

Zeitliche Entwicklung der NO₂ – Immissionen an verkehrsbelasteten städtischen Standorten

Bestimmung der direkten NO₂ – Emissionen des Strassenverkehrs durch Auswertung von langjährigen Immissionsdaten von zwei städtischen Messstationen in Zürich

Inhalt

Zusammenfassung	3
Résumé	5
1 Einleitung	7
2 Hintergrund	8
3 Methode	10
4 Resultate	11
5 Box- Modell zur Bestimmung der Abhängigkeit von NO₂ und NO_x	17
6 Abschätzung der Emissionsentwicklung	20
7 Fazit	22

Bericht: **Zeitliche Entwicklung der NO₂ – Immissionen an verkehrsbelasteten städtischen Standorten**

Bestimmung der direkten NO₂ – Emissionen des Strassenverkehrs durch Auswertung von langjährigen Immissionsdaten von zwei städtischen Messstationen in Zürich

Autor: Christoph Hüglin

Adresse: Empa, Abteilung Luftfremdstoffe und Umwelttechnik
Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Kontakt: christoph.hueglin@empa.ch

Dieser Bericht ist abrufbar unter: www.empa.ch/nabel

Dübendorf, 12.06.2012

Zusammenfassung

Die Emissionen von Stickoxiden ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) aus dem Strassenverkehr und anderen Emissionsquellen nehmen seit Beginn der 1990er Jahre kontinuierlich ab. Die NO_x -Immissionsbelastung folgt der zeitlichen Entwicklung der Stickoxidemissionen, dagegen sind die NO_2 -Belastungen an verkehrsnahen Standorten weniger stark gesunken. Ein Grund hierfür sind einerseits atmosphärenchemische Prozesse die dafür sorgen, dass sich eine Abnahme der NO_x -Immissionsbelastung nicht in gleichem Masse auf die NO_2 -Konzentration in der Aussenluft auswirkt. Andererseits könnte ein Anstieg des Anteils von NO_2 am gesamten Stickoxid im Abgas der Fahrzeuge zu einem Anstieg der direkten NO_2 -Emissionen des Strassenverkehrs geführt haben. Das Ziel dieser Studie ist es, die zeitliche Entwicklung des NO_2/NO_x -Emissions-verhältnisses ($f\text{-NO}_2$) des innerstädtischen Strassenverkehrs anhand von Immissionsmessungen in der Stadt Zürich zu bestimmen, sowie die Bedeutung der Entwicklung von $f\text{-NO}_2$ für die NO_2 -Immissionen an verkehrsbelasteten städtischen Standorten zu untersuchen.

Die Analyse von langjährigen Immissionsmessungen in der Stadt Zürich zeigt, dass das NO_2/NO_x -Emissionsverhältnis des innerstädtischen Strassenverkehrs von etwa 7% in den 1990er Jahren auf etwa 16% im Jahr 2011 angestiegen ist. Grund hierfür sind der gestiegene Anteil von Dieselfahrzeugen sowie die Einführung von neuen Abgasreinigungssystemen bei Dieselfahrzeugen. Der in Zürich ermittelte Anstieg von $f\text{-NO}_2$ ist in Übereinstimmung mit Untersuchungen in anderen europäischen Ländern sowie mit Berechnungen, welche auf den Emissionsfaktoren des schweizerischen Strassenverkehrs beruhen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass ein vergleichbarer Anstieg von $f\text{-NO}_2$ auch an anderen verkehrsnahen städtischen Standorten in der Schweiz stattgefunden hat.

Der Anstieg des NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisses des Strassenverkehrs kann nur zu einem kleinen Teil die immer noch zu hohen NO_2 -Belastungen an strassennahen städtischen Standorten erklären. Die Auswertungen in Zürich zeigen, dass an einer stark befahrenen Strasse die primären NO_2 -Emissionen des lokalen Strassenverkehrs im jährlichen Mittel ungefähr 17% zum gesamten NO_2 beitragen (Mittelwert von 2008, 2010 und 2011). Die NO_2 -Belastung am Standort Zürich Schimmelstrasse ist massgeblich durch den städtischen NO_2 -Hintergrund und dem lokal aus NO gebildeten NO_2 (sog. lokal gebildetes sekundäres NO_2) bestimmt. Die mittleren jährlichen Beiträge dieser beiden Faktoren betragen an diesem strassennahen Standort ca. 68% und ca. 18% (jeweils Mittelwert der Jahre 2008, 2010 und 2011).

Bei Witterungslagen welche an verkehrsbelasteten Standorten zu erhöhten NO_2 -Immissionen führen ist die lokale sekundäre NO_2 -Bildung häufig gering. Der Anteil der primären NO_2 -Emissionen an der NO_2 -Belastung ist an solchen Standorten während diesen Phasen überdurchschnittlich hoch. Entsprechend würde sich ein verminderter Anteil von NO_2 im Abgas der Fahrzeuge bei den kurzzeitigen NO_2 Spitzen stärker auswirken als im jährlichen Mittel. Im Jahr 2011 trugen am strassennahen Standort in Zürich die primären NO_2 Emissionen des lokalen Verkehrs an einem Tag 35% zum NO_2 -Tagesmittelwert bei, an 10% der Tage war der Beitrag von primärem NO_2 grösser als 21%.

Eine Reduktion des NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisses des Strassenverkehrs alleine hätte nur geringe Auswirkungen auf die mittlere jährliche NO_2 -Konzentration an den stark belasteten städtischen Standorten. Für eine wirkungsvolle Minderung der NO_2 -Immissionen sind weitere Reduktionen der NO_x -Emissionen des Strassenverkehrs sowie der anderen Emittenten notwendig. Die Prognosen für die zukünftigen NO_x -Emissionen des Strassenverkehrs zeigen für die Zeit bis 2030 kontinuierlich abnehmende Emissionen, so dass eine spürbare Abnahme der NO_2 -Belastung in den kommenden Jahren an den verkehrsbelasteten städtischen Standorten in der Schweiz eintreten sollte. Dies setzt allerdings voraus, dass die erwartete Ab-

nahme der NO_x -Emissionen des Strassenverkehrs auch tatsächlich erfolgen wird. Dazu ist es zwingend erforderlich, dass die neuen Generationen von Fahrzeugen (Personenwagen und Lastwagen) die geltenden Abgasvorschriften auch im realen Einsatz erfüllen.

Dieser Bericht behandelt die NO_2 -Belastung an den am stärksten belasteten Standorten an stark befahrenen städtischen Strassen. Es sollte hier erwähnt werden, dass es neben der Minderung der NO_2 -Belastung an diesen am stärksten belasteten Standorten weitere wichtige Gründe für eine generelle Reduktion der NO_x -Emissionen durch den Strassenverkehr wie auch durch andere Emissionsquellen gibt: Abnehmende NO_x -Emissionen tragen zu einer Minderung der Ozon- und Feinstaubbelastung, sowie zu einer Reduktion des Eintrages von Stickstoffverbindungen in naturnahe Ökosysteme bei.

Résumé

Les émissions d'oxydes d'azote ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) en provenance du trafic routier et d'autres sources sont en diminution constante depuis le début des années 1990. L'évolution temporelle des immissions de NO_x suit celle de leurs émissions; par contre les concentrations de NO_2 sur les sites exposés au trafic routier diminuent moins fortement. Une des raisons à cela réside d'une part dans les processus de la chimie atmosphérique qui font qu'une diminution des immissions de NO_x ne se répercute pas dans la même mesure sur la concentration de NO_2 dans l'air extérieur. D'autre part, une augmentation de la proportion de NO_2 dans les oxydes d'azote totaux dans les gaz d'échappement des véhicules pourrait avoir conduit à une augmentation des émissions directes de NO_2 du trafic routier. Le but de la présente étude est de déterminer l'évolution temporelle du ratio des émissions NO_2/NO_x (f-NO_2) du trafic routier urbain à l'aide de mesures d'immissions effectuées dans la ville de Zurich et d'analyser l'importance de l'évolution du f-NO_2 pour les immissions de NO_2 sur les sites urbains exposés au trafic routier.

L'analyse de mesures d'immissions réalisées durant plusieurs années en ville de Zurich montre que le ratio d'émissions NO_2/NO_x du trafic urbain a passé d'environ 7% dans les années 1990 à environ 16% en 2011. La cause de cette augmentation est due à l'accroissement du nombre de véhicules diesel ainsi qu'à l'introduction de nouveaux systèmes d'épuration des gaz d'échappement sur ces véhicules. L'augmentation du f-NO_2 constatée à Zurich concorde avec les résultats d'études effectuées dans d'autres pays d'Europe ainsi qu'avec des calculs reposant sur les facteurs d'émissions du trafic routier suisse. On peut donc admettre qu'une augmentation comparable du f-NO_2 s'est aussi produite en Suisse sur d'autres sites urbains exposés au trafic routier.

L'augmentation du ratio d'émissions NO_2/NO_x du trafic routier n'explique que très partiellement les charges de NO_2 encore trop élevées constatées sur les sites urbains exposés au trafic routier. L'analyse effectuée pour Zurich montre que dans une rue à fort trafic, les émissions primaires de NO_2 du trafic local contribuent en moyenne annuelle pour environ 17% au NO_2 total (moyenne de 2008, 2010 et 2011). La charge de NO_2 sur le site de la Schimmelstrasse à Zurich est essentiellement déterminée par les concentrations de fond urbaines en NO_2 et par le NO_2 formé localement à partir du NO (NO_2 secondaire de formation locale). Les contributions annuelles moyennes de ces deux facteurs sur ce site exposé au trafic sont d'environ 68 %, respectivement d'environ 18% (moyenne des années 2008, 2010 et 2011).

Lors des situations météorologiques qui conduisent à des immissions accrues de NO_2 sur les sites exposés au trafic routier, la formation locale de NO_2 secondaire est souvent faible. Lors de ces situations, la part des émissions primaires de NO_2 dans la charge de NO_2 est ainsi augmentée. Il s'ensuit qu'une réduction de la teneur en NO_2 des gaz d'échappement des véhicules aurait un effet plus marqué sur ces brèves pointes de NO_2 que sur la moyenne annuelle. En 2011, sur ces sites exposés au trafic routier de Zurich, la contribution des émissions primaires de NO_2 du trafic local a atteint au maximum 35% d'une moyenne journalière de NO_2 , et lors de 10% des jours la contribution du NO_2 primaire dépassait les 21%.

