; 3	6; 3			0.75; 2	0.75; 2	8.25; 2		
30	N.-Isenbg.	Frankfurter Str.	16150	-	2.0	6.0	1.7	1.5	1.5	1	1	7.75; 3.5	11.25; 3.5			3; 2	3; 2	16; 2		
31		Bieberer Str. West	9195	-	3.5	2.5	0.8	1.0	1.0	1	1	7.5; 3	10.5; 3			3; 2	3; 2	13; 2	3; 2	
32	Offenbach	Mainstr. Ost	20368	-	2.5	5.2	0.2	1.0	1.0	2	1	4.5; 3	7.5; 3	11.5; 3	14.5; 3	2; 2	2; 2	14; 2	13.5; 2	
33		Untere Grenzstr.	27204	-	3.8	5.1	2.0	1.0	1.0	2	2	12.5; 3	15.5; 3	18.5; 3	21.5; 3	7.5; 2	7.5; 2	26.5; 2	27; 2	
34		Waldstr.	19385	-	1.6	3.4	1.3	1.0	1.0	2	2	13.5; 3	16.5; 3	19.5; 3	22.5; 3	8; 2	8; 2	28; 2		
35	Rüsselsch.	Rugbyring	28654	-	8.1	5.0	1.0	1.0	1.0	2	2	18; 3	21; 3	24; 3	27; 3	6; 2	6; 2	34.5; 2	32; 2	
36	Wiesbaden	Kaiser-Friedrich-Ring	35700	-	3.5	3.0	1.0	1.0	1.0	3	3	7.5; 3	10.5; 3	13.5; 3	16.5; 3	2.5; 2	2.5; 2	38.5; 2		
37		Schiersteinerstr.	26400	-	4.0	3.0	1.0	1.0	1.0	2	3	9.5; 3	12.5; 3	15.5; 3	18.5; 3	4.5; 2	4.5; 2	29.5; 2		

1, 2 Richtungstrennung, sofern Daten vorhanden; DTV in [KZ/d], Kfz-Arten in [%], Abstände, Höhen und Breiten in [m], Abstände gemessen von der Bebauung in Fahrtrichtung links

Fortsetzung auf nächster Seite

ID	Stadt	Straße	DTV		Stkw		Ltkw	Bus	Krad	Spur- ren		Spurlage (Abstand von Bebauung in Fahrtrichtung links; Breite)						Rezeptoren (Abstand; Höhe)		
			1	2	1	2				1	2	Spur1	Spur2	Spur3	Spur4	Spur5	Spur6	Rez1	Rez2	Rez3
Mittel- und Nordhessen																				
38		Frankfurter Str.	17'000	-	7,0		11,8	0,7	4,0	1	1	10,4; 3,25	13,6; 3,25				4,25; 2	19,75; 2		
39	Fulda	Leipziger Str.	16'800	-	7,5		7,5	0,7	7,5	2	2	7,25; 3	10,25; 3	13,25; 3	16,25; 3		2,75; 2	20,75; 2		
40		Niesiger Str.	10'400	-	7,0		7,0	0,9	1,9	1	1	9,13; 3,25	12,4; 3,25				6,5; 2	17,2		
41		Petersberger Str.	22'100	-	3,9		3,2	0,2	6,6	2	2	3; 3	6; 3	12; 3	15; 3		0,75; 2	17,5; 2	18; 2	
42		Diezer Str.	10'866	10'944	5,4	5,0	5,0	0,3	1,0	1	1	11,75; 3,5	15,25; 3,5				7; 2	20; 2	20,5; 2	
43		Frankfurter Str.	9'636	9'583	4,5	5,7	5,0	1,0	1,0	2	2	3,63; 3,25	6,88; 3,25	10,1; 3,25	13,4; 3,25		1; 2	16,2	0,5; 2	
44	Limburg	Schiede I (südlich)	17'282	17'135	2,6	2,6	5,0	1,6	1,0	3	2	7; 3	10; 3	13; 3	19; 3		4,5; 2	21,5; 2	22,5; 2	
45		Schiede II (nördlich)	14'958	13'093	5,0	5,7	5,0	1,5	1,0	2	2	6,63; 3,25	9,88; 3,25	13,1; 3,25	16,4; 3,25		4; 2	26; 2	20; 2	
46		Stephanshügel	2'620	3'249	8,4	10,8	5,0	0,7	1,0	1	1	2,5; 3	5,5; 3				0,5; 2	7,5; 2		
47		Am Grün	6'735	-	1,0		1,7	1,0	5,6	1	0	4; 3					1,5; 2	6,5; 2		
48	Marburg	Elisabethstr.	10'627	-	5,1		9,2	1,0	0,4	2	0	5,5; 3	8,5; 3				1; 2	13; 2		
49		Universitätsstr.	14'559	-	2,9		3,8	2,4	0,4	2	2	6; 3	9; 3	12; 3	15; 3		1,5; 2	17,5; 2	17; 2	
Lehndill																				
50		Grünberger Str.	23'700	-	0,5		1,5	1,8	1,0	3	2	6; 3	9; 3	12; 3	15; 3	18; 3	1,5; 2	22,5; 2		
51	Gießen	Neustadt	10'100	-	5,0		0,0	6,0	1,0	1	1	3,5; 3	6,5; 3				1; 2	9; 2		
52		Südanlage	25'200	-	1,0		3,0	3,2	1,0	3	2	4,5; 3	7,5; 3	10,5; 3	15; 3	18; 3	2; 2	22,5; 2		
53		Westanlage	26'900	-	1,5		3,6	0,8	1,0	2	2	4,5; 3	7,5; 3	13,5; 3	16,5; 3		2; 2	19; 2	1; 2	
54		Ernst-Leitz-Str.	10'043	10'412	1,3	1,7	2,7	0,9	2,5	1	2	28,5; 3	31,5; 3	34,5; 3			24; 2	37; 2		
55	Wetzlar	Hermannsteiner Str.	9'407	9'268	3,0	2,2	2,5	0,9	2,7	1	1	4,5; 3	10,5; 3				2; 2	13; 2		
56		Karl-Kellner-Ring	14'255	11'281	1,6	1,5	2,5	1,7	2,2	2	2	7,5; 3	10,5; 3	13,5; 3	16,5; 3		3; 2	19; 2		
Ballungsraum Kassel																				
57		Brüderstr.	43'900	-	1,3		5,0	0,4	1,0	2	4	6,5; 3	9,5; 3	12,5; 3	15,5; 3	18,5; 3	4; 2	24; 2		
58		Frankfurter Str.	27'100	-	2,2		5,0	0,4	1,0	2	2	8,5; 3	11,5; 3	20,5; 3	23,5; 3		6; 2	26; 2		
59		Fünftenstr.	16'400	-	2,2		5,0	1,2	1,8	2	2	4,5; 3	7,5; 3	23,5; 3	26,5; 3		2; 2	29; 2	29; 2	
60	Kassel	Holländische Str.	29'900	-	3,0		5,0	0,4	1,0	2	3	6; 3	9; 3	16; 3	21; 3	24; 3; 1; 2	1,5; 2	28,5; 2		
61		Leipziger Str.	17'000	-	3,7		5,0	0,4	1,0	1	1	8; 3	16,5; 3				4,5; 2	23; 2		
62		Mauerstr.	750	-	5,0		5,0	86,0	1,0	1	1	6,5; 3	9,5; 3				4; 2	12; 2		
63		Schönfelder Str.	22'900	-	0,9		5,0	0,4	1,0	1	1	7,5; 3	10,5; 3				5; 2	15; 2		
64		Wolffinger Str.	14'900	-	3,2		5,0	0,4	1,0	1	1	6,5; 3	9,5; 3				2; 2	12; 2		

1, 2 Richtungsstrennung, sofern Daten vorhanden. DTV in [Kfz/d], Kfz-Arten in [%], Abstände, Höhen und Breiten in [m], Abstände gemessen von der Bebauung in Fahrtrichtung links

6 Ergebnisse

6.1 Hessen

Die Ergebnisse der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Arbeitsschritte zur flächenhaften Ermittlung der Belastung in Hessen sind im Folgenden als räumliche Verteilung der Jahresmittelwerte kartographisch dargestellt und tabellarisch zusammengefasst.

Die kartographischen Darstellungen sind so aufgebaut, dass der jeweils vorkommende Wertebereich gleichmäßig – vom Maximalwert ausgehend – in 12, auf ganze μg bzw. % gerundete, Klassen aufgeteilt ist. Die unteren Randklassen weichen dabei z. T. von der gleichmäßigen Schrittweite ab und umfassen größere oder kleinere Spannbreiten. Bei manchen Darstellungen wurde von dieser Systematik teilweise abgewichen, da dort große Wertebereiche bei gleichzeitig hoher Differenzierung in den niedrigen Bereichen vorliegen, die sich mit einer einheitlichen Schrittweite nicht zufriedenstellend darstellen lassen. Daher vermindert sich bei einigen Legenden die Schrittweite ab einem bestimmten Wert.

Die Zuweisung der ermittelten Werte für die einzelnen Gitterzellen zu den Farbklassen entspricht einer kaufmännischen Rundung auf ganze Zahlen, bei der für jede Klasse die Werte ihrer oberen Grenze noch innerhalb der Klasse dargestellt sind. In der Abbildung 6-1 der mittleren NO_2 -Belastung enthält demnach die erste Legendenklasse alle Werte vom Minimum bis einschließlich $8.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, die zweite Klasse alle Werte ab 8.5 bis einschließlich $12.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ usw.

Für negative Werte, wie sie bei den relativen Veränderungen der Prognose gegenüber dem Basisfall auftreten, wurde die Aufteilung in Klassen und die Zuweisung zu den Werteklassen entsprechend gespiegelt.

Thematisch gleiche und direkt vergleichbare Darstellungen, wie z. B. die mittlere Belastung 2013 und 2020 oder die Beiträge der Quellengruppen, wurden für die einzelnen Stoffe in der jeweils gleichen Klassifizierung dargestellt, um eine direkte Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Dies führt dazu, dass sich die ermittelten Minimal- und Maximalwerte der einzelnen Stoffe in den einzelnen Fällen nicht immer aus den Karten ableiten lassen und dass einzelne Legendenklassen am unteren oder oberen Rand unbesetzt sein können.

6.1.1 Basisfall 2013

Für den Basisfall 2013 zeigen die Darstellungen in Abbildung 6-1 bis Abbildung 6-3 für NO_2 und PM_{10} die Ergebnisse der Modellrechnungen mit RCG, die an die Messwerte assimiliert wurden und mit FLADIS mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten gekoppelt wurden (s. Abschnitt 5.3).

Bei PM_{10} sind zusätzlich zu den Jahresmittelwerten die Anzahl der Tage mit einem Tagesmittelwert $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dargestellt.

Für die dargestellten Kenngrößen sind in Tabelle 6-1 die Minimal- und Maximalwerte aufgeführt.

Tabelle 6-1: Minimal- und Maximalwerte im Jahr 2013

	Jahresmittelwerte in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]				Anzahl Tage mit PM10-Tagesmittelwert > 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	NO ₂		PM10		Min	Max
	Min	Max	Min	Max		
Basisfall 2013	6.4	43.3	10.5	24.9	0	18

Die mittlere NO₂-Belastung ist gekennzeichnet durch hohe Belastungen entlang der großen Verkehrsachsen, in den größeren Städten und insbesondere im gesamten Ballungsraum Rhein-Main. Dort werden für den Bereich des Autobahnkreuzes „Frankfurter Kreuz“ auch die maximalen NO₂-Jahresmittelwerte berechnet. Geringe Belastungen treten in den ländlichen Räumen, insbesondere in Nordhessen aber auch in den höheren Lagen des Odenwalds im Süden auf (s. Abbildung 6-1).

Bei der PM10-Belastung (Jahresmittelwerte) zeigt sich in Abbildung 6-2 grundsätzlich eine ähnliche Raumstruktur, die aber – aufgrund des gegenüber NO₂ deutlich höheren Beitrags des Ferntransports von Beiträgen aus außerhalb von Hessen liegenden Quellen – nivellierter ist. Die Werte liegen flächendeckend, auch in den Ballungsräumen, zwischen 11 und ca. 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Vereinzelt treten bei PM10 sehr kleinräumige Belastungsspitzen auf, die durch bodennahe Quellen mit relevanten Emissionen in geringen Austrittshöhen verursacht werden. Die Hauptverkehrsachsen zeichnen sich deutlich schwächer als bei der NO₂-Immissionsverteilung ab.

Bei den PM10-Überschreitungstagen zeigt Abbildung 6-3 nie mehr als 18 Überschreitungstage.

Punktuell gibt es an mehreren Orten im Modellgebiet lokal höhere PM10-Belastungen. Diese Orte sind i. d. R. durch vergleichsweise hohe PM10-Emissionen aus niedrigen Quellen der Quellengruppe Industrie gekennzeichnet.

Auf den Vergleich mit den Messwerten in Abschnitt 5.3.4 und 5.4 wird an dieser Stelle nochmals hingewiesen.

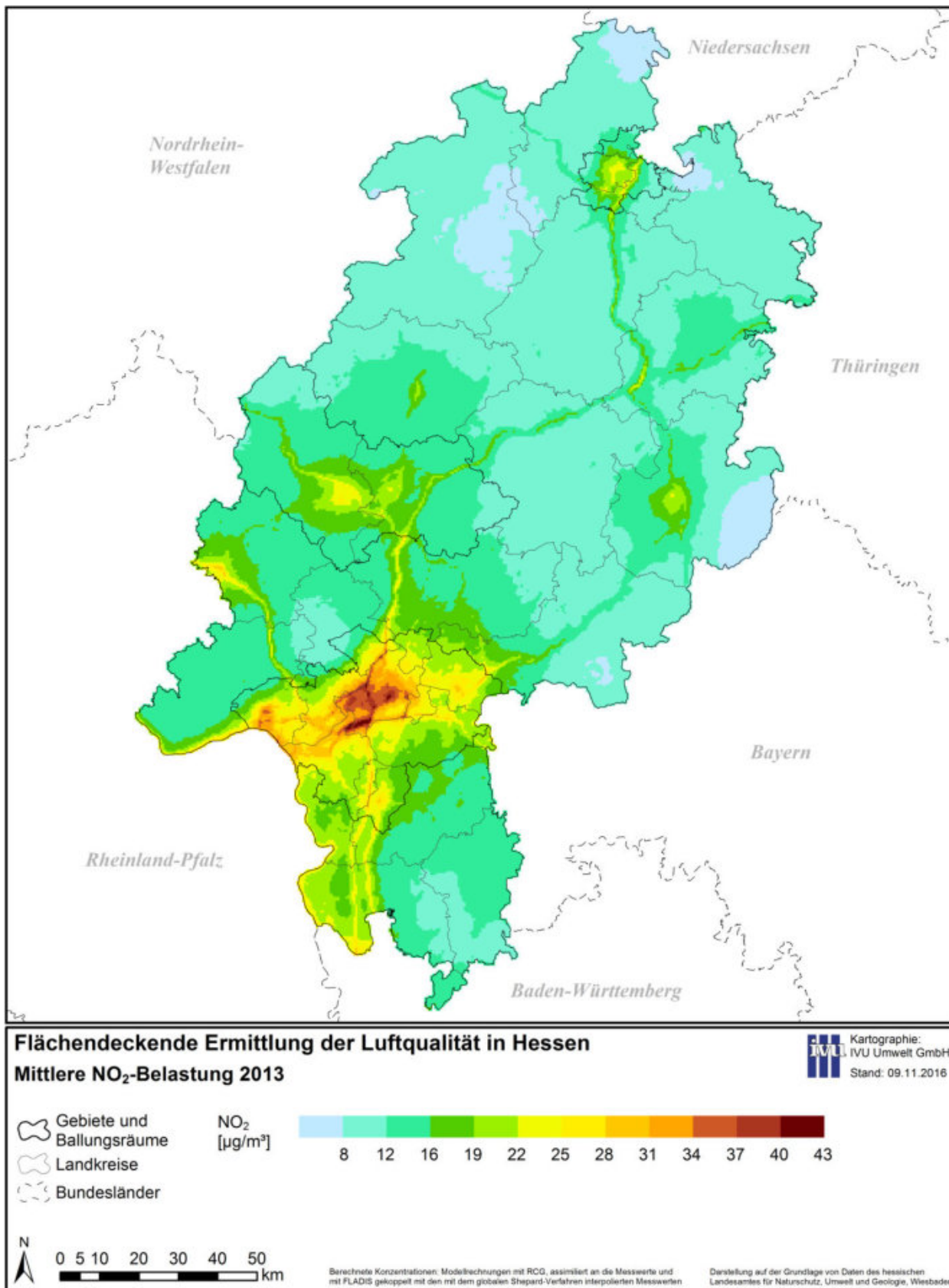


Abbildung 6-1: Mittlere NO₂-Belastung 2013 (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten)

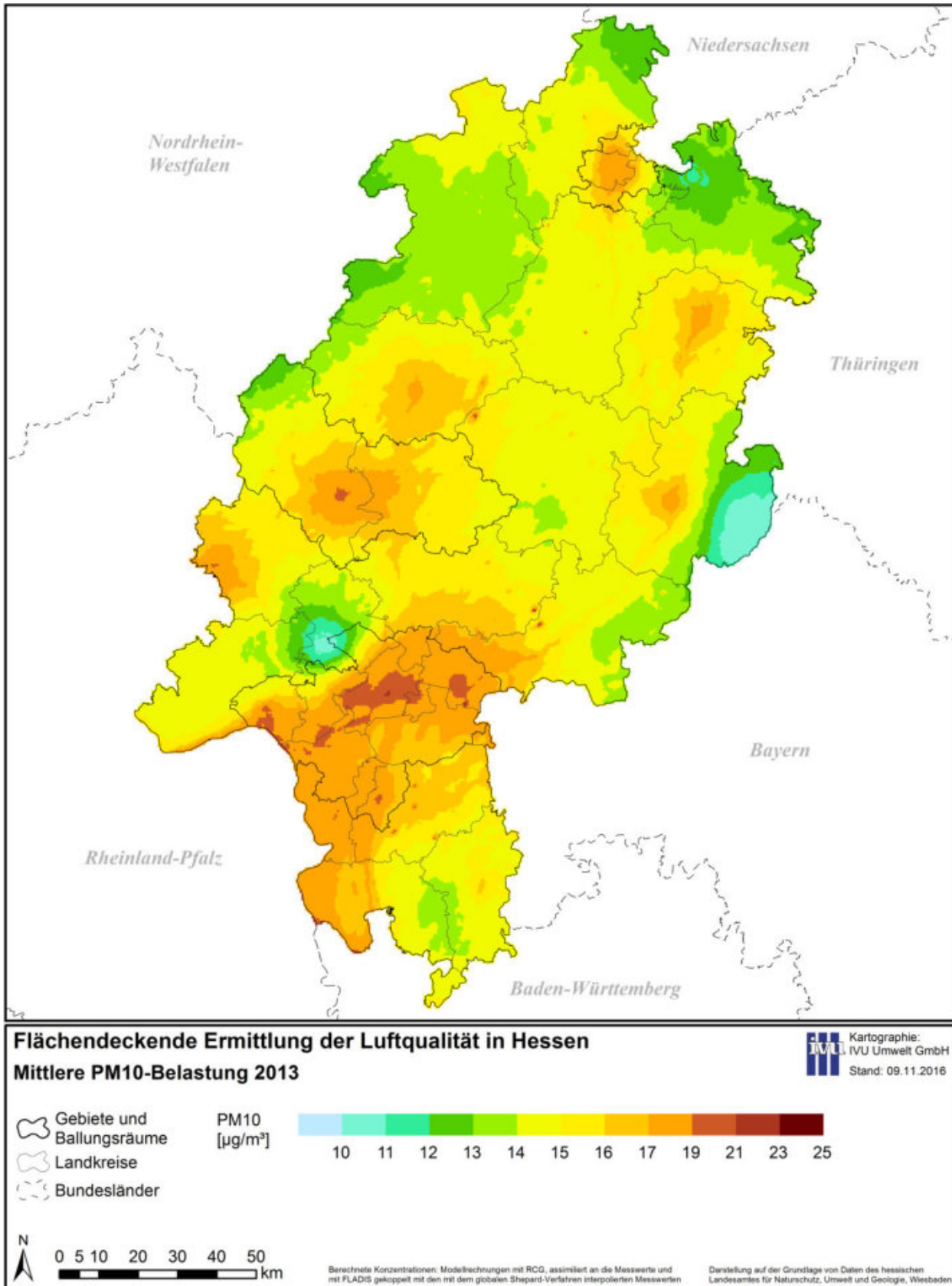


Abbildung 6-2: Mittlere PM10-Belastung 2013 (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten)

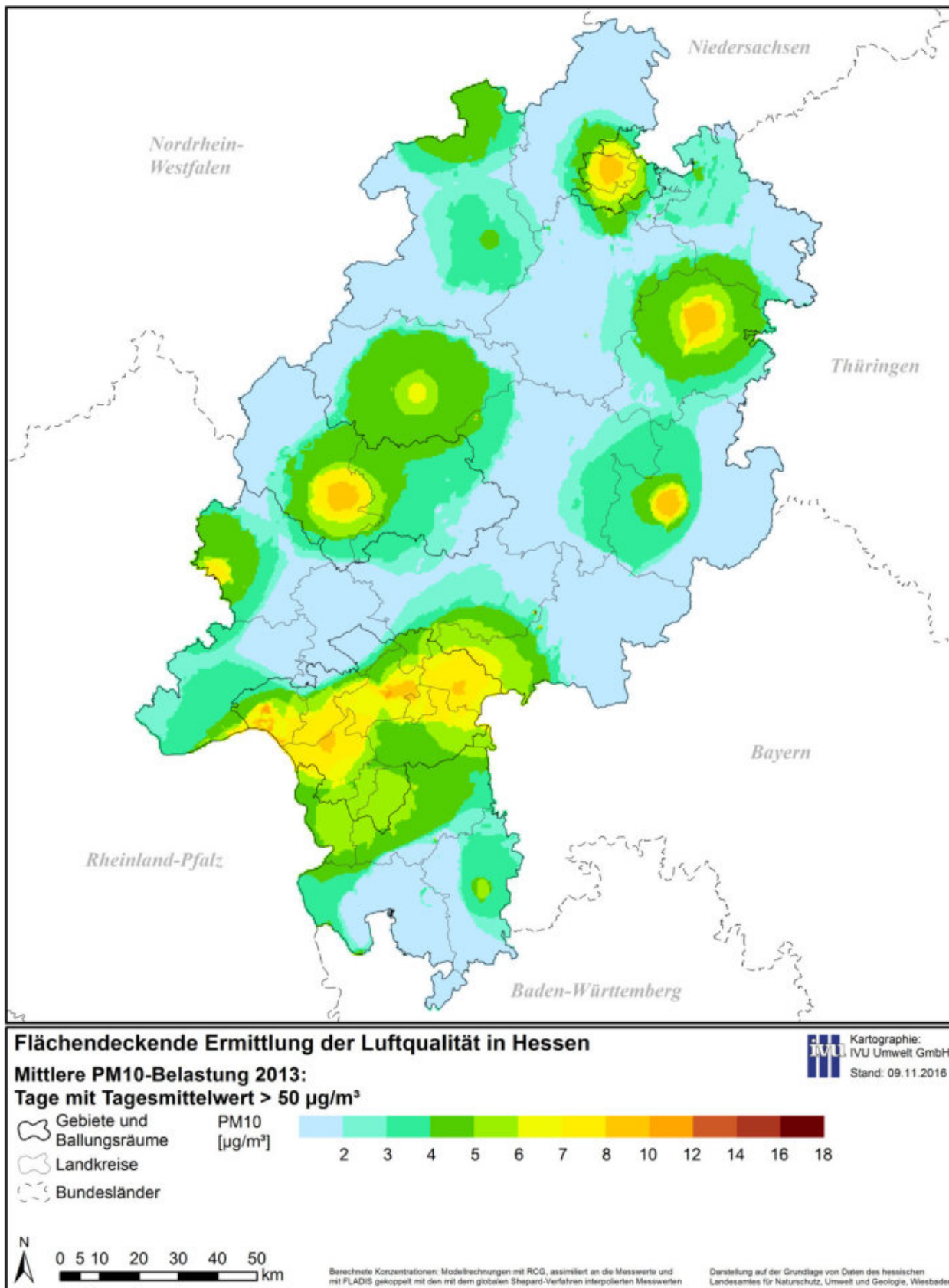


Abbildung 6-3: Mittlere PM10-Belastung 2013: Anzahl der Tage mit einem Tagesmittelwert > 50 µg/m³ (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten)

6.1.2 Beiträge ausgewählter Quellengruppen

In diesem Abschnitt sind die Beiträge der Hessischen Emissionen der fünf Quellengruppen Industrie, Gebäudeheizung und Kleinverbraucher, Straßenverkehr, Flughafen Frankfurt sowie aller anthropogener Quellen zur Belastung in Hessen in Abbildung 6-4 bis Abbildung 6-13 für NO₂ und in Abbildung 6-14 bis Abbildung 6-23 für PM₁₀ als absolute Beiträge in µg/m³ und als relative Beiträge zur Immissionsbelastung in % dargestellt.

Zur Abschätzung dieser Beiträge wurden fünf Szenarien berechnet, bei denen in Hessen alle Emissionen aller Schadstoffe der jeweiligen Verursachergruppe auf Null gesetzt wurden. Die Beiträge beziehen sich ausschließlich auf die Emissionen der betreffenden Verursachergruppe in Hessen. Emissionen im RCG-Untersuchungsgebiet (Nest 3), aber außerhalb von Hessen, bleiben in den Szenarienrechnungen unverändert. Die Beiträge der betreffenden Emissionen in Hessen zur Hintergrundbelastung ergeben sich dann als Differenzen der Ergebnisse des RCG-Basislaufs für das Jahr 2013 und der Ergebnisse der jeweiligen Läufe ohne die Emissionen der fünf Quellengruppen.

Es wird darauf hingewiesen, dass die so bestimmten relativen Beiträge der einzelnen Quellengruppen zur Gesamtbelastung nur als Näherung betrachtet werden können. Hauptursache dafür sind die nichtlinearen Beziehungen zwischen den Vorläuferemissionen und den über eine komplexe Kette chemischer Reaktionen und physikalischer Prozesse entstehenden Folgeprodukten NO₂, Ozon und sekundäre Aerosole, die einen großen Anteil an der Gesamtmasse des PM₁₀ haben. Eine Änderung der Zusammensetzung der Emissionen und damit des Gemisches der Vorläuferemissionen führt zu einer Änderung der chemischen Abläufe und damit zu einer Änderung der Konzentrationsbeiträge. Dies hat zur Folge, dass die Summe der relativen Beiträge nicht notwendigerweise 100 % ergibt. Die Auswirkungen der Nichtlinearität auf den Summenfehler ist aber gering und liegt nach im PAREST-Projekt (Bultjes et al., 2012) durchgeführten Abschätzungen unter 5%.

Bei diesen hypothetischen Szenarien sind die Annahmen, die einem Einsatz der Delta-Methode zur Anpassung der Messdaten (s. Abschnitt 5.3.1.5) zugrunde liegen, nicht mehr erfüllt. Die Berechnungsergebnisse zu den Beiträgen der Quellengruppen lassen sich daher nicht mit (angepassten) Messwerten kombinieren und sind als reine RCG-Modellergebnisse dargestellt.

Weiterhin muss betont werden, dass die hier berechneten Beiträge unter Berücksichtigung der für die Berechnungen verwendeten Auflösung von circa 500 m interpretiert werden müssen. Emissionsunterschiede innerhalb einer Gitterzelle können nicht dargestellt werden, da alle Emissionen sofort gleichmäßig über das Volumen einer Zelle verteilt werden. Aus diesem Grund sind „hot-spots“ nur im Rahmen dieser Gitterauflösung darstellbar.

Für die dargestellten Kenngrößen sind in Tabelle 6-2 die Minimal- und Maximalwerte aufgeführt. Dabei sei darauf hingewiesen, dass diese Minimal- und Maximalwerte der Beiträge der einzelnen Quellengruppen an verschiedenen Orten auftreten und daher nicht addiert werden können.

Tabelle 6-2: Minimal- und Maximalwerte der Beiträge der Quellengruppen

Quellengruppe	Beitrag			
	NO ₂		PM10	
	Min	Max	Min	Max
Beitrag als Jahresmittelwert in µg/m³				
Industrie	0.1	7.1	0.1	14.4
Gebäudeheizung und Kleinverbraucher	0.1	7.4	0.1	2.7
Straßenverkehr	0.3	29.5	0.1	4.6
Flughafen Frankfurt	0.0	21.8	0.0	3.1
anthropogene Quellen	0.5	39.6	0.3	16.4
Relativer Beitrag zum Jahresmittelwert in %				
Industrie	0.7	50.9	0.4	56.5
Gebäudeheizung und Kleinverbraucher	0.9	25.4	0.8	14.1
Straßenverkehr	4.0	84.3	1.0	25.5
Flughafen Frankfurt	0.0	51.5	0.2	17.7
anthropogene Quellen	8.0	90.5	3.5	64.1

Tabelle 6-2 und Abbildung 6-4 bis Abbildung 6-23 kann entnommen werden, dass die Herausnahme der Emissionen einer der betrachteten Verursachergruppen durchweg zu Abnahmen der mittleren NO₂- und PM10-Konzentrationen führt.

Die Beiträge der Verursachergruppe Industrie zu der NO₂-Gesamtbelastung können lokal bis zu circa 50 % reichen. In der Fläche liegt der Beitrag aber unter 10 %. In absoluten Zahlen entspricht dies einer Spannbreite von 0.1 µg/m³ bis circa 7 µg/m³ (Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5).

Die Beiträge der Verursachergruppe Gebäudeheizung und Kleinverbraucher zur gesamten NO₂-Konzentration liegen in den bevölkerungstärkeren Regionen bei etwa 15 bis maximal 25 %. Das entspricht im Jahresmittel absoluten Abnahmen im Bereich von 4 bis über 7 µg/m³. In den weniger belasteten Gebieten Hessens trägt diese Verursachergruppe zum Teil unter 10 % zu der Gesamtbelastung bei (Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7).

Für den Straßenverkehr werden im Nahbereich der Hauptverkehrsachsen Beiträge zu den NO₂-Jahresmittelwerten in der Größenordnung von 50 bis zu 85 % oder circa 10 bis 30 µg/m³ berechnet. Abseits der großen Verkehrsachsen schwankt der Beitrag zwischen 4 und 50 % (Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9).

Der relative Beitrag der Emissionen des Frankfurter Flughafens zu den NO₂-Jahresmittelwerten am Boden schwankt zwischen Werten von mehr als 50 % im direkten Flughafenbereich bis zu einem sehr geringen Beitrag außerhalb des Rhein-Main-Gebiets. Absolut werden im direkten Flughafenbereich Beiträge bis zu knapp 22 µg/m³ berechnet (Abbildung 6-10 und Abbildung 6-11).

Die Berechnung des Beitrags aller anthropogenen Emissionen des Landes liefert eine Abschätzung des Gesamtbeitrags der Emissionen von Hessen zur Immissionsbelastung. In den hoch belasteten Gebieten des Landes in den Ballungsgebieten und entlang der Hauptverkehrsachsen kann damit 90 % der NO₂-Konzentrationen auf die Emissionen aus Hessen zurückgeführt werden. Großflächig liegen die Beiträge bei über 60 %. Zum Rand Hessens hin nehmen die Beiträge ab und sinken in den ländlichen Randregionen auf bis zu 8 % ab. Absolut betrachtet tragen die anthropogenen hessischen Emissionen in den höher belasteten Gebieten zwischen circa 10 bis 40 µg/m³ zu den NO₂-Jahresmittelwerten bei. Die höchsten Beiträge werden für das Rhein-Main-Gebiet ermittelt (Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13).

Die industriellen PM10-Beiträge sind wie bei NO₂ großflächig niedrig (unter 5 %), können aber lokal, hervorgerufen durch bodennahe Quellen, Werte von über 55 % erreichen. An diesen lokalen „hot spots“ tragen die industriellen Emissionen dann 10 bis circa 15 µg/m³ zur Gesamtbelastung bei (Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15).

Die Verursacherguppe Gebäudeheizung und Kleinverbraucher trägt großflächig nur wenig zur gesamten PM10-Konzentration bei. Lediglich in einigen Städten werden höhere Beiträge von 8 bis zu circa 14 % erreicht. Absolut entspricht dies weniger als 3 µg/m³ (Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17).

Die Verkehrsbeiträge zur PM10-Hintergrundbelastung liegen in großen Teilen Hessens zwischen 5 und 10 % mit niedrigeren Werten vor allem in den weniger bewohnten Regionen des Landes. Entlang der das Land durchquerenden Autobahnen werden höhere Beiträge berechnet. In den Ballungsräumen, vor allem in der Region Wiesbaden-Frankfurt werden Beiträge bis zu 25 % oder bis zu knapp 5 µg/m³ erreicht (Abbildung 6-18 und Abbildung 6-19).

Der Beitrag der Emissionen des Frankfurter Flughafens zu den PM10-Jahresmittelwerten am Boden erreicht nur im direkten Flughafenbereich höhere Werte (bis zu knapp 18% oder circa 3 µg/m³). Mit zunehmender Entfernung vom Flughafen fallen die Beiträge schnell auf sehr geringe Werte ab (Abbildung 6-20 und Abbildung 6-21).

Der Beitrag der hessischen anthropogenen PM10-Emissionen ist großflächig unter 25 % und erreicht in den hoch belasteten Ballungsräumen bis zu 40 %. Die lokal nur an den Standorten einzelner industrieller PM10-Quellen ermittelten Beiträge von bis zu 66 % wurden bereits oben diskutiert. In den ländlichen Randregionen von Hessen beträgt der Beitrag nur noch 3 %. Absolut betrachtet tragen die anthropogenen hessischen Emissionen in den höher belasteten Gebieten mit circa 3 bis 7 µg/m³ zu den PM10-Jahresmittelwerten bei. Die höchsten flächigen Beiträge werden im Raum Wiesbaden und Frankfurt ermittelt (Abbildung 6-22 und Abbildung 6-23).

Mit Ausnahme der Quellengruppe Industrie sind die Beiträge der hier betrachteten Emissionsgruppen zu den PM10-Jahresmittelwerten geringer als die entsprechenden Beiträge zu den NO₂-Jahresmitteln. Ursache des geringeren Eigenanteils ist der hohe Beitrag der sekundären Aerosole zu der PM10-Gesamtmasse. Diese Aerosole bilden sich während des Ausbreitungsprozesses aus gasförmigen Vorläuferstoffen und können über große Entfernungen transportiert werden. Die Ursache ihrer Bildung liegt damit zu einem beträchtlichen Teil in den Emissionen außerhalb der Landesgrenzen.

