

Mag.(FH) DI Dr. Stefan Krispel, DI Martin Peyerl
 Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Wien

Schadstoffreduktion durch Betonflächen – neueste Entwicklungen

55

Einleitung

Mensch und Umwelt sind in Österreich trotz zum Teil erheblicher Fortschritte in der österreichischen und europäischen Luftreinhaltepolitik vor allem bei den Luftschadstoffen Feinstaub¹, Ozon und Stickstoffoxide weiterhin hohen Belastungen ausgesetzt. Diese können, wie neue Forschungsergebnisse gezeigt haben, zu Beeinträchtigungen der Gesundheit sowie zu negativen Auswirkungen etwa auf empfindliche Ökosysteme führen. Zusätzlich führt das vermehrte Freisetzen von CO₂ zu einer Verstärkung des Klimawandels. Dieser Klimawandel im Allgemeinen und die Reduktion der Emissionen im Speziellen sind einerseits ein für zukünftige Generationen wichtiges und andererseits aufgrund der Brisanz ein äußerst sensibles Thema.

Österreich hat sich verpflichtet die NO_x-Emissionen bis zum Jahr 2010 auf 103.000 t/Jahr zu reduzieren (NEC-Ziel). Derzeit betragen die Emissionen in Österreich 225.060 t/Jahr (ohne Tanktourismus 159.170 t/Jahr) [6]. Insbesondere die Stickoxid-Emissionen (NO_x) des Verkehrssektors sind aufgrund der steigenden Verkehrsaktivität wieder im Zunehmen. Zusätzlich besteht die Verpflichtung des Kyoto-Abkommens den Ausstoß von Kohlendioxid bis 2012 auf den um 13 % verringerten Wert des Jahres 1990 zu reduzieren [15]. Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Möglichkeit wie bei Verwendung spezieller Betonoberflächen die NO_x-Belastung z. B. für Wien um knapp 25 % reduziert werden kann.

Stickstoffoxide

Stickoxide (oder Stickstoffoxide) sind eine Sammelbezeichnung für die gasförmigen Oxide des Stickstoffs. Sie werden mit NO_x abgekürzt, da es mehrere Oxidationsstufen des Stickstoffs mit Sauerstoff gibt. Als Luftschadstoffe bekannt sind NO (Stickstoffmonoxid) und NO₂ (Stickstoffdioxid). Diese entstehen bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen bei hohen Temperaturen wobei das dabei entstehende NO relativ rasch in das für den Menschen mehr schädliche NO₂ umgewandelt wird. Aus diesem Grund erfolgt die Erfassung der Stickoxide gemeinsam als NO_x.

Folgende negative Auswirkungen sind auf Stickoxide zurückzuführen [13]:

- Beeinträchtigung der Lungenfunktion (vor allem NO₂)
- Wirkung als Ozonvorläufer-substanzen
- Versauerung und Überdüngung von Böden und Gewässern
- Erhöhung der Feinstaubbelastung durch Entstehung von partikelförmigem Ammoniumnitrat.

Stickoxide verhalten sich gegenüber Wasser als Säurebildner und wirken aufgrund dieser Säurebildung reizend auf die Schleimhäute. Das für den Menschen besonders schädliche NO₂ bildet mit der Feuchtigkeit der Haut oder Schleimhaut eine schwefelige Säure [1]. Die letale Konzentration LCLo (letal concentration low) für den Menschen beträgt 200 ppm/1min.

Durch Einatmen von Stickoxiden können Schleimhautreizungen, Husten und Atemnot sowie Ödeme in den Atmungsorganen auftreten. Nach der Aufnahme toxischer Mengen treten Atemdämpfung, Erregung und Krämpfe auf. Sehr hohe Konzentrationen bewirken eine schwere Schädigung der Alveolen, der Lungenkapillaren sowie der Bronchialschleimhaut. Weiters kann es zu einem Glottiskrampf², reflektorischen Atem, Atemstillstand und somit zum Tod kommen [1]. Ebenso wirken sich langfristige Belastungen negativ auf den menschlichen Organismus aus. Es wurde beobachtet, dass erhöhte NO₂-Konzentrationen mit einer Zunahme an Todesfällen durch Atemwegs-, Herz/Kreislaufkrankungen und Lungenkrebs sowie mit einer Häufung von Atemwegserkrankungen verbunden sind [1]. Zusätzlich bilden Stickoxide eine bedeutende Gruppe bei den Ozonvorläufer-substanzen [10].