A lui seul, un abaissement du ratio d'émissions NO_2/NO_x du trafic routier n'aurait qu'un effet limité sur la concentration annuelle moyenne de NO_2 sur les sites urbains fortement exposés au trafic routier. Un abaissement efficace des immissions de NO_2 nécessite de réduire encore davantage les émissions de NO_x du trafic routier et de ses autres sources. Les pronostics des émissions de NO_x pour la période allant jusqu'à 2030 prévoient une diminution continue de ces émissions de sorte qu'une baisse sensible de la pollution par le NO_2 devrait se produire au cours des prochaines années en Suisse sur les sites urbains exposés au trafic routier. A la conditions toutefois que la diminution attendue des émissions de NO_x du trafic routier se pro-

duise effectivement. Pour cela il est absolument nécessaire que les nouvelles générations de véhicules (voitures de tourisme et poids lourds) satisfassent en circulation les prescriptions sur les gaz d'échappement.

Ce rapport traite de la pollution par le NO_2 sur les sites urbains les plus fortement exposés au trafic routier. Il faut relever ici qu'à côté de la réduction de la charge en NO_2 sur ces sites les plus fortement exposés, d'autres arguments importants plaident en faveur d'une réduction générale des émissions de NO_x dues au trafic routier ainsi qu'à d'autres sources: la réduction des émissions de NO_x contribue à la diminution de la pollution par l'ozone et les poussières fines ainsi qu'à la réduction de l'apport de composés azotés dans les écosystèmes naturels et semi-naturels.

1 Einleitung

Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) werden als Stickoxide (NO_x) bezeichnet. Stickoxide sind Luftschadstoffe, die hauptsächlich durch Verbrennungsprozesse emittiert werden. Sie sind einerseits als Vorläuferschadstoffe an der Bildung von Ozon (O₃) und Feinstaub beteiligt, andererseits schädigen erhöhte NO₂-Belastungen die Gesundheit der Menschen. Aufgrund der gesundheitsschädigenden Wirkung sind in der Schweiz (und z.B. auch in der EU) Immissionsgrenzwerte für NO₂ festgelegt.

In der Schweiz ist eine kontinuierliche Abnahme der NO_x-Belastung zu beobachten. Dagegen ist die Entwicklung der NO₂-Immissionen an innerstädtischen und verkehrsnahen Standorten stagnierend, der Jahresgrenzwert für NO₂ wird an diesen Standorten nach wie vor zum Teil deutlich überschritten. Abbildung 1 zeigt als Beispiel die Jahresmittelwerte von NO_x, NO und NO₂ an den innerstädtischen und stark verkehrsbelasteten NABEL-Stationen in Bern und Lausanne, die Zeitverläufe der anderen NABEL-Stationen finden sich in BAFU (2011). Ähnliche zeitliche Entwicklungen der NO_x- und NO₂-Immissionen werden auch in anderen europäischen Ländern beobachtet (z.B. Abbott, 2005; Grice et al., 2009; Kurtenbach et al., 2009).

NO₂ wird einerseits direkt von Emissionsquellen emittiert (primäres NO₂), andererseits zu einem grossen Anteil erst in der Atmosphäre durch Reaktion von NO mit Ozon (O₃) gebildet (sekundäres NO₂). Aus diesem Grund sind in der schweizerischen Luftreinhalteverordnung Emissionsgrenzwerte für NO_x (NO + NO₂) angegeben.

Obwohl die NO_x-Emissionen des Strassenverkehrs seit Anfang der 1990er Jahre stark abgenommen haben stellt der Verkehr nach wie vor die Hauptquelle von Stickoxiden dar (BUWAL, 2005). Neben den gesamten NO_x-Emissionen hat sich beim Strassenverkehr auch das NO₂/NO_x-Emissionsverhältnis (Anteil des direkt emittierten NO₂ an den gesamten NO_x-Emissionen) geändert, der Anteil von NO₂ im Abgas der Fahrzeuge hat sich erhöht. Dies liegt am gestiegenen Anteil von Fahrzeugen mit Dieselmotor, sowie an neuen Abgasreinigungssystemen mit welchen diese Fahrzeuge ausgestattet sind¹.

Für die Entwicklung einer effizienten Strategie zur Reduktion der NO₂-Belastung an verkehrsnahen städtischen Standorten ist es wichtig zu wissen, zu welchen Anteilen sich die NO₂-Immissionen aus primär emittiertem NO₂, lokal sekundär gebildetem NO₂ sowie einer regionalen Hintergrundbelastung zusammensetzt. Durch Auswertung der zeitgleichen Messungen von NO, NO₂ und O₃ an einem verkehrsnahen städtischen Standort und einem nahegelegenen städtischen Hintergrundstandort können Kenntnisse über die Zusammensetzung der NO₂-Immissionen gewonnen werden. In diesem Bericht werden die Resultate einer entsprechenden Auswertung von langjährigen Messreihen der beiden Stationen Zürich Schimmelstrasse (Messstation der Stadt Zürich - Umwelt und Gesundheitsschutz; direkt an einer städtischen Hauptverkehrsachse gelegen) und Zürich Kaserne (NABEL Messstation, BAFU/Empa, städtische Hintergrundstation) diskutiert und mit Abschätzungen der zukünftigen Entwicklung der Emissionen sowie Erkenntnissen aus anderen Studien ergänzt.

¹ Modernere Dieselfahrzeuge sind mit Oxidationskatalysator ausgestattet, diese erhöhen durch Oxidation von NO zu NO₂ den NO₂-Anteil im Abgas. Bei Fahrzeugen mit konventionellen Dieselpartikelfiltern wird ebenfalls ein Oxidationskatalysator vorgeschaltet. Dieser wird häufig im NO₂-Überschuss betrieben, das gebildete NO₂ wird für die Verbrennung der abgeschiedenen Russpartikel benötigt.

Insbesondere werden folgende Fragen untersucht:

1. Wie ist die langjährige Entwicklung des NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisses des Strassenverkehrs am Standort Zürich Schimmelstrasse?
2. Wie hat sich der Beitrag des primär emittierten NO_2 an diesem Standort verändert?
3. Lassen sich die Erkenntnisse vom Standort Zürich Schimmelstrasse auf andere städtische und verkehrsbelastete Standorte in der Schweiz übertragen?
4. Was bedeuten diese Resultate für die Planung von Massnahmen zur Minderung der NO_2 -Belastung an verkehrsnahen Standorten?

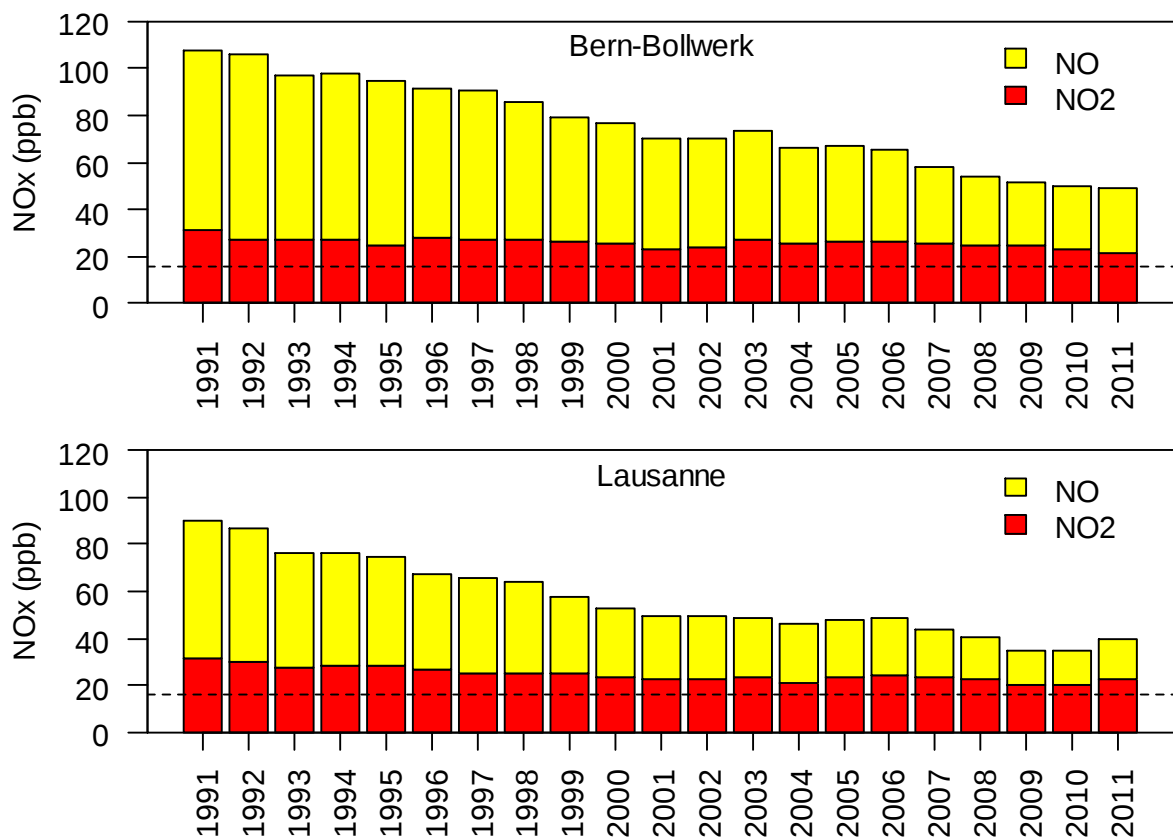


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung der Jahresmittelwerte von NO_x , NO und NO_2 an den städtischen, verkehrsbelasteten NABEL-Messstationen in Bern-Bollwerk (oben) und Lausanne (unten).

2 Hintergrund

Die NO_2 -Konzentration in der Aussenluft wird wesentlich durch Bildungs- und Abbaureaktionen bestimmt. Insbesondere wird NO_2 durch die Reaktion von NO mit Ozon (O_3) gebildet (sekundäres NO_2)



und unter Sonneneinstrahlung wieder photolytisch abgebaut



Während des Tages stellt sich schnell ein Gleichgewicht zwischen den Reaktionen (1) und (2) ein. Es resultiert der sogenannte photostationäre Zustand

$$J_{NO_2} [NO_2] = k_1 [O_3][NO], \quad (3)$$

mit der Photolyserate J_{NO_2} und k_1 der temperaturabhängigen Reaktionskonstante von (1). Die Klammern in Gleichung (3) kennzeichnen Konzentrationsangaben.

An verkehrsnahen Standorten führen die lokalen NO- und NO₂-Emissionen dazu, dass der photostationäre Zustand häufig nicht erreicht wird. Dennoch spielen die Reaktionen (1) und (2) auch hier eine wichtige Rolle, sie führen dazu, dass sich in der Nähe von Emissionsquellen Veränderungen der NO- und NO₂-Emissionen nicht in linearer Weise auf die NO- und NO₂-Belastungen auswirken. Die Abhängigkeit der NO₂-Immissionen von den NO_x-Emissionen einer lokalen Quelle wird für den photostationären Zustand im Abschnitt 6 bestimmt.