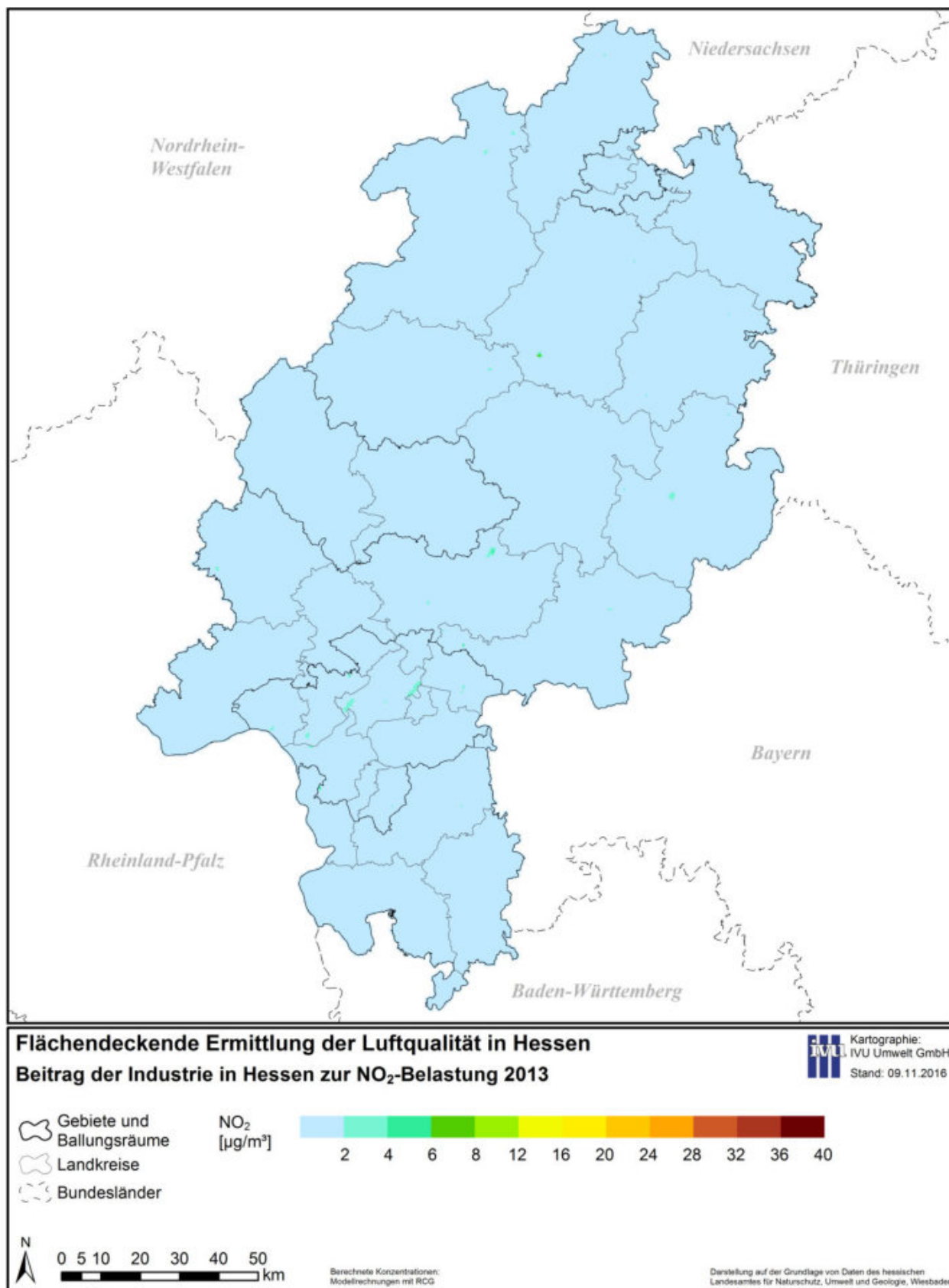


Abbildung 6-4: Beitrag der Industrie in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

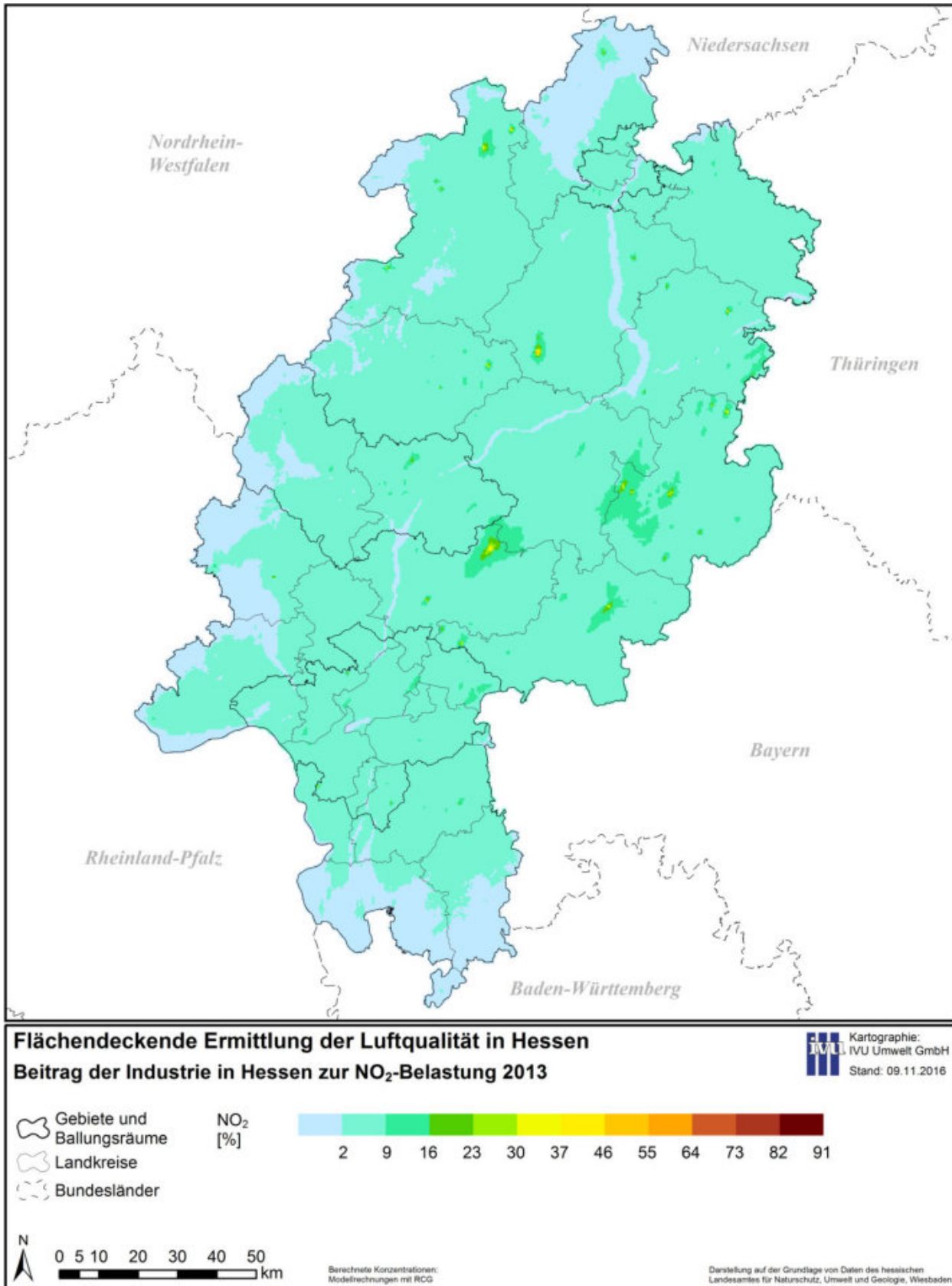


Abbildung 6-5: Relativer Beitrag der Industrie in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

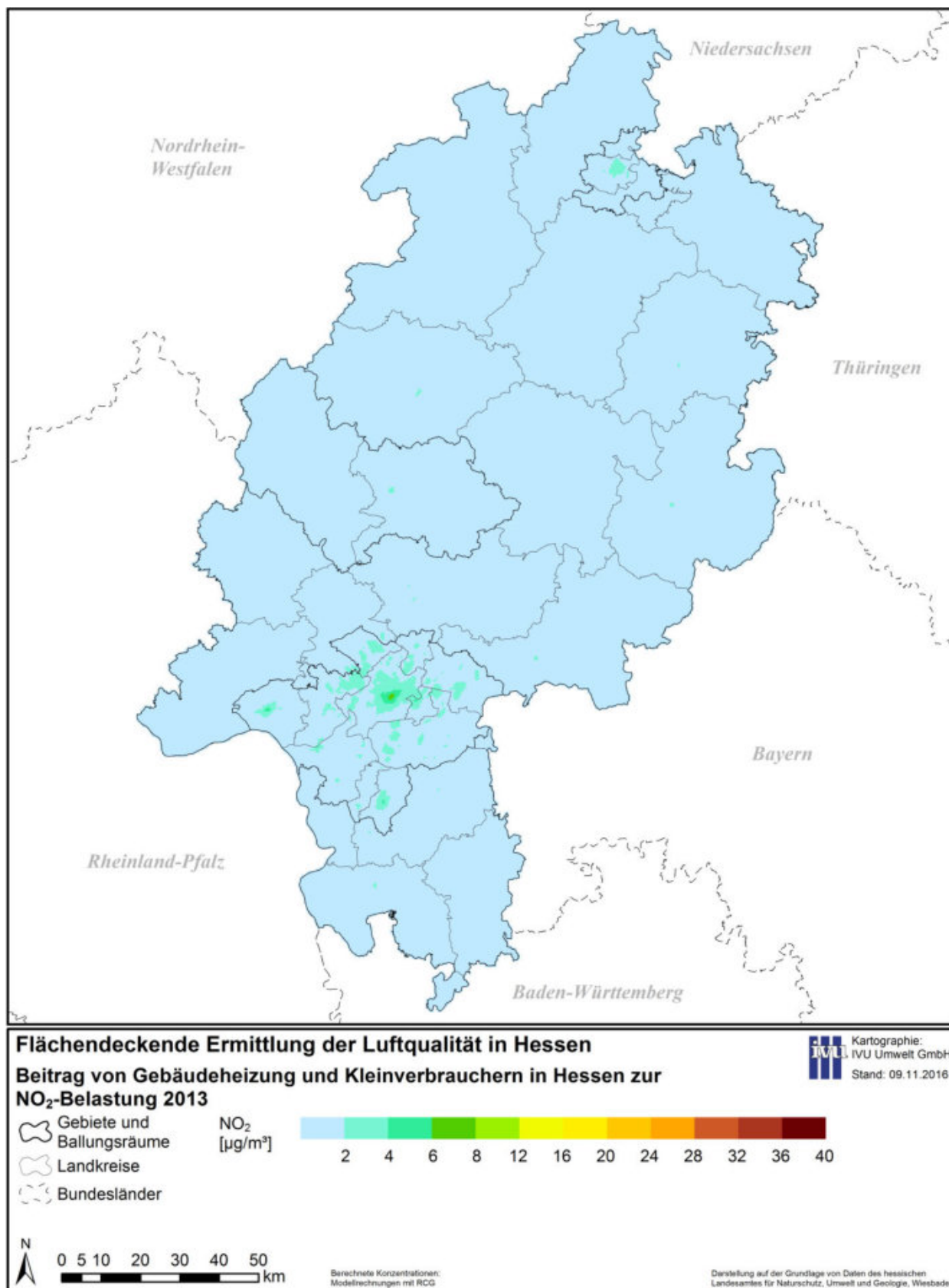


Abbildung 6-6: Beitrag von Gebäudeheizung und Kleinverbrauchern in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

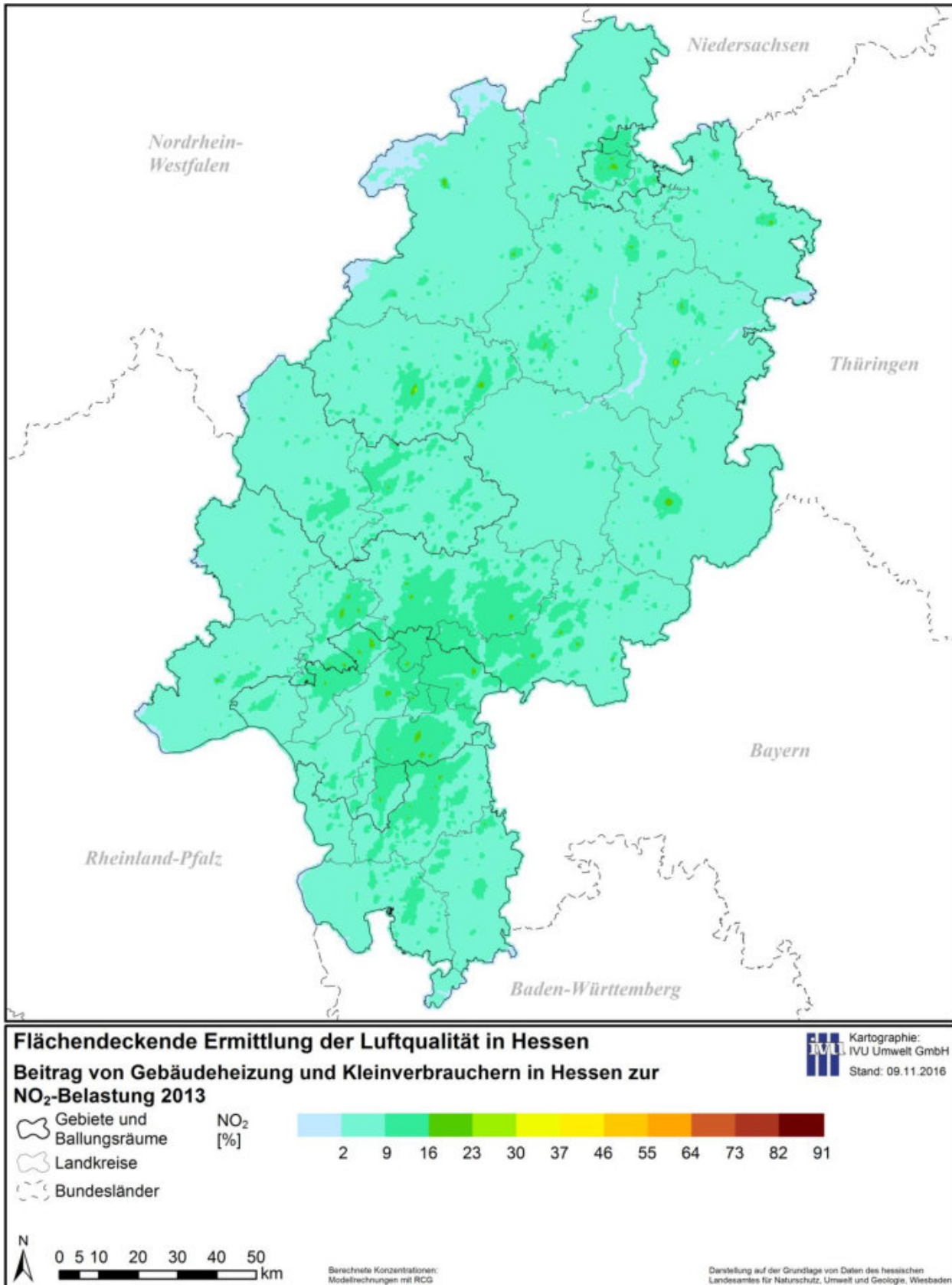


Abbildung 6-7: Relativer Beitrag von Gebäudeheizung und Kleinverbrauchern in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

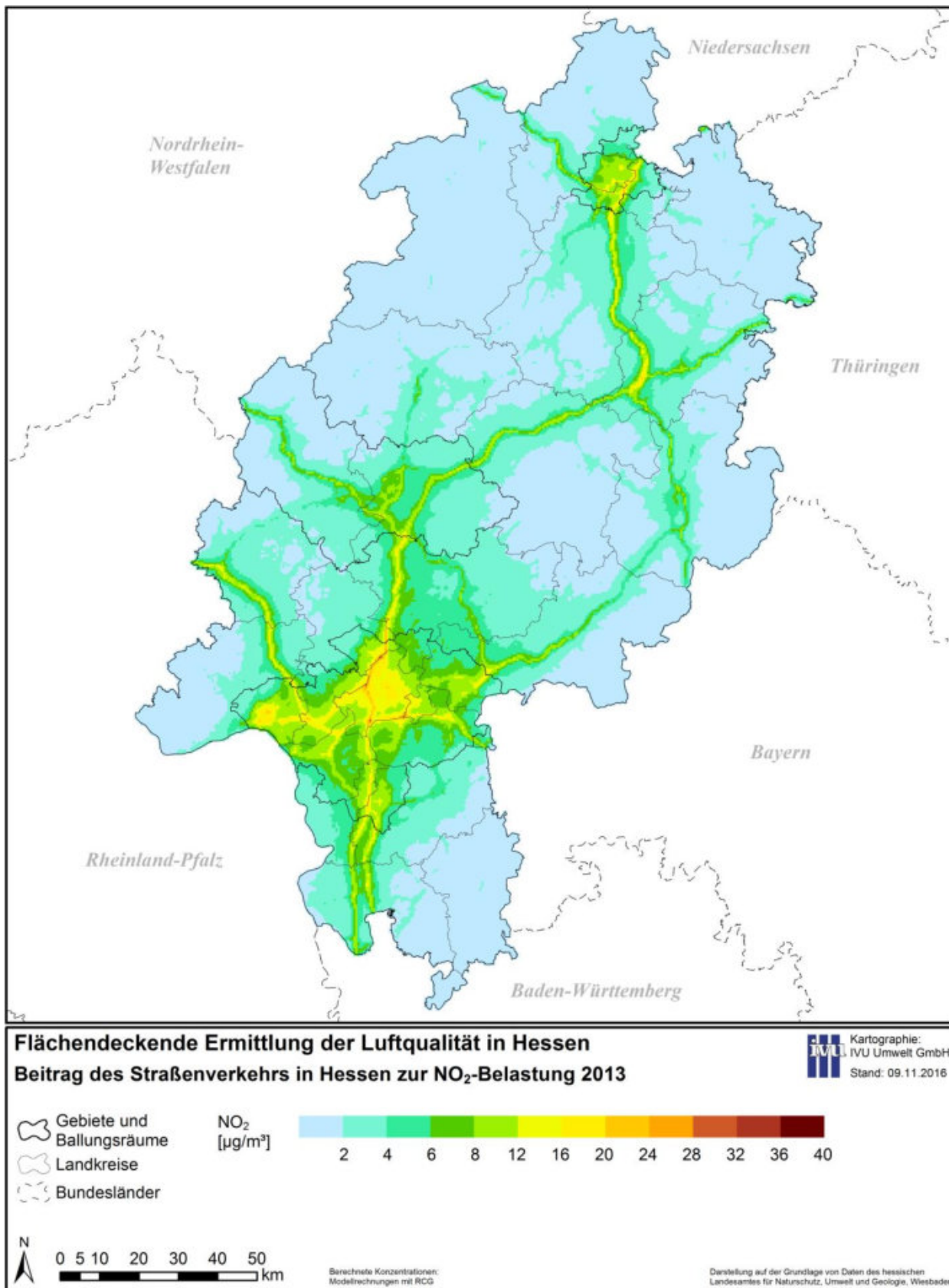


Abbildung 6-8: Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

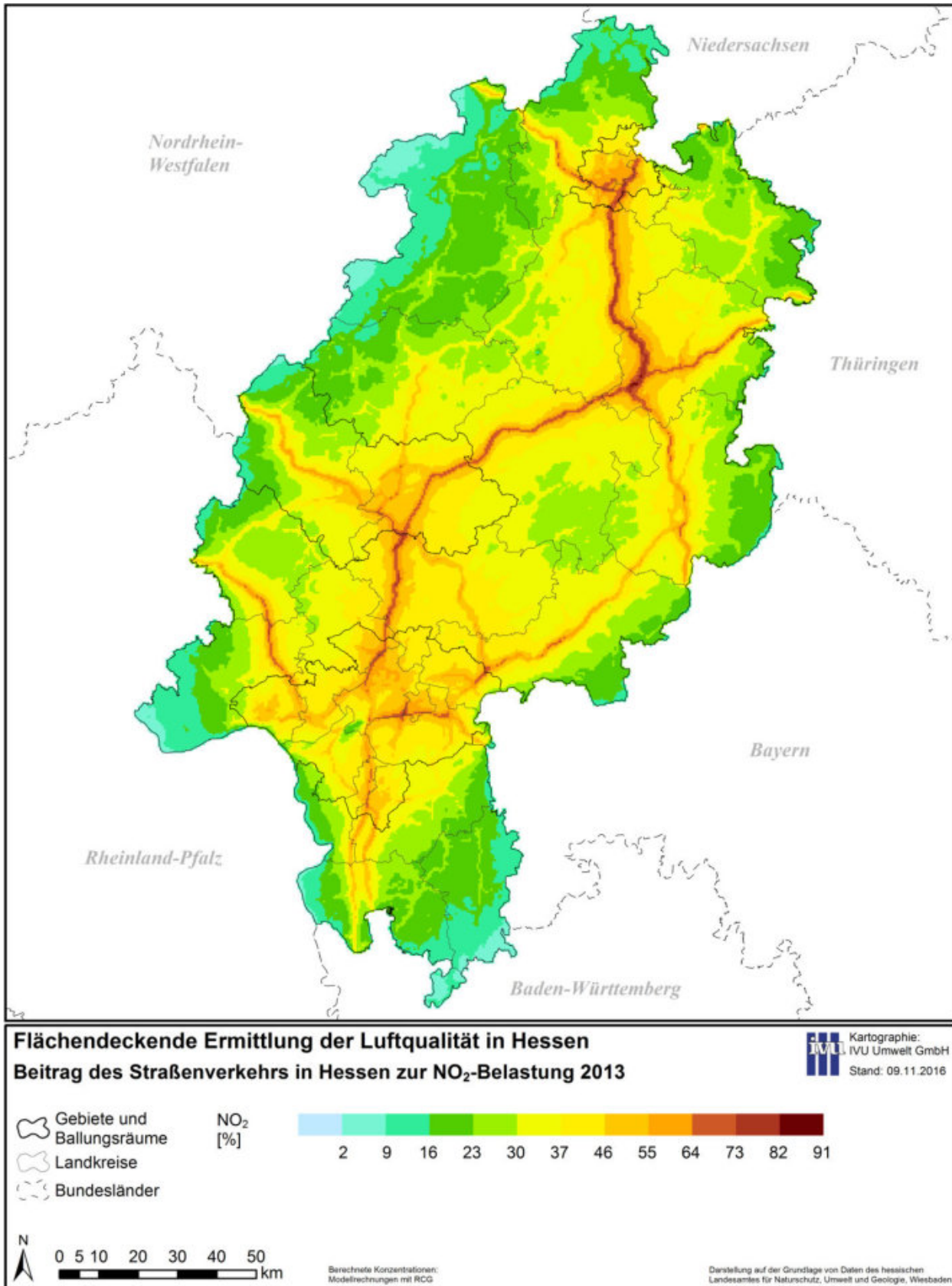


Abbildung 6-9: Relativer Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

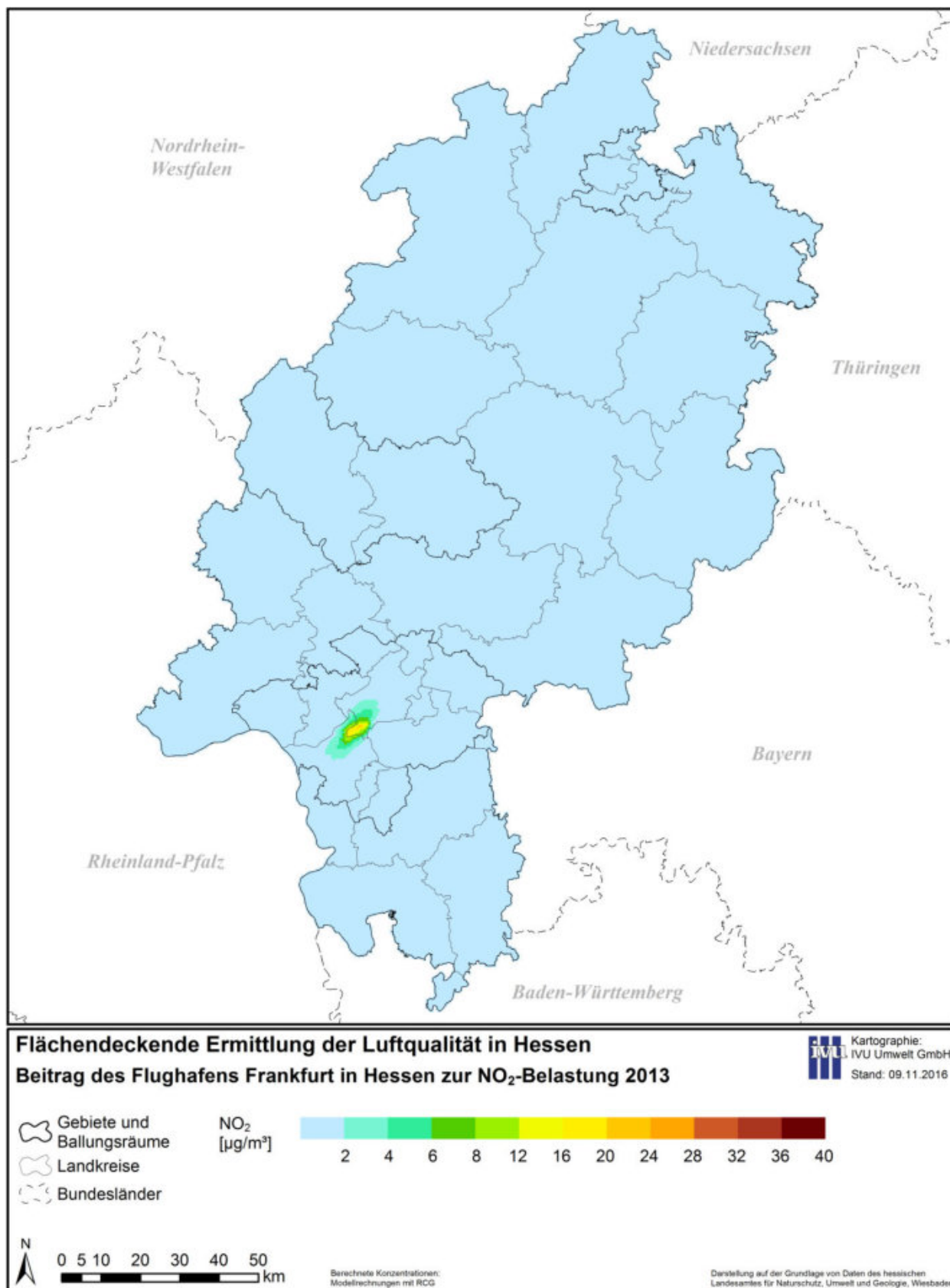


Abbildung 6-10: Beitrag des Flughafens Frankfurt in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

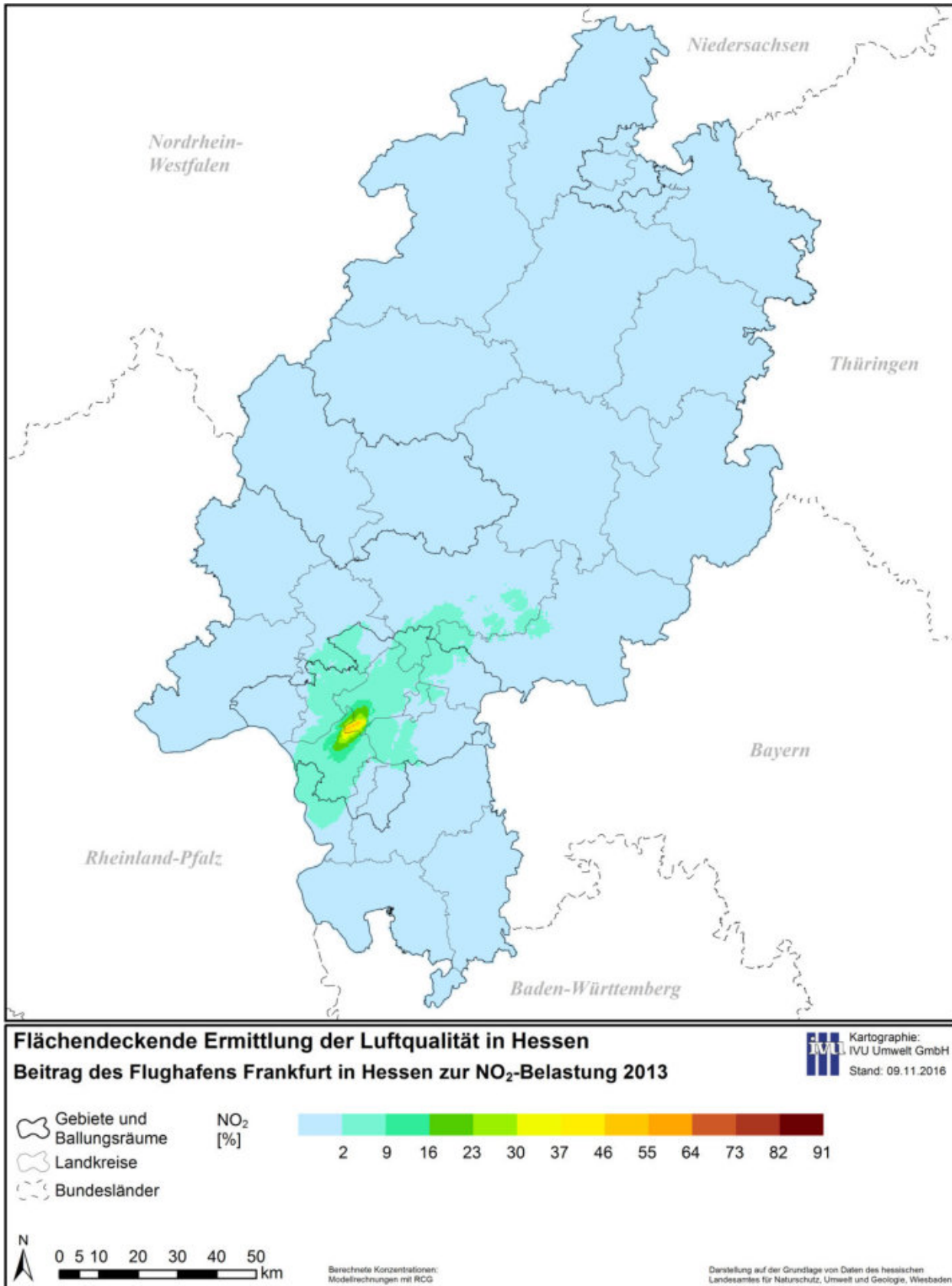


Abbildung 6-11: Relativer Beitrag des Flughafens Frankfurt in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

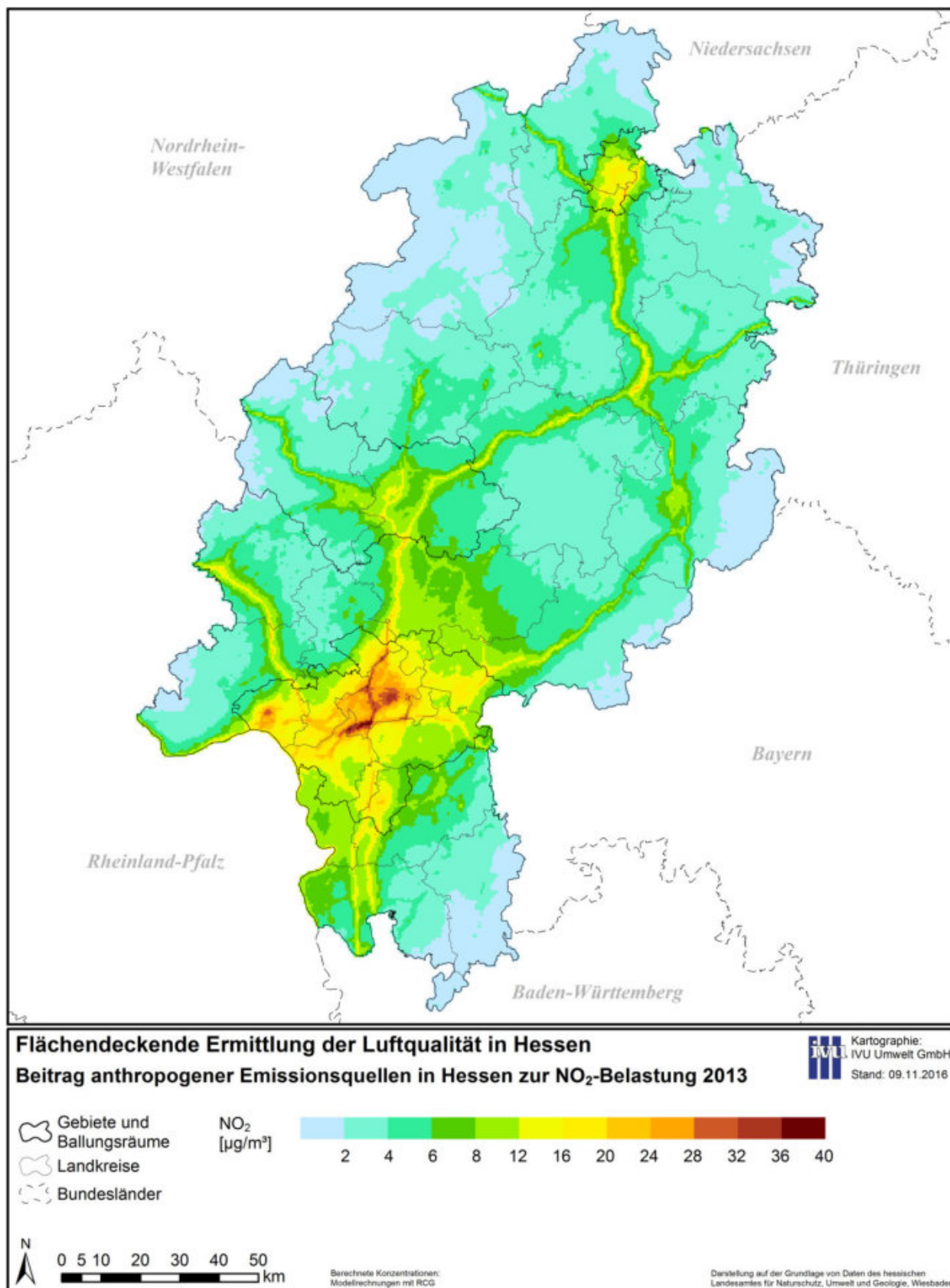


Abbildung 6-12: Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

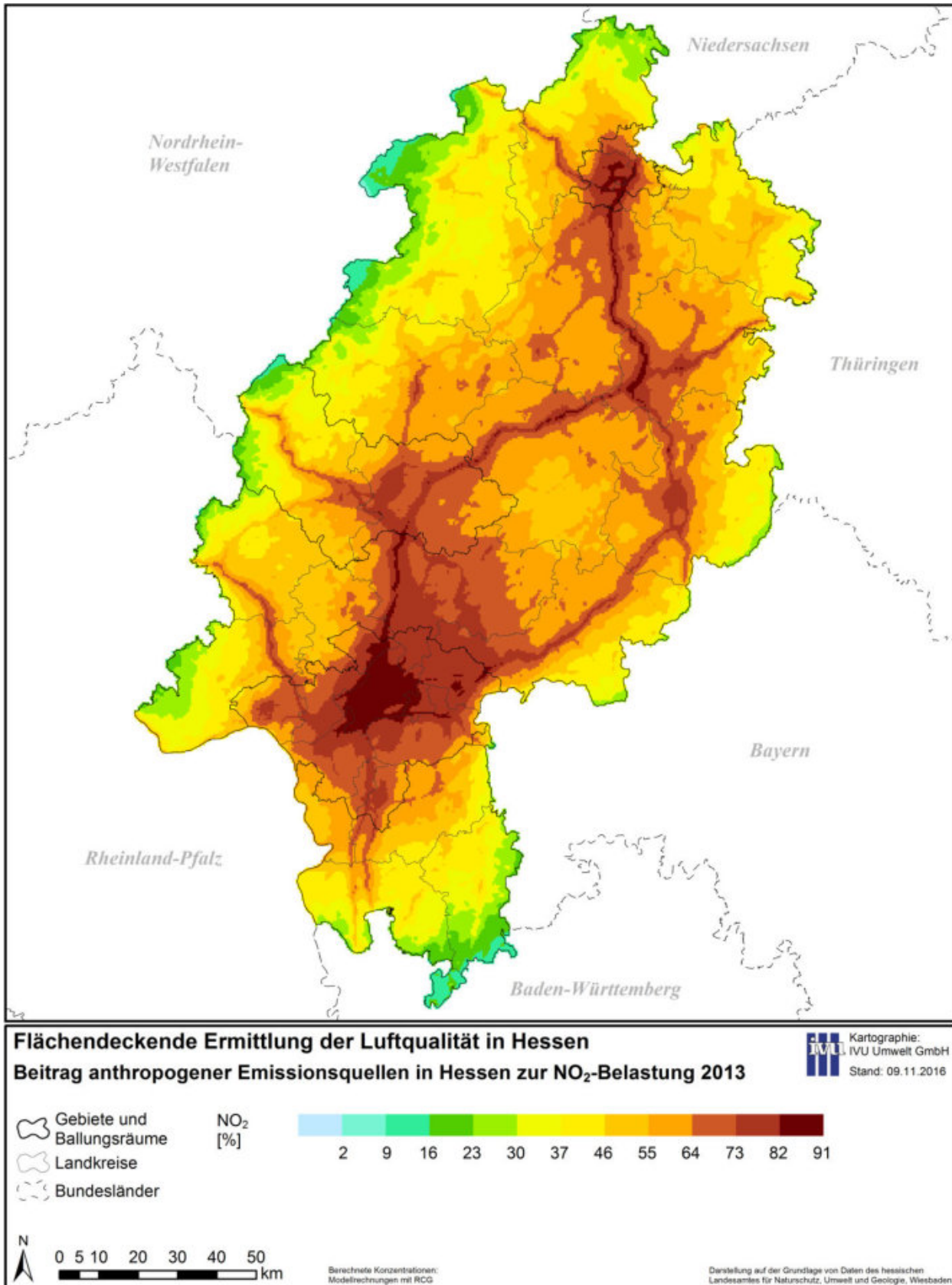


Abbildung 6-13: Relativer Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

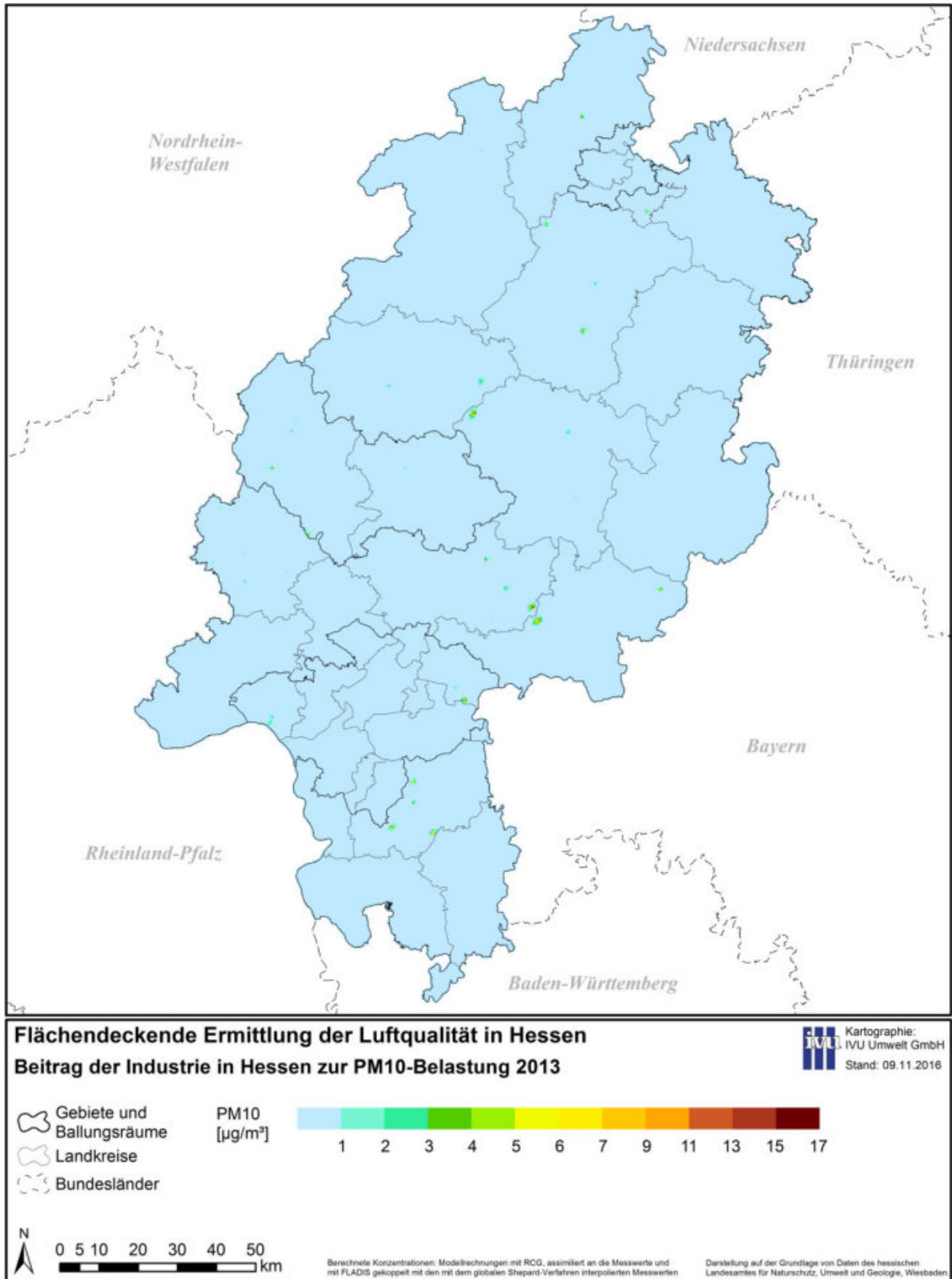


Abbildung 6-14: Beitrag der Industrie in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

