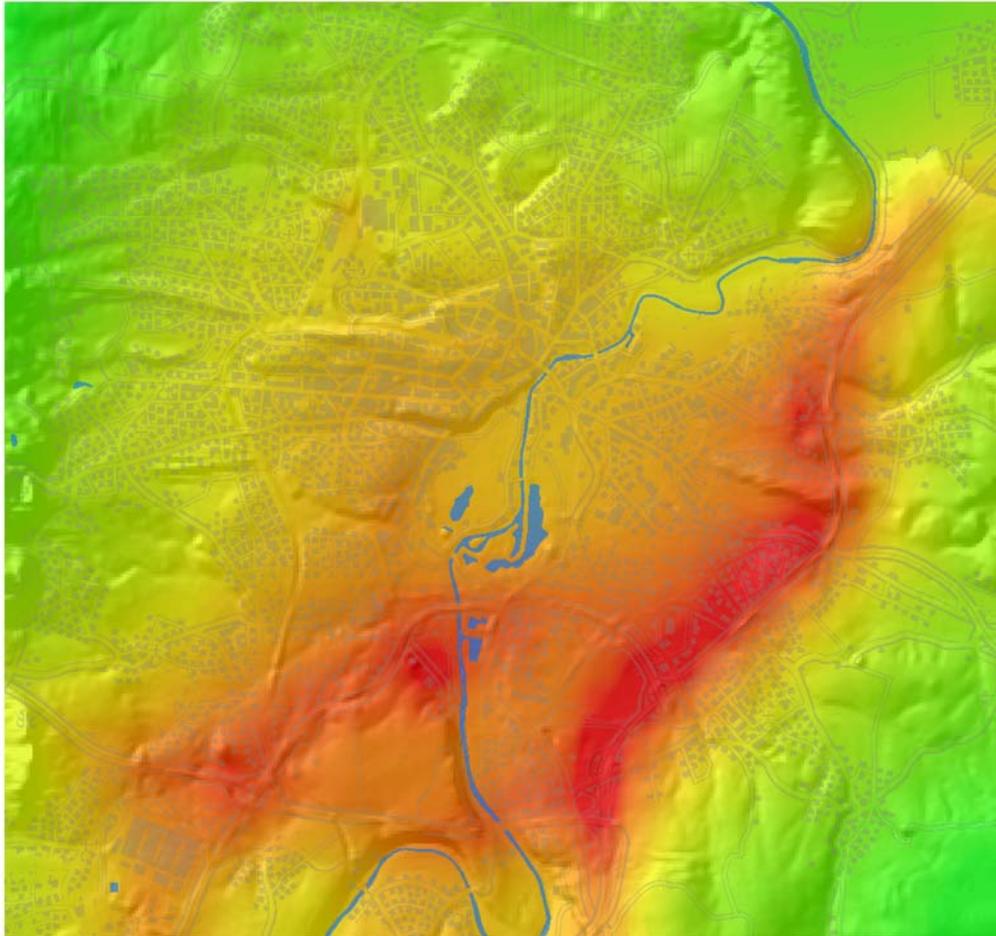


Ausbreitungsrechnungen mit dem RCG/CPB-Modell als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Kassel



für

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

von

IVU Umwelt GmbH
Burgweg 10 · D-79350 Sexau
G. Wiegand, F. Pfäfflin

TRUMF Troposphärische Umweltforschung
Inst. f. Meteorologie, Freie Universität Berlin
R. Stern, E. Reimer, A. Kerschbaumer

Februar 2006

1 Einführung

Im Ballungsraum Kassel wurde im Jahr 2003 der Immissionsgrenzwert der 22.BImSchV überschritten. Nach Artikel 8 der EU-Rahmenrichtlinie 96/62/EG (EU-RRL) zur Luftqualität (EU, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 1996) bzw. §13 der 22. BImSchV müssen für Gebiete, in denen Grenzwerte überschritten werden, Luftreinhaltepläne erarbeitet werden, aufgrund derer die betreffenden Grenzwerte zukünftig eingehalten werden können. In der EU-RRL sind dazu neben Messungen erstmalig auch Modellrechnungen zur Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität vorgesehen.

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

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

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

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

Dieser Kurzbericht ist die Zusammenfassung einer Studie, die von der IVU-Umwelt GmbH gemeinsam mit der Arbeitsgruppe TRUMF am Institut für Meteorologie der Freien Universität im Auftrag des Hessisches Landesamts für Umwelt und Geologie (HLUG) erstellt wurde (IVU, 2005; Stern et al., 2005). Ziel der Untersuchung war die rechnerische Ermittlung der Immissionen in 25 hoch belasteten Straßenräumen im Großraum Kassel.

Zusätzlich zu dem Basislauf 2003, einer Istzustand-Berechnung, werden drei Emissionsszenarien mit den meteorologischen Daten von 2003 gerechnet:

- 1 Emissionsszenario "ohne Autobahnen" ,
- 2 Emissionsszenario "halbierter städtische Verkehr" und
- 3 Emissionsszenario "NEC/CLE".

2 Die 25 Straßenräume

Die 25 Straßenräume wurden von den verantwortlichen Behörden vorgegeben. Für die ausgewählten Straßenräume (siehe Abbildung 1 und Tabelle 1) sind die NO₂- und PM₁₀-Immissionen an der Bordsteinkante in 3 m Höhe mit den Modellen zu ermitteln.



Abbildung 1 Ausgewählte Straßenräume in Kassel und den umliegenden Gemeinden

Tabelle 1 Übersicht über die 25 Straßenräume. Das Kürzel vor dem Straßennamen bedeutet KS=Kassel, BA=Baunatal, FI=Fuldata-Ihringshausen, LO=Lohfelden-Ochshausen und NS=Niestetal-Sandershausen.

Nr	Straßenname	von
1	KS-Adenauerstraße	Konrad-Adenauer-Straße 73 (L 3218, einseitige Bebauung mit Wald im Westen; im Osten Häuser)
2	BA-Altenritterstraße	Baunatal Altenritter Straße / Lärchenweg
3	KS-Brüderstraße	Brüderstraße 5 (B 3)
4	KS-FriedrichEbert-Straße	Friedrich-Ebert-Straße 32 (L 3420)
5	KS-Frankfurter-Straße 247	Frankfurter Straße 247 (B 520)
6	KS-Frankfurter-Straße 102	Frankfurter Straße 102 (B 3)
7	KS-Fünffensterstraße	Fünffensterstraße 14 (L 3420)
8	KS-Holländische-Straße 157	Holländische Straße 157 (B 7)
9	KS-Holländische-Straße 28	Holländische Straße 28 (B 7)
10	KS-Ihringshäuser-Straße	Ihringshäuser Straße 43 (B 3)
11	FI-Veckerhagener-Straße	Fuldata-Ihringshausen Veckerhagener Straße Ecke Schulstraße
12	KS-Kohlenstraße	Kohlenstraße 40 (L 3218)
13	KS-Leipziger-Straße	Leipziger Straße 159 (B 7)
14	KS-Mauerstraße	Mauerstraße 11
15	KS-Obervellmarer-Straße	Obervellmarer Straße 4 (L 3234)
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	Lohfelden-Ochshausen Ochshäuser Dorfstraße / Mehlhof
17	NS-Hannoversche-Straße	Niestetal-Sandershausen Hannoversche Straße Ecke Im Niederfeld
18	KS-Schönfelder-Straße 50	Schönfelder Straße 50 (L 3421)
19	KS-Schönfelder-Straße 6	Schönfelder Straße 6 (aktuelle Situation)
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	Schönfelder Straße 6 (mit geplanter Bebauung)
21	KS-Tischbeinstraße	Tischbeinstraße 18 (L 3218)
22	KS-Weserstraße	Weserstraße 17 (B 3)
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	Wilhelmshöher Allee 286 (K 32)
24	KS-Wolfhager-Straße	Wolfhager Straße 124 (B 251)
25	KS-Ysenburgstraße	Ysenburgstraße 29 (K 44)

3 Modelle

3.1 Meteorologische Daten

Die von den Modellen benötigten meteorologischen Daten wurden aus meteorologischen Beobachtungen mit dem am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin betriebenen Programmsystem TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research, Reimer und Scherer, 1992) erstellt. Abbildung 2 zeigt die Windrosen über dem Gelände von Kassel. Die Information wurde durch Clusterbildung verdichtet. Die kleinen verschiedenen Zahlen von 1 bis 5 geben an, für welchen Bereich die jeweilige Windrose repräsentativ ist.

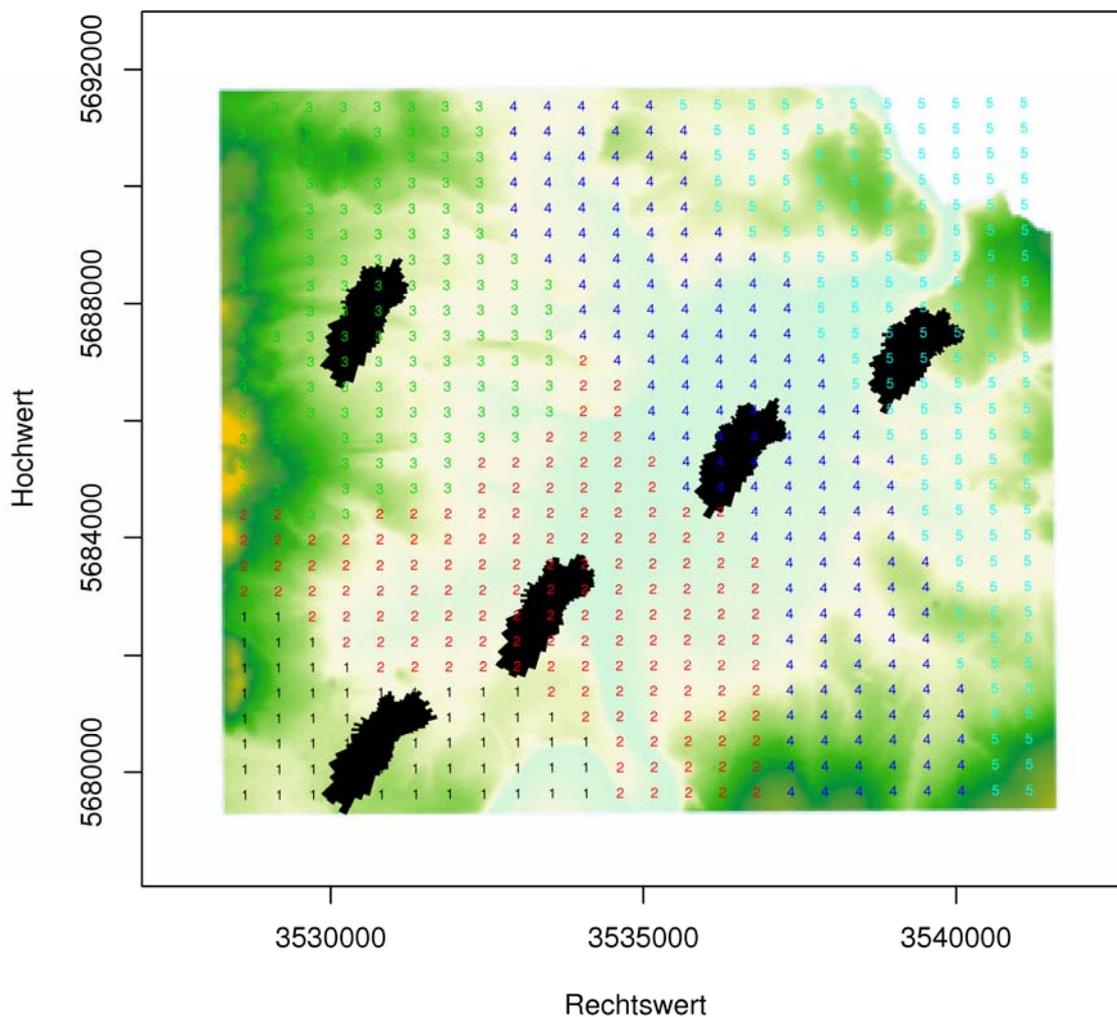


Abbildung 2 Windrosen im Nest 3 über dem Gelände von Kassel

Der Vergleich der Windverteilungen der TRAMPER-Analyse mit den im LRP-Kassel von Dezember 1999 (siehe HMULV, 1999) dargestellten synthetischen Windrosen, die auf numerischen Modellrechnungen beruhen, und nur einen kurzen Zeitraum abdecken zeigt im Detail zwar beträchtliche Unterschiede, die Hauptanströmung im Kasserler Raum aus Südwest wird aber in beiden Darstellungen deutlich. Die TRAMPER-Analyse beruht auf einem optimalen Interpolationsverfahren von vorhandenen meteorologischen Messungen, die in dem Interpolationsgitter durch die topographischen Einflüsse modifiziert werden. Die erzeugten Felder sind wegen der geringen Anzahl von

zur Verfügung stehenden Messungen glatter als die Felder aus einem meteorologischen Modell, das die physikalischen Effekte direkt in dem feinen Gitter modelliert. Wegen der fehlenden Messungen können die feiner strukturierten Felder der numerischen Berechnung aber nicht verifiziert werden.

3.2 Vorbelastungsrechnungen

Die Vorbelastungsrechnungen wurden von Stern et al. (2005) mit dem REM-CALGRID-Modell (RCG) durchgeführt. Das RCG-Modell ist ein chemisches Transportmodell, das die dreidimensionale Ausbreitung und Entfernung von Schadstoffen in der Atmosphäre unter Berücksichtigung der Oxidantien- und Aerosolbildung simuliert (siehe Stern, 2003). Das Modell ist in der Lage, für alle in den EU-Richtlinien definierten Schadstoffe die entsprechenden Beurteilungsgrößen zu berechnen. Die Berechnung erfolgt dabei auf Stundenbasis für das ganze Jahr, so dass auch die in den Richtlinien verlangten Überschreitungshäufigkeiten direkt berechnet werden können. Bei den Aerosolen können neben der Gesamtsumme der Partikel $< 10 \mu\text{m}$ auch die Einzelkomponenten der wichtigsten primären und sekundären Aerosole getrennt ausgewiesen werden.

Das RCG-Modell wurde zunächst auf ein großräumiges Modellgebiet, das ganz Mitteleuropa umfasst, in einem circa $30\text{km} \cdot 30\text{km}$ -Gitter angewandt. Als Emissionsdaten wurden dazu die von der TNO, Niederlande, für Europa erstellten Daten verwendet (Stern, 2005). Die vom Modell benötigten meteorologischen Daten des Modells wurden aus meteorologischen Beobachtungen mit dem am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin betriebenen Programmsystem TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research) erstellt. In das europaweite Gitter ist ein feineres deutschlandweites Gitter eingebettet (Nest 1), das etwa die doppelte Auflösung hat. Das europaweite Gitter liefert die Randbedingungen für das deutschlandweite Gitter.

In das deutschlandweite Modellgebiet ist ein kleinräumiges, regionales Modellgebiet eingebettet (Nest 2), das den gesamten Großraum Kassel in einem $2 \text{ km} \cdot 2 \text{ km}$ -Gitter umfasst. Die deutschlandweite Rechnung liefert die Hintergrundkonzentrationen für die regionale Skala. In das regionale Gitter ist ein urbanes Gitter mit circa 500 Metern Auflösung eingebettet (Nest 3). Wieder liefert das regionale Gitter die Randbedingungen für das urbane Gitter. Die für diese regionale/urbane Ausbreitungsrechnungen benötigten Emissionsdaten wurden aus dem hessischen Emissionskataster 2000 abgeleitet. Die PM₁₀-Emissionen wurden ergänzt um die in dem HLUG-Kataster fehlenden Verursachergruppen "Landwirtschaft" und "sonstige Quellen". Das urbane Gitter liefert dann die Vorbelastungen für die Straßenschluchtrechnungen.

3.3 Straßenschluchtrechnungen

Mit dem Ausbreitungsmodell CPB (Canyon-Plume-Box-Modell) können die verkehrsbedingten Luftschadstoff-Immissionen in einer Straßenschlucht berechnet werden. CPB kann einen weiten Bereich von Straßenschluchtgeometrien behandeln, darunter unterschiedliche Bebauungshöhen auf beiden Seiten, teildurchlässi-

ge, "poröse" Bebauung (z.B. offene Parkhäuser) oder gekrümmte Straßen (siehe Yamartino, 1986).

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

CPB enthält ein Photochemie-Modul, das es erlaubt direkt NO_2 -Immissionen zu berechnen. Die erforderlichen Eingangsdaten (stündliche NO -, NO_2 - und O_3 -Konzentrationen über dem Straßenraum) stehen als urbane RCG-Modellrechnungen im 0.25 km^2 -Gitter zur Verfügung.

Die stündlichen Verkehrsemissionen werden für die 25 Straßen mit dem auf den neuen Emissionsfaktoren (INFRAS, 2004) beruhenden Emissionsmodell $\text{IMMIS}^{\text{em/h}}$ (siehe $\text{IMMIS}^{\text{luft}}$, 2004) berechnet.

3.4 Relevanz von Modellrechnungen

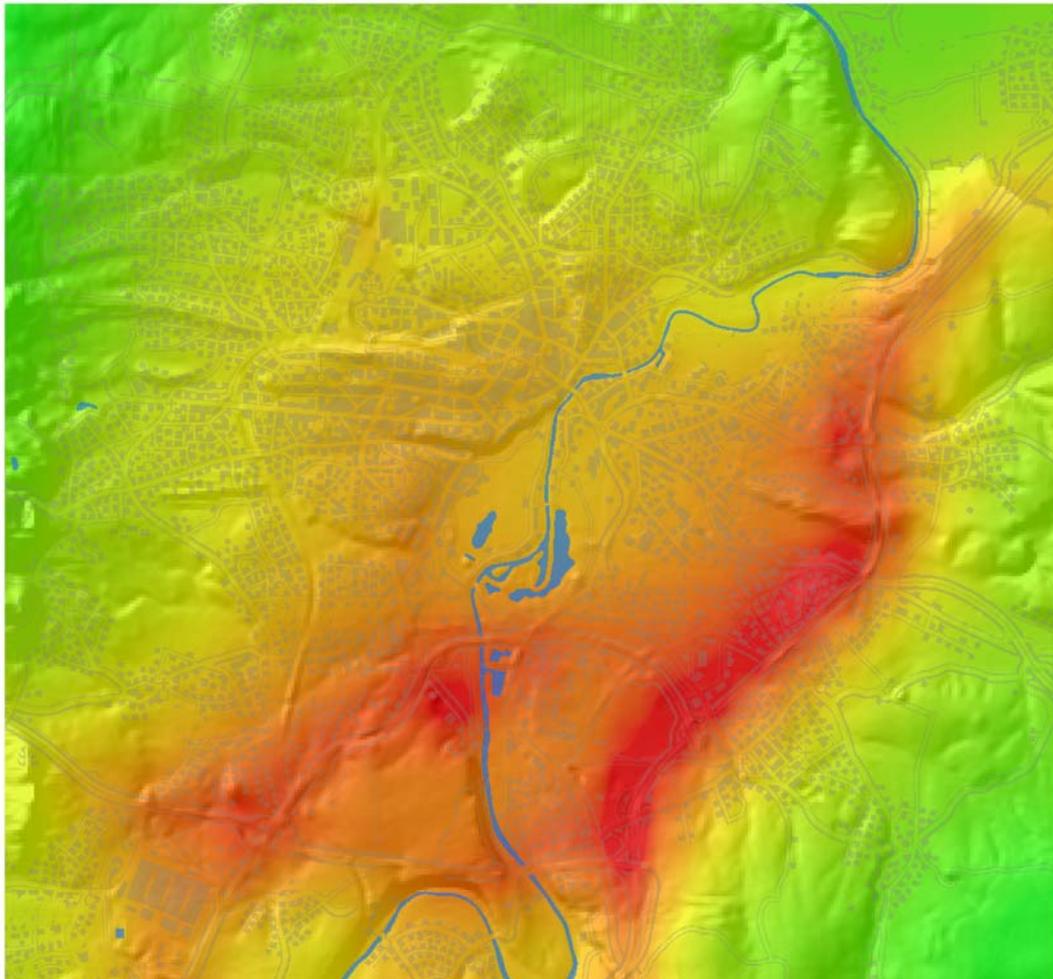
Die urbane RCG-Rechnung liefert die Vorbelastungskonzentrationen für die sich anschließenden Straßenschluchtrechnungen. Damit beruhen Hintergrund-, Vor- und Zusatzbelastung komplett auf Modellrechnungen. Dies ist besonders wichtig für die Ursachenanalyse, da die nicht-linearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission unter Berücksichtigung aller relevanten physikalischen und chemischen Prozesse berechnet werden. Insbesondere für die Oxidantien und PM_{10} ist es nur schwer möglich, das Minderungspotential von Straßenräumen ohne solch eine rechnerische Bestimmung des großräumigen Hintergrunds, der regionalen und urbanen Vorbelastung sowie der Belastung aus der Straße selbst zu quantifizieren.

4 Ergebnisse

4.1 Istzustand

4.1.1 Ergebnisse der Berechnungen

Das Ergebnis der NO₂-Immissionsberechnung im Istzustand zeigt Abbildung 3.



Darstellung auf Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Wiesbaden

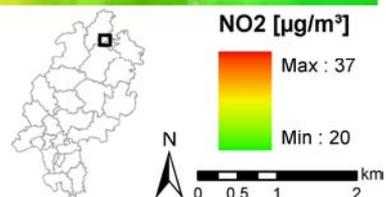
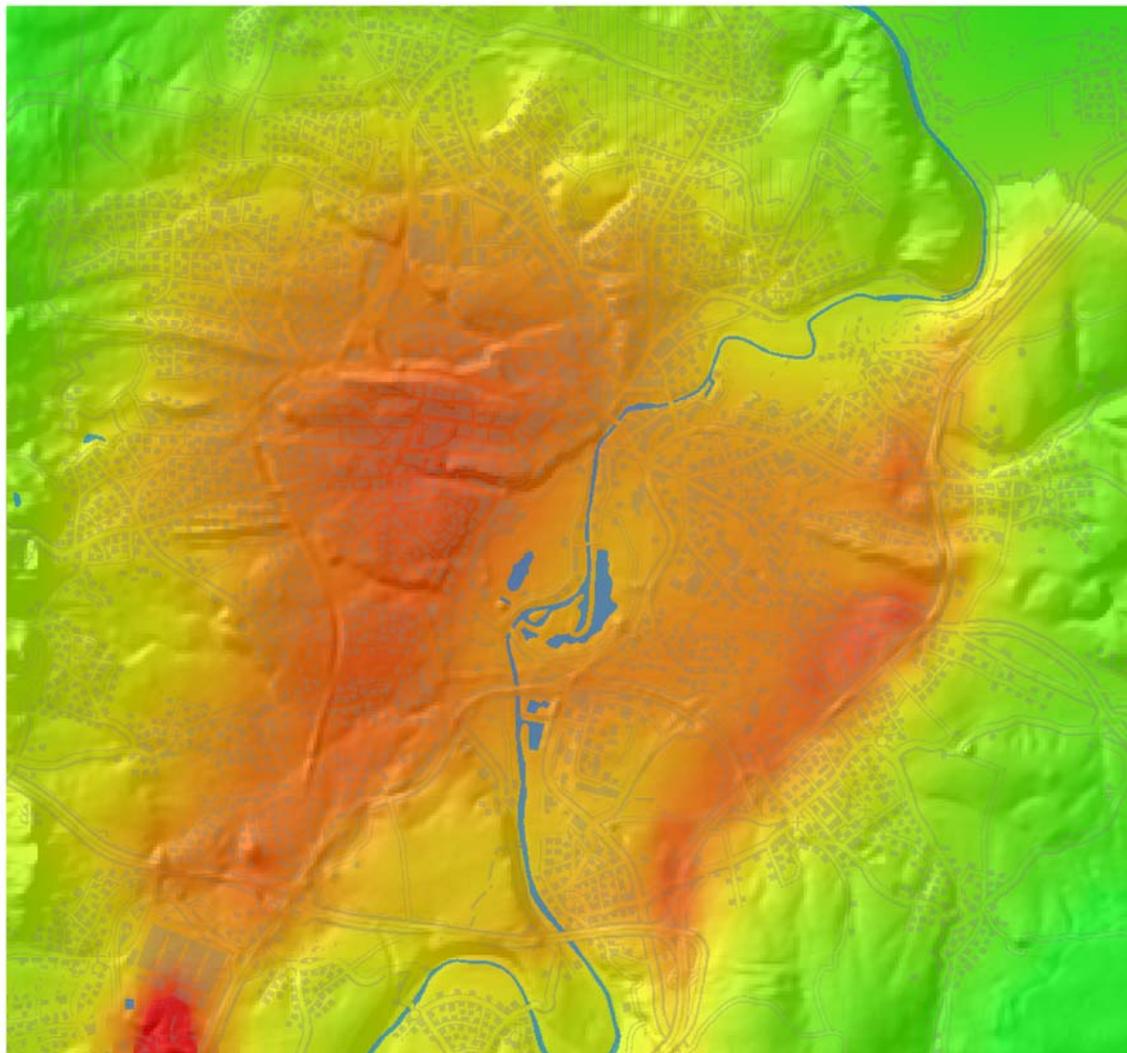


Abbildung 3 Jahresmittelwerte der NO₂-Konzentrationen im Ballungsraum Kassel

Das Ergebnis der PM₁₀-Immissionsberechnung im Istzustand zeigt Abbildung 4.



Darstellung auf Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Wiesbaden



PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

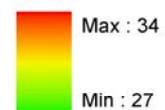


Abbildung 4 Jahresmittelwerte der PM10-Konzentrationen im Ballungsraum Kassel

Die Ergebnisse der NO₂ bzw. PM10-Immissionsberechnungen für die 25 Straßenräume zeigen Tabelle 2 und Tabelle 3.

Die Immissionen sind aufgeteilt nach RCG-Vorbelastung, CPB-Zusatzbelastung und Gesamtbelastung in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ angegeben. Die Anteile beziehen sich auf die Gesamtbelastung und die Verursachergruppen im Nest 3.

Tabelle 2 NO₂-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 25 Straßenräumen für den Istzustand. Die Anteile beziehen sich auf den Beitrag der Emissionen im Nest 3 an der Gesamtbelastung im Nest 3.

NO ₂		Vorbelastung (RCG)	Zusatzbelastung (CPB)	Gesamtbelastung	Anteil Kraft- fahrzeuge	Anteil Hausbrand	Anteil Kraftwerke + Industrie
Straßenraum		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	%	%	%
1	KS-Adenauerstraße	23.81	6.37	30.17	32.71	5.30	1.33
2	BA-Altenritterstraße	27.93	7.28	35.21	38.57	4.26	2.84
3	KS-Brüderstraße	29.43	12.41	41.84	49.26	5.98	3.59
4	KS-FriedrichEbert-Straße	29.70	10.93	40.63	47.33	6.89	3.20
5	KS-Frankfurter-Straße 247	30.56	11.46	42.02	48.22	6.19	4.05
6	KS-Frankfurter-Straße 102	30.57	14.72	45.30	50.60	6.18	4.64
7	KS-Fünfensterstraße	29.51	10.73	40.24	46.79	6.46	3.98
8	KS-Holländische-Straße 157	26.68	22.43	49.11	58.30	4.89	2.04
9	KS-Holländische-Straße 28	29.05	28.98	58.03	63.90	4.65	2.41
10	KS-Ihringshäuser-Straße	27.95	13.34	41.29	50.23	6.05	2.66
11	FI-Veckerhagener-Straße	24.13	10.19	34.32	42.51	4.66	1.75
12	KS-Kohlenstraße	28.92	19.83	48.75	56.27	5.74	2.26
13	KS-Leipziger-Straße	29.87	15.18	45.04	53.46	5.11	3.33
14	KS-Mauerstraße	29.49	11.47	40.96	48.02	6.59	3.42
15	KS-Obervellmarer-Straße	24.88	19.94	44.82	55.42	4.69	1.12
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	31.40	4.94	36.34	46.06	3.58	1.10
17	NS-Hannoversche-Straße	29.87	6.77	36.64	44.95	5.19	2.73
18	KS-Schönfelder-Straße 50	29.72	21.15	50.87	57.50	5.50	2.56
19	KS-Schönfelder-Straße 6	29.72	9.92	39.64	45.46	7.06	3.28
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	29.72	12.76	42.48	49.11	6.59	3.06
21	KS-Tischbeinstraße	29.89	10.02	39.91	46.15	7.02	3.76
22	KS-Weserstraße	28.80	27.57	56.37	62.75	4.26	2.66
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	26.76	7.58	34.35	40.12	7.57	2.04
24	KS-Wolfhager-Straße	28.13	18.71	46.83	54.47	5.77	2.78
25	KS-Ysenburgstraße	28.80	17.56	46.36	54.70	5.18	3.24

Tabelle 3 PM10-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 25 Straßenräumen für den Istzustand. Die Anteile beziehen sich auf den Beitrag der Emissionen im Nest 3 an der Gesamtbelastung im Nest 3.

PM10		Vorbelastung (RCG)	Zusatzbelastung (CPB)	Gesamtbelastung	Anteil Kraft- fahrzeuge	Anteil Hausbrand + Kleinverbraucher	Anteil Kraftwerke + Industrie
Straßenraum		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	%	%
1	KS-Adenauerstraße	28.53	2.46	30.98	9.88	0.97	0.32
2	BA-Altenritterstraße	29.17	2.75	31.92	12.37	1.25	1.25
3	KS-Brüderstraße	31.15	5.62	36.76	19.37	1.90	0.54
4	KS-FriedrichEbert-Straße	31.59	4.65	36.24	17.25	2.21	0.83
5	KS-Frankfurter-Straße 247	31.56	5.10	36.66	18.82	1.91	1.09
6	KS-Frankfurter-Straße 102	31.62	6.62	38.24	21.50	1.83	1.05
7	KS-Fünfensterstraße	31.19	4.52	35.71	16.86	1.96	0.84
8	KS-Holländische-Straße 157	30.30	10.48	40.78	28.64	1.72	0.74
9	KS-Holländische-Straße 28	31.13	15.99	47.12	37.12	1.49	0.42
10	KS-Ihringshäuser-Straße	30.63	6.15	36.79	20.52	1.90	0.54
11	FI-Veckerhagener-Straße	28.74	3.92	32.66	14.45	1.22	0.31
12	KS-Kohlenstraße	31.49	9.63	41.12	27.07	1.95	0.73
13	KS-Leipziger-Straße	30.74	6.71	37.45	22.19	1.60	0.53
14	KS-Mauerstraße	31.40	2.55	33.95	12.22	2.36	0.88
15	KS-Obervellmarer-Straße	29.72	10.12	39.83	27.92	1.51	0.50
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	30.28	2.09	32.37	14.18	1.24	0.62
17	NS-Hannoversche-Straße	30.17	3.04	33.21	14.88	1.81	0.90
18	KS-Schönfelder-Straße 50	31.71	10.04	41.74	27.89	1.92	0.96
19	KS-Schönfelder-Straße 6	31.71	4.64	36.35	17.17	2.20	1.10
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	31.71	5.97	37.67	20.10	2.12	1.06
21	KS-Tischbeinstraße	31.56	4.63	36.19	17.21	2.21	1.11
22	KS-Weserstraße	30.79	18.09	48.89	40.07	1.43	0.61
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	30.57	2.97	33.54	12.43	2.09	0.60
24	KS-Wolfhager-Straße	31.13	8.63	39.76	24.97	1.76	0.75
25	KS-Ysenburgstraße	30.79	8.23	39.02	24.94	1.79	0.77

4.1.2 Verletzung der Grenzwerte der 22. BImSchV

Die berechneten Überschreitungen der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM10 sind in Tabelle 4 dargestellt.

Der NO₂-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in 17 der 25 Straßen von den Berechnungen überschritten. Der PM10-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in 5 der 25 Straßen von den Berechnungen überschritten.

Der Stundenmittelwert-Grenzwert für NO₂ von 200 µg/m³ wird in keiner Straße mehr als die erlaubten 18mal überschritten. Der Tagesmittelwert-Grenzwert für PM10 von 50 µg/m³ wird in allen Straßen mehr als die erlaubten 35mal überschritten.

Die Grenzwertüberschreitungen sind in Tabelle 4 farbig (■) hervorgehoben.

Tabelle 4 Überschreitung der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM10 in den Modellrechnungen für den Istzustand.

Nr	Straßenname	Grenzwerte			
		Mittelwert		Überschreitungen	
		NO ₂ >40	PM10>40	NO ₂ >18	PM10>35
1	KS-Adenauerstraße	nein	nein	nein	ja
2	BA-Altenritterstraße	nein	nein	nein	ja
3	KS-Brüderstraße	ja	nein	nein	ja
4	KS-FriedrichEbert-Straße	ja	nein	nein	ja
5	KS-Frankfurter-Straße 247	ja	nein	nein	ja
6	KS-Frankfurter-Straße 102	ja	nein	nein	ja
7	KS-Fünffensterstraße	ja	nein	nein	ja
8	KS-Holländische-Straße 157	ja	ja	nein	ja
9	KS-Holländische-Straße 28	ja	ja	nein	ja
10	KS-Ihringshäuser-Straße	ja	nein	nein	ja
11	FI-Veckerhagener-Straße	nein	nein	nein	ja
12	KS-Kohlenstraße	ja	ja	nein	Ja
13	KS-Leipziger-Straße	ja	nein	nein	ja
14	KS-Mauerstraße	ja	nein	nein	ja
15	KS-Obervellmarer-Straße	ja	nein	nein	ja
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	nein	nein	nein	ja
17	NS-Hannoversche-Straße	nein	nein	nein	ja
18	KS-Schönfelder-Straße 50	ja	ja	nein	ja
19	KS-Schönfelder-Straße 6	nein	nein	nein	ja
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	ja	nein	nein	ja
21	KS-Tischbeinstraße	nein	nein	nein	ja
22	KS-Weserstraße	ja	ja	nein	ja
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	nein	nein	nein	ja
24	KS-Wolfhager-Straße	ja	nein	nein	ja
25	KS-Ysenburgstraße	ja	nein	nein	ja
Überschreitungen in Straßen		17	5	0	25

4.1.3 Vergleich mit Messung

In einer der 25 Straßen befindet sich eine Messstellen des HLOG:

- Kassel, Fünffensterstrasse (Straße 7 in den Straßenlisten).

In dieser Straße kann man die Messungen zum Vergleich mit den RCG/CPB-Berechnungen heranziehen. Dieser Vergleich kann nur für den Istzustand durchgeführt werden, nicht aber für die Emissionsszenarien.

Die beobachteten Jahresmittelwerte (siehe Tabelle 5) werden von den Modellrechnungen unterschätzt. Die Modellergebnisse liegen aber innerhalb der von den EU-Richtlinien verlangten Genauigkeit von 30% für die NO₂-Jahresmittelwerte und 50% für die PM₁₀-Jahresmittelwerte.. Die Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Rechnung kann damit als gut bezeichnet werden. Dies gilt insbesondere unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in die Modellierung an keiner Stelle eine Immissionsmessung – etwa als Vorbelastungsmessung - eingeht, sondern die Berechnung von der Emission über Transmission bis zu der Immission durchgehend auf Modellen beruht.

Tabelle 5 Jahresmittelwerte der Modellrechnungen und der Messungen im Jahr 2003 für den Istzustand.

Nr	Straßenname	NO ₂	PM ₁₀	NO ₂	PM ₁₀
		Messung		Rechnung	
7	KS-Fünffensterstraße	47.15	37.99	40.24	35.71

Der Jahresmittelwert der NO₂-Messung liegt wie bei der Rechnung über dem 22. BImSchV-Grenzwert (40 µg/m³). Mehr als 18 Stundenmittelwertüberschreitung (200 µg/m³) treten weder in den Messungen noch in den Rechnungen auf.

Der Jahresmittelwert der PM₁₀-Messung liegt wie bei der Rechnung unter dem 22. BImSchV-Grenzwert (40 µg/m³). Mehr als 35 Tagesmittelwertüberschreitung (50 µg/m³) treten in den Messungen (74 mal) und in den Rechnungen (52 mal) auf.

Die 22. BImSchV-Grenzwert-Überschreitungen werden also von der Modellrechnung richtig wiedergegeben.

4.2 Ohne Autobahnen

4.2.1 Ergebnisse der Berechnungen

Im Großraum Kassel wurde die Emission der Autobahnen auf Null gesetzt.

Die Ergebnisse der NO₂ bzw. PM₁₀-Immissionsberechnungen für die 25 Straßenräume zeigen Tabelle 6 und Tabelle 7.

Die Immissionen sind aufgeteilt nach RCG-Vorbelastung, CPB-Zusatzbelastung und Gesamtbelastung in µg/m³ angegeben.

Tabelle 6 NO₂-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 25 Straßenräumen für Straßenräumen für das Emissionsszenario "ohne Autobahnen".

NO ₂		Vorbelastung (RCG)	Zusatzbelastung (CPB)	Gesamtbelastung
Straßenraum		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
1	KS-Adenauerstraße	21.34	6.78	28.12
2	BA-Altenritterstraße	22.77	7.76	30.53
3	KS-Brüderstraße	26.21	12.96	39.17
4	KS-FriedrichEbert-Straße	26.81	11.34	38.15
5	KS-Frankfurter-Straße 247	26.04	12.19	38.22
6	KS-Frankfurter-Straße 102	27.09	15.30	42.38
7	KS-Fünfensterstraße	25.97	11.31	37.28
8	KS-Holländische-Straße 157	24.64	22.91	47.55
9	KS-Holländische-Straße 28	26.10	29.81	55.92
10	KS-Ihringshäuser-Straße	25.20	13.72	38.92
11	FI-Veckerhagener-Straße	21.82	10.42	32.23
12	KS-Kohlenstraße	26.48	20.42	46.9
13	KS-Leipziger-Straße	24.57	16.31	40.88
14	KS-Mauerstraße	26.57	11.93	38.50
15	KS-Obervellmarer-Straße	23.68	20.18	43.86
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	22.15	6.20	28.35
17	NS-Hannoversche-Straße	23.71	7.42	31.12
18	KS-Schönfelder-Straße 50	26.84	21.84	48.68
19	KS-Schönfelder-Straße 6	26.84	10.31	37.15
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	26.84	13.26	40.10
21	KS-Tischbeinstraße	26.72	10.44	37.16
22	KS-Weserstraße	25.55	28.46	54.01
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	24.93	7.76	32.69
24	KS-Wolfhager-Straße	26.03	19.16	45.19
25	KS-Ysenburgstraße	25.55	18.25	43.79

Tabelle 7 PM10-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 25 Straßenräumen für Straßenräumen für das Emissions-szenario "ohne Autobahnen".

PM10		Vorbelastung (RCG)	Zusatzbelastung (CPB)	Gesamtbelastung
Straßenraum		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	KS-Adenauerstraße	28.00	2.46	30.46
2	BA-Altenritterstraße	28.19	2.75	30.94
3	KS-Brüderstraße	30.47	5.62	36.09
4	KS-FriedrichEbert-Straße	30.95	4.65	35.60
5	KS-Frankfurter-Straße 247	30.62	5.10	35.72
6	KS-Frankfurter-Straße 102	30.87	6.62	37.48
7	KS-Fünfensterstraße	30.47	4.52	34.99
8	KS-Holländische-Straße 157	29.82	10.48	40.30
9	KS-Holländische-Straße 28	30.49	15.99	46.48
10	KS-Ihringshäuser-Straße	30.04	6.15	36.19
11	FI-Veckerhagener-Straße	28.26	3.92	32.18
12	KS-Kohlenstraße	30.94	9.63	40.56
13	KS-Leipziger-Straße	29.72	6.71	36.43
14	KS-Mauerstraße	30.77	2.55	33.32
15	KS-Obervellmarer-Straße	29.40	10.12	39.52
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	28.28	2.09	30.36
17	NS-Hannoversche-Straße	29.01	3.04	32.05
18	KS-Schönfelder-Straße 50	31.07	10.04	41.10
19	KS-Schönfelder-Straße 6	31.07	4.64	35.71
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	31.07	5.97	37.03
21	KS-Tischbeinstraße	30.88	4.63	35.50
22	KS-Weserstraße	30.12	18.09	48.21
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	30.14	2.97	33.11
24	KS-Wolfhager-Straße	30.63	8.63	39.26
25	KS-Ysenburgstraße	30.12	8.23	38.35

4.2.2 Verletzung der Grenzwerte der 22. BImSchV

Die berechneten Überschreitungen der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM10 sind in Tabelle 8 für das Emissionsszenario "ohne Autobahnen" dargestellt.

Der NO₂-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in 11 der 25 Straßen von den Berechnungen überschritten. Der PM10-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in 5 der 25 Straßen von den Berechnungen überschritten.

Der Stundenmittelwert-Grenzwert für NO₂ von 200 µg/m³ wird in keiner Straße mehr als die erlaubten 18mal überschritten. Der Tagesmittelwert-Grenzwert für PM10 von 50 µg/m³ wird in 22 der 25 Straßen mehr als die erlaubten 35mal überschritten.

Die Grenzwertüberschreitungen sind in Tabelle 8 farbig (■) hervorgehoben.

Tabelle 8 Überschreitung der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM10 in den Modellrechnungen für das Emissionsszenario "ohne Autobahnen".

Nr	Straßenname	Grenzwerte			
		Mittelwert		Überschreitungen	
		NO ₂ >40	PM10>40	NO ₂ >18	PM10>35
1	KS-Adenauerstraße	nein	nein	nein	ja
2	BA-Altenritterstraße	nein	nein	nein	ja
3	KS-Brüderstraße	nein	nein	nein	ja
4	KS-FriedrichEbert-Straße	nein	nein	nein	ja
5	KS-Frankfurter-Straße 247	nein	nein	nein	ja
6	KS-Frankfurter-Straße 102	ja	nein	nein	ja
7	KS-Fünffensterstraße	nein	nein	nein	ja
8	KS-Holländische-Straße 157	ja	ja	nein	ja
9	KS-Holländische-Straße 28	ja	ja	nein	ja
10	KS-Ihringshäuser-Straße	nein	nein	nein	ja
11	FI-Veckerhagener-Straße	nein	nein	nein	nein
12	KS-Kohlenstraße	ja	ja	nein	ja
13	KS-Leipziger-Straße	ja	nein	nein	ja
14	KS-Mauerstraße	nein	nein	nein	ja
15	KS-Obervellmarer-Straße	ja	nein	nein	ja
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	nein	nein	nein	nein
17	NS-Hannoversche-Straße	nein	nein	nein	nein
18	KS-Schönfelder-Straße 50	ja	ja	nein	ja
19	KS-Schönfelder-Straße 6	nein	nein	nein	ja
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	ja	nein	nein	ja
21	KS-Tischbeinstraße	nein	nein	nein	ja
22	KS-Weserstraße	ja	ja	nein	ja
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	nein	nein	nein	ja
24	KS-Wolfhager-Straße	ja	nein	nein	ja
25	KS-Ysenburgstraße	ja	nein	nein	ja
Überschreitungen in Straßen		11	5	0	22

4.3 Halbierte städtische Verkehrsemissionen

4.3.1 Ergebnisse der Berechnungen

Im innerstädtischen Raum von Kassel wurden die Verkehrsemissionen halbiert.