¹ Feinstaub ist kein festgelegter Begriff. Im deutschen Sprachgebrauch hat sich die Bezeichnung Feinstaub für PM10 (50% < 10 µm), aber auch für PM2,5 (50% < 2,5 µm) eingebürgert. Mitunter wird aber auch PM2,5 als Feinstaub bezeichnet.

² Ein Glottiskrampf ist eine Verkrampfung der Stimmritze des Kehlkopfs, die zu einem gefährlichen Verschluss der Atemwege führen kann.

Emission von Stickoxiden in Österreich

Luftschadstoffe werden zum größten Teil, abgesehen von einem geringen Teil durch natürliche Prozesse wie Vulkane oder Vegetation emittierte Gase, durch menschliche Aktivitäten verursacht [10]. Generell wird durch den Begriff Emission der Schadstoffausstoß in die Atmosphäre bezeichnet. Bei großen Emittenten wie kalorischen Kraftwerken oder Industriebetrieben erfolgt die Messung der Emission kontinuierlich, bei den anderen unzähligen Einzelquellen wie Verkehr oder Haushalte wäre der Aufwand für eine kontinuierliche Messung zu hoch, deshalb wird, um flächendeckende Informationen über diese Schadstoffquellen zu erhalten, meist auf verallgemeinerte Ergebnisse von Einzelmessungen zurückgegriffen [10].

Stickoxide entstehen vorwiegend als Nebenprodukt bei der Verbrennung, wobei der Verkehr, wie in Abbildung 1 ersichtlich, als der mit Abstand größte

Tabelle 1: Emissionen von Wien (2000-2002) nach Emissionsart [nach 4]

NO _x		
	[t]	[%]
Flächenquellen	2693	30,21
Linienquellen	4738	53,16
Punktquellen	1482	16,63
Summe	8913	100,00

Tabelle 2: Emissionen in Wien (2000-2002) nach Emissionsquelle [nach 4]

NO _x		
	[t]	[%]
Landwirtschaft	67	0,75
Infrastruktur	1485	16,66
Gewerbe	946	10,61
Haushalte	1366	15,33
Industrie	96	1,08
Straßenverkehr	4953	55,57
Summe	8913	100,00

Produzent von NO_x mit einem Anteil von etwa 50 % angesehen werden kann. Kleinverbraucher und Industrie sind mit je 20 % weitere bedeutende Emittenten von Stickoxiden. Während die Einführung des Katalysators Ende der 1980er Jahre eine deutliche Reduktion der NO_x-Belastung bewirkte, ist seit 1990 fast keine Reduktion mehr festzustellen. Speziell die Stickoxid-Emissionen des Verkehrssektors sind aufgrund der steigenden Verkehrsaktivität wieder im Zunehmen [3].

Eine Aufspaltung der einzelnen Emissionen in Punkt, Linien und Flächenquellen wurde in [4] für Wien aufgelistet. Die Gesamt-NO_x-Emissionen für das Wiener Stadtgebiet betragen etwa 8.913 Tonnen. Eine genaue Zusammenstellung ist Tabelle 1 zu entnehmen. Linienquellen bezeichnen im Allgemeinen Verkehrswege, Punktquellen stehen für Anlagen wo der NO_x-Ausstoß aus kontinuierlichen Messungen bekannt ist und in die Kategorie Flächenquellen fallen alle anderen NO_x-Emittenten.

Tabelle 2 liefert eine Zusammenstellung der Emissionen nach Verursachergruppen. Der Straßenverkehr (Linienquellen) hebt sich deutlich von den restlichen Luftverschmutzern ab.

Abbildung 2 liefert eine Zuordnung der Emissionen der Innenbezirke von Wien auf einem Raster von 100 x 100 m. Die Verkehrswege, im speziellen A22 und A23, grenzen sich durch erhöhte Emissionswerte deutlich vom restlichen Stadtgebiet ab.

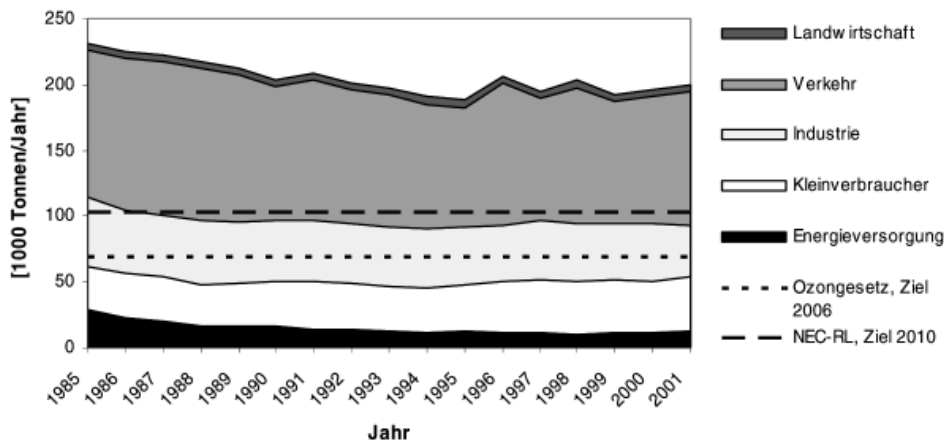


Abbildung 1: NO_x-Emissionsbelastung in Österreich nach Verursachern [3]