Neben Reaktion (1) kann NO in der Aussenluft durch weitere Reaktionen zu NO₂ umgewandelt werden, insbesondere durch Reaktion mit Peroxyradikalen. In einer stärker belasteten städtischen Umgebung sind diese Reaktionen jedoch vernachlässigbar (Mannschreck et al., 2004).

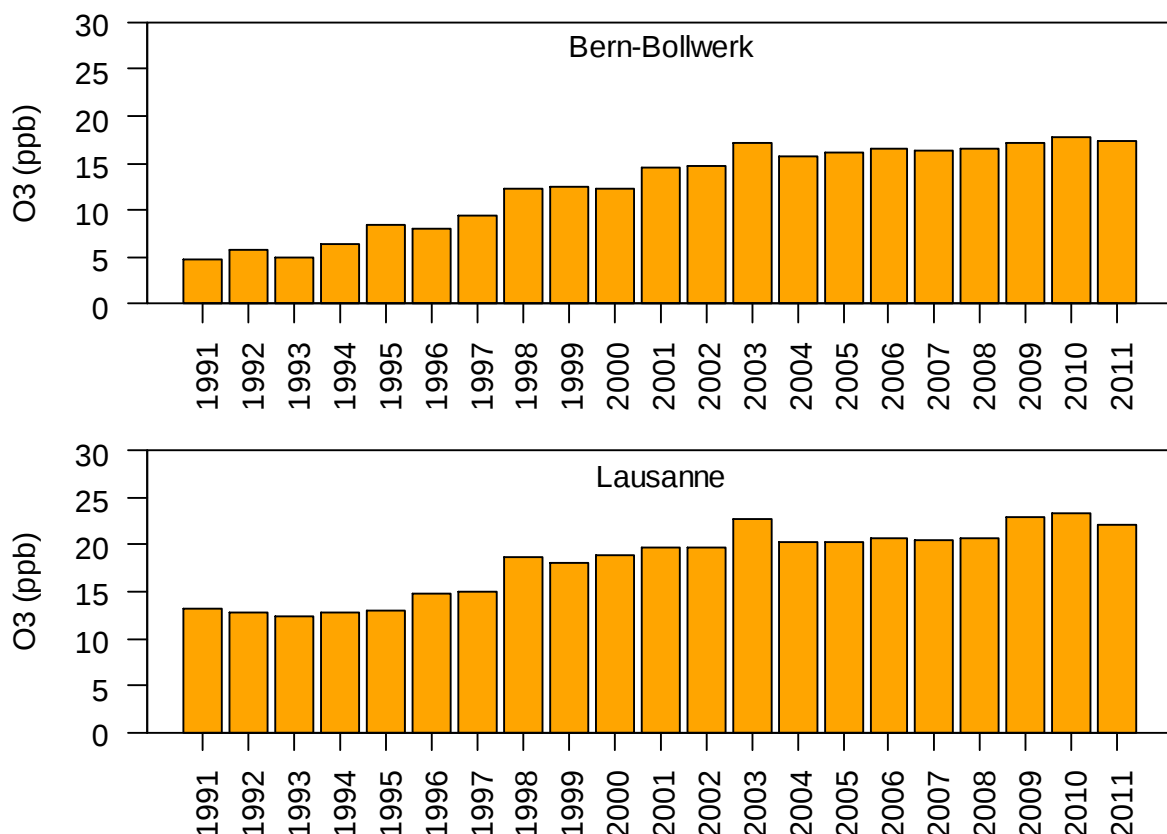


Abbildung 2: Jahresmittelwerte von Ozon an den städtischen, verkehrsbelasteten NABEL-Messstationen in Bern-Bollwerk (oben) und Lausanne (unten) für die Jahre 1991 – 2011.

Aus Abbildung 1 wird deutlich, dass das Verhältnis von NO_2 zu NO in der Aussenluft an den beiden verkehrsbelasteten Standorten Bern-Bollwerk und Lausanne in den vergangenen zwei Jahrzehnten angestiegen ist. Nach Gleichung (3) führt ein höheres Verhältnis von NO_2 zu NO in der Aussenluft auch zu einer höheren Konzentration von O_3 . Entsprechend sind seit 1991 an beiden Standorten die O_3 -Jahresmittelwerte deutlich angestiegen (Abbildung 2).

3 Methode

Zeitgleiche Messungen von NO , NO_2 und O_3 an den Messstationen Zürich Kaserne (städtischer Hintergrund) und Zürich Schimmelstrasse (städtisch, stark verkehrsbelastet) wurden entsprechend der Methode in Abbott (2005) ausgewertet. Es wurden Stundenmittelwerte aus der Zeit vom 01.01.1988 bis 31.12.2011 verwendet.

In Abbott (2005) wird hergeleitet, dass der Anteil von primärem NO_2 an den NO_x -Emissionen des lokalen Verkehrs beim verkehrsnahen Standort (bezeichnet durch α) gemäss

$$[\text{O}_x]_v - [\text{O}_x]_h = \alpha \cdot ([\text{NO}_x]_v - [\text{NO}_x]_h) + \beta \quad (4)$$

abgeschätzt werden kann. Dabei ist $[\text{O}_x]_v$ die Konzentration der Summe der am verkehrsnahen Standort gemessenen Konzentrationen von NO_2 und O_3 ($\text{O}_x = \text{NO}_2 + \text{O}_3$), $[\text{O}_x]_h$ ist die entsprechende Konzentration am städtischen Hintergrundstandort. Entsprechend sind $[\text{NO}_x]_v$ und $[\text{NO}_x]_h$ die zeitgleich gemessenen NO_x -Konzentrationen an den beiden Standorten, β repräsentiert den Effekt von anderen Reaktionen als (1) und (2) sowie Prozessen wie z.B. Deposition. Der Anteil α (also das mittlere NO_2/NO_x -Emissionsverhältnis des lokalen Verkehrs am verkehrsbelasteten Standort) kann mittels Regression von $[\text{O}_x]_v - [\text{O}_x]_h$ gegen $[\text{NO}_x]_v - [\text{NO}_x]_h$ bestimmt werden.

Gleichung (4) kann umgeschrieben werden zu

$$[\text{NO}_2]_v = [\text{NO}_2]_h + ([\text{O}_3]_h - [\text{O}_3]_v) + \alpha \cdot ([\text{NO}_x]_v - [\text{NO}_x]_h) + \beta. \quad (5)$$

Die NO_2 -Belastung am verkehrsnahen Standort kann somit aufgeteilt werden in einen städtischen NO_2 -Hintergrund ($[\text{NO}_2]_h$), einen Beitrag durch sekundäres NO_2 ($[\text{O}_3]_h - [\text{O}_3]_v$) welches durch Reaktion (1) lokal gebildet wurde, sowie $\alpha \cdot ([\text{NO}_x]_v - [\text{NO}_x]_h)$, dem Beitrag von primärem NO_2 , welches durch den lokalen Verkehr am verkehrsbelasteten Standort emittiert wurde. Wie in Gleichung (4) repräsentiert β einen durch das Modell nicht erklärbaren Restanteil von NO_2 .

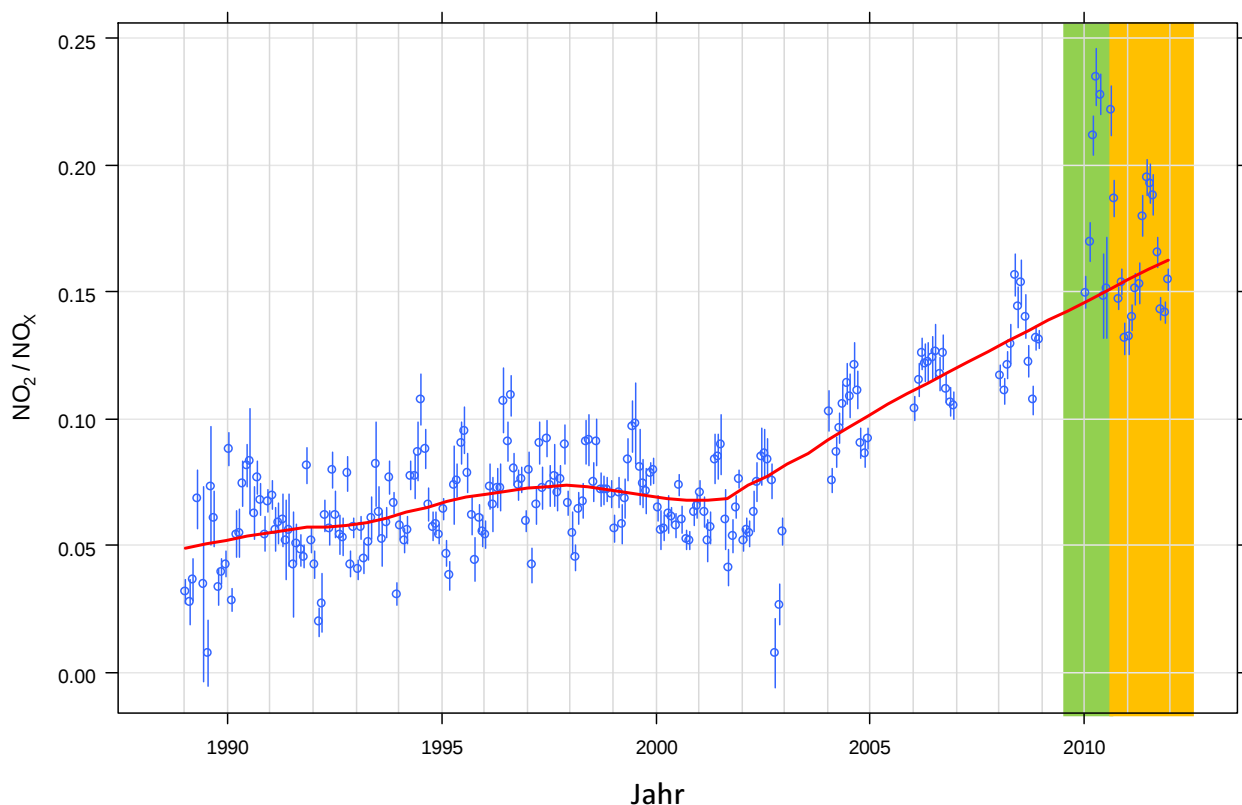


Abbildung 3: Entwicklung des NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisses ($f\text{-NO}_2$) des lokalen Strassenverkehrs am Standort Zürich Schimmelstrasse (blaue Kreise, die vertikalen blaue Linien kennzeichnen 95%-Vertrauensbereiche). Die NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisse waren während der 1990er Jahre relativ konstant bei etwa 5-7%, nach 2002 ist ein deutlicher Anstieg erkennbar (siehe Tabelle 1). Die rote Linie ist eine glatte Funktion welche an die monatlichen $f\text{-NO}_2$ Werte angepasst wurde, sie dient zur Verdeutlichung des Trends. Seit 2003 wird die Messstation Zürich Schimmelstrasse nur noch jedes zweite Jahr betrieben, daher fehlen die Werte für 2003, 2005, 2007 und 2009. Die grüne Fläche markiert eine Zeitperiode in der aufgrund von Bauarbeiten nur eine Fahrbahn in Richtung Basel befahren werden konnte (Mai 2009 bis August 2010). Seit August 2010 wird der Verkehr auf der Schimmelstrasse auf vier Fahrbahnen im Gegenverkehr geführt (orange Fläche). Die genauen Verkehrszahlen auf der Schimmelstrasse unter diesem neuen Verkehrsregime sind zurzeit noch nicht verfügbar.

