

Gutachten zur Änderung der Verordnung einer im- missionsgesteuerten Ge- schwindigkeitsbegrenzung auf der A12 zwischen Kuf- stein und Zirl

Neue Emissionsfaktoren

Prognosemodul

Dr. Jürg Thudium
16.08.2008 / 5238.80 V01

Oekoscience AG

Postfach 452
CH - 7001 Chur

Telefon: +4181 250 3310
science@oekoscience.ch

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Anpassung der Emissionsfaktoren	1
2.1. Geschwindigkeitsabhängigkeit der Emissionsfaktoren	2
2.2. Zeitliche Änderungen der Emissionsfaktoren	4
2.3. Direktemission an NO ₂	5
2.4. Empfehlungen für die Evaluation in Bezug auf Emissionen	6
3. Prognoseterme im Steuer-Algorithmus	7
3.1. Wahrscheinlichkeit von Überschreitungen des Kurzzeitgrenzwertes von NO ₂	7
3.2. Prognose für Verkehr und Ausbreitungsbedingungen	9
3.2.1. Verkehrsprognose	9
3.2.2. Tauprognose: Prognose der Ausbreitungsbedingungen	10
3.3. Empfehlungen für die Evaluation in Bezug auf die Prognoseterme	12

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Emissionsfaktoren für NO _x (blau) und PM ₁₀ (rot) in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit für Pkw für 2006/07. Quelle: TU Graz, April 2007.	2
Abbildung 2.2: Emissionsfaktoren für NO _x (blau) und PM ₁₀ (rot) in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit für Lieferwagen (oben) und Motorräder (unten) für 2006/07. Quelle: TU Graz, April 2007.	3
Abbildung 3.1: Täglicher maximaler Halbstundenwert von NO ₂ bei Vomp gegen morgendliches NO ₂ -Minimum, 1999 – 2007.	8

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Emissionsfaktoren für NO _x und PM ₁₀ von schweren Fahrzeugen 2006/07. Quelle: TU Graz, April 2007.	4
Tabelle 2.2: Verhältnis der Emissionsfaktoren je Fahrzeugkategorie und Jahr zu ihrem Mittelwert 2006/07 gemäß HBEFA2.1:	5

1. Einleitung

Die Tiroler Landesregierung hat Dr. Jürg Thudium von der Fa. Oekoscience beauftragt, ein Gutachten zur **Änderung** der Verordnung einer immissionsgesteuerten Geschwindigkeitsbegrenzung mittels einer Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA) auf der Inntalautobahn A12 zwischen Kufstein und Zirl zu erstellen. Dabei geht es um die Anpassung der verwendeten Emissionsfaktoren und die Einführung eines Prognosemoduls. Auf die bereits bestehende Verordnung zur VBA wird hier nicht mehr eingegangen.

2. Anpassung der Emissionsfaktoren

Im Steuer-Algorithmus werden die aktuellen Emissionen auf der A12 berechnet. Dazu werden die kontinuierlichen nach Kategorien unterteilten Fahrzeugzahlen mit den zugehörigen Emissionsfaktoren verknüpft. Die Emissionsfaktoren hängen stark von der Fahrgeschwindigkeit ab (ansonsten die Temporeduktion lufthygienisch ja keinen Sinn machen würde); deshalb werden auch kontinuierlich die mittleren Geschwindigkeiten jeder Fahrzeugkategorie gemessen und in die Emissionsberechnung miteinbezogen.

Im Allgemeinen wird für die Bestimmung der Emissionsfaktoren das Handbuch HBEFA 2.1 vom Feb. 2004 herangezogen. Neuere Erkenntnisse haben gezeigt, dass diese Angaben an vielen Stellen zu revidieren sind. Eine neue Version ist auf Herbst 2008 angesagt, könnte sich aber noch weiter verzögern.

Im Frühjahr 2007 sind dem Land Tirol von der TU Graz revidierte Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für die Autobahn A12 vorgelegt worden. Diese werden für alle immissionsgesteuerten Autobahnabschnitte verwendet, bis offiziell neue Emissionsfaktoren vorliegen.

Im Folgenden werden diese Emissionsfaktoren in ihrer Geschwindigkeitsabhängigkeit aufgezeigt.

2.1. Geschwindigkeitsabhängigkeit der Emissionsfaktoren

Zitat aus: „Evaluation: Tempo 100 auf der Unterinntalautobahn im Winter 2006/07, Teil 1: Effekte auf Fahrgeschwindigkeiten, Emissionen und Immissionen“. Im Auftrag der Tiroler Landesregierung, Oekoscience, April 2007.