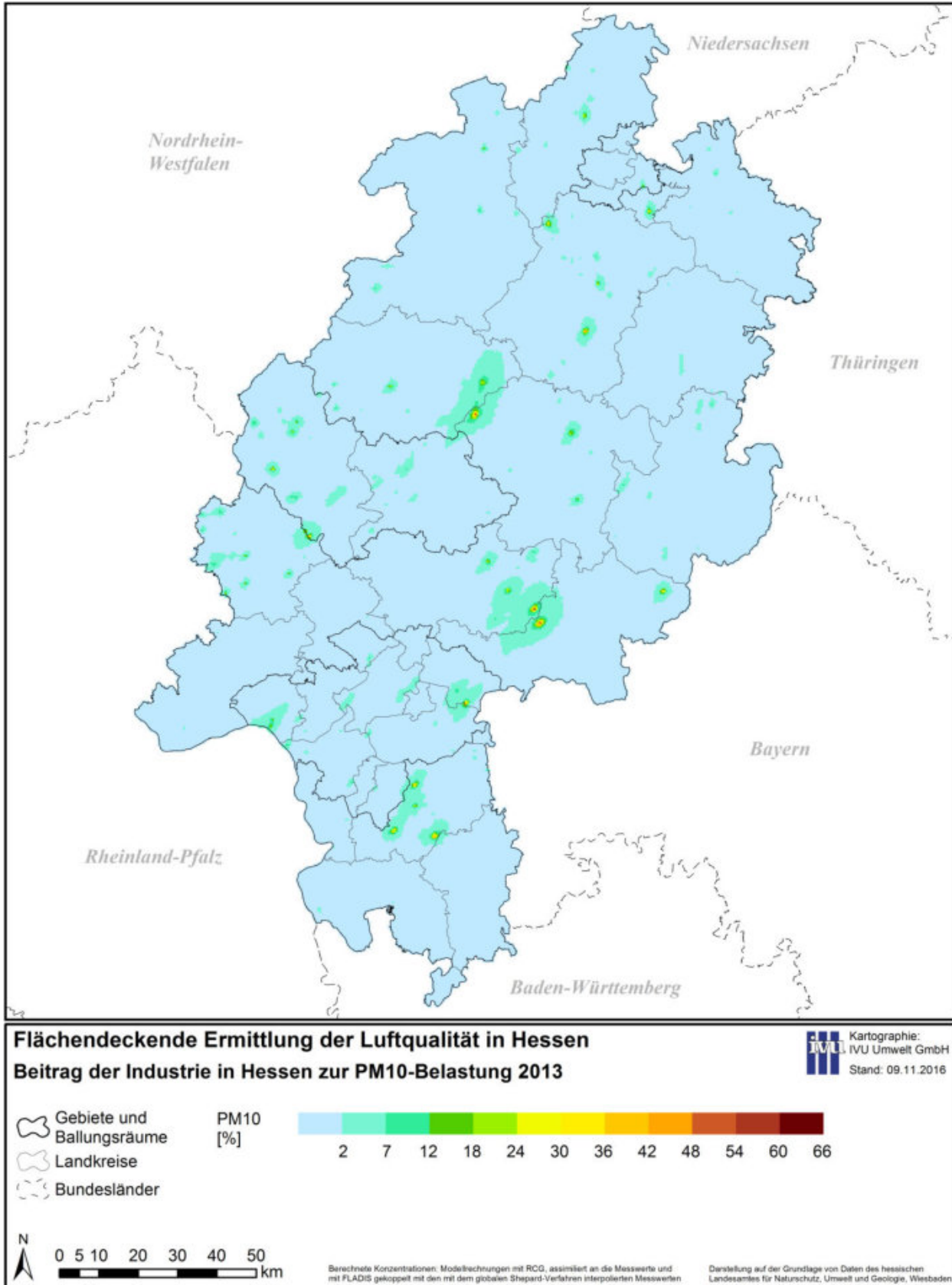


Abbildung 6-15: Relativer Beitrag der Industrie in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

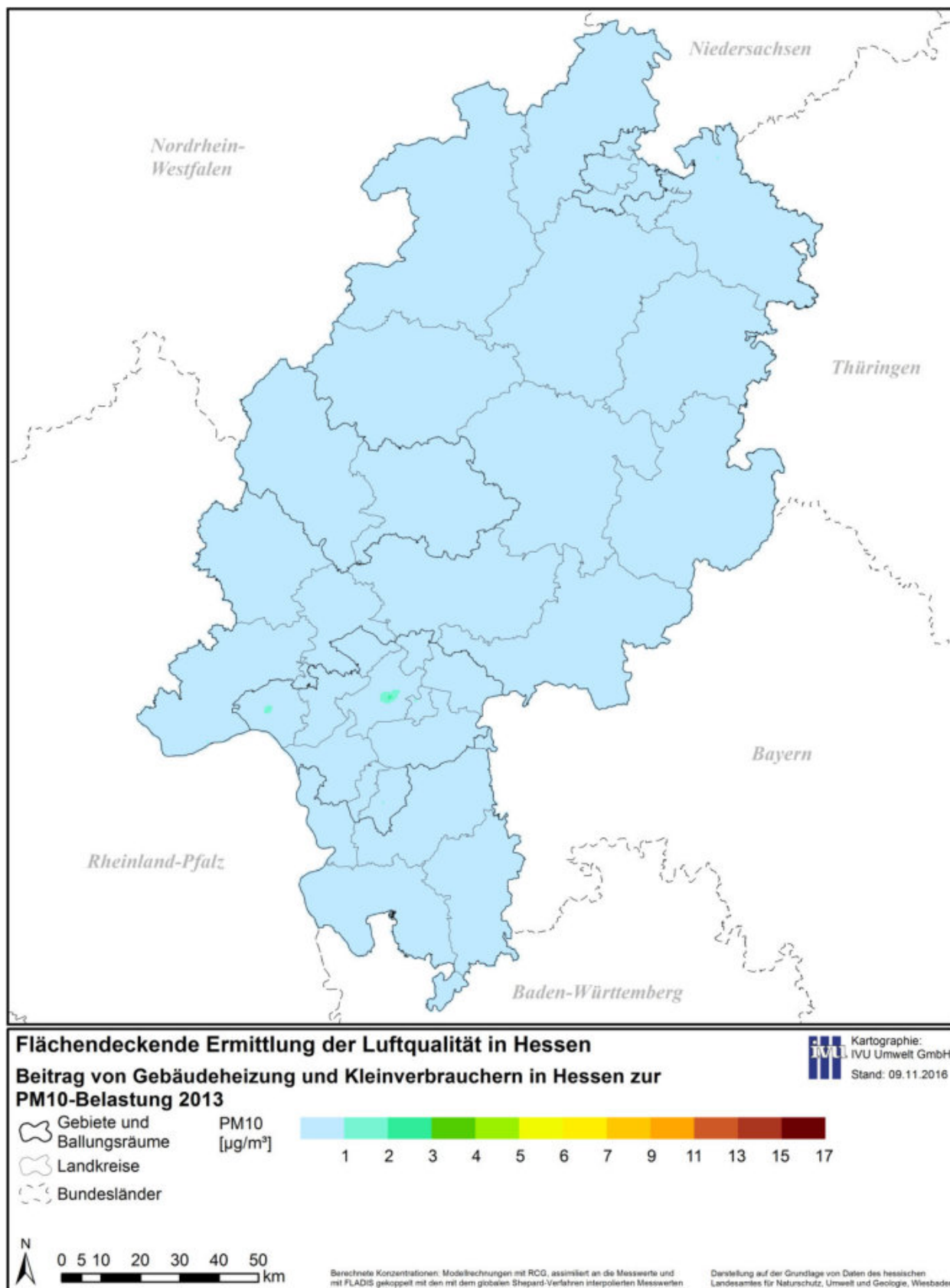


Abbildung 6-16: Beitrag von Gebäudeheizung und Kleinverbrauchern in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

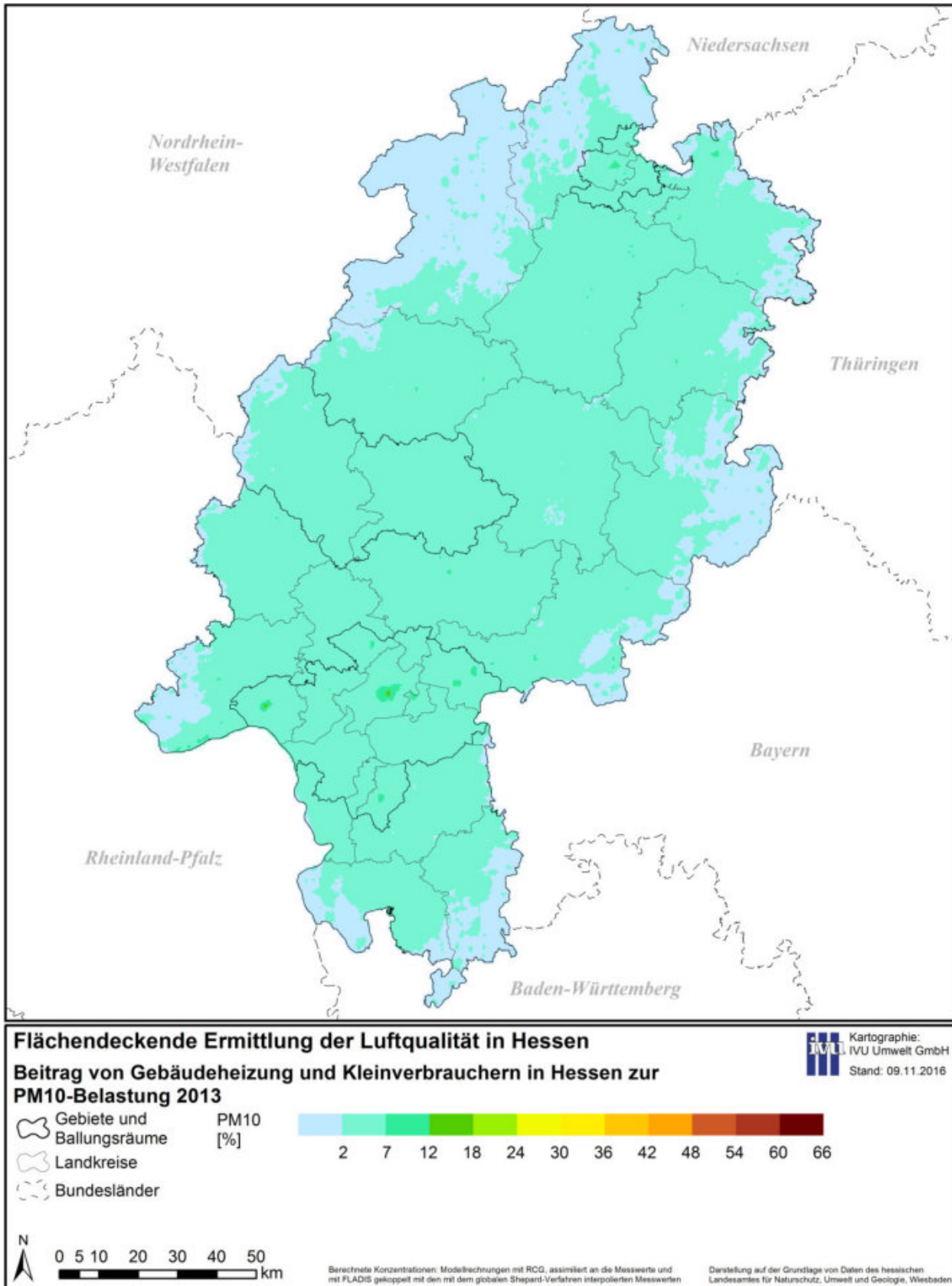


Abbildung 6-17: Relativer Beitrag von Gebäudeheizung und Kleinverbrauchern in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

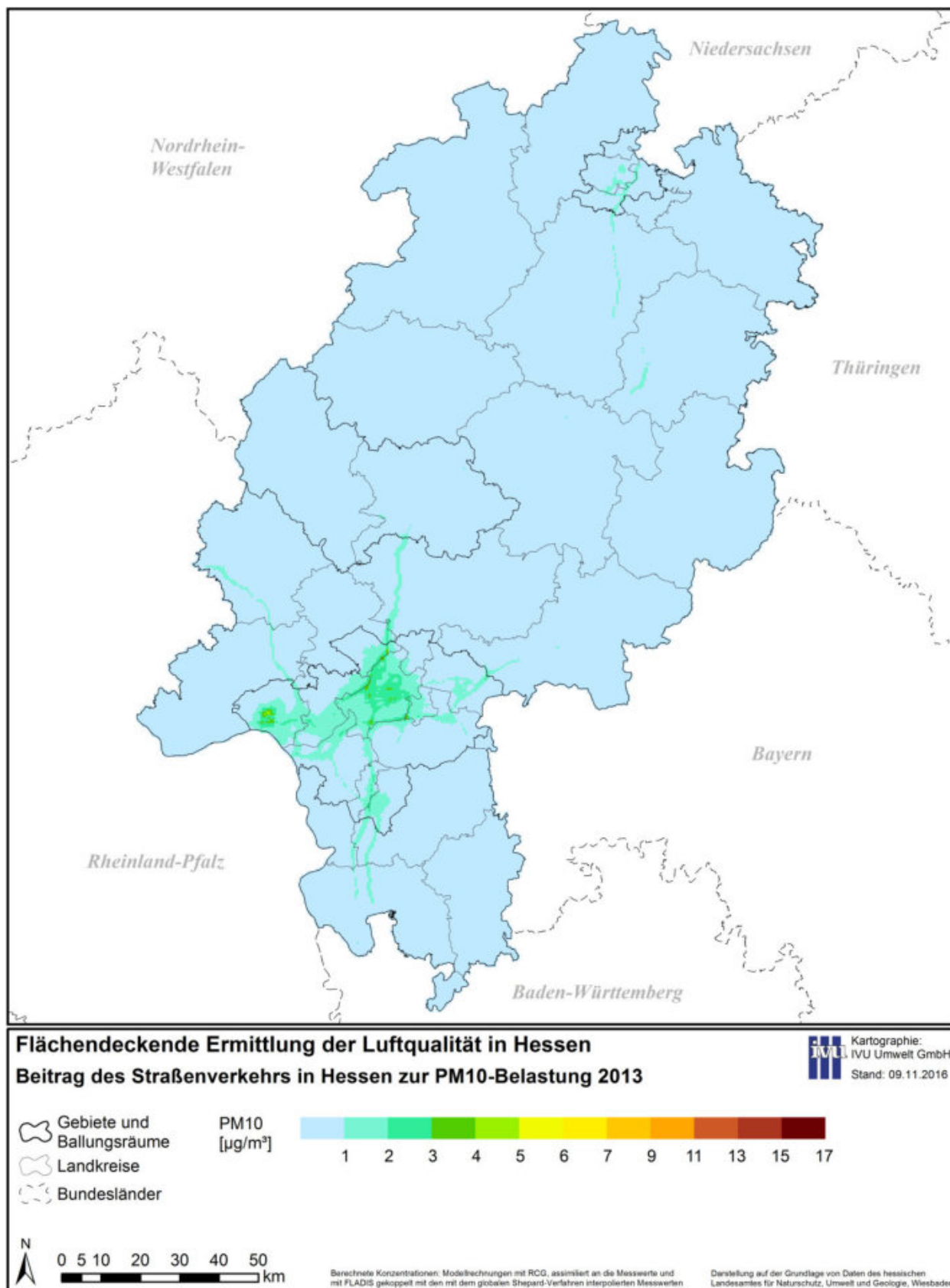


Abbildung 6-18: Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

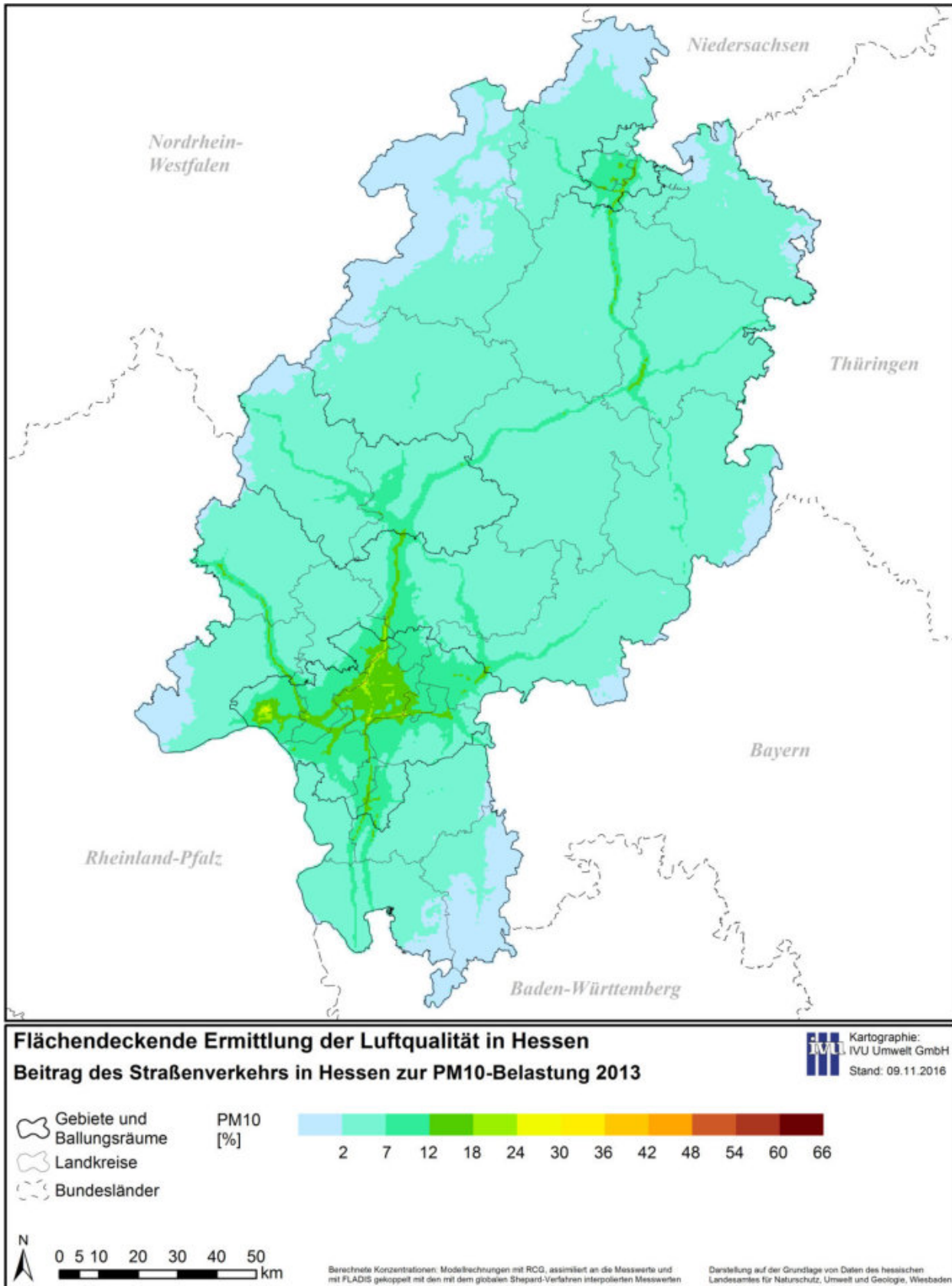


Abbildung 6-19: Relativer Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

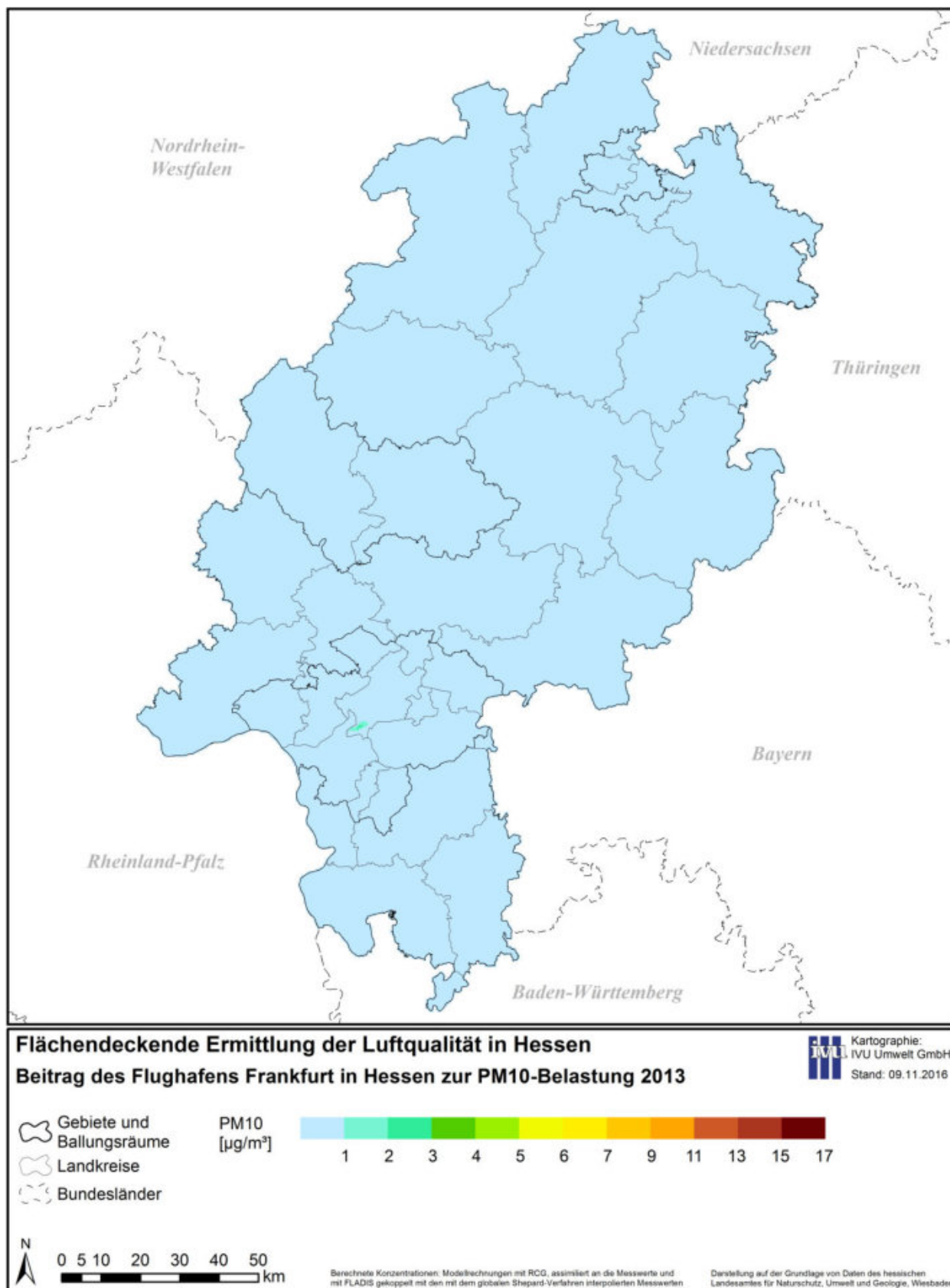


Abbildung 6-20: Beitrag des Flughafens Frankfurt in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

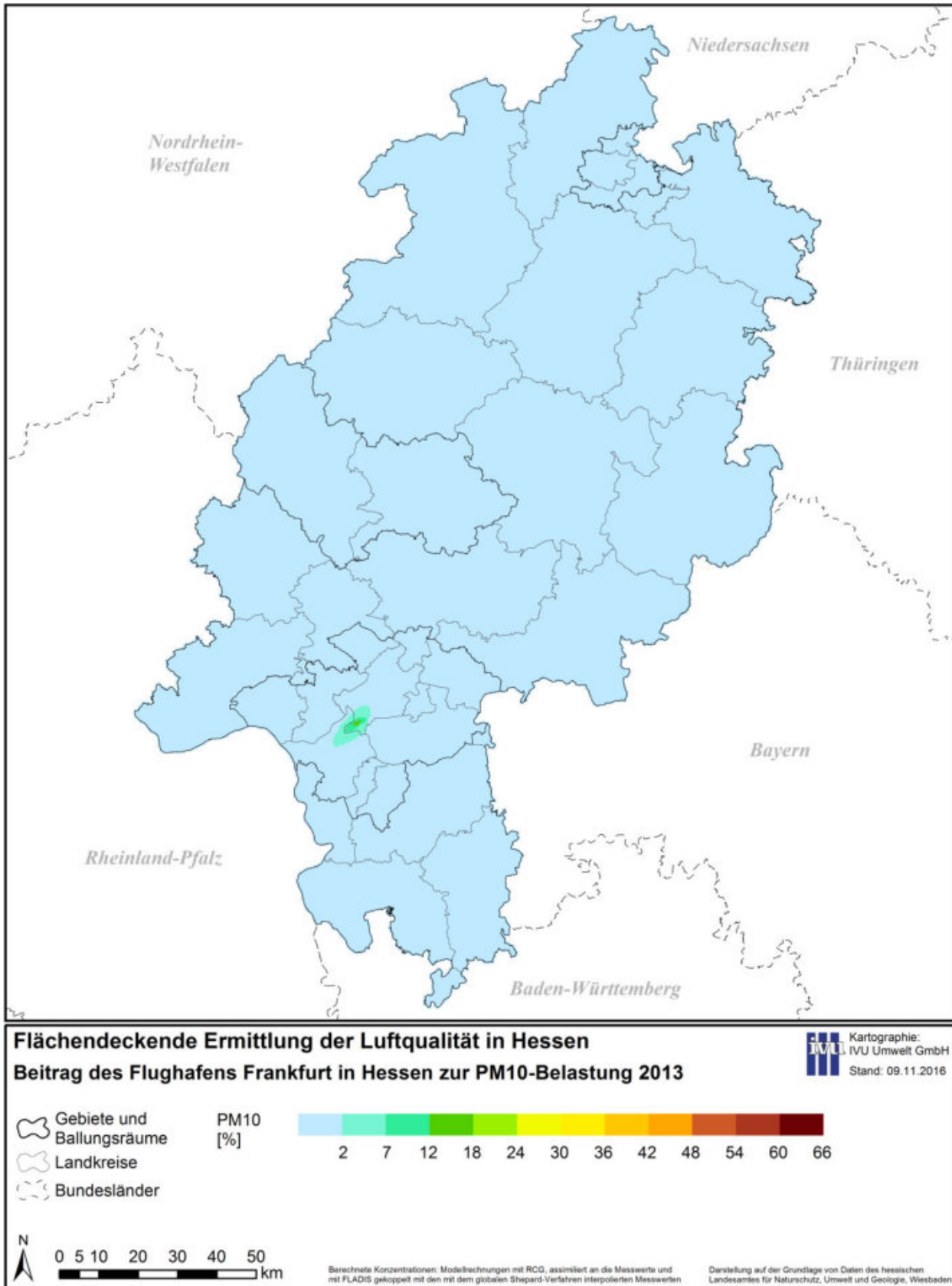


Abbildung 6-21: Relativer Beitrag des Flughafens Frankfurt in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

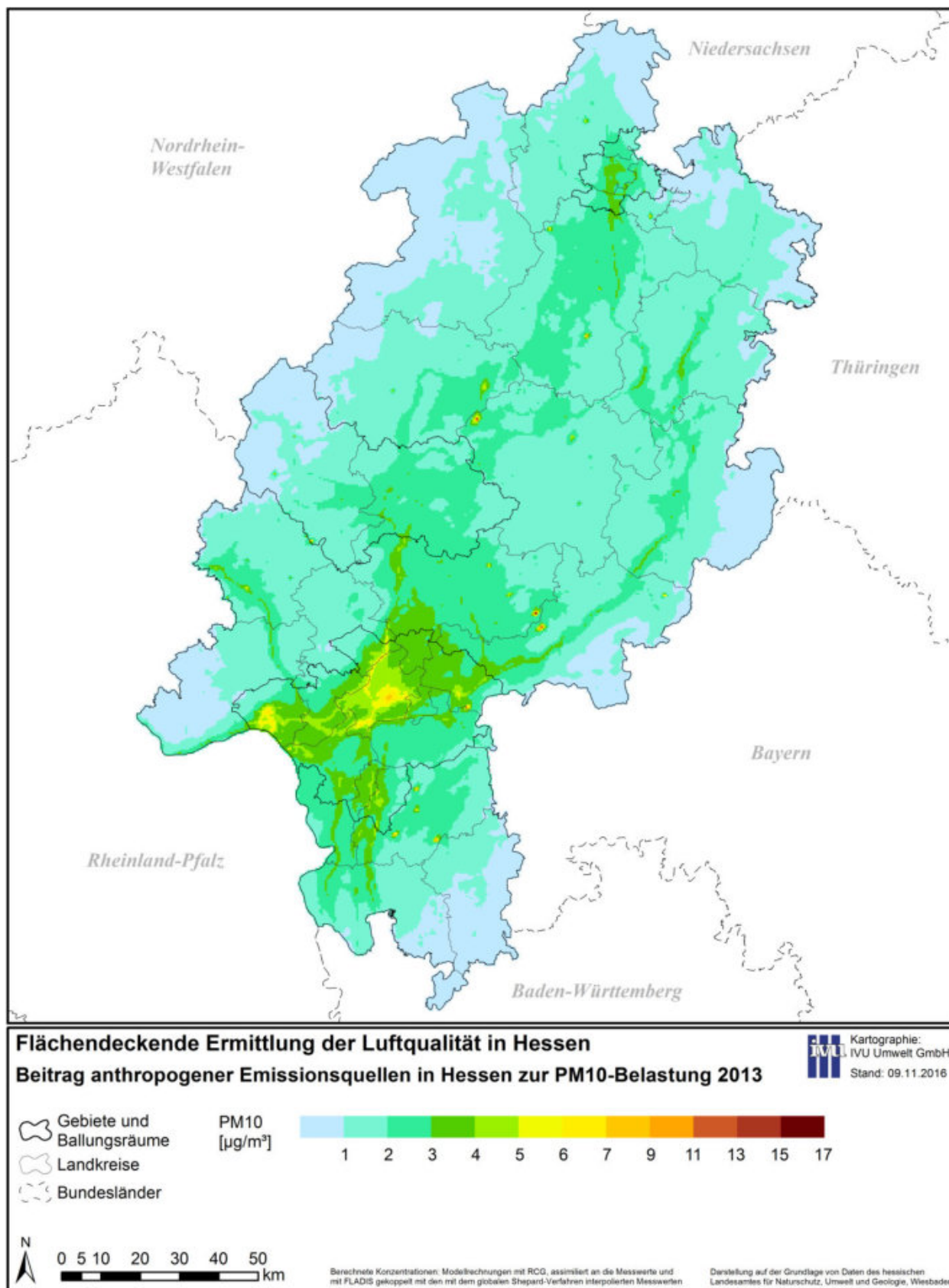


Abbildung 6-22: Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

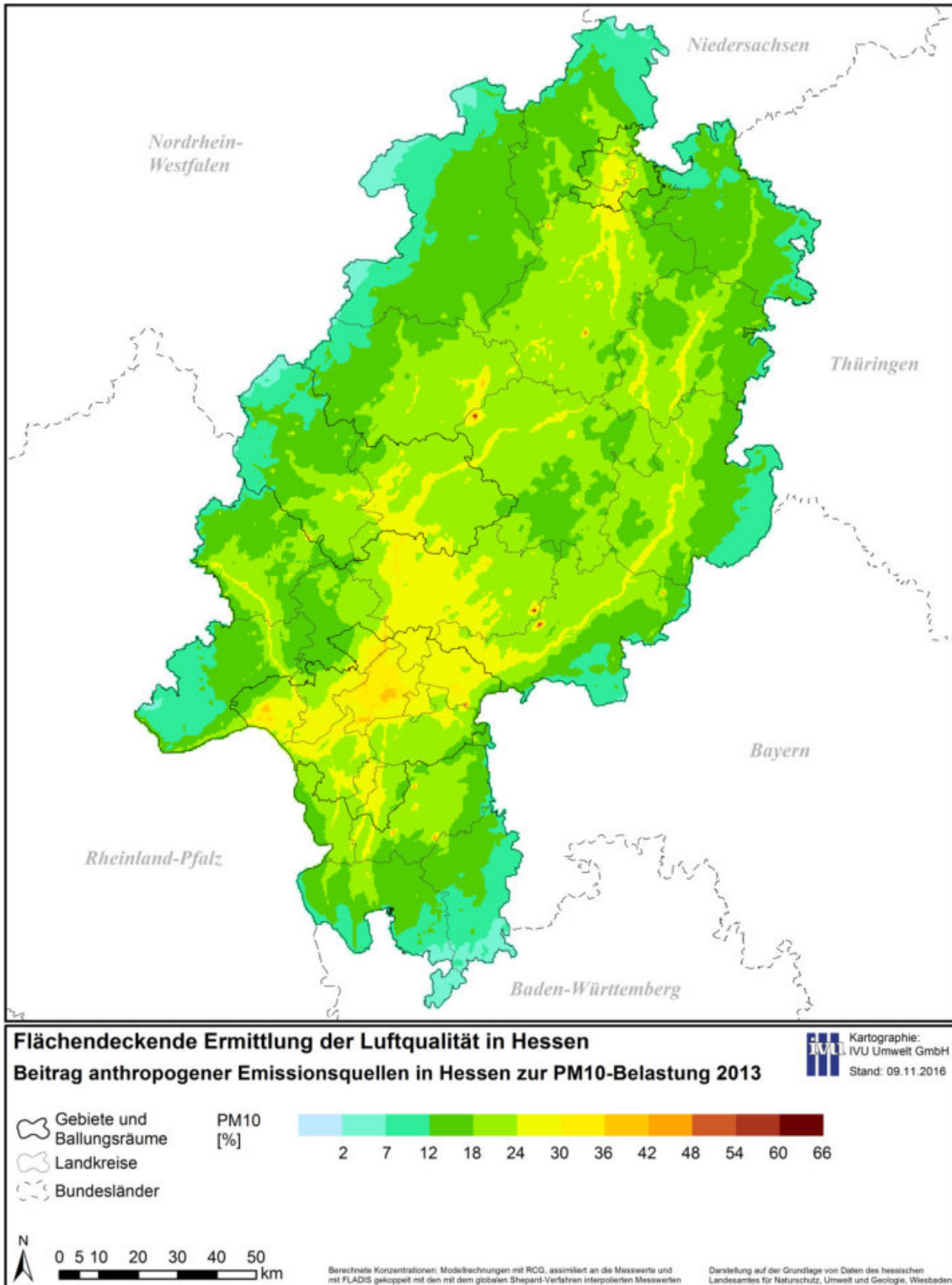


Abbildung 6-23: Relativer Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2013 (reines RCG-Modellergebnis)

6.1.3 Prognose 2020

Die für die Prognose verwendeten Emissionsdaten sind in Abschnitt 4.5.11 dokumentiert. An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass nach gegenwärtigem Kenntnisstand davon auszugehen ist, dass die in diesen Prognosedaten enthaltenen NO_x-Emissionsfaktoren von Euro-6-Diesel-Pkw zu niedrig sind und daher die angesetzte Minderung der NO_x-Emissionen des Kfz-Verkehrs diesbezüglich zu groß ist. Es sei weiterhin angemerkt, dass für die Prognose-Berechnungen für 2020 nicht nur für die Emissionen in Hessen, sondern auch für die Emissionen im übrigen Deutschland und in Europa der prognostizierte Stand 2020 verwendet wurde. Zur Erstellung neuer Randbedingungen unter der Berücksichtigung dieser großräumigen Emissionsveränderungen mussten für die Prognose 2020 daher auch die übergeordneten Nester (Nest 0 – Europa bis Nest 2 – regionale Skala) neu berechnet werden.