Die Ergebnisse der NO₂ bzw. PM10-Immissionsberechnungen für die 25 Straßenräume zeigen Tabelle 9 und Tabelle 10.

Die Immissionen sind aufgeteilt nach RCG-Vorbelastung, CPB-Zusatzbelastung und Gesamtbelastung in µg/m³ angegeben.

Tabelle 9 NO₂-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 25 Straßenräumen für Straßenräumen für das Emissionsszenario "halbierte städtische Verkehrsemissionen".

NO ₂		Vorbelastung (RCG)	Zusatzbelastung (CPB)	Gesamtbelastung
Straßenraum		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
1	KS-Adenauerstraße	23.43	3.39	26.82
2	BA-Altenritterstraße	27.79	3.85	31.64
3	KS-Brüderstraße	27.96	7.21	35.16
4	KS-FriedrichEbert-Straße	28.02	6.31	34.33
5	KS-Frankfurter-Straße 247	29.99	6.26	36.25
6	KS-Frankfurter-Straße 102	29.35	8.50	37.85
7	KS-Fünfensterstraße	28.24	6.03	34.28
8	KS-Holländische-Straße 157	26.06	13.22	39.28
9	KS-Holländische-Straße 28	27.64	18.59	46.22
10	KS-Ihringshäuser-Straße	27.13	7.53	34.66
11	FI-Veckerhagener-Straße	23.84	5.50	29.34
12	KS-Kohlenstraße	27.24	12.1	39.35
13	KS-Leipziger-Straße	29.54	8.50	38.03
14	KS-Mauerstraße	27.90	6.76	34.67
15	KS-Obervellmarer-Straße	24.27	11.71	35.98
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	31.29	2.58	33.87
17	NS-Hannoversche-Straße	29.64	3.60	33.24
18	KS-Schönfelder-Straße 50	28.10	13.06	41.16
19	KS-Schönfelder-Straße 6	28.10	5.76	33.85
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	28.10	7.41	35.50
21	KS-Tischbeinstraße	28.37	5.68	34.05
22	KS-Weserstraße	27.63	17.46	45.09
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	25.35	4.27	29.62
24	KS-Wolfhager-Straße	26.82	11.17	37.99
25	KS-Ysenburgstraße	27.63	10.44	38.08

Tabelle 10 PM10-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 25 Straßenräumen für Straßenräumen für das Emissionszenario "halbierte städtische Verkehrsemissionen".

PM10		Vorbelastung (RCG)	Zusatzbelastung (CPB)	Gesamtbelastung
Straßenraum		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	KS-Adenauerstraße	28.47	1.23	29.70
2	BA-Altenritterstraße	29.15	1.37	30.52
3	KS-Brüderstraße	30.84	2.81	33.65
4	KS-FriedrichEbert-Straße	31.26	2.32	33.59
5	KS-Frankfurter-Straße 247	31.46	2.55	34.01
6	KS-Frankfurter-Straße 102	31.40	3.31	34.70
7	KS-Fünfensterstraße	30.96	2.26	33.22
8	KS-Holländische-Straße 157	30.18	5.24	35.42
9	KS-Holländische-Straße 28	30.83	8.00	38.82
10	KS-Ihringshäuser-Straße	30.46	3.08	33.54
11	FI-Veckerhagener-Straße	28.68	1.96	30.64
12	KS-Kohlenstraße	31.17	4.81	35.99
13	KS-Leipziger-Straße	30.68	3.35	34.04
14	KS-Mauerstraße	31.08	1.28	32.36
15	KS-Obervellmarer-Straße	29.59	5.06	34.65
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	30.25	1.04	31.30
17	NS-Hannoversche-Straße	30.12	1.52	31.65
18	KS-Schönfelder-Straße 50	31.39	5.02	36.41
19	KS-Schönfelder-Straße 6	31.39	2.32	33.71
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	31.39	2.98	34.38
21	KS-Tischbeinstraße	31.28	2.31	33.59
22	KS-Weserstraße	30.55	9.05	39.60
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	30.30	1.49	31.79
24	KS-Wolfhager-Straße	30.87	4.32	35.19
25	KS-Ysenburgstraße	30.55	4.11	34.66

4.3.2 Verletzung der Grenzwerte der 22. BImSchV

Die berechneten Überschreitungen der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM₁₀ sind in Tabelle 11 für das Emissionsszenario "halbierter städtischer Verkehr" dargestellt.

Der NO₂-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in 3 der 25 Straßen von den Berechnungen überschritten. Der PM₁₀-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in keiner Straße von den Berechnungen überschritten.

Der Stundenmittelwert-Grenzwert für NO₂ von 200 µg/m³ wird in keiner Straße mehr als die erlaubten 18mal überschritten. Der Tagesmittelwert-Grenzwert für PM₁₀ von 50 µg/m³ wird in 19 der 25 Straßen mehr als die erlaubten 35mal überschritten.

Die Grenzwertüberschreitungen sind in Tabelle 11 farbig (■) hervorgehoben.

Tabelle 11 Überschreitung der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM₁₀ in den Modellrechnungen für das Emissionsszenario " halbierte städtische Verkehrsemissionen " .

Nr	Straßenname	Grenzwerte			
		Mittelwert		Überschreitungen	
		NO ₂ >40	PM ₁₀ >40	NO ₂ >18	PM ₁₀ >35
1	KS-Adenauerstraße	nein	nein	nein	nein
2	BA-Altenritterstraße	nein	nein	nein	nein
3	KS-Brüderstraße	nein	nein	nein	ja
4	KS-FriedrichEbert-Straße	nein	nein	nein	ja
5	KS-Frankfurter-Straße 247	nein	nein	nein	ja
6	KS-Frankfurter-Straße 102	nein	nein	nein	ja
7	KS-Fünffensterstraße	nein	nein	nein	ja
8	KS-Holländische-Straße 157	nein	nein	nein	ja
9	KS-Holländische-Straße 28	ja	nein	nein	ja
10	KS-Ihringshäuser-Straße	nein	nein	nein	nein
11	FI-Veckerhagener-Straße	nein	nein	nein	nein
12	KS-Kohlenstraße	nein	nein	nein	ja
13	KS-Leipziger-Straße	nein	nein	nein	ja
14	KS-Mauerstraße	nein	nein	nein	ja
15	KS-Obervellmarer-Straße	nein	nein	nein	ja
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	nein	nein	nein	nein
17	NS-Hannoversche-Straße	nein	nein	nein	nein
18	KS-Schönfelder-Straße 50	ja	nein	nein	ja
19	KS-Schönfelder-Straße 6	nein	nein	nein	ja
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	nein	nein	nein	ja
21	KS-Tischbeinstraße	nein	nein	nein	ja
22	KS-Weserstraße	ja	nein	nein	ja
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	nein	nein	nein	ja
24	KS-Wolfhager-Straße	nein	nein	nein	ja
25	KS-Ysenburgstraße	nein	nein	nein	ja
Überschreitungen in Straßen		3	0	0	19

4.4 NEC/CLE

4.4.1 Ergebnisse der Berechnungen

Weiterhin wurde ein Szenario-Lauf unter den angenommenen Emissionsbedingungen für 2010 durchgeführt. Grundlage der Emissionsabschätzung 2010 bildet das so genannte CLE-Szenario (**C**urrent **L**egislation **E**mission, siehe Stern et al., 2005), das die Umsetzung bereits heute festgeschriebener Maßnahmen für das Jahr 2010 betrachtet. Im Gegensatz zu den anderen Szenarien, die lediglich die Emissionen im Nest 3 (Stadtgebiet von Kassel) betrafen, wurde das NEC/CLE-Szenario auf alle 5 Untersuchungsräume angewandt (Europa, Deutschland, Region Kassel, Stadt Kassel, Straßenschlucht).

Die CLE-Angaben wurden für Deutschland zusätzlich pauschal auf die nationalen Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie (**N**ational **E**mission **C**eilings, EU 2000) gesetzt, unter Beibehaltung der durch das CLE-Szenario vorgegebenen Emissionsstruktur.

Die Tabelle 12 zeigt die sich aus dem NEC/CLE-Szenario für Deutschland im Mittel ergebende prozentuale Emissionsänderung. Die Adaption des CLE-Szenario an die NEC-Emissionshöchstmengen wirkt sich nicht auf die PM10-Emissionen aus, da für PM10 kein Emissionshöchstwert existiert.

	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀
Änderung 2000-2010 %	-32.7	-20.3	-14.3

Tabelle 12: Änderung der deutschen Emissionen 2000 bis zum Jahr 2010 (CLE/NEC-Szenario) in %, bezogen auf 2000.

Die Ergebnisse der NO₂ bzw. PM10-Immissionsberechnungen für die 25 Straßenräume zeigen Tabelle 13 und Tabelle 14.

Die Immissionen sind aufgeteilt nach RCG-Vorbelastung, CPB-Zusatzbelastung und Gesamtbelastung in µg/m³ angegeben.

Tabelle 13 NO₂-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 25 Straßenräumen für Straßenräumen für das Emissionsszenario "NEC/CLE".

NO ₂		Vorbelastung (RCG)	Zusatzbelastung (CPB)	Gesamtbelastung
Straßenraum		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
1	KS-Adenauerstraße	17.26	4.53	21.79
2	BA-Altenritterstraße	20.69	5.25	25.94
3	KS-Brüderstraße	22.06	9.32	31.37
4	KS-FriedrichEbert-Straße	22.34	8.10	30.44
5	KS-Frankfurter-Straße 247	23.02	8.58	31.60
6	KS-Frankfurter-Straße 102	23.18	11.05	34.22
7	KS-Fünfensterstraße	22.17	7.94	30.11
8	KS-Holländische-Straße 157	19.96	17.20	37.16
9	KS-Holländische-Straße 28	21.78	22.94	44.72
10	KS-Ihringshäuser-Straße	20.87	9.94	30.81
11	FI-Veckerhagener-Straße	17.88	7.23	25.11
12	KS-Kohlenstraße	21.65	15.31	36.96
13	KS-Leipziger-Straße	22.32	11.53	33.85
14	KS-Mauerstraße	22.17	8.68	30.85
15	KS-Obervellmarer-Straße	18.29	15.09	33.38
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	22.94	3.63	26.57
17	NS-Hannoversche-Straße	22.25	5.00	27.25
18	KS-Schönfelder-Straße 50	22.31	16.43	38.74
19	KS-Schönfelder-Straße 6	22.31	7.44	29.75
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	22.31	9.57	31.88
21	KS-Tischbeinstraße	22.51	7.38	29.88
22	KS-Weserstraße	21.53	21.75	43.29
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	19.83	5.46	25.29
24	KS-Wolfhager-Straße	21.15	14.19	35.34
25	KS-Ysenburgstraße	21.53	13.41	34.94

Tabelle 14 PM10-Jahresmittelwerte der Vor-, Zusatz- und Gesamtbelastung in 25 Straßenräumen für Straßenräumen für das Emissionszenario "NEC/CLE".

PM10		Vorbelastung (RCG)	Zusatzbelastung (CPB)	Gesamtbelastung
Straßenraum		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	KS-Adenauerstraße	24.08	1.92	26.00
2	BA-Altenritterstraße	24.68	2.14	26.83
3	KS-Brüderstraße	25.97	4.38	30.35
4	KS-FriedrichEbert-Straße	26.31	3.63	29.93
5	KS-Frankfurter-Straße 247	26.35	3.98	30.33
6	KS-Frankfurter-Straße 102	26.36	5.16	31.52
7	KS-Fünfensterstraße	26.03	3.52	29.55
8	KS-Holländische-Straße 157	25.32	8.17	33.50
9	KS-Holländische-Straße 28	25.93	12.47	38.40
10	KS-Ihringshäuser-Straße	25.54	4.80	30.34
11	FI-Veckerhagener-Straße	24.19	3.06	27.25
12	KS-Kohlenstraße	26.26	7.51	33.77
13	KS-Leipziger-Straße	25.69	5.23	30.92
14	KS-Mauerstraße	26.15	1.99	28.14
15	KS-Obervellmarer-Straße	24.96	7.89	32.85
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	25.33	1.63	26.96
17	NS-Hannoversche-Straße	25.26	2.37	27.64
18	KS-Schönfelder-Straße 50	26.42	7.83	34.25
19	KS-Schönfelder-Straße 6	26.42	3.62	30.04
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	26.42	4.65	31.08
21	KS-Tischbeinstraße	26.29	3.61	29.90
22	KS-Weserstraße	25.68	14.11	39.80
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	25.58	2.32	27.89
24	KS-Wolfhager-Straße	25.97	6.73	32.70
25	KS-Ysenburgstraße	25.68	6.42	32.10

4.4.2 Verletzung der Grenzwerte der 22. BImSchV

Die Überschreitung der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM₁₀ der Modellrechnungen sind in Tabelle 15 für das Emissionsszenario "NEC/CLE" dargestellt.

Der NO₂-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird an einer der 25 Straßen in den Berechnungen überschritten. Der PM₁₀-Jahresmittelwert-Grenzwert von 40 µg/m³ wird in keiner Straße überschritten.

Der Stundenmittelwert-Grenzwert für NO₂ von 200 µg/m³ wird in keiner Straße mehr als die erlaubten 18mal überschritten. Der Tagesmittelwert-Grenzwert für PM₁₀ von 50 µg/m³ wird in drei der 25 Straßenschluchten mehr als die erlaubten 35mal überschritten.

Die Grenzwertüberschreitungen sind in Tabelle 15 farbig (■) hervorgehoben.

Tabelle 15 Überschreitung der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM₁₀ in den Modellrechnungen für das Emissionsszenario "NEC/CLE".

Nr	Straßenname	Grenzwerte			
		Mittelwert		Überschreitungen	
		NO ₂ >40	PM ₁₀ >40	NO ₂ >18	PM ₁₀ >35
1	KS-Adenauerstraße	nein	nein	nein	nein
2	BA-Altenritterstraße	nein	nein	nein	nein
3	KS-Brüderstraße	nein	nein	nein	nein
4	KS-FriedrichEbert-Straße	nein	nein	nein	nein
5	KS-Frankfurter-Straße 247	nein	nein	nein	nein
6	KS-Frankfurter-Straße 102	nein	nein	nein	nein
7	KS-Fünffensterstraße	nein	nein	nein	nein
8	KS-Holländische-Straße 157	nein	nein	nein	nein
9	KS-Holländische-Straße 28	ja	nein	nein	ja
10	KS-Ihringshäuser-Straße	nein	nein	nein	nein
11	FI-Veckerhagener-Straße	nein	nein	nein	nein
12	KS-Kohlenstraße	nein	nein	nein	ja
13	KS-Leipziger-Straße	nein	nein	nein	nein
14	KS-Mauerstraße	nein	nein	nein	nein
15	KS-Obervellmarer-Straße	nein	nein	nein	nein
16	LO-Ochshäuser-Dorfstraße	nein	nein	nein	nein
17	NS-Hannoversche-Straße	nein	nein	nein	nein
18	KS-Schönfelder-Straße 50	nein	nein	nein	ja
19	KS-Schönfelder-Straße 6	nein	nein	nein	nein
20	KS-Schönfelder-Straße 6a	nein	nein	nein	nein
21	KS-Tischbeinstraße	nein	nein	nein	nein
22	KS-Weserstraße	ja	nein	nein	ja
23	KS-Wilhelmshöher-Allee	nein	nein	nein	nein
24	KS-Wolfhager-Straße	nein	nein	nein	nein
25	KS-Ysenburgstraße	nein	nein	nein	nein
Überschreitungen in Straßen		2	0	0	4

5 Schlussfolgerungen

Die beiden Emissionsszenarien "ohne Autobahnen" und "halbierte städtische Verkehrsemissionen" im Nest 3, von denen das erste ausschließlich Auswirkungen auf den städtischen Beitrag zur Vorbelastung hat, führen zu einer Verringerung der Immissionsbelastung in den Straßenräumen (siehe Tabelle 16). Insbesondere die Halbierung der lokalen Verkehrsemissionen führt erwartungsgemäß zu einer deutlichen Abnahme der für den Ist-Zustand berechneten Grenzwertverletzungen. Die geringste Anzahl von Grenzwertverletzungen ergibt sich unter den Emissionsbedingungen des NEC/CLE-Szenarios. Insbesondere die Anzahl der Verletzungen des PM10-Kurzzeitgrenzwertes gehen stark zurück, da der großräumige Charakter des NEC/CLE-Szenarios auch zu einer Verringerung der sekundären Aerosole führt, die einen großen Anteil an der PM10-Gesamtkonzentration haben. Dies weist darauf hin, dass die Kombination von lokalen mit überregionalen Emissionskontrollen die beste Maßnahme zur Senkung der Immissionen ist.

Tabelle 16 Anzahl der Straßenräume mit Überschreitung der Grenzwerte der 22. BImSchV für NO₂ und PM10

Nr	Szenarien	Grenzwerte			
		Mittelwert		Überschreitungen	
		NO ₂ >40	PM10>40	NO ₂ >18	PM10>35
1	Ist-Zustand	17	5	0	25
2	ohne Autobahn"	11	5	0	22
3	halbierte städt. Verkehrsemissionen	3	0	0	19
4	NEC/CLE-Szenario	2	0	0	4

6 Literatur

- EU (1996): Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27.9.1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 296/55 vom 21.11. 1996
- EU (2000): Amtsblatt der EU C375/1 vom 28.12. 2000
- HMULV (1999): Luftreinhalteplan Kassel, 1. Fortschreibung, Dezember 1999
- IIASA (2004): The "Current Legislation" and the "Maximum Feasible Reduction" cases for the CAFE baseline emission projections, CAFE Scenario Analysis Report Nr. 2
- IMMIS^{luft}, 2004: Handbuch zu IMMIS^{luft}, IVU Umwelt GmbH, siehe www.IVU-Umwelt.de
- INFRAS, 2004: HBEFA Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 2.1. Im Auftrag der UBA Berlin / BUWAL Bern / UBA Wien; Februar 2004
- IVU, 2004: Ausbreitungsrechnungen mit dem Canyon-Plume-Box-Modell als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main. Bericht von IVU Umwelt GmbH für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Ostmann, C., Stern, R., Wiegand, G. (1996). Canyon Plume Box Modell, Version 3, Release 8, Handbuch. IVU Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung mbH. Abschlussbericht zum FE-Vorhaben 104 02 811 des Umweltbundesamts, Berlin.
- Reimer E. und Scherer B. (1992). An operational meteorological diagnostic system for regional air pollution analysis and long-term modeling. Air Poll. Modelling and its Applications IX. Plenum Press
- Stern, R. (2003). Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“.
- Stern, R., Kerschbaumer, A., Fath, J., (2003). Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID auf die Region Berlin-Brandenburg. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 29943 246 auf dem Gebiet des Umweltschutzes „Entwicklung eines Modellsystems für das Zusammenspiel von Messung und Rechnung für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität“.
- Stern, R. (2005) Erstellung einer hoch aufgelösten Emissionsdatenbasis für Deutschland und Europa, Bezugsjahre 2000 und 2010. Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Nr. 202 43 270 des Umweltbundesamts.
- Stern, R., Kerschbaumer, A., Reimer, E. (2005). Ausbreitungsrechnungen mit dem chemischen Transportmodell REM-CALGRID als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Kassel. Bericht der Arbeitsgruppe TRUMF am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie im Unterauftrag der IVU Umwelt GmbH.
- Yamartino, R. J., Wiegand, G. (1986): Development and Evaluation of Simple Models for the Flow, Turbulence and Pollutant Concentration Fields within an Urban Street Canyon Atmospheric Environment Vol.20, No.11, pp 2137-2156; 1986



Abschlussbericht

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

für

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

Im Unterauftrag von

IVU Umwelt GmbH
Burgweg 10 · D-79350 Sexau

Rainer Stern
Andreas Kerschbaumer
Eberhard Reimer

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

November 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	4
2	Untersuchungsgebiet und Datenaufbereitung für REM-CALGRID.....	7
2.1	<i>Großräumiges und überregionales Modellgebiet</i>	<i>7</i>
2.2	<i>Regionales und urbanes Modellgebiet</i>	<i>8</i>
2.3	<i>Topographie und Landnutzungsdatenbasis</i>	<i>10</i>
2.4	<i>Meteorologische Daten.....</i>	<i>13</i>
2.4.1	<i>Dreidimensionale großräumige meteorologische Analyse</i>	<i>13</i>
2.4.2	<i>Adaptation an die feine Auflösung</i>	<i>14</i>
2.4.3	<i>Grenzschichtparameter</i>	<i>15</i>
2.5	<i>Emissionsdaten</i>	<i>16</i>
2.5.1	<i>Basisemissionen.....</i>	<i>16</i>
2.5.2	<i>Szenarienemissionen.....</i>	<i>26</i>
3	Ergebnisse der Basisläufe 2004.....	30
3.1	<i>Überblick</i>	<i>30</i>
3.2	<i>Flächendarstellungen</i>	<i>31</i>
3.3	<i>Vergleich mit Messungen.....</i>	<i>36</i>
3.4	<i>Herkunftsanalyse</i>	<i>40</i>
4	Die Emissionsszenarien	54
4.1	<i>Keine Emissionen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3.....</i>	<i>54</i>
4.2	<i>Kein Kfz-Verkehr im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3</i>	<i>57</i>
4.3	<i>Keine Industrie im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3.....</i>	<i>58</i>
4.4	<i>Kein Hausbrand im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3.....</i>	<i>60</i>
4.5	<i>Beitrag der Quellgruppen zur Vorbelastung der 25 Straßenräume</i>	<i>63</i>
4.6	<i>Keine Emissionen der Bundesautobahnen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3.....</i>	<i>68</i>
4.7	<i>Kfz-Verkehr halbiert in der Kasseler Innenstadt.....</i>	<i>70</i>
4.8	<i>Beitrag der Kfz-bezogenen Quellgruppen zur Vorbelastung der 25 Straßenräume</i>	<i>72</i>
4.9	<i>Das CLE/NEC-Szenario</i>	<i>80</i>
5	Zusammenfassung.....	85
6	Literatur	87

7	Abbildungsverzeichnis.....	89
8	Tabellenverzeichnis.....	91
9	Anhang : Kurzbeschreibung des REM-CALGRID-Modells.....	94

1 Einführung

Dieser Bericht beschreibt die Anwendung des chemischen Transportmodells REM-CALGRID auf die Region Kassel. Das Modell wurde eingesetzt, um für das Bezugsjahr 2003 für eine Reihe von Straßen die zur Anwendung eines Straßenschluchtmodells notwendigen Vorbelastungskonzentrationen von NO, NO₂, PM10 und Ozon zu liefern.

Im Ballungsraum Kassel wurde im Jahr 2003 an zwei Messstationen der Kurzzeitgrenzwert für PM10 (plus Toleranzmarge) überschritten (siehe Lufthygienischer Jahresbericht 2003, HLUg). Nach Artikel 8 der EU-Rahmenrichtlinie 96/62/EG (EU-RRL) zur Luftqualität (EU, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 1996) müssen für Gebiete, in denen Grenzwerte überschritten werden, Luftreinhaltepläne erarbeitet werden, aufgrund derer die betreffenden Grenzwerte zukünftig eingehalten werden können. In der EU-RRL sind dazu neben Messungen erstmalig auch Modellrechnungen zur Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität vorgesehen. Im Rahmen des vom Umweltbundesamt an die FU Berlin vergebenen FE-Vorhabens 29841252 „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“ und des FE-Vorhabens 29943246 „Entwicklung eines Modellsystems für das Zusammenspiel von Messung und Rechnung für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität“ wurde ein Modellinstrumentarium entwickelt, das den in der EU-RRL definierten Anforderungen an die Ausbreitungsrechnung genügt. Kern des Systems ist das chemische Transportmodell REM-CALGRID (RCG), das für die vorliegende Studie eingesetzt wurde. Dieses Instrumentarium wurde bereits zur Ursachenanalyse in den Ballungsräumen Rhein-Main (IVU und TRUMF, 2004) und Berlin (Kerschbaumer et al., 2005) eingesetzt.

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

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

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

Das Modellsystem enthält für die hiesige Fragestellung folgende Ausbreitungsmodelle:

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

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

Der vorliegende Bericht beschreibt die Anwendung des RCG-Modells auf die Region Kassel. Die für 25 Straßen im Großraum Kassel berechneten Vorbelastungskonzentrationen wurden in Form von Zeitreihen an das Canyon-Plume-Box-Modell übergeben. Die Anwendung des CPB-Modells zur Ermittlung der Zusatzbelastung im eigentlichen Straßenraum wurde dann von der IVU-Umwelt GmbH durchgeführt.

Die RCG-Anwendung erfolgte in 4 Gebieten mit ansteigender horizontaler Auflösung:

- Europa (Nest 0),
- Deutschland (Nest 1),
- Großraum Kassel mit Umgebung (Nest 2),
- Stadtgebiet Kassel (Nest 3)

Die europaweite Rechnung liefert die Hintergrundkonzentrationen für die deutschlandweite Rechnung. Diese überregionale Rechnung liefert den Hintergrund für die regionalen Rechnungen im Großraum Kassel plus Umgebung. Die Ergebnisse der regionalen Rechnung gehen über die Randbedingungen in die urbane Rechnung für das Stadtgebiet von Kassel ein, deren Ergebnisse dann als Vorbelastungskonzentrationen für die Straßenschluchtrechnungen benutzt werden. Die Vorbelastung beruht damit komplett auf Modellrechnungen. Dies ist besonders wichtig für die Ursachenanalyse, da die nicht-linearen Zusammenhänge zwischen Emission und Immission unter Berücksichtigung aller relevanten physikalischen und chemischen Prozesse berechnet werden. Insbesondere für Ozon und PM10 ist es nicht möglich, das Minderungspotential einer Region ohne solch eine rechnerische Bestimmung des großräumigen Hintergrunds sowie der regionalen Vorbelastung zu quantifizieren.

Neben der Bereitstellung der Vorbelastungskonzentrationen für das Jahr 2003 wurden zur Ursachenanalyse eine Reihe grundlegender Emissionsszenarien auf ihre immissionsseitigen Auswirkungen im Raum Kassel untersucht. Im Nest 3 wurden dazu folgende Szenarien berechnet:

- Keine Emissionen
- Keine Emissionen der Verursachergruppe Hausbrand
- Keine Emissionen der Verursachergruppe Straßenverkehr
- Keine Emissionen der Verursachergruppe Industrie und Kraftwerke
- Keine Autobahn-Emissionen
- Kfz- Emissionen im Innenstadtbereich halbiert

Neben diesen lokalen Szenarien wurden Szenarienrechnungen zur zukünftigen Emissionsentwicklung bis 2010 durchgeführt.

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

1. Durchführung des Basislaufs (Meteorologisches Bezugsjahr 2003) in der europäischen Skala (Nest 0) und Bereitstellung der Randbedingungen für die deutschlandweite Skala.

2. Durchführung des Basislaufs 2003 in der deutschlandweiten Skala (Nest 1) und Bereitstellung der Randbedingungen für die regionale Skala.
3. Erstellung der meteorologischen, topographischen und physikalischen Eingangsdaten für die regionale Skala (Nest 2: Großraum Kassel und Umgebung) und die urbane Skala (Nest 3: Großraum Kassel), Bezugsjahr 2003.
4. Durchführung des Basislaufs 2003 in der regionalen Skala (Großraum Kassel plus Umgebung) und Bereitstellung der Randbedingungen für die urbane Skala.
5. Durchführung des Basislaufs in der urbanen Skala (Großraum Kassel) und Bereitstellung der Hintergrundkonzentrationen für die Straßenschluchtberechnungen.
6. Durchführung und Auswertung der lokalen Emissionsszenarien.

Arbeiten zum Emissionsszenario NEC/CLE2010:

1. Durchführung des Szenariolaufs mit der Meteorologie 2003 unter den Emissionsbedingungen des CLE-Szenarios 2010 in der europäischen Skala und Bereitstellung der Randbedingungen für die deutschlandweite Skala.
2. Durchführung des Szenariolaufs mit der Meteorologie 2003 unter den Emissionsbedingungen des CLE-Szenarios 2010 (normiert auf die NEC-Werte) in der deutschlandweiten Skala und Bereitstellung der Randbedingungen für das Nest 2 (Großraum Kassel).
3. Erstellen der Emissionsdatenbasis Kassel für die Bedingungen des CLE-Szenarios 2010 (normiert auf die NEC-Werte) unter Verwendung von Änderungsraten, die aus der großräumigen Datenbasis abgeleitet wurden.
4. Durchführung des Szenariolaufs mit der Meteorologie 2003 unter den Emissionsbedingungen des CLE-Szenarios 2010 für das Nest 2 (Großraum Kassel) und Bereitstellung der Randbedingungen für das Nest 3 (Stadt Kassel).
5. Durchführung des Szenariolaufs mit der Meteorologie 2003 unter den Emissionsbedingungen des CLE-Szenarios 2010 für das Nest 3 (Stadtgebiet Kassel) und Bereitstellung der Randbedingungen für das CPB-Modell.

und

6. Berichterstattung zur Anwendung des RCG-Modells.

Eine Kurzbeschreibung des REM-CALGRID-Modells ist im Anhang zu finden. Im folgenden Kapitel 2 werden die Untersuchungsgebiete und die verwendeten Eingangsdaten für die Modellrechnung beschrieben. Kapitel 3 enthält eine Diskussion der Ergebnisse des Basislaufs für die Region Kassel. In Kapitel 4 folgen die Auswertungen der Emissionsszenarien.

2 Untersuchungsgebiet und Datenaufbereitung für REM-CALGRID

2.1 Großräumiges und überregionales Modellgebiet

Das RCG-Modell wurde für die europaweite Rechnung (Nest 0) auf das in der Abbildung 1 gezeigte Modellgebiet angewendet. Die horizontale Auflösung beträgt in einem geographischen Koordinatensystem 0.5° Länge und 0.25° Breite. Die deutschlandweite Rechnung (Nest 1) erfolgte in dem Gebiet der Abbildung 2 mit einer Auflösung von 0.25° Länge und 0.125° Breite. In der Vertikalen wird die Atmosphäre mit 8 Schichten aufgelöst von denen sich 6 Schichten unter 1000 m über Grund befinden. Als Emissionsdaten wurden die von der TNO, Niederlande, für Europa erstellten Daten verwendet (Visschedijk und Van der Gon, 2005). Die vom Modell benötigten meteorologischen Daten des Modells wurden aus meteorologischen Beobachtungen mit dem am Institut für Meteorologie betriebenen Programmsystem TRAMPER (Tropospheric Realtime Applied Meteorological Procedures for Environmental Research) erstellt (siehe auch Kap. 2.4).

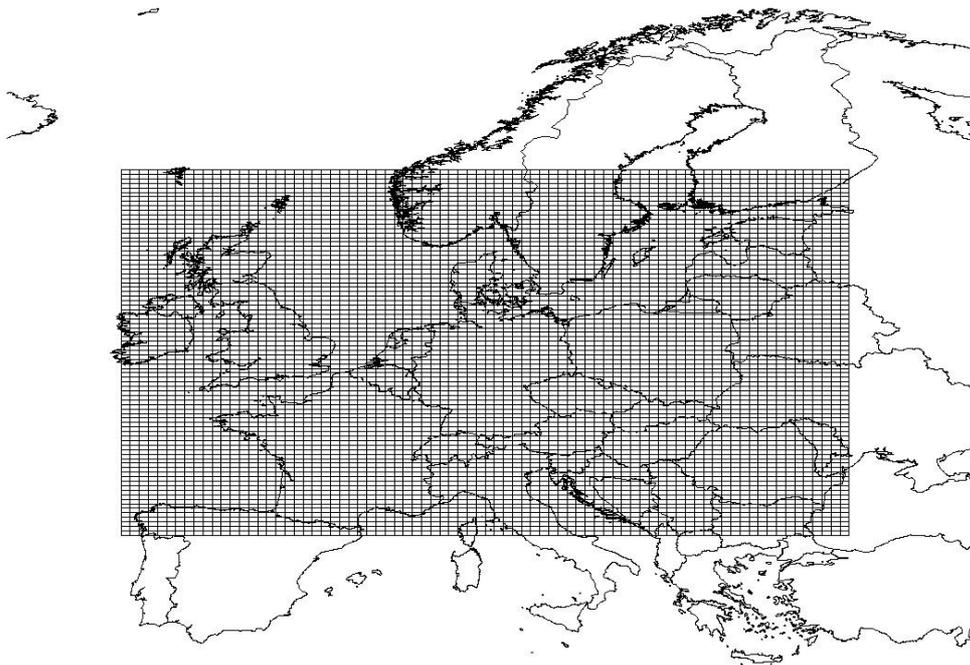


Abbildung 1: Großräumiges RCG-Modellgebiet mit einer Maschenweite von 0.25° Breite und 0.5° Länge.

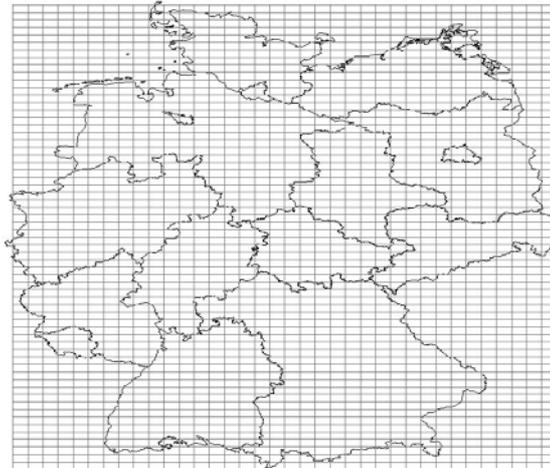


Abbildung 2 : RCG-Modellgebiet für Deutschland mit einer Maschenweite von 0.125° Breite und 0.25° Länge. In dieses Gitter wird direkt das Nest 2 für den Großraum Kassel und Umgebung eingepasst.

2.2 Regionales und urbanes Modellgebiet

Da die regional/urbane Anwendung des Modells REM/CALGRID genestet in die deutschlandweite Anwendung erfolgen muss, wird das regional/urbane Untersuchungsgebiet in das deutschlandweite Horizontalgitter eingepasst, um eine direkte Übergabe der Randbedingungen zu ermöglichen. Dies ist nur in einem geographischen Koordinatensystem möglich, da die großräumigen Datenbasen und damit alle großräumigen Rechnungen nur in solch einem System vorliegen.

Die Verwendung von Modellrechnungen im Rahmen von Maßnahmenplanungen oder Verursacheranalysen in der topographisch stark gegliederten Region Kassel erfordert eine sehr hohe räumliche Auflösung. Das Ausbreitungsgebiet von Kassel wurde daher mit einem horizontalen Gitternetz mit der Maschenweite in der Größenordnung von 500 m aufgelöst (Nest 3). Da der Sprung zwischen der Maschenweite für die deutschlandweiten Hintergrundrechnungen (in der Region Kassel circa $17 \times 14 \text{ km}^2$) auf eine Maschenweite von circa 500 m zu groß ist, musste dazwischen noch ein weiteres Nest gelegt werden. Diese Nest umfasst den Großraum Kassel plus Umgebung und hat eine Auflösung von knapp 2 km. In Tabelle 1 sind die genauen Maße der verwendeten Nester zusammengestellt.

Das Nest 2 besitzt eine Gitterweite 0.015625° Breite und 0.03125° Länge. Dies entspricht bezogen auf das Deutschlandgitter einem Nesting-Verhältnis von 1:8. Die Anzahl der Gitterzellen beträgt für Nest 2 16 entlang der Breitengrade (West-Ost) und 24 entlang der Längengrade (Nord-Süd). Die Ost-West-Ausdehnung des Gebiets beträgt circa 34.5 km. In Nord-Süd-Richtung erhält man eine Ausdehnung von 41.7 km. Die Maschenweite beträgt in Ost-West-Richtung circa 2.2 km, in Nord-Süd-Richtung circa 1.7 km.

Nest 3 umfasst das eigentliche Stadtgebiet von Kassel und ist mit einem Nesting-Verhältnis von 1:4 eingebettet in das Gebiet des Nests 2. Die Auflösung in Ost-West-Richtung beträgt 0.0078125° und in Nord-Süd-Richtung 0.00390625° . Dies entspricht ungefähr einer Auflösung

von circa 542 m x 434 m, bei einer Gitteranzahl von 24 entlang der Längengrade (Nord-Süd) und von 28 entlang der Breitengrade (West-Ost). Die Ausdehnung ist ca. 13.0 km in Ost-West-Richtung und 12.2 km in Nord-Süd-Richtung. Die Nester 2 und 3 zeigt die Abbildung 3.

Tabelle 1: Gebietsgrößen der Nester 0 bis 3

Gebiet	Ausdehnung	Auflösung
Nest 0	-10° W bis 30° O	0.5° Länge
Westliches Europa	42° N bis 62° N	0.25° Breite
Nest 1	4° O bis 17° O	0.25° Länge
Deutschland	47° N bis 55° N	0.125° Breite
Nest 2	9.25° O bis 9.75° O	0.03125° Länge (16 Zellen)
Großraum Kassel	51.125° N bis 51.5° N	0.015625° Breite (24 Zellen)
Nest 3	9.40625° O bis 9.59375° O	0.0078125° Länge (24 Zellen)
Stadtgebiet von Kassel	51.25° N bis 51.359375° N	0.00390625° Breite (28 Zellen)

Alle vom RCG-Modell benötigten Daten für die Nester 2 und 3 wurden in der in der Tabelle 1 angeführten Auflösung erhoben. Dabei handelt es sich um

- Topographiedaten
- Landnutzungsdaten
- Emissionsdaten
- Meteorologiedaten.

Die meteorologischen Daten für alle Nester wurden mit dem System TRAMPER erstellt. Bei den Landnutzungs-, Topographie und Emissionsdaten wurden auf für den Raum Kassel zur Verfügung stehende Informationen zurückgegriffen. Für diese Daten, die von der IVU-GmbH für das Vorhaben gesammelt und aufbereitet werden, erfolgte eine Anpassung an die vom RCG-Modell verlangten Datenformate.

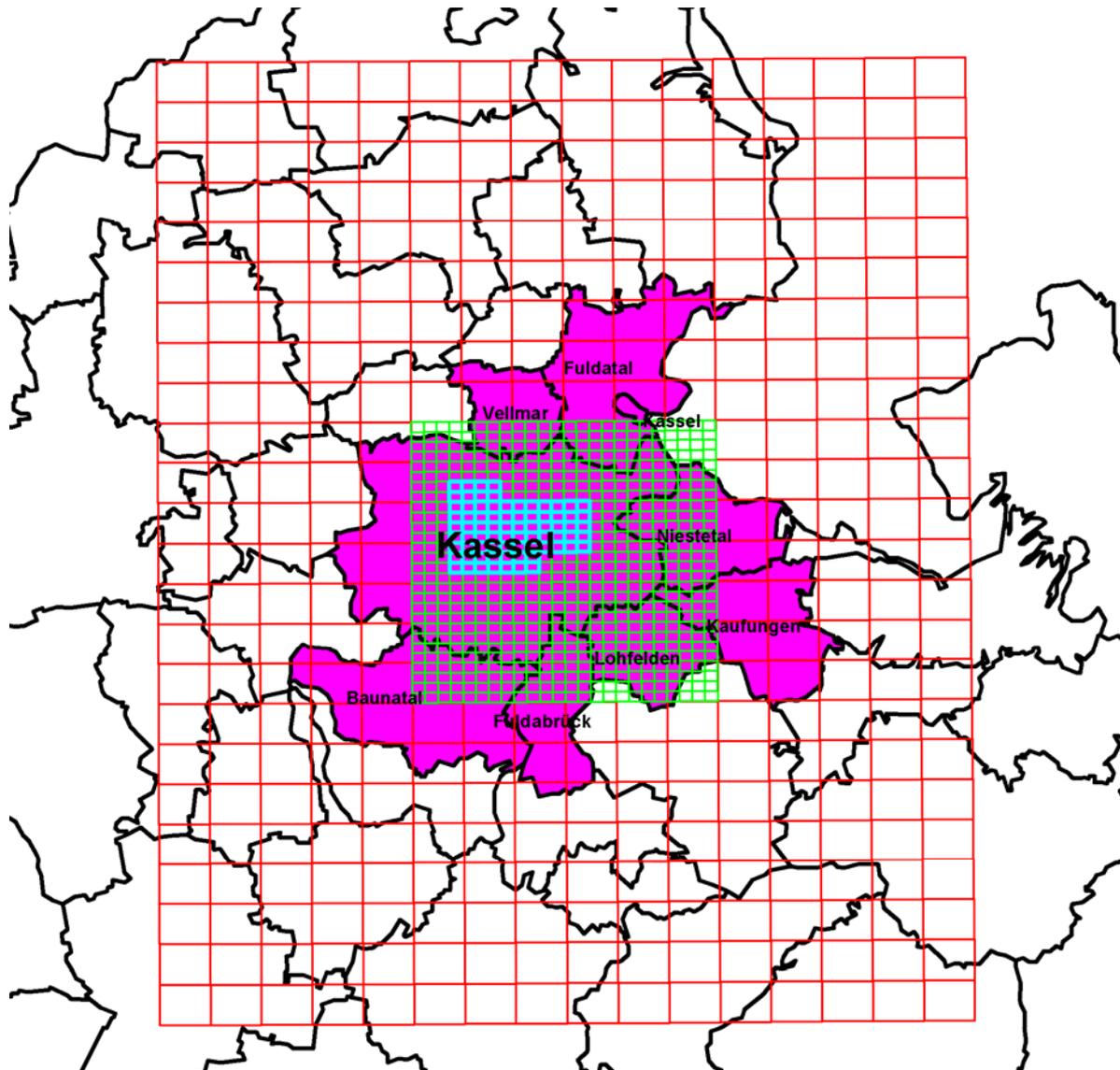


Abbildung 3: Untersuchungsgebiet Ballungsraum Kassel. Nest 2 (rote Gitterlinien) und Nest 3 (grüne Gitterlinien). Die hellblau gekennzeichneten Gitter zeigen das eigentliche Stadtgebiet von Kassel. Zu den geographischen Grenzen und Gittergrößen siehe Tabelle 1.