4 Resultate

In diesem Dokument wird für das NO_2/NO_x -Emissionsverhältnis auch die Kurzform $f\text{-NO}_2$ verwendet (Grice et al., 2009). Abbildung 3 zeigt den Verlauf des NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisses des lokalen Strassenverkehrs an der Messstation Zürich Schimmelstrasse für die Zeit von 1988 bis 2011. Dazu wurden die Stundenwerte während jeweils eines Monats mittels Regression gemäss Gleichung (4) ausgewertet. Es ist erkennbar, dass $f\text{-NO}_2$ während der 1990er Jahre relativ konstant war, nach 2002 ist ein deutlicher Anstieg zu beobachten. In Tabelle 1 sind die Jahresmittelwerte angegeben, welche aus den monatlichen NO_2/NO_x -Emissionsverhältnissen berechnet wurden. Der beobachtete Anstieg wird durch einen steigenden Anteil von Dieselfahrzeugen und der Nutzung von neueren Technologien zur Abgasreinigung von Dieselfahrzeugen verursacht (siehe Einleitung).

Tabelle 1: Jährliche Mittelwerte der geschätzten monatlichen NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisse (f-NO_2) an der Station Zürich Schimmelstrasse (Angabe in %).

1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2004	2006	2008
4.2	6.6	5.6	5.3	5.7	7.0	6.6	7.8	7.5	7.2	7.7	6.1	6.7	6.0	9.9	11.7	13.1

2010	2011
17.8	16.2

Die beobachtete Entwicklung des NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisses an der Station Zürich Schimmelstrasse ist in Übereinstimmung mit Messungen und Modellergebnissen für f-NO_2 an anderen verkehrsbelasteten Standorten in Europa. In der Studie von Grice et al. (2009) wurden Messungen von Stationen in Deutschland, Frankreich, Grossbritannien, Italien, Niederlande, Österreich, Spanien und der Tschechischen Republik ausgewertet. Zudem wurden Emissionsinventare des Strassenverkehrs für diese Länder (zusätzlich Finnland und Griechenland) mit Emissionsfaktoren verschiedener Fahrzeugtypen und Fahrzeugtechnologien kombiniert. Daraus wurde die Entwicklung von f-NO_2 für den Zeitraum 1995-2005 berechnet, sowie Prognosen bis 2020 durchgeführt. Grice et al. (2009) fanden an den berücksichtigten verkehrsbelasteten Standorten einen Anstieg der mittleren NO_2/NO_x -Emissionsfaktoren von 8.6% im Jahr 2000 auf 12.5% im Jahr 2004. Die Modellrechnungen ergaben einen Anstieg von 6.3% im Jahr 2000 auf 10.6% im Jahr 2005.

Abbildungen 4 und 5 zeigen die mittlere jährliche Aufteilung der NO_2 -Immissionen am Standort Zürich Schimmelstrasse in die verschiedenen Anteile nach Gleichung (5). In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Abbildungen 4 und 5 für den Zeitraum von 1991-2011 als absolute (in ppb) und relative Zahlen (prozentualer Anteil an der gesamten NO_2 -Belastung) aufgelistet. Den grössten Beitrag zum NO_2 an der Station Zürich Schimmelstrasse leistet der städtische NO_2 -Hintergrund. Dieser Hintergrund ist vorwiegend durch Gleichgewichtsprozesse bestimmt (Gleichungen 1-3) und resultiert daher ebenfalls zu einem Grossteil aus sekundären Prozessen. Der Beitrag des städtischen NO_2 -Hintergrundes zeigt wegen den sinkenden NO_x -Emissionen einen negativen Trend (absolut und relativ). Der Anteil von lokal sekundär durch Reaktion von NO mit O_3 gebildetem NO_2 zeigt einen deutlichen Jahresgang mit höherem Beitrag im Sommer (nicht dargestellt). Der mittlere jährliche Beitrag von lokal sekundär gebildetem NO_2 war in den vergangenen 15 Jahren recht konstant, der relative Anteil von lokalem sekundärem NO_2 ist wegen der Abnahme des NO_2 -Hintergrundes ansteigend. Primäres NO_2 (vom lokalen Strassenverkehr an der Schimmelstrasse direkt emittiert) trug im betrachteten Zeitraum im Mittel knapp 4ppb zur NO_2 -Belastung bei. Von 1991 bis 2002 war der mittlere jährliche Beitrag leicht abnehmend, seither steigt der Beitrag von primärem NO_2 wieder an.

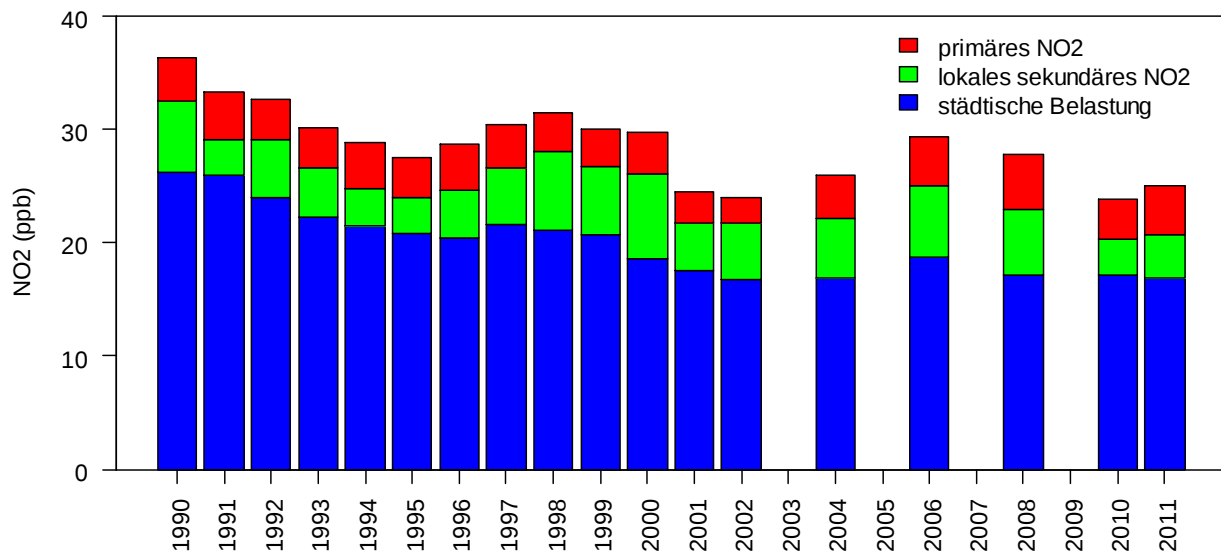


Abbildung 4: Aufteilung der jährlichen NO₂-Immissionen am Standort Zürich Schimmelstrasse in die Beiträge des städtischen NO₂-Hintergrundes sowie lokal gebildetem sekundärem NO₂ und lokal emittiertem primärem NO₂ gemäss Gleichung (5).

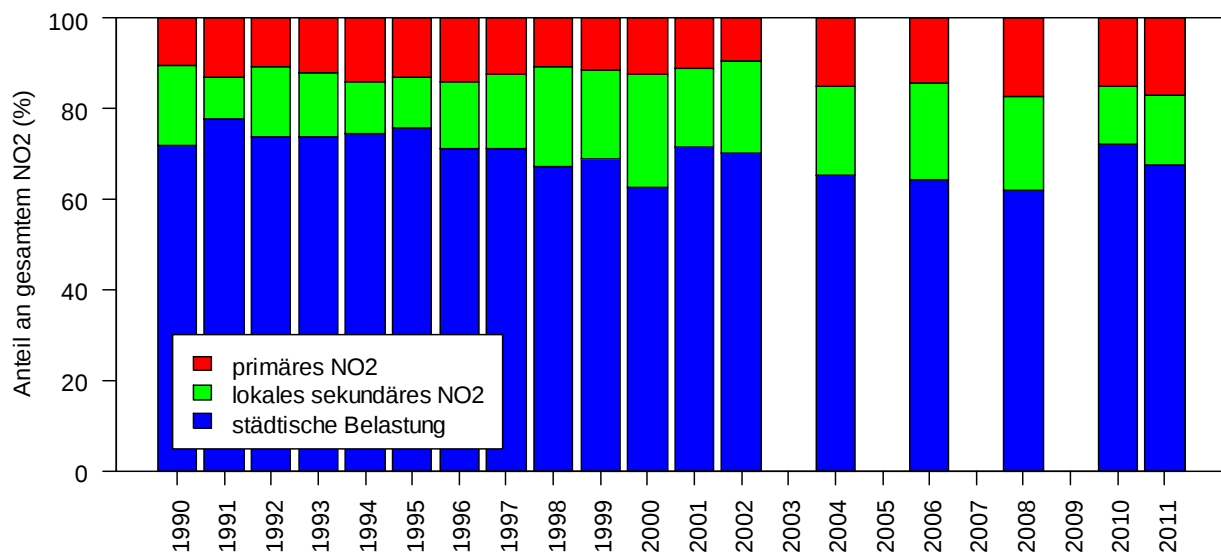


Abbildung 4: Relative Aufteilung der jährlichen NO₂-Immissionen am Standort Zürich Schimmelstrasse in die Beiträge des städtischen NO₂-Hintergrundes sowie lokal gebildetem sekundärem NO₂ und lokal emittiertem primärem NO₂ gemäss Gleichung (5).

Tabelle 2: Trend der mittleren Beiträge des städtischen NO₂-Hintergrundes, des lokal primär emittierten NO₂ sowie des lokal sekundär gebildeten NO₂ zu den gesamten jährlichen NO₂-Immissionen an der Station Zürich Schimmelstrasse. Zudem sind die Beiträge des Restanteils (Term β in Gleichung 5) aufgelistet. Angegeben sind die absoluten Beiträge in ppb und in Klammern der prozentuale Anteil an der gesamten NO₂-Belastung.