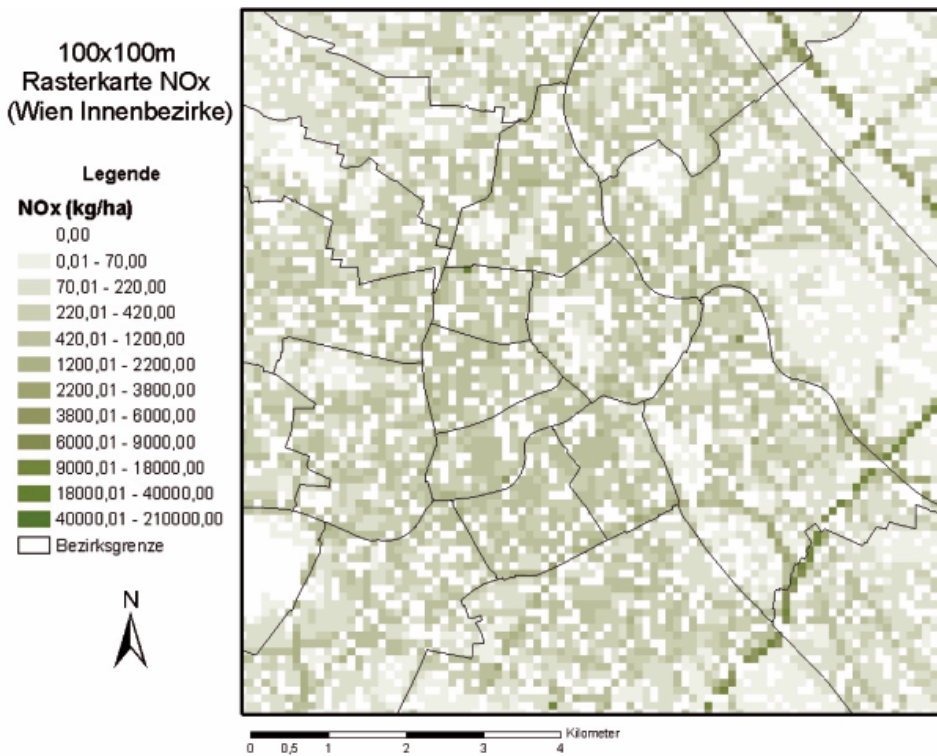


Abbildung 2: NO_x - Emissionsbelastung aller Verursachertypen für die Wiener Innenbezirke (Rasterkarte 100 x 100 m) [4]

Immission von Stickoxiden

Verschiedene atmosphärische Prozesse wie Wetterlage und Wind bewirken einen Transport bzw. eine Verdünnung (Transmission) der Luftschadstoffe. Die ausgestoßenen Schadstoffe treten wieder, unter Umständen auch in einiger Entfernung, als Immission auf Mensch und Natur auf [10]. Somit definiert der Begriff Immission die Konzentration der Schadstoffe am Ort der Einwirkung.

Die Messung von Immissionen erfolgt punktuell an Luftgütemessstationen. Derzeit werden im Stadtgebiet von Wien 17 NO_x-Messstellen betrieben.

Maximal zulässige Konzentrationen (Immission)

In Tabelle 3 sind die maximal zulässigen Konzentrationen von Stickoxiden aufgelistet. Es existieren jedoch zurzeit nur Grenzwerte für das für den Menschen gefährlichere NO₂.