„Die TU Graz hat für die beiden Streckenabschnitte der A12 bei Vomp und Kundl und für die verschiedenen Tempolimits nachts und tagsüber mittlere Emissionsfaktoren für Pkw, Motorräder und Lieferwagen bestimmt. Diese zeigen alle eine strenge Abhängigkeit von der Durchschnittsgeschwindigkeit allein, so dass daraus geschlossen werden kann, dass mit dem heutigen Kenntnisstand die mittlere Geschwindigkeit allein (und allenfalls noch die Längsneigung) den Emissionsfaktor bestimmt. Die folgenden drei Abbildungen zeigen diese Abhängigkeiten.

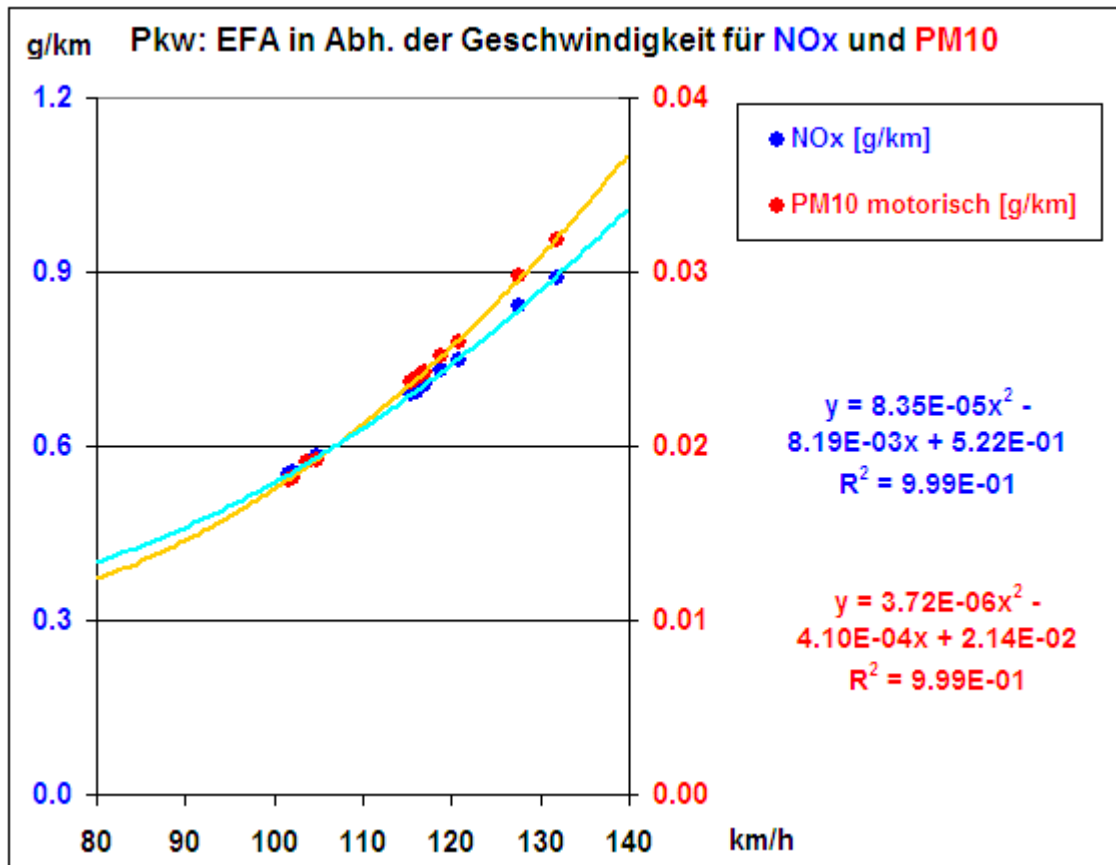


Abbildung 2.1: Emissionsfaktoren für NOx (blau) und PM10 (rot) in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit für Pkw für 2006/07. Quelle: TU Graz, April 2007.