NO ₂	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2004	2006	2008
Hintergrund	26.2 (77)	24.1 (79)	22.3 (74)	21.4 (72)	20.9 (71)	20.4 (69)	21.6 (72)	21.2 (72)	20.8 (72)	18.6 (65)	17.5 (69)	16.8 (65)	16.9 (61)	18.8 (63)	17.2 (64)
Sekundär	3.1 (9)	5.1 (16)	4.3 (13)	3.3 (10)	3.2 (10)	4.3 (15)	5.0 (17)	6.9 (23)	5.9 (20)	7.4 (24)	4.3 (17)	4.9 (18)	5.2 (19)	6.3 (22)	5.7 (22)
Primär	4.3 (13)	3.5 (11)	3.6 (12)	4.1 (13)	3.6 (12)	4.0 (14)	3.7 (13)	3.4 (12)	3.4 (12)	3.7 (13)	2.7 (11)	2.3 (9)	3.9 (14)	4.3 (15)	4.9 (18)
Rest	0.8 (1)	-1.7 (-6)	0.4 (1)	1.4 (5)	2.0 (7)	0.7 (2)	-0.4 (-1)	-2.1 (-7)	-1.3 (-4)	-0.4 (-1)	1.0 (4)	2.0 (8)	1.5 (6)	0.2 (0)	-1.0 (-3)

NO ₂	2010	2011
Hintergrund	17.2 (74)	16.9 (67)
Sekundär	3.1 (14)	3.8 (17)
Primär	3.6 (16)	4.3 (18)
Rest	-0.8 (-3)	-0.5 (-2)

Der Beitrag von primärem NO₂ zur gesamten NO₂-Belastung an einem strassennahen Standort kann kurzzeitig deutlich höher sein als im jährlichen Mittel. Abbildung 6 zeigt die Abhängigkeit zwischen den verschiedenen NO₂-Anteilen und der gesamten NO_x-Belastung für die Jahre 1991-1993 und den Jahren 2008, 2010 und 2011. Für diese Abbildung wurden die gemessenen täglichen NO_x-Immissionen an der Station Zürich Schimmelstrasse in Belastungsklassen von 10ppb Breite zusammen gefasst und die zugehörigen Mittelwerte der verschiedenen NO₂-Anteile bestimmt. Bei Situationen mit höheren NO_x-Tagesmittelwerten nimmt der Anteil an sekundärem NO₂ mit der NO_x-Konzentration ab. Dies liegt daran, dass hohe NO_x-Belastungen häufig auftreten, wenn die O₃-Konzentration tief ist (z.B. im Winter) und NO nicht vollständig durch Reaktion mit O₃ in NO₂ umgewandelt werden kann. Der Beitrag von primärem NO₂ nimmt dagegen mit steigendem NO_x absolut und auch relativ zu. Abbildung 7 ist die gleiche Darstellung wie Abbildung 6, jedoch für Stundenmittelwerte der Jahre 1993 und 2011. Wegen der grösseren Anzahl von Messungen mit hohen NO_x-Werten ist hier deutlicher erkennbar als in Abbildung 6, dass der mittlere Beitrag von primärem NO₂ bei hohen NO_x-Belastungen derzeit grösser ist als zu Beginn der 1990er Jahre. Dies ist eine Folge des höheren NO₂/NO_x-Emissionsverhältnisses des Strassenverkehrs im Jahr 2011 gegenüber 1993. Aus Abbildungen 6 und 7 lässt

sich schliessen, dass der beobachtete Anstieg des NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisses zu vereinzelt zusätzlichen Überschreitungen des 24h-Immissionsgrenzwertes führen kann.

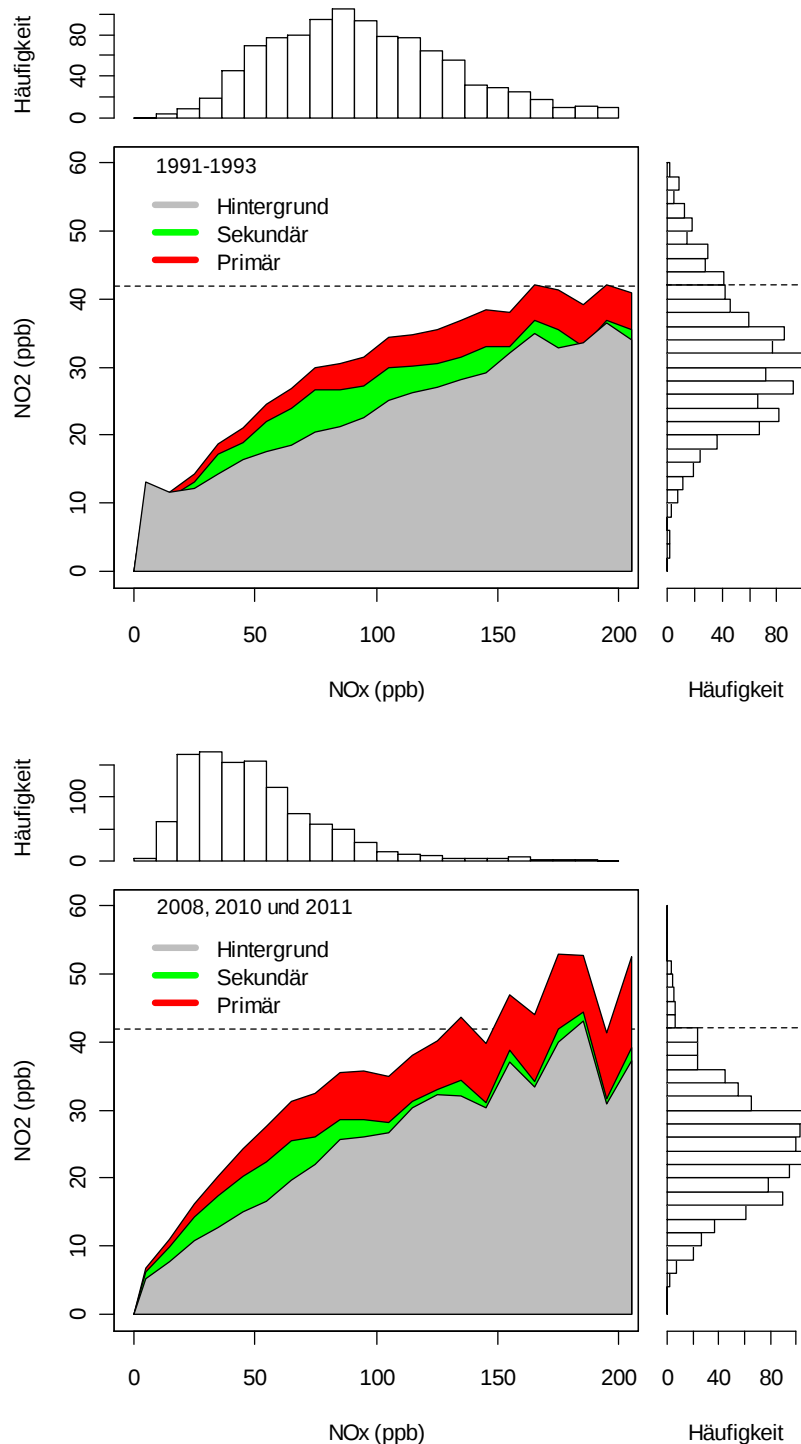


Abbildung 6: Mittlere NO_2 -Konzentration am Standort Zürich Schimmelstrasse in Abhängigkeit von der NO_x -Belastung an diesem Ort in den Jahren 1991-1993 (oben) und 2008, 2010, 2011 (unten). Die NO_2 -Mittelwerte wurden aus Tagesmittelwerten berechnet, welche in NO_x -Intervalle von 10ppb eingeteilt wurden. Die Verteilungen der NO_x -Tagesmittelwerte (Histogramm oberhalb x-Achse) sowie der NO_2 -Tagesmittelwerte (Histogramm rechts der y-Achse) sind ebenfalls dargestellt. Die gestrichelten horizontalen Linien kennzeichnen den 24h-Immissionsgrenzwert von $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($1\text{ppb} = 1.91\mu\text{g}/\text{m}^3$).

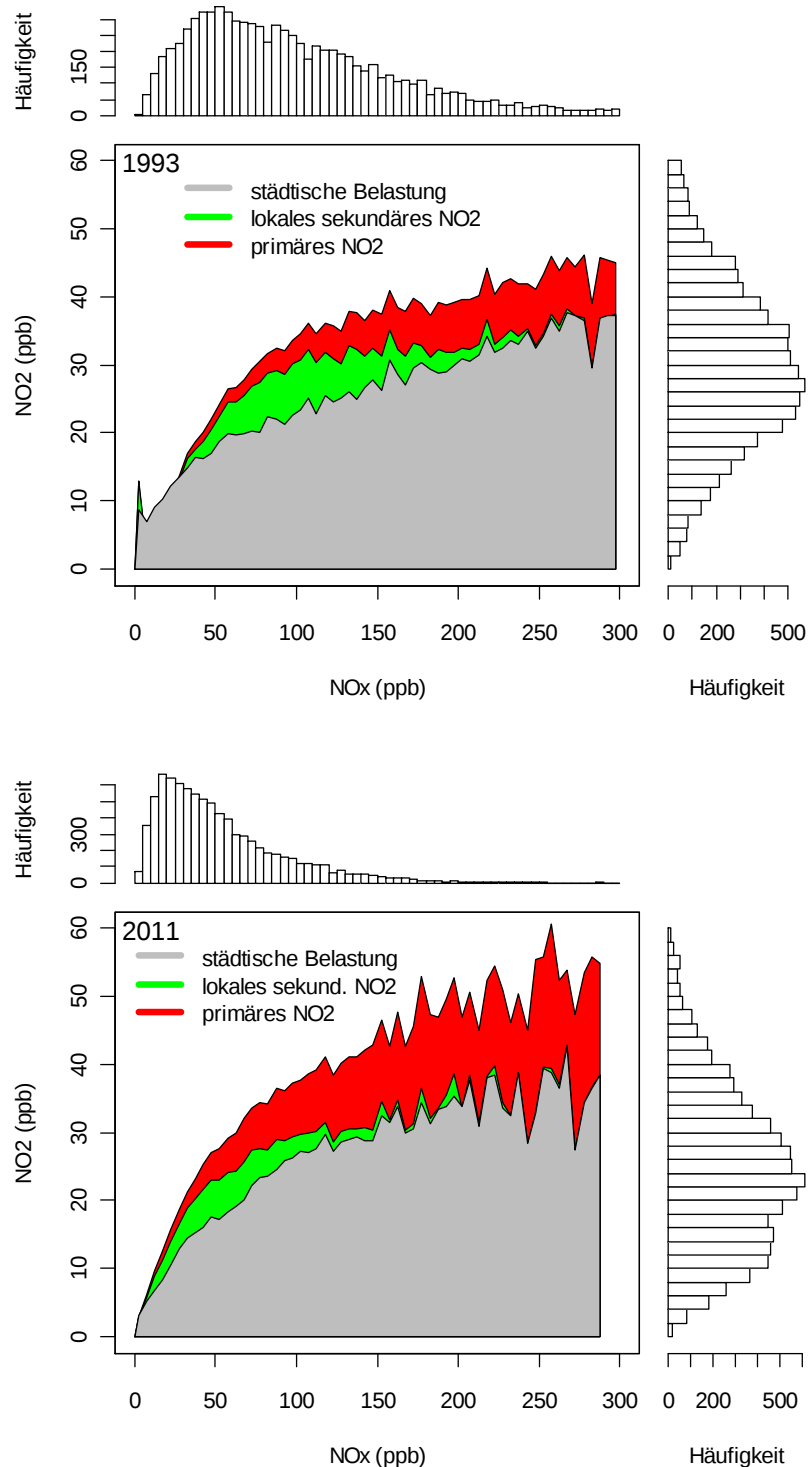


Abbildung 7: Mittlere NO₂-Konzentration am Standort Zürich Schimmelstrasse in Abhängigkeit von der NO_x-Belastung an diesem Ort in den Jahren 1993 (oben) und 2011 (unten). Die NO₂-Mittelwerte wurden aus Stundenmittelwerten berechnet, welche in NO_x-Intervalle von 5ppb eingeteilt wurden. Die Verteilungen der NO_x-Stundenwerte (Histogramm oberhalb x-Achse) sowie der NO₂-Stundenwerte (Histogramm rechts der y-Achse) sind ebenfalls dargestellt.

