

PM10-Emissionen an Außerortsstraßen

FA 2.222

Forschungsstelle: Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Ra-
debeul

Bearbeiter: Lohmeyer, A. / Düring, I. /
Bösinger, R.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und
Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Dezember 2004

1. Aufgabenstellung / Ausgangssituation

Neuere Untersuchungen zur PM10-Emissions- und Immissions-situation an Außerortsstraßen deuteten darauf hin, dass das bisher angewendete modifizierte EPA-Modell (mEPA) für diesen Straßentyp in der Tendenz zu hohe PM10-Emissionen berechnet. Von den Autoren dieses Modells wurde bereits bei dessen Formulierung auf die fehlende Validierung für Außer-ortsstraßen bzw. Autobahnen hingewiesen, da zum damaligen Zeitpunkt keine entsprechenden Messdaten vorlagen.

Ein wesentliches Ziel des hier beschriebenen Vorhabens bestand deshalb in einer ersten Auswertung der Messdaten an der autobahnähnlichen B 10 bei Karlsruhe, in einer Systematisierung weiterer zugänglicher PM10-Messergebnisse an Straßen im Anwendungsbereich von M LuS und darauf aufbauend in einer Verbesserung des existierenden Verfahrens zur Berechnung verkehrsbedingter PM10-Emissionen im Sinne einer schnell verfügbaren pragmatischen Zwischenlösung für diese Straßen. Die Ableitung eines grundsätzlich neuen und umfassenden physikalischen Modells der PM10-Emissionsprozesse infolge Straßenverkehrs konnte und sollte im Rahmen dieses Projektes nicht geleistet werden, ist aber nach wie vor anzustreben.

2. Untersuchungsmethodik

Datenauswertungen an der B 10

Die B 10 bei Karlsruhe ist an der Messstelle eine 8-streifige auf 100 km/h beschränkte autobahnähnliche Bundesstraße mit einer mittleren Verkehrsbelegung von etwa 75 500 Kfz/d und einem Schwerverkehrsanteil von ca. 14 %. Als Datengrundlage lagen für beide Seiten der Straße tagesmittlere PM_{2.5} und PM₁₀ (Gravimetrie) in 3 m und 6 m Messhöhe, kontinuierliche (1/2 h-Mittelwerte) der PM₁₀-Konzentrationen (Beta-Staubmeter), NO_x- und CO-Konzentrationen sowie meteorologische Informationen auf beiden Seiten der Straße (Abstand 6 m bzw. 7 m), Inhaltsstoffanalysen von PM₁₀ und PM_{2.5} für ausgewählte Tage sowie detaillierte Verkehrsinformationen (Verkehrsstärken und Fahrzeuggeschwindigkeiten) zur Verfügung.

Für 38 Tage mit deutlichen Luv-Lee-Effekten liegen vollständige Datensätze (Verkehr, Konzentrationen, Inhaltsstoffanalysen, Meteorologie) vor. Davon wurden 24 Tage selektiert, in denen die meteorologischen und verkehrlichen Bedingungen weitgehend stabil und die Zusatzbelastungen für Partikelgröße PM_{2.5} und PM_{2.5-10} positiv waren. Davon entfallen 18 Tage auf einen Werktag (Montag bis Freitag) sowie 6 Tage auf einen Sonntag. An 5 Tagen (3 Werktag und 2 Sonntage) hatte es geregnet. Die täglichen Regenmengen lagen an diesen Tagen über 1 mm.

Mittels der NO_x-Tracermethode konnten PM10-Emissionsfaktoren abgeleitet werden. Diese betragen im Wochenmittel 81 mg/(km · Fzg), wobei an trockenen Werktagen 92 mg/(km · Fzg) und an trockenen Sonntagen 59 mg/(km · Fzg) ermittelt wurden. Der Vergleich zwischen Sonntag zu Werktag weist im Mittel auf eine fahrzeugspezifische Separation des PM10-Emissionsfaktors an der B 10 in 65 mg/(km · Pkw) und 195 mg/(km · Lkw) hin. Aus der Regression der werktäglichen Emissionsfaktoren in Abhängigkeit vom Lkw-Anteil können Pkw-Emissionsfaktoren von 23 mg/(Pkw · km) und Lkw-Emissionsfaktoren von 430 mg/(Lkw · km) abgeschätzt werden, also niedrigere Pkw- und höhere Lkw-PM10-Emissionsfaktoren als aus dem Sonntags-Werktags-Vergleich ableitbar. Möglicherweise liegt dieser scheinbare Widerspruch in einer Abhängigkeit der Emissionsfaktoren von der Verkehrsstärke insbesondere bei niedrigen und sehr hohen Lkw-Anteilen mit zu verkehrsrärmeren Zeiten (z. B. sonntags) in der Tendenz höheren Pkw-Emissionsfaktoren begründet, vorausgesetzt, dass die als Tracer verwendeten NO_x-Emissionsfaktoren (Pkw/Lkw) des Handbuches für Emissionsfaktoren (HBEFA 2.1) die Realität richtig widerspiegeln.