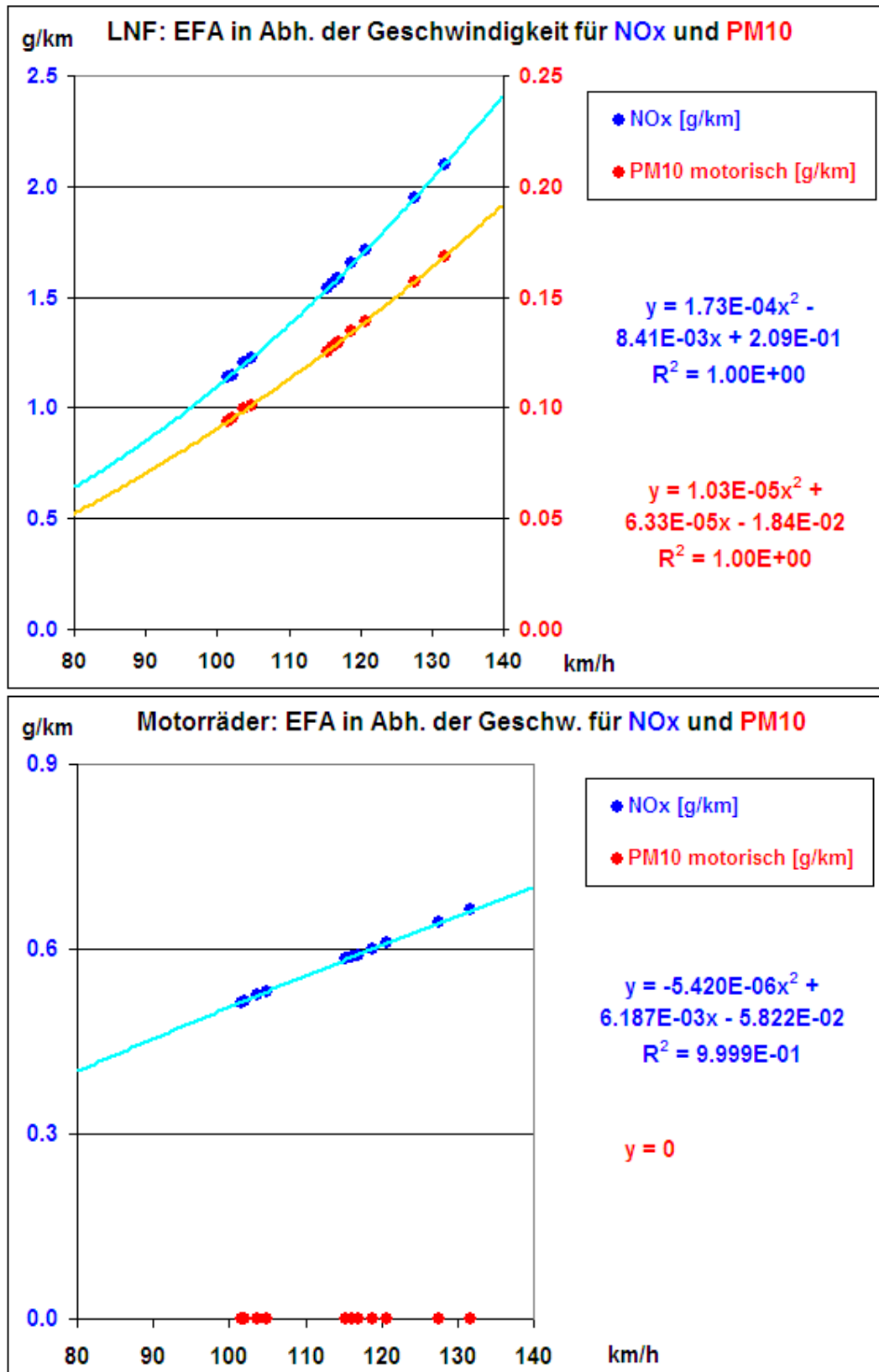


Abbildung 2.2: Emissionsfaktoren für NOx (blau) und PM10 (rot) in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit für Lieferwagen (oben) und Motorräder (unten) für 2006/07. Quelle: TU Graz, April 2007.

Die Kurven zeigen Korrelationskoeffizienten von mehr als 0.999, zum Teil mehr als 0.9999, d.h. die Geschwindigkeit allein bestimmt für geringe Längsneigung die Emissionsfaktoren.

Bei den Pkw und Lieferwagen nehmen die EFA von (wirklich gefahrenem) Tempo 130 km/h auf 100 km/h um etwa 40% ab.“

Die Emissionsfaktoren der schweren Fahrzeuge wurden wie folgt angegeben:

Tabelle 2.1: Emissionsfaktoren für NOx und PM10 von schweren Fahrzeugen 2006/07. Quelle: TU Graz, April 2007.