2.3 Topographie und Landnutzungsdatenbasis

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die für die Ausbreitungsrechnungen in den Nestern 2 und 3 verwendete topografische Höhenverteilung, Abbildung 6 und Abbildung 7 die in den jeweiligen Nestern vorherrschende Landnutzungsclassen.

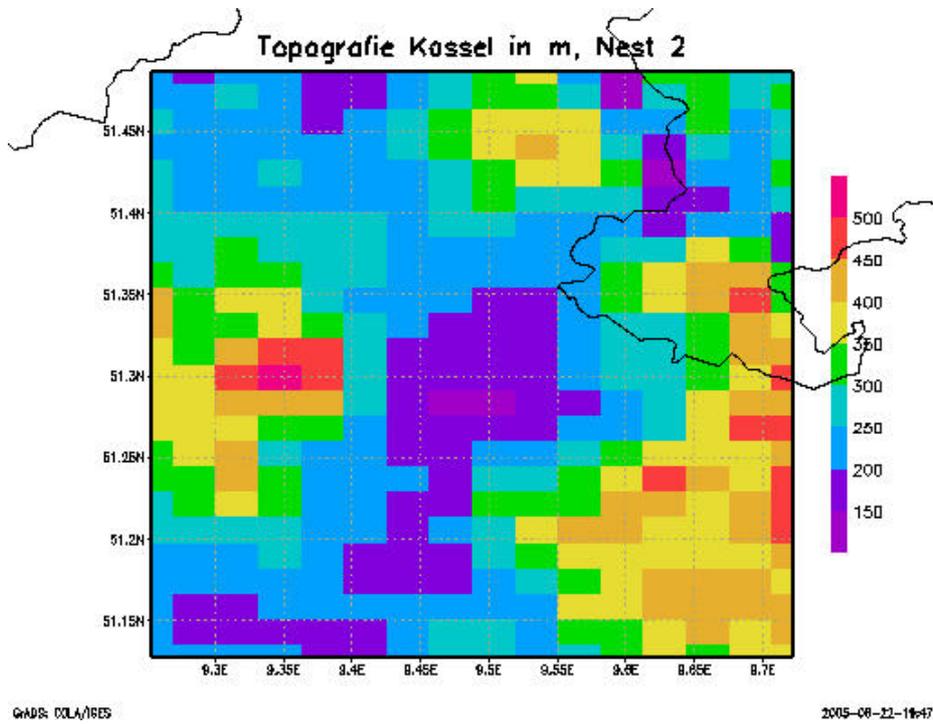


Abbildung 4: Topographie in den Rastern des Untersuchungsgebiets Kassel, Nest 2. Zu den geographischen Grenzen und Gittergrößen siehe Tabelle 1.

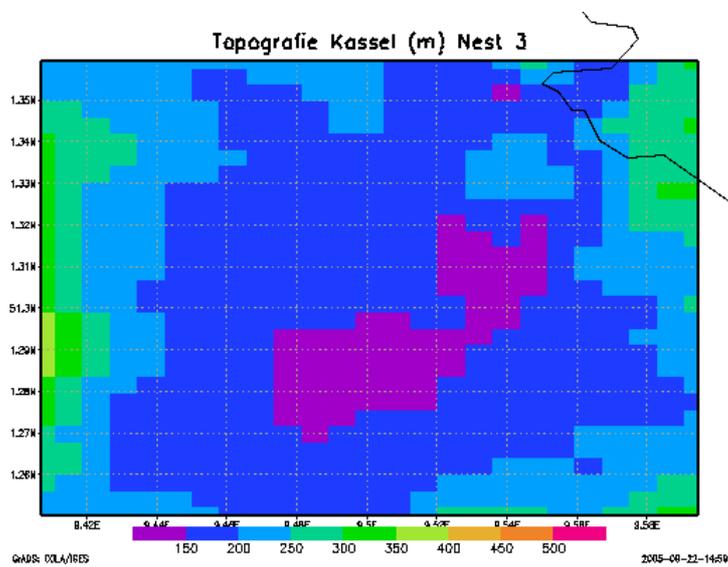


Abbildung 5: Topographie in den Rastern des Untersuchungsgebiets Kassel, Nest 3. Zu den geographischen Grenzen und Gittergrößen siehe Tabelle 1.

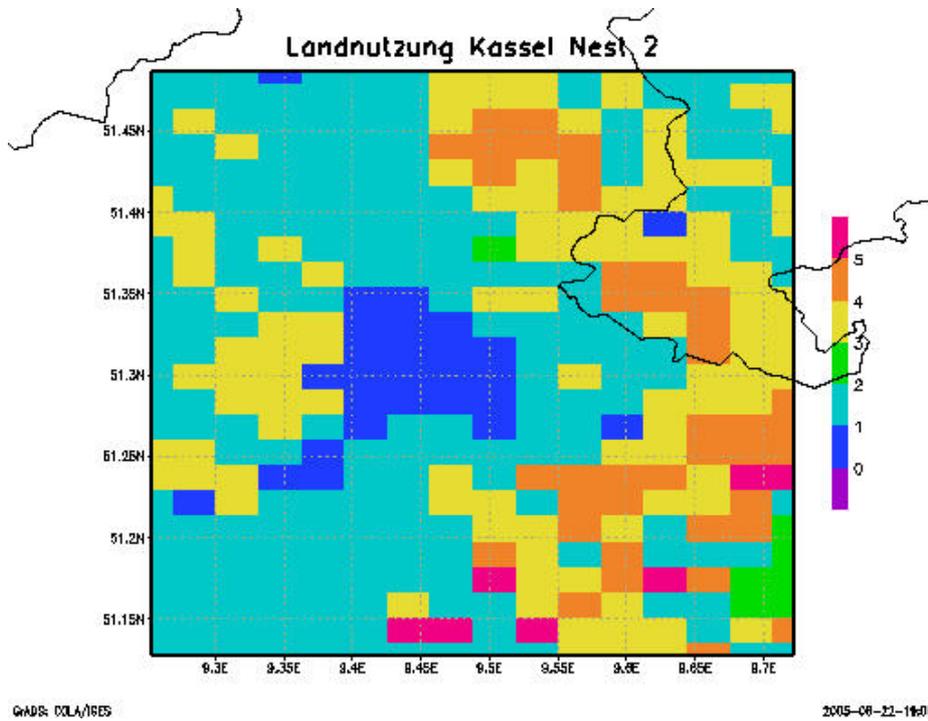


Abbildung 6: Vorherrschende Landnutzungskategorie in den Rastern des Untersuchungsgebiets Kassel, Nest 2. Dunkelblau: Bebaute Flächen einschließlich Straßen; Hellblau: Landwirtschaftlich genutzte Fläche; grün: Grasland, Weide; gelb: Laubwald; orange: Nadelwald; rot: Mischwald. Zu den geographischen Grenzen und Gittergrößen siehe Tabelle 1.

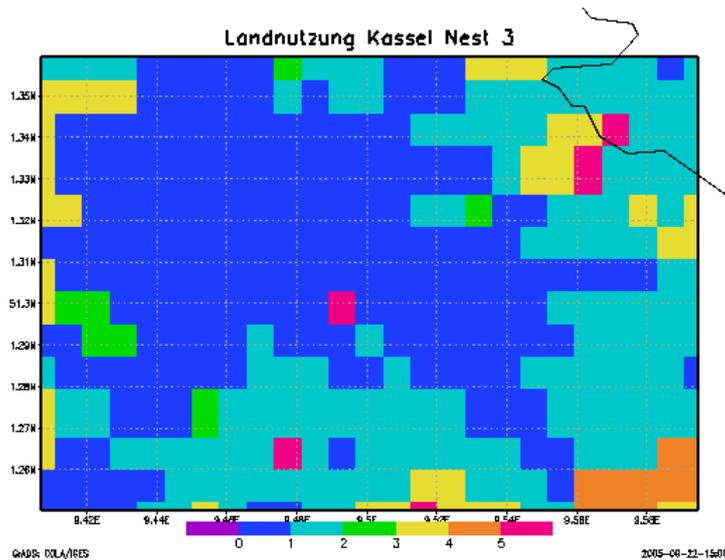


Abbildung 7: Vorherrschende Landnutzungskategorie in den Rastern des Untersuchungsgebiets Kassel, Nest 3. Dunkelblau: Bebaute Flächen einschließlich Straßen; Hellblau: Landwirtschaftlich genutzte Fläche; grün: Grasland, Weide; gelb: Laubwald; orange: Nadelwald; rot: Mischwald. Zu den geographischen Grenzen und Gittergrößen siehe Tabelle 1.

2.4 Meteorologische Daten

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

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

2.4.1 Dreidimensionale großräumige meteorologische Analyse

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

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

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

Die dreidimensional analysierten Variablen sind:

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

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

Zweidimensional werden dargestellt:

- Bewölkung und Wetter aus Bodenbeobachtungen,
- Potentielle Temperatur in 2m Höhe,

- Bodendrucktendenz (dreistündlich),
- Inversionshöhen aus Radiosonden.

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

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

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

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

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

2.4.2 Adaptation an die feine Auflösung

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

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

Pro Tag werden zusammenhängend 24 Analysen (00, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 UTC) ausgeführt. Die Grundfelder für Zwischentermine, die keine ausreichende Basis an Beobachtungen aufweisen, werden durch Interpolation der nächstliegenden Termine erzeugt, wobei evtl. vorhandene Messungen örtlich berücksichtigt werden. Die Beobachtungsdaten werden dafür einer Vorbehandlung unterzogen, in der evtl. Lücken durch zeitliche Interpolation aufgefüllt und geprüft werden und die Wolken und Niederschlagsdaten einer Konsistenzbetrachtung unterzogen werden.

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

Die Grenzschichtgrößen werden in stündlicher Folge berechnet, wobei die Topographie in der Bestrahlung beachtet wird. Die Mischungshöhe wird 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. Folgende Optionen stehen zur Verfügung:

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

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

- Interpolation lokaler Messungen,
- Anpassung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente.

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

Das Strömungsfeld der großräumigen Analyse wird als erste Schätzung („first guess“) benutzt. Ein vertikales Adaptationsverfahren erlaubt unter anderem die vertikale Interpolation von Bodenwinden mittels Potenzansatz oder beliebigen Profilen. Zur Minimierung der Divergenz und Erhaltung der Massenbilanz des Strömungsfeldes wird ein iteratives Verfahren eingesetzt. Dabei werden die horizontalen Komponenten unter Berücksichtigung der vertikalen Divergenz variiert. Die großräumige Vertikalbewegung in der Troposphäre wird hierbei als neuer Schritt mit eingebunden, so dass die Vertikalbewegung und Divergenzfelder von bodennahen, sehr detailreichen Schichten bis in die Troposphäre quasikontinuierlich beschrieben werden. Eine Beschreibung der Basisverfahren zur Strömungsbeschreibung findet sich in Kerschbaumer und Reimer (2003).

2.4.3 Grenzschichtparameter

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

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

2.5 Emissionsdaten

2.5.1 Basisemissionen

Emissionen der Stoffgruppen SO₂, NO_x, CO, NH₃, PM10, PM2.5 und NMVOC müssen dem Modell in Form von Punkt- oder Flächenquellen vorgegeben werden. Für die Punktquellen wird aus den Kenndaten der Quelle und lokalen meteorologischen Größen eine effektive Schornsteinhöhe bestimmt. Die Übergabe der Emissionen erfolgt dann in die dazugehörige Modellschicht. Flächen- und Punktquellen werden im Modell als Volumenquellen behandelt, d.h. die Emissionen verteilen sich unmittelbar in der betreffenden Gitterzelle.

Das Modell verlangt jahresspezifische Emissionsdaten für alle benötigten Spezies getrennt nach Punkt- und Flächenquellen und unterteilt nach Verursachergruppen. Für die Verursachergruppen werden im Modell ausgehend von den Jahreswerten stündliche Emissionen abgeleitet. Die dazu verwendeten Monats-, Tages- und Stundenfaktoren müssen ebenfalls vorgegeben werden und berücksichtigen die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Emissionen der einzelnen Verursachergruppen. Bei den Kohlenwasserstoffen verlangt das Modell die Gesamtemissionen für die definierten Verursachergruppen und ein zu jeder Verursachergruppe gehöriges Kohlenwasserstoffprofil, das die prozentualen Anteile der spezifischen Kohlenwasserstoffe an der Gesamtemission der Verursachergruppe angibt. Jeder Kohlenwasserstoff wird dann den entsprechenden Klassen des chemischen Mechanismus zugeordnet. Diese Vorgehensweise vermeidet die Verwendung pauschaler, mechanismusabhängiger Zuordnungsfaktoren und gewährleistet, dass das emittierte Kohlenwasserstoffgemisch exakt entsprechend der vom chemischen Mechanismus verlangten Klassifizierung behandelt wird. Biogene VOC- und NO_x-Emissionen werden stündlich modellintern mit Hilfe von Landnutzungsdaten und entsprechenden Emissionsfaktoren berechnet.

Die Emissionsdaten im Hessischen Teil des Untersuchungsgebiets Kassel wurden von der IVU Umwelt GmbH bereitgestellt. IVU-Umwelt lieferte für folgende Verursacher die Emissionen als Flächenquellen in der Auflösung des Nests 3 für das gesamte Gebiet des Nests 2 (siehe Abbildung 3 und Tabelle 1):

- Verkehr auf den Autobahnen
- Verkehr auf allen anderen Straßen
- Hausbrand
- Kleinverbraucher
- Biogene und nicht-gefasste landwirtschaftliche Emissionen

Die industriellen Emissionen wurden ausschließlich als Punktquellen geliefert. Emissionen in Niedersachsen standen nur für die A5 und einige Bundesstraßen zur Verfügung.

In der Tabelle 2 sind die gelieferten Schadstoffmengen für alle Verursacher zusammengestellt. Die von IVU für PM10 gelieferten Emissionsmengen beziehen sich ausschließlich auf die von Dieselfahrzeugen über den Auspuff emittierten Partikel. Angaben zum Beitrag des Reifen- und

Bremsabriebs sowie der Staubaufwirbelung zu den Kfz-bedingten PM10-Emissionen liegen nicht vor. Nach den Untersuchungen von Düring et al. (2002) erklären die PM10-Auspuffemissionen aber nur circa 50% der gemessenen Verkehrs-Zusatzbelastung. Zur Berücksichtigung der Nicht-Auspuff-Emissionen wurden die PM10-Emissionen für den Verkehr daher verdoppelt. Zusätzlich angegeben in Tabelle 2 sind die Emissionen, die sich für Nest 2 aus der für die großräumigen und überregionalen Rechnungen (Nest 0 und Nest 1) verwendeten Emissionsdatenbasis ergeben. Es ist offensichtlich, dass sich die Emissionsangaben beträchtlich unterscheiden. Insbesondere die lokalen PM10-Emissionen sind deutlich niedriger als die in demselben Gebiet enthaltenen PM10-Emissionen der großräumigen Datenbasis in der Auflösung von circa 15x15 km².

Der Verkehr stellt in Kassel die Hauptverursachergruppe. Bei den Stickoxid- und den PM10-Emissionen werden über 70% vom Verkehr verursacht.

Abbildung 8 bis Abbildung 12 zeigen die räumliche Verteilung der NO_x- NMHC, CO-, SO₂- und PM10-Emissionen in der Auflösung des Nests 3 für das Gebiet von Nest 2. Die in Tabelle 2 zusammengestellten Emissionen wurden für die Ausbreitungsrechnungen in den Verursachergruppen des RCG-Modells für die Nester 2 und 3 aufbereitet. Tabelle 4 zeigt dazu die prozentualen Anteile der Emissionen in Nest 3 an den Gesamtemissionen des Nests 2. Beim Verkehr dominieren eindeutig die durch die Autobahnen verursachten Emissionen. In der Stadt Kassel selbst ist die NO_x- und PM10-Emissionsdichte selbst in der Auflösung von einigen Hundert Metern (Nest 3-Auflösung) noch relativ homogen (Abbildung 13, Abbildung 14). Dies gilt auch für die Emissionen des Hausbrands (Abbildung 15, Abbildung 16). Industrielle Emissionen liegen ausschließlich als Punktquellen vor (Abbildung 17, Abbildung 18).

Bei den Stickoxiden liegen die bereits angesprochenen Unterschiede zwischen der lokalen und der großräumigen Emissionserhebung mit 17% höheren lokalen Emissionen (bezogen auf die TNO-Emissionen) im Rahmen dessen, was aufgrund der unterschiedlichen Erhebungsmethoden zu erwarten ist. Die Tabelle 5 zeigt die Aufteilung der NO_x-Emissionen nach Verursachergruppen. Die TNO-Erhebung kennt danach keine NO_x-Emissionen aus der Landwirtschaft, die lokale Kasseler Erhebung dagegen keine Emissionen der Quellgruppe „Sonstige mobile Quellen“. Die Unterschiede zwischen der großräumigen TNO-Emissionsdatenbasis und der lokalen Kasseler Emissionsdatenbasis sind beim PM10 in der Gesamtsumme der Emissionen so beträchtlich, dass sie hier näher untersucht werden sollen. Dazu sind in Tabelle 6 die lokalen Kasseler Emissionen denen aus der TNO-Datenbasis gegenübergestellt. Die Emissionsabschätzungen für den Verkehrsbereich sowie Hausbrand und Kleingewerbe sind vergleichbar. Es sei angemerkt, dass in beiden Abschätzungen die Beiträge der Kfz-bedingten Feinstaubaufwirbelung inklusive der Emissionen des Reifenabriebs, sowie des Bremsen- und Kupplungsabriebs auf die Höhe der Auspuffemissionen gesetzt wurden. Große Unterschiede gibt es bei den industriellen Emissionen. Für den Bereich sonstige Quellen und Landwirtschaft gibt es keine lokalen PM10-Emissionsangaben. Die Unterschiede in den industriellen Emissionen können im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht aufgeklärt werden. In den Industrieemissionen der TNO sind auch die Emissionen der Energiewirtschaft, der Aufbereitung und Verbreitung fossiler Brennstoffe sowie der Müllbehandlung enthalten, also Emissionsdaten, die von den Betreibern solcher Anlagen in den Emissionserklärungen anzugeben sind und von den Überwachungsbehörden auch überprüft werden. Anzumerken als mögliche Ursache der Unterschiede ist die Tatsache, dass die Industrieemissionen in Kassel von 1997 bis 2000 deutlich zurückgegangen sind, was in der großräumigen Datenbasis möglicherweise noch nicht berücksichtigt ist. Der Sektor „Sonstige Quellen“ umfasst mobile Geräte und Maschinen der Bauwirtschaft, in Haushalten,

Gärten, Grünanlagen und der Straßenreinigung. Dieser Sektor stellt in der TNO-Datenbasis im Raum Kassel eine PM10-Emission in der Höhe von 55% der Kfz-Auspuffemissionen. Laut einer Studie des Umweltbundesamts (Lambrecht und Helms, 2004) können die Feinstaubemissionen aus mobilen Geräten und Maschinen in Deutschland sogar bis zu 90% der durch den Straßenverkehr bedingten Emissionen betragen, wobei in dieser Zahl die Aufwirbelungs- und Abriebemissionen durch den Einsatz der Geräte noch gar nicht enthalten sind. Legt man diese Zahl zu Grunde, dann wäre die von der TNO für die sonstigen Quellen im Nest 2 ermittelte PM10-Emission sogar nur eine niedrige Schätzung. Auch Baustellentätigkeit mit Lkw-Transporten oder natürliche Emissionen (Pollen und andere organische Partikel) sind in den Kasseler Feinstaub-Emissionsabschätzungen nicht enthalten. Im Luftreinhalte- und Aktionsplan Berlin (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2005) sind z.B. 35.7 % der gesamten Feinstaubemissionen unter der Kategorie „Sonstige Quellen“ geführt¹. Insgesamt lässt sich also festhalten, dass die für die Ausbreitungsrechnung gelieferten Feinstaubemissionsdaten für den Raum Kassel mit großer Wahrscheinlichkeit eine zu niedrige Abschätzung der Feinstaubemissionen geben. Aus diesem Grunde wurde für die Ausbreitungsrechnungen eine weitere PM10-Emissionsdatenbasis erstellt, in der die von der IVU-Umwelt gelieferten PM10-Emissionen folgendermaßen ergänzt wurden:

- 66.5 t/a PM10-Emissionen für den Sektor Landwirtschaft, verteilt entsprechend der räumlichen Struktur der NH₃-Emissionen dieses Sektors.
- 276.6 t/a PM10-Emissionen des Sektors „Sonstige Quellen“, verteilt entsprechend der räumlichen Struktur der PM10-Emissionen für den Sektor Hausbrand. Die Emissionsergänzung ergibt sich aus dem von der TNO ermittelten Beitrag der Sonstigen Quellen multipliziert mit dem Faktor 2, um die nicht-erfassten Beiträge zu dieser Gruppe zu berücksichtigen.

Mit diesen Ergänzungen ergibt sich für Nest 2 eine Gesamt-PM10-Emission von 933.3 t/a. Der Anteil des Sektors „Sonstige Quellen“ beträgt in dieser Abschätzung circa 29% und ist damit in der Größenordnung des im Luftreinhalteplan für Berlin angegebenen Anteils. Es soll ausdrücklich betont werden, dass die Ergänzung der PM10-Emissionen selbstverständlich mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

¹ Sonstige Feinstaubquellen im Berliner Emissionskataster beinhalten:

Abgas mobiler Maschinen, Abrieb und Aufwirbelung mobiler Geräte und den übrigen Verkehr, Holzverbrennung als Zusatzheizung in privaten Haushalten, sonstige verbrennungsbedingte Emissionen, Baustellentätigkeit mit Transport, Aufwirbelung durch starken Wind, Pollen und andere organische Partikel

Kassel, Nest 2, to/a	NO _x	NMVOC	CO	SO ₂	NH ₃	PM ₁₀
Verkehr ohne BAB	4097.09	1451.66	17619.303	106.659	51.373	301.637
Verkehr auf BAB	2149.083	274.609	6287.371	45.664	16.051	154.224
Hausbrand	876.418	256.152	3218.656	747.447		66.396
Privat		1165.372				
Kleingewerbe		586.594				11.146
Industrie	531.465	172.371	233.535	344.439		56.807
Biogen	979.872				1088.698	
Summe	8633.928	3906.758	27358.865	1244.209	1156.122	590.21

TNO-Daten	7404.434	6411.6	19266.863	792.099	1971.589	1097.634
Nest 2/TNO	1.17	0.61	1.42	1.57	0.59	0.54

Tabelle 2: Von IVU-Umwelt gelieferte Emissionen für das RCG-Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 2 (Abbildung 3). Die Emissionsangaben „TNO-Daten“ geben die Emissionen an, die für Nest 2 in der großräumigen, für Nest 0 und Nest 1 verwendeten Emissionsdatenbasis ausgewiesen werden. Mit Kfz-induzierter Feinstaubaufwirbelung. Keine Eintragung bedeutet keine Information.

Kassel, Nest2, %	NO _x	NMVOC	CO	SO ₂	NH ₃	PM ₁₀
Verkehr ohne BAB	47.5	37.2	64.4	8.6	4.4	51.1
Verkehr auf BAB	24.9	7.0	23.0	3.7	1.4	26.1
Hausbrand	10.2	6.6	11.8	60.1	0.0	11.2
Privat		29.8				
Kleingewerbe		15.0				1.9
Industrie	6.2	4.4	0.9	27.7	0.0	9.6
Biogen/Landwirtschaft	11.3				94.2	
Summe	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabelle 3: Relative Aufteilung in % der von der IVU-Umwelt gelieferten Emissionen für das RCG-Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 2 (Abbildung 3). Keine Eintragung bedeutet keine Information.

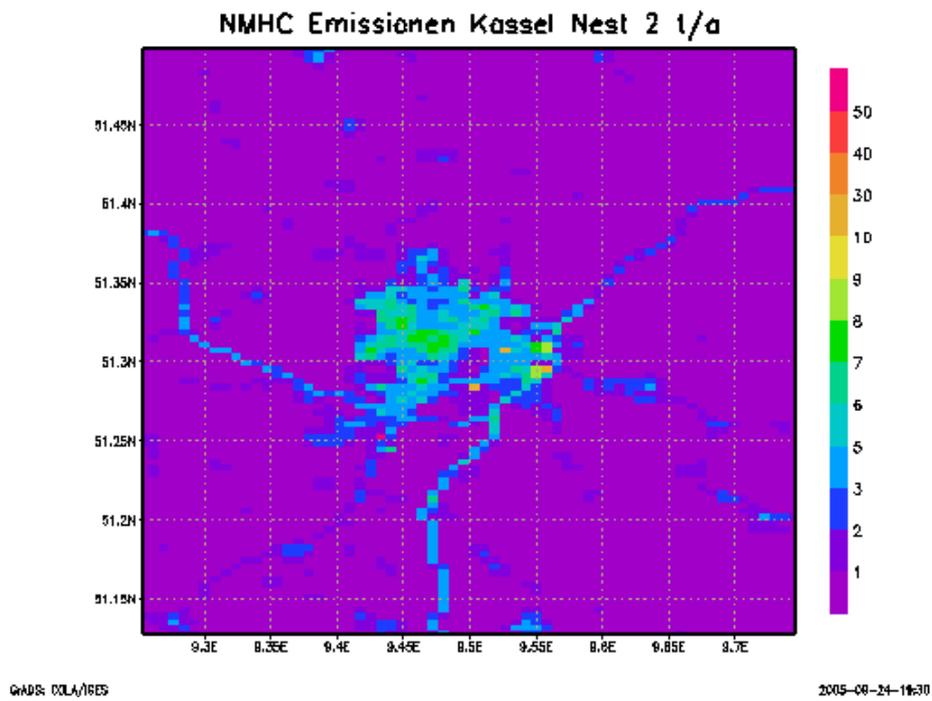


Abbildung 9: NMHC-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.

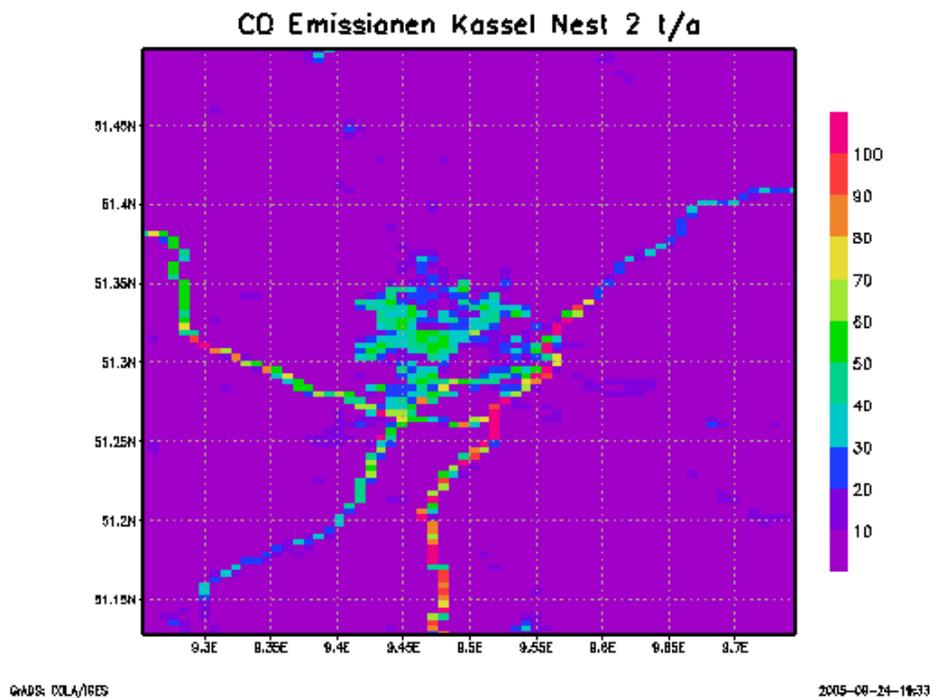


Abbildung 10: CO-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.

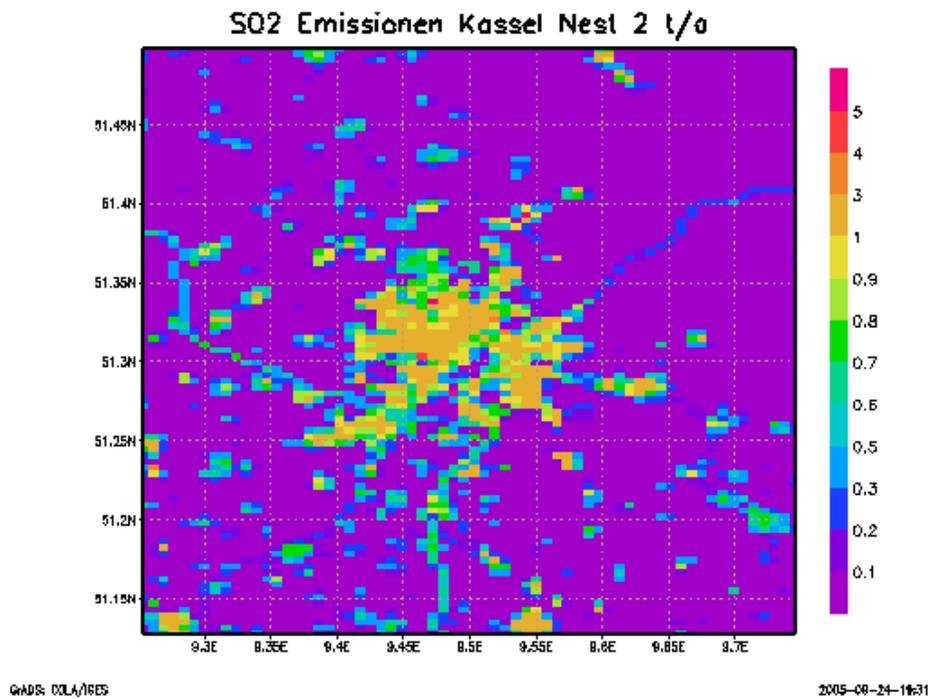


Abbildung 11: SO₂-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.

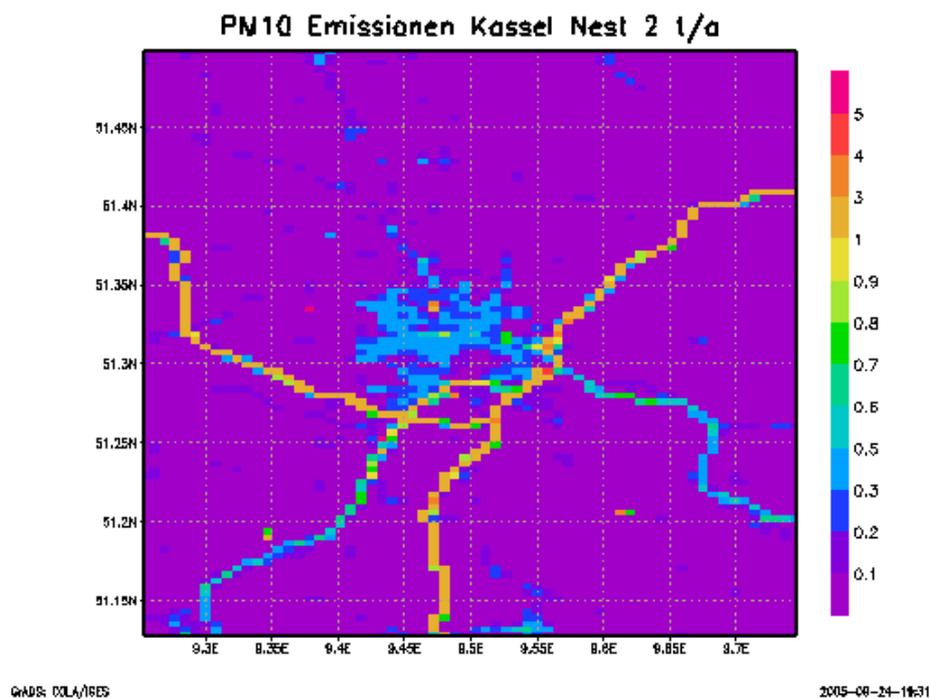


Abbildung 12: PM₁₀-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.

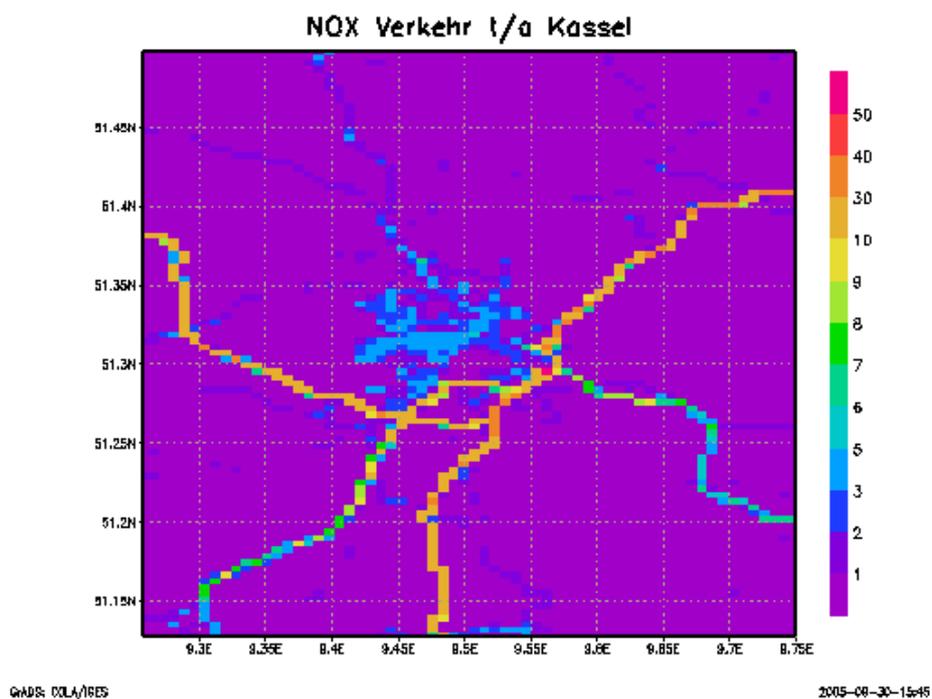


Abbildung 13: NOx-Emissionen des Verkehrs im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.

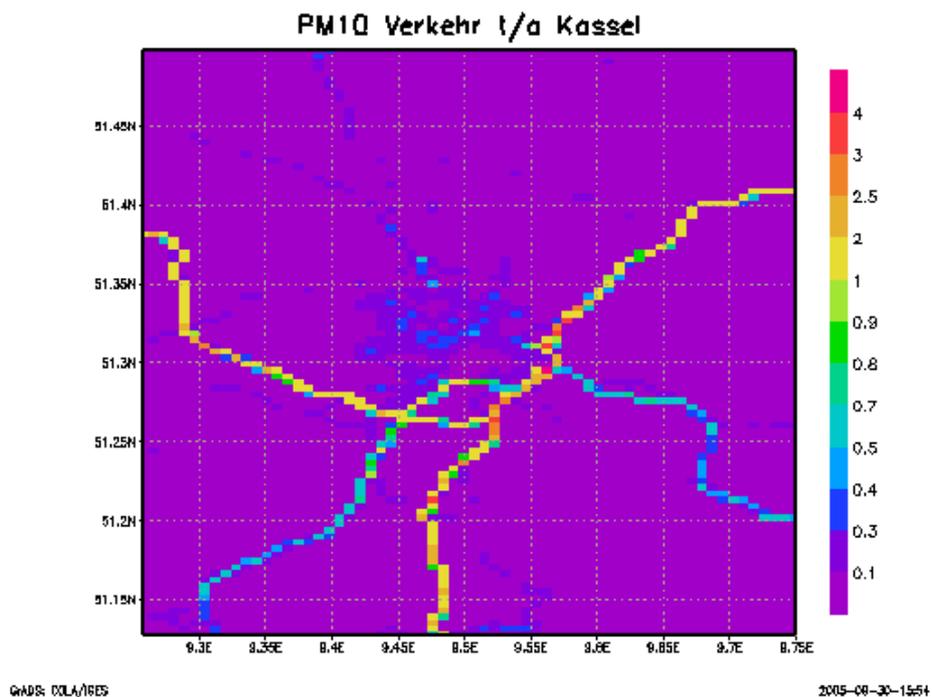


Abbildung 14: PM10-Emissionen des Verkehrs im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.

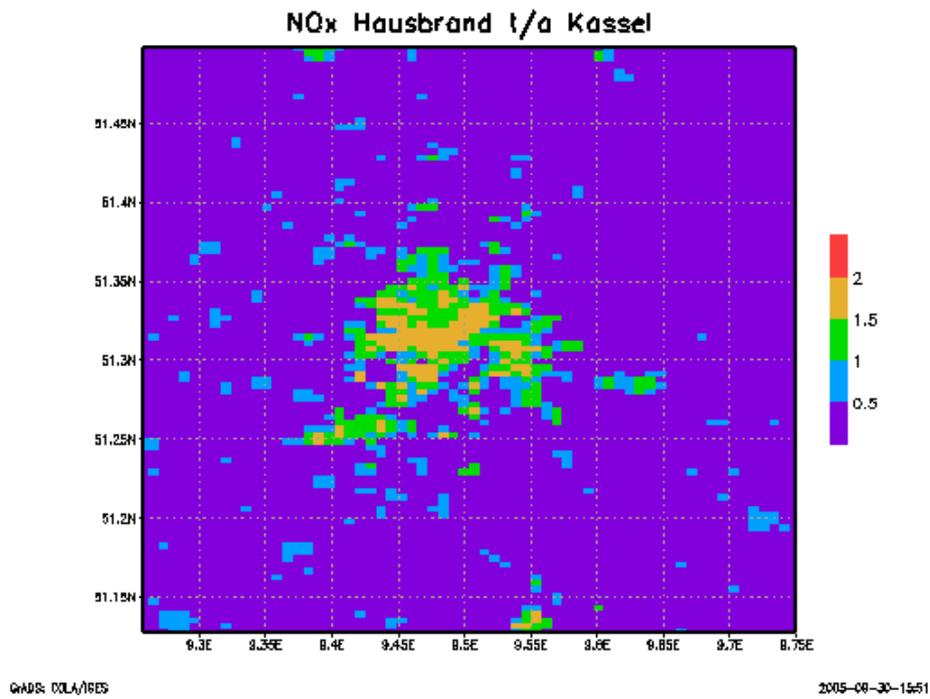


Abbildung 15: NO_x-Emissionen des Hausbrands im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.

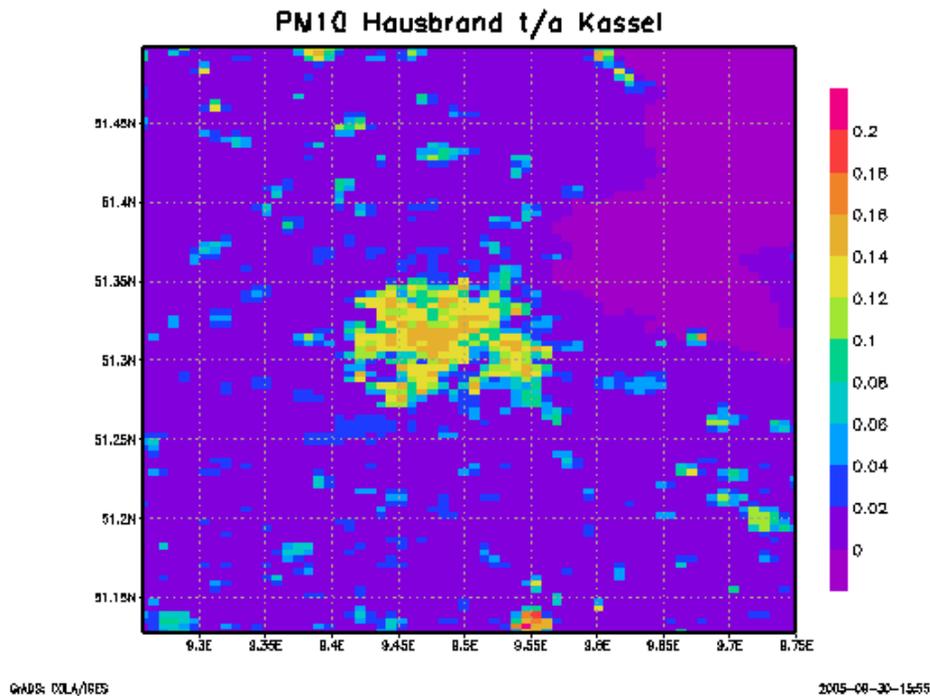


Abbildung 16: PM₁₀-Emissionen des Hausbrands im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.

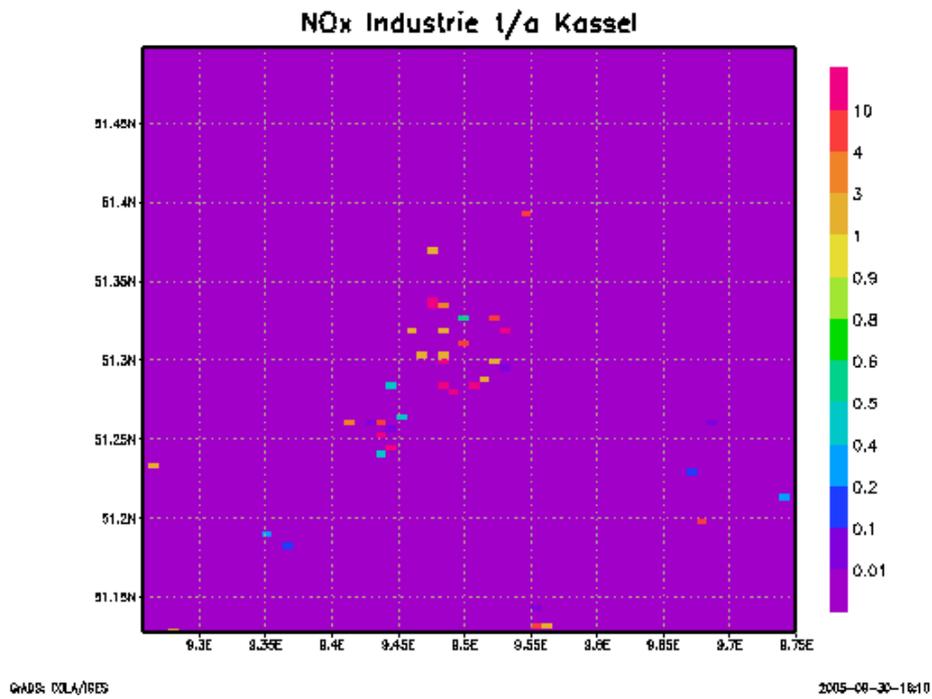


Abbildung 17: NO_x-Emissionen der Industrie im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.