Weiterführende Untersuchungen sollten sich mit diesen Effekten auseinandersetzen. Als gewichteter Wochenmittelwert wird von 26 mg/(Pkw · km) sowie von 410 mg/(Lkw · km) ausgegangen.

Anhand der Auswertung der Inhaltsstoffanalyse konnte eine Abschätzung der Quellanteile vorgenommen werden. Für trockene Werktage wurde festgestellt, dass ca. 50 % der PM10-Emissionen durch Auspuffemissionen realisiert werden, ca. 20 % durch Reifenabrieb, weniger als 1 % durch Bremsabriebe und ca. 30 % durch Straßenabriebe sowie Wiederaufwirbelung von Schmutzeintrag. Für trockene Sonntage konnten ca. 25 bis 36 % auspuffbedingte Partikel, ca. 10 bis 12 % Reifenabrieb, ebenfalls weniger als 1 % Bremsabrieb sowie ca. 50 bis 65 % durch Straßenabriebe sowie Wiederaufwirbelung von Schmutzeintrag abgeschätzt werden. Es konnten Auspuffemissionsfaktoren von 17 mg/(Pkw · km) sowie 200 mg/(Lkw · km) abgeschätzt werden. Diese abgeleiteten Partikel-Auspuffemissionen zeigen für die trockenen Tage im Flottenmittel eine Abweichung von den Emissionsfaktoren des Handbuches für Emissionsfaktoren (HBEFA 2.1) von ca. 5 % und für die trockenen Sonntage bei eingeschränkter Statistik von ca. 30 %. Für die Regentage liegt die Abweichung, ebenfalls bei stark eingeschränkter Statistik, bei ca. ± 50 %.

Für die drei analysierten Werktage mit Regen wurde eine Reduktion des tagesmittleren Emissionsfaktors von ca. 40 % gegenüber dem mittleren trockenen Werktag festgestellt. Für die zwei Sonntage mit Regen wurde keine Abnahme (eher eine geringe Zunahme) gegenüber dem mittleren trockenen Sonntag beobachtet. An allen Tagen lagen Niederschlagsmengen größer 1 mm vor. Die stundenfeine Auswertung der Emissionsfaktoren an Regentagen zeigt, dass während und kurz nach dem Regen die PM10-Emissionen deutlich (häufig auf ca. Null) zurückgehen, danach aber auf ein deutlich höheres Niveau als im trockenen Mittel ansteigen. Die PM10-Emissionsminderung durch Regen ist somit stark von der Länge des Regenereignisses und wahrscheinlich von der Zeit abhängig, in der sich die Straße in einem nassen Zustand befindet.

Systematisierung weiterer Messungen im Anwendungsbereich von M LuS

Bei den Landesumweltämtern, beim Umweltbundesamt und in der Literatur wurde nach PM10-Messungen an weiteren Außerortsstraßen recherchiert. Insgesamt konnten Informationen über 20 Messkampagnen zusammengestellt werden, die auch einer Einschätzung hinsichtlich ihrer Verwendung zur Validierung des Emissionsmodells unterzogen wurden. Der größte Einfluss auf den PM10-Emissionsfaktor stellt für die beprobten Außerortsstraßen der Anteil des Schwerverkehrs dar. Im Mittel der vorliegenden Daten mit guter Qualität emittieren Lkw ca. 11-mal mehr PM10 als leichte Fahrzeuge. Es konnte für Lkw kein statistisch abgesicherter Unterschied zwischen den Emissionen in Tunneln und im offenen Gelände festgestellt werden. Es deutet sich allerdings an, dass die nicht auspuffbedingten PM10-Emissionsfaktoren für Pkw im Tunnel deutlich niedriger liegen als an freier Strecke.