Fahrzeugkategorie	NOx	PM10 motorisch
	[g/km]	[g/km]
Solo LKW	4.25	0.088
Last- und Sattelzüge	5.74	0.106
Reisebus	7.53	0.177

Die Abhängigkeit der Emissionsfaktoren der schweren Fahrzeuge von der Geschwindigkeit ist gemäß HBEFA 2.1 im üblichen Geschwindigkeitsbereich sehr gering: Bei Bussen im Bereich von ca. 80 – 100 km/h $< 0.04\%/[\text{km/h}]$; bei Lkw und SLZ im Bereich von ca. 75 – 90 km/h etwa $-0.3\%/[\text{km/h}]$.

2.2. Zeitliche Änderungen der Emissionsfaktoren

Die oben dargestellten Emissionsfaktoren und ihre Änderungen mit der Geschwindigkeit beziehen sich auf den Mittelwert der Jahre 2006 und 2007. Es wird angenommen, dass die zeitliche Abhängigkeit (vom Jahr) dieser Faktoren und ihrer Abhängigkeit von der Geschwindigkeit proportional zu den entsprechenden Änderungen der Emissionsfaktoren gemäß HBEFA2.1 verläuft. Dies ist zurzeit die beste Näherung (Prof. Hausberger, TU Graz, private Mitteilung, 2008).

Die folgende Tabelle gibt das Verhältnis der Emissionsfaktoren je Fahrzeugkategorie und Jahr zu ihrem Mittelwert 2006/07 gemäß HBEFA2.1 an. Mit diesen Verhältnissen sind die von der TU Graz im April 2007 neu berechneten Emissionsfaktoren auf ein bestimmtes Jahr hochzurechnen, ebenso die Funktionen, welche die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit beschreiben.

Tabelle 2.2: Verhältnis der Emissionsfaktoren je Fahrzeugkategorie und Jahr zu ihrem Mittelwert 2006/07 gemäß HBEFA2.1:

Jahr	Krad	PkwoA	Lfw	PkwmA	Bus	LKW	SLZ
2005	1.017	1.076	1.077	1.077	1.075	1.126	1.148
2006	1.005	1.024	1.030	1.030	1.027	1.045	1.073
2007	0.995	0.976	0.970	0.970	0.973	0.955	0.927
2008	0.986	0.934	0.915	0.915	0.919	0.862	0.772
2009	0.978	0.893	0.861	0.861	0.849	0.763	0.638
2010	0.970	0.861	0.816	0.816	0.797	0.685	0.549

Es bedeuten: Krad: Kraftrad; PkwoA: Pkw ohne Anhänger; Lfw: Lieferwagen; PkwmA: Pkw mit Anhänger; LKW: Lastkraftwagen (ohne Anhänger); SLZ: Sattel- und Lastenzüge.

Er wird also erwartet, dass sich die realen Emissionsfaktoren beim schweren Güterverkehr bis zum Jahr 2010 massiv verringern.

2.3. Direktemission an NO₂

Infolge der katalytischen Abgasnachbehandlung bei modernen Dieselfahrzeugen nehmen die Anteile direkt emittierten NO₂ im Abgasstrom der Fahrzeuge zu. Davon sind vor allem die leichten Fahrzeuge betroffen, sowie die Euro4-Lkw. Bei den Euro5-Lkw scheint der Direktanteil an NO₂ wieder geringer zu werden (Hausberger, 2007). Ausgehend von verschiedener Literatur wurden die Anteile direkt emittierten NO₂ am gesamten emittierten Stickoxid für 2008/2009 wie folgt angesetzt:

Pkw-Ähnliche Fahrzeuge: 18 Volumenprozent (25 Massenprozent).

Lkw-Ähnliche Fahrzeuge: 5 Volumenprozent (7 Massenprozent).

Hinter diesen Werten steht auch die Erfahrung, dass es in Simulationsrechnungen für Kundl nicht zu viele negative Werte für die Konzentration photochemisch gebildeten NO₂ geben darf; je höher der Anteil an Direktemission von NO₂, desto geringer wird der photochemisch gebildete Anteil. Wird letzterer negativ, ist also der Anteil der Direktemission zu hoch angesetzt.