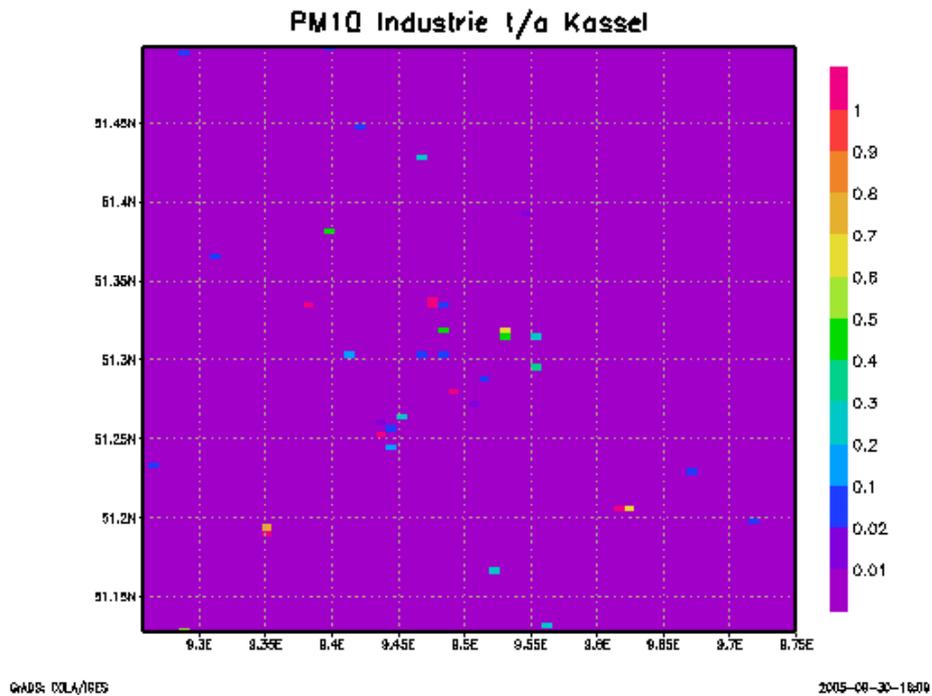


Abbildung 18: PM₁₀-Emissionen der Industrie im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.

NOx-Emissionen Kassel, Nest2, t/a	Lokale Erhebung	TNO-Erhebung
Verkehr	6246.173	5600.387
Sonstige mobile Quellen		967.575
Hausbrand u. Kleingewerbe	876.418	484.902
Industrie	531.465	351.570
Biogen/Landwirtschaft	979.872	
Summe	8633.928	7404.434

Tabelle 5: NOx-Emissionen für das Nest 2. Lokale Emissionserhebung Kassel und TNO-Emissionserhebung. Keine Eintragung bedeutet keine Information.

PM10-Emissionen Kassel, Nest2, t/a	Lokale Erhebung	TNO-Erhebung
Verkehr (ohne Aufwirbelung)	227.931	252.902
Aufwirbelung, Reifen-, Brems-Kuppelungsabrieb	227.931	252.902
Sonstige Quellen		138.275
Hausbrand u. Kleingewerbe	77.542	83.677
Industrie	56.807	303.382
Biogen/Landwirtschaft		66.496
Summe	590.211	1097.634

Tabelle 6: PM10-Emissionen für das Nest 2. Lokale Emissionserhebung Kassel und TNO-Emissionserhebung. Keine Eintragung bedeutet keine Information.

2.5.2 Szenarienemissionen

Im Nest 3 wurden folgende pauschalen Szenarien berechnet:

- Keine Emissionen (auch im Nest 2 gerechnet)
- Keine Emissionen der Verursachergruppe Straßenverkehr
- Keine Emissionen der Verursachergruppe Hausbrand

- Keine Emissionen der Verursachergruppe Industrie
- Keine Autobahn-Emissionen
- Kfz-Emissionen im Innenstadtbereich halbiert

Die sich für die Szenarien ergebenden Emissionsänderungen im Nest 3 zeigt die Tabelle 7.

%-Minderung im Nest 3	NOX	NMVOC	SO2	NH3	CO	PM10
Kein Verkehr*	-69.9	-46.4	-8.3	-17.3	-87.7	-43.0
Keine Industrie	-13.3	-8.5	-45.3	0.0	-1.7	-9.9
Kein Hausbrand	-15.0	-5.2	-46.4	0.0	-10.6	-8.7
Keine BAB-Emissionen*	-43.9	-9.8	-4.4	-6.0	-32.9	-26.7
Kfz-Verkehr Innenstadt halbiert*	-3.6	-5.9	-0.5	-1.5	-9.0	-2.0
Summe Basislauf t/a	3148	1937.5	730.9	133.3	12406.9	393.2

* Nicht-Auspuffemissionen einbezogen

Tabelle 7: Minderung der Emissionen in % im Nest 3 aufgrund der verschiedenen pauschalen Emissionsszenarien. Die prozentualen Änderungen beziehen sich auf die Gesamtsummen der Emissionen im Nest 3 (letzte Zeile). Beim PM10 beziehen sie sich auf die Gesamtsumme auf die Emissionen einschließlich der Ergänzung für Landwirtschaft und Sonstige Quellen.

Weiterhin wurde in allen Nestern ein Szenario-Lauf unter den angenommenen Emissionsbedingungen für 2010 durchgeführt. Grundlage der Emissionsabschätzung 2010 bildet das so genannte CLE-Szenario („Current legislation“), das die Umsetzung bereits heute festgeschriebener Maßnahmen für das Jahr 2010 betrachtet. Diese Angaben wurden für Deutschland zusätzlich pauschal auf die nationalen Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie (Amtsblatt der EU C375/1 vom 28.12. 2000) gesetzt, unter Beibehaltung der durch das CLE-Szenario vorgegebenen Emissionsstruktur. In Tabelle 8 sind für Deutschland die Emissionen nach dem CLE-Szenario 2010 und die Emissionshöchstmengen nach der NEC-Richtlinie zusammengestellt. Außer für SO₂ werden die Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie im CLE-Szenario 2010 überschritten. Für PM10 und CO existiert kein Emissionshöchstwert. Die Tabelle 9 zeigt die sich aus dem CLE-Szenario für Deutschland ergebenden Emissionsänderungen in den sog. SNAP-Verursachergruppen. Die Übertragung der CLE/NEC-Änderung auf die Emissionen im Kasseler Raum führt zu den in Tabelle 9 zusammengestellten Emissionsänderungen.

Emissionen kt/Jahr Deutschland	NEC-Richtlinie	CLE 2010	NEC/CLE
SO ₂	520	450	1,156
NO _x	1051	1182	0,888
VOC	995	1056	0,943
NH ₃	550	624	0,881
PM ₁₀	-	624	-
CO	-		-

Tabelle 8: Emissionen in Deutschland nach dem CLE-Szenario 2010 und Emissionshöchstmengen entsprechend der NEC-Richtlinie.

Änderung 2000-2010 %	NOX	NMVOC	SOX	NH3	CO	PM25	PM10
Energy transformation	-24.2	-0.8	-19.2		54.7	-11.2	-11.8
Small combustion sources	-1.8	10.0	-51.4		53.2	7.1	2.6
Industrial combustion	-17.7	-16.7	-36.4		-87.5	-6.6	-10.1
Industrial process emissions	-5.9	-8.4	-22.1	-1.8	-16.5	-12.1	-10.3
Extraction of fossil fuels		-45.5				-12.5	-7.8
Solvent and product use		-24.1					
Road transport: Gasoline	-36.2	-56.2	-70.8	-65.9	-30.5	-42.4	-42.4
Road Transport: Diesel	-36.2	-56.2	-70.8	-64.3	-30.5	-43.2	-43.2
Brake and tyrewear						-41.9	9.2
Volatilisation losses		-56.2					
Non road transport	-27.4	-27.3	-77.4		229.3	-32.2	-32.0
Waste handling and disposal						-0.8	-0.8
Agriculture				0.0		4.4	5.3
SUM OVER ALL SECTORS	-28.6	-30.6	-29.9	-2.3	-11.0	-20.3	-14.3

Tabelle 9: Änderung der deutschen Emissionen 2000 nach 2010 (CLE-Szenario) in %, bezogen auf 2000, aufgeschlüsselt nach den SNAP-Verursachergruppen.

Kassel, Nest2, %-Änderung CLE/NEC	NOx	NMVOC	CO	SO2	NH3	PM10
Verkehr ohne BAB	-43.0	-59.0	-30.0	-71.0	-70.0	-21.0
Verkehr auf BAB	-43.0	-59.0	-30.0	-71.0	-70.0	-21.0
Hausbrand	-13.0	4.0	53.0	-51.0		3.0
Privat		-28.0				
Kleingewerbe		4.0				3.0
Sonstige Quellen						-32.0
Industrie	-21.5	-17.0	-52.0	-32.0		-10.0
Biogen/Landwirtschaft	0.0				0.0	5.0
Summe	-33.8	-34.9	-20.4	-48.2	-4.1	-19.7

Tabelle 10: Änderung (%) der Emissionen in Kassel vom Ist-Zustand nach 2010 (CLE-Szenario, korrigiert mit NEC-Emissionshöchstmenge), bezogen auf den Ist-Zustand. Beim Verkehr wurden die Nicht-Auspuffemissionen entsprechend den Ansätzen des CLE-Szenarios nicht gemindert. Bei der Industrie wurde das Mittel der Minderung aus den SNAP-Verursachergruppen „Industrial combustion“ und „Industrial process emissions“ angesetzt, da eine Unterscheidung in diese Gruppen nicht möglich ist.

3 Ergebnisse der Basisläufe 2004

3.1 Überblick

Die Ausbreitungsrechnungen für das Untersuchungsgebiet Kassel wurden in 4 Stufen durchgeführt:

- Rechnung für Europa (Nest 0, siehe Abbildung 1) zur Bestimmung des europäischen Hintergrunds,
- Rechnung für Deutschland zur Bestimmung des überregionalen Hintergrunds (Nest 1, siehe Abbildung 2)
- Rechnung für den Großraum Kassel und Umgebung zur Bestimmung des Hintergrunds für die Stadtrechnungen (Nest 2, siehe Abbildung 3)
- Rechnung für die Stadt Kassel zur Bestimmung des städtischen Hintergrunds für die Straßenschluchtrechnungen (Nest 3, siehe Abbildung 3)

Alle Läufe wurden für das gesamte Jahr 2003 in stündlicher Auflösung durchgeführt. Die in den folgenden Kapiteln präsentierte Auswertung konzentriert sich auf PM10 und NO₂. Der Vergleich mit Messungen erfolgt für Stationen im kleinräumigen Untersuchungsgebiet. Die Straßenvorbelastungsdaten in stündlicher Auflösung sowie die meteorologischen Daten von Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung für die 25 mit dem CPB-Modell zu simulierenden Straßen wurden aus der Rechnung im Nest 3 abgeleitet. Die Lage der 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel zeigt die Abbildung 19 .

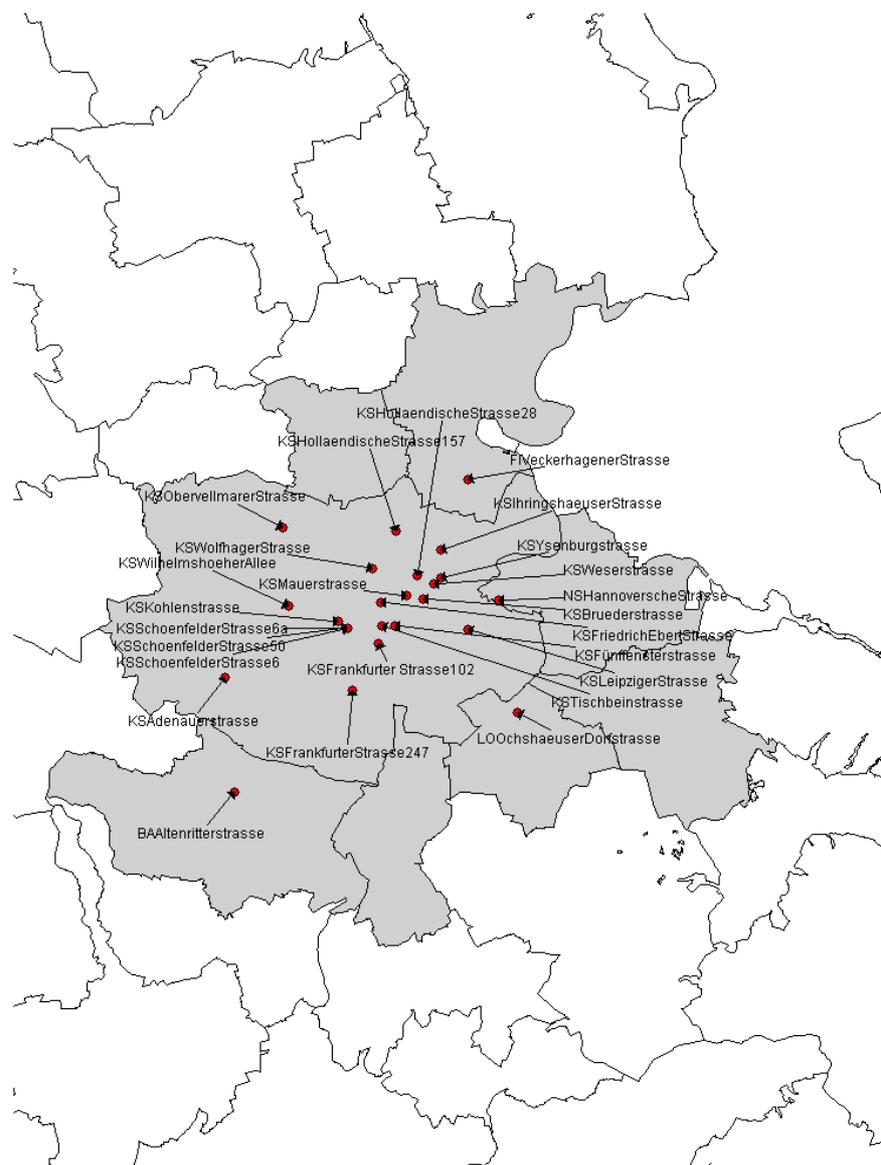


Abbildung 19: Lage von 25 Straßen, für die die Überdach-Konzentrationszeitreihen aus den Ergebnissen der Rechnungen im Nest 3 bereitgestellt werden.

3.2 Flächendarstellungen

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die berechnete Verteilung der PM₁₀- und NO₂-Jahresmittelwerte in der deutschlandweiten Skala sowie in dem das Stadtgebiet von Kassel überdeckenden Nest 3. Nest 2 wird nicht dargestellt, da dieses Nest lediglich als Zwischennest dient, um den Sprung von der deutschlandweiten Maschenweite zur städtischen Maschenweite nicht zu groß werden zu lassen.

In Deutschland werden die maximalen NO₂-Werte im Ruhrgebiet im Raum Duisburg und Dortmund berechnet (Abbildung 20). In diesen beiden Regionen werden in einzelnen Boxen des Modellgebiets Werte über dem Langzeitgrenzwert von 40 µg/m³ berechnet. Alle größeren Ballungsräume zeichnen sich durch gegenüber der Umgebung erhöhte NO₂-Konzentrationen aus. Im Raum Kassel werden in der deutschlandweiten Auflösung von circa 15x15 km² NO₂-Werte von knapp unter 25 µg/m³ berechnet. Die deutschlandweite PM10-Verteilung (Abbildung 21) ähnelt der NO₂-Verteilung, die Gradienten zwischen den höher belasteten Ballungsräumen und der Umgebung sind aber deutlich geringer als beim NO₂. Im Kasseler Raum liegen die berechneten PM10-Jahresmittelwerte bei circa 22 µg/m³.

Die berechneten Jahresmittelwerte von NO₂ und PM10 im Nest 3 zeigen Abbildung 22 und Abbildung 23. In Abbildung 24 und sind nochmals die NO₂- und PM10-Emissionen in diesem Nest zusammengestellt. Hohe NO₂-Immissionen werden hauptsächlich im Bereich der Hauptverkehrsachsen berechnet. Die hohen Emissionen im Bereich der Verkehrsknotenpunkte Kasseler Kreuz, Kassel, Kassel-Nord und Baunatal-Nord zeichnen sich deutlich in der Konzentrationsverteilung ab. In der Kasseler Innenstadt liegen die berechneten NO₂-Jahresmittelwerte zwischen 28 und 32 µg/m³. In der PM10-Verteilung heben sich die Hauptverkehrsachsen weniger deutlich ab, da ein großer Teil des PM10 aus sekundären Aerosolen besteht, die nicht aus den lokalen Emissionen gebildet werden, sondern über große Entfernung in den Raum Kassel transportiert werden. Dementsprechend ist auch der Gradient zwischen den Konzentrationen außerhalb des eigentlichen Stadtgebiets und den Konzentrationen im Stadtgebiet bzw. im Einflussbereich der Hauptverkehrsachsen beim PM10 schwächer als beim NO₂. In der Kasseler Innenstadt liegen die berechneten PM10-Jahresmittelwerte bei 30 bis 32 µg/m³, in den Randgebieten des Nestes 3 bei 27 bis 28 µg/m³. Die in Abbildung 23 gezeigten PM10-Jahresmittelwerte wurden auf Basis der oberen Emissionsabschätzung für PM10 berechnet. Diese Abschätzung beinhaltet die PM10-Emissionen der Landwirtschaft und der sonstigen Quellen, die nach den Angaben in der großräumigen Emissionsdatenbasis ergänzt wurden (siehe Kap. 2.5.1). Die ausschließlich auf der Basis der von der IVU-Umwelt gelieferten Emissionsdaten berechneten PM10-Jahresmittelwerte zeigt die Abbildung 26. Die PM10-Jahresmittelwerte ohne die geschätzten Emissionen der Landwirtschaft und der sonstigen Quellen liegen im Schnitt um 2 bis 2,5 µg/m³ unter denjenigen der Berechnung mit der PM10-Abschätzung für diese Quellen.

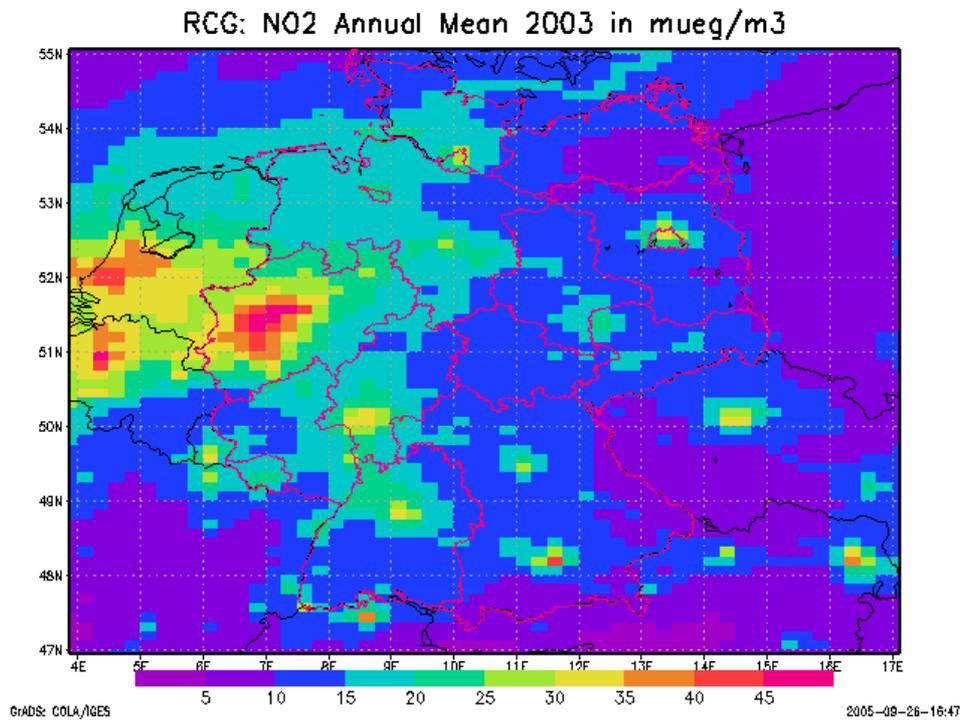


Abbildung 20: Berechneter NO₂-Jahresmittelwert 2003 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Nest 1 in einer Auflösung von 0.25° Länge und 0.125° Breite.

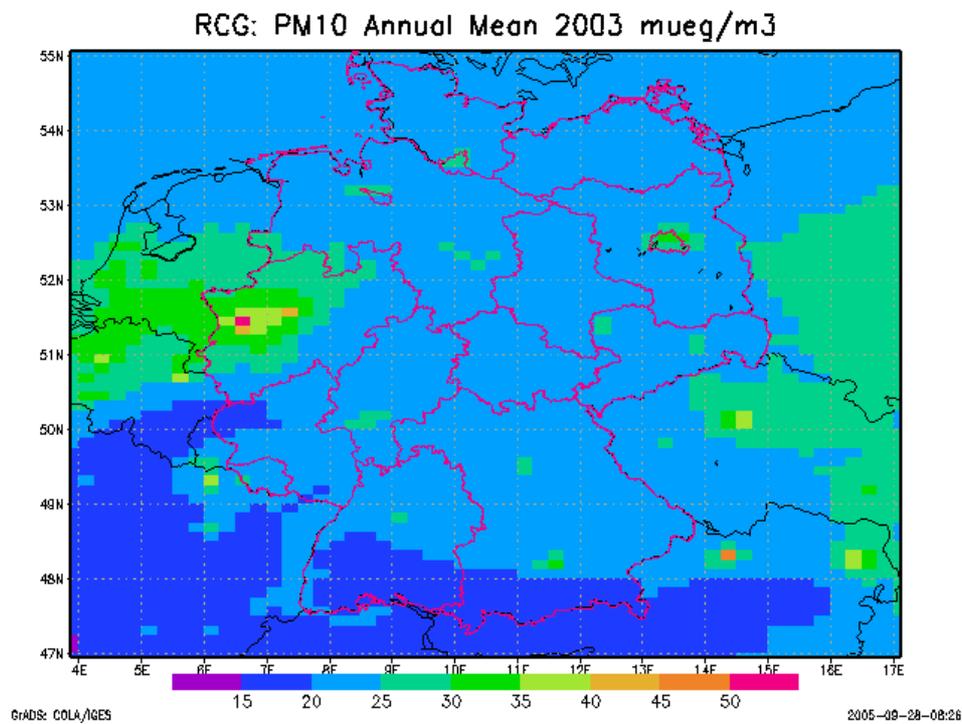


Abbildung 21: Berechneter PM₁₀-Jahresmittelwert 2003 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Nest 1 in einer Auflösung von 0.25° Länge und 0.125° Breite.

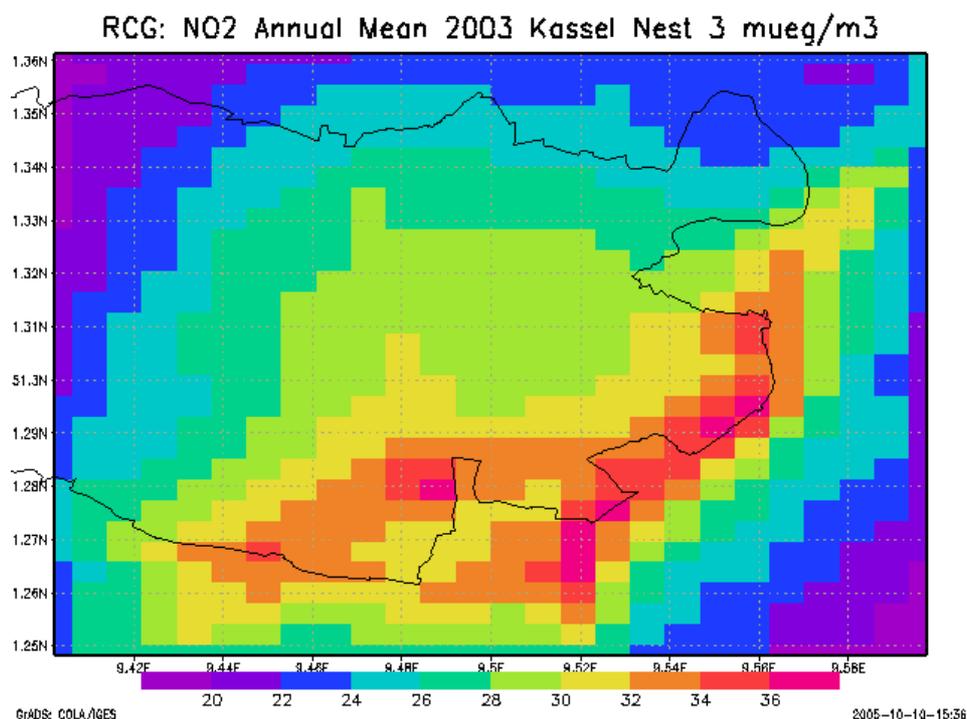


Abbildung 22: Berechnete NO₂-Jahresmittelwerte 2003 in µg/m³ im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3 mit den Grenzen der Stadt Kassel.

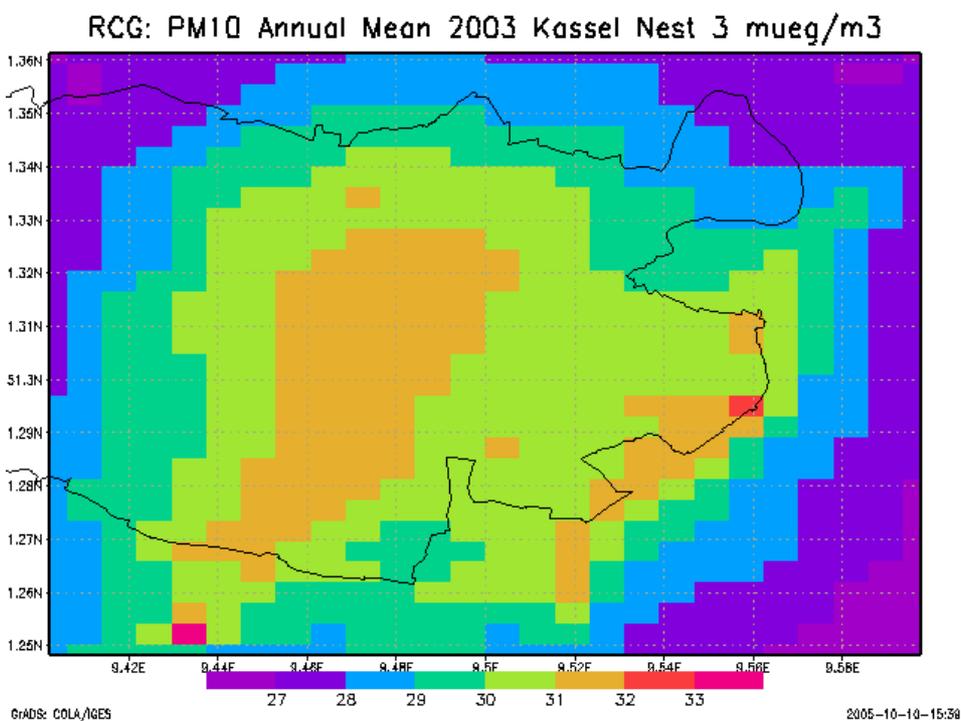


Abbildung 23: Berechnete PM₁₀-Jahresmittelwerte 2003 in µg/m³ im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3 mit den Grenzen der Stadt Kassel. PM₁₀-Emissionen mit Landwirtschaft und sonstige Quellen.

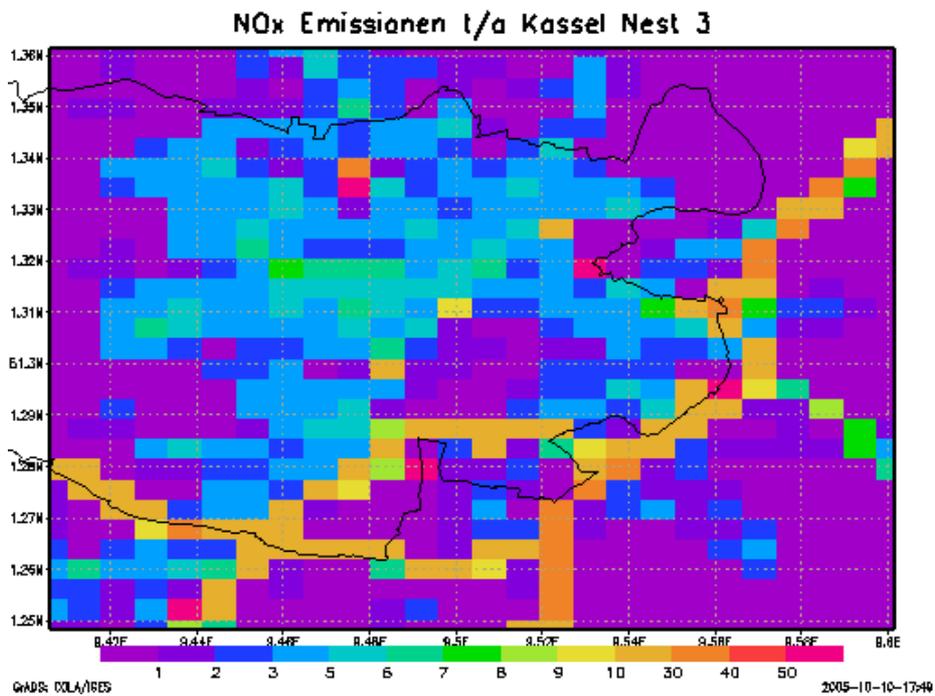


Abbildung 24: NO_x-Emissionen in Kassel, Nest 3 mit den Grenzen der Stadt Kassel.

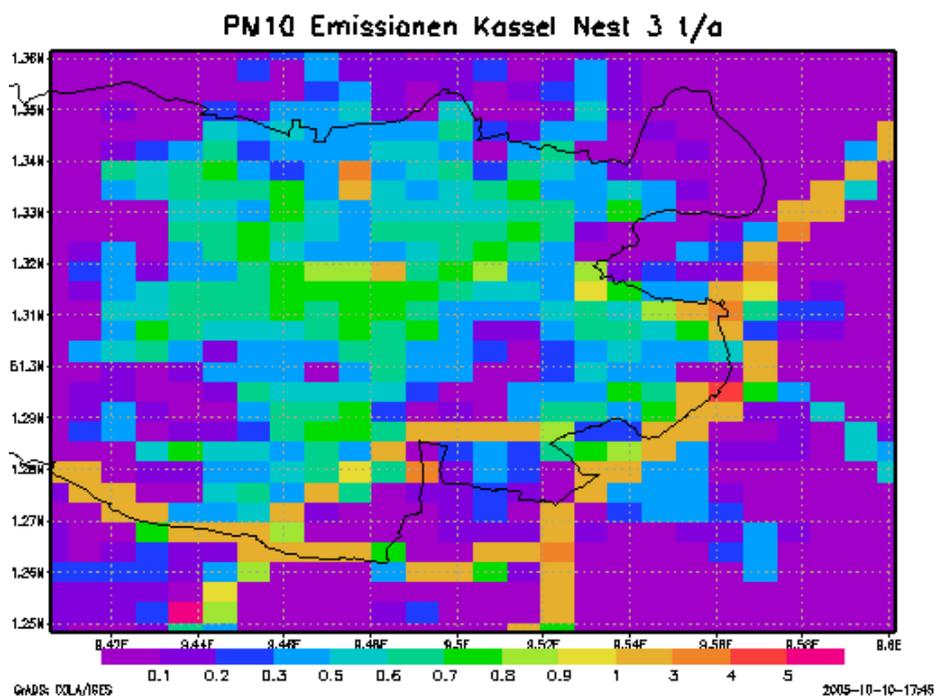


Abbildung 25: PM₁₀-Emissionen in Kassel, Nest 3 mit den Grenzen der Stadt Kassel. Emissionsabschätzung unter Einbezug der Landwirtschaft und den sonstigen Quellen (siehe Kap. 2.5.1).

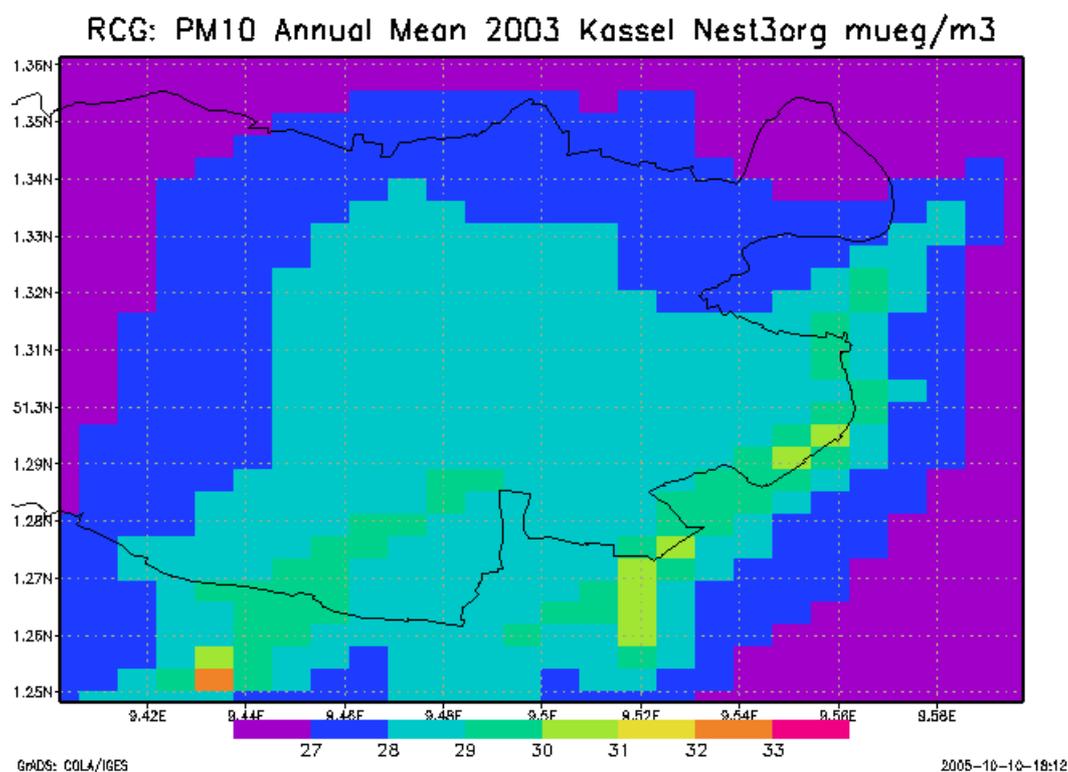


Abbildung 26: Berechnete PM10-Jahresmittelwerte 2003 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3 mit den Grenzen der Stadt Kassel. PM10-Emissionen ohne Landwirtschaft und sonstige Quellen.

3.3 Vergleich mit Messungen

Im Modellgebiet Nest 3 befinden sich 2 Messstellen des HLUG:

- Kassel, Fünffensterstrasse
- Kassel-Nord

Beide Stationen sind als verkehrsnah einzustufen, wobei die Station Fünffensterstraße in einer beidseitig bebauten Straße liegt, während die Station Kassel-Nord sich in einem offenen Industriegelände befindet. Für die Station Fünffensterstraße existieren RCG- und CPB-Berechnungen, für die Station Kassel-Nord nur RCG-Berechnungen. Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die beobachteten und die berechneten PM10-Tagesmittelwerte an diesen beiden Stationen. Für die Fünffensterstraße sind die RCG-Vorbelastung und die Gesamtbelastung in der Straße (RCG+CPB) angegeben. Im Allgemeinen wird das beobachtete PM10-Niveau bis auf einzelne Ausnahmen gut nachvollzogen. Im Februar und März 2003 kommt es aber über jeweils mehrere Tage zu sehr hohen beobachteten PM10-Tagesmittelwerten, die vom Modell nicht erfasst werden. In diesen Zeiten wurden im gesamten Norddeutschen Raum hohe PM10-Konzentrationen gemessen, deren Ursache wahrscheinlich in der zu dieser Zeit vorherrschenden windschwachen, austauscharmen Wetterlage mit östlichen Anströmungen liegt. Weiter im Norden werden diese hohen Messungen vom Modell besser reproduziert, was auf den Einfluss von Ferntransport hinweist. Möglicherweise reproduzieren die verwendeten großräu-

migen meteorologischen Windfelder im Kasseler Raum zu dieser Zeit nur bedingt die wahre Strömungsrichtung. In den beobachteten Zeitreihen von Kassel-Nord und Kassel-Fünffensterstraße gibt es zu den Perioden mit stark erhöhten PM10-Konzentrationen relativ große Unterschiede, obwohl die beiden Stationen nur wenige Kilometer auseinander liegen. Hier müssen lokale Einflüsse eine größere Rolle spielen. Stark überschätzt werden die Beobachtungen nur an einem Tag im Juli, an dem das Modell sehr viel höhere PM10-Tagesmittelwerte liefert als beobachtet wurden. Die Überschätzung hat seine Ursache in den berechneten Hintergrundkonzentrationen und nicht in dem berechneten urbanen Beitrag. Insbesondere die berechnete Konzentration der sekundären Aerosole ist an diesem Tage sehr hoch, was von den Messungen aber nicht bestätigt wird. Die Ursache dieser Abweichung kann im Rahmen dieses Projekts nicht näher analysiert werden. Der Abbildung 27 kann auch entnommen werden, dass der mit dem CPB-Modell berechnete Beitrag des Straßenabschnitts relativ gering ist. In Tabelle 11 sind die berechneten und beobachteten PM10-Kenngrößen für die Fünffensterstraße zusammengestellt. Die Ergänzung der PM10-Emissionen um den abgeschätzten Beitrag der Landwirtschaft und der sonstigen Quellen führt in der Fünffensterstraße und auch in Kassel-Nord zu einer Erhöhung des berechneten Jahresmittelwerts um $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Diesen Betrag kann man als Spannbreite der Immission resultierend aus der unteren und oberen Abschätzung der PM10-Emissionen interpretieren. Der mittlere Beitrag des CPB-Modells zur Gesamtbelastung beträgt $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Insgesamt werden die beobachteten Kenngrößen unterschätzt, selbst wenn man die hohe Abschätzung der PM10-Emissionen zugrunde legt (RCG-EM+CPB). Dies ist insbesondere bei den Überschreitungstagen auf die oben diskutierte Unterschätzung im Februar und März 2003 zurückzuführen. Auch im offenen Gelände in Kassel-Nord wird der beobachtete Jahresmittelwert ($36.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) unter Verwendung der hohen PM10-Emissionsabschätzung von der RCG-Berechnung im Nest 3 unterschätzt ($33.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

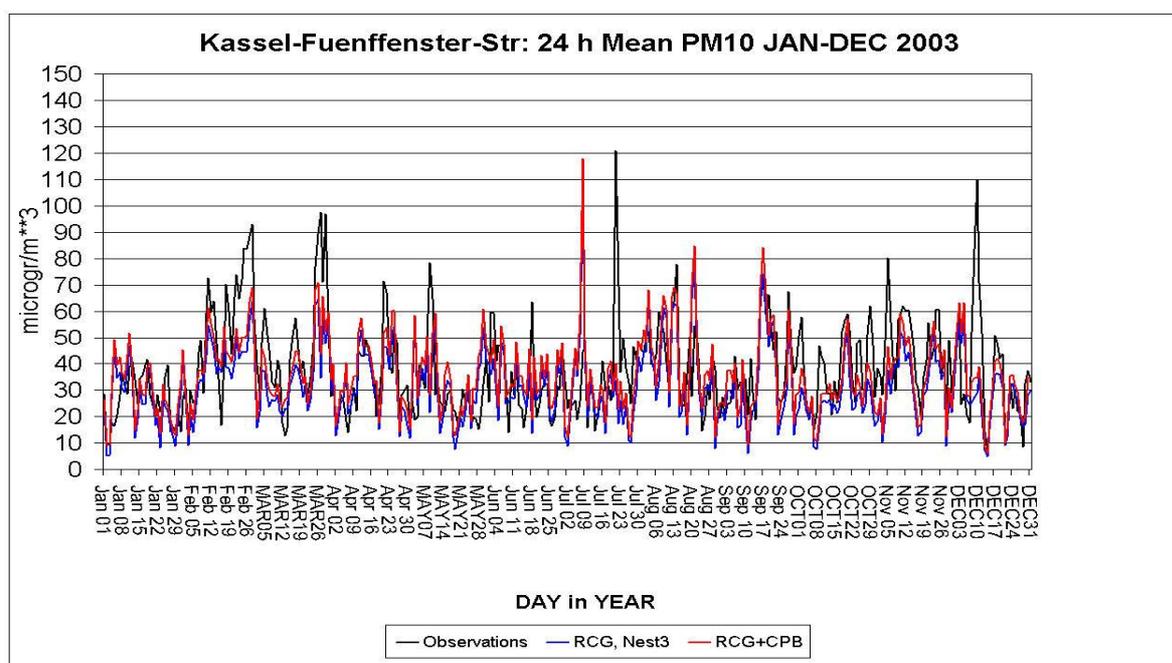


Abbildung 27: Berechnete und beobachtete PM10-Tagesmittelwerte Kassel, Fünffensterstraße. RCG: Straßenhintergrund. RCG+CPB: Gesamtbelastung in der Straße. Berechnung unter Verwendung der hohen PM10-Emissionsabschätzung (siehe Kap. 2.5.1).