Der Einfluss von Regen auf die PM10-Emissionsfaktoren ist weiterhin nicht eindeutig geklärt.

Die vorliegenden Daten reichen nicht aus, um eine signifikante und statistisch abgesicherte Abhängigkeit der nicht auspuffbedingten PM10-Emissionsfaktoren von den Fahrzeuggeschwindigkeiten abzuleiten.

3. Untersuchungsergebnisse und Schlussfolgerungen

Vorschlag für PM10-Emissionsmodell

Das bisherige in M LuS verwendete PM10-Emissionsmodell (mEPA) weist deutliche Schwächen auf. Die größte ist die dort verwendete Staubbelastung der Straße als wesentlicher Parameter, der zumindest für befestigte Straßen unter mitteleuropäischen Verhältnissen nicht als primäre Einflussgröße angesehen werden kann. Auch ist die für die Anwendung des mEPA-Modells eigentlich notwendige Bestimmung der Staubbelastung für die zu betrachtende Straße nicht praktikabel. (An der B 10-Messstelle z. B. war sie nicht genehmigt worden.) Die Streuung der realen Messwerte um bisher verwendete Standardwerte ist dagegen groß, wie vorliegende Messungen an Innerortsstraßen gezeigt haben. Es wird deshalb vorgeschlagen, nicht das modifizierte EPA-Modell zu verbessern, sondern im Sinne einer notwendigen schnellen und pragmatischen Zwischenlösung einen Ansatz zu wählen, der kompatibel mit den Verkehrssituationen im Handbuch für Emissionsfaktoren ist und an die Vorgehensweise der Schweizer Arbeitsgruppen anknüpft. Diese Vorgehensweise stellt kein grundsätzlich neues und physikalisch fundiertes Modell dar. Diese längerfristige Lösung ist aber nach wie vor anzustreben. Es wird im Folgenden für die Berechnung der PM10-Emissionsfaktoren einer Straße davon ausgegangen, dass sie sich für das zu betrachtende Bezugsjahr (Bzj) zusammensetzen aus den Emissionen aus dem Auspuff und einem Beitrag infolge der Wiederaufwirbelung (Resuspension) von Abrieben und Straßenstaub, also

$$e_{PM10}(Bzj) = e_{PM10}^{Auspuff}(Bzj) + e_{PM10}^{Auf/Ab}(Bzj)$$

Dabei werden die Emissionsfaktoren des Auspuffs aus dem aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes (HBEFA) entnommen. Für Abriebe und Aufwirbelung wird angesetzt, dass diese vom Bezugsjahr unabhängig sind, also

$$e_{PM10}^{Auf/Ab}(Bzj) = e_{PM10}^{Auf/Ab}$$

Der Beitrag der Wiederaufwirbelung wird gebildet aus dem prinzipiell zur Verfügung stehenden Straßenstaub (= Emissionspoten-

zial e^{Pot}). Dieser besteht aus deponierten Abrieben (ggf. auch aus größeren Partikeln durch mechanische und/oder chemischen Einflüssen gebildet) und von außen auf die Straße eingetragenen Partikeln also

$$e_{PM10}^{Pot} = e_{PM10}^{Reifen} + e_{PM10}^{Brems} + e_{PM10}^{Straße} + e_{PM10}^{Rest}$$

Um dieses Staubpotenzial als PM10 aufzuwirbeln, bedarf es kinetischer Energie durch die fahrzeugerzeugte Turbulenz. Der Straßenzustand und die Feuchte der Straßenoberfläche können ebenfalls diesen Term beeinflussen. Somit wird folgende Gleichung für die nicht auspuffbedingten PM10-Emissionen angesetzt:

$$e_{PM10}^{Auf/Ab} = F_{Zustand} \cdot F_{kin} \cdot (e_{PM10}^{Reifen} + e_{PM10}^{Brems} + e_{PM10}^{Straße} + e_{PM10}^{Rest})$$