Durch die Anhebung des Direktanteils an emittiertem NO₂ für Pkw-Ähnliche auf 18 Volumen% (von bisher 10 Volumen%) steigt der den Pkw zugeordnete Beitrag am gesamten NO₂ und damit die Schalthäufigkeit. Beispielsweise für das Winterhalbjahr November 2007 – April 2008 bei Kundl würde sich die Schalthäufigkeit von 36% auf knapp 43% erhöhen. Werktags würde sich die Schalthäufigkeit von 30 auf 38% erhöhen, sonntags lediglich von 52 auf 54%. Ein Teil des Unter-

schieds in der Schalthäufigkeit von Werktagen und Sonntagen würde sich dadurch also ausgleichen. Sonntags macht der Effekt der angestiegenen Direktmission von NO₂ weniger aus, weil dann sowieso der größte Teil des NO₂ den Pkw-Ähnlichen zuzuordnen ist. Im Sommerhalbjahr wird es ebenfalls weniger ausmachen, weil dann die Direktmission an NO₂ an sich einen viel geringeren Anteil am gesamten NO₂ hat als im Winterhalbjahr, weil dann die photochemische NO₂-Bildung effizienter ist. Bei Vomp werden die Verhältnisse grundsätzlich ähnlich sein.

Wegen der höheren NO₂-Beiträge der Pkw ist es fachlich an sich gerechtfertigt, wenn die Schalthäufigkeit steigt. Um jedoch die lufthygienische Wirksamkeit eines permanenten Tempolimits im Winterhalbjahr zu erreichen, muss die Schalthäufigkeit trotz Anstiegs der Direktmission nicht steigen. Durch ein Anheben des Schwellenwertes des NO₂-Beitrags der Pkw könnte die Schalthäufigkeit wieder etwas gesenkt werden; dies zu entscheiden, ist Sache des Landes Tirol.

Literatur:

- * Hausberger, S., TU Graz: Entwicklung der NO₂ Belastung durch den Straßenverkehr. Erstellt im Auftrag von Umweltbundesamt GmbH, 2007.
- * 16. Symposium "Transport and Air Pollution", Graz 2008:
 - "Trends in Regulated and Non-Regulated Emissions of Cars in Both Statutory and Real-World Driving Conditions – Do They Still Follow Regulations?". Weilenmann, M. et al., EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, CH.
 - "Evaluation of European Road Transport Emission Models against On-Road Emission Data as Measured by Optical Remote Sensing". Sjödin, A. et al., Swedish Environmental Research Institute, SE.

2.4. Empfehlungen für die Evaluation in Bezug auf Emissionen

Gemäß Bundesverordnung sind die lufthygienischen Ergebnisse der flexiblen Geschwindigkeitsbegrenzungen jährlich zu evaluieren. In Bezug auf die Emissionen wird empfohlen, diese ebenfalls in die Evaluation einzubeziehen, und zwar die Faktoren als auch ihre Abhängigkeit von der Geschwindigkeit als auch die Anteile der direkten NO₂-Emission. Es ist davon auszugehen, dass sowohl diese Faktoren als auch die Kenntnisse darüber im Laufe der Zeit ändern.

3. Prognoseterme im Steuer-Algorithmus

Gemäß Bundesverordnung soll der Algorithmus für die immissionsgesteuerte Geschwindigkeitsbegrenzung eine Voraussage machen über die zu erwartende immissionsklimatische Entwicklung, "insbesondere der Inversionswahrscheinlichkeit der nächsten Stunden". Es geht dabei darum, kurzzeitige Entwicklungen aufzufangen. Da der in Tirol zum Einsatz gelangende Algorithmus jede halbe Stunde die verkehrliche und immissionsseitige Realität erfasst, genügt eine kurzfristige Prognose. Wie im nächsten Abschnitt erläutert wird, entwickeln sich Immissionsspitzen oft sehr rasch auf Grund spezieller Bedingungen, so dass sie nicht weit im Voraus vorhergesehen werden können, bzw. wenn die Immissionsbeiträge der Pkw relevant werden, wird ohnehin schon die Maßnahme Tempo100 ergriffen.

3.1. Wahrscheinlichkeit von Überschreitungen des Kurzzeitgrenzwertes von NO₂

Nur ein kleiner Teil der Überschreitungen des Kurzzeitgrenzwertes von NO₂ an der Messstelle Vomp geschieht im Rahmen sich 'anreichernder' Luftschadstoffe. Der größere Teil der NO₂-Spitzen baut sich kurzfristig auf.