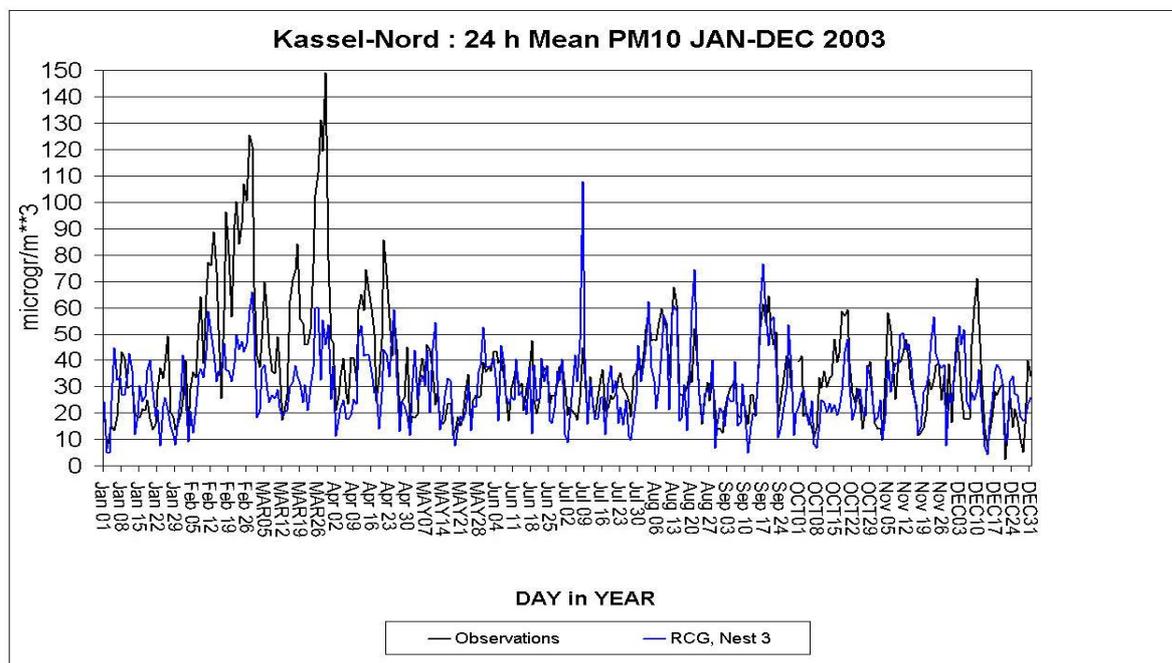


Abbildung 28: Berechnete und beobachtete PM10-Tagesmittelwerte Kassel-Nord. Nur RCG-Ergebnis im Nest 3. Berechnung unter Verwendung der hohen PM10-Emissionsabschätzung (siehe Kap. 2.5.1).

PM10-Fünffensterstr.	Jahresmittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anzahl der Überschreitungen $>50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ TM
RCG-EO	28.5	29
RCG-EM	31.4	38
RCG-EO+CPB	33.0	39
RCG-EM+CPB	35.9	55
Beobachtung	38.1	77

Tabelle 11: Berechneter und beobachteter PM10-Jahresmittelwert und Anzahl der Überschreitungen eines Tagesmittelwerts von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kassel, Fünffensterstr. RCG-EO: RCG-Rechnung mit den originalen PM10-Emissionen. RCG-EM: RCG-Rechnung mit den modifizierten (um Landwirtschaft und sonstige Quellen erhöhten) PM10-Emissionen (siehe Kap. 2.5.1). RCG+CPB: Berechnete Gesamtbelastung in der Straßenschlucht.

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen die beobachteten und die berechneten NO_2 -Tagesmittelwerte an den beiden im Nest 3 vorhandenen Messstationen. Für die Fünffensterstraße sind wieder die RCG-Vorbelastung und die Gesamtbelastung in der Straße (RCG+CPB) angegeben.

An beiden Stationen werden die beobachteten NO₂-Tagesmittelwerte insbesondere im Sommer unterschätzt. Die Unterschätzung kann ihre Ursache in subskaligen Prozessen haben, die selbst in einer Maschenweite von circa 500 m nicht entsprechend aufgelöst werden können. Dies betrifft zum einen den Beitrag der nahe an den Messstationen gelegenen Quellen aber auch die kleinräumige durch die mikrometeorologische Turbulenz hervorgerufene meteorologische Varianz, die mit den zur Erstellung der meteorologischen Inputdaten verwendeten Methoden kaum dargestellt werden kann, da die dazu benötigte lokale meteorologische Information nicht vorliegt. Beim NO₂ ist dieser lokale Einfluss dabei deutlich höher als beim PM₁₀, da der ferntransportierte NO₂-Anteil geringer ist. Insgesamt sind die beobachteten NO₂-Jahresmittelwerte relativ hoch (Kassel-Nord: 38.0 µg/m³; Fünffensterstraße: 47 µg/m³). Die Berechnung liefert für Kassel-Nord 26.3 µg/m³, für die Fünffensterstraße 38.4 µg/m³. Wie weit in dieser Berechnung eine eventuelle Unterschätzung der Emission eingeht, kann hier nicht beurteilt werden.

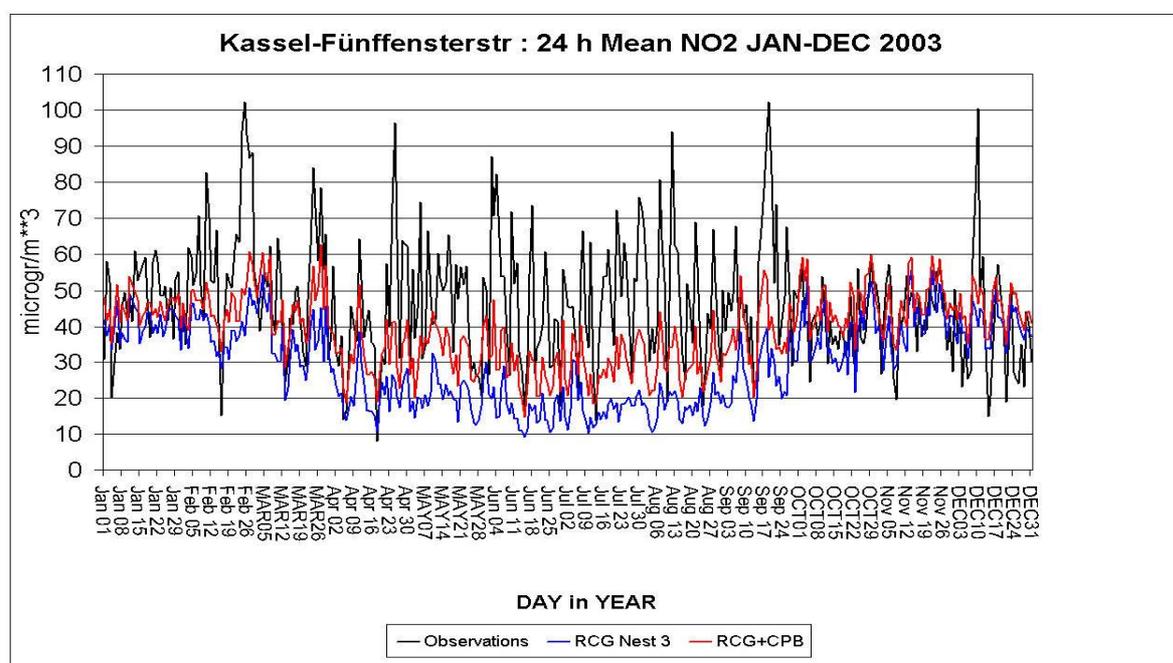


Abbildung 29: Berechnete und beobachtete NO₂-Tagesmittelwerte Kassel, Fünffensterstraße. RCG: Straßenvorbelastung, RCG+CPB: Gesamtbelastung in der Straße.

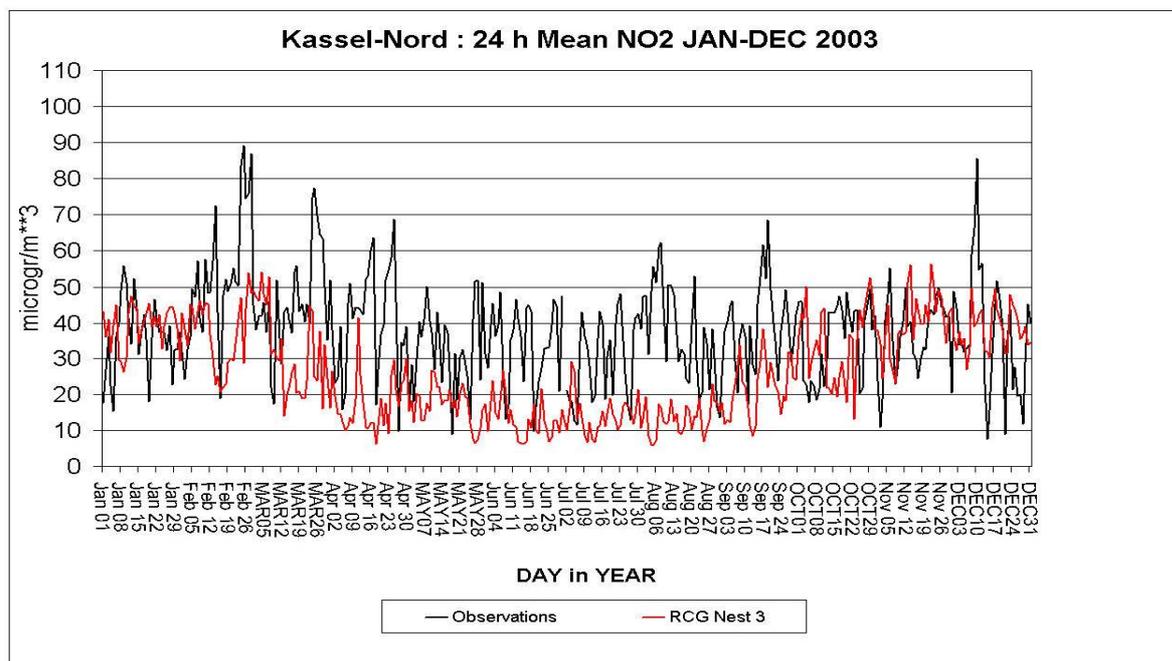


Abbildung 30: Berechnete und beobachtete NO₂-Tagesmittelwerte Kassel-Nord. RCG-Berechnung im Nest 3.

3.4 Herkunftsanalyse

In diesem Kapitel werden die berechneten Konzentrationen in den 25 ausgewählten Straßenräumen bezüglich ihrer Herkunft aufgeschlüsselt. Für PM₁₀ erfolgt zuerst eine Aufteilung in primäre und sekundäre Anteile, d.h. in den PM₁₀-Beitrag, der der direkten Emission entstammt und den Beitrag, der sich über komplexe chemisch/physikalische Prozesse aus den Vorläuferemissionen von NO_x, SO₂, VOC und NH₃ bildet. Danach werden für PM₁₀ und NO₂ die Beiträge in den 25 Straßen aufgeschlüsselt nach dem Hintergrund (Ferntransportanteil), Vorbelastung (hier nur Stadtanteil) und Zusatzbelastung (Straßenanteil) dargestellt. Unter Ferntransport werden alle Beiträge zusammengefasst, die aus den Emissionen außerhalb des Nestes 3 bzw. des Nestes 2 stammen. Der „Stadtanteil“ bezeichnet den Anteil der Immissionen, der sich aus den Emissionen im Nest 3 bzw. Nest 2 bildet. Der Straßenbeitrag ist der Anteil an PM₁₀ und NO₂, der sich aus den von der IVU-Umwelt durchgeführten CPB-Berechnungen ergibt. Der „Stadtanteil“ wird aus den RCG-Berechnungen unter Verwendung der hohen PM₁₀-Emissionsabschätzung ermittelt (siehe 2.5.1).

Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigen die absoluten und relativen Beiträge verschiedener PM₁₀-Komponenten zu der berechneten Gesamtbelastung in den 25 Straßenräumen. Den größten Beitrag zu der PM₁₀-Gesamtbelastung liefern die sekundären Aerosole, die zum überwiegenden Teil außerhalb des Stadtgebiets von Kassel gebildet werden und dann in die Stadt transportiert werden. Je nach Straßenraum stellen sie zwischen 40% und 62% der PM₁₀-Gesamtbelastung. Dieser Teil des PM₁₀ kann mit lokalen Maßnahmen kaum beeinflusst werden. Die direkt emittierten PM₁₀-Anteile (PPM₁₀) stellen den zweitgrößten Anteil an den Gesamtkonzentrationen. Der Beitrag der Staubaufwirbelung und insbesondere der Beitrag der Seesalzkomponenten sind deutlich niedriger.

Die Tabelle 14 und die Tabelle 15 zeigen die Aufschlüsselung der berechneten PM10-Konzentrationen in die oben definierten Anteile, jeweils absolut und relativ. Als Stadtanteil wird hier der Beitrag aller Emissionen im Nest 2 betrachtet. In Tabelle 16 und Tabelle 17 ist der Stadtanteil aus dem Beitrag der Emissionen des Nestes 3 definiert. Im ersten Fall ist der Stadtanteil größer, da mehr Emissionen zu ihm beitragen. Dementsprechend ist der Anteil des Hintergrunds geringer. Im Mittel stammen beim PM10 zwischen $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stadtanteil aus den Emissionen des Nestes 2) und $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stadtanteil aus den Emissionen des Nestes 3) aus dem Ferntransport. Der Vergleich mit Tabelle 12 zeigt, dass der Großteil des ferntransportierten PM10 aus sekundären Aerosolen besteht. Der Stadtbeitrag liegt zwischen $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stadtanteil aus den Emissionen des Nestes 2) und $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stadtanteil aus den Emissionen des Nestes 3). Beim NO_2 (Tabelle 18 bis Tabelle 21) liegt der Anteil des Ferntransports zwischen $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stadtanteil aus den Emissionen des Nestes 2) und $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stadtanteil aus den Emissionen des Nestes 3). Der NO_2 -Stadtbeitrag liegt zwischen $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stadtanteil aus den Emissionen des Nestes 2) und $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stadtanteil aus den Emissionen des Nestes 3). Im Schnitt stammen damit circa 2/3 der PM10-Gesamtbelastung in den ausgewählten Straßen aus Emissionsgebieten außerhalb des lokalen Einzugsbereichs von Kassel (definiert als Nest 2). Damit sind nur circa 1/3 der Belastung (städtische Vorbelastung und Straßenbeitrag) durch lokale Maßnahmen zu beeinflussen. Beim NO_2 ist es umgekehrt: circa 2/3 der Belastung sind lokalen Maßnahmen (innerhalb des Nestes 2) zugänglich und nur 1/3 der Belastung kann dem Ferntransport zugeschrieben werden.

Alle oben ausgeführten Abschätzungen beziehen sich auf Jahresmittelwerte. Daher soll hier noch weiterhin analysiert werden, wie sich die berechnete Anzahl der PM10-Überschreitungstage zusammensetzt. Diese Untersuchung wurde nur für die Fünffensterstraße durchgeführt. Abbildung 31 zeigt dazu die berechneten PM10-Tagesmittelwerte aus dem Beitrag des Hintergrunds (Ferntransport aus allen Emissionen außerhalb von Nest 2), der „Stadt“ (hier alle Emissionen im Nest 2) und der Straße (Zusatzbelastung nach der CPB-Berechnung). Es ist offensichtlich, dass die Emissionen im Nest 2 und die Emissionen in der Straße jeweils für sich alleine zu keinen Überschreitungen des Kurzzeitgrenzwerts von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ führen. Der Beitrag des Ferntransports übersteigt aber schon an 10 Tagen diesen Grenzwert. Addiert man die Beiträge des Hintergrunds und die Beiträge aus Nest 2, dann ergeben sich bereits 33 Überschreitungstage (Abbildung 32 oben). Die Addition des Straßenbeitrags ergibt dann 55 Überschreitungstage (Abbildung 32 unten). Der berechnete Beitrag der Straßenemissionen zum Jahresmittelwert liegt bei circa 12% (Tabelle 12), der Beitrag zu den Überschreitungstagen aber bei 40%. Dieser sehr viel höhere berechnete Beitrag zu den Überschreitungstagen hat seine Ursache in der Definition dieser Kenngröße.

Das Beispiel zeigt, dass auch eine relativ geringe Zusatzbelastung zu einer Grenzwertverletzung führen kann, falls die Vorbelastung (Hintergrund+Stadtbeitrag) schon hoch sind. Auf der anderen Seite kann dadurch natürlich eine lokale Maßnahme auch dazu beitragen, die Anzahl der Überschreitungstage deutlich zu senken, selbst dann wenn der Beitrag des Ferntransports zu den PM10-Belastungen die größte Einzelkomponente stellt.

	RCG	RCG	RCG	RCG	CPB	
$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert)	SAER	PPM10	NACL	WBDU	PPM10	Summe PM10
KS-Adenauerstrasse	19.4	7	0.7	1.4	2.5	31.0
BA-Altenritterstrasse	19.7	7.3	0.7	1.4	2.8	31.9
KS-Bruederstrasse	19.9	8.9	0.7	1.6	5.6	36.7
KS-FriedrichEbertStrasse	20	9.2	0.8	1.7	4.6	36.3
KS-FrankfurterStrasse247	20	9.1	0.7	1.7	5.1	36.6
KS-FrankfurterStrasse102	20	9.1	0.7	1.7	6.6	38.1
KS-Fünffensterstrasse	20	8.8	0.7	1.7	4.5	35.7
KS-HollaendischeStrasse157	19.7	8.3	0.7	1.5	10.5	40.7
KS-HollaendischeStrasse28	19.9	8.9	0.7	1.6	16.0	47.1
KS-IhringshaeuserStrasse	19.8	8.6	0.7	1.5	6.2	36.8
FI-VeckerhagenerStrasse	19.5	7.1	0.7	1.4	3.9	32.6
KS-Kohlenstrasse	19.9	9.1	0.7	1.7	9.6	41.0
KS-LeipzigerStrasse	19.9	8.6	0.7	1.6	6.8	37.6
KS-Mauerstrasse	19.9	9.1	0.7	1.7	2.6	34.0
KS-ObervellmarerStrasse	19.5	7.8	0.7	1.6	10.2	39.8
LO-OchshaeuserDorfstrasse	19.8	8.4	0.7	1.3	2.1	32.3
NS-HannoverscheStrasse	19.7	8.2	0.7	1.5	3.0	33.1
KS-SchoenfelderStrasse50	20	9.2	0.8	1.7	10.1	41.8
KS-SchoenfelderStrasse6	20	9.2	0.7	1.7	4.7	36.3
KS-SchoenfelderStrasse6a	20	9.2	0.7	1.7	6.0	37.6
KS-Tischbeinstrasse	20	9.1	0.7	1.7	4.6	36.1
KS-Weserstrasse	19.8	8.6	0.7	1.6	18.1	48.8
KS-WilhelmshoehrerAllee	19.7	8.5	0.7	1.6	3.0	33.5
KS-WolfhagerStrasse	19.9	8.8	0.7	1.7	8.7	39.8
KS-Ysenburgstrasse	19.8	8.6	0.7	1.6	8.2	38.9
Mittel	19.8	8.6	0.7	1.6	6.6	37.4

Tabelle 12: Absolute Beiträge der einzelnen PM10-Komponenten in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zu der Gesamtbelastung in den 25 Straßenräumen. Mit RCG gekennzeichnet sind alle Komponenten, die mit dem RCG-Modell berechnet wurden: SAER= Summe der sekundären Aerosole, PPM10= Summe der anthropogenen primär emittierten Aerosole, NACL= Seesalzkomponenten; WBDU= Summe des Bodenstaubs aus unbebauten Böden. CPB PPM10: Mit dem CPB-Modell berechnete primäre PM10-Zusatzbelastung.

	RCG	RCG	RCG	RCG	CPB	
%	SAER	PPM10	NACL	WBDU	PPM10	Summe PM10
KS-Adenauerstrasse	62.6	22.6	2.3	4.5	8.0	100.0
BA-Altenritterstrasse	61.9	22.9	2.2	4.4	8.6	100.0
KS-Bruederstrasse	54.2	24.3	1.9	4.4	15.3	100.0
KS-FriedrichEbertStrasse	55.1	25.3	2.2	4.7	12.7	100.0
KS-FrankfurterStrasse247	54.6	24.8	1.9	4.6	14.0	100.0
KS-FrankfurterStrasse102	52.5	23.9	1.8	4.5	17.4	100.0
KS-Fünffensterstrasse	56.0	24.6	2.0	4.8	12.7	100.0
KS-HollaendischeStrasse157	48.4	20.4	1.7	3.7	25.8	100.0
KS-HollaendischeStrasse28	42.3	18.9	1.5	3.4	34.0	100.0
KS-IhringshaeuserStrasse	53.9	23.4	1.9	4.1	16.8	100.0
FI-VeckerhagenerStrasse	59.7	21.8	2.1	4.3	12.1	100.0
KS-Kohlenstrasse	48.5	22.2	1.7	4.1	23.4	100.0
KS-LeipzigerStrasse	53.0	22.9	1.9	4.3	18.0	100.0
KS-Mauerstrasse	58.6	26.8	2.1	5.0	7.5	100.0
KS-ObervellmarerStrasse	49.1	19.6	1.8	4.0	25.5	100.0
LO-OchshaeuserDorfstrasse	61.3	26.0	2.2	4.0	6.5	100.0
NS-HannoverscheStrasse	59.5	24.8	2.1	4.5	9.1	100.0
KS-SchoenfelderStrasse50	47.9	22.0	1.9	4.1	24.1	100.0
KS-SchoenfelderStrasse6	55.2	25.4	1.9	4.7	12.8	100.0
KS-SchoenfelderStrasse6a	53.2	24.5	1.9	4.5	15.9	100.0
KS-Tischbeinstrasse	55.3	25.2	1.9	4.7	12.8	100.0
KS-Weserstrasse	40.6	17.6	1.4	3.3	37.1	100.0
KS-WilhelmshoeherAllee	58.8	25.4	2.1	4.8	8.9	100.0
KS-WolfhagerStrasse	50.0	22.1	1.8	4.3	21.8	100.0
KS-Ysenburgstrasse	50.8	22.1	1.8	4.1	21.2	100.0
Mittel	53.7	23.2	1.9	4.3	16.9	100.0

Tabelle 13: Relative Beiträge der einzelnen PM10-Komponenten in % zu der Gesamtbelastung in den 25 Straßenräumen. Mit RCG gekennzeichnet sind alle Komponenten, die mit dem RCG-Modell berechnet wurden: SAER= Summe der sekundären Aerosole, PPM10= Summe der anthropogenen primär emittierten Aerosole, NACL=Seesalzkomponenten; WBDU=Summe des Bodenstaubs aus nicht bebauten Böden. CPB PPM10: Mit dem CPB-Modell berechnete primäre PM10-Beiträge.

PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert)	Hintergrund	Beitrag Stadt =Nest 2	Zusatzbelastung Straße	Gesamtbelastung
KS-Adenauerstrasse	24.2	4.3	2.5	31.0
BA-Altenritterstrasse	24.0	5.2	2.8	32.0
KS-Bruederstrasse	24.1	7.0	5.6	36.7
KS-FriedrichEbertStrasse	24.3	7.3	4.6	36.2
KS-FrankfurterStrasse247	24.3	7.3	5.1	36.7
KS-FrankfurterStrasse102	24.3	7.3	6.6	38.2
KS-Fünffensterstrasse	24.3	6.9	4.5	35.7
KS-HollaendischeStrasse157	24.2	6.1	10.5	40.8
KS-HollaendischeStrasse28	24.1	7.0	16.0	47.1
KS-IhringshaeuserStrasse	24.0	6.6	6.2	36.8
FI-VeckerhagenerStrasse	23.9	4.8	3.9	32.6
KS-Kohlenstrasse	24.3	7.2	9.6	41.1
KS-LeipzigerStrasse	24.2	6.5	6.8	37.5
KS-Mauerstrasse	24.3	7.1	2.6	34.0
KS-ObervellmarerStrasse	24.2	5.5	10.2	39.9
LO-OchshaeuserDorfstrasse	24.0	6.3	2.1	32.4
NS-HannoverscheStrasse	24.0	6.2	3.0	33.2
KS-SchoenfelderStrasse50	24.3	7.4	10.1	41.8
KS-SchoenfelderStrasse6	24.3	7.4	4.7	36.4
KS-SchoenfelderStrasse6a	24.3	7.4	6.0	37.7
KS-Tischbeinstrasse	24.3	7.3	4.6	36.2
KS-Weserstrasse	24.1	6.7	18.1	48.9
KS-WilhelmshoeherAllee	24.3	6.3	3.0	33.6
KS-WolfhagerStrasse	24.3	6.8	8.7	39.8
KS-Ysenburgstrasse	24.1	6.7	8.2	39.0
Mittel	24.2	6.6	6.6	37.4

Tabelle 14: Absolute Aufteilung der PM10-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 2, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 2.

PM10 %	Hintergrund	Beitrag Stadt =Nest 2	Zusatzbelastung Straße	Gesamtbelastung
KS-Adenauerstrasse	78.1	13.9	8.0	100.0
BA-Altenritterstrasse	75.1	16.3	8.6	100.0
KS-Bruederstrasse	65.7	19.1	15.3	100.0
KS-FriedrichEbertStrasse	67.1	20.1	12.8	100.0
KS-FrankfurterStrasse247	66.2	19.9	14.0	100.0
KS-FrankfurterStrasse102	63.6	19.1	17.3	100.0
KS-Fünffensterstrasse	68.0	19.3	12.7	100.0
KS-HollaendischeStrasse157	59.3	14.9	25.8	100.0
KS-HollaendischeStrasse28	51.2	14.9	34.0	100.0
KS-IhringshaeuserStrasse	65.3	18.0	16.8	100.0
FI-VeckerhagenerStrasse	73.2	14.7	12.1	100.0
KS-Kohlenstrasse	59.1	17.5	23.4	100.0
KS-LeipzigerStrasse	64.6	17.4	18.0	100.0
KS-Mauerstrasse	71.6	20.9	7.5	100.0
KS-ObervellmarerStrasse	60.7	13.8	25.5	100.0
LO-OchshaeuserDorfstrasse	74.1	19.5	6.5	100.0
NS-HannoverscheStrasse	72.2	18.7	9.1	100.0
KS-SchoenfelderStrasse50	58.2	17.7	24.1	100.0
KS-SchoenfelderStrasse6	66.9	20.4	12.8	100.0
KS-SchoenfelderStrasse6a	64.5	19.6	15.9	100.0
KS-Tischbeinstrasse	67.1	20.1	12.8	100.0
KS-Weserstrasse	49.3	13.7	37.0	100.0
KS-WilhelmshoeherAllee	72.4	18.8	8.9	100.0
KS-WolfhagerStrasse	61.1	17.1	21.8	100.0
KS-Ysenburgstrasse	61.7	17.2	21.1	100.0
Mittel	65.4	17.7	16.9	100.0

Tabelle 15: Relative Aufteilung der PM10-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 2, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 2.

PM10 µg/m3 (Jahresmittelwert)	Hintergrund	Beitrag Stadt =Nest 3	Zusatzbelastung Straße	Gesamtbelastung
KS-Adenauerstrasse	26.0	2.5	2.5	31.0
BA-Altenritterstrasse	25.9	3.3	2.8	32.0
KS-Bruederstrasse	25.7	5.4	5.6	36.7
KS-FriedrichEbertStrasse	25.8	5.8	4.6	36.2
KS-FrankfurterStrasse247	25.9	5.7	5.1	36.7
KS-FrankfurterStrasse102	25.9	5.7	6.6	38.2
KS-Fünffensterstrasse	25.8	5.4	4.5	35.7
KS-HollaendischeStrasse157	25.6	4.7	10.5	40.8
KS-HollaendischeStrasse28	25.7	5.4	16.0	47.1
KS-IhringshaeuserStrasse	25.6	5.0	6.2	36.8
FI-VeckerhagenerStrasse	25.5	3.2	3.9	32.6
KS-Kohlenstrasse	25.9	5.6	9.6	41.1
KS-LeipzigerStrasse	25.7	5.0	6.8	37.5
KS-Mauerstrasse	25.7	5.7	2.6	34.0
KS-ObervellmarerStrasse	25.8	3.9	10.2	39.9
LO-OchshaeuserDorfstrasse	25.5	4.8	2.1	32.4
NS-HannoverscheStrasse	25.5	4.7	3.0	33.2
KS-SchoenfelderStrasse50	25.9	5.8	10.1	41.8
KS-SchoenfelderStrasse6	25.9	5.8	4.7	36.4
KS-SchoenfelderStrasse6a	25.9	5.8	6.0	37.7
KS-Tischbeinstrasse	25.8	5.8	4.6	36.2
KS-Weserstrasse	25.6	5.2	18.1	48.9
KS-WilhelmshoeherAllee	25.8	4.8	3.0	33.6
KS-WolfhagerStrasse	25.8	5.3	8.7	39.8
KS-Ysenburgstrasse	25.6	5.2	8.2	39.0
Mittel	25.8	5.0	6.6	37.4

Tabelle 16: Absolute Aufteilung der PM10-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 3, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 3.

PM10 %	Hintergrund	Beitrag Stadt =Nest 3	Zusatzbelastung Straße	Gesamtbelastung
KS-Adenauerstrasse	83.9	8.1	8.0	100.0
BA-Altenritterstrasse	81.1	10.3	8.6	100.0
KS-Bruederstrasse	70.0	14.7	15.3	100.0
KS-FriedrichEbertStrasse	71.2	16.0	12.8	100.0
KS-FrankfurterStrasse247	70.5	15.5	14.0	100.0
KS-FrankfurterStrasse102	67.7	14.9	17.3	100.0
KS-Fünffensterstrasse	72.2	15.1	12.7	100.0
KS-HollaendischeStrasse157	62.7	11.5	25.8	100.0
KS-HollaendischeStrasse28	54.6	11.5	34.0	100.0
KS-IhringshaeuserStrasse	69.6	13.6	16.8	100.0
FI-VeckerhagenerStrasse	78.1	9.8	12.1	100.0
KS-Kohlenstrasse	63.0	13.6	23.4	100.0
KS-LeipzigerStrasse	68.6	13.4	18.0	100.0
KS-Mauerstrasse	75.7	16.8	7.5	100.0
KS-ObervellmarerStrasse	64.7	9.8	25.5	100.0
LO-OchshaeuserDorfstrasse	78.7	14.8	6.5	100.0
NS-HannoverscheStrasse	76.8	14.1	9.1	100.0
KS-SchoenfelderStrasse50	62.0	13.9	24.1	100.0
KS-SchoenfelderStrasse6	71.3	16.0	12.8	100.0
KS-SchoenfelderStrasse6a	68.7	15.4	15.9	100.0
KS-Tischbeinstrasse	71.2	16.0	12.8	100.0
KS-Weserstrasse	52.3	10.6	37.0	100.0
KS-WilhelmshoeherAllee	76.8	14.3	8.9	100.0
KS-WolfhagerStrasse	64.9	13.3	21.8	100.0
KS-Ysenburgstrasse	65.6	13.3	21.1	100.0
Mittel	69.7	13.5	16.9	100.0

Tabelle 17: Relative Aufteilung der PM10-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 3, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 3.

NO ₂ µg/m ³ (Jahresmittelwert)	Hintergrund	Vorbelastung Stadt=Nest 2	Zusatzbelastung Straße	Gesamtbelastung
KS-Adenauerstrasse	11.7	12.1	5.7	29.5
BA-Altenritterstrasse	11.8	16.1	6.1	34.0
KS-Bruederstrasse	11.6	17.8	11.2	40.6
KS-FriedrichEbertStrasse	11.7	18.0	9.7	39.4
KS-FrankfurterStrasse247	11.7	18.9	9.9	40.5
KS-FrankfurterStrasse102	11.7	18.9	13.5	44.1
KS-Fünffensterstrasse	11.7	17.8	9.3	38.8
KS-HollaendischeStrasse157	11.7	15.0	19.4	46.1
KS-HollaendischeStrasse28	11.6	17.5	26.6	55.7
KS-IhringshaeuserStrasse	11.6	16.4	12.3	40.3
FI-VeckerhagenerStrasse	11.6	12.5	9.6	33.7
KS-Kohlenstrasse	11.7	17.2	18.5	47.4
KS-LeipzigerStrasse	11.7	18.2	13.9	43.8
KS-Mauerstrasse	11.7	17.8	10.2	39.7
KS-ObervellmarerStrasse	11.7	13.2	18.2	43.1
LO-OchshaeuserDorfstrasse	11.6	19.8	3.7	35.1
NS-HannoverscheStrasse	11.6	18.3	6.0	35.9
KS-SchoenfelderStrasse50	11.7	18.0	19.2	48.9
KS-SchoenfelderStrasse6	11.7	18.0	8.9	38.6
KS-SchoenfelderStrasse6a	11.7	18.0	11.4	41.1
KS-Tischbeinstrasse	11.7	18.2	9.0	38.9
KS-Weserstrasse	11.6	17.2	25.2	54.0
KS-WilhelmshoerAllee	11.7	15.1	6.7	33.5
KS-WolfhagerStrasse	11.7	16.4	16.1	44.2
KS-Ysenburgstrasse	11.6	17.2	15.8	44.6
Mittel	11.7	16.9	12.6	41.2

Tabelle 18: Absolute Aufteilung der NO₂-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 2, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 2.

NO ₂ %	Hintergrund	Beitrag Stadt =Nest 2	Zusatzbelastung Straße	Gesamtbelastung
KS-Adenauerstrasse	39.7	41.1	19.2	100.0
BA-Altenritterstrasse	34.7	47.4	17.9	100.0
KS-Bruederstrasse	28.6	43.8	27.6	100.0
KS-FriedrichEbertStrasse	29.7	45.7	24.6	100.0
KS-FrankfurterStrasse247	28.9	46.7	24.4	100.0
KS-FrankfurterStrasse102	26.5	42.8	30.6	100.0
KS-Fünffensterstrasse	30.1	45.9	24.0	100.0
KS-HollaendischeStrasse157	25.4	32.6	42.1	100.0
KS-HollaendischeStrasse28	20.8	31.4	47.8	100.0
KS-IhringshaeuserStrasse	28.8	40.7	30.6	100.0
FI-VeckerhagenerStrasse	34.4	37.1	28.5	100.0
KS-Kohlenstrasse	24.7	36.3	39.0	100.0
KS-LeipzigerStrasse	26.7	41.6	31.7	100.0
KS-Mauerstrasse	29.5	44.8	25.7	100.0
KS-ObervellmarerStrasse	27.1	30.6	42.2	100.0
LO-OchshaeuserDorfstrasse	33.0	56.4	10.5	100.0
NS-HannoverscheStrasse	32.3	51.0	16.6	100.0
KS-SchoenfelderStrasse50	24.0	36.8	39.2	100.0
KS-SchoenfelderStrasse6	30.3	46.6	23.0	100.0
KS-SchoenfelderStrasse6a	28.4	43.8	27.8	100.0
KS-Tischbeinstrasse	30.1	46.8	23.0	100.0
KS-Weserstrasse	21.5	31.8	46.7	100.0
KS-WilhelmshoeherAllee	35.0	45.1	19.9	100.0
KS-WolfhagerStrasse	26.5	37.1	36.4	100.0
KS-Ysenburgstrasse	26.0	38.6	35.4	100.0
Mittel	28.9	41.7	29.4	100.0

Tabelle 19: Relative Aufteilung der NO₂-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 2, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 2.

NO₂ µg/m³ (Jahresmittelwert)	Hintergrund	Beitrag Stadt =Nest 3	Zusatzbelastung Straße	Gesamtbelastung
KS-Adenauerstrasse	17.7	6.1	5.7	29.5
BA-Altenritterstrasse	17.6	10.3	6.1	34.0
KS-Bruederstrasse	15.8	13.6	11.2	40.6
KS-FriedrichEbertStrasse	15.8	13.9	9.7	39.4
KS-FrankfurterStrasse247	16.1	14.5	9.9	40.5
KS-FrankfurterStrasse102	15.9	14.7	13.5	44.1
KS-Fünffensterstrasse	15.8	13.7	9.3	38.8
KS-HollaendischeStrasse157	15.9	10.8	19.4	46.1
KS-HollaendischeStrasse28	15.7	13.4	26.6	55.7
KS-IhringshaeuserStrasse	15.8	12.2	12.3	40.3
FI-VeckerhagenerStrasse	16.3	7.8	9.6	33.7
KS-Kohlenstrasse	15.9	13.0	18.5	47.4
KS-LeipzigerStrasse	16.1	13.8	13.9	43.8
KS-Mauerstrasse	15.8	13.7	10.2	39.7
KS-ObervellmarerStrasse	16.5	8.4	18.2	43.1
LO-OchshaeuserDorfstrasse	16.4	15.0	3.7	35.1
NS-HannoverscheStrasse	16.1	13.8	6.0	35.9
KS-SchoenfelderStrasse50	15.9	13.8	19.2	48.9
KS-SchoenfelderStrasse6	15.9	13.8	8.9	38.6
KS-SchoenfelderStrasse6a	15.9	13.8	11.4	41.1
KS-Tischbeinstrasse	15.8	14.1	9.0	38.9
KS-Weserstrasse	15.8	13.0	25.2	54.0
KS-WilhelmshoerAllee	16.2	10.6	6.7	33.5
KS-WolfhagerStrasse	15.9	12.2	16.1	44.2
KS-Ysenburgstrasse	15.8	13.0	15.8	44.6
Mittel	16.1	12.5	12.6	41.2

Tabelle 20: Absolute Aufteilung der NO₂-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 3 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 3, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 3.

NO ₂ %	Hintergrund	Beitrag Stadt =Nest 3	Zusatzbelastung Straße	Gesamtbelastung
KS-Adenauerstrasse	60.1	20.7	19.2	100.0
BA-Altenritterstrasse	51.8	30.3	17.9	100.0
KS-Bruederstrasse	38.9	33.5	27.6	100.0
KS-FriedrichEbertStrasse	40.1	35.3	24.6	100.0
KS-FrankfurterStrasse247	39.8	35.8	24.4	100.0
KS-FrankfurterStrasse102	36.0	33.3	30.6	100.0
KS-Fünffensterstrasse	40.7	35.3	24.0	100.0
KS-HollaendischeStrasse157	34.5	23.4	42.1	100.0
KS-HollaendischeStrasse28	28.2	24.1	47.8	100.0
KS-IhringshaeuserStrasse	39.2	30.3	30.6	100.0
FI-VeckerhagenerStrasse	48.4	23.2	28.5	100.0
KS-Kohlenstrasse	33.5	27.4	39.0	100.0
KS-LeipzigerStrasse	36.8	31.5	31.7	100.0
KS-Mauerstrasse	39.8	34.5	25.7	100.0
KS-ObervellmarerStrasse	38.3	19.5	42.2	100.0
LO-OchshaeuserDorfstrasse	46.7	42.7	10.5	100.0
NS-HannoverscheStrasse	44.9	38.5	16.6	100.0
KS-SchoenfelderStrasse50	32.5	28.2	39.2	100.0
KS-SchoenfelderStrasse6	41.2	35.8	23.0	100.0
KS-SchoenfelderStrasse6a	38.7	33.6	27.8	100.0
KS-Tischbeinstrasse	40.7	36.3	23.0	100.0
KS-Weserstrasse	29.3	24.1	46.7	100.0
KS-WilhelmshoeherAllee	48.4	31.7	19.9	100.0
KS-WolfhagerStrasse	36.0	27.6	36.4	100.0
KS-Ysenburgstrasse	35.5	29.2	35.4	100.0
Mittel	40.0	30.6	29.4	100.0

Tabelle 21: Relative Aufteilung der NO₂-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 3 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 3, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 3.

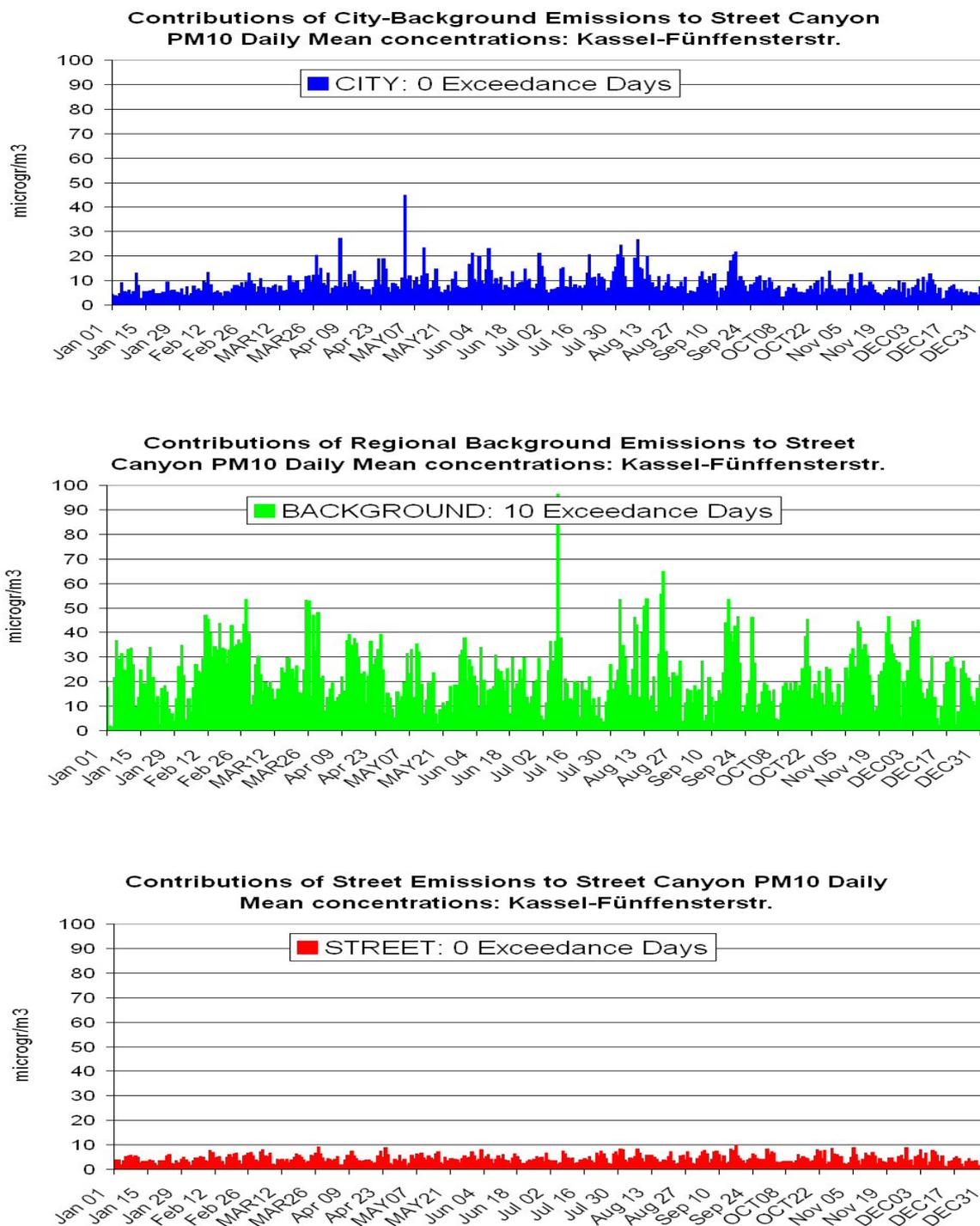


Abbildung 31: Berechnete PM10-Tagesmittelwerte in der Fünffensterstraße, aufgeteilt nach Beitrag aus Hintergrund (Ferntransport, oben), Stadt (Emissionen in Nest 2, Mitte) und Straße (CPB-Berechnung, unten).