Für die Prognose 2020 zeigen die Darstellungen in Abbildung 6-24 bis Abbildung 6-26 die Ergebnisse der Modellrechnungen mit RCG, die an Messwerte assimiliert wurden und mit FLADIS mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten gekoppelt wurden (s. Abschnitt 5.3). Als hypothetische Messwerte für 2020 wurden dabei die mit der Delta-Methode für das Jahr 2020 angepassten Messwerte angesetzt (s. Abschnitt 5.3.1.5). Bei PM₁₀ ist entsprechend Abschnitt 6.1.1 zusätzlich zu den Jahresmittelwerten die Anzahl der Tage mit einem Tagesmittelwert > 50 µg/m³ in Abbildung 6-26 dargestellt.

In Abbildung 6-27 bis Abbildung 6-30 finden sich ergänzende Darstellungen der absoluten und relativen Veränderungen der Prognose 2020 gegenüber 2013 für die Jahresmittelwerte von NO₂ und PM₁₀. Da es sich hier um Differenzen handelt, die zum Teil auch nur einen Wertebereich von wenigen µg/m³ oder Prozent aufweisen, wurden die Differenzen in Abbildung 6-27 bis Abbildung 6-30 nicht als gerundete Werte, sondern direkt als die Differenzen zwischen den nicht gerundeten Werten für 2013 und der Prognose 2020 dargestellt. Die Klassengrenzen sind dabei an ihrem jeweiligen größeren Wert einschließend, so dass beispielsweise eine Abnahme des NO₂-Jahresmittelwerts in Höhe von -2.0 µg/m³ in Abbildung 6-27 in der Klasse -3 bis -2 dargestellt wird.

Für die dargestellten Kenngrößen sind in Tabelle 6-3 die Minimal- und Maximalwerte, zusammen mit denen des Basisfalls, aufgeführt. Tabelle 6-4 enthält die minimalen und maximalen Änderungen der Prognose gegenüber 2013. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen Minimal- und Maximalwerte in den beiden Fällen nicht unbedingt an den gleichen Orten auftreten müssen. Ebenso wenig müssen die Orte der minimalen und maximalen Änderungen zwischen den Fällen aus Tabelle 6-4 mit denen der minimalen und maximalen Absolutwerte aus Tabelle 6-3 zusammenfallen.

Tabelle 6-3: Minimal- und Maximalwerte 2013 und in der Prognose 2020

	Jahresmittelwerte in [µg/m ³]				Anzahl Tage mit PM ₁₀ -Tagesmittelwert > 50 µg/m ³	
	NO ₂		PM ₁₀		Min	Max
	Min	Max	Min	Max		
Basisfall 2013	6.4	43.3	10.5	24.9	0	18
Prognose 2020	4.7	37.2	9.6	23.9	0	18

Tabelle 6-4: Minimal- und Maximalwerte der Änderungen der Prognose 2020 gegenüber 2013

Jahresmittelwerte	NO ₂		PM10	
	Min	Max	Min	Max
Absolute Änderung [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-11.0	-1.7	-2.1	-0.9
Relative Änderung [%]	-34.0	-13.4	-10.2	-4.0

Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 sowie Abbildung 6-24 bis Abbildung 6-30 zeigen im Vergleich mit dem Basisfall 2013 bei NO₂ und PM10 flächendeckend Rückgänge der Belastungen, die in Gebieten mit hoher Emissionsdichte deutlicher ausgeprägt sind als in den eher emissionschwachen Regionen.

Insgesamt nehmen die NO_x-Emissionen in Hessen von 2013 bis 2020 um 22 %, für den Straßenverkehr sogar um etwa 39 % ab (s. Tabelle 4-4 bis Tabelle 4-6). Die NO₂-Belastung verringert sich von 2013 bis 2020 von unter 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bis zu 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mit den höchsten Abnahmen entlang der großen Verkehrsachsen (s. Abbildung 6-27). Die geringsten absoluten Abnahmen werden in den emissionsarmen Gebieten berechnet. Entsprechend der hohen Minderungsraten bei den Emissionen des Straßenverkehrs werden im Bereich der Verkehrsachsen auch die höchsten relativen Abnahmen (circa 30 bis 45 %) berechnet (s. Abbildung 6-28). Ansonsten liegen die erreichbaren NO₂-Minderungen großflächig im Bereich von 20 bis 25 %.

Entsprechend den geringeren PM10-Emissionsminderungen (-9 % über alle Quellengruppen) sind auch die bis 2020 für die PM10-Jahresmittelwerte erreichbaren Abnahmen geringer als bei NO₂ (s. Abbildung 6-29 und Abbildung 6-30). Die absoluten PM10-Minderungen liegen im Bereich von 1 bis 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die verkehrsbedingten PM10-Emissionen nehmen bis 2020 wegen des hohen Anteils der Aufwirbelungs- und Abriebemissionen kaum ab (PM10 -1 %, PM2.5 -21 %), dementsprechend zeichnen sich in den Karten der Änderungen die Gebiete hoher Verkehrsdichte auch sehr viel weniger in der Flächendarstellung ab, als bei den NO₂-Minderungen. Die relativen PM10-Abnahmen bewegen sich flächendeckend im Bereich von circa 7 bis 10 %, im Einflussbereich der bodennahen industriellen Quellen werden geringere Minderungen erreicht. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die industriellen Emissionen bis 2020 um circa 6 % zunehmen.

Abbildung 6-26 zeigt die für 2020 berechnete Anzahl von Tagen mit einem PM10-Tagesmittelwert > 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Der Vergleich mit der entsprechenden Abbildung für 2013 in Abbildung 6-3 zeigt eine deutliche Verringerung der Anzahl von Überschreitungstagen, auch an den Orten mit hohen industriellen PM10-Emissionen, auch wenn das Maximum von 18 Tagen erhalten bleibt. Die Reduzierung der PM10-Kenngrößen in der Umgebung der industriellen Standorte trotz einer Erhöhung der Industrie-Emissionen bis 2020 um 6 % ist sowohl auf die Minderungsbeiträge der anderen Quellengruppen in Hessen als auch auf die Minderung der Emissionen außerhalb des Landes zurückzuführen, die über den Ferntransport vor allem zu einer Abnahme der aus gasförmigen Vorläufern gebildeten sekundären Aerosole beitragen.

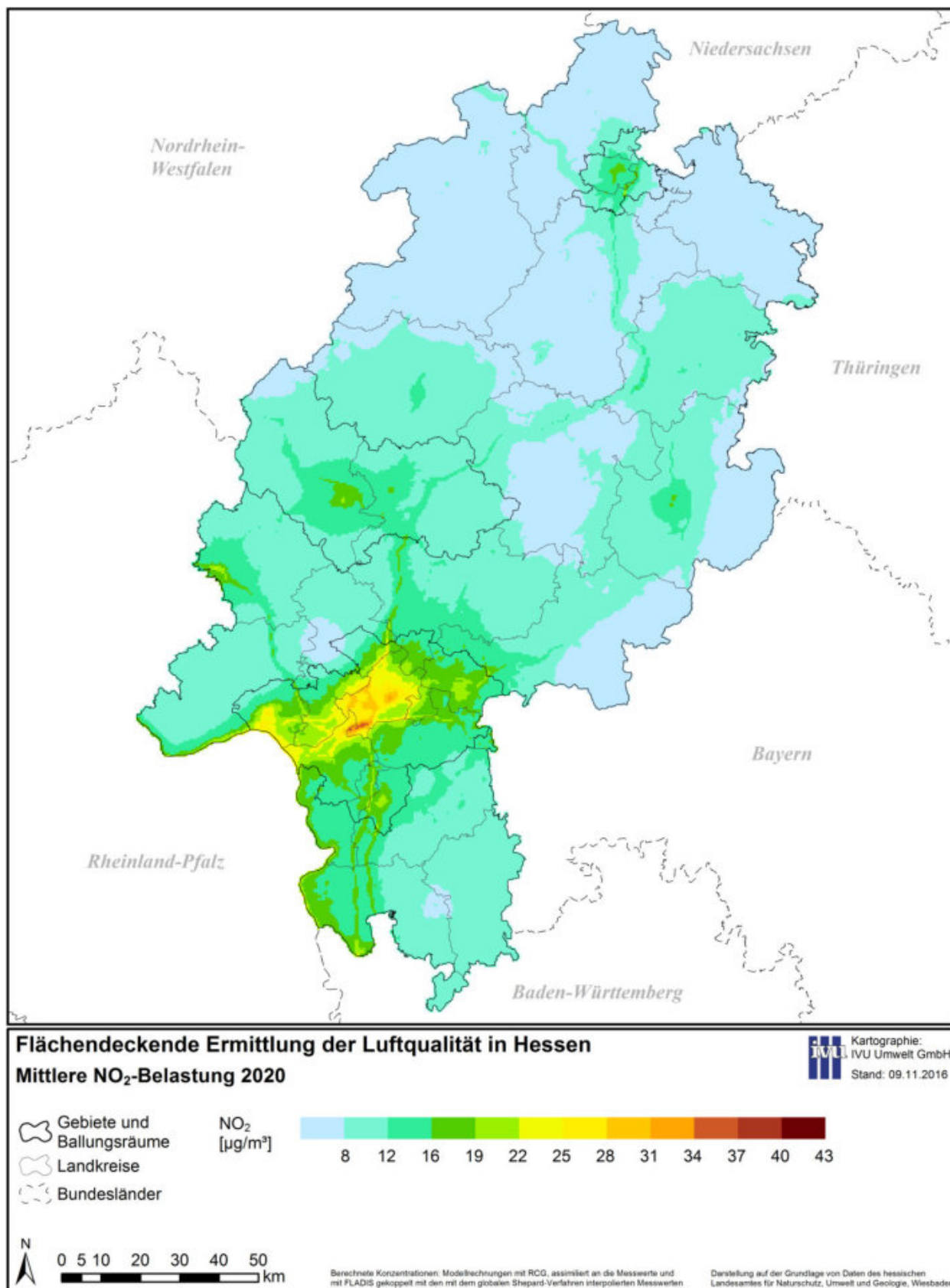


Abbildung 6-24: Mittlere NO₂-Belastung 2020 (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten)

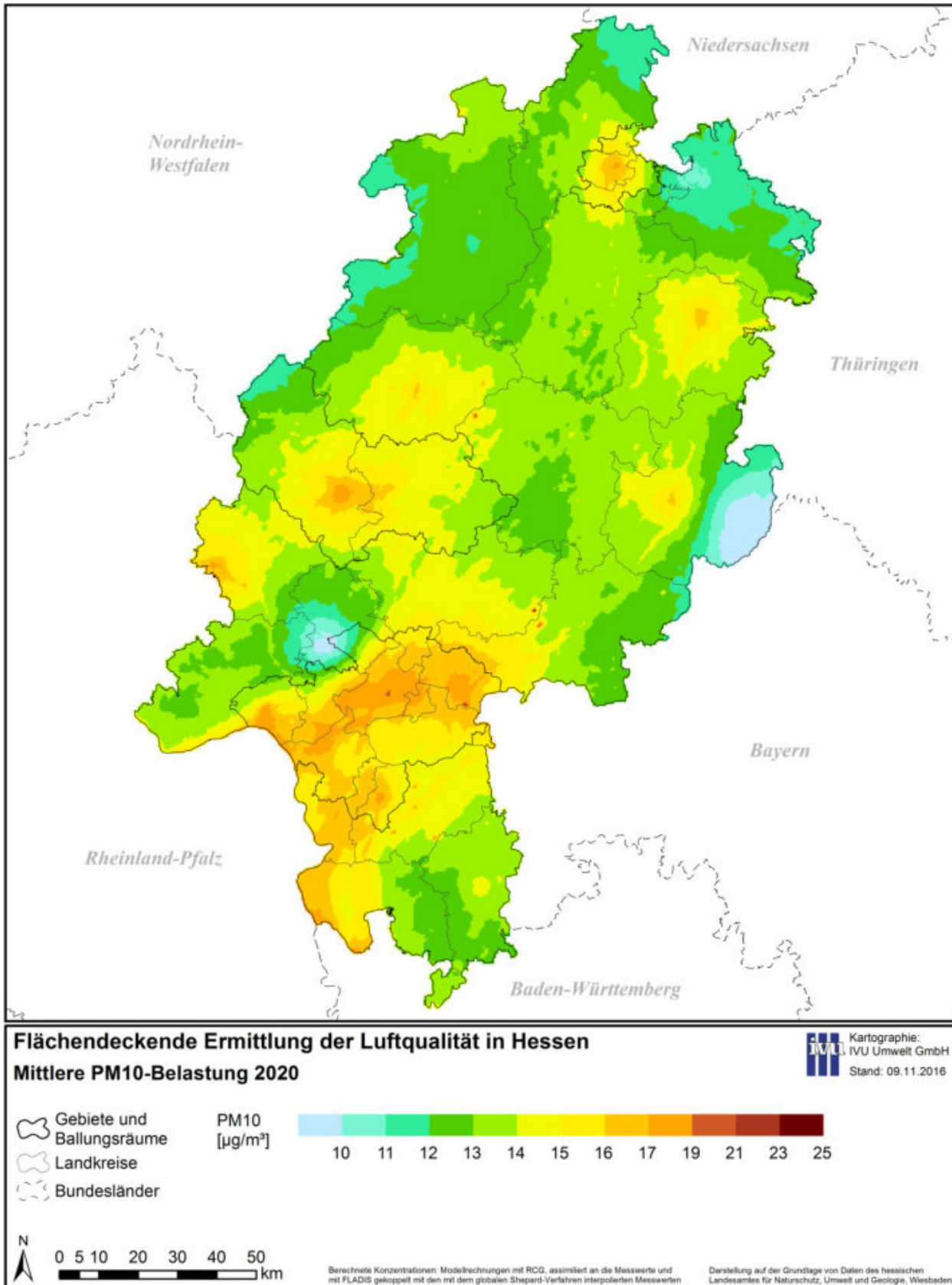


Abbildung 6-25: Mittlere PM10-Belastung 2020 (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten)

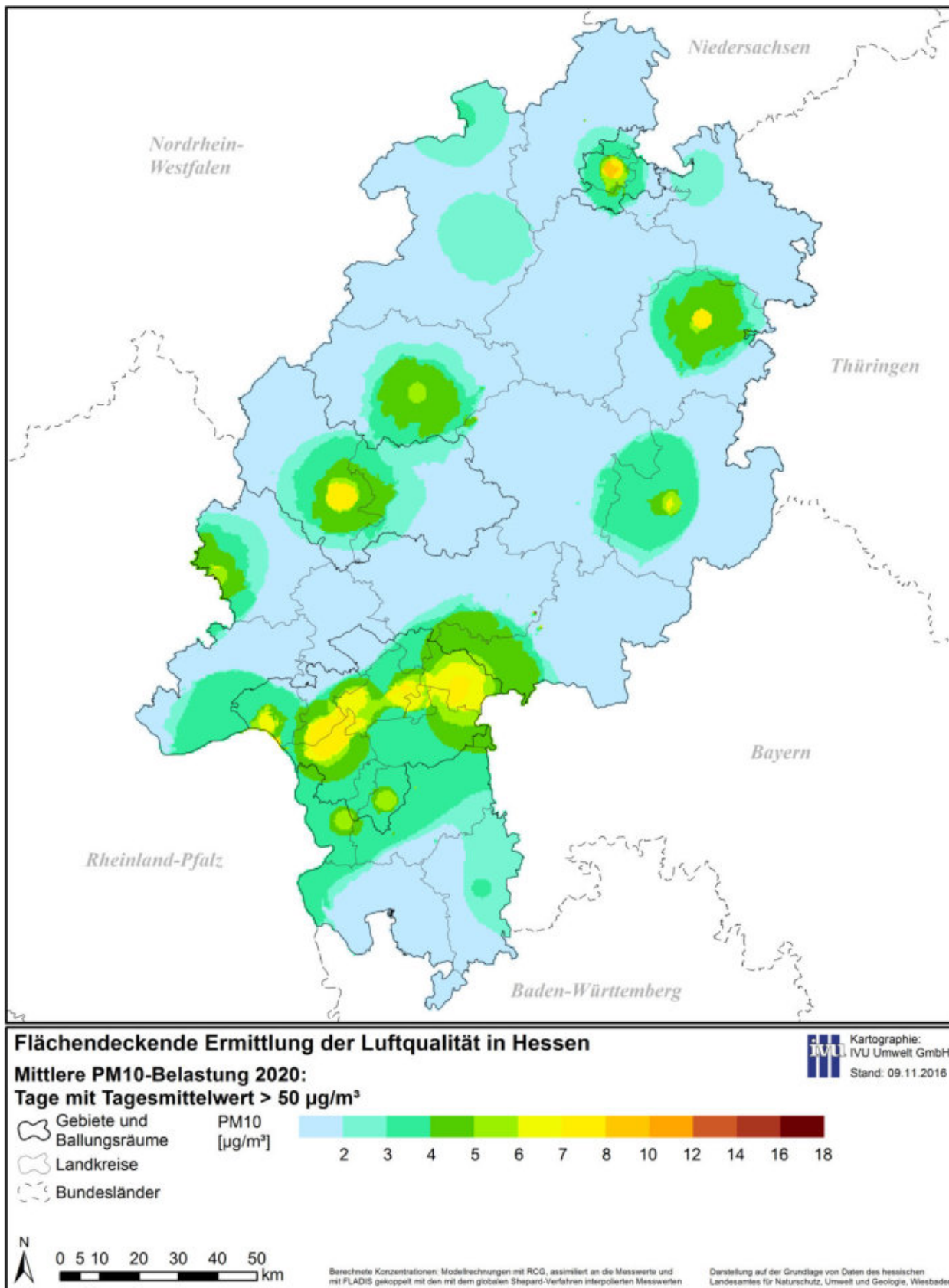


Abbildung 6-26: Mittlere PM10-Belastung 2020: Anzahl der Tage mit einem Tagesmittelwert > 50 µg/m³ (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten)

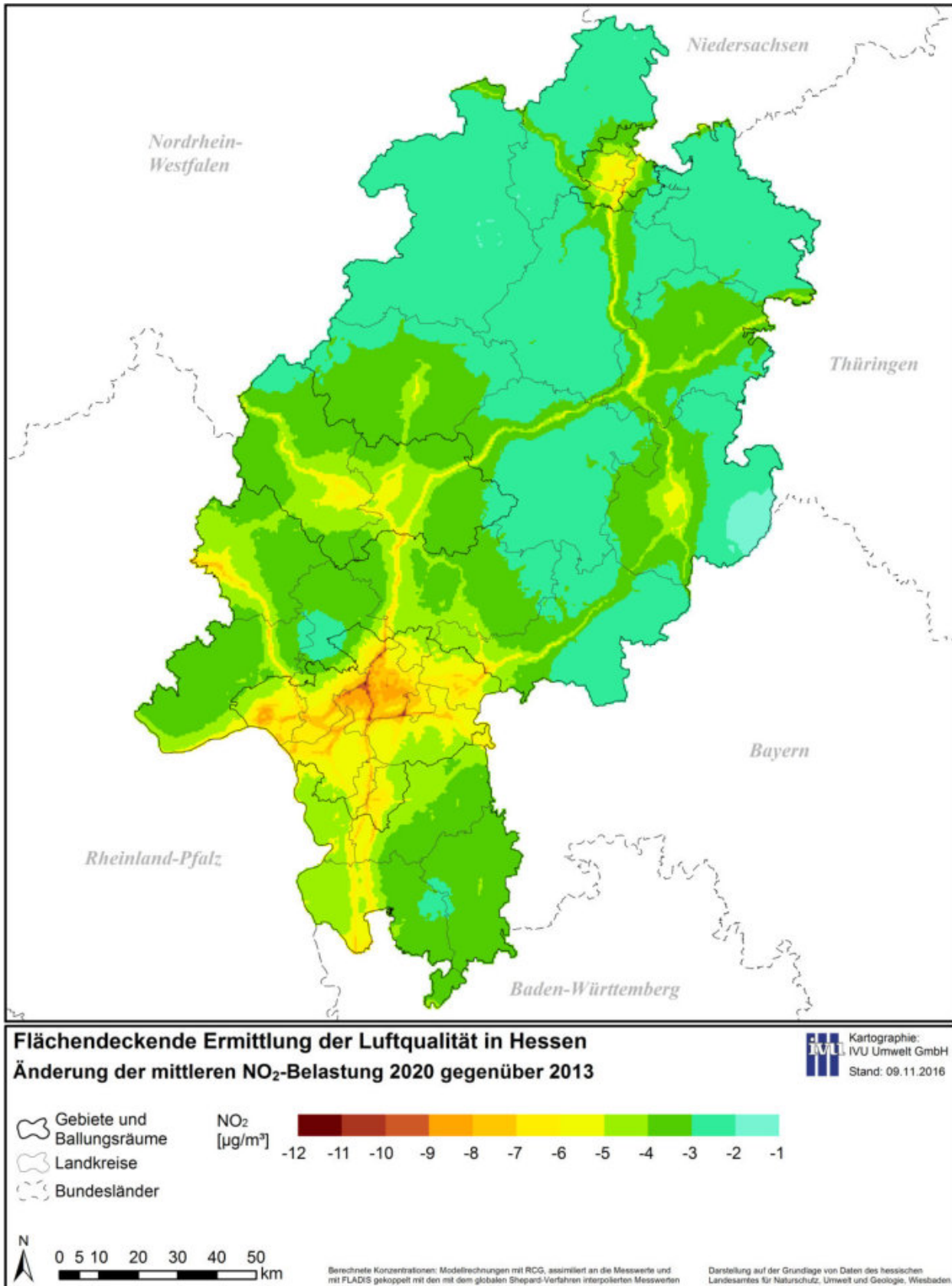


Abbildung 6-27: Absolute Änderung der NO₂-Belastung 2020 gegenüber 2013 (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten)

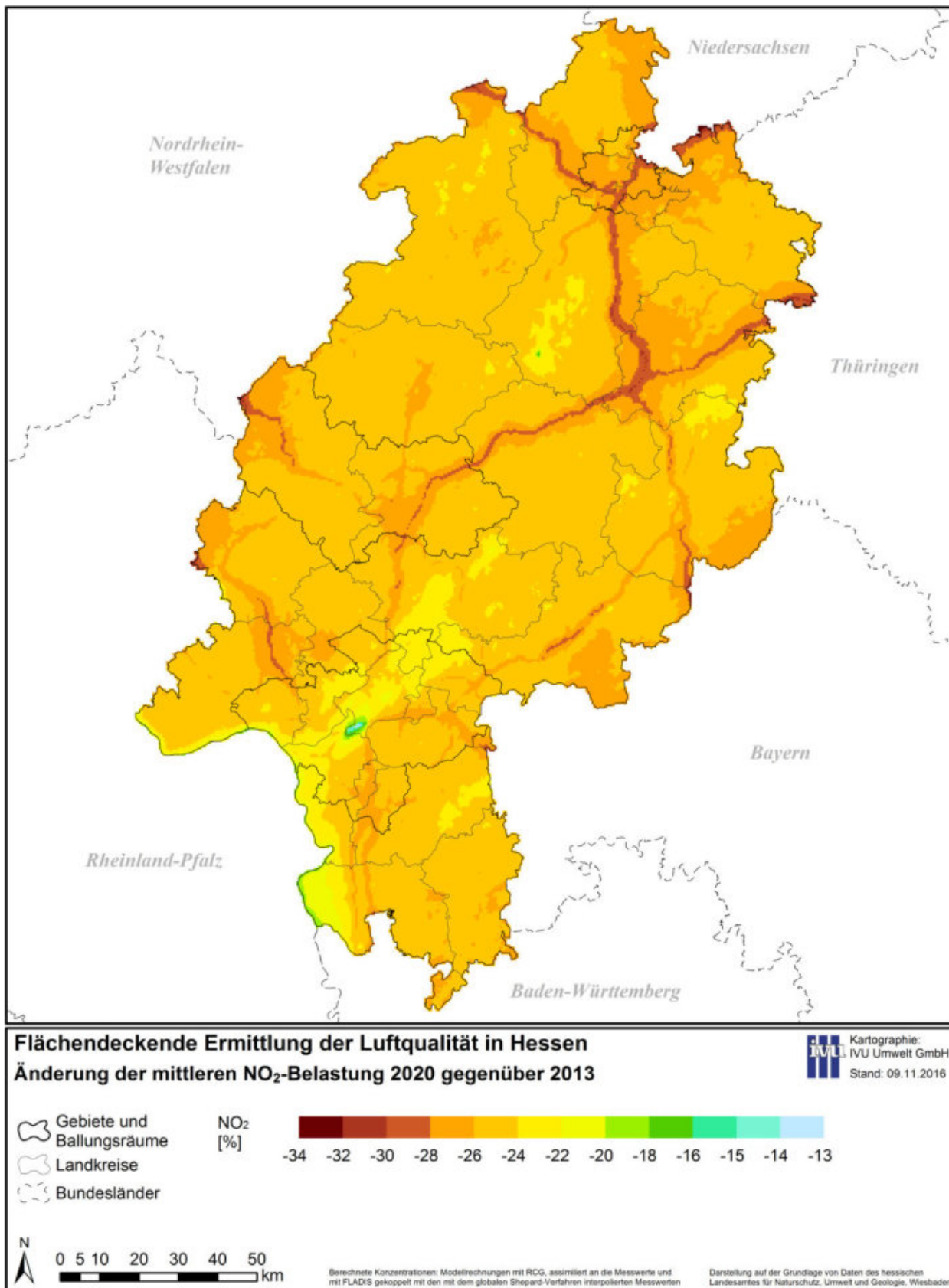


Abbildung 6-28: Relative Änderung der NO₂-Belastung 2020 gegenüber 2013 (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten)

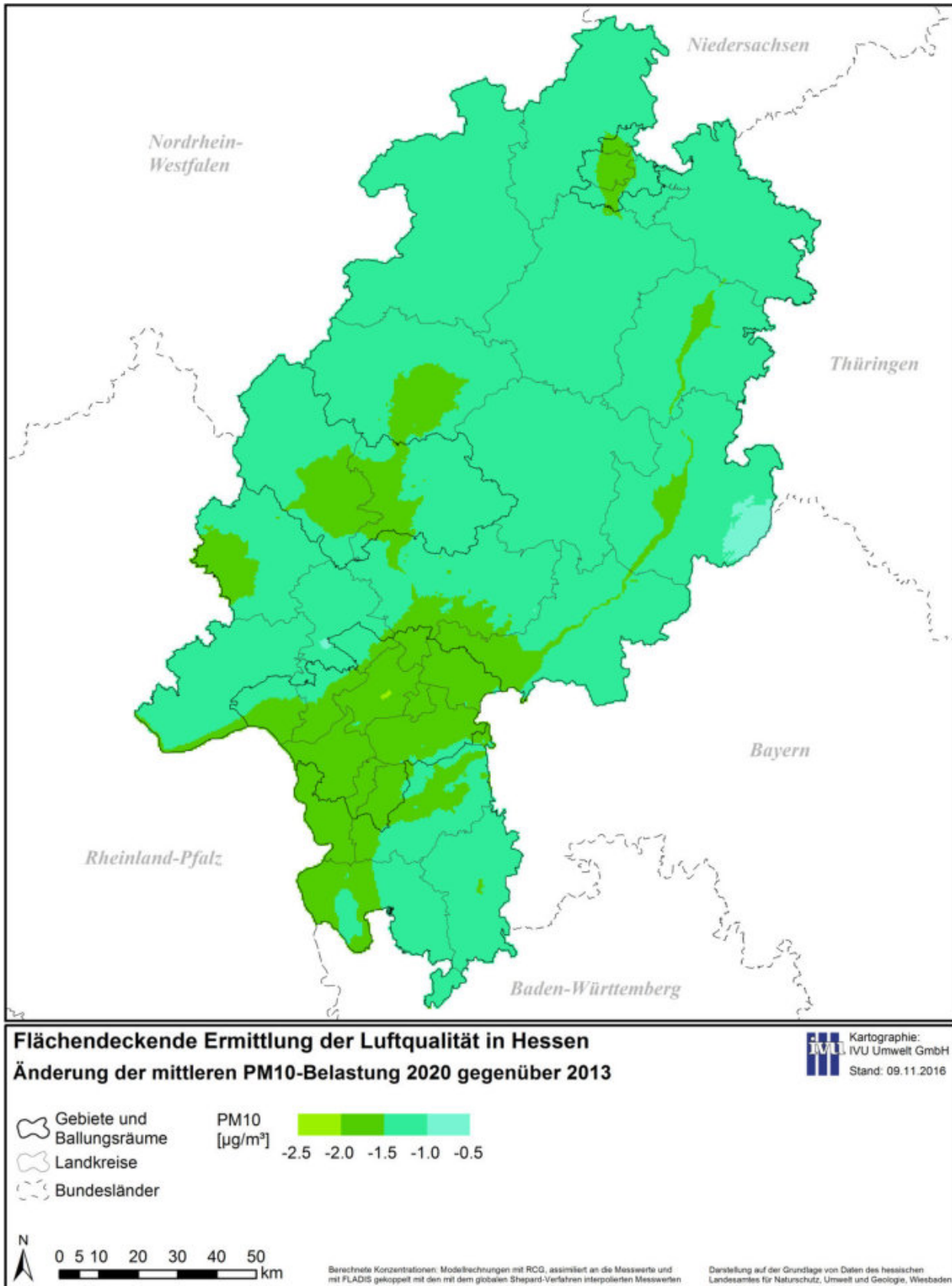


Abbildung 6-29: Absolute Änderung der PM10-Belastung 2020 gegenüber 2013 (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten)

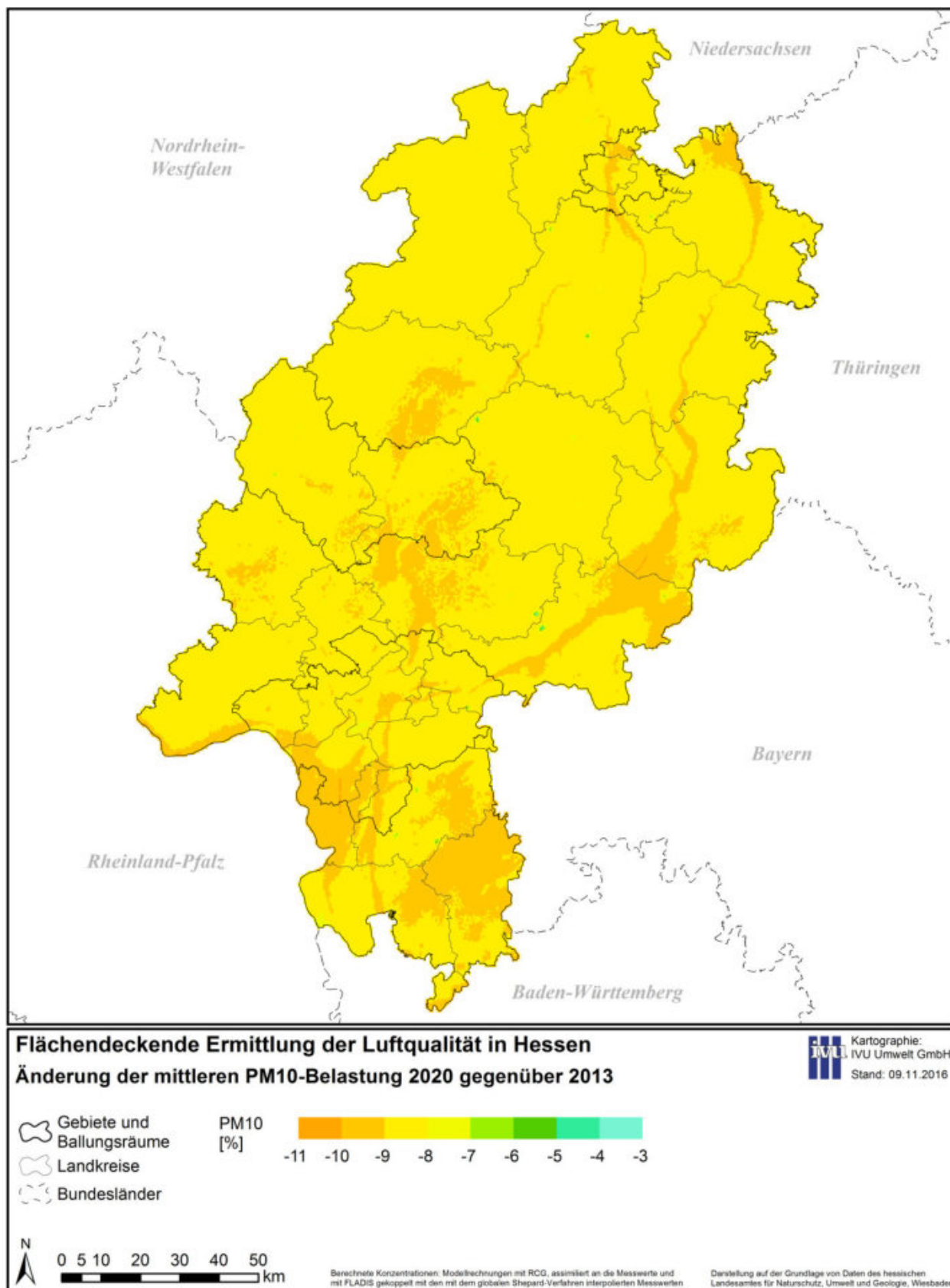


Abbildung 6-30: Relative Änderung der PM10-Belastung 2020 gegenüber 2013 (Modellrechnungen mit RCG, assimiliert an die Messwerte und mit FLADIS gekoppelt mit den mit dem globalen Shepard-Verfahren interpolierten Messwerten)

6.1.4 Beiträge ausgewählter Quellengruppen in der Prognose 2020

In diesem Abschnitt sind die Beiträge der Hessischen Emissionen der zwei Quellengruppen Straßenverkehr und aller anthropogener Quellen zur Belastung in Hessen in Abbildung 6-31 bis Abbildung 6-34 für NO₂ und in Abbildung 6-35 bis Abbildung 6-38 für PM₁₀ als absolute Beiträge in µg/m³ und als relative Beiträge zur Immissionsbelastung in % dargestellt. Auch hier gelten die Anmerkungen aus Abschnitt 6.1.2 zur Berechnungsmethodik und zur Interpretation der Werte.

Für die dargestellten Kenngrößen sind in Tabelle 6-5 die Minimal- und Maximalwerte aufgeführt. Dabei sei darauf hingewiesen, dass diese Minimal- und Maximalwerte der Beiträge der einzelnen Quellengruppen an verschiedenen Orten auftreten und daher nicht addiert werden können.

Tabelle 6-5: Minimal- und Maximalwerte der Beiträge der Quellengruppen der Prognose 2020

Quellengruppe	Beitrag			
	NO ₂		PM ₁₀	
	Min	Max	Min	Max
Beitrag als Jahresmittelwert in µg/m³				
Straßenverkehr	0.2	19.8	0.0	4.4
anthropogene Quellen	0.4	36.3	0.3	16.8
Relativer Beitrag zum Jahresmittelwert in %				
Straßenverkehr	3.0	81.2	0.5	25.9
anthropogene Quellen	8.6	91.2	2.8	66.2

Die relativen Anteile des Straßenverkehrs an den NO₂-Immissionen 2020 ändern sich kaum im Vergleich zu den Anteilen an den NO₂-Immissionen 2013. (4 bis 84 % für 2013, 3 bis 81 % für 2020). Dies gilt auch für die Verteilung der Änderungen (siehe Abbildung 6-9 und Abbildung 6-32), da in die Fortschreibung der Emissionen von 2013 nach 2020 keine eventuellen Strukturveränderungen einfließen. Absolut gesehen sinkt der maximale Beitrag der Verkehrsemissionen von knapp 30 µg/m³ für den Referenzfall 2013 auf knapp 20 µg/m³ für die Prognose 2020.

Ähnliches gilt auch für den Beitrag aller anthropogenen Quellen in Hessen zu der NO₂-Immission 2020. Der Bereich der relativen Anteile bleibt nahezu identisch und schwankt in Hessen zwischen knapp 9 % und 91% (2013: 8 % bis 90 %). Auch an der Verteilung dieser Änderungen ändert sich wenig (siehe Abbildung 6-13 und Abbildung 6-34). Absolut gesehen sinkt der maximale Beitrag der anthropogenen Emissionen in Hessen von circa 39 µg/m³ für den Referenzfall 2013 auf circa 36 µg/m³ für die Prognose 2020. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die maximalen NO₂-Konzentrationen im Bereich des Autobahnkreuzes „Frankfurter Kreuz“ am Flughafen Frankfurt berechnet werden. Die prognostizierten Zunahmen der flughafenbedingten NO_x-Emissionen bis 2020 (+16 %) heben in diesem Bereich einen Teil der prognostizierten Abnahmen der NO_x-Emissionen des Straßenverkehrs (-39 %) wieder auf. Außerhalb des Flughafenbereichs sind die absoluten Beiträge der hessischen Emissionen zu den NO₂-Immissionen des Prognosejahrs 2020 zum Teil deutlich niedriger als die entsprechenden Beiträge zu den NO₂-Immissionen des Referenzjahres 2013 was entsprechend dem Rückgang der Gesamtemissionen bis 2020 auch zu erwarten ist (siehe Abbildung 6-12 und Abbildung 6-33).