In der nächsten Abbildung ist für alle Tage von 1999 – 2007 für die Messstelle Vomp das Tagesmaximum an NO₂ gegen das NO₂-Minimum am Morgen (von 1 – 5 Uhr) aufgetragen.

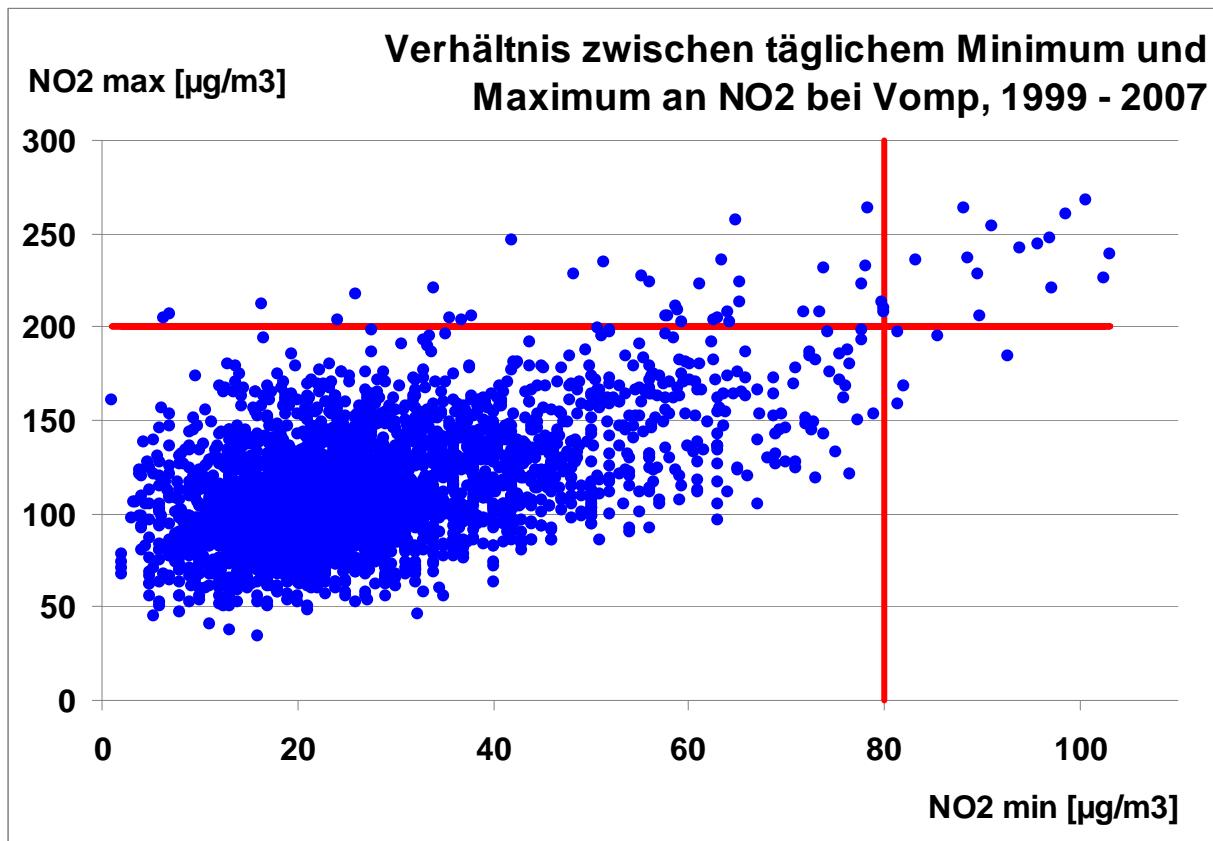


Abbildung 3.1: Täglicher maximaler Halbstundenwert von NO₂ bei Vomp gegen morgendliches NO₂-Minimum, 1999 – 2007.

Wenn das morgendliche NO₂-Minimum >80 µg/m³ ist, ist die Häufigkeit ca. ¼, dass es dann im Laufe des Tages zu einer Überschreitung des Kurzzeitgrenzwertes kommt. Aber nur etwa ¼ aller Kurzzeitgrenzwert-Überschreitungen geschehen bei einem NO₂-Minimum >80 µg/m³! Es gibt morgendliche Minima von weniger als 20 µg/m³ und dennoch ein Maximum am gleichen Tag von mehr als 200 µg/m³.