Messwerte in der Luft

Die Belastungsschwerpunkte von NO_x liegen vor allem in Großstädten sowie im Nahbereich von stark befahrenen Autobahnen bzw. Straßen, da etwa 59 % (2004) der NO_x-Emissionen dem Verkehr zuzurechnen sind [vgl. 2, 3]. Weiters haben meteorologische Einflüsse große Auswirkungen auf die jeweils aktuelle Schadstoffkonzentration. Ungünstige Ausbreitungsbedingungen, wie sie

Tabelle 3: Maximal zulässige Konzentration³ von NO₂ gemäß Immissionsschutzgesetz Luft

	HMW	JMW	Grenzwert für Vegetation	Alarmwert
	(Halbstundenmittelwert)	(Jahresmittelwert) ⁴	(Tagesmittelwert)	(Gleitender Dreistundenmittelwert)
NO ₂	200 µg/m ³ (0,10 ppm)	40 µg/m ³ (0,02 ppm)	80 µg/m ³ (0,04 ppm)	400 µg/m ³ (0,20 ppm)

³ Für NO₂ gilt folgende Umrechnung:
1 µg/m³ = 0,52293 ppb (0,00052 ppm)

⁴ Grenzwert für den Jahresmittelwert von 2005-2009; Grenzwert 2010-2011 35 µg/m³, Grenzwert ab 2012 30 µg/m³

beispielsweise im Winter auftreten können, wo durch fehlende Sonneneinstrahlung keine Durchmischung der Luft erfolgt, bewirken tendenziell höhere NO_x -Konzentrationen [vgl. 10].

Abbildung 3 zeigt Jahresmittelwerte von NO_2 -Messungen von allen sich dauernd im Betrieb befindlichen österreichischen Messstellen. Der Maximalwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert) wird von der Kurve der Maximalmesswerte deutlich überschritten. (Durch die Umwandlung des durch Verbrennungsprozesse ausgestoßenen NO bildet sich aus einem Teil davon durch Reaktion mit Ozon NO_2).

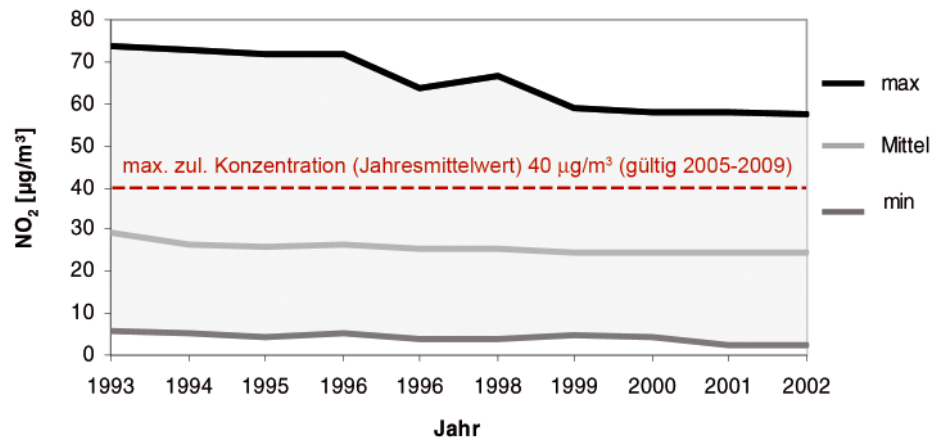


Abbildung 3: Maximaler, mittlerer und minimaler NO_2 -Jahresmittelwert der 94 in Österreich ständig im Betrieb befindlichen Messstellen [3]

Reduktionspotential der Stickoxide (NO_x) durch photokatalytisch aktive Materialien

Photokatalyse

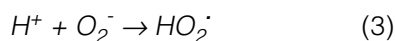
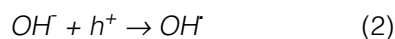
Ein Photokatalysator ist eine Substanz die eine oder mehrere Eigenschaften basierend auf Oxidation und Reduktion unter Bestrahlung, inklusive Zersetzung und Entfernen von Luft- und Wasserverschmutzung, Desodorierung (Beseitigung übel riechender Substanzen) und antibakterielle bzw. selbst reinigende sowie antibeschlagende Effekte, besitzt.

Photokatalytische Materialien sind Stoffe in denen ein Photokatalysator vorhanden ist, entweder als Anstrich, Imprägnierung oder als Zusatzstoff. Als photokatalytisch gelten Metalloxide, diese sind chemische Verbindungen eines Metalls mit Sauerstoff.

Die Photokatalyse löst Reaktionen unter Einwirkung von Wasser, Sauerstoff

und Energie (Licht) auf der Oberfläche von photokatalytischen Materialien aus. Dabei entstehen hochreaktive Hydroxylradikale (OH^\cdot), die wiederum mit anderen umgebenden Stoffen Verbindungen eingehen. Hydroxylradikale wirken als starke Oxidationsmittel [16].

Der Mechanismus der Bildung der Hydroxylradikale wird in Gleichung 1-3 [17] dargestellt.