Die relativen und absoluten Beiträge der PM₁₀-Emissionen des Straßenverkehrs zu den PM₁₀-Immissionen 2013 bzw. 2020 unterscheiden sich nur geringfügig. (vergleiche Abbildung 6-18 mit Abbildung 6-35 bzw. Abbildung 6-19 mit Abbildung 6-36). Dies ist

auch nicht anders zu erwarten, da die PM10-Emissionen bis 2020 insgesamt nur um circa 9 % abnehmen und sich die PM10-Emissionen des Straßenverkehrs in der Summe der Beiträge aus der Grob- bzw. der Feinfraktion (PM2.5) bis 2020 kaum verändern.

Die relativen und absoluten Beiträge aller PM10-Emissionen in Hessen sind für das Prognosejahr 2020 in der Fläche etwas niedriger als für das Referenzjahr 2013 (vergleiche Abbildung 6-22 mit Abbildung 6-37 bzw. Abbildung 6-23 mit Abbildung 6-38). Die absoluten und relativen maximalen Änderungen bleiben aber nahezu unverändert. Die flächenhaften Änderungen der Beiträge sind hauptsächlich auf die Abnahmen der PM10-Emissionen in den Quellengruppen Gebäudeheizung und Kleinverbraucher, sonstiger Verkehr und Landwirtschaft zurückzuführen (Tabelle 4-4 bis Tabelle 4-6). Die maximalen Beiträge der hessischen Emissionen zur PM10-Belastung (64% für 2013, 66% für 2020) bleiben nahezu unverändert, da diese lokal im Bereich einiger hoher bodennahen Emittenten der Verursachergruppe Industrie berechnet werden. Für diese Quellengruppe wird bis 2020 eine Zunahme der PM10-Emissionen um 6% angesetzt (Tabelle 4-4 bis Tabelle 4-6).

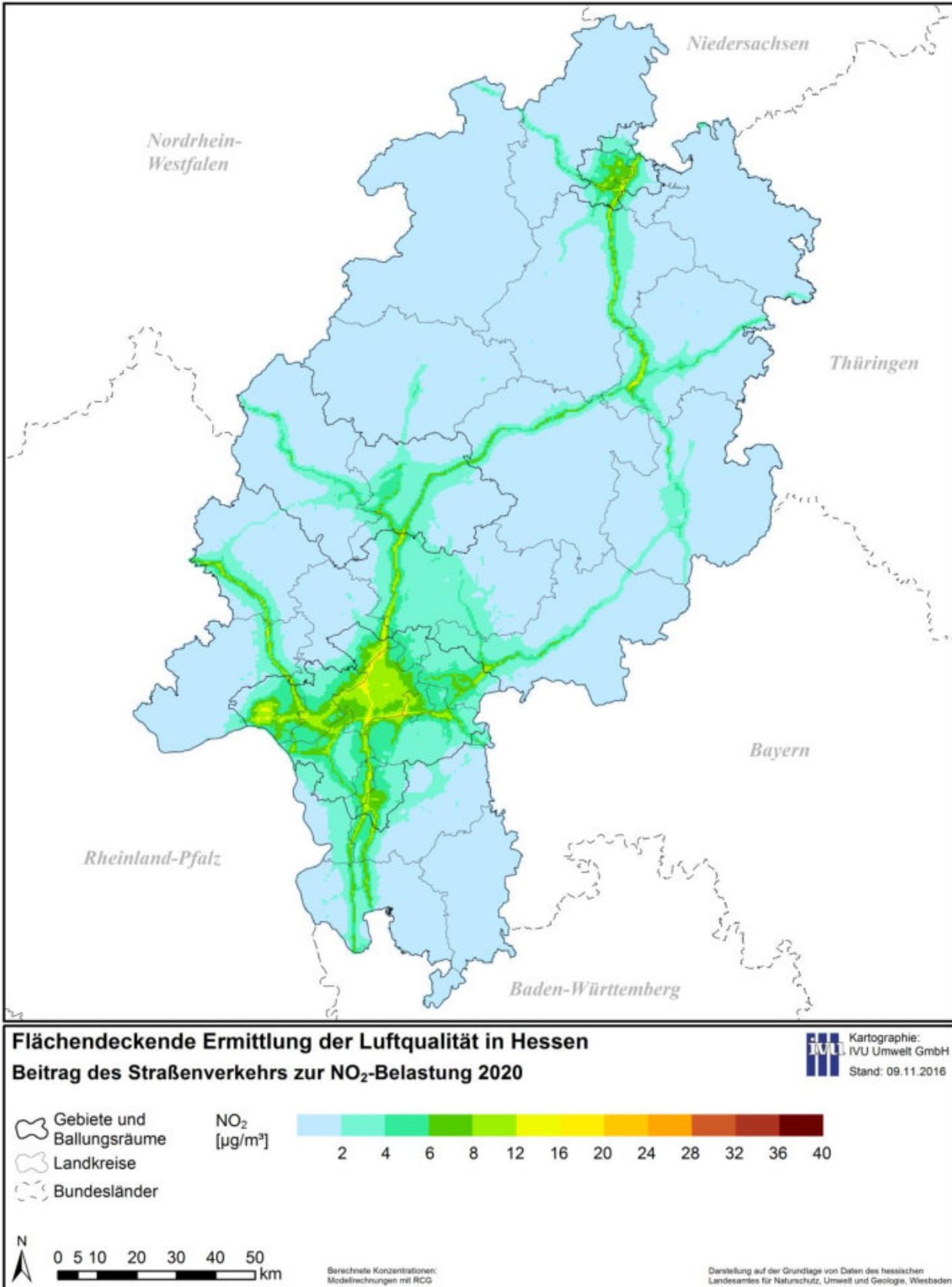


Abbildung 6-31: Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2020 (reines RCG-Modellergebnis)

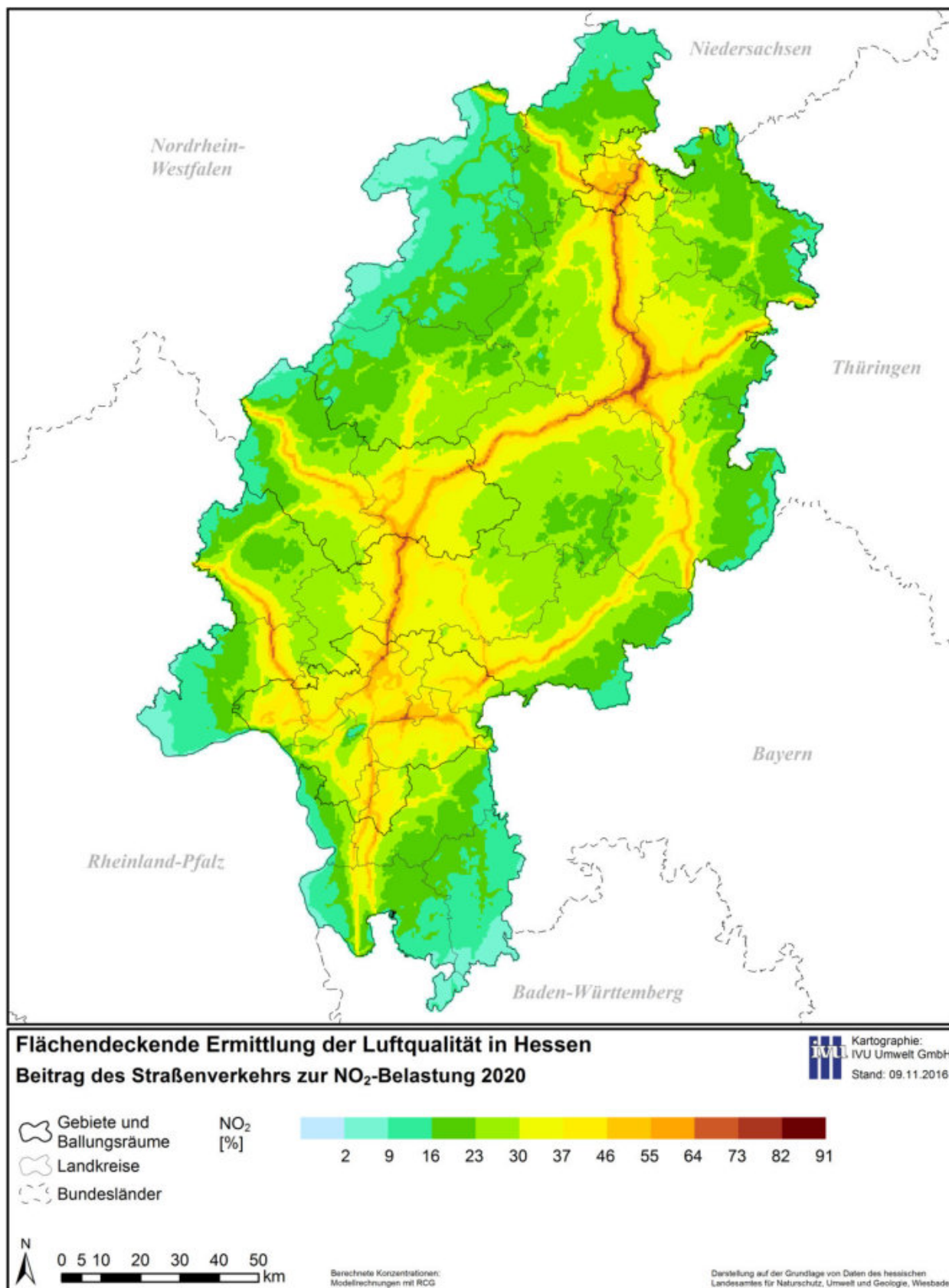


Abbildung 6-32: Relativer Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2020 (reines RCG-Modellergebnis)

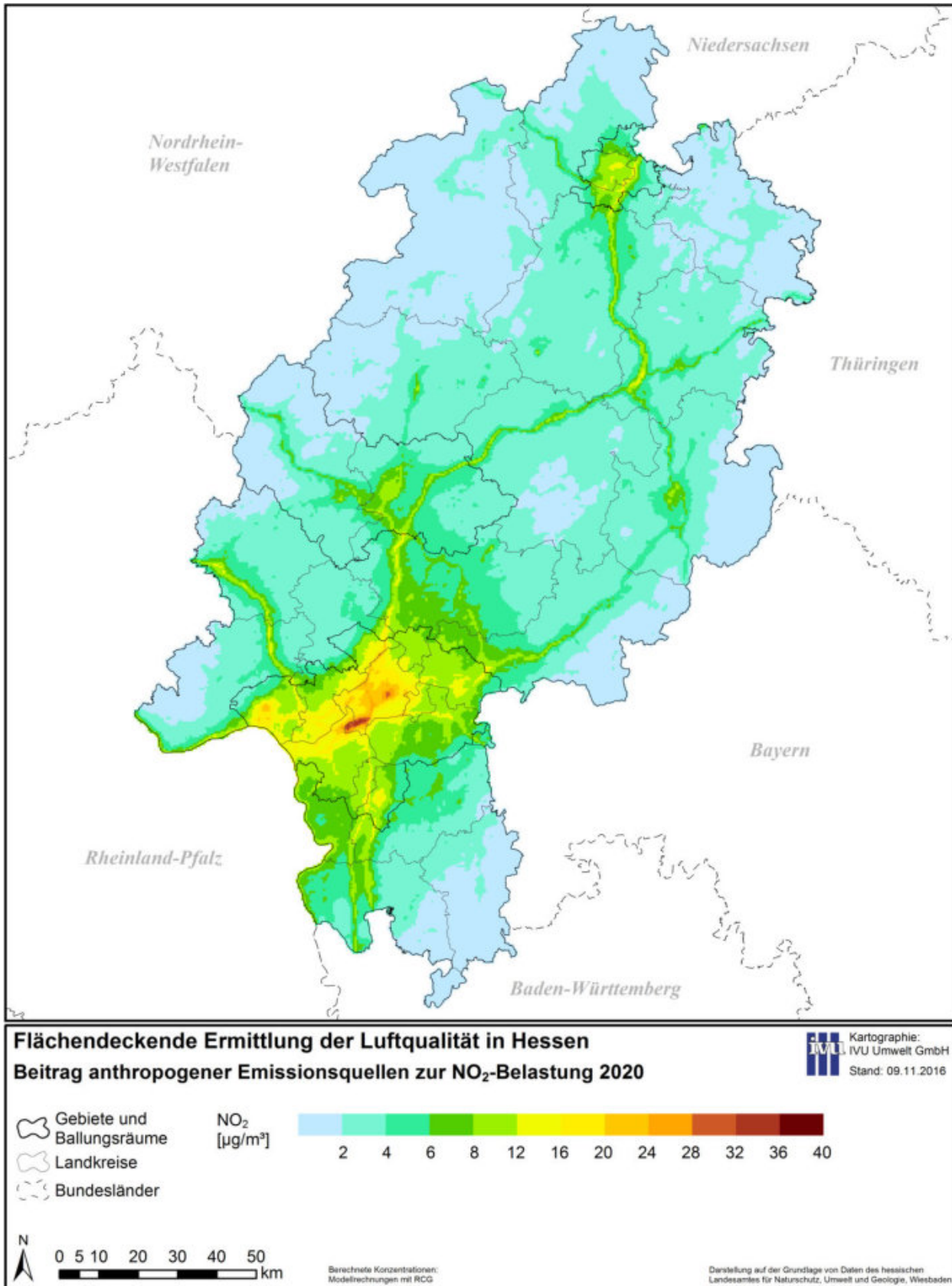


Abbildung 6-33: Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2020 (reines RCG-Modellergebnis)

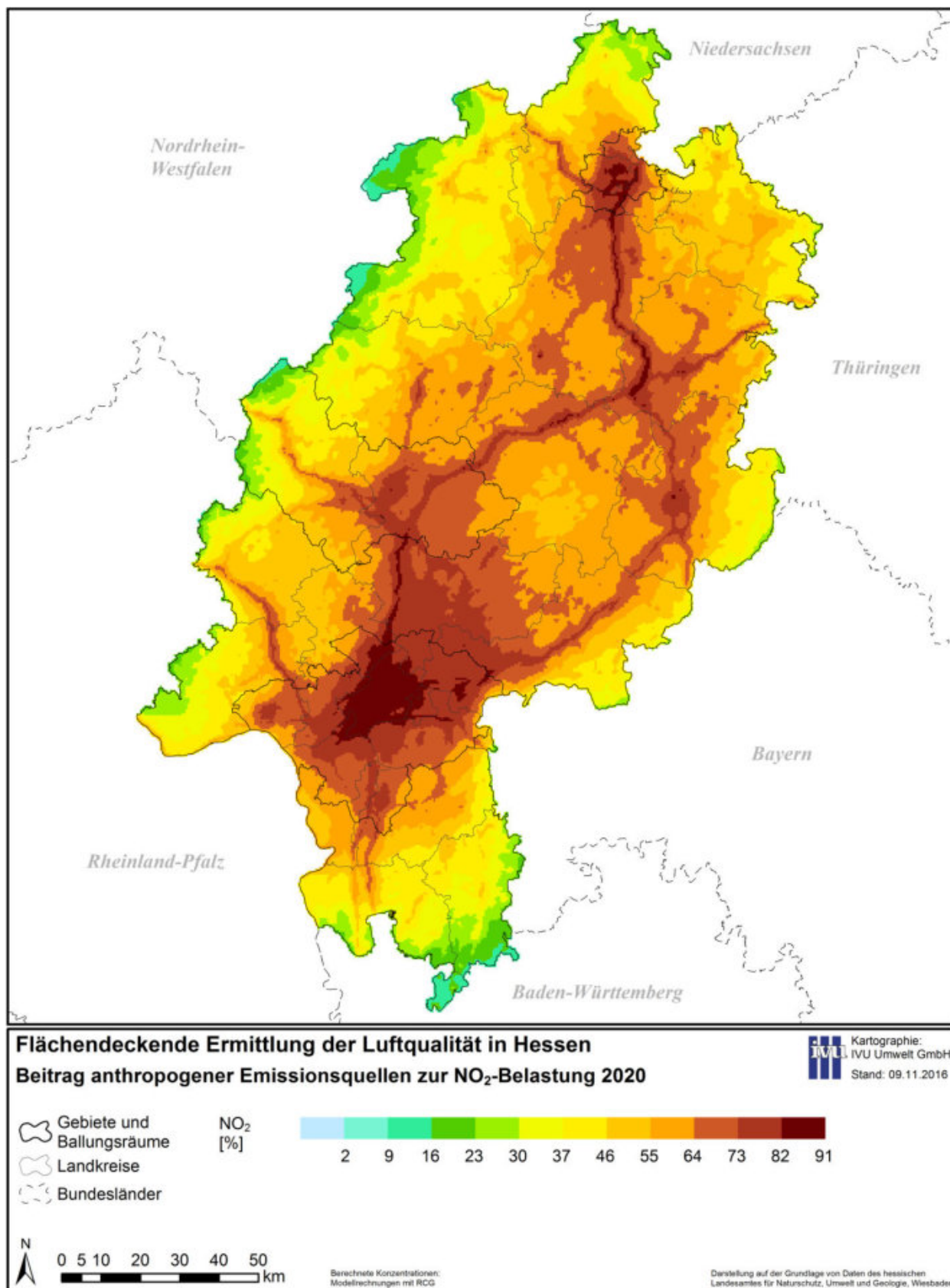


Abbildung 6-34: Relativer Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur NO₂-Belastung im Jahr 2020 (reines RCG-Modellergebnis)

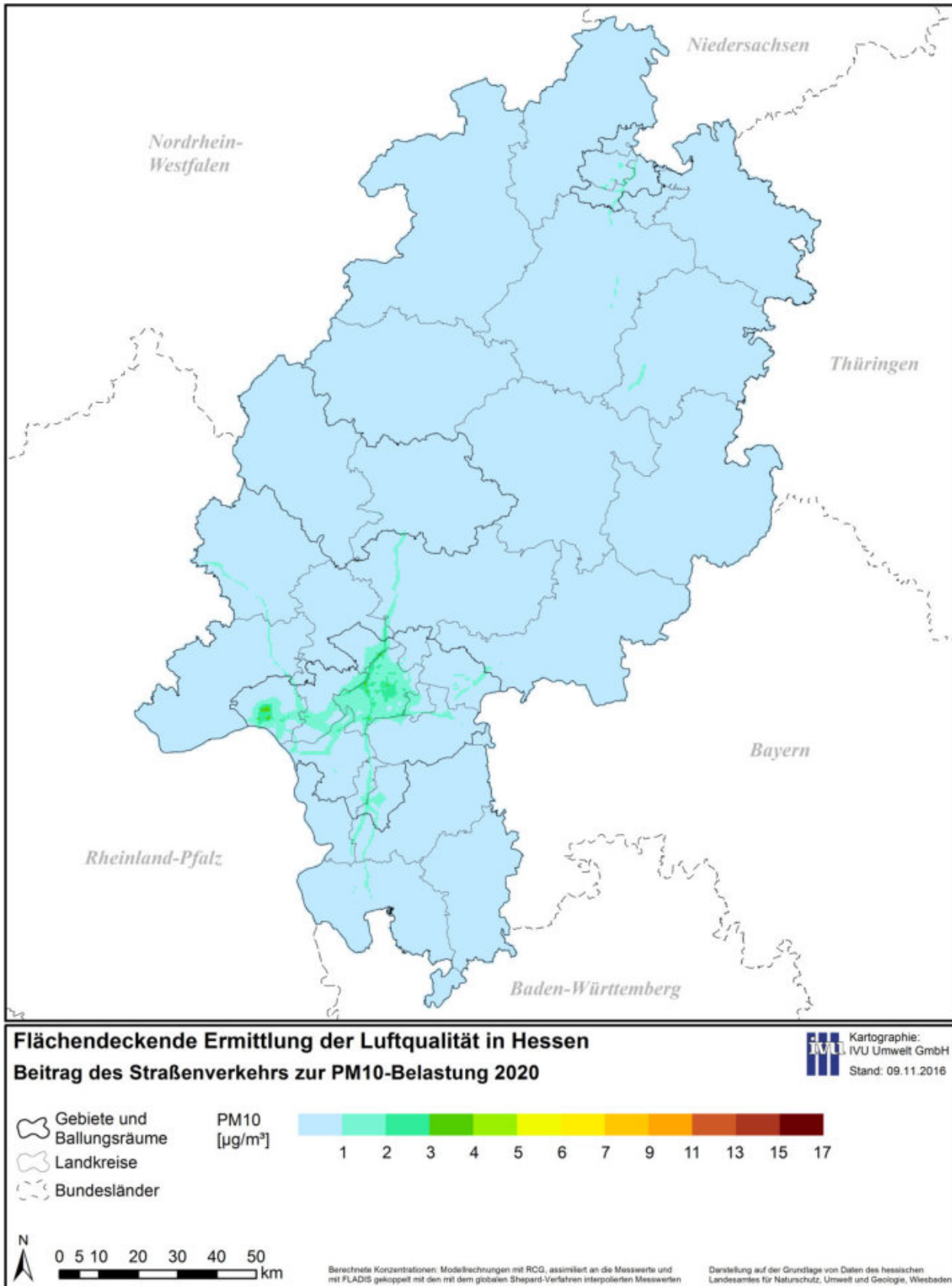


Abbildung 6-35: Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2020 (reines RCG-Modellergebnis)

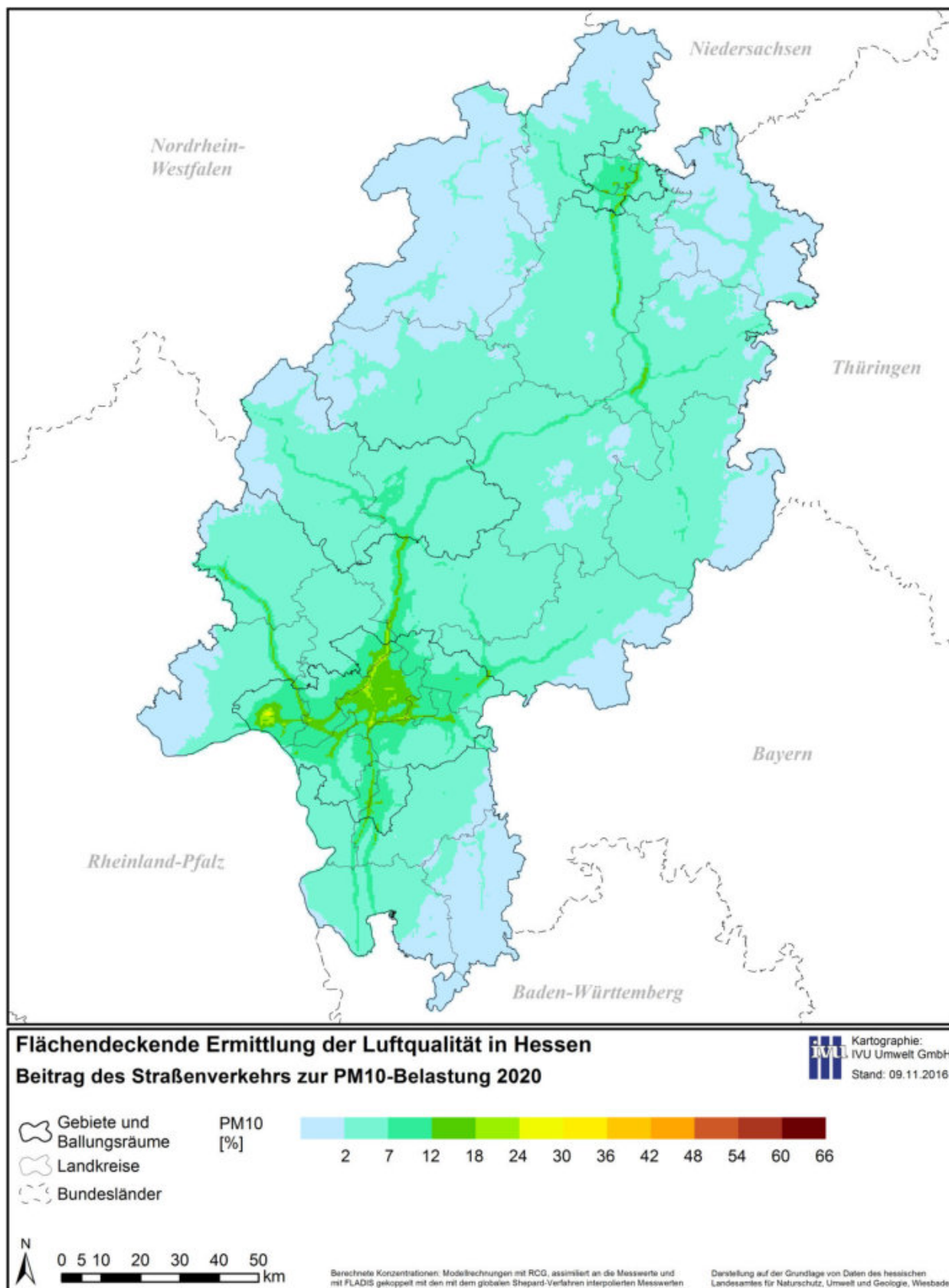


Abbildung 6-36: Relativer Beitrag des Straßenverkehrs in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2020 (reines RCG-Modellergebnis)

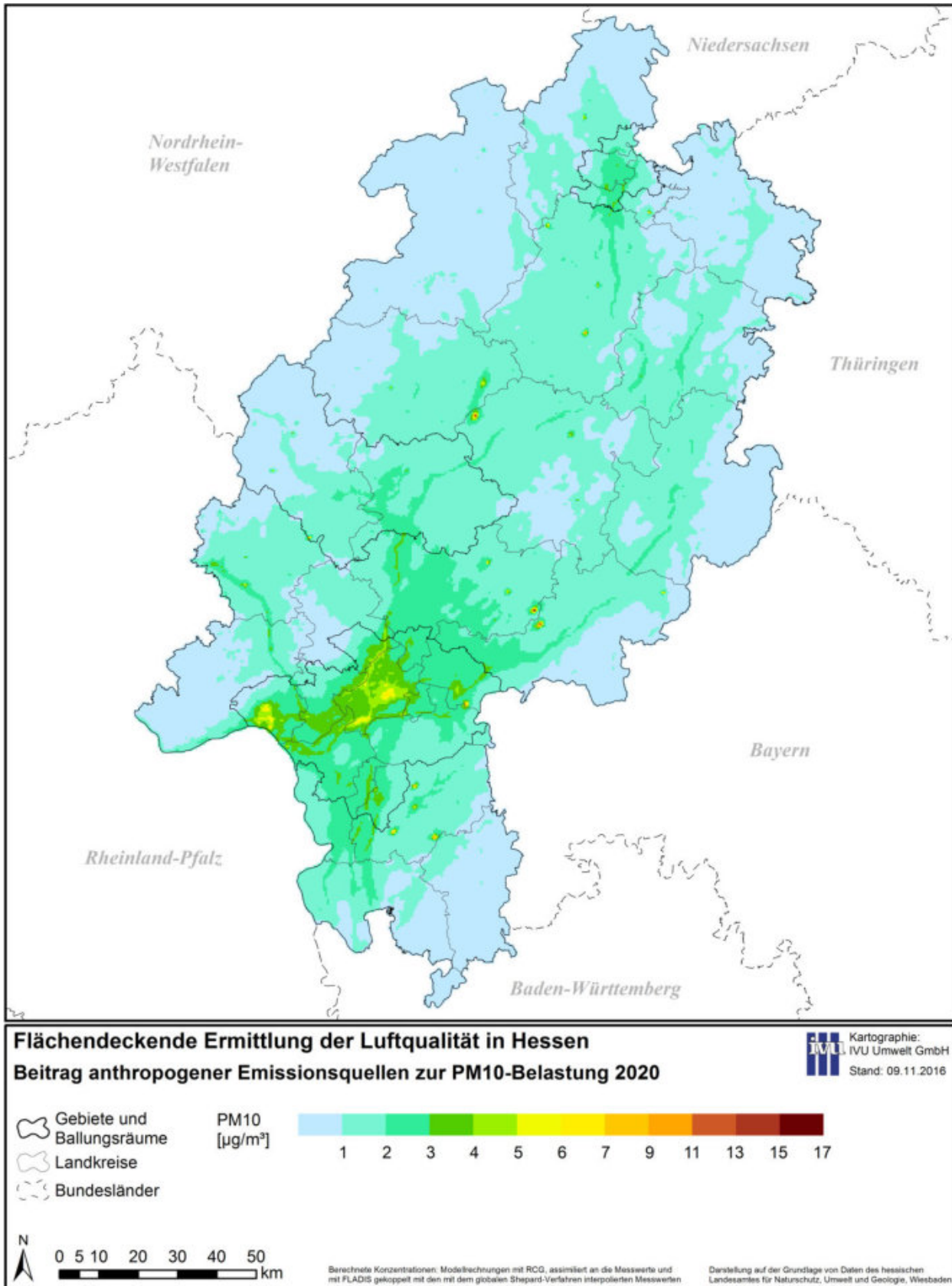


Abbildung 6-37: Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2020 (reines RCG-Modellergebnis)

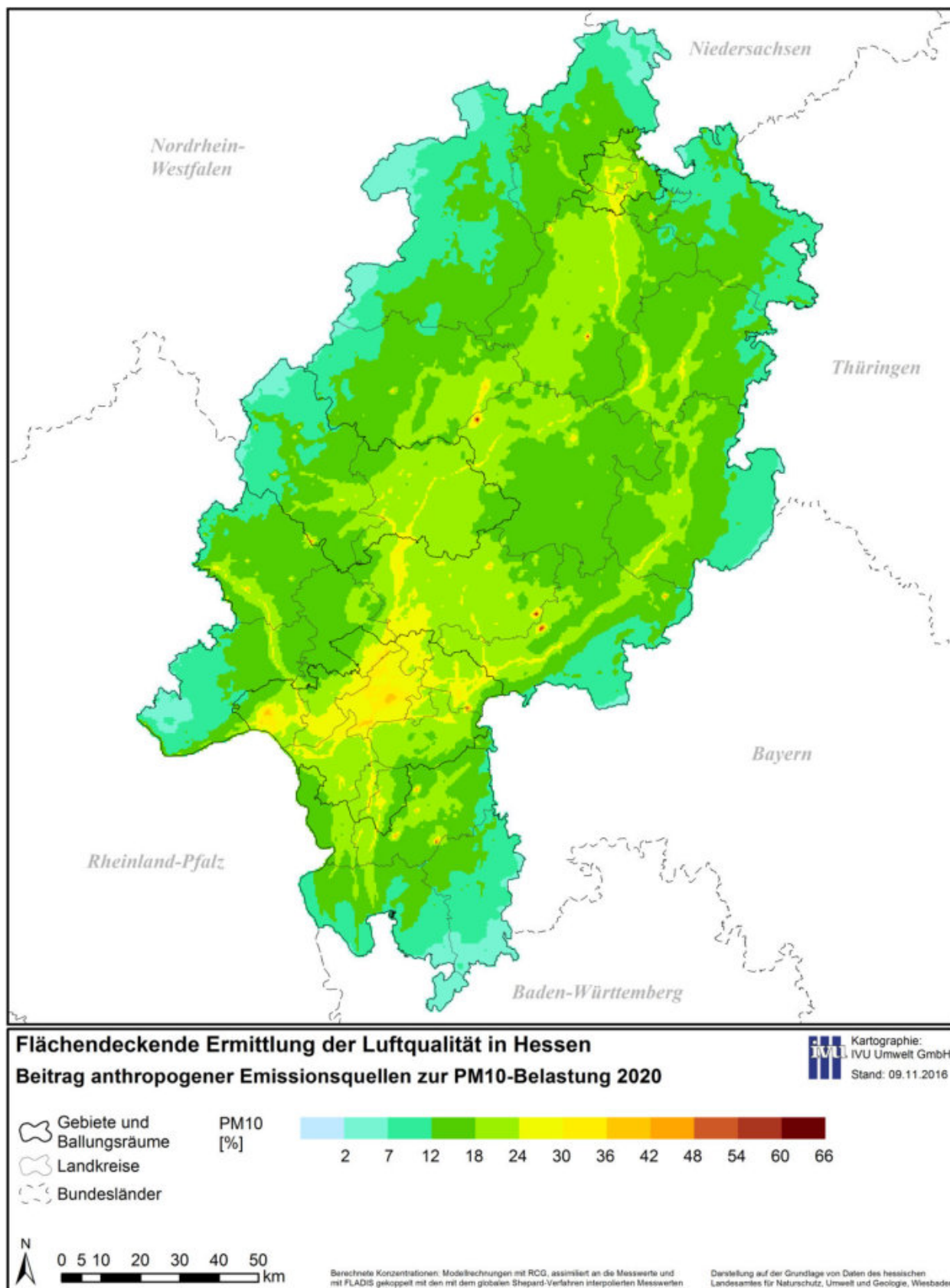


Abbildung 6-38: Relativer Beitrag anthropogener Emissionsquellen in Hessen zur PM10-Belastung im Jahr 2020 (reines RCG-Modellergebnis)

6.2 Straßenabschnitte

Gemäß der Methodik aus Abschnitt 5.5 wurde mit dem CPB-Modell die Zusatzbelastung in den ausgewählten Straßenräumen berechnet. Die Gesamtbelastung in den Straßenräumen wurde dann für NO₂ entsprechend Abschnitt 5.5.2 und für PM₁₀ als Summe aus Vorbelastung und Zusatzbelastung bestimmt.

6.2.1 Vergleich mit Messwerten

Innerhalb des Untersuchungsgebiets befinden sich sechs verkehrsbezogene HLNUG-Luftmessstationen, für die mit dem verwendeten Modellinstrumentarium Gesamtbelastungen berechnet wurden. Es handelt sich dabei um die Stationen Hügelsstraße in Darmstadt, Friedberger Landstraße in Frankfurt, Petersberger Straße in Fulda, Universitätsstraße in Marburg, Westanlage in Gießen und Fünffensterstraße in Kassel.

Zusätzlich betrieb das HLNUG im Jahr 2013 an acht weiteren modellierten Straßenabschnitten NO₂-Passivsammler: drei in Offenbach, einen in Rüsselsheim und vier in Limburg.

Der Vergleich der für 2013 modellierten Werte mit den gemessenen Werten an den 14 Messstationen nach HLUg (2014) findet sich in Tabelle 6-6.

Tabelle 6-6: Vergleich von Messwerten 2013 mit der modellierten Gesamtbelastung

ID	Messstation	NO ₂ [µg/m ³]			PM ₁₀ [µg/m ³]		
		Messung	Modell	Abweichung	Messung	Modell	Abweichung
4	Darmstadt: Hügelsstr.	58.9	56.4	-4%	25.4	27.8	9%
14	Frankfurt: Friedberger Landstr.	54.7	50.4	-8%	26.0	24.7	-5%
41	Fulda: Petersberger Str.	42.9	37.8	-12%	23.3	22.7	-2%
49	Marburg: Universitätsstr.	45.1	40.2	-11%	23.1	23.8	3%
53	Gießen: Westanlage	46.7	38.4	-18%	25.4	22.6	-11%
59	Kassel: Fünffensterstr.	45.2	43.0	-5%	27.0	23.8	-12%
ID	Passivsammler						
31	Offenbach: Bieberer Str. West	47.6	41.9	-12%			
32	Offenbach: Mainstr. Ost	54.6	48.7	-11%			
33	Offenbach: Untere Grenzstr.	50.3	45.1	-10%			
35	Rüsselsheim: Rugbyring	44.4	41.9	-6%			
42	Limburg: Diezer Str.	46.3	47.4	2%			
43	Limburg: Frankfurter Str.	46.4	40.5	-13%			
44	Limburg: Schiede I	66.4	62.1	-6%			
45	Limburg: Schiede II	52.2	45.2	-13%			

Alle Modellwerte liegen deutlich innerhalb des Datenqualitätsziels für Modellierungen nach EU (2008) von nicht mehr als 30 % Abweichung bei NO₂ und nicht mehr als 50 % Abweichung bei PM₁₀. Für NO₂ unterschätzt die Modellrechnung die Messungen mit Ausnahme des Passivsammlers an der Diezer Straße in Limburg an allen Stationen im Mittel um 10 %. Die maximale Unterschätzung liegt bei 18 %. Vor dem Hintergrund der Unsicherheiten in den Eingangsdaten, vor allem für die Berechnung der Kfz-Emissionen, und der diskutierten Problematik bezüglich der Verkehrsqualitäten und ihren Auswirkungen (s. Abschnitt 5.5.4) kann bei diesen Unterschätzungen die Übereinstimmung mit den Messwerten als gut bezeichnet werden. Bei den PM₁₀-Jahresmittelwerten werden die modellierten Werte mit einer mittleren Unterschätzung

von 3 % ebenfalls gut wiedergegeben. Überwiegend finden sich leichte Unterschätzungen von im Mittel 8 % und an zwei Abschnitten Überschätzungen von im Mittel 6 %.

In Tabelle 6-7 sind die gemessenen PM10-Tagesgrenzwertüberschreitungen den aus den modellierten PM10-Jahresmittelwerten gemäß Abschnitt 5.5.3 abgeleiteten Werten gegenübergestellt. Mit Ausnahme der Hängelstraße in Darmstadt werden die Messwerte gut wiedergegeben und sowohl alle Messwerte als auch alle mit dem statistischen Ansatz ermittelten Modellwerte liegen deutlich unter dem erlaubten Grenzwert von 35 Tagen mit einem Mittelwert $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Hängelstraße in Darmstadt ist aufgrund der in sie mündenden Ausfahrt des City-Tunnels eine sehr besondere Situation (vgl. dazu auch IVU Umwelt (2014b)) und schon der PM10-Jahresmittelwert wird um 9 % überschätzt. Aufgrund der Nichtlinearität des statistischen Ansatzes zur Bestimmung der PM10-Tagesgrenzwertüberschreitungen ergibt sich dann die deutliche Überschätzung der Überschreitungstage. Auch bei der Hängelstraße in Darmstadt liegen aber sowohl die Messung als auch die statistisch abgeleiteten Tagesgrenzwertüberschreitungen deutlich unter dem Grenzwert.