Bei einem morgendlichen NO₂-Minimum (von 1 – 5 Uhr) von mehr als 80 µg/m³ kann also mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Grenzwertüberschreitung für den laufenden Tag erwartet werden. Deshalb soll in diesen Fällen von 5 – 18 Uhr permanent Tempo 100 geschaltet werden, um den größtmöglichen Beitrag der Pkw zur Verringerung der Schadstoffbelastung in diesen Smogepisoden sicherzustellen. In den allermeisten Fällen wäre ohnehin auf 'normalem' Weg über den Pkw-Beitrag Tempo 100 geschaltet worden. Man muss sich allerdings bewusst sein, dass der größere Teil der Kurzzeit-Grenzwertüberschreitungen sich sehr rasch aus einem niedrigeren Niveau heraus auf Grund von ungünstigen atmosphärischen Bedingungen und entsprechend hohen Emissionen entwickelt. Auch

für diese Fälle führt der 'normale' Weg über den Pkw-Beitrag zur Tempo 100-Schaltung.

3.2. Prognose für Verkehr und Ausbreitungsbedingungen

Bislang errechnet der Algorithmus jede Halbstunde die Schaltempfehlung (Tempo100 oder Tempo130) aufgrund der erhobenen Verkehrs- und Immissionsdaten der vergangenen Halbstunde. Die Schaltempfehlung gilt dann für die folgende Halbstunde. Damit ist der Algorithmus immer eine halbe Stunde "zu spät". Mit der Prognose kann dies korrigiert werden.

Zusammenfassung zum Tau-Modell: Es bestimmt stündlich oder halbstündlich den Transferfaktor, mit welchem die Straßenemissionen an einer Messstelle in relativer Straßennähe in Immissionen umgesetzt werden. Dieser Transferfaktor als Verhältnis zwischen erzeugter Immission und ursächlicher Emission wird aus Messungen (Verkehr, Immissionen) bestimmt. Für jede Halbstunde eines Zeitraumes sind somit die realen Ausbreitungsbedingungen über das I/E-Verhältnis = τ [Tau]) bekannt und müssen nicht über Annahmen parametrisiert werden. Dabei muss ein zeitlich variabler, also dynamischer Hintergrund berücksichtigt werden (entsprechend den von früheren und anderen Emissionen herrührenden Immissionen).

Der Algorithmus errechnet mit dem für das nächste Zeitintervall erwarteten Verkehr und dem erwarteten Wert für Tau die Schaltempfehlung; damit reagiert er auf die zu erwartenden Entwicklungen.

3.2.1. Verkehrsprognose

Der erwartete Verkehr wird in 'Pkw-ähnliche' und 'Lkw-ähnliche' Fahrzeuge unterteilt; für diese zwei zusammengefassten Klassen können die Wochentags-Ganglinien, d.h. mittlere Tagesganglinien typischer Wochentage → Erwartungswerte der Abt. Verkehrsplanung in Tirol oder der Asfinag verwendet werden.

Die einzelnen Tage einer bestimmten Wochentagsklasse streuen allerdings stark um die mittlere Ganglinie. Jedoch weisen die allermeisten Tage eine kontinuierliche Tendenz innerhalb ihrer Klasse auf, also über den ganzen Tag generell höher als im Mittel oder generell tiefer als im Mittel etc., d.h. die einzelnen Tages-

gänge überschneiden sich meistens nur wenig. Darauf baut der Prognoseansatz auf. Dabei ist es sehr wichtig, dass nur Tage mit einem **ähnlichen relativen Verlauf** des Verkehrsaufkommens zu einem Tagestyp zusammengefasst werden, die absoluten Werte können eher schwanken.

Das Verkehrsaufkommen des nächsten Zeitintervalls wird prognostiziert, indem der aktuelle Wert mit der gleichen **relativen** Änderung versehen wird wie der Erwartungswert zur entsprechenden Tageszeit:

$$LV(t+1) = LV(t) \left(1 + \frac{Pkw\ Diff(k,t)}{Pkw\ Abs(k,t)} \right)$$

$$SV(t+1) = SV(t) \left(1 + \frac{Lkw\ Diff(k,t)}{Lkw\ Abs(k,t)} \right)$$

Mit LV: Leichtverkehr; SV: Schwerverkehr; t: aktuelle Tageszeit; k: Tagestyp.

PkwAbs(k,t): Erwartungswert von LV (in Anzahl Fz) zum jetzigen Zeitpunkt t je Tagestyp k.

PkwDiff(k,t): Erwartungswert der Änderung von LV auf das nächste Zeitintervall t+1 (negativ, wenn weniger Fz im nächsten Zeitintervall erwartet werden).