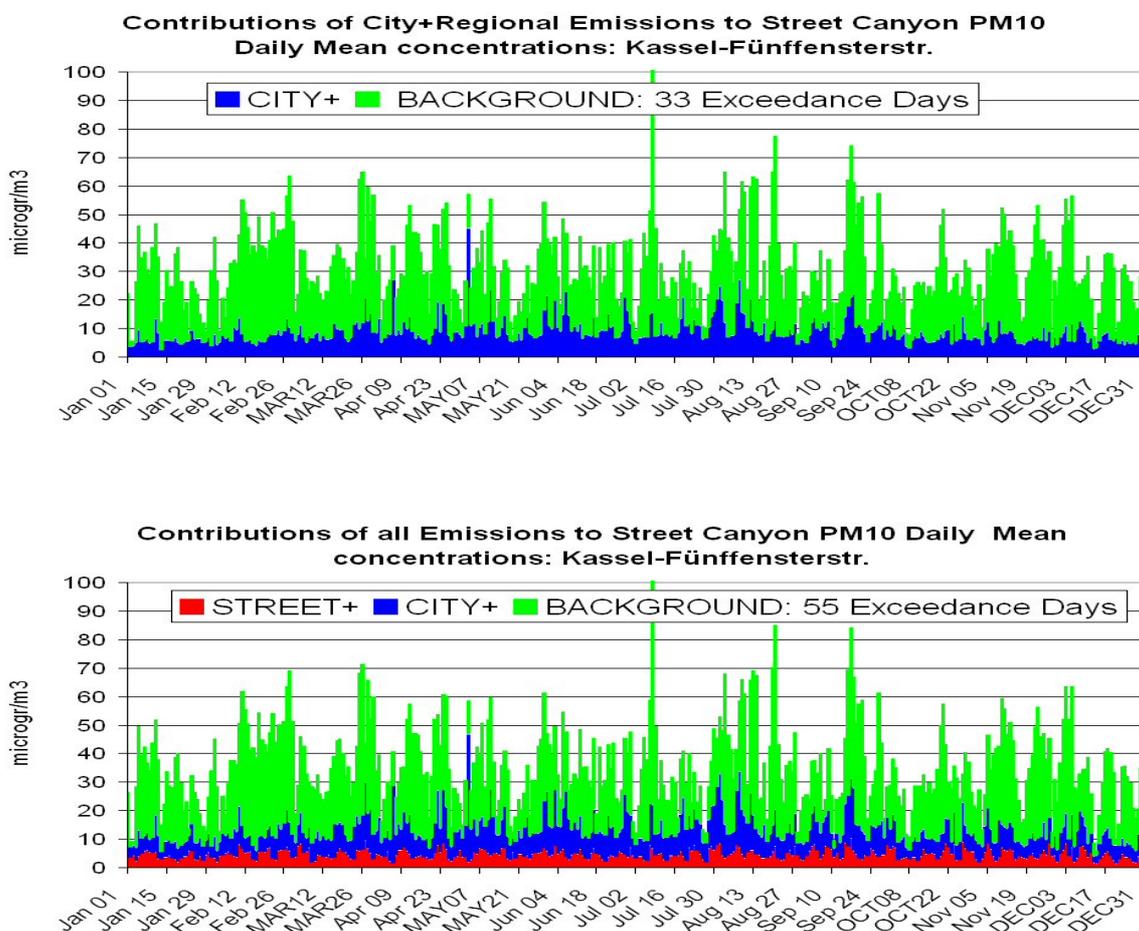


Abbildung 32: Berechnete PM10-Tagesmittelwerte in der Fünffensterstraße, aufgeteilt nach Beitrag aus Hintergrund und Stadt (oben) und Hintergrund, Stadt und Straße (unten).

4 Die Emissionsszenarien

Alle Emissionsszenarien wurden für Nest 3 (Abbildung 3) berechnet. Folgende Szenarien wurden betrachtet:

- Keine anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet (zusätzlich auch für Nest 2)
- Alle Emissionen der Verursachergruppe Straßenverkehr Null
- Alle Emissionen der Verursachergruppe Industrie Null.
- Alle Emissionen der Verursachergruppe Hausbrand Null
- Alle Emissionen auf den Bundesautobahnen Null.
- Verkehrsemissionen in der Kasseler Innenstadt halbiert.

Die emissionsseitigen Auswirkungen dieser Szenarien wurden bereits in Kap. 2.5.2 diskutiert. Außer den Emissionen wurden in den Szenarien keine anderen Eingangsdaten verändert.

4.1 Keine Emissionen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3

In diesem Szenario wurden alle anthropogenen Emissionen im Nest 3 auf Null gesetzt. Mit diesem Szenario kann der Beitrag der deutschen und europäischen Emissionen außerhalb des Nests 3 zu den Immissionen im Gebiet ermittelt werden. Für die 25 ausgewählten Straßenräume wurde das Szenario bereits in Kap. 3.4 diskutiert. Hier werden daher nur noch die Flächendarstellungen zu dem Szenario besprochen.

Abbildung 33 zeigt die für Nest 3 berechneten NO_2 -Jahresmittelwerte unter der Annahme, dass die anthropogenen Emissionen im Gebiet Null sind. Die verbleibenden Immissionen können also als der durch Emissionen außerhalb von Nest 3 verursachte Hintergrund interpretiert werden. Im Stadtgebiet von Kassel, wo im Basislauf NO_2 -Jahresmittelwerte zwischen 28 und 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet wurden (Abbildung 22), stellen sich ohne den Beitrag der Emissionen des Nestes 3 Jahresmittelwerte zwischen 15 und 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ein. Dies bedeutet, dass der Beitrag der Emissionen im Nest 3 zu den NO_2 -Jahresmittelwerten im Stadtzentrum von Kassel bei 13 bis 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 45 bis 50% liegt. Entlang der Hauptverkehrsachsen stellen die Emissionen im Nest 3 nahezu 60% der Gesamtimmission.

Abbildung 34 zeigt die für Nest 3 berechneten PM_{10} -Jahresmittelwerte ohne den Beitrag der anthropogenen Emissionen im Untersuchungsgebiet. Der PM_{10} -Hintergrund im Nest 3 liegt überwiegend zwischen 25 bis 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Im Kasseler Stadtzentrum liegt der Beitrag der Emissionen im Nest 3 zu den PM_{10} -Jahresmittelwerten zwischen 4 und 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 14 bis 20%. Insgesamt ist der Beitrag der Emissionen im Untersuchungsgebiet zu den PM_{10} -Jahresmitteln damit deutlich niedriger als derjenige zu den NO_2 -Jahresmitteln. PM_{10} setzt sich aus primären, d.h. direkt emittierten Partikeln und sekundären, d.h. über physikalisch/chemische Prozesse gebildeten Partikeln zusammen. Die Bildung der sekundären Bestandteile ist ein großräumiger Prozess. Demzufolge wird ein Großteil der sekundären Partikel außerhalb des Untersuchungsgebietes gebildet und in das Gebiet transportiert und unterliegt damit nicht dem Einfluss lokaler Maßnahmen. Die hier diskutierten Beiträge zur berechneten Gesamtbelastung können als obere Grenze für die durch lokale Maßnahmen erreichbaren Minderungen interpretiert werden.

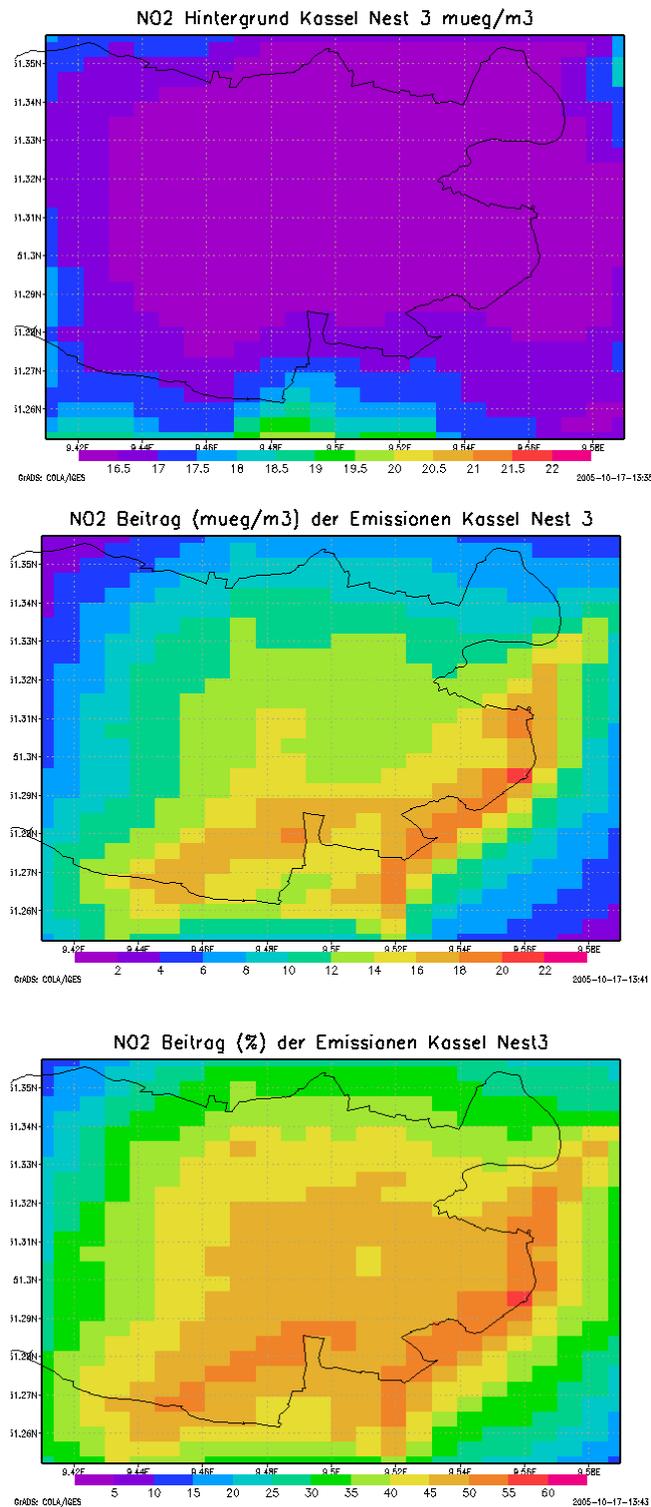


Abbildung 33: Oben: Berechneter NO₂-Jahresmittelwert in µg/m³ in Kassel, Nest 3 für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null,, Mitte und unten: Beitrag der Emissionen im Nest 3 in µg/m³ und % zu den Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22)

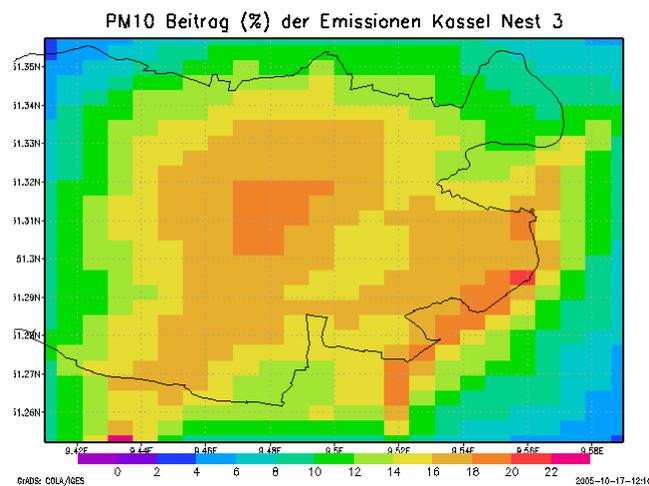
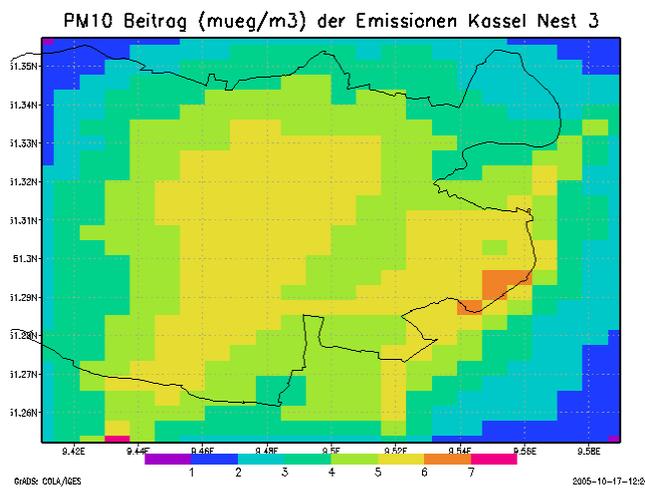
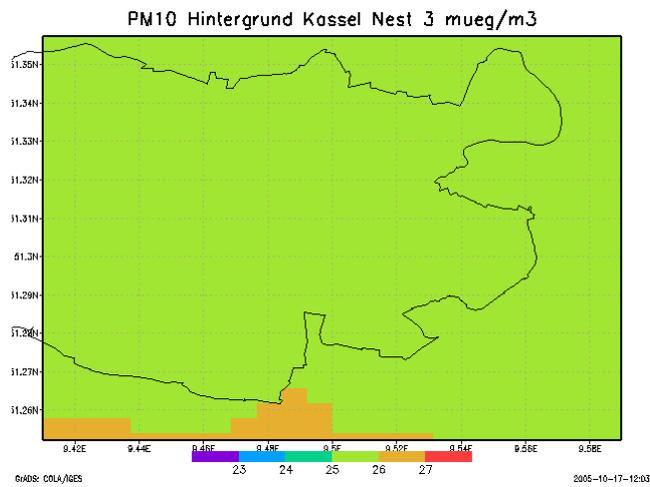


Abbildung 34: Oben: Berechneter PM10-Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Kassel, Nest 3 für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null,“. Mitte und unten: Beitrag der Emissionen im Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).

4.2 Kein Kfz-Verkehr im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3

Abbildung 35 zeigt die durch den Kfz-Verkehr im Nest 3 verursachten absoluten und relativen Beiträge zur gesamten städtischen NO_2 -Belastung (Abbildung 22). Im Kasseler Stadtzentrum können circa 6 bis $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 25 bis 30% der Immissionen dem Verkehr zugeordnet werden. Entlang der Hauptverkehrsachsen steigt der Beitrag auf 12 bis $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 35 bis 50% an.

Für PM_{10} zeigen die durch den Kfz-Verkehr verursachten Beiträge zum Jahresmittelwert eine ähnliche Struktur wie die NO_2 -Beiträge, die Werte sind aber deutlich niedriger (Abbildung 36).

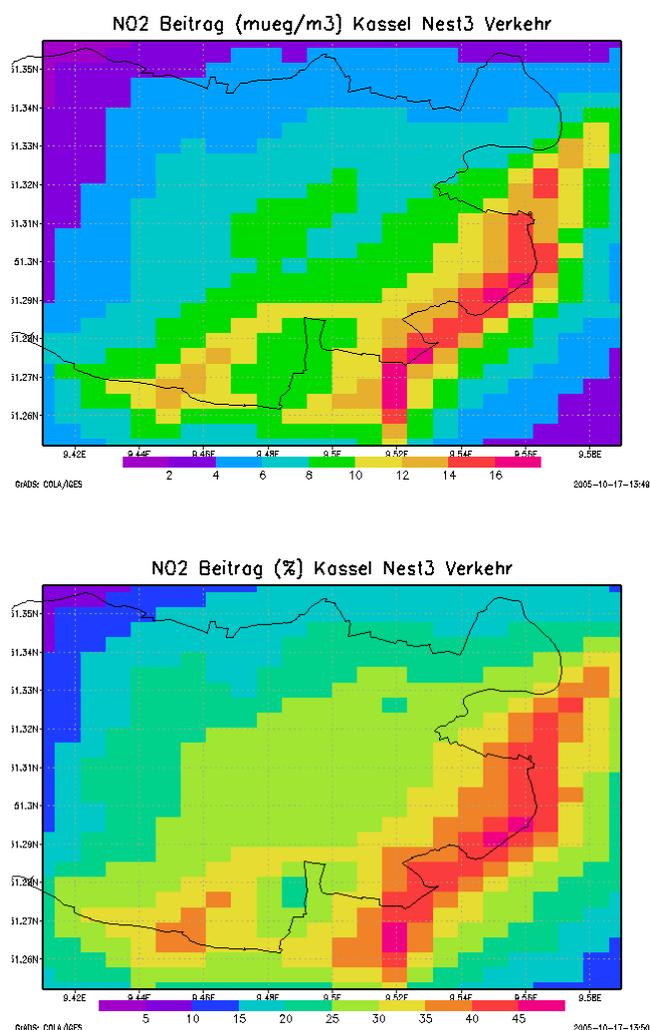


Abbildung 35: Beitrag der Kfz-Emissionen im Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den NO_2 -Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).

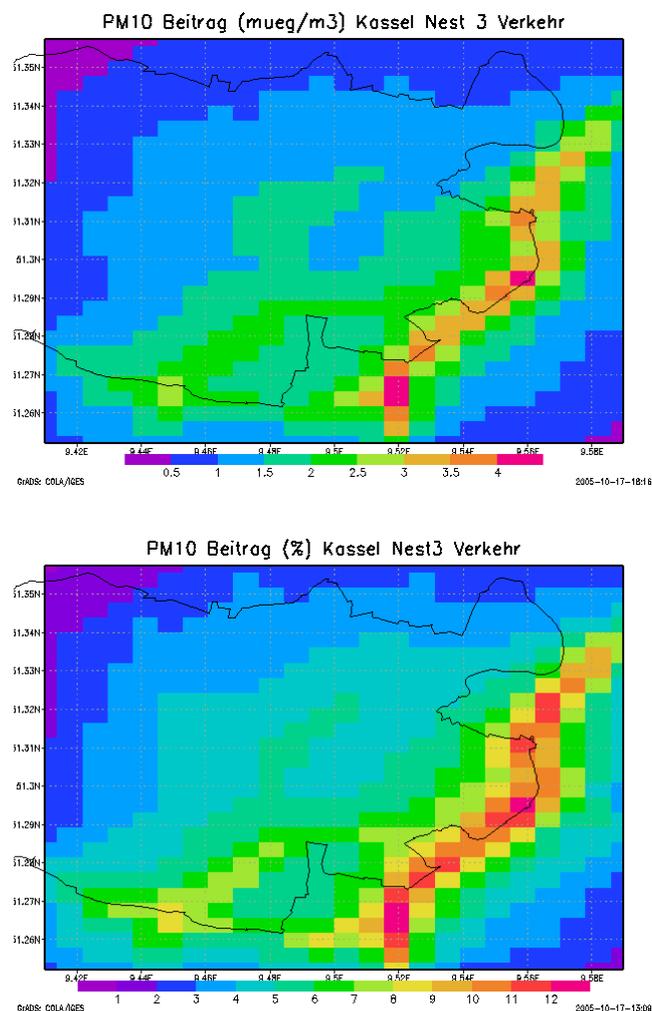


Abbildung 36: Beitrag der Kfz-Emissionen im Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 23).

4.3 Keine Industrie im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3

Der Beitrag der industriellen Emissionen zu den NO_2 -Jahresmittelwerten zeigt 3 Schwerpunkte: Im Norden des Stadtgebiets von Kassel (4 bis $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 12 bis 14%) im Süden des Stadtgebiets (6 bis $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 20 bis 22%) und am süd-westlichen Rand des Nestes 3 (3 bis $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 12 bis 14%). Insgesamt tragen die Industrieemissionen also deutlich weniger zur NO_2 -Belastung bei als die Kfz-Emissionen. Alle drei NO_2 -Belastungsschwerpunkte zeigen sich auch beim PM10, aber für diese Komponente wird der höchste Beitrag am südwestlichen Rand berechnet (4 bis $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 12 bis 13 %). Die PM10-Beiträge der beiden Industrieschwerpunkte im Stadtgebiet von Kassel sind dagegen sehr viel niedriger.

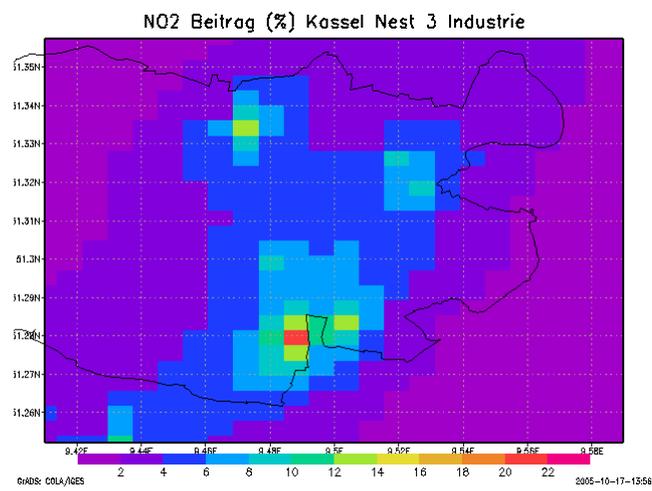
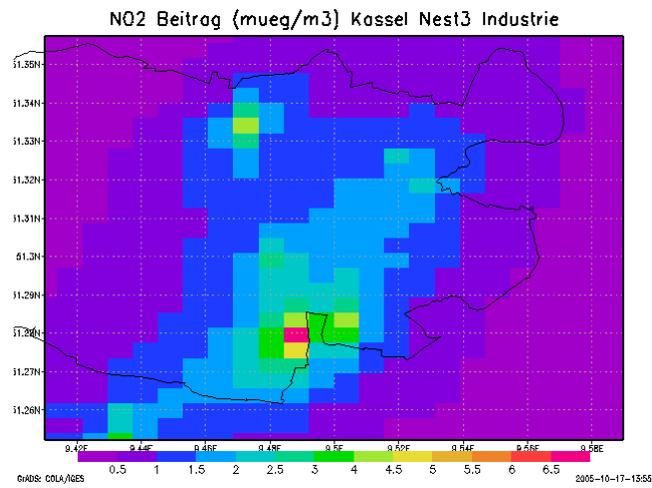


Abbildung 37: Beitrag der industriellen Emissionen im Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den NO_2 -Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).

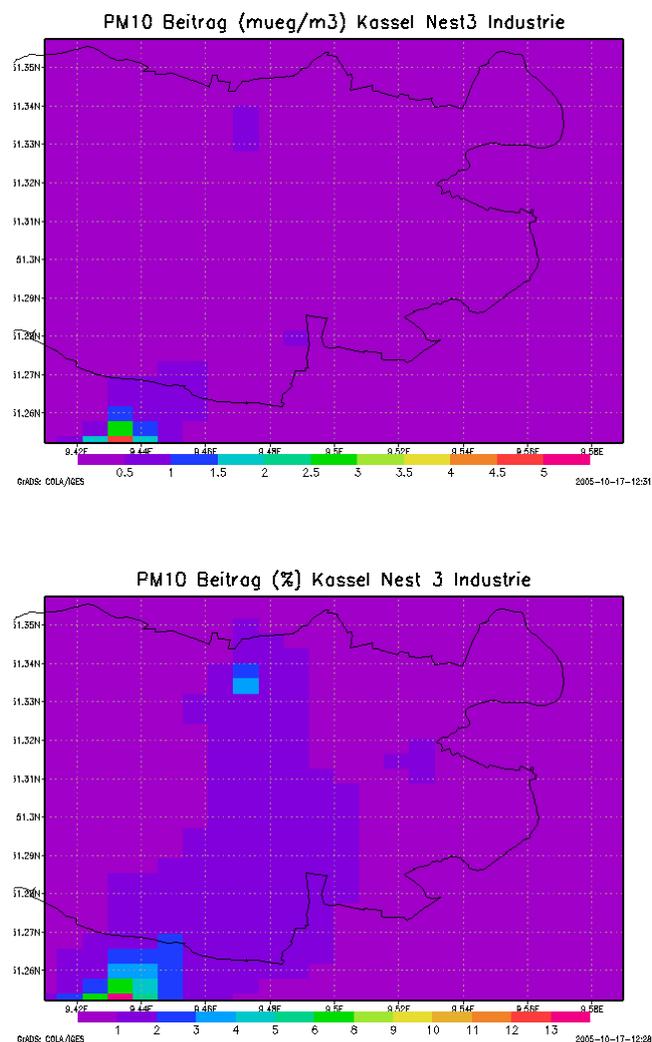


Abbildung 38: Beitrag der industriellen Emissionen im Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 23).

4.4 Kein Hausbrand im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3

Der Beitrag der Hausbrandemissionen zu den NO_2 -Jahresmittelwerten konzentriert sich auf das Stadtzentrum von Kassel (Abbildung 39). Hier liegen die Beiträge zwischen 2.5 und 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 9 bis 11%. Ähnliches gilt auch für PM10 (Abbildung 40), mit allerdings deutlich niedrigeren Beiträgen (unter 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. unter 3%). Von allen drei betrachteten Gruppen hat der Hausbrand damit zwar punktuell die geringsten Anteile an der Immissionsbelastung, aber dafür überdecken diese Anteile einen großen Teil des Stadtkerns. Die Industrieanteile sind dagegen an den Industrieschwerpunkten relativ hoch, aber über die Fläche gemittelt geringer als die des Hausbrands.

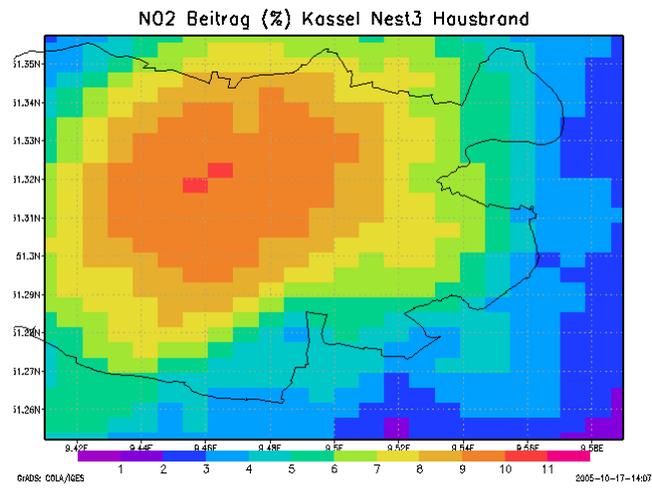
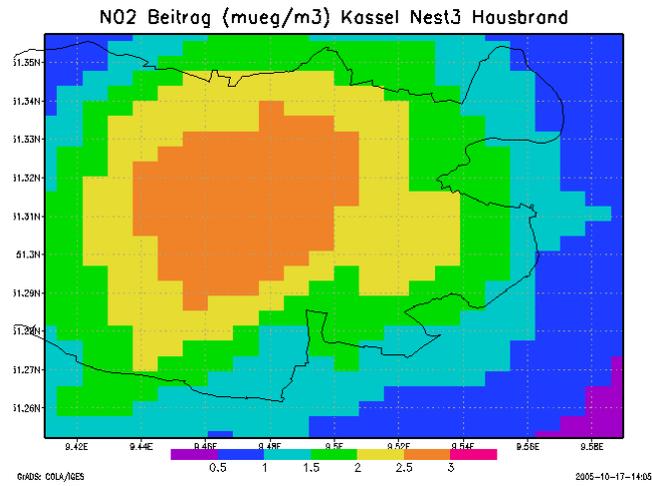


Abbildung 39: Beitrag der Hausbrand-Emissionen im Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den NO_2 -Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).

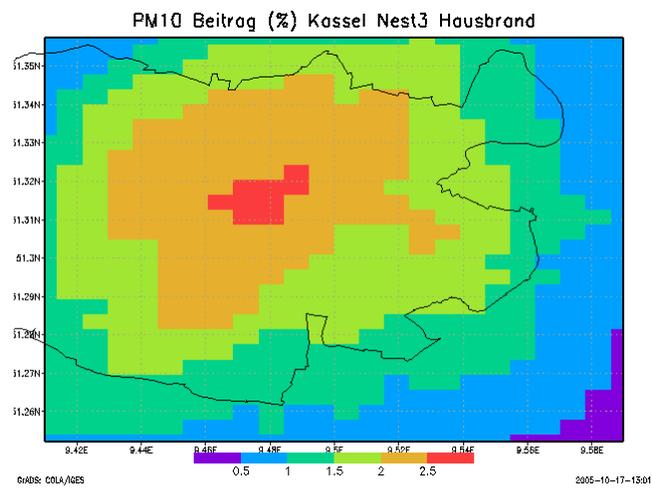
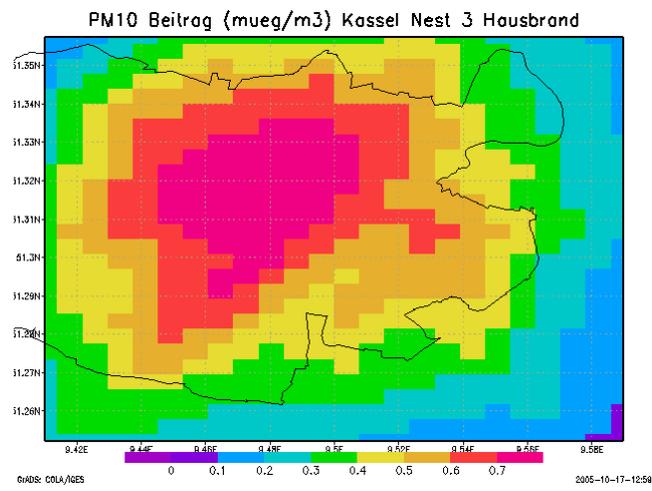


Abbildung 40: Beitrag der Hausbrand-Emissionen im Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 23).

4.5 Beitrag der Quellgruppen zur Vorbelastung der 25 Straßenräume

In Tabelle 22 bis Tabelle 25 sind die für die 25 Straßen berechnete Vorbelastung von NO₂ und PM10 zusammengestellt. Die Tabellen zeigen weiterhin die absoluten und relativen Beiträge aller Emissionen im Untersuchungsgebiet sowie die der Verursachergruppen Hausbrand, Verkehr und Industrie zu dieser Vorbelastung. Es muss betont werden, dass die Addition der hier berechneten Beiträge der Verursachergruppen Verkehr, Industrie und Hausbrand nicht exakt zu der Gesamtkonzentration führen, wie sie sich unter der Verwendung aller Emissionen im Nest 3 ergeben. Ursache dafür sind zum einen die nicht gesondert betrachteten Immissionsbeiträge der Landwirtschaft, der Kleinverbraucher, der Sonstigen Quellen (nur PM10) und der Staubaufwirbelung von natürlichen Böden (nur PM10). Zum anderen müssen die nichtlinearen Beziehungen zwischen den Vorläuferemissionen und den über eine komplexe Kette chemischer Reaktionen entstehenden Folgeprodukten NO₂ und PM10 berücksichtigt werden. Eine Änderung der Zusammensetzung der Emissionen führt also auch zu einer Änderung der chemischen Abläufe und damit zu einer Änderung der Konzentrationsbeiträge. Aus diesem Grunde können die berechneten Beiträge der einzelnen Emissionsgruppen zur Gesamtkonzentration auch nur als Näherung betrachtet werden.

Es werden nur zwischen 25 und 47 % der NO₂-Vorbelastung über den betrachteten Straßenschluchten durch die Emissionen im Untersuchungsgebiet erklärt. Von den 3 untersuchten Quellgruppen stellt der Verkehr mit Abstand den höchsten Beitrag zur Vorbelastung. Der Beitrag der Emissionen innerhalb des Nestes 3 zu den NO₂-Immissionen ist höher als derjenige zu den PM10-Immissionen. Beim PM10 tragen die Emissionen im Gebiet nur zwischen 8 und 19% zur Vorbelastung an den ausgewählten Straßen bei. Im Mittel stammen über 80% der PM10-Vorbelastung aus Quellen außerhalb des Nestes 3. Auch beim PM10 stellt der Kfz-Verkehr im Nest 3 den größten Einzelbeitrag zur Vorbelastung, gefolgt vom Hausbrand. All diese Angaben gelten für die Mittelwerte, und nicht für den Einzelfall.

Schätzt man die mittleren Einzelbeiträge der betrachteten Verursachergruppen zu der Vorbelastung an den 25 ausgewählten Straßenräumen ab, so erhält man die in Tabelle 26 zusammengestellten Relationen, die auf den Beitrag der Verursachergruppe Industrie normiert sind. Im Mittel ist danach der Beitrag der Verkehrsemissionen zu den NO₂-Vorbelastungen circa 6x höher, der des Hausbrands circa 2x höher als der Beitrag der Industrie. Beim PM10 ergeben sich zwischen Industrie und Hausbrand ähnliche Relationen wie beim NO₂, der Kfz-Anteil ist etwas niedriger. Naturgemäß hängt der Beitrag der Industrie sehr stark von der geographischen Lage der Anlagen und der betrachteten Straßen ab. Die in Tabelle 26 abgeschätzten Verhältnisse gelten daher nur im Mittel, und nicht notwendigerweise für einzelne Zellen des Untersuchungsgebiets. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass der Beitrag des Verkehrs wahrscheinlich eher unterschätzt wird, da insbesondere der Beitrag des Verkehrs in der nächsten Nachbarschaft der betrachteten Straße von einer Gittermodellanwendung in der urbanen Skala nicht adäquat berechnet werden kann.

NO ₂ µg/m ³	Vorbelastung	Hintergrund	Gesamtbeitrag			
			Nest 3	Kfz	Industrie	Hausbrand
KS-Adenauerstrasse	23.8	17.7	6.1	3.5	0.4	1.6
BA-Altenritterstrasse	27.9	17.6	10.3	6.3	1.0	1.5
KS-Bruederstrasse	29.4	15.8	13.6	8.2	1.5	2.5
KS-FriedrichEbertStrasse	29.7	15.8	13.9	8.3	1.3	2.8
KS-FrankfurterStrasse247	30.6	16.1	14.5	8.8	1.7	2.6
KS-FrankfurterStrasse102	30.6	15.9	14.7	8.2	2.1	2.8
KS-Fünffensterstrasse	29.5	15.8	13.7	8.1	1.6	2.6
KS-HollaendischeStrasse157	26.7	15.9	10.8	6.2	1.0	2.4
KS-HollaendischeStrasse28	29.1	15.7	13.4	8.1	1.4	2.7
KS-IhringshaeuserStrasse	28.0	15.8	12.2	7.4	1.1	2.5
FI-VeckerhagenerStrasse	24.1	16.3	7.8	4.4	0.6	1.6
KS-Kohlenstrasse	28.9	15.9	13.0	7.6	1.1	2.8
KS-LeipzigerStrasse	29.9	16.1	13.8	8.9	1.5	2.3
KS-Mauerstrasse	29.5	15.8	13.7	8.2	1.4	2.7
KS-ObervellmarerStrasse	24.9	16.5	8.4	4.9	0.5	2.1
LO-OchshaeuserDorfstrasse	31.4	16.4	15.0	11.8	0.4	1.3
NS-HannoverscheStrasse	29.9	16.1	13.8	9.7	1.0	1.9
KS-SchoenfelderStrasse50	29.7	15.9	13.8	8.1	1.3	2.8
KS-SchoenfelderStrasse6	29.7	15.9	13.8	8.1	1.3	2.8
KS-SchoenfelderStrasse6a	29.7	15.9	13.8	8.1	1.3	2.8
KS-Tischbeinstrasse	29.9	15.8	14.1	8.4	1.5	2.8
KS-Weserstrasse	28.8	15.8	13.0	7.8	1.5	2.4
KS-WilhelmshoeherAllee	26.8	16.2	10.6	6.2	0.7	2.6
KS-WolfhagerStrasse	28.1	15.9	12.2	6.8	1.3	2.7
KS-Ysenburgstrasse	28.8	15.8	13.0	7.8	1.5	2.4
Mittel	28.6	16.1	12.5	7.6	1.2	2.4

Tabelle 22: Berechnete NO₂-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Absoluter Beitrag des Transports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, der Verkehrsemissionen, der Emissionen des Hausbrands sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Weitere Erläuterungen im Text.

NO ₂	Vorbelastung	Hintergrund	Gesamtbeitrag	Anteil	Anteil	Anteil
			Nest 3	Kfz	Industrie	Hausbrand
KS-Adenauerstrasse	23.8	74.4	25.6	14.7	1.7	6.7
BA-Altenritterstrasse	27.9	63.1	36.9	22.6	3.6	5.4
KS-Bruederstrasse	29.4	53.7	46.3	27.9	5.1	8.5
KS-FriedrichEbertStrasse	29.7	53.2	46.8	27.9	4.4	9.4
KS-FrankfurterStrasse247	30.6	52.6	47.4	28.8	5.6	8.5
KS-FrankfurterStrasse102	30.6	52.0	48.0	26.8	6.9	9.2
KS-Fünffensterstrasse	29.5	53.6	46.4	27.5	5.4	8.8
KS-HollaendischeStrasse157	26.7	59.6	40.4	23.2	3.7	9.0
KS-HollaendischeStrasse28	29.1	54.0	46.0	27.8	4.8	9.3
KS-IhringshaeuserStrasse	28.0	56.4	43.6	26.4	3.9	8.9
FI-VeckerhagenerStrasse	24.1	67.6	32.4	18.3	2.5	6.6
KS-Kohlenstrasse	28.9	55.0	45.0	26.3	3.8	9.7
KS-LeipzigerStrasse	29.9	53.8	46.2	29.8	5.0	7.7
KS-Mauerstrasse	29.5	53.6	46.4	27.8	4.7	9.2
KS-ObervellmarerStrasse	24.9	66.3	33.7	19.7	2.0	8.4
LO-OchshaeuserDorfstrasse	31.4	52.2	47.8	37.6	1.3	4.1
NS-HannoverscheStrasse	29.9	53.8	46.2	32.4	3.3	6.4
KS-SchoenfelderStrasse50	29.7	53.5	46.5	27.3	4.4	9.4
KS-SchoenfelderStrasse6	29.7	53.5	46.5	27.3	4.4	9.4
KS-SchoenfelderStrasse6a	29.7	53.5	46.5	27.3	4.4	9.4
KS-Tischbeinstrasse	29.9	52.8	47.2	28.1	5.0	9.4
KS-Weserstrasse	28.8	54.9	45.1	27.1	5.2	8.3
KS-WilhelmshoeherAllee	26.8	60.4	39.6	23.1	2.6	9.7
KS-WolfhagerStrasse	28.1	56.6	43.4	24.2	4.6	9.6
KS-Ysenburgstrasse	28.8	54.9	45.1	27.1	5.2	8.3
Mittel	28.6	56.6	43.4	26.3	4.1	8.4

Tabelle 23: Berechnete NO₂-Vorbelastung (Jahresmittelwert in µg/m³) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) des Transports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, der Verkehrsemissionen, der Emissionen des Hausbrands sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Weitere Erläuterungen im Text.

PM10 µg/m3	Vorbelastung	Hintergrund	Gesamtbeitrag	Anteil	Anteil	Anteil
			Nest 3	Kfz	Industrie	Hausbrand
KS-Adenauerstrasse	28.5	26.0	2.5	0.6	0.1	0.3
BA-Altenritterstrasse	29.2	25.9	3.3	1.2	0.4	0.4
KS-Bruederstrasse	31.1	25.7	5.4	1.5	0.2	0.7
KS-FriedrichEbertStrasse	31.6	25.8	5.8	1.6	0.3	0.8
KS-FrankfurterStrasse247	31.6	25.9	5.7	1.8	0.4	0.7
KS-FrankfurterStrasse102	31.6	25.9	5.7	1.6	0.4	0.7
KS-Fünffensterstrasse	31.2	25.8	5.4	1.5	0.3	0.7
KS-HollaendischeStrasse157	30.3	25.6	4.7	1.2	0.3	0.7
KS-HollaendischeStrasse28	31.1	25.7	5.4	1.5	0.2	0.7
KS-IhringshaeuserStrasse	30.6	25.6	5.0	1.4	0.2	0.7
FI-VeckerhagenerStrasse	28.7	25.5	3.2	0.8	0.1	0.4
KS-Kohlenstrasse	31.5	25.9	5.6	1.5	0.3	0.8
KS-LeipzigerStrasse	30.7	25.7	5.0	1.6	0.2	0.6
KS-Mauerstrasse	31.4	25.7	5.7	1.6	0.3	0.8
KS-ObervellmarerStrasse	29.7	25.8	3.9	1.0	0.2	0.6
LO-OchshaeuserDorfstrasse	30.3	25.5	4.8	2.5	0.2	0.4
NS-HannoverscheStrasse	30.2	25.5	4.7	1.9	0.3	0.6
KS-SchoenfelderStrasse50	31.7	25.9	5.8	1.6	0.4	0.8
KS-SchoenfelderStrasse6	31.7	25.9	5.8	1.6	0.4	0.8
KS-SchoenfelderStrasse6a	31.7	25.9	5.8	1.6	0.4	0.8
KS-Tischbeinstrasse	31.6	25.8	5.8	1.6	0.4	0.8
KS-Weserstrasse	30.8	25.6	5.2	1.5	0.3	0.7
KS-WilhelmshoeherAllee	30.6	25.8	4.8	1.2	0.2	0.7
KS-WolfhagerStrasse	31.1	25.8	5.3	1.3	0.3	0.7
KS-Ysenburgstrasse	30.8	25.6	5.2	1.5	0.3	0.7
Mittel	30.8	25.8	5.0	1.5	0.3	0.7

Tabelle 24: Berechnete PM10-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Absoluter Beitrag des Transports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, der Verkehrsemissionen, der Emissionen des Hausbrands sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Weitere Erläuterungen im Text.