Tabelle 6-7: Vergleich von Messwerten der PM10-Tagesgrenzwertüberschreitungen 2013 mit aus der Modellierung abgeleiteten Werten

ID	Messstation	Anzahl PM10-Tagesmittelwerte > 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		Messung	Modell
4	Darmstadt: Hängelstr.	17	28
14	Frankfurt: Friedberger Landstr.	21	19
41	Fulda: Petersberger Str.	12	14
49	Marburg: Universitätsstr.	15	16
53	Gießen: Westanlage	14	14
59	Kassel: Fünffensterstr.	19	16

6.2.2 Gesamtbelastung und Verursacheranteile

In Tabelle 6-8 und Tabelle 6-9 sowie in Abbildung 6-39 bis Abbildung 6-42 sind für NO_2 die Gesamtbelastung sowie die absoluten und relativen Anteile der einzelnen Verursachergruppen für die 64 Straßenräume als Ergebnis der Berechnungen in der Sortierung entsprechend Abschnitt 4.1 dargestellt. Dabei wurde jeweils die Maximalkonzentration der beiden Aufpunkte rechts und links der Straße ausgewertet bzw. bei Straßen mit Messstationen der für den Messrezeptor modellierte Wert gewählt.

Bezüglich der Beiträge der einzelnen Quellengruppen muss auch an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen werden, dass die Beiträge nur als Näherung betrachtet werden können. Hauptursache dafür sind die nichtlinearen Beziehungen zwischen den Vorläuferemissionen und den über eine komplexe Kette chemischer Reaktionen und physikalischer Prozesse entstehenden Folgeprodukten NO_2 , Ozon und sekundäre Aerosole, die einen großen Anteil an der Gesamtmasse des PM10 haben. Eine Änderung der Zusammensetzung der Emissionen und damit des Gemisches der Vorläuferemissionen führt zu einer Änderung der chemischen Abläufe und damit zu einer Änderung der Konzentrationsbeiträge.

Als Ferntransport wird in diesen Darstellungen der Beitrag bezeichnet, der sich ergibt, wenn alle anthropogenen Emissionen in Hessen auf Null gesetzt werden, also die Differenz aus den RCG-Modellwerten für alle Quellen und den für die anthropogenen Quellen in Hessen modellierten Modellwerte.

Die einzelnen Quellengruppen tragen durch Emissionen außerhalb von Hessen auch zum Ferntransport in das Untersuchungsgebiet bei und die Anteile der einzelnen Quellengruppen an der gesamten Vorbelastung sind damit streng genommen höher, als die hier ermittelten Beiträge aufgrund von Emissionen der Quellengruppen in Hessen.

Der Beitrag der sonstigen Quellen enthält summarisch die Beiträge der Quellengruppen, für die keine separate Berechnung durchgeführt wurde sowie den Beitrag durch die Kombination mit den Messwerten der Vorbelastung (s. Abschnitt 5.3).

In Tabelle 6-10 und Tabelle 6-11 sowie in Abbildung 6-43 bis Abbildung 6-46 folgen analoge Darstellungen für PM₁₀.

6.2.2.1 NO₂

Die Jahresmittelwerte der NO₂-Gesamtbelastung an den untersuchten Straßenabschnitten weisen bei einem Mittelwert von 46 µg/m³ mit Werten zwischen 29 und 62 µg/m³ eine große Spannbreite auf. Die Spitzenwerte der NO₂-Belastung werden mit über 55 µg/m³ in

- Darmstadt: Hügelstraße,
- Frankfurt: Adolf-Haeuser-Straße,
- Frankfurt: Bockenheimer Landstraße,
- Frankfurt: Eschersheimer Landstraße,
- Frankfurt: Hochstraße,
- Frankfurt: Mainzer Landstraße,
- Limburg: Schiede I und
- Kassel: Schönfelder Straße

erreicht.

Für 48 Straßenabschnitte liegen die berechneten Werte über⁵ dem seit 2010 gültigen Grenzwert der 39. BImSchV von 40 µg/m³. Für fünf weitere Abschnitte wird gerundet das Erreichen des Grenzwerts in Höhe von 40 µg/m³ berechnet. Leitet man aus dem Vergleich mit den Messwerten in Abschnitt 6.1 einen moderaten Sicherheitszuschlag in Höhe von 10 % ab und wendet diesen auf die modellierten Gesamtbelastungen an, werden für insgesamt 57 Abschnitte Werte über 40 µg/m³ berechnet. Für weitere drei Abschnitte wird dann gerundet der Grenzwert erreicht. Der Anteil der Abschnitte mit berechneten Grenzwertüberschreitungen liegt damit, je nach Auswertungsvariante, zwischen 75 und 94 %.

Mit Werten zwischen 14 und 47 µg/m³ bei einem Mittelwert von 29 µg/m³ und entsprechenden Anteilen zwischen 47 und 80 % ist der Straßenverkehr mit einem mittleren Anteil von 63 % die dominierende Quellengruppe. Der niedrigste Anteil wird für die Sindlinger Bahnstraße in Frankfurt berechnet, der höchste für die Schönfelder Straße in Kassel. Dort sind 61 % der Gesamtbelastung durch den lokalen Verkehr auf dem Straßenabschnitt selbst verursacht, 59 % davon durch NO₂-Direktemissionen und 41 % durch chemische Prozesse. Insgesamt liegt der Anteil der jeweils durch den lokalen

⁵ Schadstoff-Konzentrationen werden gemäß der 39. BImSchV (2010) auf ganze Stellen gerundet. Eine Überschreitung wird dann angenommen, wenn dieser gerundete Wert den erlaubten Grenzwert überschreitet. Daraus folgt, dass z. B. bei NO₂ ein Jahresmittelwert von 40.49 µg/m³ auf 40 µg/m³ gerundet und damit nicht als Überschreitung des Grenzwertes gezählt wird.

Verkehr verursachten Belastung mit Werten zwischen 15 und 61 % im Mittel bei 37 %. Der mittlere Anteil der NO₂-Direktemissionen an der durch lokalen Verkehr verursachten Belastung liegt bei 54 % und an der insgesamt durch Straßenverkehr verursachten Belastung bei 32 %.

Der Anteil der Quellengruppe Industrie ist mit Werten zwischen 0.4 µg/m³ und 3.0 µg/m³ bei einem Mittelwert von 1 µg/m³ eher gering. Etwa drei Mal so groß ist der Beitrag der Gebäudeheizung und Kleinverbraucher mit Werten zwischen 1.3 µg/m³ und 7.3 µg/m³ bei einem Mittelwert von 3.3 µg/m³. Die relativen Beiträge der Quellengruppen Industrie sowie Gebäudeheizung und Kleinverbraucher liegen, bei Spannweiten von 6 % bzw. 11 %, im Mittel bei 3 % bzw. 7 %. Der Beitrag des Flughafens Frankfurt ist wegen seiner räumlich begrenzten Wirkung im Mittel über das ganze Untersuchungsgebiet mit 0.5 µg/m³ bzw. 1.1 % gering. Anteile ab 1 % treten im Ballungsraum Rhein-Main in den Städten Frankfurt, Hofheim, Mörfelden-Walldorf, Neu-Isenburg Offenbach und Rüsselsheim auf und erreichen Werte von bis zu 3.4 µg/m³ bzw. knapp 8 %.

Die Beiträge sonstiger Emittenten sowie aus der Anpassung der Modellwerte an die Messdaten liegen zwischen 3.1 und 12.7 µg/m³ und einem Mittelwert von 3.1 µg/m³. Die entsprechenden relativen Anteile liegen mit einem Mittelwert von 6 % zwischen 16 und 32 %.

Tabelle 6-8: Gesamtbelastung und Verursacheranteile NO₂ absolut im Jahr 2013 in µg/m³

ID	Stadt	Straße	Gesamt [µg/m ³]	Vorbelastung						Zusatzbelastung		
				Gesamt	FT	Son	Ind	Gh/ KV	Flug F	Kfz	PC	di- rekt
Ballungsraum Rhein-Main												
1		Bleichstr.	45.6	29.0	5.6	4.8	1.1	4.4	0.2	12.9	6.6	10.0
2		Heidelbg. Str.	37.3	25.5	5.7	4.8	0.8	2.7	0.2	11.3	5.4	6.4
3		Heinrichstr.	45.1	27.4	5.7	4.7	0.7	3.8	0.2	12.3	6.7	11.0
4	Darmstadt	Hügelstr.	56.4	27.3	5.6	4.7	0.8	4.1	0.2	12.0	10.7	18.4
5		Kasinostr.	47.7	29.0	5.6	4.8	1.1	4.4	0.2	12.9	8.1	10.6
6		N.-Ramst. Str.	46.1	26.0	5.5	4.6	0.8	3.0	0.2	11.9	8.0	12.1
7		Rhoenring	41.7	26.3	5.5	5.1	1.1	3.5	0.2	11.1	7.0	8.3
8		A.-Haeuser-Str.	56.3	38.5	5.0	12.6	2.6	2.9	1.6	13.9	8.4	9.3
9		Alte Falterstr.	44.5	38.0	4.5	9.3	1.3	2.7	3.4	16.8	3.4	3.2
10		Bleichstr.	52.3	38.9	4.0	8.6	1.3	5.6	1.0	18.4	6.0	7.4
11		Bock. Landstr.	57.8	36.0	4.2	8.1	1.3	4.4	1.6	16.3	8.9	12.9
12		Esch. Landstr. I	55.7	39.0	4.1	8.9	1.4	6.6	1.0	17.0	7.4	9.2
13		Esch. Landstr. II	42.9	34.0	4.1	7.2	1.2	3.0	1.1	17.4	4.1	4.8
14		Friedb. Landstr.	50.4	37.0	4.0	8.3	1.4	5.0	1.0	17.2	5.9	7.4
15	Frankfurt	Hochstr.	61.7	39.7	4.1	8.9	1.5	6.8	1.1	17.3	9.0	12.9
16		Höhenstr.	50.6	35.1	4.0	8.7	1.3	5.0	0.9	15.2	7.0	8.5
17		Königst. Str.	47.2	38.7	4.9	12.7	2.1	2.9	1.7	14.3	4.5	3.9
18		Lorscher Str.	46.4	36.0	4.4	8.1	1.4	2.8	1.7	17.6	5.0	5.4
19		Mainz. Landstr.	62.1	38.8	4.2	8.8	1.6	6.0	1.5	16.8	9.6	13.6
20		Offenb. Landstr.	39.8	31.0	3.9	8.0	1.6	2.6	0.9	13.9	4.2	4.6
21		Schweizerstr.	47.2	38.6	4.1	9.0	1.2	5.6	1.2	17.5	4.5	4.1
22		Sindl. Bahnstr.	43.7	35.1	5.2	11.0	3.0	2.3	1.6	12.0	4.0	4.6
23	Taunusstr.	52.0	41.4	4.1	9.5	1.6	7.3	1.2	17.6	5.3	5.3	
24		B45 Han. Vorst.	52.6	29.1	3.8	8.7	1.1	3.5	0.3	11.6	9.8	13.7
25	Hanau	Barbarossastr.	40.3	28.4	4.0	8.0	2.1	2.3	0.3	11.6	5.6	6.3
26		B45 Nussallee	43.5	29.1	3.8	8.7	1.1	3.5	0.3	11.6	7.2	7.2
27		L3209 Lamb.str.	54.7	28.0	3.8	8.5	1.4	3.2	0.3	10.8	12.1	14.6
28	Hofheim	Elisabethenstr.	46.0	28.1	6.0	7.0	1.2	3.0	0.7	10.2	7.8	10.1
29	Mfd.-Wld.	Westendstr.	35.8	24.3	5.3	5.4	0.9	2.7	1.1	8.9	5.9	5.6
30	N.-Isenbg.	Frankfurter Str.	46.3	29.8	4.2	5.9	1.0	3.4	0.6	14.6	7.3	9.2
31		Bieberer Str.	41.9	31.0	3.9	8.6	1.2	3.6	0.6	13.2	6.1	4.7
32	Offenbach	Mainstr. Ost	48.7	30.4	3.7	9.6	1.1	3.2	0.5	12.2	8.0	10.3
33		Unt. Grenzstr.	45.1	28.5	3.9	7.4	1.3	2.4	0.5	12.9	8.1	8.5
34		Waldstr.	42.0	30.1	3.9	7.5	1.2	3.1	0.6	13.8	6.3	5.6
35	Rüsselsh.	Rugbyring	41.9	29.9	6.7	7.1	1.2	2.6	1.7	10.6	5.5	6.5
36	Wiesba-	K.-Friedr.-Ring	50.9	35.7	8.0	3.2	0.8	3.3	0.2	20.3	7.7	7.4
37	den	Schiersteinerstr.	49.4	35.0	7.7	3.1	0.6	4.2	0.2	19.3	7.6	6.8
Mittel- und Nordhessen												
38		Frankfurter Str.	31.6	20.8	2.8	9.5	1.0	1.8	0.1	5.6	5.6	5.2
39	Fulda	Leipziger Str.	36.4	22.4	2.8	9.1	2.0	1.9	0.1	6.6	7.6	6.5
40		Niesiger Str.	29.1	19.7	2.8	9.4	1.2	1.3	0.1	5.0	5.4	3.9
41		Petersberg. Str.	37.8	22.3	2.8	9.3	1.5	3.2	0.1	5.4	8.1	7.4
42		Diezer Str.	47.4	24.8	10.5	5.4	0.7	1.4	0.1	6.7	9.8	12.8
43		Frankfurter Str.	40.5	25.6	9.2	5.3	0.5	1.6	0.1	9.0	6.2	8.7
44	Limburg	Schiede I	62.1	25.6	9.3	5.3	0.6	1.9	0.0	8.6	12.8	23.7
45		Schiede II	45.2	25.6	9.3	5.3	0.6	1.9	0.0	8.6	9.2	10.4
46		Stephanshügel	42.1	25.3	9.8	5.5	0.5	1.7	0.1	7.7	7.7	9.1

ID	Stadt	Straße	Ge- samt [µg/m³]	Vorbelastung							Zusatz- belastung	
				Ge- samt	FT	Son	Ind	Gh/ KV	Flug F	Kfz	PC	di- rekt
Mittel- und Nordhessen (Fortsetzung)												
47		Am Grün	38.1	21.0	3.4	7.3	0.6	3.8	0.0	5.9	7.8	9.4
48	Marburg	Elisabethstr.	36.2	20.0	3.5	7.3	0.6	2.6	0.0	6.0	8.8	7.5
49		Universitätsstr.	40.2	21.0	3.4	7.3	0.6	3.8	0.0	5.9	8.6	10.7
Lahn-Dill												
50		Grünberger Str.	35.3	22.2	3.5	5.9	1.1	2.3	0.1	9.4	5.5	7.5
51	Gießen	Neustadt	50.1	23.8	3.5	6.0	1.1	3.2	0.1	9.9	10.6	15.7
52		Südanlage	45.3	23.4	3.5	6.0	1.3	2.9	0.1	9.6	9.0	12.9
53		Westanlage	38.4	23.8	3.5	6.0	1.1	3.2	0.1	9.9	6.6	8.1
54		Ernst-Leitz-Str.	45.1	26.0	4.0	11.2	0.4	1.9	0.1	8.5	9.2	9.9
55	Wetzlar	Hermannst. Str.	43.9	24.8	4.0	11.9	0.9	1.9	0.1	6.0	7.5	11.6
56		K.-Kellner-Ring	43.0	26.3	4.0	11.4	0.4	2.1	0.1	8.4	6.5	10.2
Ballungsraum Kassel												
57		Brüderstr.	52.7	25.2	3.5	3.9	0.8	3.1	0.0	14.0	10.8	16.7
58		Frankfurter Str.	42.5	22.9	3.4	4.6	0.9	2.6	0.0	11.4	9.5	10.2
59		Fünffensterstr.	43.0	24.1	3.4	4.5	0.8	4.1	0.0	11.2	9.7	9.2
60	Kassel	Holländ. Str.	43.7	22.3	3.5	4.7	0.8	2.9	0.0	10.4	10.7	10.7
61		Leipziger Str.	36.4	21.8	3.5	3.7	1.1	2.7	0.0	10.8	6.9	7.7
62		Mauerstr.	53.3	25.1	3.5	4.2	0.8	4.4	0.0	12.2	13.4	14.8
63		Schönfelder Str.	58.7	23.1	3.4	4.7	0.8	2.9	0.0	11.3	14.6	21.0
64		Wolfhager Str.	40.3	22.0	3.5	5.7	1.0	2.9	0.0	9.0	9.1	9.1
		Mittelwert	45.7	28.7	4.7	7.2	1.1	3.3	0.5	11.8	7.7	9.4
		Min	29.1	19.7	2.8	3.1	0.4	1.3	0.0	5.0	3.4	3.2
		Max	62.1	41.4	10.5	12.7	3.0	7.3	3.4	20.3	14.6	23.7

Vorbelastung: Ferntransport (FT), Sonstige Quellen (Son), Industrie (Ind), Gebäudeheizung und Kleinverbraucher (Gh/KV); Flughafen Frankfurt (Flug F); Straßenverkehr (Kfz)

Zusatzbelastung Straßenverkehr: Photochemie (PC), NO₂-Direktemission (direkt).

Tabelle 6-9: Gesamtbelastung und Verursacheranteile NO₂ relativ im Jahr 2013

ID	Stadt	Straße	Ge- samt [µg/m ³]	Vorbelastung						Zusatz- belastung di- rekt		
				Ge- samt	FT	Son	Ind	Gh/ KV	Flug F	Kfz	PC	
Ballungsraum Rhein-Main												
1		Bleichstr.	45.6	64%	12%	11%	2%	10%	0.4%	28%	15%	22%
2		Heidelbg. Str.	37.3	68%	15%	13%	2%	7%	0.5%	30%	15%	17%
3		Heinrichstr.	45.1	61%	13%	10%	2%	8%	0.4%	27%	15%	24%
4	Darmstadt	Hügelstr.	56.4	48%	10%	8%	1%	7%	0.3%	21%	19%	33%
5		Kasinostr.	47.7	61%	12%	10%	2%	9%	0.4%	27%	17%	22%
6		N.-Ramst. Str.	46.1	56%	12%	10%	2%	7%	0.4%	26%	17%	26%
7		Rhoenring	41.7	63%	13%	12%	3%	8%	0.5%	27%	17%	20%
8		A.-Haeuser-Str.	56.3	68%	9%	22%	5%	5%	2.8%	25%	15%	17%
9		Alte Falterstr.	44.5	85%	10%	21%	3%	6%	7.7%	38%	8%	7%
10		Bleichstr.	52.3	74%	8%	16%	3%	11%	1.8%	35%	11%	14%
11		Bock. Landstr.	57.8	62%	7%	14%	2%	8%	2.7%	28%	15%	22%
12		Esch. Landstr. I	55.7	70%	7%	16%	2%	12%	1.9%	31%	13%	17%
13		Esch. Landstr. II	42.9	79%	10%	17%	3%	7%	2.6%	41%	10%	11%
14		Friedb. Landstr.	50.4	73%	8%	17%	3%	10%	2.0%	34%	12%	15%
15	Frankfurt	Hochstr.	61.7	64%	7%	14%	2%	11%	1.8%	28%	15%	21%
16		Höhenstr.	50.6	69%	8%	17%	3%	10%	1.8%	30%	14%	17%
17		Königst. Str.	47.2	82%	10%	27%	5%	6%	3.7%	30%	10%	8%
18		Lorscher Str.	46.4	78%	10%	17%	3%	6%	3.6%	38%	11%	12%
19		Mainz. Landstr.	62.1	63%	7%	14%	3%	10%	2.4%	27%	16%	22%
20		Offenb. Landstr.	39.8	78%	10%	20%	4%	7%	2.3%	35%	11%	11%
21		Schweizerstr.	47.2	82%	9%	19%	3%	12%	2.6%	37%	10%	9%
22		Sindl. Bahnstr.	43.7	80%	12%	25%	7%	5%	3.7%	27%	9%	11%
23	Taunusstr.	52.0	80%	8%	18%	3%	14%	2.4%	34%	10%	10%	
24	Hanau	B45 Han. Vorst.	52.6	55%	7%	17%	2%	7%	0.6%	22%	19%	26%
25		Barbarossastr.	40.3	70%	10%	20%	5%	6%	0.8%	29%	14%	16%
26		B45 Nussallee	43.5	67%	9%	20%	3%	8%	0.8%	27%	17%	17%
27		L3209 Lamb.str.	54.7	51%	7%	16%	3%	6%	0.6%	20%	22%	27%
28	Hofheim	Elisabethenstr.	46.0	61%	13%	15%	3%	7%	1.5%	22%	17%	22%
29	Mfd.-Wld.	Westendstr.	35.8	68%	15%	15%	3%	8%	3.1%	25%	16%	16%
30	N.-Isenbg.	Frankfurter Str.	46.3	64%	9%	13%	2%	7%	1.4%	32%	16%	20%
31	Offenbach	Bieberer Str.	41.9	74%	9%	21%	3%	9%	1.4%	31%	15%	11%
32		Mainstr. Ost	48.7	62%	8%	20%	2%	7%	1.1%	25%	16%	21%
33		Unt. Grenzstr.	45.1	63%	9%	16%	3%	5%	1.2%	29%	18%	19%
34		Waldstr.	42.0	72%	9%	18%	3%	7%	1.4%	33%	15%	13%
35	Rüsselsh.	Rugbyring	41.9	71%	16%	17%	3%	6%	4.2%	25%	13%	16%
36	Wiesba- den	K.-Friedr.-Ring	50.9	70%	16%	6%	2%	7%	0.4%	40%	15%	15%
37		Schiersteinerstr.	49.4	71%	16%	6%	1%	8%	0.3%	39%	15%	14%
Mittel- und Nordhessen												
38	Fulda	Frankfurter Str.	31.6	66%	9%	30%	3%	6%	0.2%	18%	18%	16%
39		Leipziger Str.	36.4	61%	8%	25%	5%	5%	0.2%	18%	21%	18%
40		Niesiger Str.	29.1	68%	9%	32%	4%	4%	0.2%	17%	19%	14%
41		Petersberg. Str.	37.8	59%	7%	25%	4%	8%	0.2%	14%	21%	20%
42		Diezer Str.	47.4	52%	22%	11%	2%	3%	0.1%	14%	21%	27%
43		Frankfurter Str.	40.5	63%	23%	13%	1%	4%	0.1%	22%	15%	22%
44	Limburg	Schiede I	62.1	41%	15%	9%	1%	3%	0.1%	14%	21%	38%
45		Schiede II	45.2	57%	21%	12%	1%	4%	0.1%	19%	20%	23%
46		Stephanshügel	42.1	60%	23%	13%	1%	4%	0.1%	18%	18%	22%

ID	Stadt	Straße	Ge- samt [µg/m³]	Vorbelastung						Zusatz- belastung		
				Ge- samt	FT	Son	Ind	Gh/ KV	Flug F	Kfz	PC	di- rekt
Mittel- und Nordhessen (Fortsetzung)												
47		Am Grün	38.1	55%	9%	19%	2%	10%	0.1%	15%	21%	25%
48	Marburg	Elisabethstr.	36.2	55%	10%	20%	2%	7%	0.1%	16%	24%	21%
49		Universitätsstr.	40.2	52%	9%	18%	1%	9%	0.1%	15%	21%	27%
Lahn-Dill												
50		Grünberger Str.	35.3	63%	10%	17%	3%	6%	0.2%	27%	16%	21%
51	Gießen	Neustadt	50.1	47%	7%	12%	2%	6%	0.1%	20%	21%	31%
52		Südanlage	45.3	52%	8%	13%	3%	6%	0.1%	21%	20%	29%
53		Westanlage	38.4	62%	9%	16%	3%	8%	0.2%	26%	17%	21%
54		Ernst-Leitz-Str.	45.1	58%	9%	25%	1%	4%	0.1%	19%	20%	22%
55	Wetzlar	Hermannst. Str.	43.9	56%	9%	27%	2%	4%	0.1%	14%	17%	26%
56		K.-Kellner-Ring	43.0	61%	9%	26%	1%	5%	0.1%	20%	15%	24%
Ballungsraum Kassel												
57		Brüderstr.	52.7	48%	7%	7%	1%	6%	0.0%	27%	20%	32%
58		Frankfurter Str.	42.5	54%	8%	11%	2%	6%	0.0%	27%	22%	24%
59		Fünffensterstr.	43.0	56%	8%	11%	2%	10%	0.0%	26%	23%	21%
60	Kassel	Holländ. Str.	43.7	51%	8%	11%	2%	7%	0.0%	24%	24%	25%
61		Leipziger Str.	36.4	60%	10%	10%	3%	7%	0.1%	30%	19%	21%
62		Mauerstr.	53.3	47%	7%	8%	1%	8%	0.0%	23%	25%	28%
63		Schönfelder Str.	58.7	39%	6%	8%	1%	5%	0.0%	19%	25%	36%
64		Wolfhager Str.	40.3	55%	9%	14%	2%	7%	0.0%	22%	23%	23%
		Mittelwert	45.7	63%	10%	16%	3%	7%	1.1%	26%	17%	20%
		Min	29.1	39%	6%	6%	1%	3%	0.0%	14%	8%	7%
		Max	62.1	85%	23%	32%	7%	14%	7.7%	41%	25%	38%

Vorbelastung: Ferntransport (FT), Sonstige Quellen (Son), Industrie (Ind), Gebäudeheizung und Kleinverbraucher (Gh/KV); Flughafen Frankfurt (Flug F); Straßenverkehr (Kfz)

Zusatzbelastung Straßenverkehr: Photochemie (PC), NO₂-Direktemission (direkt).

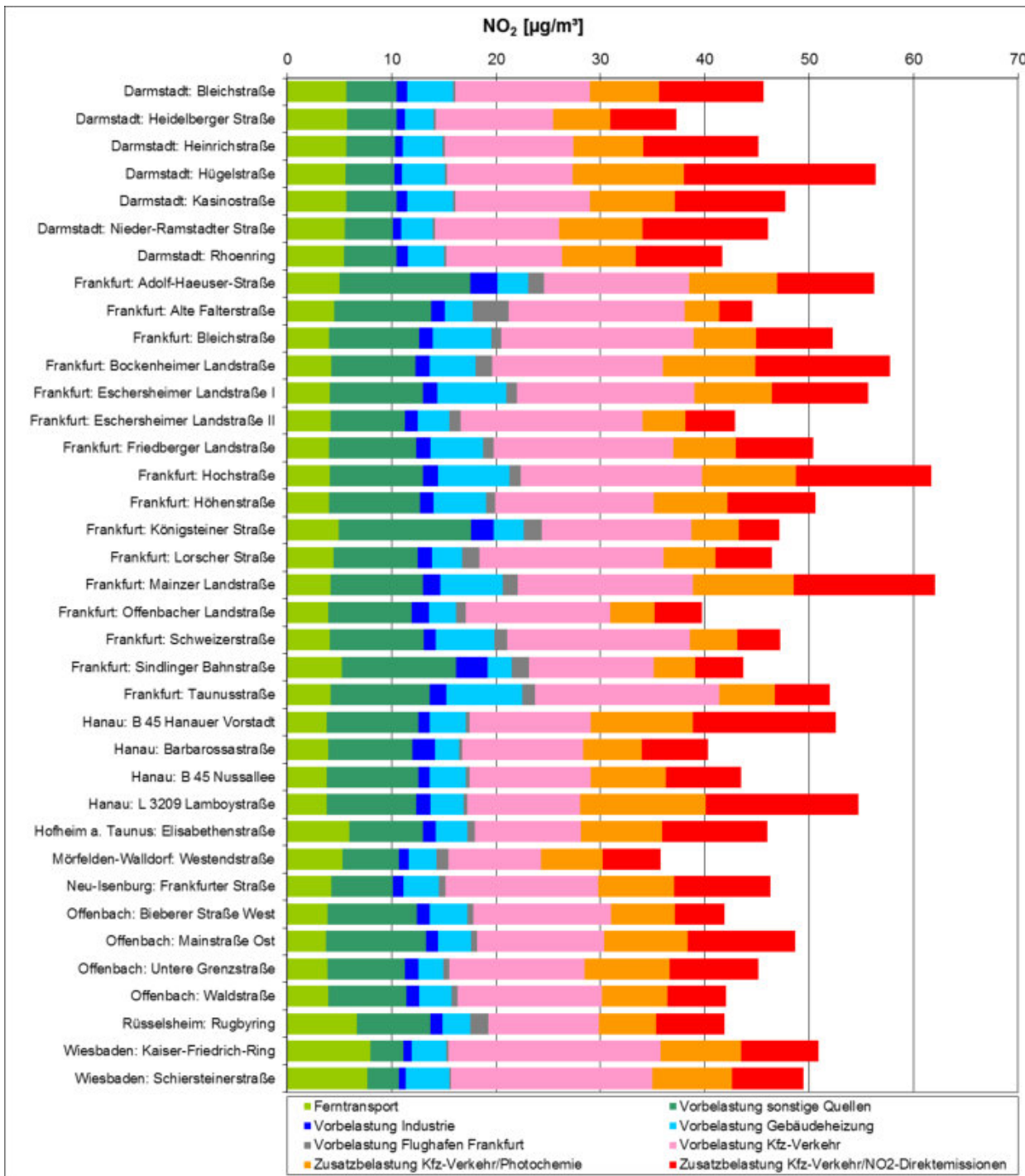


Abbildung 6-39: Gesamtbelastung und Verursacheranteile NO₂ absolut im Jahr 2013 für den Ballungsraum Rhein-Main

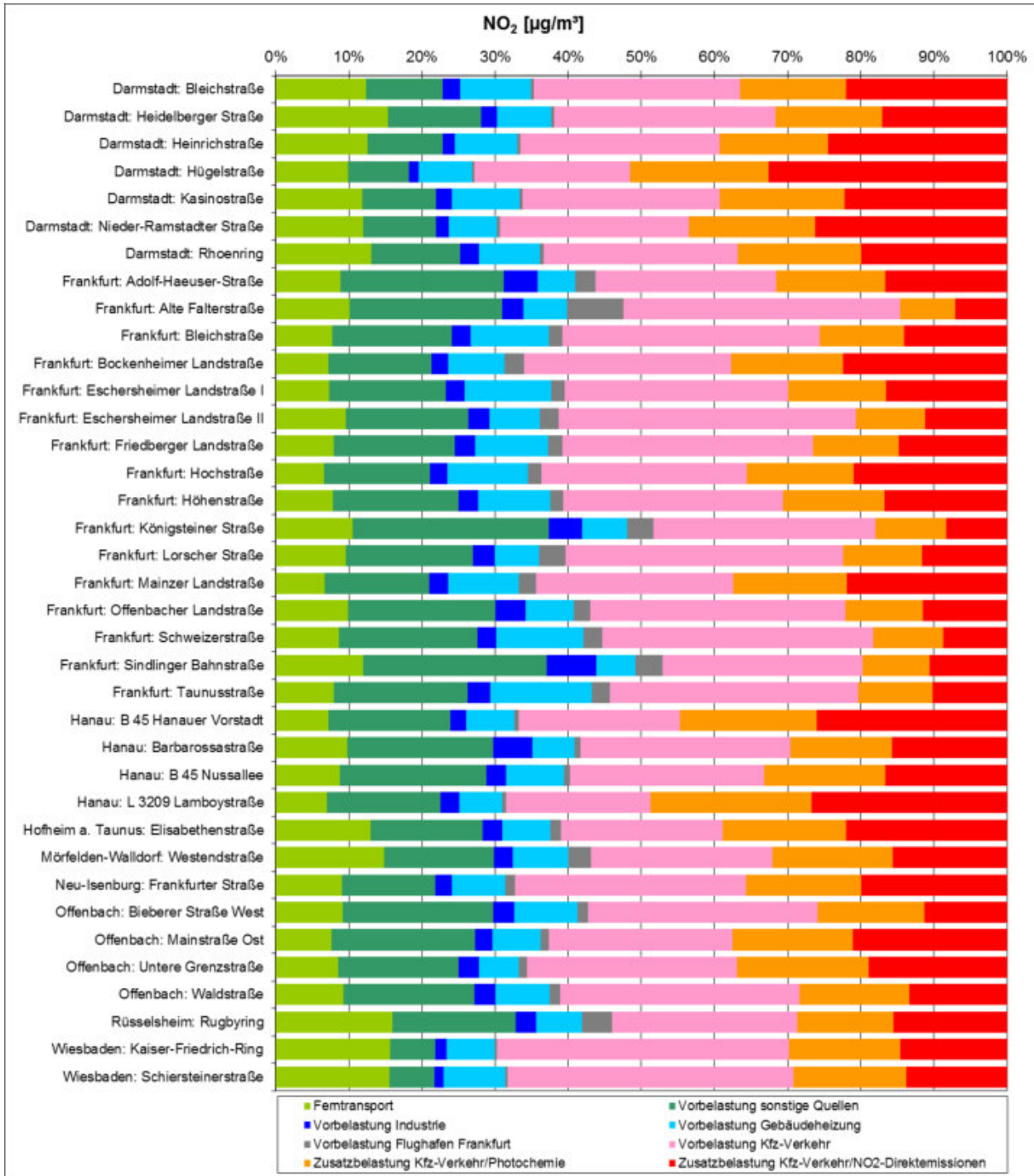


Abbildung 6-40: Verursacheranteile NO₂ relativ im Jahr 2013 für den Ballungsraum Rhein-Main

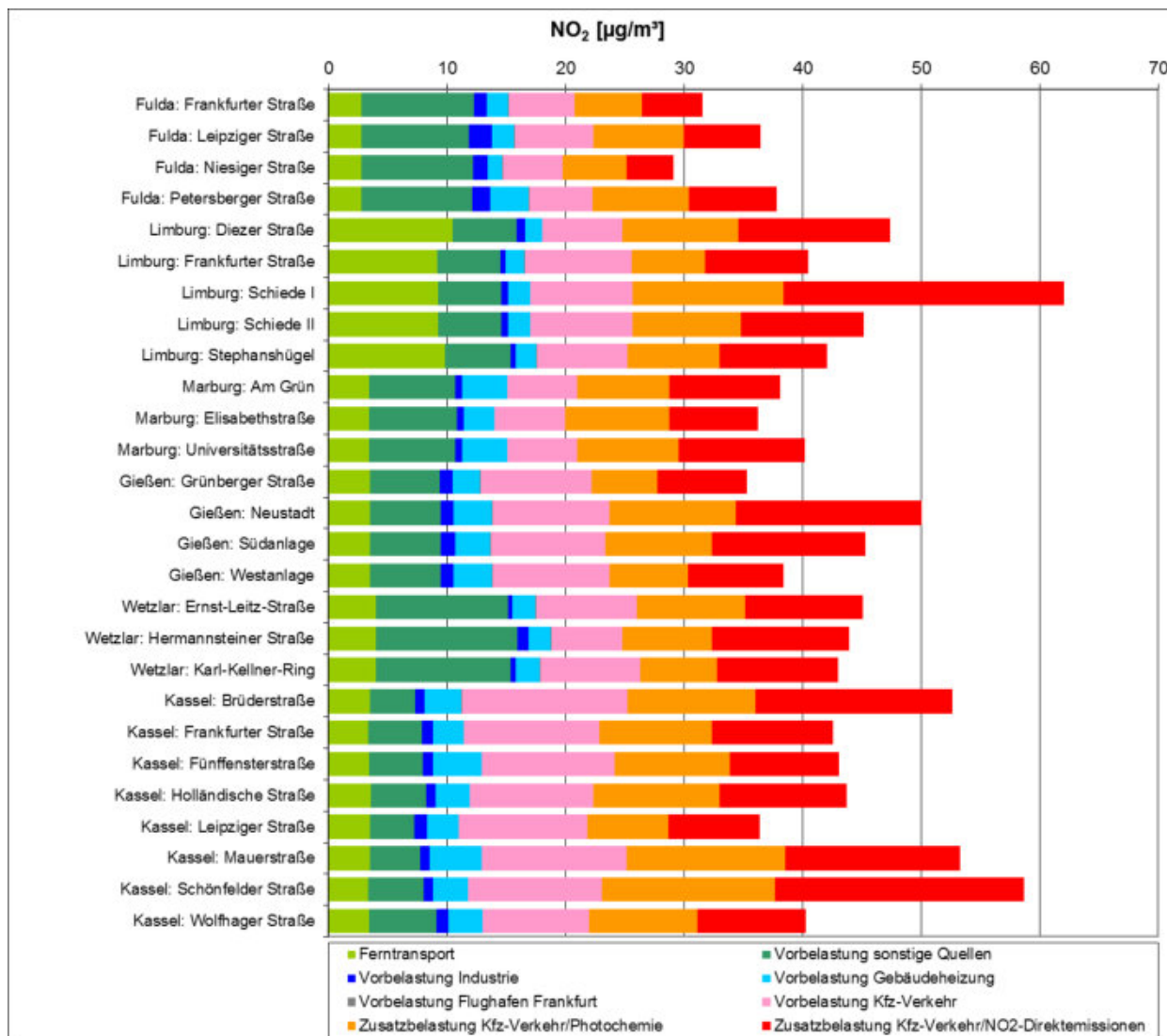


Abbildung 6-41: Gesamtbelastung und Verursacheranteile NO₂ absolut im Jahr 2013 für Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill sowie den Ballungsraum Kassel

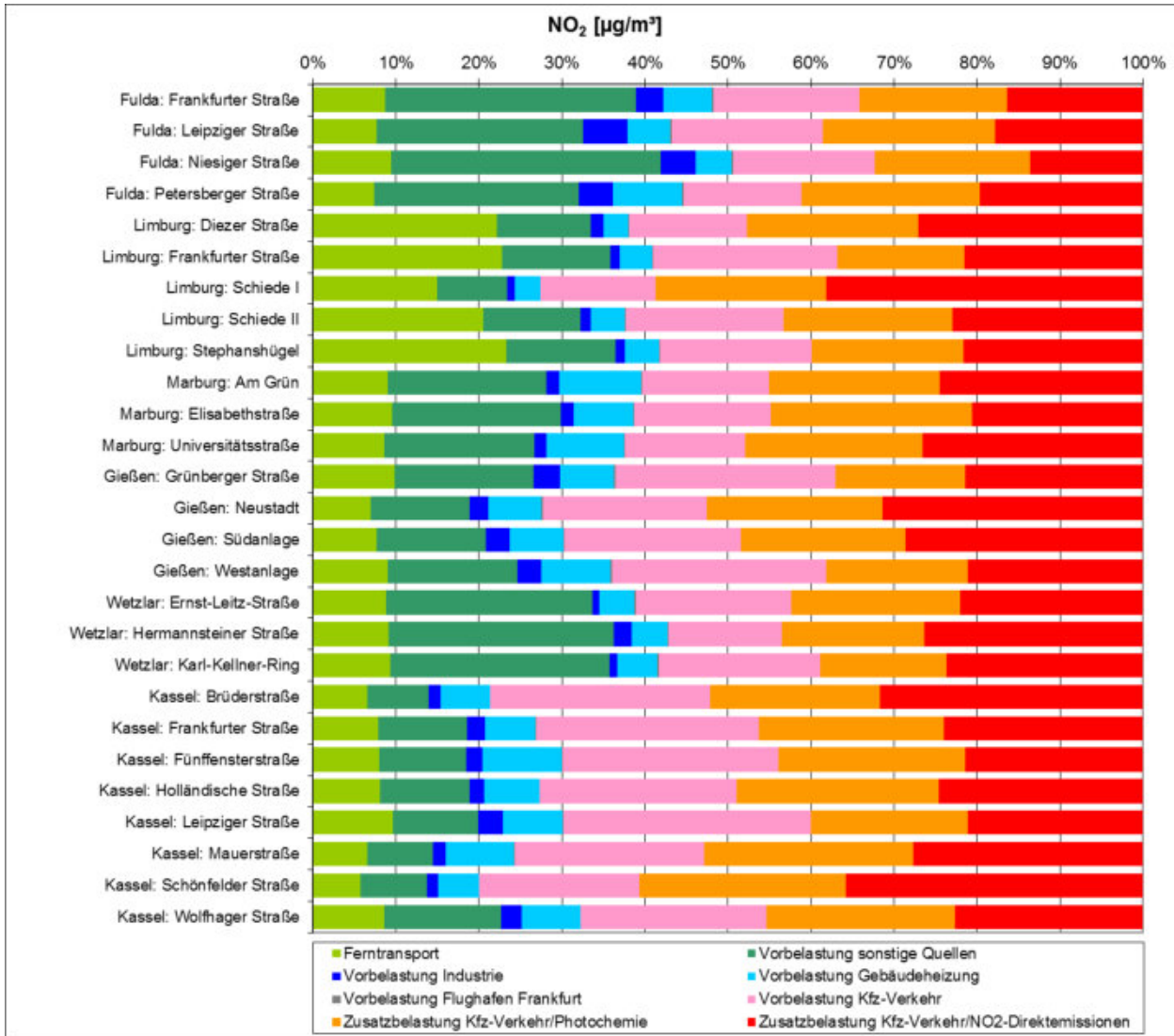


Abbildung 6-42: Verursacheranteile NO₂ relativ im Jahr 2013 für Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill sowie den Ballungsraum Kassel

6.2.2.2 PM10

Die berechneten Jahresmittelwerte der PM10-Gesamtbelastung an den untersuchten Straßenabschnitten weisen bei einem Mittelwert von 24.3 µg/m³ mit Werten zwischen 20.1 und 31.0 µg/m³ erwartungsgemäß eine deutlich geringere Spannweite als die NO₂-Jahresmittelwerte auf. Für alle Straßenabschnitte liegen die berechneten Jahresmittelwerte deutlich unter dem Grenzwert der 39. BImSchV in Höhe von 40 µg/m³. Die Spitzenwerte der PM10-Belastung werden mit über 28 µg/m³ in

- Hanau: L 3209 Lamboyostraße,
- Limburg: Schiede I und
- Kassel: Schönfelder Straße

erreicht. Gemäß dem statistischen Ansatz aus Abschnitt 5.5.3 kann lediglich dem Abschnitt Schiede I in Limburg eine Überschreitung des Tagesgrenzwertkriteriums der 39. BImSchV von mehr als 35 Überschreitungen des Tagesmittelwertes von 50 µg/m³ zugeordnet werden.