LkwAbs(k,t): Erwartungswert von SV (in Anzahl Fz) zum jetzigen Zeitpunkt t je Tagestyp k.

LkwDiff(k,t): Erwartungswert der Änderung von SV auf das nächste Zeitintervall t+1 (negativ, wenn weniger Fz im nächsten Zeitintervall erwartet werden).

3.2.2. Tauprognose: Prognose der Ausbreitungsbedingungen

Ausgangspunkt ist die Tatsache, dass die Tauwerte je nach meteorologischer Situation stark unterschiedliche, aber typische Tagesgänge zeigen und dass die Situation in den frühen Morgenstunden meist prägend ist für den gesamten Tagesverlauf.

Das folgende Prognoseverfahren soll für die Streckenabschnitte bei Vomp und Kundl eingesetzt werden:

- Alle Tage des Referenzzeitraumes (Vomp: 2005; Kundl: November 2006 – April 2007, muss als provisorisch betrachtet werden bis zur nächsten Eva-

luation mit einem ganzen Jahr) werden gemäß den Tauwerten von 1-5 h in 3 Klassen eingeteilt: gute, mittlere, schlechte Ausbreitungsbedingungen (niedrige, mittlere, hohe Werte für Tau). Dabei befinden sich 40% aller Tage in der mittleren Klasse, je 30% in der hohen und tiefen.

- Für jede der 3 Ausbreitungsklassen wird der mittlere Tagesgang für Tau bestimmt ($\rightarrow \tau_{\text{Erw}(k)}$). Dies sind die Tauwerte, die in der jeweiligen Ausbreitungssituation erwartet werden.
- Auch für die übrigen 5 Vierstundenintervalle des Tages (5-9h, 9-13h, 13-17h, 17-21h, 21-1h) werden die Quantile (30, 40, 30%) der Tauwerte bestimmt.
- Im konkreten Betrieb wird alle vier Stunden die aktuelle Ausbreitungsklasse bestimmt, durch Vergleich mit den Quantilsgrenzen. Ein Vierstundenintervall ist notwendig, weil die Tauwerte erhebliche kurzfristige Fluktuationen aufweisen, zum kleineren Teil wegen meteorologischen Schwankungen wie dem Lokalwind, zum größten Teil wegen Abweichungen der Emissionen der realen Flotte vom Rechenwert.
- Der Tauwert des nächsten Zeitintervalls (t+1) wird prognostiziert, indem die aktuellen Werte von Tau wie folgt mit den Erwartungswerten verknüpft werden:

$$\tau(t+1) = \frac{\tau(t) + \tau(t-1)}{\text{Erw}\tau(t,k) + \text{Erw}\tau(t-1,k)} \times \text{Erw}\tau(t+1,k)$$

Mit t: aktuelle Tageszeit; k: Ausbreitungsklasse; Erw τ : Erwartungswert für τ .

Mit diesem Ansatz geht auch die aktuelle Situation in die Prognose ein. Der zeitliche Verlauf von Tau je Ausbreitungsklasse – auch der relative Verlauf (\rightarrow die Kurvenform) - ist unterschiedlich; das bedeutet, dass die zu erwartende prozentuale Änderung von Tau für das nächste Zeitintervall je nach Ausbreitungsklasse verschieden ist. Für die Ermittlung dieser Tau-Verläufe wurde auf die Situation von 1-5 h morgens abgestellt, um meteorologisch zusammenhängende Verläufe zu eruieren.

3.3. Empfehlungen für die Evaluation in Bezug auf die Prognosesterme

Es wird empfohlen, im Rahmen der jährlichen Evaluation die für Vomp bzw. Kundl prognostizierten Werte für das Verkehrsaufkommen (Pkw-Ähnliche und Lkw-Ähnliche) und die Ausbreitungsbedingungen (Tau) mit den realen Werten retrospektiv zu vergleichen. Es sind wohl Prognosesimulationen durchgeführt worden, wobei die Simulationszeiträume sowohl für Vomp als auch für Kundl andere als die Referenzzeiträume waren, um die Übertragbarkeit zu gewährleisten. Es wurden für die beiden Verkehrsprognosen als auch die Tauprognose Korrelationskoeffizienten von über 0.9 erreicht. Dennoch sollten die Prognosen in die Evaluation mit aufgenommen werden, um bei einer allfälligen Notwendigkeit Anpassungen durchführen zu können.