5 Box- Modell zur Bestimmung der Abhängigkeit von NO₂ und NO_x

Mit einer einfachen Box-Modellrechnung wurden die NO₂-Konzentrationen abgeschätzt, welche sich an einem verkehrsbelasteten Standort bei Verkehrsemissionen mit verschiedenen NO₂/NO_x-Emissionsverhältnissen einstellen. Dabei wurde angenommen, dass die Reaktionen (1) und (2) die Immissionskonzentrationen von NO, NO₂ und O₃ bestimmen und dass der photostationäre Zustand (Gleichung 3) erreicht wird. Dieses Box-Modell ist sicherlich eine stark vereinfachte und unvollständige Beschreibung der am verkehrsbelasteten Standort ablaufenden luftchemischen Prozesse. Es ist jedoch geeignet, um den Zusammenhang zwischen NO_x und NO₂-Immissionen zu beschreiben und dadurch Erkenntnisse für Strategien zur Reduktion der NO₂-Belastung an verkehrsbelasteten Standorten abzuleiten.

Für die Modellrechnungen wurde eine Photolyserate J_{NO_2} von $0.0045s^{-1}$ angenommen (Düring et al., 2011), die Reaktionskonstante wurde $k_1 = 1.4 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(-1310 / T) \text{ cm}^3 (\text{molec} \cdot s)$ mit $T=298K$ gewählt.

Aufgrund der Erhaltung des Stickstoffs bei den Reaktionen (1) und (2) sowie der Stöchiometrie von Reaktion (1) gelten (Seinfeld und Pandis, 1998):

$$[NO] + [NO_2] = [NO]_0 + [NO_2]_0 \quad (6)$$

und

$$[O_3]_0 - [O_3] = [NO]_0 - [NO] \quad (7)$$

mit $[NO]_0$, $[NO_2]_0$ und $[O_3]_0$ als den Konzentrationen von NO, NO₂ und O₃ zum Startzeitpunkt der Reaktionen (1) und (2). Gleichung (3) wurde schliesslich mit Hilfe der Gleichungen (6) und (7) nach $[NO_2]$ aufgelöst. Für eine O₃-Startkonzentration von $[O_3]_0 = 40\text{ppb}$ sowie typischen städtischen Hintergrundkonzentrationen von NO und NO₂ (10 bzw. 20ppb) denen NO_x-Emissionen des Verkehrs mit verschiedenen NO₂/NO_x-Emissionsverhältnissen überlagert wurden, ergibt sich die in Abbildung 8 gezeigte Abhängigkeit der NO₂-Konzentration ($[NO_2]$) von NO_x ($[NO] + [NO_2]$). Die mit dem Box-Modell berechnete Abhängigkeit von NO₂ und NO_x sind qualitativ sehr ähnlich zu der am Standort Zürich Schimmelstrasse beobachteten und in den Abbildungen 6 und 7 dargestellten Abhängigkeit (ein absoluter Vergleich von Modell und Beobachtung ist nicht sinnvoll, da das Box-Modell wie erwähnt eine starke Vereinfachung darstellt).

Abbildung 8 zeigt, dass bei mittleren NO_x-Konzentrationen (wie z.B. im Bereich des Medians der NO_x-Stundenwerte an der Messstation Zürich Schimmelstrasse) die NO₂-Belastung unter den vorgegebenen Bedingungen und den getroffenen Annahmen nur schwach vom NO₂/NO_x-Emissionsverhältnis abhängt. Bei höheren NO_x-Konzentrationen steigt die Abhängigkeit der NO₂-Belastung vom NO₂/NO_x-Emissionsverhältnis. Bei den an verkehrsbelasteten Standorten in der Schweiz zurzeit vorherrschenden NO₂-Immissionsbelastung (vgl. Abbildungen 1, 4, 6, 7) hat eine Reduktion des NO₂/NO_x-Emissionsverhältnisses keine starke Auswirkung auf die mittlere NO₂-Konzentration. Die NO_x-Konzentration und somit die NO_x-Emissionen müssen weiter reduziert werden, damit eine deutliche Abnahme von NO₂ erreicht werden kann.

Abbildung 8 ist zu entnehmen, dass bei hohen NO_x-Konzentrationen eine Reduktion von NO_x nur eine geringe Auswirkung auf die NO₂-Immissionen hat. Dies bedeutet, dass das Verhältnis von NO₂ zu NO in der Aussonluft mit abnehmendem NO_x ansteigt. Dadurch steigt auch die Ozon-Konzentration an (siehe Abbildung 9, vgl. Abschnitt 2). Eine höhere O₃-Belastung hat wiederum einen Einfluss auf die Abhängigkeit der NO₂-Konzentration von NO_x. Abbildung 10 zeigt diese Abhängigkeit für unterschiedliche O₃-Hintergrundkonzentrationen. Bei gleicher NO_x-Belastung stellt sich bei einem höheren O₃-Hintergrund eine höhere NO₂-Konzentration ein. Dies bedeutet, dass eine Reduktion von NO_x aufgrund des damit verbundenen Anstieges

der O_3 -Belastung zu einer etwas geringeren Abnahme von NO_2 führt, als dies durch die in Abbildung 8 eingetragenen Kurven beschrieben wird.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die an den verkehrsbelasteten Standorten beobachteten stagnierenden NO_2 -Immissionen (Abbildungen 1 und 4) durch den beschriebenen Zusammenhang zwischen den Aussenluftkonzentrationen von NO , NO_2 und Ozon erklärt werden können.

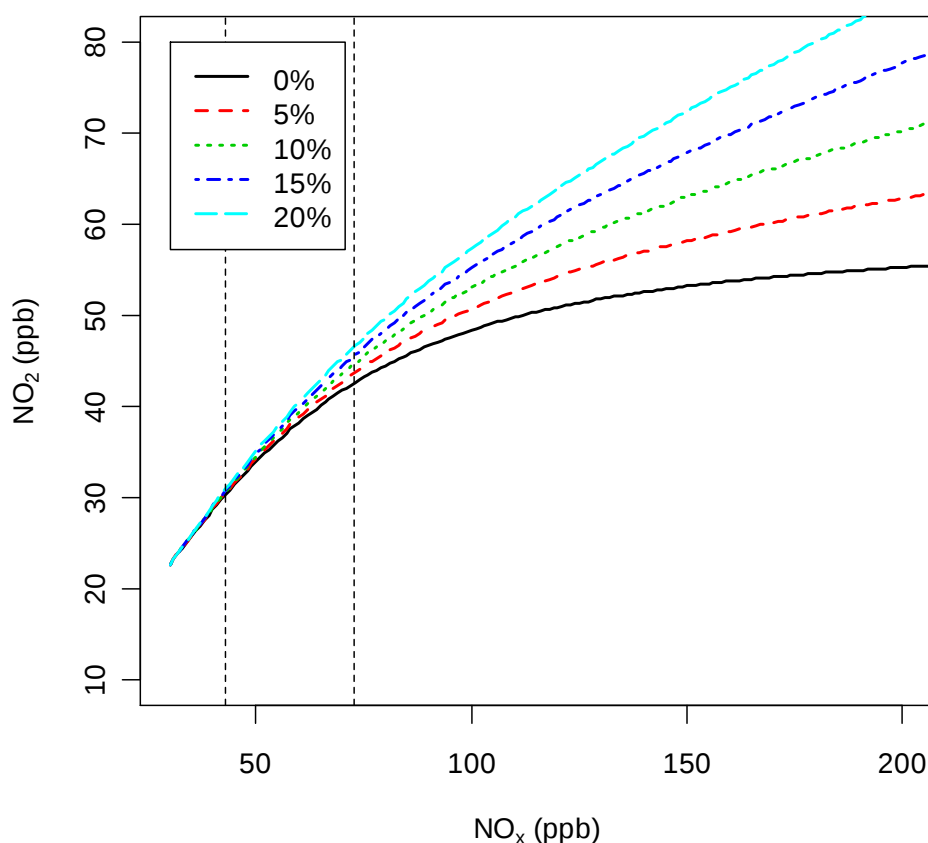


Abbildung 8: NO_2 -Konzentration gegen NO_x für verschiedene NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisse bei einer O_3 -Hintergrundbelastung $[O_3]_0 = 40\text{ppb}$ (siehe Text). Zur Orientierung sind der Median und das 95-Perzentil der NO_x -Stundenwerte 2011 an der Messstation Zürich Schimmelstrasse als vertikale gestrichelte Linien eingezeichnet.

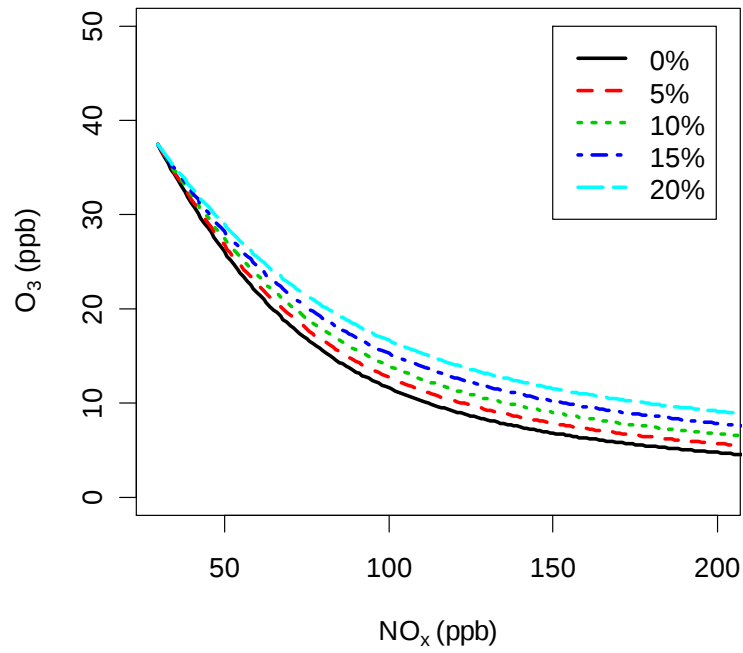


Abbildung 9: O_3 -Konzentration gegen NO_x für verschiedene NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisse. Als Startbedingungen wurde eine O_3 -Hintergrundbelastung $[\text{O}_3]_0 = 40\text{ppb}$ angenommen (siehe Text).