Bei der Aufteilung der PM₁₀-Gesamtbelastung nach Verursachern liegt die Vorbelastung für alle Straßenräume auf einem hohen Niveau von im Mittel 19.5 µg/m³ bei Werten zwischen 17.5 µg/m³ und 21.8 µg/m³ bzw. relativen Anteilen zwischen 61 und 93 % und einem Mittelwert von 81 %. In dieser Vorbelastung ist der Ferntransport, der hier als die durch alle außerhessischen Emissionen⁶ verursachte Belastung definiert wird (s. Abschnitt 6.2.2), mit Werten zwischen 9.2 und 12.0 µg/m³ bei einem Mittelwert von 10.5 µg/m³ enthalten. Die Anteile dieses Ferntransports an der Gesamtbelastung liegen zwischen 35 und 52 % im Mittel bei 44 %. Diese Prozentangaben beziehen sich auf die Ergebnisse der mit dem RCG-Modell durchgeführten Quellgruppenanalysen. Ebenfalls in der hier verwendeten Vorbelastung enthalten ist unter „Sonstige“ der Beitrag aus der Kombination der Modelldaten mit den Messwerten (s. Abschnitt 5.3). Ein nicht genauer zu spezifizierender Teil dieses Beitrags ist auch mit dem Ferntransport verknüpft. Dieser Umstand muss bei der Bewertung der oben aufgeführten Anteile des Ferntransports an der Vorbelastung berücksichtigt werden.

Mit Werten zwischen 3.3 und 13.2 µg/m³ bei einem Mittelwert von 6.6 µg/m³ und entsprechenden Anteilen zwischen 17 und 43 % ist der Straßenverkehr mit einem mittleren Anteil von 27 % die größte innerhessische Quellengruppe. Der niedrigste Anteil wird für die Niesiger Straße in Fulda und der höchste für die Schiede I in Limburg berechnet. Dort sind 39 % der Gesamtbelastung durch den lokalen Verkehr auf dem Straßenabschnitt selbst verursacht. Insgesamt liegt der Anteil der jeweils durch den lokalen Verkehr verursachten Belastung mit Werten zwischen 7 und 39 % im Mittel bei 19 %.

Der Beitrag der Quellengruppe Industrie ist mit Werten zwischen 0.1 µg/m³ und 0.5 µg/m³ bei einem Mittelwert von 1.0 µg/m³ und entsprechenden relativen Anteilen zwischen 0 und 2 % und im Mittel 1 % gering.

Etwa drei Mal so hoch, aber ebenfalls gering, ist der Beitrag der Gebäudeheizung und Kleinverbraucher mit Werten zwischen 0.5 µg/m³ und 2.7 µg/m³ bei einem Mittelwert von 0.5 µg/m³. Die Anteile der Quellengruppe liegen zwischen 2 % bzw. 11 % im Mittel bei 5 %. Der Beitrag des Flughafens Frankfurt ist wegen seiner räumlich begrenzten Wirkung im Mittel über das ganze Untersuchungsgebiet mit 0.1 µg/m³ bzw. 0 % sehr gering. Anteile ab 0.5 % treten im Ballungsraum Rhein-Main in den Städten Frankfurt und Rüsselsheim auf und erreichen Werte von bis zu 0.3 µg/m³ bzw. etwas über 1 %.

Für PM₁₀ finden sich auch relevante Beiträge sonstiger Emittenten sowie aus der bereits Anpassung der Modellwerte an die Messdaten zwischen 2.4 und 8.2 µg/m³ und einem Mittelwert von 5.7 µg/m³. Die entsprechenden relativen Anteile liegen mit einem Mittelwert von 10 % zwischen 24 und 34 %.

⁶ Enthalten sind ebenfalls die Emissionen aus nicht anthropogenen Quellen in Hessen.

Tabelle 6-10: Gesamtbelastung und Verursacheranteile PM10 absolut im Jahr 2013 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

ID	Stadt	Straße	Ge- samt [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Ge- samt	Vorbelastung					Zu- satz- bel.	
					FT	Son	Ind	Gh/ KV	Flug F		Kfz
Ballungsraum Rhein-Main											
1		Bleichstr.	24.8	19.8	11.7	4.3	0.2	1.4	0.1	2.1	5.0
2		Heidelbg. Str.	22.3	19.0	11.5	4.6	0.2	0.9	0.1	1.6	3.3
3		Heinrichstr.	24.3	19.5	11.6	4.4	0.2	1.2	0.1	1.9	4.9
4	Darmstadt	Hügelstr.	27.8	19.4	11.6	4.4	0.2	1.3	0.1	1.9	8.4
5		Kasinostr.	25.2	19.8	11.7	4.3	0.2	1.4	0.1	2.1	5.4
6		N.-Ramst. Str.	24.5	19.1	11.5	4.5	0.2	1.0	0.1	1.8	5.4
7		Rhoenring	23.3	19.2	11.5	4.6	0.2	1.1	0.1	1.7	4.1
8		A.-Haeuser-Str.	24.1	20.6	11.0	5.9	0.5	1.0	0.1	2.1	3.4
9		Alte Falterstr.	21.4	20.0	10.8	5.1	0.3	0.9	0.3	2.6	1.5
10		Bleichstr.	25.3	21.4	10.9	4.9	0.3	1.9	0.1	3.3	3.9
11		Bock. Landstr.	26.2	20.3	10.9	4.6	0.3	1.5	0.1	2.8	6.0
12		Esch. Landstr. I	26.4	21.4	10.9	4.7	0.3	2.2	0.1	3.1	5.0
13		Esch. Landstr. II	22.4	19.8	10.9	4.8	0.3	1.0	0.1	2.8	2.7
14		Friedb. Landstr.	24.7	20.9	11.0	4.9	0.3	1.6	0.1	3.0	3.8
15	Frankfurt	Hochstr.	28.8	21.5	11.0	4.5	0.3	2.4	0.1	3.2	7.3
16		Höhenstr.	25.1	20.7	10.9	5.4	0.3	1.5	0.1	2.6	4.3
17		Königst. Str.	22.5	20.6	10.9	6.0	0.4	0.9	0.2	2.2	1.8
18		Lorscher Str.	22.4	19.5	10.7	4.8	0.3	0.9	0.2	2.7	2.9
19		Mainz. Landstr.	27.8	21.2	11.0	4.6	0.3	2.1	0.1	3.1	6.6
20		Offenb. Landstr.	22.2	19.8	10.4	5.9	0.5	0.8	0.1	2.1	2.4
21		Schweizerstr.	23.1	20.9	10.7	4.9	0.3	1.8	0.1	3.2	2.3
22		Sindl. Bahnstr.	21.5	19.5	10.8	5.4	0.5	0.8	0.2	1.9	1.9
23	Taunusstr.	24.5	21.8	10.9	4.4	0.3	2.7	0.1	3.4	2.7	
24	Hanau	B45 Han. Vorst.	27.0	20.4	10.3	6.6	0.4	1.3	0.1	1.7	6.6
25		Barbarossastr.	23.9	20.3	10.5	6.7	0.5	0.9	0.1	1.7	3.6
26		B45 Nussallee	24.3	20.4	10.3	6.6	0.4	1.3	0.1	1.7	3.9
27		L3209 Lamb.str.	28.2	20.2	10.4	6.6	0.3	1.2	0.1	1.6	8.0
28	Hofheim	Elisabethenstr.	22.3	18.3	11.0	4.6	0.2	0.9	0.1	1.5	4.0
29	Mfd.-Wld.	Westendstr.	22.0	18.3	11.0	5.0	0.2	0.8	0.1	1.3	3.7
30	N.-Isenbg.	Frankfurter Str.	23.2	18.7	10.5	5.0	0.2	0.8	0.1	2.0	4.5
31	Offenbach	Bieberer Str.	23.1	20.3	10.6	6.1	0.2	1.2	0.1	2.0	2.8
32		Mainstr. Ost	26.1	20.2	10.5	6.2	0.2	1.1	0.1	2.0	5.9
33		Unt. Grenzstr.	24.3	19.6	10.6	6.1	0.2	0.8	0.1	1.8	4.7
34		Waldstr.	22.9	19.8	10.7	5.9	0.2	1.0	0.1	1.9	3.0
35	Rüsselsh.	Rugbyring	23.8	19.8	11.6	5.2	0.2	1.0	0.2	1.6	4.0
36	Wiesba-	K.-Friedr.-Ring	24.2	20.1	11.2	2.7	0.3	1.4	0.0	4.4	4.0
37	den	Schiersteinerstr.	23.7	19.8	11.1	2.4	0.3	1.7	0.0	4.3	3.8
Mittel- und Nordhessen											
38	Fulda	Frankfurter Str.	21.1	17.8	9.2	7.0	0.2	0.6	0.0	0.8	3.3
39		Leipziger Str.	22.3	18.4	9.6	7.0	0.2	0.6	0.0	0.9	3.9
40		Niesiger Str.	20.1	17.5	9.3	6.8	0.2	0.5	0.0	0.8	2.6
41		Petersberg. Str.	22.7	18.3	9.7	6.9	0.2	0.9	0.0	0.8	4.4
42	Limburg	Diezer Str.	26.9	19.1	12.0	5.2	0.3	0.5	0.0	1.0	7.8
43		Frankfurter Str.	23.2	19.0	11.3	5.4	0.3	0.6	0.0	1.3	4.2
44		Schiede I	31.0	19.0	11.4	5.3	0.3	0.6	0.0	1.3	12.0
45		Schiede II	24.8	19.0	11.4	5.3	0.3	0.6	0.0	1.3	5.8
46		Stephanshügel	24.6	19.1	11.7	5.3	0.3	0.6	0.0	1.1	5.6

ID	Stadt	Straße	Ge- samt [µg/m³]	Vorbelastung						Zu- satz- bel.	
				Ge- samt	FT	Son	Ind	Gh/ KV	Flug F		Kfz
Mittel- und Nordhessen (Fortsetzung)											
47		Am Grün	22.8	18.4	9.3	6.9	0.2	1.1	0.0	0.9	4.4
48	Marburg	Elisabethstr.	23.2	18.2	9.3	7.0	0.1	0.8	0.0	0.9	5.0
49		Universitätsstr.	23.8	18.4	9.3	6.9	0.2	1.1	0.0	0.9	5.4
Lahn-Dill											
50		Grünberger Str.	21.5	18.1	9.7	6.2	0.2	0.7	0.0	1.2	3.4
51	Gießen	Neustadt	25.2	18.6	9.6	6.3	0.2	1.0	0.0	1.4	6.6
52		Südanlage	24.0	18.5	9.8	6.2	0.2	0.9	0.0	1.3	5.5
53		Westanlage	22.6	18.6	9.6	6.3	0.2	1.0	0.0	1.4	4.0
54		Ernst-Leitz-Str.	24.7	19.8	9.4	8.0	0.3	0.8	0.0	1.2	4.9
55	Wetzlar	Hermannst. Str.	25.9	19.8	9.5	8.2	0.5	0.7	0.0	0.8	6.0
56		K.-Kellner-Ring	24.7	19.9	9.4	8.0	0.4	0.8	0.0	1.2	4.8
Ballungsraum Kassel											
57		Brüderstr.	26.1	19.2	9.8	6.3	0.1	1.1	0.0	1.9	6.8
58		Frankfurter Str.	24.2	18.9	9.8	6.7	0.1	0.8	0.0	1.5	5.3
59		Fünffensterstr.	23.8	19.3	9.9	6.4	0.1	1.4	0.0	1.5	4.5
60	Kassel	Holländ. Str.	24.6	18.9	9.9	6.4	0.1	1.0	0.0	1.4	5.7
61		Leipziger Str.	22.7	18.3	9.9	5.9	0.1	0.9	0.0	1.3	4.4
62		Mauerstr.	25.6	19.5	9.9	6.2	0.1	1.5	0.0	1.6	6.1
63		Schönfelder Str.	28.3	19.1	9.9	6.7	0.1	0.9	0.0	1.4	9.2
64		Wolfhager Str.	24.4	19.0	9.8	6.8	0.1	0.9	0.0	1.2	5.4
		Mittelwert	24.3	19.5	10.5	5.7	0.3	1.1	0.1	1.9	4.8
		Min	20.1	17.5	9.2	2.4	0.1	0.5	0.0	0.8	1.5
		Max	31.0	21.8	12.0	8.2	0.5	2.7	0.3	4.4	12.0

Vorbelastung: Ferntransport (FT), Sonstige Quellen (Son), Industrie (Ind), Gebäudeheizung und Kleinverbraucher (Gh/KV); Flughafen Frankfurt (Flug F); Straßenverkehr (Kfz); Zusatzbelastung Straßenverkehr (Zusatzbel.).

Tabelle 6-11: Gesamtbelastung und Verursacheranteile PM10 relativ im Jahr 2013

ID	Stadt	Straße	Ge- samt [µg/m³]	Ge- samt	Vorbelastung					Zu- satz- bel.	
					FT	Son	Ind	Gh/ KV	Flug F		Kfz
Ballungsraum Rhein-Main											
1		Bleichstr.	24.8	80%	47%	17%	1%	6%	0.2%	9%	20%
2		Heidelbg. Str.	22.3	85%	52%	21%	1%	4%	0.3%	7%	15%
3		Heinrichstr.	24.3	80%	48%	18%	1%	5%	0.2%	8%	20%
4	Darmstadt	Hügelstr.	27.8	70%	42%	16%	1%	5%	0.2%	7%	30%
5		Kasinostr.	25.2	79%	46%	17%	1%	6%	0.2%	8%	21%
6		N.-Ramst. Str.	24.5	78%	47%	18%	1%	4%	0.2%	7%	22%
7		Rhoenring	23.3	83%	49%	20%	1%	5%	0.2%	7%	17%
8		A.-Haeuser-Str.	24.1	86%	46%	25%	2%	4%	0.6%	9%	14%
9		Alte Falterstr.	21.4	93%	50%	24%	1%	4%	1.3%	12%	7%
10		Bleichstr.	25.3	85%	43%	19%	1%	7%	0.4%	13%	15%
11		Bock. Landstr.	26.2	77%	42%	17%	1%	6%	0.5%	11%	23%
12		Esch. Landstr. I	26.4	81%	41%	18%	1%	8%	0.4%	12%	19%
13		Esch. Landstr. II	22.4	88%	48%	21%	1%	4%	0.5%	13%	12%
14		Friedb. Landstr.	24.7	85%	44%	20%	1%	7%	0.4%	12%	15%
15	Frankfurt	Hochstr.	28.8	75%	38%	16%	1%	8%	0.4%	11%	25%
16		Höhenstr.	25.1	83%	44%	21%	1%	6%	0.4%	10%	17%
17		Königst. Str.	22.5	92%	49%	27%	2%	4%	0.7%	10%	8%
18		Lorscher Str.	22.4	87%	48%	21%	1%	4%	0.7%	12%	13%
19		Mainz. Landstr.	27.8	76%	39%	16%	1%	8%	0.5%	11%	24%
20		Offenb. Landstr.	22.2	89%	47%	26%	2%	4%	0.4%	9%	11%
21		Schweizerstr.	23.1	90%	46%	21%	1%	8%	0.5%	14%	10%
22		Sindl. Bahnstr.	21.5	91%	50%	25%	2%	4%	0.7%	9%	9%
23		Tanusstr.	24.5	89%	44%	18%	1%	11%	0.5%	14%	11%
24		B45 Han. Vorst.	27.0	76%	38%	24%	1%	5%	0.2%	6%	24%
25	Hanau	Barbarossastr.	23.9	85%	44%	28%	2%	4%	0.2%	7%	15%
26		B45 Nussallee	24.3	84%	43%	27%	1%	5%	0.2%	7%	16%
27		L3209 Lamb.str.	28.2	72%	37%	24%	1%	4%	0.2%	6%	28%
28	Hofheim	Elisabethenstr.	22.3	82%	49%	21%	1%	4%	0.4%	7%	18%
29	Mfd.-Wld.	Westendstr.	22.0	83%	50%	23%	1%	4%	0.5%	6%	17%
30	N.-Isenbg.	Frankfurter Str.	23.2	81%	45%	22%	1%	4%	0.3%	9%	19%
31		Bieberer Str.	23.1	88%	46%	27%	1%	5%	0.3%	9%	12%
32	Offenbach	Mainstr. Ost	26.1	77%	40%	24%	1%	4%	0.3%	8%	23%
33		Unt. Grenzstr.	24.3	80%	44%	25%	1%	3%	0.3%	7%	20%
34		Waldstr.	22.9	87%	47%	26%	1%	4%	0.3%	9%	13%
35	Rüsselsh.	Rugbyring	23.8	83%	49%	22%	1%	4%	0.7%	7%	17%
36	Wiesba-	K.-Friedr.-Ring	24.2	83%	46%	11%	1%	6%	0.2%	18%	17%
37	den	Schiersteinerstr.	23.7	84%	47%	10%	1%	7%	0.2%	18%	16%
Mittel- und Nordhessen											
38		Frankfurter Str.	21.1	84%	44%	33%	1%	3%	0.2%	4%	16%
39	Fulda	Leipziger Str.	22.3	82%	43%	31%	1%	3%	0.2%	4%	18%
40		Niesiger Str.	20.1	87%	46%	34%	1%	2%	0.2%	4%	13%
41		Petersberg. Str.	22.7	81%	43%	30%	1%	4%	0.2%	3%	19%
42		Diezer Str.	26.9	71%	45%	19%	1%	2%	0.1%	4%	29%
43		Frankfurter Str.	23.2	82%	49%	23%	1%	3%	0.2%	6%	18%
44	Limburg	Schiede I	31.0	61%	37%	17%	1%	2%	0.1%	4%	39%
45		Schiede II	24.8	77%	46%	22%	1%	3%	0.1%	5%	23%
46		Stephanshügel	24.6	77%	47%	22%	1%	3%	0.1%	5%	23%

ID	Stadt	Straße	Ge- samt [µg/m³]	Vorbelastung						Zu- satz- bel.	
				Ge- samt	FT	Son	Ind	Gh/ KV	Flug F		Kfz
Mittel- und Nordhessen (Fortsetzung)											
47		Am Grün	22.8	81%	41%	30%	1%	5%	0.2%	4%	19%
48	Marburg	Elisabethstr.	23.2	78%	40%	30%	1%	4%	0.2%	4%	22%
49		Universitätsstr.	23.8	77%	39%	29%	1%	5%	0.2%	4%	23%
Lahn-Dill											
50		Grünberger Str.	21.5	84%	45%	29%	1%	3%	0.2%	6%	16%
51	Gießen	Neustadt	25.2	74%	38%	25%	1%	4%	0.2%	5%	26%
52		Südanlage	24.0	77%	41%	26%	1%	4%	0.2%	5%	23%
53		Westanlage	22.6	82%	43%	28%	1%	4%	0.2%	6%	18%
54		Ernst-Leitz-Str.	24.7	80%	38%	32%	1%	3%	0.2%	5%	20%
55	Wetzlar	Hermannst. Str.	25.9	77%	37%	32%	2%	3%	0.2%	3%	23%
56		K.-Kellner-Ring	24.7	80%	38%	32%	2%	3%	0.2%	5%	20%
Ballungsraum Kassel											
57		Brüderstr.	26.1	74%	38%	24%	1%	4%	0.2%	7%	26%
58		Frankfurter Str.	24.2	78%	40%	28%	1%	3%	0.2%	6%	22%
59		Fünffensterstr.	23.8	81%	42%	27%	1%	6%	0.2%	6%	19%
60	Kassel	Holländ. Str.	24.6	77%	40%	26%	1%	4%	0.2%	6%	23%
61		Leipziger Str.	22.7	81%	44%	26%	1%	4%	0.2%	6%	19%
62		Mauerstr.	25.6	76%	39%	24%	1%	6%	0.2%	6%	24%
63		Schönfelder Str.	28.3	68%	35%	24%	0%	3%	0.2%	5%	32%
64		Wolfhager Str.	24.4	78%	40%	28%	1%	4%	0.2%	5%	22%
		Mittelwert	24.3	81%	44%	24%	1%	5%	0.3%	8%	19%
		Min	20.1	61%	35%	10%	0%	2%	0.1%	3%	7%
		Max	31.0	93%	52%	34%	2%	11%	1.3%	18%	39%

Vorbelastung: Ferntransport (FT), Sonstige Quellen (Son), Industrie (Ind), Gebäudeheizung und Kleinverbraucher (Gh/KV); Flughafen Frankfurt (Flug F); Straßenverkehr (Kfz); Zusatzbelastung Straßenverkehr (Zusatzbel.).

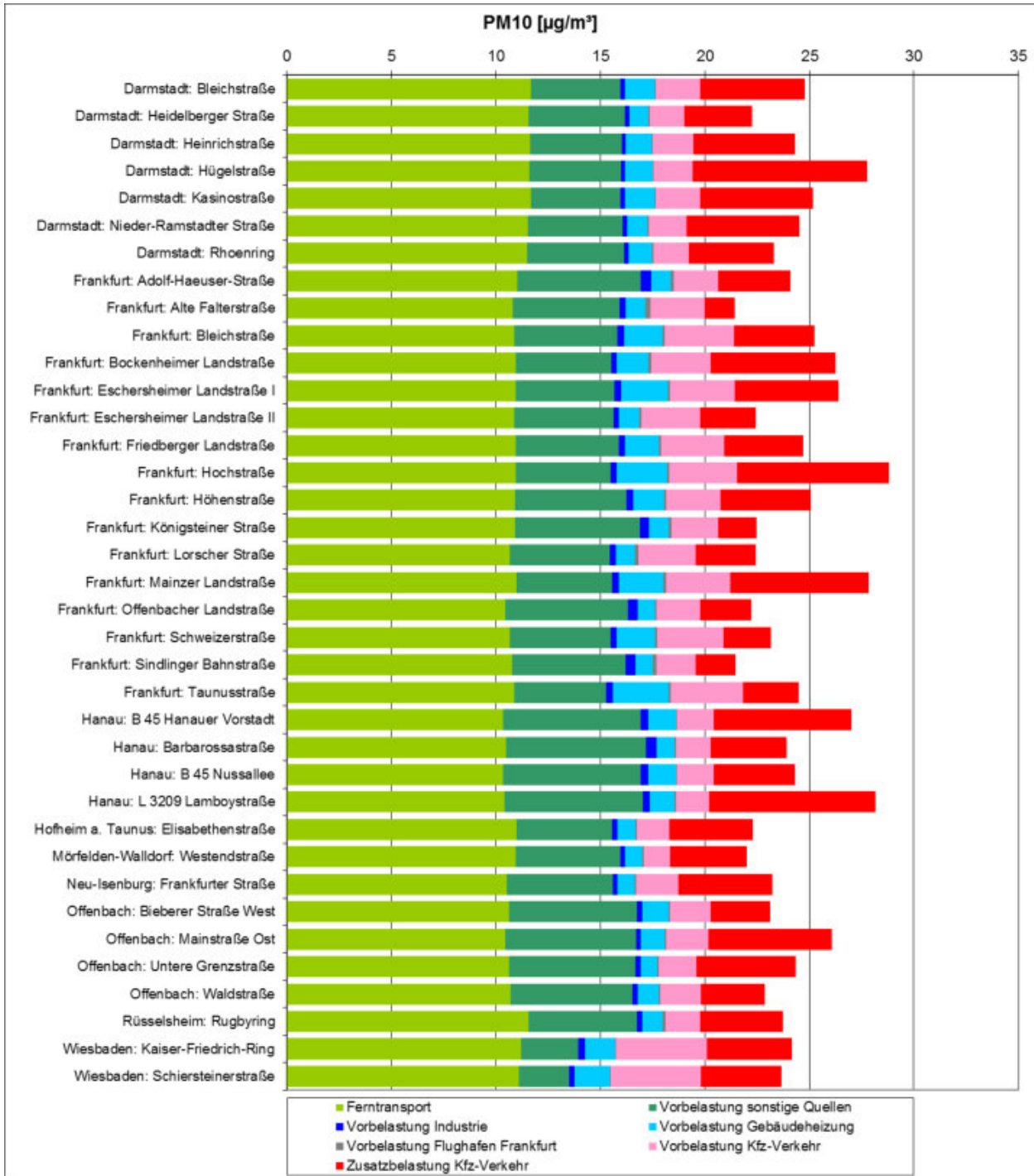


Abbildung 6-43: Gesamtbelastung und Verursacheranteile PM10 absolut im Jahr 2013 für den Ballungsraum Rhein-Main

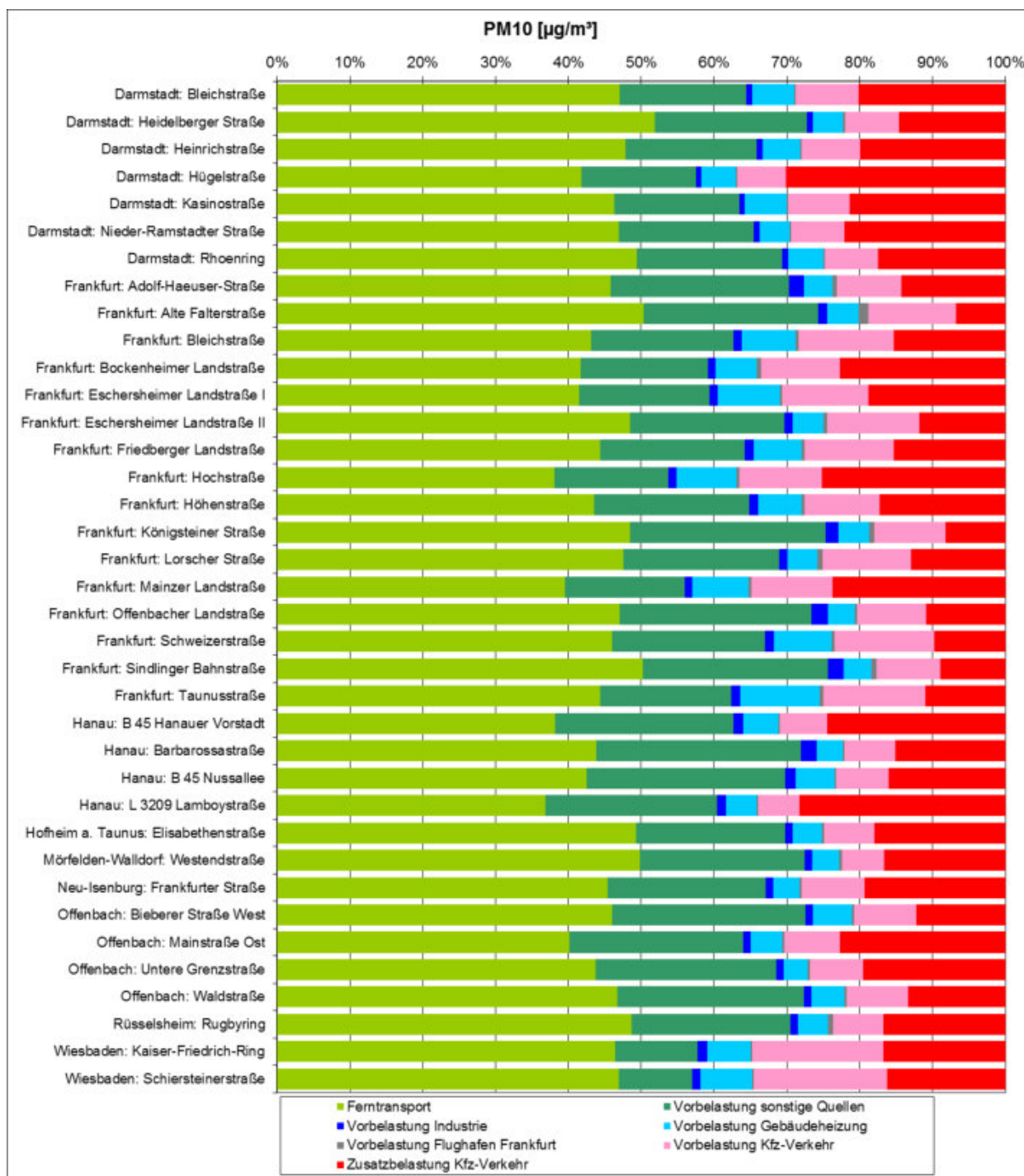


Abbildung 6-44: Verursacheranteile PM10 relativ im Jahr 2013 für den Ballungsraum Rhein-Main

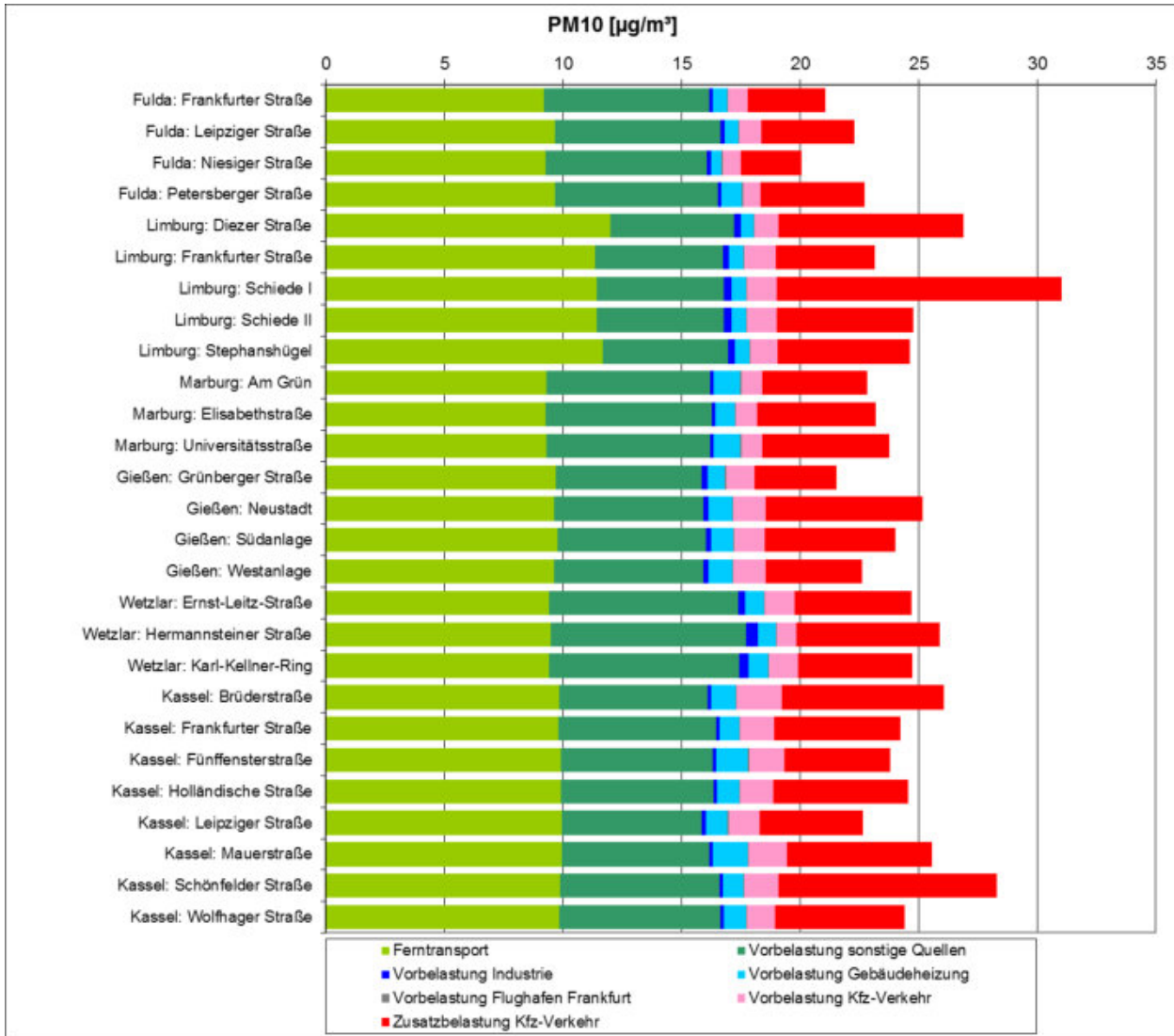


Abbildung 6-45: Gesamtbelastung und Verursacheranteile PM10 absolut im Jahr 2013 für Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill sowie den Ballungsraum Kassel

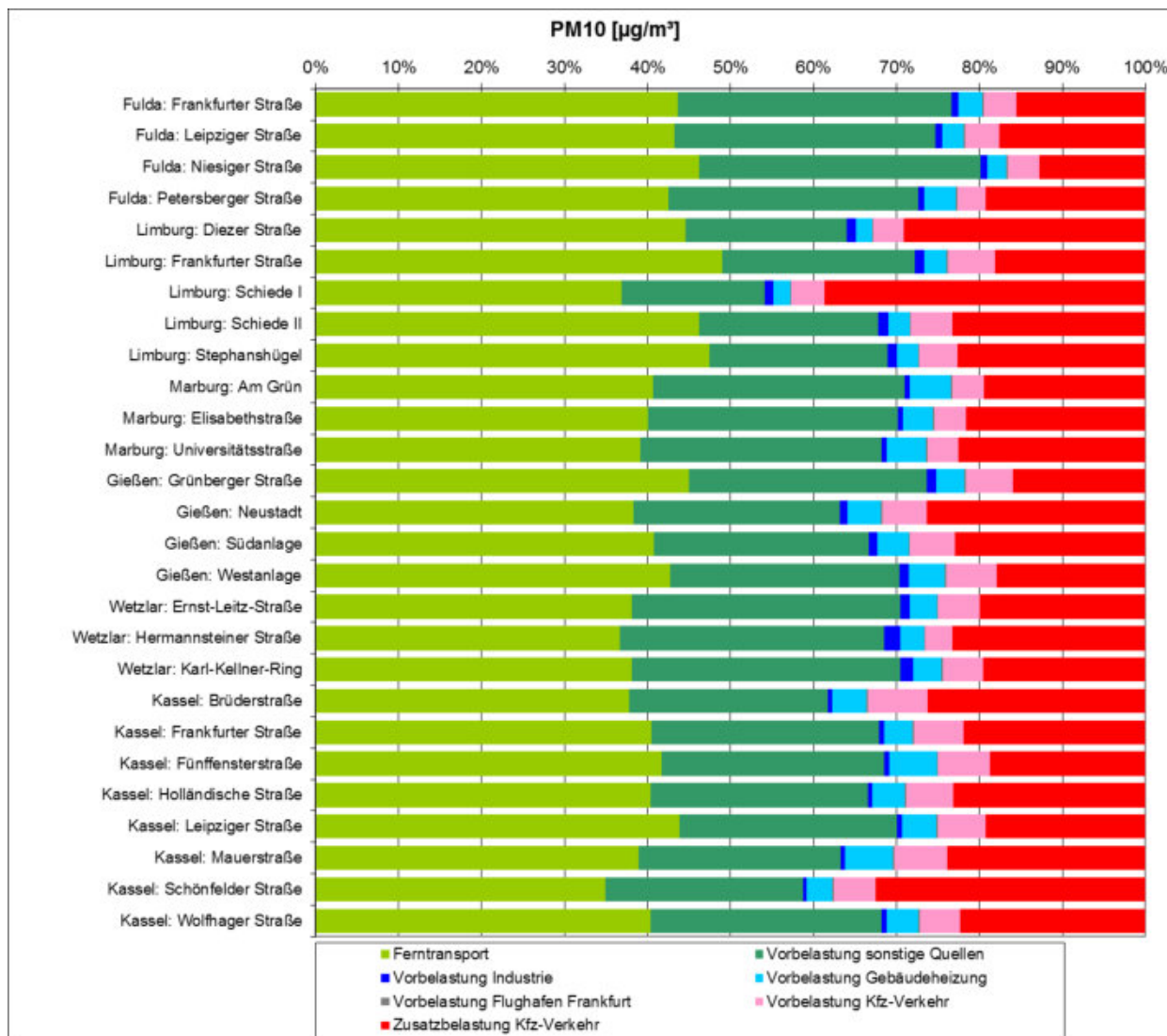


Abbildung 6-46: Verursacheranteile PM10 relativ im Jahr 2013 für Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill sowie den Ballungsraum Kassel

6.2.3 Verursacheranteile von Diesel-Kfz und schweren Nutzfahrzeuge

Für sechs vom Auftraggeber ausgewählte Straßenabschnitte wurde die Verursachermanalyse für den Bereich des Kfz-Verkehrs hinsichtlich der Beiträge der Diesel-Kfz und der schweren Nutzfahrzeuge an der lokalen Zusatzbelastung weiter detailliert. Dazu wurden zunächst im Rahmen der Emissionsmodellierung mit dem Modell IMMIS^{em,h} die Emissionsanteile der Diesel-Kfz und der schweren Nutzfahrzeuge separat ermittelt.