PM10	Vorbelastung	Hintergrund	Gesamtbeitrag	Anteil	Anteil	Anteil
			Nest 3	Kfz	Industrie	Hausbrand
KS-Adenauerstrasse	28.5	91.2	8.8	2.1	0.4	1.1
BA-Altenritterstrasse	29.2	88.7	11.3	4.1	1.4	1.4
KS-Bruederstrasse	31.1	82.6	17.4	4.8	0.6	2.3
KS-FriedrichEbertStrasse	31.6	81.6	18.4	5.1	0.9	2.5
KS-FrankfurterStrasse247	31.6	82.0	18.0	5.7	1.3	2.2
KS-FrankfurterStrasse102	31.6	82.0	18.0	5.1	1.3	2.2
KS-Fünffensterstrasse	31.2	82.7	17.3	4.8	1.0	2.2
KS-HollaendischeStrasse157	30.3	84.5	15.5	4.0	1.0	2.3
KS-HollaendischeStrasse28	31.1	82.6	17.4	4.8	0.6	2.3
KS-IhringshaeuserStrasse	30.6	83.7	16.3	4.6	0.7	2.3
FI-VeckerhagenerStrasse	28.7	88.9	11.1	2.8	0.3	1.4
KS-Kohlenstrasse	31.5	82.2	17.8	4.8	1.0	2.5
KS-LeipzigerStrasse	30.7	83.7	16.3	5.2	0.7	2.0
KS-Mauerstrasse	31.4	81.8	18.2	5.1	1.0	2.5
KS-ObervellmarerStrasse	29.7	86.9	13.1	3.4	0.7	2.0
LO-OchshaeuserDorfstrasse	30.3	84.2	15.8	8.3	0.7	1.3
NS-HannoverscheStrasse	30.2	84.4	15.6	6.3	1.0	2.0
KS-SchoenfelderStrasse50	31.7	81.7	18.3	5.0	1.3	2.5
KS-SchoenfelderStrasse6	31.7	81.7	18.3	5.0	1.3	2.5
KS-SchoenfelderStrasse6a	31.7	81.7	18.3	5.0	1.3	2.5
KS-Tischbeinstrasse	31.6	81.6	18.4	5.1	1.3	2.5
KS-Weserstrasse	30.8	83.1	16.9	4.9	1.0	2.3
KS-WilhelmshoeherAllee	30.6	84.3	15.7	3.9	0.7	2.3
KS-WolfhagerStrasse	31.1	83.0	17.0	4.2	1.0	2.3
KS-Ysenburgstrasse	30.8	83.1	16.9	4.9	1.0	2.3
Mittel	30.8	83.8	16.2	4.8	0.9	2.1

Tabelle 25: Berechnete PM10-Vorbelastung (Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) des Transports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, der Verkehrsemissionen, der Emissionen des Hausbrands sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Weitere Erläuterungen im Text.

	NO ₂ -Jahresmittelwert	PM10-Jahresmittelwert
Industrie	1	1
Hausbrand	2	2
Verkehr	6	5

Tabelle 26: Relative Beiträge der betrachteten Verursachergruppen zu den mittleren Vorbelastungen für die 25 ausgewählten Straßen, normiert auf den Beitrag der Industrie. Weitere Erläuterungen im Text.

4.6 Keine Emissionen der Bundesautobahnen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3

Für dieses Szenario wurden die Autobahn-Emissionen im Nest 3 (Abbildung 3) auf Null gesetzt. Abbildung 41 zeigt die durch die Autobahnemissionen im Nest 3 verursachten absoluten und relativen Beiträge zur NO₂-Gesamtkonzentration (Abbildung 22). Im Einflussbereich der Autobahnen vermindern sich die Jahresmittelwerte um 12 bis 16 µg/m³ oder 35 bis 45%. Im Kasseler Stadtzentrum können nur 2 bis 5 µg/m³ oder 5 bis 20% der Immissionen dem Autobahn-Verkehr zugeordnet werden.

Für PM10 zeigen die durch den Autobahnverkehr-Verkehr verursachten Beiträge zum Jahresmittelwert eine ähnliche Struktur wie die NO₂-Beiträge, die Werte sind aber deutlich niedriger (Abbildung 42).

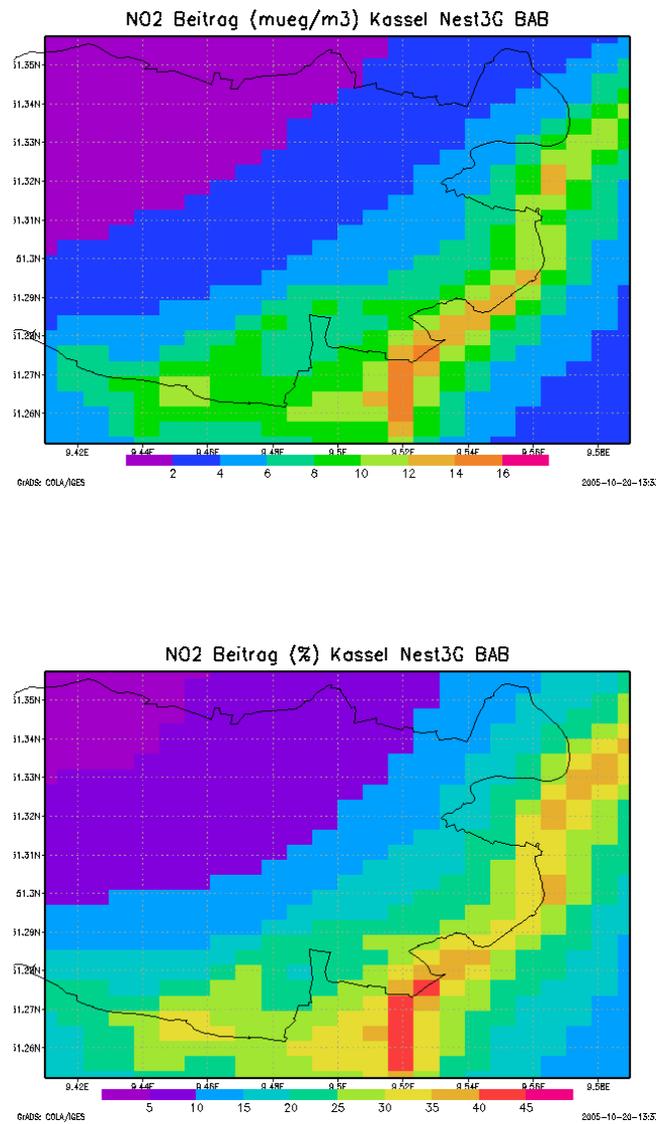


Abbildung 41: Beitrag der Emissionen auf den Bundesautobahnen im Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den NO_2 -Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).

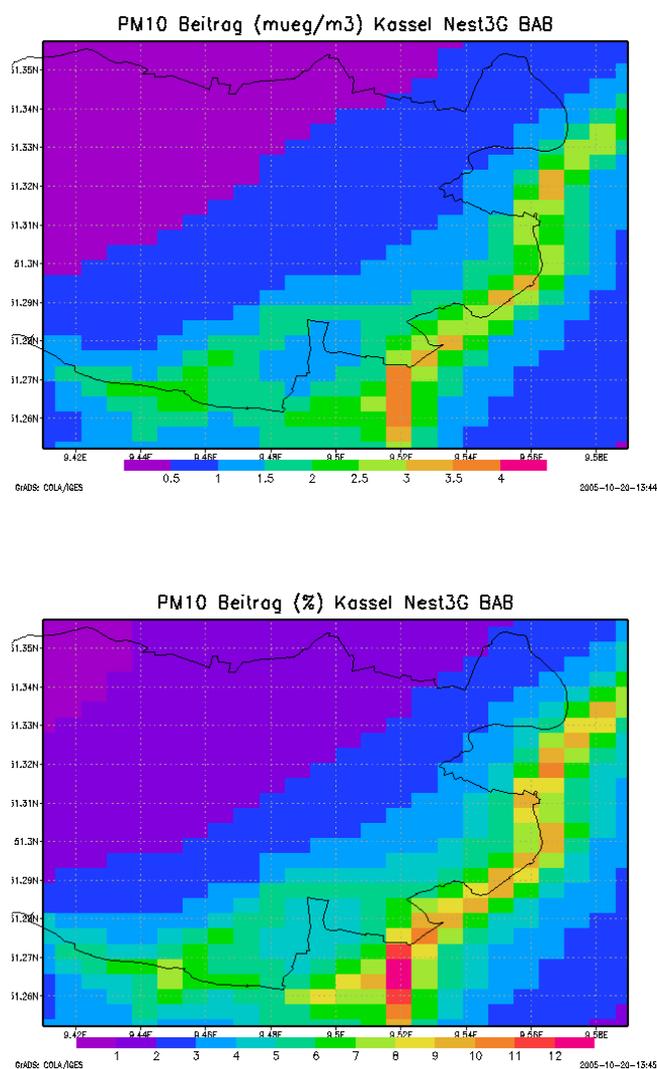


Abbildung 42: Beitrag der Emissionen auf den Bundesautobahnen im Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 23).

4.7 Kfz-Verkehr halbiert in der Kasseler Innenstadt

In diesem Szenario wurden die Emissionen des Kfz-Verkehrs in der Kasseler Innenstadt halbiert. Die entsprechenden Zellen im Nest 3 sind in der Abbildung 3 hellblau markiert. Der NO_2 -Beitrag von 50% der Kfz-Emissionen in der Kasseler Innenstadt liegt im Minderungsgebiet zwischen 1 und 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 5 bis 7 % der NO_2 -Jahresmittelwerte aus allen Emissionen (Abbildung 43). Die entsprechenden Beiträge zum PM10-Jahresmittelwert sind mit Werten unter 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder weitgehend unter 1 % deutlich niedriger (Abbildung 44).

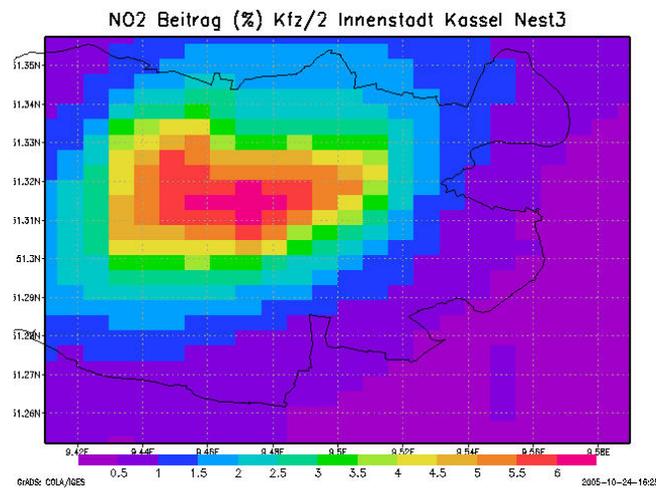
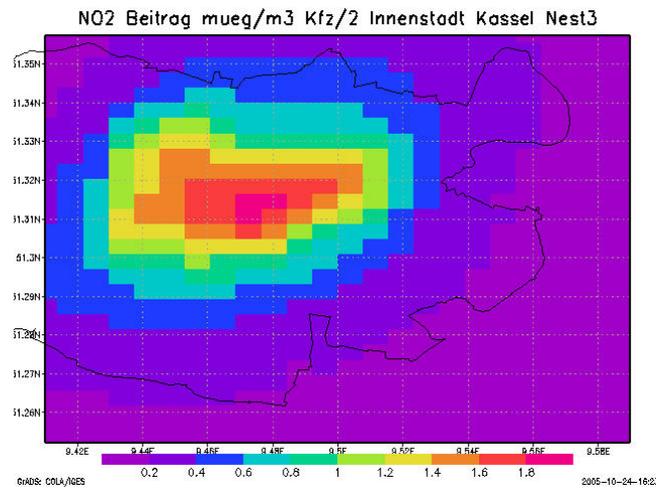


Abbildung 43: Beitrag der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Kasseler Innenstadt in Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den NO₂-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).

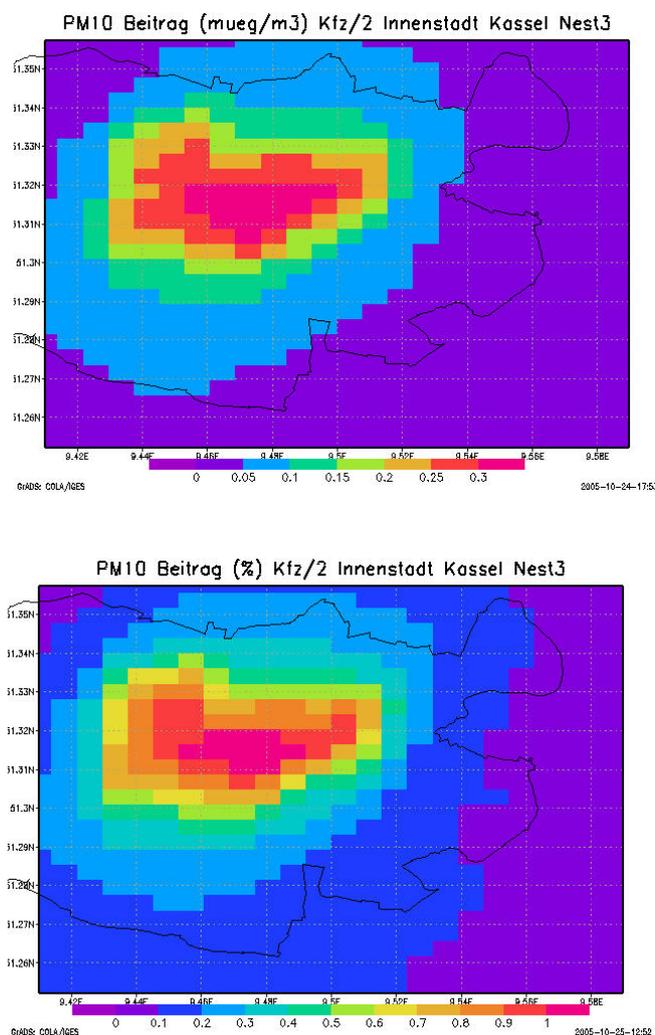


Abbildung 44: Beitrag der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Kasseler Innenstadt in Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 23).

4.8 Beitrag der Kfz-bezogenen Quellgruppen zur Vorbelastung der 25 Straßenräume

Entsprechend der Vorgehensweise in Kap. 4.5 sind in Tabelle 27 bis

Tabelle 31 die für die 25 Straßen berechneten Beiträge der Verkehrsszenarien zur gesamten Vorbelastung von NO_2 und PM10 zusammengestellt. Die Tabellen zeigen die gesamte Vorbelastung, den Beitrag des Hintergrunds, den Beitrag aller Emissionen im Nest 3 und die Beiträge aller Verkehrsemissionen im Untersuchungsgebiet sowie die der Autobahnen und die von 50% des Verkehrs in der Kasseler Innenstadt. Zur Einordnung des Immissionsbeitrags der gesamten Quellgruppe Verkehr zur Vorbelastung sei auf Kap. 4.5 und Tabelle 22 bis Tabelle 26 verwiesen.

Im Mittel tragen die Autobahnemissionen circa 44% zu dem vom Verkehr verursachten NO₂-Immissionsanteil bei (Tabelle 29). Im Einzelfall schwankt der Beitrag zwischen circa 25% (Obervellmarer Strasse) und 78% (Ochshaeuser Dorfstrasse). An der gesamten NO₂-Vorbelastung tragen die Autobahnemissionen zwischen circa 4% (Obervellmarer Strasse) und 29% (Ochshaeuser Dorfstrasse) bei (Tabelle 28). Für die Hälfte der Kfz-Emissionen in der Kasseler Innenstadt wird in der Innenstadt ein NO₂-Beitrag zwischen 10 und 25% zur vom Verkehr verursachten Vorbelastung berechnet. An der gesamten Vorbelastung ist dieser Beitrag mit 5 bis 6% deutlich niedriger.

Absolut betrachtet ist der PM10-Beitrag des Straßenverkehrs sehr viel niedriger als der NO₂-Beitrag. Die prozentualen Anteile der Autobahnemissionen bzw. der Kfz-Emissionen in der Kasseler Innenstadt an der gesamten vom Verkehr verursachten Vorbelastung sind aber vergleichbar (Tabelle 30 bis Tabelle 32).

NO ₂ µg/m ³	Vorbelastung	Hintergrund	Gesamtbeitrag Emissionen Nest 3	Anteil Kfz	Anteil BAB	Anteil 50% Kfz City
KS-Adenauerstrasse	23.8	17.7	6.1	3.5	2.5	0.4
BA-Altenritterstrasse	27.9	17.6	10.3	6.3	5.1	0.1
KS-Bruederstrasse	29.4	15.8	13.6	8.2	3.2	1.5
KS-FriedrichEbertStrasse	29.7	15.8	13.9	8.3	2.9	1.7
KS-FrankfurterStrasse247	30.6	16.1	14.5	8.8	4.6	0.6
KS-FrankfurterStrasse102	30.6	15.9	14.7	8.2	3.5	1.3
KS-Fünffensterstrasse	29.5	15.8	13.7	8.1	3.5	1.3
KS-HollaendischeStrasse157	26.7	15.9	10.8	6.2	2.1	0.7
KS-HollaendischeStrasse28	29.1	15.7	13.4	8.1	3.0	1.5
KS-IhringshaeuserStrasse	28.0	15.8	12.2	7.4	2.8	0.9
FI-VeckerhagenerStrasse	24.1	16.3	7.8	4.4	2.3	0.3
KS-Kohlenstrasse	28.9	15.9	13.0	7.6	2.4	1.7
KS-LeipzigerStrasse	29.9	16.1	13.8	8.9	5.3	0.4
KS-Mauerstrasse	29.5	15.8	13.7	8.2	2.9	1.6
KS-ObervellmarerStrasse	24.9	16.5	8.4	4.9	1.2	0.7
LO-OchshaeuserDorfstrasse	31.4	16.4	15.0	11.8	9.2	0.1
NS-HannoverscheStrasse	29.9	16.1	13.8	9.7	6.2	0.3
KS-SchoenfelderStrasse50	29.7	15.9	13.8	8.1	2.9	1.6
KS-SchoenfelderStrasse6	29.7	15.9	13.8	8.1	2.9	1.6
KS-SchoenfelderStrasse6a	29.7	15.9	13.8	8.1	2.9	1.6
KS-Tischbeinstrasse	29.9	15.8	14.1	8.4	3.2	1.5
KS-Weserstrasse	28.8	15.8	13.0	7.8	3.2	1.2
KS-WilhelmshoeherAllee	26.8	16.2	10.6	6.2	1.9	1.5
KS-WolfhagerStrasse	28.1	15.9	12.2	6.8	2.1	1.3
KS-Ysenburgstrasse	28.8	15.8	13.0	7.8	3.2	1.2
Mittel	28.6	16.1	12.5	7.6	3.4	1.1

Tabelle 27: Berechnete NO₂-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Absoluter Beitrag des Ferntransports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, aller Verkehrsemissionen (Kfz), der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt. Weitere Erläuterungen im Text.

NO ₂ , %	Vorbelastung	Hintergrund	Gesamtbeitrag	Anteil	Anteil	Anteil
			Emissionen Nest 3	Kfz	BAB	Kfz City
KS-Adenauerstrasse	23.8	74.4	25.6	14.7	10.5	1.7
BA-Altenritterstrasse	27.9	63.1	36.9	22.6	18.3	0.4
KS-Bruederstrasse	29.4	53.7	46.3	27.9	10.9	5.1
KS-FriedrichEbertStrasse	29.7	53.2	46.8	27.9	9.8	5.7
KS-FrankfurterStrasse247	30.6	52.6	47.4	28.8	15.0	2.0
KS-FrankfurterStrasse102	30.6	52.0	48.0	26.8	11.4	4.2
KS-Fünffensterstrasse	29.5	53.6	46.4	27.5	11.9	4.4
KS-HollaendischeStrasse157	26.7	59.6	40.4	23.2	7.9	2.6
KS-HollaendischeStrasse28	29.1	54.0	46.0	27.8	10.3	5.2
KS-IhringshaeuserStrasse	28.0	56.4	43.6	26.4	10.0	3.2
FI-VeckerhagenerStrasse	24.1	67.6	32.4	18.3	9.5	1.2
KS-Kohlenstrasse	28.9	55.0	45.0	26.3	8.3	5.9
KS-LeipzigerStrasse	29.9	53.8	46.2	29.8	17.7	1.3
KS-Mauerstrasse	29.5	53.6	46.4	27.8	9.8	5.4
KS-ObervellmarerStrasse	24.9	66.3	33.7	19.7	4.8	2.8
LO-OchshaeuserDorfstrasse	31.4	52.2	47.8	37.6	29.3	0.3
NS-HannoverscheStrasse	29.9	53.8	46.2	32.4	20.7	1.0
KS-SchoenfelderStrasse50	29.7	53.5	46.5	27.3	9.8	5.4
KS-SchoenfelderStrasse6	29.7	53.5	46.5	27.3	9.8	5.4
KS-SchoenfelderStrasse6a	29.7	53.5	46.5	27.3	9.8	5.4
KS-Tischbeinstrasse	29.9	52.8	47.2	28.1	10.7	5.0
KS-Weserstrasse	28.8	54.9	45.1	27.1	11.1	4.2
KS-WilhelmshoeherAllee	26.8	60.4	39.6	23.1	7.1	5.6
KS-WolfhagerStrasse	28.1	56.6	43.4	24.2	7.5	4.6
KS-Ysenburgstrasse	28.8	54.9	45.1	27.1	11.1	4.2
	28.6	56.6	43.4	26.3	11.7	3.7

Tabelle 28: Berechnete NO₂-Vorbelastung (in µg/m³) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) des Ferntransports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, aller Verkehrsemissionen (Kfz), der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt. Weitere Erläuterungen im Text.

NO ₂ µg/m ³	Beitrag Kfz	Beitrag BAB (%)	Beitrag 50% Kfz City (%)
KS-Adenauerstrasse	3.5	71.4	11.4
BA-Altenritterstrasse	6.3	81.0	1.6
KS-Bruederstrasse	8.2	39.0	18.3
KS-FriedrichEbertStrasse	8.3	34.9	20.5
KS-FrankfurterStrasse247	8.8	52.3	6.8
KS-FrankfurterStrasse102	8.2	42.7	15.9
KS-Fünffensterstrasse	8.1	43.2	16.0
KS-HollaendischeStrasse157	6.2	33.9	11.3
KS-HollaendischeStrasse28	8.1	37.0	18.5
KS-IhringshaeuserStrasse	7.4	37.8	12.2
FI-VeckerhagenerStrasse	4.4	52.3	6.8
KS-Kohlenstrasse	7.6	31.6	22.4
KS-LeipzigerStrasse	8.9	59.6	4.5
KS-Mauerstrasse	8.2	35.4	19.5
KS-ObervellmarerStrasse	4.9	24.5	14.3
LO-OchshaeuserDorfstrasse	11.8	78.0	0.8
NS-HannoverscheStrasse	9.7	63.9	3.1
KS-SchoenfelderStrasse50	8.1	35.8	19.8
KS-SchoenfelderStrasse6	8.1	35.8	19.8
KS-SchoenfelderStrasse6a	8.1	35.8	19.8
KS-Tischbeinstrasse	8.4	38.1	17.9
KS-Weserstrasse	7.8	41.0	15.4
KS-WilhelmshoeherAllee	6.2	30.6	24.2
KS-WolfhagerStrasse	6.8	30.9	19.1
KS-Ysenburgstrasse	7.8	41.0	15.4
Mittel	7.6	44.3	14.2

Tabelle 29: Berechneter NO₂-Anteil (Jahresmittelwert in µg/m³) der Verkehrsemissionen an der Vorbelastung für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt zum Verkehrsanteil. Weitere Erläuterungen im Text.

PM10 µg/m3	Vorbelastung	Hintergrund	Gesamtbeitrag			
			Emissionen Nest 3	Anteil Kfz	Anteil BAB	Anteil 50% Kfz City
KS-Adenauerstrasse	28.5	26.0	2.5	0.6	0.5	0.1
BA-Altenritterstrasse	29.2	25.9	3.3	1.2	1.0	0.1
KS-Bruederstrasse	31.1	25.7	5.4	1.5	0.6	0.3
KS-FriedrichEbertStrasse	31.6	25.8	5.8	1.6	0.6	0.3
KS-FrankfurterStrasse247	31.6	25.9	5.7	1.8	1.0	0.1
KS-FrankfurterStrasse102	31.6	25.9	5.7	1.6	0.7	0.2
KS-Fünffensterstrasse	31.2	25.8	5.4	1.5	0.7	0.2
KS-HollaendischeStrasse157	30.3	25.6	4.7	1.2	0.5	0.1
KS-HollaendischeStrasse28	31.1	25.7	5.4	1.5	0.6	0.3
KS-IhringshaeuserStrasse	30.6	25.6	5.0	1.4	0.6	0.1
FI-VeckerhagenerStrasse	28.7	25.5	3.2	0.8	0.4	0.1
KS-Kohlenstrasse	31.5	25.9	5.6	1.5	0.6	0.3
KS-LeipzigerStrasse	30.7	25.7	5.0	1.6	1.0	0.1
KS-Mauerstrasse	31.4	25.7	5.7	1.6	0.6	0.3
KS-ObervellmarerStrasse	29.7	25.8	3.9	1.0	0.3	0.1
LO-OchshaeuserDorfstrasse	30.3	25.5	4.8	2.5	2.0	0.1
NS-HannoverscheStrasse	30.2	25.5	4.7	1.9	1.2	0.1
KS-SchoenfelderStrasse50	31.7	25.9	5.8	1.6	0.6	0.3
KS-SchoenfelderStrasse6	31.7	25.9	5.8	1.6	0.6	0.3
KS-SchoenfelderStrasse6a	31.7	25.9	5.8	1.6	0.6	0.3
KS-Tischbeinstrasse	31.6	25.8	5.8	1.6	0.7	0.3
KS-Weserstrasse	30.8	25.6	5.2	1.5	0.7	0.2
KS-WilhelmshoeherAllee	30.6	25.8	4.8	1.2	0.5	0.3
KS-WolfhagerStrasse	31.1	25.8	5.3	1.3	0.5	0.2
KS-Ysenburgstrasse	30.8	25.6	5.2	1.5	0.7	0.2
	30.8	25.8	5.0	1.5	0.7	0.2

Tabelle 30: Berechnete PM10-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Absoluter Beitrag des Ferntransports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, aller Verkehrsemissionen (Kfz), der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt. Weitere Erläuterungen im Text.

PM10, %	Vorbelastung	Hintergrund	Gesamtbeitrag			
			Emissionen Nest 3	Anteil Kfz	Anteil BAB	Anteil 50% Kfz City
KS-Adenauerstrasse	28.5	91.2	8.8	2.1	1.8	0.4
BA-Altenritterstrasse	29.2	88.7	11.3	4.1	3.4	0.3
KS-Bruederstrasse	31.1	82.6	17.4	4.8	1.9	1.0
KS-FriedrichEbertStrasse	31.6	81.6	18.4	5.1	1.9	0.9
KS-FrankfurterStrasse247	31.6	82.0	18.0	5.7	3.2	0.3
KS-FrankfurterStrasse102	31.6	82.0	18.0	5.1	2.2	0.6
KS-Fünffensterstrasse	31.2	82.7	17.3	4.8	2.2	0.6
KS-HollaendischeStrasse157	30.3	84.5	15.5	4.0	1.7	0.3
KS-HollaendischeStrasse28	31.1	82.6	17.4	4.8	1.9	1.0
KS-IhringshaeuserStrasse	30.6	83.7	16.3	4.6	2.0	0.3
FI-VeckerhagenerStrasse	28.7	88.9	11.1	2.8	1.4	0.3
KS-Kohlenstrasse	31.5	82.2	17.8	4.8	1.9	1.0
KS-LeipzigerStrasse	30.7	83.7	16.3	5.2	3.3	0.3
KS-Mauerstrasse	31.4	81.8	18.2	5.1	1.9	1.0
KS-ObervellmarerStrasse	29.7	86.9	13.1	3.4	1.0	0.3
LO-OchshaeuserDorfstrasse	30.3	84.2	15.8	8.3	6.6	0.3
NS-HannoverscheStrasse	30.2	84.4	15.6	6.3	4.0	0.3
KS-SchoenfelderStrasse50	31.7	81.7	18.3	5.0	1.9	0.9
KS-SchoenfelderStrasse6	31.7	81.7	18.3	5.0	1.9	0.9
KS-SchoenfelderStrasse6a	31.7	81.7	18.3	5.0	1.9	0.9
KS-Tischbeinstrasse	31.6	81.6	18.4	5.1	2.2	0.9
KS-Weserstrasse	30.8	83.1	16.9	4.9	2.3	0.6
KS-WilhelmshoerAllee	30.6	84.3	15.7	3.9	1.6	1.0
KS-WolfhagerStrasse	31.1	83.0	17.0	4.2	1.6	0.6
KS-Ysenburgstrasse	30.8	83.1	16.9	4.9	2.3	0.6
Mittel	30.8	83.8	16.2	4.8	2.3	0.6

Tabelle 31: Berechnete PM10-Vorbelastung (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) des Ferntransports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, aller Verkehrsemissionen (Kfz), der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt. Weitere Erläuterungen im Text.

PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Beitrag Kfz	Beitrag BAB	Beitrag 50% Kfz City
KS-Adenauerstrasse	0.6	83.3	6.7
BA-Altenritterstrasse	1.2	83.3	8.3
KS-Bruederstrasse	1.5	40.0	20.0
KS-FriedrichEbertStrasse	1.6	37.5	18.8
KS-FrankfurterStrasse247	1.8	55.6	5.6
KS-FrankfurterStrasse102	1.6	43.8	12.5
KS-Fünffensterstrasse	1.5	46.7	13.3
KS-HollaendischeStrasse157	1.2	41.7	8.3
KS-HollaendischeStrasse28	1.5	40.0	20.0
KS-IhringshaeuserStrasse	1.4	42.9	7.1
FI-VeckerhagenerStrasse	0.8	50.0	12.5
KS-Kohlenstrasse	1.5	40.0	20.0
KS-LeipzigerStrasse	1.6	62.5	6.2
KS-Mauerstrasse	1.6	37.5	18.7
KS-ObervellmarerStrasse	1.0	30.0	10.0
LO-OchshaeuserDorfstrasse	2.5	80.0	4.0
NS-HannoverscheStrasse	1.9	63.2	5.3
KS-SchoenfelderStrasse50	1.6	37.5	18.8
KS-SchoenfelderStrasse6	1.6	37.5	18.8
KS-SchoenfelderStrasse6a	1.6	37.5	18.8
KS-Tischbeinstrasse	1.6	43.8	18.8
KS-Weserstrasse	1.5	46.7	13.3
KS-WilhelmshoeherAllee	1.2	41.7	25.0
KS-WolfhagerStrasse	1.3	38.5	15.4
KS-Ysenburgstrasse	1.5	46.7	13.3
Mittel	1.5	48.3	13.6

Tabelle 32: Berechneter PM10-Anteil (Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) der Verkehrsemissionen an der Vorbelastung für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt zum Verkehrsanteil. Weitere Erläuterungen im Text.

4.9 Das CLE/NEC-Szenario

Die emissionsseitigen Randbedingungen dieses Szenario sind im Detail in Kap. 2.5.2 beschrieben. Im Gegensatz zu den anderen Szenarien, die auf Nest 3 beschränkt wurden, wurden die auf dem CLE/NEC-Szenario beruhenden Emissionsänderungen auf ganz Europa angewandt. Dies bedeutet, dass die Szenario-Berechnungen für alle Untersuchungsgebiete durchgeführt werden mussten, um den Randbedingungen für die Nester 1, 2 und 3 die Emissionsbedingungen des CLE/NEC-Szenarios aufzuprägen.

Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen die NO_2 - bzw. PM_{10} -Jahresmittelwerte, die sich unter den Emissionsbedingungen des NEC/CLE2010-Szenarios im Raum Kassel einstellen würden. Ebenfalls abgebildet sind die absoluten und relativen Immissionsänderungen vom Ist-Zustand nach 2010. Nach den Berechnungen sinken die NO_2 -Jahresmittelwerte bis 2010 zwischen 6 und $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 22 bis 30%. Für PM_{10} liegen die Abnahmen zwischen 4 und $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oder 14 bis 17%. Die bis 2010 zu erwartenden PM_{10} -Abnahmen infolge der europaweiten Emissionsänderungen entsprechend dem NEC/CLE-Szenario sind in ihrer Wirkung außerhalb des direkten Einflussbereichs der Autobahnen vergleichbar mit dem Szenario „Keine Emissionen im Nest 3“ (Abbildung 34) obwohl die mittlere Emissionsabnahme in Deutschland nach dem NEC/CLE-Szenario für PM_{10} nur circa 14%, für NO_x nur circa 32%, und für SO_2 nur circa 30% beträgt (siehe Kap. 2.5.2). Dieser Umstand zeigt deutlich, dass die PM_{10} -Immissionen durch großräumige Maßnahmen entscheidend gesenkt werden können, da die sekundären Aerosole, die einen Großteil des PM_{10} bilden, nicht im Rezeptorgebiet gebildet werden. Beim NO_2 ist der ferntransportierte Anteil geringer, dementsprechend hat die komplette Abschaltung der Emissionen im Nest 3 eine größere Auswirkung als die europaweite Absenkung der Emissionen auf das zu erwartende Emissionsniveau unter den Bedingungen des NEC/CLE-Szenarios (vergleiche Abbildung 33 mit Abbildung 45).

In der Tabelle 33 und der Tabelle 34 sind die berechneten Vorbelastungen für die 25 Straßenräume unter den Emissionsbedingungen des Ist-Zustands (Basislauf) sowie den Emissionsbedingungen des NEC/CLE-Szenarios 2010 zusammengestellt. Im Mittel bewirkt die Emissionsabsenkung bis 2010 eine Abnahme der PM_{10} -Vorbelastung um circa 4 bis $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der NO_2 -Vorbelastung um 6.5 bis $8.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Auswirkungen der Absenkung der Vorbelastung auf die Immissionen in den Straßenschluchten kann in dem Beitrag der Fa. IVU-Umwelt gefunden werden.

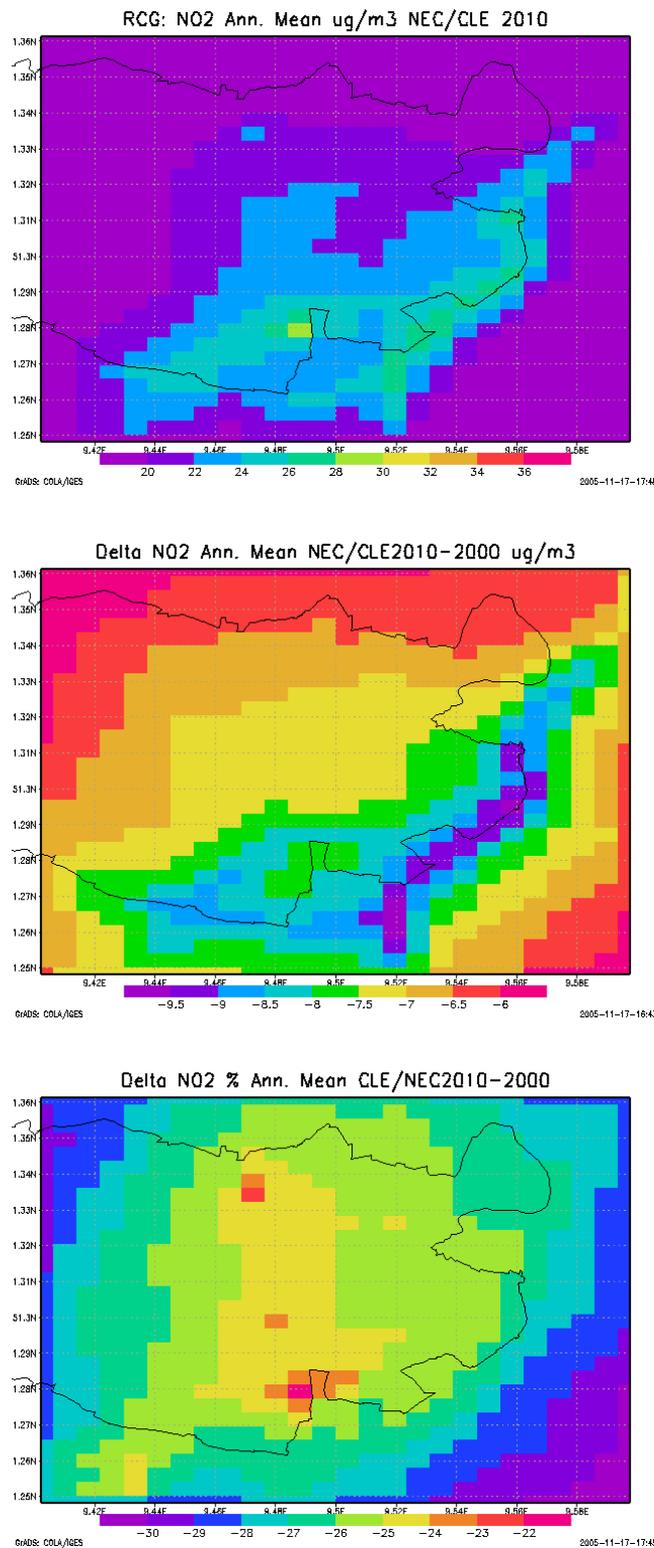


Abbildung 45: Oben: Berechneter NO₂-Jahresmittelwert in µg/m³ in Kassel, Nest 3 für das NEC/CLE-Szenario 2010. Mitte und unten: Änderung im Nest 3 in µg/m³ und % bezogen auf den Istzustand (Basislauf 2003, siehe Abbildung 22).

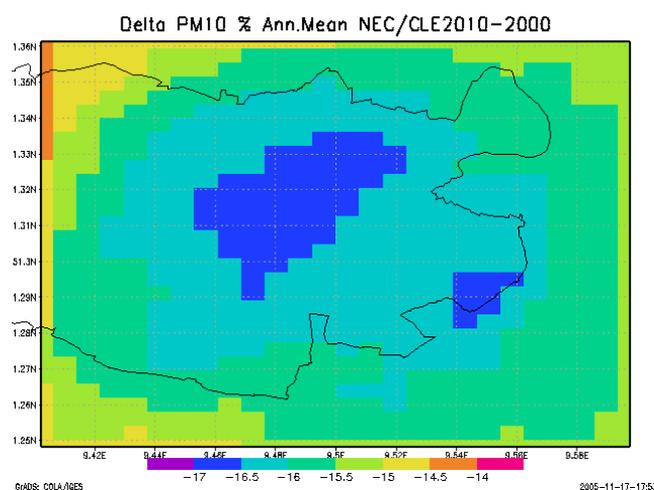
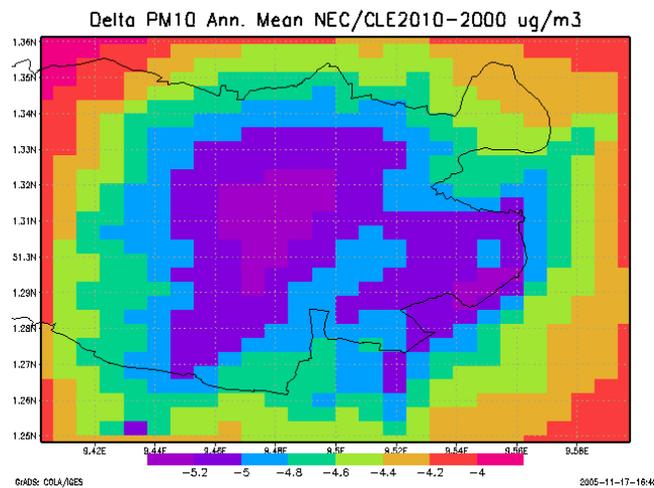
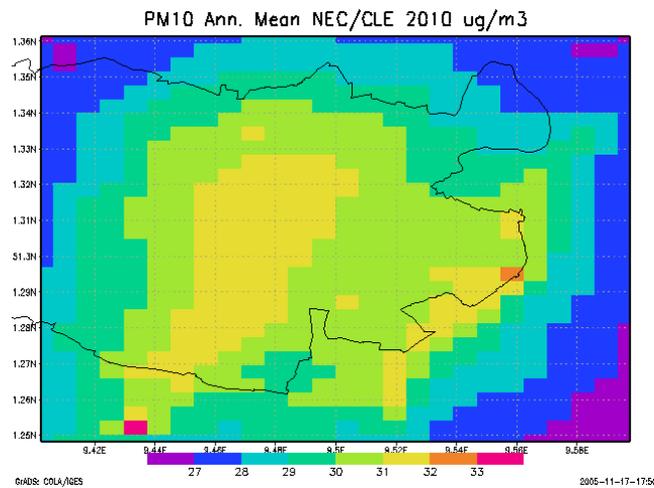


Abbildung 46: Oben: Berechneter PM10-Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Kassel, Nest 3 für das NEC/CLE-Szenario 2010. Mitte und unten: Änderung im Nest 3 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und % bezogen auf den Istzustand (Basislauf 2003, siehe Abbildung 23).

NO ₂	Vorbelastung Istzustand µg/m ³	Vorbelastung CLE/NEC 2010 µg/m ³	Änderung µg/m ³	Änderung %
KSAdenauerstrasse	23.8	17.3	-6.5	-27.3
BAAltenritterstrasse	27.9	20.7	-7.2	-25.8
KSBruederstrasse	29.4	22.1	-7.3	-24.8
KSFriedrichEbertStrasse	29.7	22.3	-7.4	-24.9
KSFrankfurterStrasse247	30.6	23.0	-7.6	-24.8
KSFrankfurterStrasse102	30.6	23.2	-7.4	-24.2
KSFünffensterstrasse	29.5	22.2	-7.3	-24.7
KSHollaendischeStrasse157	26.7	20.0	-6.7	-25.1
KSHollaendischeStrasse28	29.1	21.8	-7.3	-25.1
KSIhringshaeuserStrasse	28.0	20.9	-7.1	-25.4
FIVeckerhagenerStrasse	24.1	17.9	-6.2	-25.7
KSKohlenstrasse	28.9	21.7	-7.2	-24.9
KSLeipzigerStrasse	29.9	22.3	-7.6	-25.4
KSMauerstrasse	29.5	22.2	-7.3	-24.7
KSObervellmarerStrasse	24.9	18.3	-6.6	-26.5
LOOchshaeuserDorfstrasse	31.4	22.9	-8.5	-27.1
NSHannoverscheStrasse	29.9	22.3	-7.6	-25.4
KSSchoenfelderStrasse50	29.7	22.3	-7.4	-24.9
KSSchoenfelderStrasse6	29.7	22.3	-7.4	-24.9
KSSchoenfelderStrasse6a	29.7	22.3	-7.4	-24.9
KSTischbeinstrasse	29.9	22.5	-7.4	-24.7
KSWeserstrasse	28.8	21.5	-7.3	-25.3
KSWilhelmshoeherAllee	26.8	19.8	-7.0	-26.1
KSWolfhagerStrasse	28.1	21.1	-7.0	-24.9
KSYsenburgstrasse	28.8	21.5	-7.3	-25.3
Mittel	28.6	21.4	-7.2	-25.3

Tabelle 33: Berechnete NO₂-Vorbelastung für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3, unter den Emissionsbedingungen des Istzustandes (Basislauf) und den Emissionsbedingungen NEC/CLE 2010. Absolute und Relative Änderung der Vorbelastung vom Istzustand nach 2010.