Die Emissionsfaktoren für die Reifen- und Bremsabriebe könnten differenziert nach den verschiedenen Fahrzeugklassen europäischen Emissionsdatenbanken, wie z. B. der CORINAIR-Emissionsfaktor-Datenbank oder RAINS entnommen werden. Diese Emissionsfaktoren weichen z. T. stark voneinander ab bzw. werden von den Autoren z. B. für den Straßenabrieb als sehr unsicher bewertet. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen die o. g. Abriebe mit den sonstigen nicht auspuffbedingten Anteilen (e^{Rest}) zusammenzufassen und mittels Anpassung an Messdaten festzulegen. Hierzu bietet sich die der Schweizer Arbeitsgruppen vorgeschlagene Vorgehensweise an, nach Verkehrssituationen klassifizierte Emissionsfaktoren getrennt nach Pkw und Lkw (ähnlich dem Vorgehen wie bei der Berechnung der Auspuffemissionen mittels Handbuch für Emissionsfaktoren) zu verwenden. Dieses Vorgehen wird im Folgenden "Emissionsfaktorenansatz" genannt.

Als Regenkorrektur wäre der Ansatz der US-EPA möglich. Die vorliegenden Untersuchungen aus Europa für befestigte Straßen zeigen allerdings zum Teil widersprechende Abhängigkeiten von der Regenmenge auf. Die örtlichen Regenhäufigkeiten (in Bezug auf Tagesniederschlagssummen größer 0,1 mm) variieren meist nur gering um einen Wert von 0,5 in Gebieten, in denen relevanter Fahrzeugverkehr zu verzeichnen ist. Außerdem ist in den Emissionsfaktoren, welche der Ableitung der Emissionsfaktoren zugrunde gelegt wurden, der jeweilige Regeneinfluss bereits beinhaltet. Deshalb wird vorgeschlagen, auf einen separaten Regenkorrekturfaktor zu verzichten.

Bezüglich der Abhängigkeit des kinetischen Kopplungsgliedes von der Fahrzeuggeschwindigkeit liegen wenig Informationen vor. Aus diesem Grund wird vorerst vorgeschlagen, auf eine zusätzliche Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit zu verzichten und den Ansatz von verkehrssituationsabhängigen Emissionsfaktoren anzuwenden.

In Ermangelung konkreter messtechnisch erfasster Abhängigkeiten zwischen Straßenzustand und nicht auspuffbedingten Emissionen kann derzeit keine Korrektur-Funktion für den Einfluss des Straßenzustandes angesetzt werden. Es wird vorgeschlagen, dass in Anlehnung an das derzeitige eingesetzte modifizierte EPA-Modell für Straßen im guten Zustand ein Wert 1, für Straßen im schlechten Zustand ein Wert von 3,6 verwendet wird. Hier wird dringender Forschungsbedarf gesehen.

Somit ergeben sich für die beiden verbliebenen Faktoren

$$F_{kin} = 1$$

$$F_{Zustand} = 1 \text{ für Straßen im guten (Standardanwendung) und 3,6 im schlechten Zustand.}$$

(Hinweis: Ein schlechter Fahrbahnzustand liegt bei überwiegend sehr rissigen oder löchrigen Fahrbahnoberflächen verbunden mit unbefestigten oder sehr verschmutzten Nebenanlagen (Gehwege, Bankette, Randstreifen etc.) vor.)

Für die Emissionsfaktoren für Aufwirbelung und Abrieb werden für freie (nicht überdeckelte Strecken) folgende Werte vorgeschlagen:

Pkw inkl. LNF: für alle Außerorts- und Autobahnverkehrssituationen und IO_HVS > 50 (freie Strecke)	22 mg/(km · Fzg)
Lkw: für alle Außerorts- und Autobahnverkehrssituationen und IO_HVS > 50 (freie Strecke)	200 mg/(km · Fzg).

In Tunnelstrecken scheinen die Abriebs- und Aufwirbelungsemissionen infolge gleichmäßiger Fahrweise und verminderten Staubeintrags geringer zu sein. Für die Pkw-Emissionsfaktoren liegen diese im Mittel niedriger als an freier Strecke. Für die vorliegenden Lkw konnten für Tunnelstrecken keine abgesicherten niedrigeren Emissionsfaktoren festgestellt werden. Dies ist im Rahmen weiterführender Untersuchungen zu beobachten. Deshalb wird für Tunnelstrecken vorgeschlagen:

Pkw inkl. LNF: für alle Außerorts- und Autobahnverkehrssituationen und IO_HVS > 50 (Tunnel)	10 mg/(km · Fzg)
Lkw: für alle Außerorts- und Autobahnverkehrssituationen und IO_HVS > 50 (Tunnel)	200 mg/(km · Fzg).