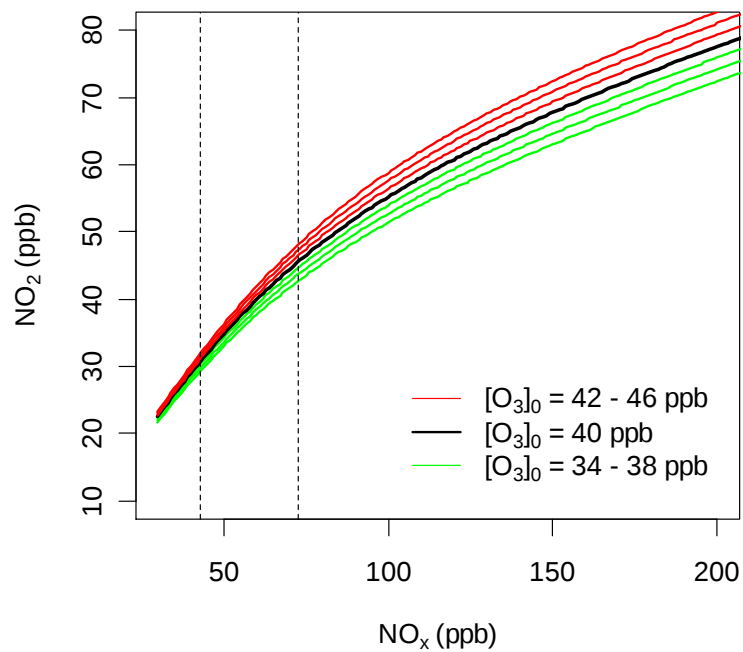


Abbildung 10: NO_2 -Konzentration gegen NO_x für verschiedene O_3 -Hintergrundbelastungen $[\text{O}_3]_0$ (siehe Text).

6 Abschätzung der Emissionsentwicklung

Die zeitliche Entwicklung der Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs kann neben anderen Luftschadstoffen auch für NO_2 und NO_x (und damit auch für das NO_2/NO_x -Emissionsverhältnis) mit dem Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA (2010) für die korrekte Zusammensetzung der Fahrzeugflotte und für verschiedene Fahrsituationen abgeschätzt werden. Mit dem HBEFA können zudem Prognosen für die zukünftige Entwicklung der Emissionen des Strassenverkehrs erstellt werden. Abbildung 11 zeigt die zeitliche Entwicklung des NO_2/NO_x – Emissionsverhältnisses des Strassenverkehrs gemäss HBEFA, Version 3.1 (die Berechnungen wurden von Felix Reutimann (BAFU) durchgeführt). Zum Vergleich sind die an der Station Zürich Schimmelstrasse ermittelten Jahresmittelwerte für f- NO_2 (Werte aus Tabelle 1) eingetragen.

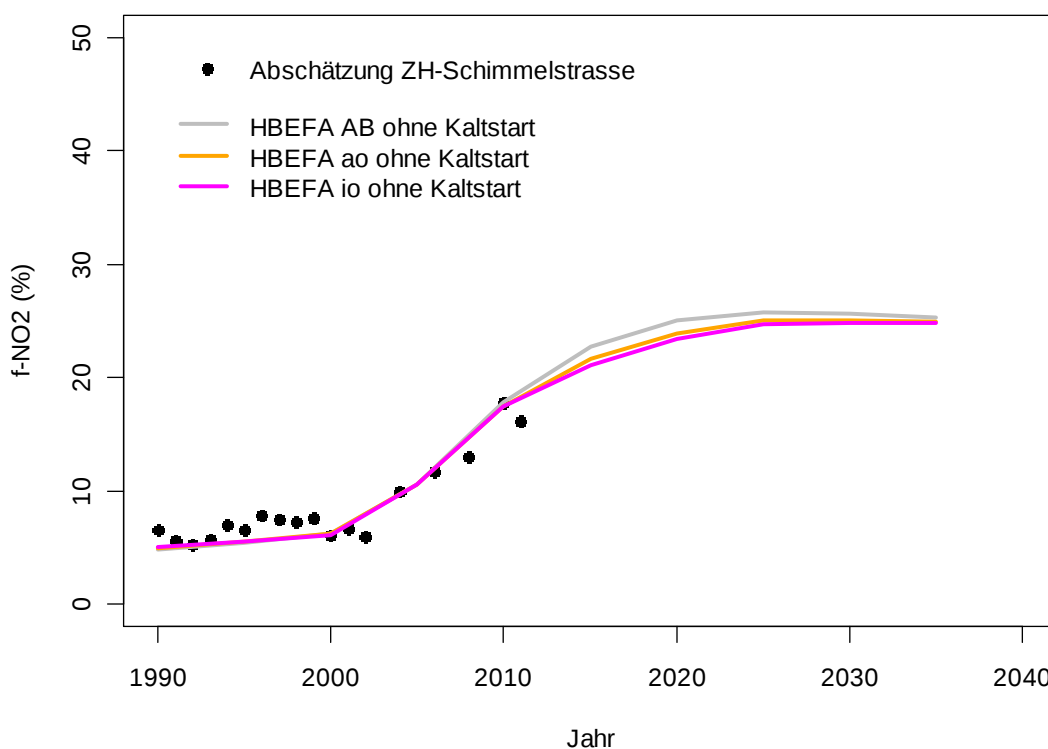


Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung des NO_2/NO_x – Emissionsverhältnisses des Strassenverkehrs gemäss HBEFA, Version 3.1 für Fahrten auf der Autobahn (AB), ausserorts (ao) sowie innerorts (io) ohne Berücksichtigung von Kaltstartemissionen. Zum Vergleich sind die Jahresmittelwerte für f- NO_2 an der Messstation Zürich Schimmelstrasse aus Tabelle 1 eingetragen.

Abbildung 11 zeigt zunächst eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den in diesem Bericht beschriebenen Abschätzungen an der Messstation Zürich Schimmelstrasse und den Berechnungen mit dem Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs. Dies kann einerseits als gegenseitige Plausibilisierung aufgefasst werden, andererseits lässt sich aus der Übereinstimmung schliessen, dass die Ergebnisse an der Messstation Zürich Schimmelstrasse repräsentativ für andere verkehrsbelastete Standorte in der Schweiz sind.

Gemäss HBEFA wird das NO_2/NO_x -Emissionsverhältnis des Strassenverkehrs bis etwa 2020 weiter ansteigen und danach bis nach 2030 ungefähr konstant bleiben. Die Entwicklung des NO_2/NO_x -Emissions-

verhältnisses sollte allerdings nicht losgelöst von der Entwicklung der gesamten NO_x -Emissionen des Strassenverkehrs betrachtet werden, diese ist in Abbildung 12 dargestellt.

Die mit dem Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs berechnete zukünftige Entwicklung der NO_x -Emissionen des Strassenverkehrs zeigt bis ca. 2030 eine Fortführung des langjährigen Trends stark abnehmender Emissionen. Die erwartete Abnahme der NO_x -Emissionen des Strassenverkehrs ist auf die kontinuierliche Erneuerung der Fahrzeuge und der Einführung der strengeren Abgasnormen Euro 5 und Euro 6 zurückzuführen. Aus der zeitlichen Entwicklung der NO_x -Emissionen und des NO_2/NO_x -Emissionsverhältnisses ergibt sich die in Abbildung 13 dargestellte zeitliche Entwicklung der NO_2 -Emissionen des Strassenverkehrs. Die NO_2 -Emissionen des Strassenverkehrs sind nach HBEFA v3.1 seit 2000 wegen des Anstieges von f- NO_2 deutlich angestiegen und haben gegenwärtig ein Maximum erreicht. Ab ungefähr 2015 sollten die NO_2 -Emissionen des Strassenverkehrs wieder abnehmen. Diese Prognose für die Entwicklung der NO_2 -Emissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz ist in guter Übereinstimmung mit Prognosen für andere europäische Länder (Grice et al., 2009).

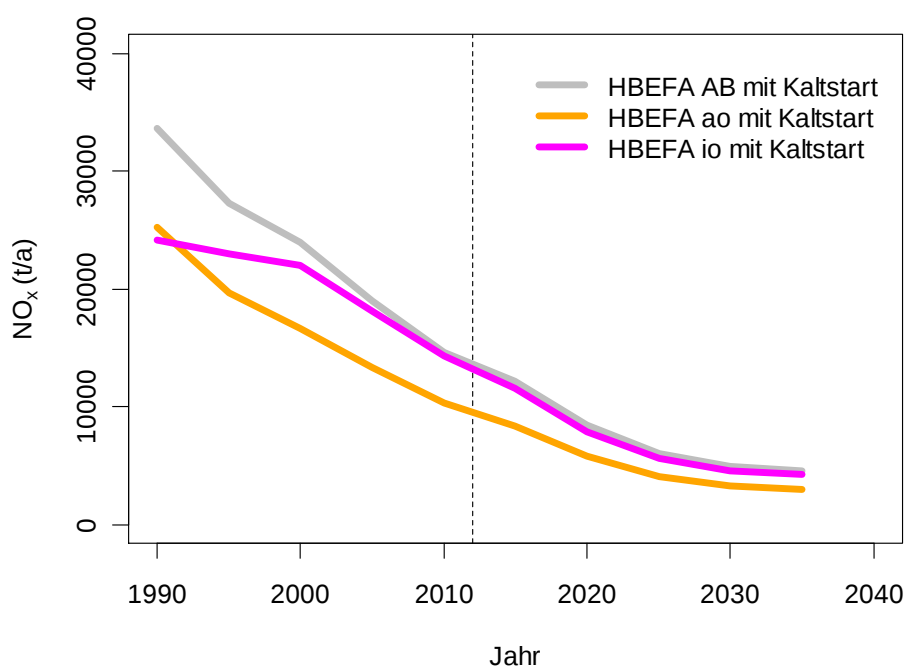


Abbildung 12: Zeitliche Entwicklung der NO_x -Emissionen des Strassenverkehrs nach HBEFA Version 3.1 für verschiedene Verkehrssituationen (Autobahn (AB), ausserorts (ao) sowie innerorts (io) mit Berücksichtigung von Kaltstartemissionen). Die gestrichelte vertikale Linie markiert das Jahr 2012.