PM10	Vorbelastung Istzustand µg/m3	Vorbelastung CLE/NEC 2010 µg/m3	Änderung µg/m3	Änderung %
KSAdenauerstrasse	28.5	24.1	-4.4	-15.4
BAAltenritterstrasse	29.2	24.7	-4.5	-15.4
KSBruederstrasse	31.1	26.0	-5.1	-16.4
KSFriedrichEbertStrasse	31.6	26.3	-5.3	-16.8
KSFrankfurterStrasse247	31.6	26.4	-5.2	-16.5
KSFrankfurterStrasse102	31.6	26.4	-5.2	-16.5
KSFünffensterstrasse	31.2	26.0	-5.2	-16.7
KSHollaendischeStrasse157	30.3	25.3	-5.0	-16.5
KSHollaendischeStrasse28	31.1	25.9	-5.2	-16.7
KSIhringshaeuserStrasse	30.6	25.5	-5.1	-16.7
FIVeckerhagenerStrasse	28.7	24.2	-4.5	-15.7
KSKohlenstrasse	31.5	26.3	-5.2	-16.5
KSLeipzigerStrasse	30.7	25.7	-5.0	-16.3
KSMauerstrasse	31.4	26.2	-5.2	-16.6
KSObervellmarerStrasse	29.7	25.0	-4.7	-15.8
LOOchshaeuserDorfstrasse	30.3	25.3	-5.0	-16.5
NSHannoverscheStrasse	30.2	25.3	-4.9	-16.2
KSSchoenfelderStrasse50	31.7	26.4	-5.3	-16.7
KSSchoenfelderStrasse6	31.7	26.4	-5.3	-16.7
KSSchoenfelderStrasse6a	31.7	26.4	-5.3	-16.7
KSTischbeinstrasse	31.6	26.3	-5.3	-16.8
KSWeserstrasse	30.8	25.7	-5.1	-16.6
KSWilhelmshoeherAllee	30.6	25.6	-5.0	-16.3
KSWolfhagerStrasse	31.1	26.0	-5.1	-16.4
KSYsenburgstrasse	30.8	25.7	-5.1	-16.6
Mittel	30.8	25.7	-5.0	-16.4

Tabelle 34: Berechnete PM10-Vorbelastung für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3, unter den Emissionsbedingungen des Istzustandes (Basislauf) und den Emissionsbedingungen NEC/CLE 2010. Absolute und Relative Änderung der Vorbelastung vom Istzustand nach 2010.

5 Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt die Anwendung des chemischen Transportmodells REM-CALGRID (RCG) auf die Region Kassel. Das Modell wurde eingesetzt, um für das Bezugsjahr 2003 für 25 Straßen die zur Anwendung des Straßenschluchtmodells CPB notwendigen Vorbelastungskonzentrationen von NO, NO₂, PM10 und Ozon zu liefern.

Weiterhin wurden zur Ursachenanalyse eine Reihe grundlegender Emissionsszenarien auf ihre immissionsseitigen Auswirkungen im Raum Kassel untersucht. Es wurden folgende Szenarien berechnet:

- Keine Emissionen
- Keine Emissionen der Verursachergruppe Hausbrand
- Keine Emissionen der Verursachergruppe Straßenverkehr
- Keine Emissionen der Verursachergruppe Industrie und Kraftwerke
- Keine Autobahn-Emissionen im Osten und Süden von Kassel
- Kfz- Emissionen im Innenstadtbereich halbiert

Neben diesen lokalen Szenarien wurden europaweite Szenarienrechnungen zur zukünftigen Emissionsentwicklung bis 2010 durchgeführt.

Die RCG-Anwendung erfolgte genestet in 4 Gebieten mit ansteigender horizontaler Auflösung:

- Europa (Nest 0),
- Deutschland (Nest 1),
- Großraum Kassel mit Umgebung (Nest 2),
- Stadtgebiet Kassel (Nest 3)

Die berechneten Konzentrationen in den 25 ausgewählten Straßenräumen im Gebiet Kassel wurden bezüglich ihrer Herkunft aufgeschlüsselt. Den größten Beitrag zu der PM10-Gesamtbelastung liefern die sekundären Aerosole, die zum überwiegenden Teil außerhalb des Stadtgebiets von Kassel gebildet und dann in die Stadt transportiert werden. Je nach Straßenraum stellen sie zwischen 40% und 62% der PM10-Gesamtbelastung. Dieser Teil des PM10 kann mit lokalen Maßnahmen kaum beeinflusst werden. Die direkt emittierten primären PM10-Anteile stellen den zweitgrößten Anteil an den Gesamtkonzentrationen.

Im Mittel stammen beim PM10 circa 26 µg/m³ der Vorbelastung aus dem Hintergrund, d.h. aus Emissionen außerhalb von Nest 3 (Stadtgebiet von Kassel). Der Stadtbeitrag liegt circa bei 5 µg/m³ (Stadtanteil aus den Emissionen des Nestes 3). Der Straßenbeitrag, berechnet mit dem CPB-Modell (Zusatzbelastung), schwankt in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke und der Bebauung zwischen 2 und 18 µg/m³. Beim NO₂ beträgt der Anteil des Hintergrunds (Ferntransport) an der Vorbelastung circa 16 µg/m³, der Stadtbeitrag liegt bei 12 µg/m³ (Stadtanteil aus den Emissionen des Nestes 3), der Straßenbeitrag zwischen 5 und 25 µg/m³.

Im Schnitt stammen damit circa 2/3 der PM10-Gesamtbelastung (Primäre+Sekundäre Aerosole) in den ausgewählten Straßen aus Emissionsgebieten außerhalb des lokalen Einzugsbereichs von Kassel. Damit sind nur circa 1/3 der Belastung (städtische Vorbelastung und Straßenbeitrag) durch lokale Maßnahmen zu beeinflussen. Beim NO₂ ist es eher umgekehrt: Im

Mittel sind circa 60% der Belastung auch lokalen Maßnahmen zugänglich und nur 40% der Belastung kann dem Hintergrund (Ferntransport) zugeschrieben werden.

Die mit dem RCG-Modell berechnete Vorbelastung wurde hinsichtlich ihrer lokalen Verursacher (Emissionen im Nest 3) aufgeschlüsselt. Es werden nur zwischen 25 und 47 % der NO₂-Vorbelastung über den betrachteten Straßenschluchten durch die Emissionen im Untersuchungsgebiet (Nest 3) erklärt. Von den 3 untersuchten Quellgruppen Verkehr, Industrie und Hausbrand stellt der Verkehr mit Abstand den höchsten Beitrag zur Vorbelastung. Der Beitrag der NO_x-Emissionen innerhalb des Nestes 3 zu den NO₂-Immissionen ist deutlich höher als der Beitrag der PM₁₀-Emissionen zu den PM₁₀-Immissionen. Beim PM₁₀ tragen die Emissionen im Gebiet nur zwischen 8 und 19% zur Vorbelastung an den ausgewählten Straßen bei. Im Mittel stammen über 80% der PM₁₀-Vorbelastung aus Quellen außerhalb des Nestes 3. Auch beim PM₁₀ stellt der Kfz-Verkehr im Nest 3 den größten Einzelbeitrag zur Vorbelastung, gefolgt vom Hausbrand.

Im Mittel ist der Beitrag der Verkehrsemissionen im Nest 3 zu den NO₂-Vorbelastungen circa 6x höher, der des Hausbrands circa 2x höher als der Beitrag der Industrie. Beim PM₁₀ ergeben sich zwischen Industrie und Hausbrand ähnliche Relationen wie beim NO₂, der Kfz-Anteil ist etwas niedriger. Naturgemäß hängt der Beitrag der Industrie sehr stark von der geographischen Lage der Anlagen und der betrachteten Straßen ab.

Die Autobahnemissionen tragen im Mittel circa 44% zu dem vom Verkehr im Nest 3 verursachten NO₂-Immissionsanteil bei. Im Einzelfall schwankt der Beitrag zwischen circa 25% (Obervellmarer Strasse) und 78% (Ochshaeuser Dorfstrasse). An der gesamten NO₂-Vorbelastung tragen die Autobahnemissionen zwischen circa 4% (Obervellmarer Strasse) und 29% (Ochshaeuser Dorfstrasse) bei. Für die Hälfte der Kfz-Emissionen in der Kasseler Innenstadt wird in der Innenstadt ein NO₂-Beitrag zwischen 10 und 25% zur vom Verkehr verursachten Vorbelastung berechnet. An der gesamten Vorbelastung ist dieser Beitrag mit 5 bis 6% deutlich niedriger.

Absolut betrachtet ist der PM₁₀-Beitrag des Straßenverkehrs sehr viel niedriger als der NO₂-Beitrag. Die prozentualen Anteile der Autobahnemissionen bzw. der Kfz-Emissionen in der Kasseler Innenstadt an der gesamten vom Verkehr verursachten Vorbelastung sind aber vergleichbar.

Neben den lokalen Emissionsszenarien, bei denen lediglich die Emissionen im Nest 3 verändert wurden, erfolgte auch die Berechnung eines europaweiten Szenarios. Dazu wurde in allen Untersuchungsgebieten (Europa, Deutschland, Großraum Kassel und Umgebung, sowie Kassel) ein Szenario-Lauf unter den angenommenen Emissionsbedingungen für 2010 durchgeführt. Grundlage der Emissionsabschätzung 2010 bildete das so genannte CLE-Szenario („Current legislation“), das die Umsetzung bereits heute festgeschriebener Maßnahmen für das Jahr 2010 betrachtet. Diese Angaben wurden für Deutschland zusätzlich pauschal auf die nationalen Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie (Amtsblatt der EU C375/1 vom 28.12. 2000) gesetzt, unter Beibehaltung der durch das CLE-Szenario vorgegebenen Emissionsstruktur. Nach den Berechnungen sinken für das NEC/CLE-Szenario die NO₂-Jahresmittelwerte bis 2010 in Kassel zwischen 6 und 10 µg/m³ oder 22 bis 30%. Für PM₁₀ liegen die Abnahmen zwischen 4 und 5.5 µg/m³ oder 14 bis 17%.

6 Literatur

- Düring, I., Lambrecht, U., Peranic, Z., Weber, G., Lohmeyer, A. (2002). Determination of „non-exhaust“ PM10 emissions of roads on the basis of the results of the roadside air quality monitoring of the German states. Particles in the size of 2.5 to 10 microns in urban areas. Workshop in support of the Clean Air for Europe (CAFE) programme of DG ENV in Berlin, Germany, November 4-6, 2002. www.trumpf.fu-berlin.de/veranstaltungen
- EU (1996). Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27.9.1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 296/55 vom 21.11. 1996
- EU (1999). Richtlinie 1999/30/EG des Rats vom 22.4.1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 163/41 vom 29.6. 1999.
- EU (2000). Richtlinie 2000/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rats vom 16.11.2000 über Grenzwerte für Benzol und Kohlenmonoxid in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 313/12 vom 13.12. 2000.
- EU (2002). Richtlinie 2002/3/EG des Europäischen Parlaments und des Rats vom 12.2.2002 über den Ozongehalt der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 67/14 vom 9.3. 2002.
- Hanna S.R. und Paine R.J. (1989). Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) Development and Evaluation. J. of Appl. Met., Vol.28, pp. 206-224
- Ingenieurbüro Janicke (2003). AUSTAL2000 Programmbeschreibung zu Version 1.0. Stand 2003-02-09. Entwicklung eines modellgestützten Beurteilungssystems für den anlagenbezogenen Immissionsschutz. UBA F&E-Bericht 200 43 256.
- IVU-Umwelt und TRUMF (2004) Ausbreitungsrechnungen als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main. Bericht für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie. IVU-Umwelt GmbH und Arbeitsgruppe Troposphärische Umweltforschung am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.
- Kerschbaumer, A. und Reimer, E. (2003). Erstellung der Meteorologischen Eingangsdaten für das REM/CALGRID-Modell: Modellregion Berlin-Brandenburg. Abschlussbericht zum UBA-Forschungsvorhaben FE-Vorhaben 299 43 246. Freie Universität Berlin. Institut für Meteorologie.
- Kerschbaumer, A., Stern, R. und Reimer, E. (2005) Untersuchung des Potentials und der Umsetzbarkeit von Maßnahmen und der damit erzielbaren Minderungen der Feinstaub- und Stickoxidemissionen in Berlin. Bericht für die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin. Freie Universität Berlin. Institut für Meteorologie.
- Lambrecht, U. und Helms, H. (2004) Luftschadstoffemissionen von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen der Landwirtschaft, der Bauwirtschaft und weiterer Sektoren. Immissionsschutz 2004, S.17-22.
- Motz, G., Hartmann, A., Plinke, E., Stern, R., Scherer, B., Fath, J., Reimer, E., Memmesheimer, M., Tippke, J., Ebel, A. (1997). Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon: Ermittlung und Bewertung der Effekte von lokalen, regionalen und überregionalen Emissionsminderungs-Strategien auf bodennahe Ozonkonzentrationen in hochsommerlichen Episoden mit Hilfe modellgestützter emissions- und immissionsseitiger Wirkungsanalysen. Kurzfassung. Im Auftrag des Umweltbundesamts. www.umweltbundesamt.de/ozon.
- Ostmann, C., Stern, R., Wiegand, G. (1996). Canyon Plume Box Modell, Version 3 ,Release 8, Handbuch. IVU Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung mbH. Abschlussbericht zum FE-Vorhaben 104 02 811 des Umweltbundesamts, Berlin.

- Reimer E. und Scherer B. (1992). An operational meteorological diagnostic system for regional air pollution analysis and long-term modelling. *Air Poll. Modelling and its Applications IX*. Plenum Press
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2005) Luftreinhalte- und Aktionsplan für Berlin 2005-2010.
- Stern, R., Kerschbaumer, A., Fath, J., (2003). Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID auf die Region Berlin-Brandenburg. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 29943 246 auf dem Gebiet des Umweltschutzes „Entwicklung eines Modellsystems für das Zusammenspiel von Messung und Rechnung für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität“.
- Stern, R. (2003a). Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“.
- Stern, R. (2003b). Erstellung einer europaweiten Emissionsdatenbasis mit Bezugsjahr 1995 und die Erarbeitung von Emissionsszenarien für die großräumigen Ausbreitungsrechnungen mit REM/CALGRID. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“.
- Stern, R. (1994). Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen photochemischen Ausbreitungsmodells mit verschiedenen chemischen Mechanismen, *Meteorologische Abhandlungen Serie A Band 8, Heft 1* (1994). Verlag von Dietrich Reimer, Berlin.
- Van Ulden A.P. und Holtslag A.A.M. (1985). Estimation of Atmospheric Boundary Layer Parameters for Diffusion Applications. *J. Climate and Appl. Meteor.*, Vol.24, No.11, pp. 1196-1207.
- Visscherdijk, A. und Van der Gon, D. (2005) Gridded European anthropogenic emission data for NO_x, SO₂, NMVOC, NH₃, CO, PM₁₀, PM_{2.5} and CH₄ for the year 2000. TNO-report B&O-A R 2005/106
- Yamartino, R. J., Wiegand, G.: Development and Evaluation of Simple Models for the Flow, Turbulence and Pollutant Concentration Fields within an Urban Street Canyon; *Atmospheric Environment* Vol.20, No.11, pp 2137-2156; 1986
- Yamartino, R., et al. (1989). A mesoscale photochemical grid model. Model formulation. *Atm. Env.* 26A, pp.1493-1512.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Großräumiges RCG-Modellgebiet mit einer Maschenweite von 0.25° Breite und 0.5° Länge.....	7
Abbildung 2 : RCG-Modellgebiet für Deutschland mit einer Maschenweite von 0.125° Breite und 0.25° Länge. In dieses Gitter wird direkt das Nest 2 für den Großraum Kassel und Umgebung eingepasst.	8
Abbildung 3: Untersuchungsgebiet Ballungsraum Kassel. Nest 2 (rote Gitterlinien) und Nest 3 (grüne Gitterlinien). Die hellblau gekennzeichneten Gitter zeigen das eigentliche Stadtgebiet von Kassel. Zu den geographischen Grenzen und Gittergrößen siehe Tabelle 1.	10
Abbildung 4: Topographie in den Rastern des Untersuchungsgebiets Kassel, Nest 2. Zu den geographischen Grenzen und Gittergrößen siehe Tabelle 1.	11
Abbildung 5: Topographie in den Rastern des Untersuchungsgebiets Kassel, Nest 3. Zu den geographischen Grenzen und Gittergrößen siehe Tabelle 1.	11
Abbildung 6: Vorherrschende Landnutzungskategorie in den Rastern des Untersuchungsgebiets Kassel, Nest 2. Dunkelblau: Bebaute Flächen einschließlich Straßen; Hellblau: Landwirtschaftlich genutzte Fläche; grün: Grasland, Weide; gelb: Laubwald; orange: Nadelwald; rot: Mischwald. Zu den geographischen Grenzen und Gittergrößen siehe Tabelle 1.	12
Abbildung 7: Vorherrschende Landnutzungskategorie in den Rastern des Untersuchungsgebiets Kassel, Nest 3. Dunkelblau: Bebaute Flächen einschließlich Straßen; Hellblau: Landwirtschaftlich genutzte Fläche; grün: Grasland, Weide; gelb: Laubwald; orange: Nadelwald; rot: Mischwald. Zu den geographischen Grenzen und Gittergrößen siehe Tabelle 1.	12
Abbildung 8: NO _x -Emissionen im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	20
Abbildung 9: NMHC-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	21
Abbildung 10: CO-Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	21
Abbildung 11: SO ₂ -Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	22
Abbildung 12: PM ₁₀ -Emissionen (t/a) im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	22
Abbildung 13: NO _x -Emissionen des Verkehrs im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	23
Abbildung 14: PM ₁₀ -Emissionen des Verkehrs im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	23
Abbildung 15: NO _x -Emissionen des Hausbrands im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	24
Abbildung 16: PM ₁₀ -Emissionen des Hausbrands im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	24
Abbildung 17: NO _x -Emissionen der Industrie im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	25
Abbildung 18: PM ₁₀ -Emissionen der Industrie im Untersuchungsgebiet Kassel in der Auflösung des Nests 3 nach den Informationen der Tabelle 2.	25
Abbildung 19: Lage von 25 Straßen, für die die Überdach-Konzentrationszeitreihen aus den Ergebnissen der Rechnungen im Nest 3 bereitgestellt werden.	31
Abbildung 20: Berechneter NO ₂ -Jahresmittelwert 2003 in µg/m ³ im Nest 1 in einer Auflösung von 0.25° Länge und 0.125° Breite.	33
Abbildung 21: Berechneter PM ₁₀ -Jahresmittelwert 2003 in µg/m ³ im Nest 1 in einer Auflösung von 0.25° Länge und 0.125° Breite.	33
Abbildung 22: Berechnete NO ₂ -Jahresmittelwerte 2003 in µg/m ³ im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3 mit den Grenzen der Stadt Kassel.	34
Abbildung 23: Berechnete PM ₁₀ -Jahresmittelwerte 2003 in µg/m ³ im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3 mit den Grenzen der Stadt Kassel. PM ₁₀ -Emissionen mit Landwirtschaft und sonstige Quellen.	34
Abbildung 24: NO _x -Emissionen in Kassel, Nest 3 mit den Grenzen der Stadt Kassel.	35
Abbildung 25: PM ₁₀ -Emissionen in Kassel, Nest 3 mit den Grenzen der Stadt Kassel. Emissionsabschätzung unter Einbezug der Landwirtschaft und den sonstigen Quellen (siehe Kap. 2.5.1).	35
Abbildung 26: Berechnete PM ₁₀ -Jahresmittelwerte 2003 in µg/m ³ im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3 mit	

den Grenzen der Stadt Kassel. PM10-Emissionen ohne Landwirtschaft und sonstige Quellen.	36
Abbildung 27: Berechnete und beobachtete PM10-Tagesmittelwerte Kassel, Fünffensterstraße. RCG: Straßenhintergrund. RCG+CPB: Gesamtbelastung in der Straße. Berechnung unter Verwendung der hohen PM10-Emissionsabschätzung (siehe Kap. 2.5.1).....	37
Abbildung 28: Berechnete und beobachtete PM10-Tagesmittelwerte Kassel-Nord. Nur RCG-Ergebnis im Nest 3. Berechnung unter Verwendung der hohen PM10-Emissionsabschätzung (siehe Kap. 2.5.1).	38
Abbildung 29: Berechnete und beobachtete NO ₂ -Tagesmittelwerte Kassel, Fünffensterstraße. RCG: Straßenvorbelastung. RCG+CPB: Gesamtbelastung in der Straße.....	39
Abbildung 30: Berechnete und beobachtete NO ₂ -Tagesmittelwerte Kassel-Nord. RCG-Berechnung im Nest 3.	40
Abbildung 31: Berechnete PM10-Tagesmittelwerte in der Fünffensterstraße, aufgeteilt nach Beitrag aus Hintergrund (Ferntransport, oben), Stadt (Emissionen in Nest 2, Mitte) und Straße (CPB-Berechnung, unten).	52
Abbildung 32: Berechnete PM10-Tagesmittelwerte in der Fünffensterstraße, aufgeteilt nach Beitrag aus Hintergrund und Stadt (oben) und Hintergrund, Stadt und Straße (unten).	53
Abbildung 33: Oben: Berechneter NO ₂ -Jahresmittelwert in µg/m ³ in Kassel, Nest 3 für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null,“ Mitte und unten: Beitrag der Emissionen im Nest 3 in µg/m ³ und % zu den Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).....	55
Abbildung 34: Oben: Berechneter PM10-Jahresmittelwert in µg/m ³ in Kassel, Nest 3 für das Szenario „Alle anthropogenen Emissionen Null,“ Mitte und unten: Beitrag der Emissionen im Nest 3 in µg/m ³ und % zu den Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).	56
Abbildung 35: Beitrag der Kfz-Emissionen im Nest 3 in µg/m ³ und % zu den NO ₂ -Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).	57
Abbildung 36: Beitrag der Kfz-Emissionen im Nest 3 in µg/m ³ und % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 23).	58
Abbildung 37: Beitrag der industriellen Emissionen im Nest 3 in µg/m ³ und % zu den NO ₂ -Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).	59
Abbildung 38: Beitrag der industriellen Emissionen im Nest 3 in µg/m ³ und % zu den PM10- Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 23).	60
Abbildung 39: Beitrag der Hausbrand-Emissionen im Nest 3 in µg/m ³ und % zu den NO ₂ -Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).	61
Abbildung 40: Beitrag der Hausbrand-Emissionen im Nest 3 in µg/m ³ und % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 23).	62
Abbildung 41: Beitrag der Emissionen auf den Bundesautobahnen im Nest 3 in µg/m ³ und % zu den NO ₂ - Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).	69
Abbildung 42: Beitrag der Emissionen auf den Bundesautobahnen im Nest 3 in µg/m ³ und % zu den PM10- Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 23).	70
Abbildung 43: Beitrag der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Kasseler Innenstadt in Nest 3 in µg/m ³ und % zu den NO ₂ -Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 22).	71
Abbildung 44: Beitrag der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Kasseler Innenstadt in Nest 3 in µg/m ³ und % zu den PM10-Jahresmittelwerten des Basislaufs 2003 (siehe Abbildung 23).	72
Abbildung 45: Oben: Berechneter NO ₂ -Jahresmittelwert in µg/m ³ in Kassel, Nest 3 für das NEC/CLE-Szenario 2010. Mitte und unten: Änderung im Nest 3 in µg/m ³ und % bezogen auf den Istzustand (Basislaufs 2003, siehe Abbildung 22).	81
Abbildung 46: Oben: Berechneter PM10-Jahresmittelwert in µg/m ³ in Kassel, Nest 3 für das NEC/CLE- Szenario 2010. Mitte und unten: Änderung im Nest 3 in µg/m ³ und % bezogen auf den Istzustand (Basislaufs 2003, siehe Abbildung 23).....	82

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gebietsgrößen der Nester 0 bis 3	9
Tabelle 2: Von IVU-Umwelt gelieferte Emissionen für das RCG-Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 2 (Abbildung 3). Die Emissionsangaben „TNO-Daten“ geben die Emissionen an, die für Nest 2 in der großräumigen, für Nest 0 und Nest 1 verwendeten Emissionsdatenbasis ausgewiesen werden. Mit Kfz-induzierter Feinstaubaufwirbelung. Keine Eintragung bedeutet keine Information.	19
Tabelle 3: Relative Aufteilung in % der von der IVU-Umwelt gelieferten Emissionen für das RCG-Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 2 (Abbildung 3). Keine Eintragung bedeutet keine Information.	19
Tabelle 4: Anteil in % der Emissionen in Nest 3 an den Emissionen in Nest 2 zusammengefasst nach den Verursachergruppen des RCG-Modells.	20
Tabelle 5: NOx-Emissionen für das Nest 2. Lokale Emissionserhebung Kassel und TNO-Emissionserhebung. Keine Eintragung bedeutet keine Information.	26
Tabelle 6: PM10-Emissionen für das Nest 2. Lokale Emissionserhebung Kassel und TNO-Emissionserhebung. Keine Eintragung bedeutet keine Information.	26
Tabelle 7: Minderung der Emissionen in % im Nest 3 aufgrund der verschiedenen pauschalen Emissionsszenarien. Die prozentualen Änderungen beziehen sich auf die Gesamtsummen der Emissionen im Nest 3 (letzte Zeile). Beim PM10 beziehen sie sich auf die Gesamtsumme auf die Emissionen einschließlich der Ergänzung für Landwirtschaft und Sonstige Quellen.	27
Tabelle 8: Emissionen in Deutschland nach dem CLE-Szenario 2010 und Emissionshöchstmengen entsprechend der NEC-Richtlinie.	28
Tabelle 9: Änderung der deutschen Emissionen 2000 nach 2010 (CLE-Szenario) in %, bezogen auf 2000, aufgeschlüsselt nach den SNAP-Verursachergruppen.	28
Tabelle 10: Änderung (%) der Emissionen in Kassel vom Ist-Zustand nach 2010 (CLE-Szenario, korrigiert mit NEC-Emissionshöchstmengen), bezogen auf den Ist-Zustand. Beim Verkehr wurden die Nicht-Auspuffemissionen entsprechend den Ansätzen des CLE-Szenarios nicht gemindert. Bei der Industrie wurde das Mittel der Minderung aus den SNAP-Verursachergruppen „Industrial combustion“ und „Industrial process emissions“ angesetzt, da eine Unterscheidung in diese Gruppen nicht möglich ist... 29	29
Tabelle 11: Berechneter und beobachteter PM10-Jahresmittelwert und Anzahl der Überschreitungen eines Tagesmittelwerts von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kassel, Fünffensterstr. RCG-EO: RCG-Rechnung mit den originalen PM10-Emissionen. RCG-EM: RCG-Rechnung mit den modifizierten (um Landwirtschaft und sonstige Quellen erhöhten) PM10-Emissionen (siehe Kap. 2.5.1). RCG+CPB: Berechnete Gesamtbelastung in der Straßenschlucht.	38
Tabelle 12: Absolute Beiträge der einzelnen PM10-Komponenten in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zu der Gesamtbelastung in den 25 Straßenräumen. Mit RCG gekennzeichnet sind alle Komponenten, die mit dem RCG-Modell berechnet wurden: SAER= Summe der sekundären Aerosole, PPM10= Summe der anthropogenen primär emittierten Aerosole, NAEL= Seesalzkomponenten; WBDU= Summe des Bodenstaubs aus unbebauten Böden. CPB PPM10: Mit dem CPB-Modell berechnete primäre PM10-Zusatzbelastung.	42
Tabelle 13: Relative Beiträge der einzelnen PM10-Komponenten in % zu der Gesamtbelastung in den 25 Straßenräumen. Mit RCG gekennzeichnet sind alle Komponenten, die mit dem RCG-Modell berechnet wurden: SAER= Summe der sekundären Aerosole, PPM10= Summe der anthropogenen primär emittierten Aerosole, NAEL=Seesalzkomponenten; WBDU=Summe des Bodenstaubs aus nicht bebauten Böden. CPB PPM10: Mit dem CPB-Modell berechnete primäre PM10-Beiträge.	43
Tabelle 14: Absolute Aufteilung der PM10-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 2, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 2.	44
Tabelle 15: Relative Aufteilung der PM10-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 2, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 2.	45
Tabelle 16: Absolute Aufteilung der PM10-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 3, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 3.	46
Tabelle 17: Relative Aufteilung der PM10-Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die	

städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 3, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 3.	47
Tabelle 18: Absolute Aufteilung der NO ₂ -Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 2, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 2.	48
Tabelle 19: Relative Aufteilung der NO ₂ -Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 2 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 2, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 2.	49
Tabelle 20: Absolute Aufteilung der NO ₂ -Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 3 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 3, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 3.	50
Tabelle 21: Relative Aufteilung der NO ₂ -Gesamtbelastung in den Straßenräumen nach Hintergrund (Ferntransportanteil), Beitrag Nest 3 (städtische Vorbelastung), Zusatzbelastung (Straßenanteil). Die städtische Vorbelastung beinhaltet hier den Beitrag aller Emissionen in Nest 3, der Ferntransport alle Emissionen außerhalb von Nest 3.	51
Tabelle 22: Berechnete NO ₂ -Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Absoluter Beitrag des Transports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, der Verkehrsemissionen, der Emissionen des Hausbrands sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Weitere Erläuterungen im Text.	64
Tabelle 23: Berechnete NO ₂ -Vorbelastung (Jahresmittelwert in µg/m ³) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) des Transports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, der Verkehrsemissionen, der Emissionen des Hausbrands sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Weitere Erläuterungen im Text.	65
Tabelle 24: Berechnete PM10-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Absoluter Beitrag des Transports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, der Verkehrsemissionen, der Emissionen des Hausbrands sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Weitere Erläuterungen im Text.	66
Tabelle 25: Berechnete PM10-Vorbelastung (Jahresmittelwert in µg/m ³) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) des Transports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, der Verkehrsemissionen, der Emissionen des Hausbrands sowie der Industrie zu dieser Vorbelastung. Weitere Erläuterungen im Text.	67
Tabelle 26: Relative Beiträge der betrachteten Verursachergruppen zu den mittleren Vorbelastungen für die 25 ausgewählten Straßen, normiert auf den Beitrag der Industrie. Weitere Erläuterungen im Text.	68
Tabelle 27: Berechnete NO ₂ -Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Absoluter Beitrag des Ferntransports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, aller Verkehrsemissionen (Kfz), der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt. Weitere Erläuterungen im Text.	74
Tabelle 28: Berechnete NO ₂ -Vorbelastung (in µg/m ³) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) des Ferntransports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, aller Verkehrsemissionen (Kfz), der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt. Weitere Erläuterungen im Text.	75
Tabelle 29: Berechneter NO ₂ -Anteil (Jahresmittelwert in µg/m ³) der Verkehrsemissionen an der Vorbelastung für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt zum Verkehrsanteil. Weitere Erläuterungen im Text.	76
Tabelle 30: Berechnete PM10-Vorbelastung (Jahresmittelwert) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Absoluter Beitrag des Ferntransports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, aller Verkehrsemissionen (Kfz), der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt. Weitere Erläuterungen im Text.	77
Tabelle 31: Berechnete PM10-Vorbelastung (in µg/m ³) für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) des Ferntransports (Hintergrund), aller Emissionen im Nest 3, aller Verkehrsemissionen (Kfz), der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt. Weitere Erläuterungen im Text.	78
Tabelle 32: Berechneter PM10-Anteil (Jahresmittelwert in µg/m ³) der Verkehrsemissionen an der	

Vorbelastung für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3. Relativer Beitrag (%) der Emissionen der Autobahnen (BAB) sowie der Emissionen von 50% des Kfz-Verkehrs in der Innenstadt zum Verkehrsanteil. Weitere Erläuterungen im Text.	79
Tabelle 33: Berechnete NO ₂ -Vorbelastung für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3, unter den Emissionsbedingungen des Istzustandes (Basislauf) und den Emissionsbedingungen NEC/CLE 2010. Absolute und Relative Änderung der Vorbelastung vom Istzustand nach 2010.	83
Tabelle 34: Berechnete PM10-Vorbelastung für 25 Straßen im Untersuchungsgebiet Kassel, Nest 3, unter den Emissionsbedingungen des Istzustandes (Basislauf) und den Emissionsbedingungen NEC/CLE 2010. Absolute und Relative Änderung der Vorbelastung vom Istzustand nach 2010.	84

9 Anhang : Kurzbeschreibung des REM-CALGRID-Modells

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

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

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

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

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

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

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

Die wesentlichsten Bestandteile des REM/CALGRID sind:

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

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

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

Die Emissionsdaten werden verursachergruppenspezifisch aus den zur Verfügung gestellten Daten für die Modellrechnungen aufbereitet. Emissionen der Stoffgruppen SO_x , NO_x , CO , NH_3 , Benzol, PM10, PM2.5 und VOC müssen dem Modell in Form von Punkt- oder Flächenquellen vorgegeben werden. Flächenquellen emittieren dabei wahlweise in die Bodenschicht oder in die zweite Modellschicht. Für die Punktquellen wird aus den Kenndaten der Quelle und lokalen meteorologischen Größen eine effektive Schornsteinhöhe bestimmt. Die Übergabe der Emissionen erfolgt dann in die dazugehörige Modellschicht. Flächen- und Punktquellen werden im Modell als Volumenquellen behandelt, d.h. die Emissionen verteilen sich unmittelbar in der betreffenden Gitterzelle.

Das Modell verlangt jahresspezifische Emissionsdaten für alle in den verschiedenen chemischen Mechanismen benötigten Spezies getrennt nach Punkt- und Flächenquellen und unterteilt nach Verursachergruppen. Es ist die Verarbeitung einer beliebigen Anzahl von Verursachergruppen möglich. Für die Verursachergruppen werden im Modell ausgehend von

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

Abschlussbericht

Ausbreitungsrechnungen mit dem Canyon-Plume-Box-Modell als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Kassel

für

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

von

IVU Umwelt GmbH
Burgweg 10 · D-79350 Sexau

Götz Wiegand
Florian Pfäfflin

Februar 2006



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Das CPB-Modell	3
2.1	Kurzbeschreibung CPB-Modell.....	3
2.2	Anwendung des CPB-Modells	5
3	Ergebnisse.....	5
4	Literatur.....	6



1 Einführung

Dieser Bericht beschreibt die Anwendung des Canyon-Plume-Box-Modells (siehe Yamartino, 1986) auf 15 Straßenschluchten im Ballungsraum Kassel.

Im Ballungsraum Kassel wurde im Jahr 2003 der Grenzwert für Tagesmittelwerte PM10 überschritten. Nach Artikel 8 der EU-Rahmenrichtlinie 96/62/EG (EU-RRL) zur Luftqualität (EU, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 1996) müssen für Gebiete, in denen Grenzwerte überschritten werden, Luftreinhaltepläne erarbeitet werden, aufgrund derer die betreffenden Grenzwerte zukünftig eingehalten werden können. In der EU-RRL sind dazu neben Messungen erstmalig auch Modellrechnungen zur Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität vorgesehen.

Das Umweltbundesamt hat an die FU Berlin FE-Vorhaben vergeben, in denen ein Modellinstrumentarium entwickelt wurde, das den in der EU-RRL definierten Anforderungen an die Ausbreitungsrechnung genügt. Kern des Systems ist das chemische Transportmodell REM-CALGRID (RCG), das für die vorliegende Studie eingesetzt wurde (siehe Stern, 2004). Die Ergebnisse des RCG-Modells dienen als Vorbelastung für ein sich anschließendes Straßenschlucht-Modell.

Ebenfalls durch FE-Vorhaben des Umweltbundesamtes (10402432/01 und 10502812/2) wurde die Entwicklung des Canyon-Plume-Box-Modell, im folgenden CPB, gefördert. CPB wurde in zahlreichen Forschungsvorhaben validiert und in Gutachten eingesetzt. Mit CPB wird der Einfluss der Straße berechnet.

2 Das CPB-Modell

2.1 Kurzbeschreibung CPB-Modell

Mit dem Ausbreitungsmodell CPB (Canyon-Plume-Box-Modell) können die verkehrsbedingten Luftschadstoffimmissionen in einer Straßenschlucht auf der Basis von leicht zugänglichen Messgrößen berechnet werden.

Das CPB-Modell beruht auf physikalischen Prinzipien und wurde hinreichend an gemessenen Immissionsdaten überprüft.

CPB kann einen weiten Bereich von Schluchtgeometrien behandeln, darunter unterschiedliche Bebauungshöhen auf beiden Seiten, teildurchlässige, „poröse“ Bebauung (z.B. offene Parkhäuser) oder gekrümmte Straßen. Die Straße kann von endlicher Länge sein und an einem oder beiden Enden durch eine Kreuzung abgeschlossen werden.

Das Modell besteht im Wesentlichen aus drei Teilen:

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

Das Ausbreitungsmodul ist der Kern des CPB-Modells. Es setzt sich seinerseits 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 der Straßenschlucht.
- Korrekturen für Diffusion mit dem Wind
- Reflektion der Schadstoffe an den Schluchtwänden
- Einfluss von benachbarten Kreuzungen
- Mäandern der Windrichtung

In Abbildung 1 werden der Datenfluss und die wesentlichen Mechanismen des CPB-Modells schematisch dargestellt.

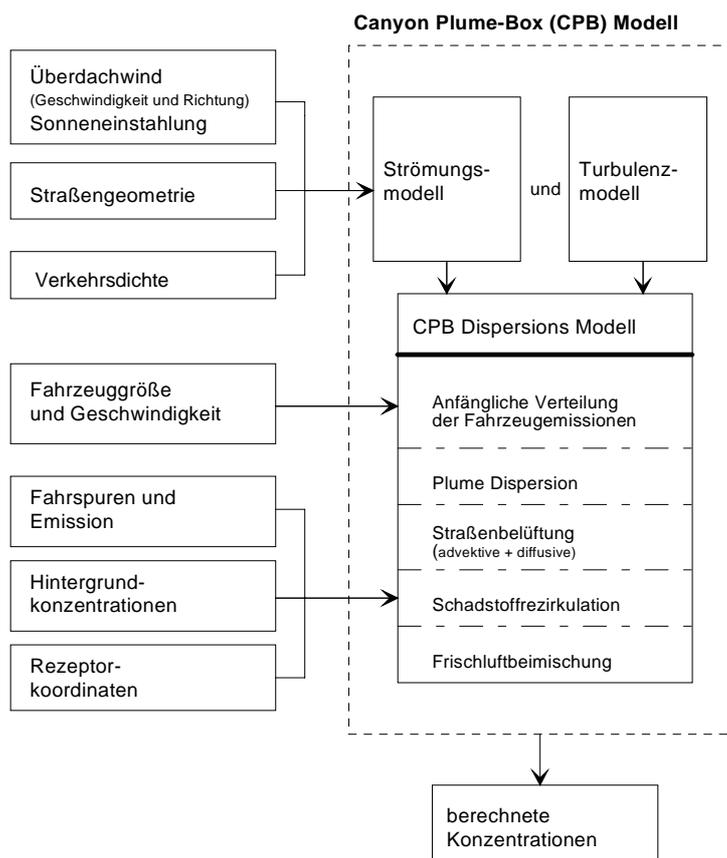


Abbildung 1 Datenfluss und die wesentlichen Mechanismen des CPB-Modells



2.2 Anwendung des CPB-Modells

CPB ist ein Straßenraum-Ausbreitungsmodell, das umfangreich validiert wurde (siehe Literaturverzeichnis). Eine Kurzbeschreibung des Systems ist in Kapitel 2.1 zu finden. Eine ausführliche Beschreibung findet man in Yamartino/Wiegand, 1986.

CPB enthält ein Photochemie-Modul, das es erlaubt direkt NO_2 -Immissionen zu berechnen. Bisher wurde das Photochemie-Modul lediglich in der Bonner Straße in Köln angewandt, da dort die erforderlichen Eingangsdaten (stündliche NO -, NO_2 - und O_3 -Konzentrationen über dem Straßenraum) durch Messungen erhoben wurden. Hier stehen sie als Modellrechnungen vom RCG-Modell zur Verfügung.

Für 15 Straßen wird CPB angewandt. Die Vorbelastungen (Überdach-Konzentrationen) und die meteorologischen Variablen (Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung) werden aus den Ergebnissen des RCG-Modells verwendet.

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

3 Ergebnisse

Wegen des Umfangs (4 Szenarien) befinden sich die Ergebnisse auf der beiliegenden CD als HTML-Dateien.



4 Literatur

- Carlaw, D.C. Beevers, S.D.: Should road vehicle emissions legislation consider primary NO₂?
Atmospheric Environment 38, 2004, pp 1233-1234
- EU (1996). Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27.9.1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 296/55 vom 21.11. 1996
- EU (1999). Richtlinie 1999/30/EG des Rats vom 22.4.1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 163/41 vom 29.6. 1999.
- EU (2000). Richtlinie 2000/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rats vom 16.11.2000 über Grenzwerte für Benzol und Kohlenmonoxid in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 313/12 vom 13.12. 2000.
- EU (2002). Richtlinie 2002/3/EG des Europäischen Parlaments und des Rats vom 12.2.2002 über den Ozongehalt der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 67/14 vom 9.3. 2002.
- IMMIS^{luft}, 2004: Handbuch zu IMMIS^{luft}, IVU Umwelt GmbH, siehe www.IVU-Umwelt.de
- Lenner, M., Nitrogen Dioxide in Exhaust emissions from Motor Vehicles
Atmospheric Environment 21, 1987, pp 37-43
- Soltic, P., Weilenmann, M.: Partitioning of NO_x Emissions for Gasoline Passenger Cars and Light Duty Trucks
11th International Symposium "Transport and Air Pollution" 19-21-06.2002, Graz
- Stern, R., Kerschbaumer, A., Reimer, E.: Ausbreitungsrechnungen mit dem chemischen Transportmodell REM-CALGRID als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main.
Arbeitsgruppe TRUMF, FUB, 2004:
- Yamartino, R. J., Wiegand, G.: Development and Evaluation of Simple Models for the Flow, Turbulence and Pollutant Concentration Fields within an Urban Street Canyon
Atmospheric Environment Vol.20, No.11, pp 2137-2156; 1986
- Yamartino, R.J.: Modification of highway air pollution models for complex site geometries Volume 1, Data Analyses and Development of the CPB 3 Model
TIDG Document No. R8806-002-RD; 1989
- Yamartino, R.J., J. Scire, G.R. Carmichael, and Y.S. Chang (1992). The CALGRID mesoscale photochemical grid model-I. Model formulation
Atmospheric Environment, 26A (1992), 1493-1512.