Mit diesem Emissionsfaktorenansatz werden deutlich realistischere PM10-Emissionsfaktoren berechnet. Die Abweichung zu den Emissionsfaktoren, welche aus Messdaten abgeleitet wurden, beträgt zwischen - 30 % und + 50 %, im Mittel + 10 %.

Mit diesem Ansatz werden mittels M LuS 04 auch deutlich niedrigere PM10-Konzentrationen berechnet als im derzeit angewendeten M LuS 02. Das Verhältnis Rechenwert zu Messwert der PM10-Gesamtbelastungen reduziert sich für den Jahresmittelwert im Mittel vom Faktor 2 auf 1,1, in der Zusatzbelastung vom Faktor 5 auf den Faktor 1,5. Auf folgenden Einschränkungen des Anwendungsbereiches der vorgeschlagenen Emissionsfaktoren sei verwiesen:

- Die Anwendung der Emissionsfaktoren ist für die Bestimmung der PM10-Emissionsverhältnisse (im Monats- bzw. Jahresmittel) geeignet. Deren Verwendung für zeitlich hochaufgelöste Episoden scheint dagegen ungeeignet, da z. B. die Auswertungen zur B 10 aufgezeigt haben, dass in kleinen Zeiträumen, wie z. B. bei Stundenmittelwerten, noch andere Einflussgrößen (wie Verkehrsstärke, Fahrzeuggeschwindigkeiten, Regenmenge, Windgeschwindigkeit) relevant sein könnten, die bisher im Emissionsmodell explizit nicht berücksichtigt werden konnten.
- Für kleine Verkehrsstärken (DTV < 14 000 Kfz/d) liegt kein Vergleich Immissionsmessung zu -berechnung bzw. abgeleitete PM10-Emissionsfaktoren für Außerortsstraßen vor. Die vorgeschlagenen Emissionsfaktoren sind dort nicht verifiziert. Die Beschränkung auf DTV > 5 000 Kfz/d im M LuS sollte jedoch deswegen nicht verändert werden. Die Ergebnisse sind dort jedoch unsicherer.
- Für Lkw-Anteile größer 70 % liegen keine Vergleichsdaten vor. Die vorgeschlagenen Emissionsfaktoren sind dort ebenfalls nicht verifiziert.
- Die Ableitung der Emissionsfaktoren für Tunnel erfolgt für Tunnel mit Tunnellängen zwischen 450 und 6 400 m. Für kürzere Tunnel liegen keine Daten vor. Zumal bei kürzeren Tunneln die Wahrscheinlichkeit wächst, dass Schmutzeintrag wie an freien Strecken erfolgt und die in Tunneln allgemein übliche vorsichtige und geschwindigkeitsbegrenzte Fahrweise aufgehoben ist. Deshalb wird empfohlen, für überdeckelte Strecken kleiner 450 m die Emissionsfaktoren für freie Strecken zu verwenden.

Überschreitungshäufigkeit von 50 µg PM10/m³ als Tagesmittel

Aus den Analysen bzgl. der Abhängigkeit der Überschreitungshäufigkeit von 50 µg PM10/m³ als Tagesmittelwert vom PM10-

Jahresmittelwert wird folgendes Vorgehen im M LuS 04 vorgeschlagen:

- Es sollte keine nach Bundesländern differenzierte Vorgehensweise verwendet werden, weil die bundeslandspezifischen Unterschiede im relativen Verlauf nicht stark genug ausgeprägt sind und an den Landesgrenzen unschöne Sprungstellen in den Berechnungen auftreten würden.
- Es sollte der "best-fit plus Sicherheitszuschlag von zwei Sigma (Jahresmittelwertabhängig)" zur Umrechnung von PM10-Jahresmittelwerten auf Überschreitungshäufigkeiten verwendet werden. Die durchgeführten Testrechnungen haben gezeigt, dass auf einen Sicherheitszuschlag nicht verzichtet werden kann. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass zwar das Ausbreitungsmodell von M LuS bei der Berechnung der PM10-Zusatzbelastung Sicherheiten beinhaltet, aber der Anteil der PM10-Zusatzbelastung an der Gesamtbelastung an Autobahnen und Außerortsstraßen selbst bei stark beeinflussten Messpunkten bei kleiner 50 % liegen wird und somit die Sicherheiten des Ausbreitungsmodells für die Gesamtbelastung deutlich verringert sind. Die Kurve zur Beschreibung der Anzahl von Tagen mit mehr als 50 µg/m³ im Tagesmittel lautet somit:

$$\text{Anzahl der Tage mit mehr als } 50 \mu\text{g/m}^3 \text{ als Tagesmittelwert} = - 6.5E-05 \cdot \text{PM10 (JM)}^4 + 0.00694 \cdot \text{PM10 (JM)}^3 - 0.15 \cdot \text{PM10 (JM)}^2 + 1.1064 \cdot \text{PM10 (JM)} + 2 \cdot [0.23 \cdot \text{PM10 (JM)}].$$

Diese Kurve gilt zwischen 0 bis 50 µg PM10/m³ im Jahresmittel. Für Jahresmittel größer 50 µg/m³ sollte die Anzahl von Tagen mit mehr als 50 µg/m³ als Tagesmittelwert auf 165 begrenzt werden.

Als Konsequenz für M LuS 04 ergäbe sich daraus, dass für einen berechneten PM10-Jahresmittelwert von 27 µg/m³ nach diesem Vorschlag der Grenzwert für das Jahr 2005 (35 Überschreitungen) mit 36 ebenfalls wie im M LuS 02 gerade überschritten wird, der Verlauf der neuen Kurve ist allerdings flacher.

Maximaler gleitender CO-8h-Mittelwert

Das Verhältnis des maximalen CO-8h-Mittelwertes zum CO-Jahresmittelwert in der Bundesrepublik zeigt sehr starke Streuungen mit nur geringer Korrelation. Diese erlaubt eigentlich nicht die Ableitung einer gesicherten funktionalen Abhängigkeit. Da dieser Grenzwert aus den vorliegenden Messungen heraus, wenn überhaupt, nur in den seltensten Fällen im Anwendungsbereich von M LuS überschritten werden wird und ein berechenbarer "best fit" bereits durch eine Vielzahl von älteren (höheren) Messergebnissen Sicherheiten enthält wird für die Anwendung im M LuS dennoch empfohlen, die Funktion des "best fit" (trotz dessen statistischer Unsicherheiten) zur Berechnung dieses Wertes in M LuS zu integrieren. Diese lautet:

$$\text{max. gleitender 8 h-CO-Mittelwert} = 5,18 \cdot \text{CO (JM)}; \text{ mit } R^2 = 0,5.$$

Vergleich von Messwerten an der A1 bei Hamburg-Billwerder mit Ergebnissen aus Ausbreitungsberechnungen unter Verwendung des neuen PM10-Emissionsmodells

Ausbreitungsberechnungen unter Verwendung des vorgeschlagenen PM10- Emissionsmodells (Aufwirbelung und Abriebe) und den Auspuffemissionsfaktoren des HBEFa 2.1 mit dem Ausbreitungsmodell PROKAS und mit dem Screeningmodell M LuS lieferten PM10-Konzentrationen, welche vorliegende PM10-Messergebnisse an der A 1 bei Hamburg-Billwerder im Zeitraum vom 1. 7. 2003 bis 30. 6. 2004 gut reproduzieren.

Die Abweichungen zwischen der Berechnung mit M LuS und den Messergebnissen liegen bei den Jahresmittelwerten in der PM10-Gesamtbelastung bei + 12 %, in der PM10- Zusatzbelastung bei + 50 %. Die Anzahl von Tagesmittelwerten größer $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wird mit dem oben beschriebenen Ansatz bei 14 gemessenen Überschreitungen mit einem Faktor 2 (best fit) bzw. 3 (2 Sigma Sicherheit) überschätzt.

Die Abweichungen zwischen den Berechnungen mit dem höherwertigen Modell PROKAS und den Messergebnissen liegen

für PM10 im Jahresmittel in der Gesamtbelastung bei -1 % und für die PM10-Zusatzbelastung bei - 5 %.

Im Vergleich dazu liegen die Abweichungen der Berechnung von der Messung für die NOx-Zusatzbelastung bei +11 %.

Der "best fit" überschätzt die gemessenen 14 Überschreitungen von Tagesmittelwerten größer $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ um ca. 30 %, unter Berücksichtigung von 2 Sigma Sicherheit um ca. 110 %. □