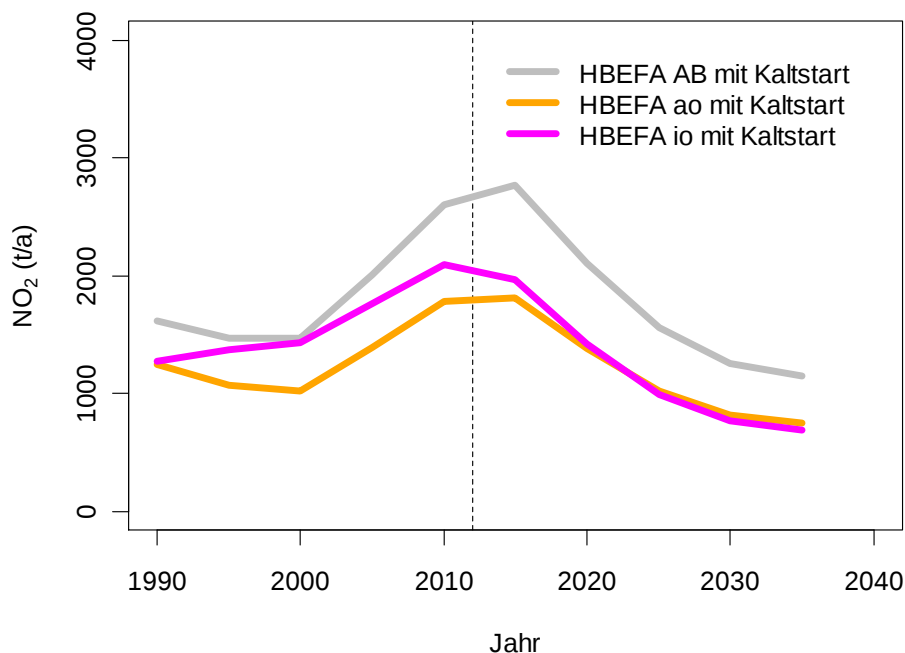


Abbildung 13: Zeitliche Entwicklung der NO₂-Emissionen des Strassenverkehrs nach HBEFA v3.1 für verschiedene Verkehrssituationen (Autobahn (AB), ausserorts (ao) sowie innerorts (io) mit Berücksichtigung von Kaltstartemissionen). Die gestrichelte vertikale Linie markiert das Jahr 2012.

7 Fazit

Die NO₂-Belastung an der Messstation Zürich Schimmelstrasse ist wie an anderen verkehrsbelasteten städtischen Standorten der Schweiz immer noch deutlich zu hoch, die Grenzwerte werden regelmässig überschritten.

Das NO₂/NO_x-Emissionsverhältnis des Strassenverkehrs am Standort Zürich Schimmelstrasse ist von etwa 7% in den 1990er Jahren auf etwa 16% im Jahr 2011 angestiegen. Dadurch ist der absolute Beitrag von primärem NO₂ an diesem Standort ebenfalls leicht angestiegen: Von 3.8ppb (bzw. 7.3µg/m³; Mittelwert 1991-1993) auf 4.3ppb (bzw. 8.2µg/m³; Mittelwert 2008, 2010 und 2011). Der NO₂-Beitrag des städtischen Hintergrundes hat dagegen seit Beginn der 1990er Jahre von 24.2ppb (bzw. 46.2µg/m³; Mittelwert 1991-1993) auf 17.1ppb (bzw. 32.6µg/m³; Mittelwert 2008, 2010 und 2011) abgenommen. Im jährlichen Mittel tragen die direkten NO₂-Emissionen am Standort Zürich Schimmelstrasse aktuell etwa 17% zur gesamten NO₂-Immissionsbelastung bei (Mittelwert 2008, 2010 und 2011). Der Beitrag durch lokal sekundär gebildetes NO₂ ist ungefähr gleich gross wie der Beitrag durch primär emittiertes NO₂ (ca. 18%, Mittelwert 2008, 2010 und 2011), den deutlich grössten Beitrag liefert der städtische NO₂-Hintergrund (ca. 68%, Mittelwert 2008, 2010 und 2011).

Eine Reduktion des NO₂/NO_x-Emissionsverhältnisses des Strassenverkehrs würde an diesem Standort folglich nicht zu einer wesentlichen Entlastung der mittleren jährlichen NO₂-Immissionen führen. Da an einem verkehrsbelasteten Standort der relative Anteil von primärem NO₂ an Tagen mit hohen NO₂-Immissionen überdurchschnittlich hoch ist, würde eine Reduktion von f-NO₂ dazu beitragen, dass die Häufigkeit von Überschreitungen des 24h-Immissionsgrenzwertes abnimmt.

Die NO_x-Belastung am Standort Zürich Schimmelstrasse ist derzeit auf einem gegenüber den 1990er Jahren deutlich tieferen Niveau. Bei der derzeitigen NO_x-Belastung an dieser verkehrsbelasteten städtischen Station sollte eine weitere Abnahme der NO_x-Konzentration zu einem stärkeren Rückgang von NO₂ führen, als dies bei den höheren NO_x-Konzentrationen der Vergangenheit der Fall war. Die mittlere jährliche NO₂-Belastung am Standort Zürich Schimmelstrasse kann wirksam gesenkt werden, wenn eine weitere Abnahme der gesamten Stickoxid-Emissionen (NO_x) realisiert werden kann.

Aufgrund der Übereinstimmung der aus Immissionsmessungen in Zürich abgeleiteten Entwicklung von f-NO₂ und den mittels HBEFA v3.1 ermittelten Werten kann davon ausgegangen werden, dass diese Untersuchungen am Standort Zürich Schimmelstrasse repräsentativ für andere verkehrsnahe städtische Standorte in der Schweiz ist. Die Ergebnisse sind ebenfalls in guter Übereinstimmung mit vergleichbaren Untersuchungen in anderen europäischen Ländern.

Die mit dem Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA v3.1) berechneten NO_x-Emissionen des Strassenverkehrs zeigen für die Zeit bis 2030 anhaltend rückläufige Emissionen. Für die Verbesserung der NO₂-Belastung am Standort Zürich Schimmelstrasse, sowie an anderen verkehrsbelasteten städtischen Standorten in der Schweiz wird es entscheidend sein, dass diese prognostizierte Abnahme der NO_x-Emissionen des Strassenverkehrs auch tatsächlich eintreten wird. Dazu müssen die zukünftigen Fahrzeuge (Personenwagen und Lastwagen) die geltenden Abgasvorschriften auch im realen Einsatz einhalten.

Die Berechnung der zukünftigen Entwicklung des NO₂/NO_x-Emissionsverhältnisses des Strassenverkehrs in der Schweiz mittels HBEFA v3.1 zeigt in Übereinstimmung mit Abschätzungen von Grice et al. (2009) für zehn weitere europäische Länder einen weiteren Anstieg des NO₂-Anteils im Abgas der Fahrzeuge bis etwa 2020. Die Prognosen für die direkten NO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz mittels HBEFA v3.1 stimmen ebenfalls mit den Resultaten der Studie von Grice et al. (2009) überein: Danach stiegen die direkten NO₂-Emissionen trotz abnehmenden NO_x-Emissionen seit ungefähr dem Jahr 2000 bis etwa 2010 deutlich an. Die NO₂-Emissionen des Strassenverkehrs werden gemäss den Prognosen bis 2015 auf dem Niveau von 2010 bleiben und anschliessend deutlich abnehmen.

Abschliessend sollte noch eine Modellierungsstudie aus England erwähnt werden, in welcher der Einfluss des NO₂/NO_x-Emissionsverhältnisses auf die Bildung von Ozon auf regionaler Skala unter sommerlichen Wetterbedingungen untersucht wurde. Jenkin et al. (2008) fanden, dass bei einem NO₂-Anteil im Abgas der Fahrzeuge von 30% gegenüber einem f-NO₂ von 0% eine im Mittel um 7% erhöhte Ozon-Konzentration auftritt. Dies wiederum hätte unter anderem einen Einfluss auf die in diesem Bericht beschriebenen Gleichgewichtsreaktionen. Die präzise und vollständige Erfassung der Auswirkungen des in diesem Bericht beschriebenen Anstieges des NO₂/NO_x-Emissionsverhältnisses des Strassenverkehrs auf die Zusammensetzung der Aussenluft ist sehr komplex und erfordert eine vollständige Modellierung welche alle relevanten chemischen und meteorologischen Prozesse berücksichtigt.

Danksagung

Ein herzlicher Dank geht an den Umwelt und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ Zürich) für die Bereitstellung der langjährigen Messwerte von Zürich Schimmelstrasse. Vielen Dank auch an Felix Reutimann (BAFU) für die Berechnung der Emissionen des Strassenverkehrs mit dem Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, HBEFA 3.1.

Literatur

- Abbott, J. (2005). Primary nitrogen dioxide emissions from road traffic: analysis of monitoring data. AEA Technology, National Environmental Technology Centre, Report AEAT-1925.
http://www.airquality.co.uk/reports/cat05/0703151041_primno2v3.pdf.
- BAFU (2009). NABEL Luftbelastung 2010, <http://www.bafu.admin.ch/luft/00649/01960/index.html?lang=de>.
- BUWAL (2005). Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene. Schriftenreihe Umwelt Nr.384, Luft. Hrsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Düring I., Bächlin W., Ketzler M., Baum A., Friedrich U., Wurzler S. (2011). A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions. Meteorologische Zeitschrift, 20, 67-73.
- Grice S., Stedmann J., Kent A., Hobson M., Norris J., Abbott J., Cooke S. (2009). Recent trends and projections of primary NO₂ emissions in Europe. Atmospheric Environment, 43, 2154-2167.
- HBEFA (2010). Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 3.1. Infras Bern, Verfügbar unter <http://www.hbefa.net>.
- Jenkin, M. E., Utembe, S. R., Derwent, R. G. (2008). Modelling the impact of elevated primary NO₂ and HONO emissions on regional scale oxidant formation in the UK, Atmospheric Environment, 42, 323-336.
- Kurtenbach, R., Becker, K.-H., Bruckmann, P., Kleffmann, J., Niedofadlo, A., Wiesen, P. (2009). Das innerstädtische „Stickstoffdioxid (NO₂)-Problem“. Gefahrenstoffe - Reinhaltung der Luft, 69, 146-149.
- Mannschreck, K., Gilge, S., Plass-Duelmer, C., Fricke, W., Berresheim, H. (2004). Assessment of the applicability of NO-NO₂-O₃ photostationary state to long-term measurements at the Hohenpeissenberg GAW Station, Germany. Atmos. Chem. Phys., 4, 1265-1277.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S. (1998) Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change, John Wiley and Sons, Inc.