Für Partikel und NO_x wurde dann aus den Emissionsanteilen die jeweiligen Anteile an der Zusatz- und Gesamtbelastung abgeleitet. Da NO₂ ein photochemisch aktiver Stoff ist, der im Straßenraum komplexen Bildungsprozessen unterliegt, die u. a. auch vom Gesamtniveau der Belastung abhängen (s. Abschnitt 5.5.2) und der NO₂-Immissionsanteil von Teilgruppen der Kfz damit nicht ohne Weiteres modelliert werden kann, wurden die NO₂-Immissions-Beiträge aus den NO_x-Emissions-Beiträgen an den jeweiligen Straßenabschnitten abgeleitet. In Tabelle 6-12 sind diese Anteile zusammengestellt.

Für NO₂ wird deutlich, dass die lokalen Emissionen der Diesel-Kfz mit Werten über 80% der dominierende Hauptverursacher der lokalen Kfz-Zusatzbelastung sind und auch zur Gesamtbelastung mit einem Drittel bis zur Hälfte beitragen. Der Beitrag der schweren Nutzfahrzeuge variiert aufgrund deren unterschiedlicher Anteile am Kfz-Verkehr stärker und erreicht in den sechs Abschnitten Beiträge von bis zu 26 % an der Zusatz- und 14 % an der Gesamtbelastung.

Der Anteil der lokalen Abgasemissionen an der PM10-Belastung ist aufgrund des hohen Anteils der nicht-motorbedingten Emissionen an den PM10-Emissionen für die Diesel-Kfz und die schweren Nutzfahrzeuge insgesamt deutlich geringer als bei NO₂.

Tabelle 6-12: Anteile lokaler Abgasemissionen von schweren Nutzfahrzeugen (sNfz) und Diesel-Kfz an der Immissionsbelastung für ausgewählte Straßenabschnitte

Abschnitt	NO ₂				PM10			
	Zusatzbelastung		Gesamtbelastung		Zusatzbelastung		Gesamtbelastung	
	sNfz	Diesel	sNfz	Diesel	sNfz	Diesel	sNfz	Diesel
Darmstadt: Hügelstraße	23%	83%	12%	43%	3.8%	26%	1.2%	7.8%
Frankfurt: Friedberger Landstr.	13%	84%	3%	22%	1.6%	23%	0.2%	3.6%
Wiesbaden: Kaiser-Friedrich-Ring	30%	85%	9%	25%	4.2%	22%	0.7%	3.7%
Offenbach: Untere Grenzstr.	26%	84%	10%	31%	3.8%	24%	0.7%	4.7%
Limburg: Schiede I	23%	90%	14%	53%	3.0%	22%	1.1%	8.5%
Marburg: Universitätsstr.	22%	90%	11%	43%	3.2%	22%	0.7%	4.9%

7 Zusammenfassung

In dem hier dokumentierten Projekt wurde zunächst die Luftqualität für das Gebiet von Hessen für die Stoffe NO₂ und PM₁₀ ermittelt. Aufgrund der teilweise starken orographischen Gliederung in Teilen Hessens und der hohen räumlichen Differenzierung der Emissionen relevanter Quellengruppen wurden die Arbeiten in einer Auflösung von 500 x 500 m² durchgeführt.

Um zu qualitativ möglichst guten Aussagen zu kommen, wurden für den Basisfall 2013 und die Prognose 2020 mit dem FLADIS-System interpolierte Schadstoffmesswerte mit räumlich hoch aufgelösten Simulationsergebnissen des dreidimensionalen chemischen Transportmodells RCG in stündlicher Auflösung kombiniert.

Ergänzend wurden mit dem RCG-Modell Simulationsrechnungen durchgeführt, um den Beitrag von fünf Quellengruppen zur Immissionsbelastung in Hessen zu ermitteln.

Als Grundlage für die Modellrechnungen wurden nach der Festlegung des repräsentativen Bezugsjahres 2013 zunächst mit dem TRAMPER-System dreidimensionale meteorologische Felder zum Antrieb des Transportmodells erzeugt. Für eine Ausbreitungsmodellierung in hoher räumlicher Auflösung ist zudem ein Emissionskataster in möglichst hoher räumlicher Differenzierung als Eingangsdatensatz erforderlich. Da die Emissionen einiger relevanter Quellengruppen in Hessen nur als Summenwerte größerer räumlicher Einheiten vorlagen, mussten sie räumlich disaggregiert werden. Dies wurde auf Basis von Gebäude- und Landnutzungsdaten quellengruppenspezifisch mit einem geographischen Informationssystem durchgeführt. Für die Prognose 2020 wurden die Emissionen entsprechend verfügbarer Emissionsprognosen fortgeschrieben.

Für die Kombination der Mess- und der Modelldaten zum Gesamtergebnis wurden die Messdaten aus Hessen um Daten benachbarter Bundesländer ergänzt und damit verschiedene Interpolationsverfahren getestet. Die Ergebnisse wurden mit dem „leave-one-out“-Verfahren zur Kreuzvalidierung entsprechend der VDI Richtlinie zur „Ermittlung der Unsicherheit räumlicher Beurteilungen der Luftqualität“ vergleichend bewertet und ein einheitliches Verfahren für die untersuchten Komponenten ausgewählt. Die im Rahmen dieser Arbeitsschritte erstellten Auswertungen und Abbildungen zeigen, dass, trotz der hohen Erklärungswerte der reinen Modellergebnisse, eine Assimilation an die Messwerte und anschließende Kombination mit einer Interpolation in stündlicher Auflösung eine deutliche Qualitätsverbesserung liefert.

Mit dem hier angewendeten System der Assimilierung der Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen mit photochemischen Modellen mit Messungen zu Flächendarstellungen der Immissionen wird es möglich, Strukturen, die durch die Orographie und die räumliche Verteilung der Emissionen hervorgerufen werden, adäquat abzubilden. Ein rein auf Messungen basierendes Interpolationsverfahren kann dies selbst bei einer hohen Messstationsdichte nur sehr begrenzt leisten.

Die Ergebnisse der einzelnen Fälle und Szenarien wurden tabellarisch und insbesondere kartographisch aufbereitet und dargestellt. Für den Basisfall 2013 ist die mittlere NO₂-Belastung gekennzeichnet durch hohe Belastungen entlang der großen Verkehrsachsen und in den Großstädten bzw. Ballungsräumen und geringen Belastungen in den ländlichen Räumen. Bei PM₁₀ zeigt sich grundsätzlich eine ähnliche Raumstruktur, die aber – aufgrund des gegenüber NO₂ deutlich höheren Beitrags der außerhalb Hessens liegenden Quellen – nivellierter ist.

Die Herausnahme der Emissionen einer der betrachteten Quellengruppen führt zu einer flächendeckenden Abnahme der mittleren NO₂- und PM₁₀-Konzentrationen. Die Beiträge der Emissionen von Gebäudeheizung und Kleinverbrauchern zur NO₂-Konzentration in den bevölkerungstärkeren Regionen liegen bei etwa 15 bis maximal 25 %. Die Beiträge der Industrie können lokal bis zu 50 % reichen. In der Fläche liegt der Betrag aber unter 10 %. Der Straßenverkehr trägt im Nahbereich der Hauptverkehrsachsen in der Größenordnung von 50 bis 85 % zu den NO₂-Jahresmittelwerten bei. Der relative Beitrag der Emissionen des Frankfurter Flughafens zu den NO₂-Jahresmittelwerten am Boden schwankt zwischen Werten von mehr als 50% im direkten Flughafenbereich bis zu einem sehr geringen Beitrag außerhalb des Rhein-Main-Gebiets. In den Ballungsgebieten und entlang der Hauptverkehrsachsen können insgesamt circa 90 % der NO₂-Konzentrationen auf die Emissionen aus Hessen zurückgeführt werden. Großflächig liegen die Beiträge bei über 60 %. Zum Rand Hessens hin nehmen die Beiträge ab und sinken in den ländlichen Randregionen auf bis zu 8 % ab.

Die industriellen PM₁₀-Beiträge sind wie bei NO₂ großflächig niedrig (unter 5 %), können aber lokal, hervorgerufen durch bodennahe Quellen, Werte von über 55 % erreichen. Die Verursacherguppe Gebäudeheizung und Kleinverbraucher trägt großflächig nur wenig zur gesamten PM₁₀-Konzentration bei. Lediglich in einigen Städten werden höhere Beiträge von 8 bis zu circa 14 % erreicht. Die Verkehrsbeiträge zur PM₁₀-Hintergrundbelastung liegen in großen Teilen Hessens zwischen 5 und 10 % mit niedrigeren Werten vor allem in den weniger bewohnten Regionen des Landes. Entlang der das Land durchquerenden Autobahnen werden höhere Beiträge berechnet. In den Ballungsräumen, vor allem in der Region Wiesbaden-Frankfurt, werden Beiträge bis zu 25 % erreicht. Der Beitrag der Emissionen des Frankfurter Flughafens zu den PM₁₀-Jahresmittelwerten am Boden erreicht nur im Flughafenbereich und dessen direktem Umfeld relevante Werte bis zu knapp 18 %. Mit zunehmender Entfernung vom Flughafen fallen die Beiträge schnell auf sehr geringe Werte. Der Beitrag aller hessischen anthropogenen PM₁₀-Emissionen ist großflächig unter 25 % und erreicht in den hoch belasteten Ballungsräumen bis zu 40 %. Die lokal nur an den Standorten einzelner industrieller PM₁₀-Quellen ermittelten Beiträge von bis zu 66 % wurden bereits oben diskutiert. In den ländlichen Randregionen von Hessen beträgt der Beitrag nur noch 3 %.

Mit Ausnahme bei der Quellgruppe Industrie sind die Beiträge der hier betrachteten Emissionsgruppen zu den PM₁₀-Jahresmittelwerten geringer als die entsprechenden Beiträge zu den NO₂-Jahresmitteln. Ursache des geringeren Eigenanteils ist der hohe Beitrag der sekundären Aerosole zu der PM₁₀-Gesamtmasse. Diese Aerosole bilden sich während des Ausbreitungsprozesses aus gasförmigen Vorläuferstoffen und können über große Entfernungen transportiert werden. Die Ursache ihrer Bildung liegt damit zu einem beträchtlichen Teil in den Emissionen außerhalb der Landesgrenzen.

Die Prognose für 2020 beruht, im Gegensatz zu der auf Hessen beschränkten Ermittlung der Beiträge einzelner Quellengruppen, auf einer ganz Europa umfassenden Emissionsentwicklung. In Hessen zeigt die Prognose 2020 in den emissionsärmeren Gebieten flächendeckend Rückgänge der NO₂-Belastungen gegenüber dem Basisfall 2013 im Bereich von 20 bis 25 %, in den Ballungsgebieten und entlang der Hauptverkehrsachse werden Rückgänge von 30 bis 45 % berechnet. Für PM₁₀ sind die bis 2020 erreichbaren Immissionsminderungen geringer als bei NO₂. Die Abnahmen bewegen sich großflächig im Bereich von 7 bis 10 %, in der Nähe der bodennahen industriellen Quellen mit hohen PM₁₀-Emissionen werden geringere Minderungen erreicht.

Die relativen Beiträge der Straßenverkehrsemissionen zu den prognostizierten Immissionen 2020 verändern sich im Vergleich mit dem Referenzfall 2013 nur wenig. Ähnliches gilt für die Beiträge aller hessischen Emissionen.

Insgesamt zeigen alle untersuchten Minderungsszenarien, dass die NO₂-Konzentrationen zu einem hohen Maße von Quellen in Hessen verursacht werden. Für PM₁₀ gilt dies wegen des hohen Anteils, der von außerhalb Hessens liegenden Quellen verursacht wird, nur zum Teil.

Die Berechnungen der Gesamtbelastung für 64 Straßenräume zeigen, dass unter den gegebenen Bedingungen an 48 Abschnitten Überschreitungen des seit 2010 gültigen NO₂-Jahresgrenzwerts und an einem Abschnitt Überschreitungen des PM₁₀-Tagesgrenzwerts prognostiziert werden. Leitet man für NO₂ aus dem Vergleich mit den Messwerten einen Sicherheitszuschlag in Höhe von 10 % ab und wendet diesen auf die modellierten Gesamtbelastungen an, werden für insgesamt 57 Abschnitte NO₂-Jahresmittelwerte über dem Grenzwert in Höhe von 40 µg/m³ berechnet.

Die Verursacheranalyse in den Straßenräumen für NO₂ zeigt, dass der Kfz-Anteil im Mittel 63 % beträgt. Im Straßenraum wird im Mittel etwas weniger als die Hälfte der NO₂-Zusatzbelastung photochemisch gebildet, etwas mehr als die Hälfte stammt aus NO₂-Direktemissionen des Kfz-Verkehrs. Die Anteile der Quellengruppen Industrie sowie Gebäudeheizung und Kleinverbraucher liegen im Mittel bei 3 bzw. 7 %. Der Anteil des Flughafens Frankfurt ist, mit Ausnahme einzelner Abschnitte im Ballungsraum Rhein-Main, sehr gering.

Der Verursacheranteil des Straßenverkehrs an der PM₁₀-Belastung liegt im Abschnitt mit der höchsten Gesamtbelastung bei 43 %, wobei davon 90 % direkt aus dem untersuchten Straßenraum stammen. Gemittelt über alle Straßenräume beträgt der Anteil der Vorbelastung ohne Straßenverkehr 73 %. Die Anteile der Quellengruppen Industrie und Gebäudeheizung liegen im Mittel bei 1 bzw. 5 %. Der Anteil des Flughafens Frankfurt ist sehr gering.

Eine detailliertere Verursacheranalyse für sechs Straßenabschnitte hinsichtlich der Beiträge der Diesel-Kfz und der schweren Nutzfahrzeuge zeigt, dass dort für NO₂ die lokalen Emissionen der Diesel-Kfz mit Werten über 80% der dominierende Hauptverursacher der lokalen Kfz-Zusatzbelastung sind und auch zur Gesamtbelastung mit einem Drittel bis zur Hälfte beitragen. Der Beitrag der schweren Nutzfahrzeuge variiert aufgrund deren unterschiedlicher Anteile am Kfz-Verkehr stärker und erreicht in den sechs Abschnitten Beiträge von bis zu 26 % an der Zusatz- und 14 % an der Gesamtbelastung.

8 Quellenverzeichnis

1. BImSchV, 2015: Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV). In der Fassung vom 31.8.2015. Berlin, 2015.
 2. BImSchV, 2015: Zweite Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen halogenierten organischen Verbindungen - 2. BImSchV). In der Fassung vom 31.08.2015. BGBl. I S. 1474. 2015.
 4. BImSchV, 2015: Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV). In der Fassung vom 28.4.2015. BGBl. I S. 670. 2015.
 11. BImSchV, 2013: Elfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Emissionserklärungen - 11. BImSchV). In der Fassung vom 2.5.2013. BGBl. I S. 1643. 2013.
 31. BImSchV, 2015: Einunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen - 31. BImSchV). In der Fassung vom 31.08.2015. BGBl. I S. 1471. 2015.
 39. BImSchV, 2015: Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV). In der Fassung vom 31.8.2015. BGBl. I S. 1474. 2015.
- Bessagnet, B.; Pirovano, G.; Mircea, M.; Cuvelier, C.; Aulinger, A.; Calori, G.; Ciarelli, G.; Manders, A.; Stern, R.; Tsyro, S.; Garcia Vivanco, M.; Thunis, P.; Pay, M.; Colette, A.; Couvidat, F.; Meleux, F.; Rouil, L.; Ung, A.; Aksoyoglu, S.; Baldasano, J. M.; Bieser, J.; Briganti, G.; Cappelletti, A.; D'Isidoro, M.; Finardi, S.; Kranenburg, R.; Silibello, C.; Carnevale, C.; Aas, W.; Dupont, J.; Fagerli, H.; Gonzalez, L.; Menut, L.; Pré-vôt, A. S. H.; Roberts, P.; White, L., 2016: Presentation of the EURODELTA III inter-comparison exercise - evaluation of the chemistry transport models' performance on criteria pollutants and joint analysis with meteorology. Atmos. Chem. Phys. Nr. 16, S. 12667-12701. 2016.
- BImSchG, 2015: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). In der Fassung vom 31.8.2015. BGBl. I S. 1474. 2015.
- BKG, 2015: Digitales Geländemodell Gitterweite 200 m Bundesrepublik Deutschland. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=3&gdz_user_id=0. 2015.
- Builtjes, P.; Jörß, W.; Stern, R.; Theloke, J., 2010: Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung (PAREST). Zusammenfassender Abschlussbericht. FE-Vorhaben FKZ 206 43 200/01. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2010.
- CEIP, 2015: EMEP Centre on Emission Inventories and Projections. <http://www.ceip.at/webdab-emission-database>. 2015.

- Cressie, N., 1993: Statistics for Spatial Data. Wiley-Interscience. 1993.
- DB Umwelt, 2015: DB Umwelt Deutsche Bahn AG, Berlin. Datenlieferung vom 23.11.2015.
- Diegmann, V.; Wiegand, G., 2000: FLADIS - A system for extending air pollution point data to continuous spatial information (according to EU Council Directive 96/62/EC). In: Longhurst, W. S.; Brebbia, C. A.; Power, H. (Ed.): Air Pollution VIII. WIT Press, 2000.
- DWD, 2009: Jahresrückblick: Deutschlandwetter im Jahr 2009. Deutscher Wetterdienst, Pressemitteilung 29.12.2009.
- DWD, 2010: Jahresrückblick: Deutschlandwetter im Jahr 2010. Deutscher Wetterdienst, Pressemitteilung 29.12.2010.
- DWD, 2011: Jahresrückblick: Deutschlandwetter im Jahr 2011. Deutscher Wetterdienst, Pressemitteilung 29.12.2011.
- DWD, 2012: Jahresrückblick: Deutschlandwetter im Jahr 2012. Deutscher Wetterdienst, Pressemitteilung 28.12.2012.
- DWD, 2013: Jahresrückblick: Deutschlandwetter im Jahr 2013. Deutscher Wetterdienst, Pressemitteilung 30.12.2013.
- DWD, 2014: Jahresrückblick: Deutschlandwetter im Jahr 2014. Deutscher Wetterdienst, Pressemitteilung 30.12.2014.
- Düring, I.; Schmidt, W., 2011: Einbindung des HBEFA 3.1 in das FIS Umwelt und Verkehr sowie Neufassung der Emissionsfaktoren für Aufwirbelung und Abrieb des Straßenverkehrs. Unter Mitarbeit der TU Dresden, BEAK Consultants GmbH. Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). 2011.
- Düring, I.; Schmidt, W., 2012: Erratum zu Tabelle 3.21 auf Seite 63 des Berichts „Einbindung des HBEFA 3.1 in das FIS Umwelt und Verkehr sowie Neufassung der Emissionsfaktoren für Aufwirbelung und Abrieb des Straßenverkehrs.“ Unter Mitarbeit der TU Dresden, BEAK Consultants GmbH. Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). 2012.
- ETC/ACM, 2013: European Topic Centre on Air Pollution and Climate Change Mitigation. <http://acm.eionet.europa.eu/databases/airbase/>. 2013.
- FAIRMODE, 2016: Guidance Document on Model Quality Objectives and Benchmarking. Version 2.0. Forum for Air Quality Modelling in Europe (FAIRMODE). 2016.
- FRAPORT, 2016: FRAPORT AG Frankfurt. Datenlieferung vom 11.04.2016
- Gandin, L.S., 1965: Objective Analysis of meteorological fields. Translated 1965 from Russian by Israeli Program for Scientific Translations. Jerusalem, 1965.
- GDWS, 2015: Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt Würzburg, Außenstelle Süd. Datenlieferung der vom 20.11.2015.
- Hertel, O.; Berkowicz, R., 1989: Modelling NO₂ concentrations in a street canyon. DMU Luft A-131. National Environmental Research Institute, Division of Emissions and Airpollution, Denmark. 1989.
- Hessen Mobil, 2016: Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement, Wiesbaden. Datenlieferung vom 23.02.2016.

- HeStaLa, 2014: Statistisches Jahrbuch Hessen 2013/14. Band 2: Bevölkerung, Bildung, Soziales und öffentliche Finanzen. Hessisches Statistisches Landesamt. 2014.
- HeStaLa, 2015: Hessen kompakt 2015. Land und Leute im Spiegel der Statistik. Hessisches Statistisches Landesamt. 2015.
- HLUG, 2010: Lufthygienischer Jahresbericht 2009. Teil I: Kontinuierliche Messungen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). 2010.
- HLUG, 2011: Lufthygienischer Jahresbericht 2010. Teil I: Kontinuierliche Messungen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). 2011.
- HLUG, 2012: Lufthygienischer Jahresbericht 2011. Teil I: Kontinuierliche Messungen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). 2012.
- HLUG, 2013: Lufthygienischer Jahresbericht 2012. Teil I: Kontinuierliche Messungen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). 2013.
- HLUG, 2014: Lufthygienischer Jahresbericht 2013. Teil I: Kontinuierliche Messungen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). 2014.
- HLUG, 2015a: Lufthygienischer Jahresbericht 2014. Teil I: Kontinuierliche Messungen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). 2015.
- HLUG, 2015b: Umweltatlas Hessen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). <http://atlas.umwelt.hessen.de>. Stand: 26.11.2015.
- HMUKLV, 2014: 2. Fortschreibung. Luftreinhalteplan für den Ballungsraum Rhein-Main. Teilplan Offenbach. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV). 2014.
- HMULF, 1999: Gewässerstrukturgüte in Hessen 1999 Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten (HMULF). 1999.
- IE, 2015: Emittentengruppe Kleingewerbe - Aktualisierung der Jahresemissionen des Kleingewerbes in Hessen. Leipziger Institut für Energie (IE). Auftraggeber: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 2015.
- IFEU, 2012: Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMOM, Version 5.3) für die Emissionsberichterstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011). Endbericht FKZ 360 16 037. ifeu Heidelberg GmbH. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2012.
- IFEU, 2015: Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMOM) für die Emissionsberichterstattung 2015 (Berichtsperiode 1990-2013). ifeu Heidelberg GmbH. In Zusammenarbeit mit Öko-Institut e.V. Institut für angewandte Ökologie. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Datenlieferung vom 12.11.2015.
- IFEU, 2016: Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMOM) für die Emissionsberichterstattung 2015 (Berichtsperiode 1990-2013). ifeu Heidelberg GmbH. In Zusammenarbeit mit Öko-Institut e.V. Institut für angewandte Ökologie. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Datenlieferung vom 10.02.2016.

- INFRAS, 2014: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. HBEFA Version 3.2. INFRAS AG, Bern. Auftraggeber: Umweltbundesamt, Berlin (Deutschland); Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern (Schweiz); Umweltbundesamt, Lebensmittelministerium und Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (Österreich); Trafikverket (Schweden); ADEME (Frankreich); SFT (Norwegen) und JRC (Joint Research Center der Europäischen Kommission). 2014.
- IVU, 1996a: Entwicklung eines Modellinstrumentariums für § 40 Abs. 2 BImSchG (Inerte Schadstoffe). Teilvorhaben I im Rahmen des Projekts „Entwicklung eines Modellinstrumentariums zur immissionsseitigen Bewertung von Kfz-Emissionen“. FE-Vorhaben FKZ 105 02 812/2. Auftraggeber: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. 1996.
- IVU, 1996b: Canyon Plume Box Modell, Version 3, Release 8. Handbuch. Abschlußbericht FE-Vorhaben FKZ 104 02 811. Anhang A. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 1996.
- IVU Umwelt, 2006: Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub und Stickstoffdioxid. FKZ 204 42 222. Veröffentlichung UBA-Texte 22/07. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Unter Mitarbeit von ifeu Heidelberg GmbH. 2006.
- IVU Umwelt, 2009: Ausbreitungsrechnungen als Beitrag zur Ursachenanalyse für den Luftreinhalteplan Rhein-Main. Auftraggeber: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 2009.
- IVU Umwelt, 2011a: Ausbreitungsrechnungen für die Gebiete Mittel- und Nordhessen, Lahn-Dill und den Ballungsraum Kassel. Auftraggeber: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). 2011.
- IVU Umwelt, 2011b: Stand der Modellierungstechnik zur Prognose der NO₂-Konzentrationen in Luftreinhalteplänen nach der 39. BImSchV. FKZ 363 01 333. Veröffentlichung UBA-Texte 70/2011. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2011.
- IVU Umwelt, 2012a: Einfluss des Verkehrs und seiner Entwicklung auf die Luftqualität im Land Brandenburg. Verkehrsgutachten. Auftraggeber: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz (MLUV) des Landes Brandenburg. 2012.
- IVU Umwelt, 2012b: Analyse der PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen im Jahre 2010 im ländlichen und urbanen Hintergrund in Ostbrandenburg. Auftraggeber: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz (MLUV) des Landes Brandenburg. 2012.
- IVU Umwelt, 2013: Benutzeranleitung FLADIS 4.2. IVU Umwelt GmbH, Freiburg. 2013.
- IVU Umwelt, 2014a: Fortschreibung des Emissionskatasters des Landes Hessen - Teilgruppe Kfz-Verkehr - unter der Benutzeroberfläche ArcGIS 10.1. Auftraggeber: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). 2014.
- IVU Umwelt, 2014b: Flächendeckende Ermittlung der Immissions-Vorbelastung für Baden-Württemberg 2010. Ausbreitungsrechnungen unter Verwendung des landesweiten Emissionskatasters und unter Berücksichtigung von gemessenen Immissionsdaten. Auftraggeber: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW) Baden-Württemberg. Veröffentlichung durch den Auftraggeber. 2014.

- IVU Umwelt, 2014c: Wirkungsanalyse verkehrsbezogener Maßnahmen in Darmstadt durch Modellierung. Unter Mitarbeit von Habermehl & Follmann mbH, Rodgau. Auftraggeber: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUVELV). Veröffentlichung durch den Auftraggeber. 2014.
- IVU Umwelt, 2016: IMMIS^{em/luft/lärm} - Handbuch zur Version 6. IVU Umwelt GmbH, Freiburg. 2016.
- Janicke, U., 2005: Derivation of smooth & shift parameters to account for source dynamics in ALAQS-AV emission grids. EEC/SEE/2005/016. Contracting Authority: EUROCONTROL Experimental Centre. Bruxelles, 2005.
- Janicke, 2014: LASPORT. Programmsystem zur Berechnung von Emissionen und Immissionen flughafenbezogener Quellsysteme in der unteren Atmosphäre. Version 2.2. Ingenieurbüro Janicke, Überlingen, 2014.
- Janicke, 2016: Ingenieurbüro Janicke, Überlingen. Datenlieferung 18.03.2016.
- Kerschbaumer, A.; Reimer, E., 2003: Erstellung der Meteorologischen Eingangsdaten für das REM/CALGRID-Modell: Modellregion Berlin-Brandenburg. Abschlussbericht zum UBA-Forschungsvorhaben FE-Vorhaben 299 43 246. Freie Universität Berlin. Institut für Meteorologie. 2003.
- KRdL, 2003: Umweltmeteorologie - Kfz-Emissionsbestimmung - Luftbeimengungen. VDI-Richtlinie 3782 Blatt 7. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. Düsseldorf, 2003.
- KRdL, 2009: Planung von Immissionsmessungen - Ermittlung der Unsicherheit räumlicher Beurteilungen der Luftqualität. VDI-Richtlinie 4280 Blatt 5. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. 2009.
- KRdL, 2015: Umweltmeteorologie - Reaktionsmechanismus zur Bestimmung der Stickstoffdioxid-Konzentration. VDI-Richtlinie 3783 Blatt 19. Entwurf. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. 2015.
- LfU, 2011: Emissionskataster Verkehr und verkehrsbedingte Immissionen in Rheinland-Pfalz 2010. Hrsg: Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz. Datenlieferung als Auszug daraus durch das HMUKLV. 2011.
- Matthias, C., 2013: Der Einfluss von Emissionen der Binnenschifffahrt auf die Luftqualität. Eine Analyse vorliegender Studien und die Durchführung einer exemplarischen Ausbreitungsrechnung. Hochschule RheinMain, Fachbereich Ingenieurwissenschaften, Studiengang Umwelttechnik. 2013.
- MUVEDA, 2016: MUVEDA Hellebrandt & Saeid Mahmoudi GbR, Aachen. Datenlieferung 17.03.2016.
- Rauterberg-Wulff, A.; Kohlen, R.; Düring, I.; Schmidt, W., 2015: Ist das schon Stau? Vergleich verschiedener Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität für die Kfz-Emissionsberechnung und Maßnahmenbewertung. Luftqualität an Straßen 2015. Kolloquium der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 20.-21.3.2011 in Bergisch Gladbach. 2015.
- Reimer, E.; Scherer, B., 1992. An operational meteorological diagnostic system for regional air pollution analysis and long-term modelling, Air Poll.Modelling and its Applications IX. Plenum Press. 1992.

- Sartelet, K.; Debry, E.; Fahey, K.; Roustan, Y.; Tombette, M.; Sportisse, B., 2007: Simulation of aerosols and gas-phase species over Europe with the POLYPHEMUS system. part I: model-to-data comparison for 2001. *Atmospheric Environment* 41 6116-6131. 2007.
- Simpson, D.; Guenther, A.; Hewitt, C. N.; Steinbrecher, R., 1995: Biogenic emissions in Europe, 1, Estimates and uncertainties, *Journal of Geophysical Research*, 100, 22875–22890, 1995.
- Simpson, D.; Winiwarter, W.; Börjesson, G.; Cinderby, S.; Ferreira, A.; Guenther, A.; Hewitt, C.N.; Janson, R.; Khalil, M.A.K.; Owen, S.; Pierce, T.E.; Puxbaum, H.; Shearer, M.; Skiba, U.; Steinbrecher, R.; Tarrasón, L.; Öquist, M.G., 1999: Inventorying emissions from nature in Europe, *Journal of Geophysical Research* 104 (D7), 8113–8152, 1999.
- Statistikportal, 2015: Statistik-Portal der statistischen Ämter des Bundes und der Länder. http://www.statistikportal.de/Statistik-Portal/de_zs01_bund.asp. Stand: 26.11.2015.
- 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". 2003.
- Stern, R., 2006a: Großräumige PM10-Ausbreitungsmodellierung: Abschätzung der gegenwärtigen Immissionsbelastung in Europa und Prognose bis 2010. S. 85-102. In: KRdL (Hrsg.): Feinstaub und Stickstoffdioxid. Wirkung, Quellen, Luftreinhaltepläne, Minderungsmaßnahmen. Herausgeber: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. Beuth Verlag, 2006.
- Stern, R., 2006b: 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, Weiterentwicklung, Validierung und Maßnahmenplanung für ein bundeseinheitliches Vorgehen". Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2006.
- Stern, R., 2010a: Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: PM10- und PM2.5-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". Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, 2010.
- 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". Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, 2010.
- Stern, R., 2010c: The Chemical Transport Model REM-CALGRID. Model's formulation and user's guide. Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie. Bericht im

- Rahmen des FE-Vorhabens FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“ PAREST. Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, 2010.
- Stern, R., 2013: Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: NO₂- und O₃-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren Reduzierung der Immissionen in Deutschland. Teilbericht zum F&E-Vorhaben "Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST". Veröffentlichung UBA-Texte 62/2013. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2013.
- 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 S. 4567-4588. 2008.
- TA Luft, 2002: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. In der Fassung vom 24.07.2002. GMBI. Nr. 25 - 29, S. 511. 2002.
- 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. UBA-Texte 51/2013.
- Thunis, P.; Pederzoli, A.; Pernigotti, D., 2012: Performance criteria to evaluate air quality modeling applications. *Atmospheric Environment* 59 S. 476–482. 2012.
- Thunis, P.; Cuvelier, C., 2016: Fairmode DELTA Version 5.4. Concepts / User's Guide / Diagrams. Joint Research Centre, Ispra. 2016.
- UBA, 2010: Auswertung der Luftbelastungssituation 2009. Umweltbundesamt. 2010.
- UBA, 2011: Luftbelastungssituation 2010. Vorläufige Auswertung. Umweltbundesamt. 2011.
- UBA, 2012a: Luftqualität 2011. Vorläufige Auswertung. Umweltbundesamt. 2012.
- UBA, 2012b: Luftqualitätsdaten- und Informationsaustausch in Deutschland. Handbuch. Version V 2.5. 2012.
- UBA, 2013: Luftqualität 2012. Vorläufige Auswertung. Umweltbundesamt. 2013.
- UBA, 2014a: Luftqualität 2013. Vorläufige Auswertung. Umweltbundesamt. 2014.
- UBA, 2014b: Luftqualität 2020/2030: Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien. UBA-Texte 35/2014. Umweltbundesamt. 2014.
- UBA, 2015: Luftqualität 2014. Vorläufige Auswertung. Umweltbundesamt. 2015.
- Vautard, R.; Builtjes P.; Thunis, P.; Cuvelier, K.; Bedogni, M.; Bessagnet, B.; Honoré, C.; Moussiopoulos, N.; Schaap, M.; Stern, R.; Tarrason, L.; van Loon, M., 2007: Evaluation and intercomparison of Ozone and PM₁₀ simulations by several chemistry-transport models over 4 European cities within the City-Delta project, 2007. *Atmospheric Environment* 41 173-188. 2007.

- Whyatt, J. D.; Metcalfe, S. E.; Nicholson, J.; Derwent, R. G.; Page, T.; Stedman, J. R., 2007: Regional scale modelling of particulate matter in the UK, source attribution and an assessment of uncertainties. *Atmospheric Environment* 41 3315-3327. 2007.
- Yamartino, R. J.; Wiegand, G., 1986: Development and Evaluation of Simple Models for the Flow, Turbulence and Pollutant Concentration Fields within an Urban Street Canyon. *Atmospheric Environment* 20 2137-2156. 1986.