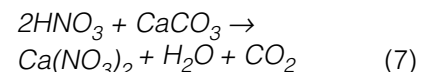
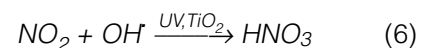
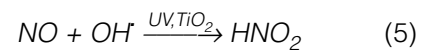
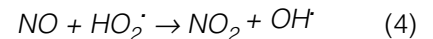


Grundsätzlich können folgende photokatalytische Reaktionen unterschieden werden:

- Es können Verunreinigungen an der Oberfläche eines photokatalytischen Materials zersetzt werden. Hierbei werden die an der Oberfläche abgelagerten Verunreinigungen durch die Hydroxylradikale zersetzt. Dies kann einfach durch den Auftrag

von organischen Farbstoffen und Beobachtung derer Zersetzung nachgewiesen werden [18].

- Zusätzlich kommt es zur Zersetzung und Umwandlung von Stickoxiden (NO_x). Folgende Reaktionsgleichungen 4, 5, 6 und 7 beschreiben den Abbau von NO zu NO_2 bzw. zu NO_3 [17]:



Feldversuche in Italien

An einer 8000 m^2 großen photokatalytisch aktiven Pflasterfläche wurden Messungen über die Reduktion der NO_x -Konzentration im Vergleich zu einer asphaltierten Referenzfläche

durchgeführt. Der 7 cm starke Vorsatzbeton der für diese Versuche angefertigten Pflastersteine wurde mit einem grauen, photokatalytisch aktiven Zement (CEM I) hergestellt [8].

Einige Werte der in [8] publizierten Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Balken geben jeweils Momentanwerte an unterschiedlichen Zeitpunkten wieder, wobei die Reduktion in Prozent bei den verschiedenen Messungen als Zahlenwert angegeben ist. Die beiden horizontalen Linien geben den Mittelwert aller über den Beobachtungszeitraum erfassten Einzelmessungen wieder. Dieser beträgt bei der photokatalytisch aktiven Zone etwa 16 ppb NO_x und bei der Referenzzone etwa 29 ppb NO_x , was einer Reduktion im Mittel von etwa 43 % entspricht. Zusätzlich ist hervorzuheben, dass vor allem die

für den menschlichen Organismus belastenden Spitzenwerte der NO_x -Konzentration von bis zu 300 ppb durch die Verwendung von photokatalytischen Materialien weitgehend reduziert werden konnten.

Abschätzung des Reduktionspotentials von Stickoxiden in Wien

Wie bereits erwähnt, werden die für Mensch und Natur schädlichen Immissionen an Luftgütemessstation bzw. durch anschließende Modellierung ermittelt. Die Angabe von Emissionen erfolgt meist in Tonnen. Hierbei handelt es sich speziell beim Verkehr um eine reine Rechengröße, bei der die Belastungswerte der einzelnen Kraftfahrzeuge aufgrund der Verkehrsdichte aufsummiert werden. Grundsätzlich kann dabei nicht von einem direkten Zusammenhang von Emissionen und Immissionen ausge-

gangen werden. Wieweit sich eine Änderung der Konzentration durch schadstoffreduzierende Maßnahmen auswirkt, kann in vernünftiger Weise nur mit Ausbreitungsrechnungen durchgeführt werden. Kleinräumig kann dieser Zusammenhang näherungsweise linear angenommen werden, wobei Verfrachtung und andere Faktoren außer Acht gelassen werden [19]. Generell kann davon ausgegangen werden, dass die höchste Konzentration der Schadstoffe etwa in Fahrbahnhöhe (bis etwa 50 cm – Auspuffhöhe) auftritt und diese mit steigender Höhe etwas abnimmt [19].

Abbildung 5 gliedert die Anteile der verschiedenen Quellgruppen an den NO_x -Emissionen für die Stadt Wien auf (linkes Diagramm). Weiters sind für die Messstation in Wien Hietzinger Kai die Beiträge der Immission von NO_2 nach unterschiedlicher Herkunft aufgeschlüsselt (rechtes Diagramm).

Folgende räumliche Differenzierung wurde festgelegt [5]:

- Der lokale Beitrag wird durch Emissionsquellen, die sich im Nahbereich der Messstelle befinden, verursacht (z. B. Verkehr).
- Der städtische Beitrag wird durch alle Emittenten, die sich innerhalb eines Ballungsraums befinden, verursacht.
- Der regionale Beitrag wird durch Emissionsquellen außerhalb des Ballungsraums Wien in einem Umkreis von höchstens 200 km verursacht. Die Summe aus städtischem und regionalem Beitrag bildet die städtische Hintergrundbelastung.

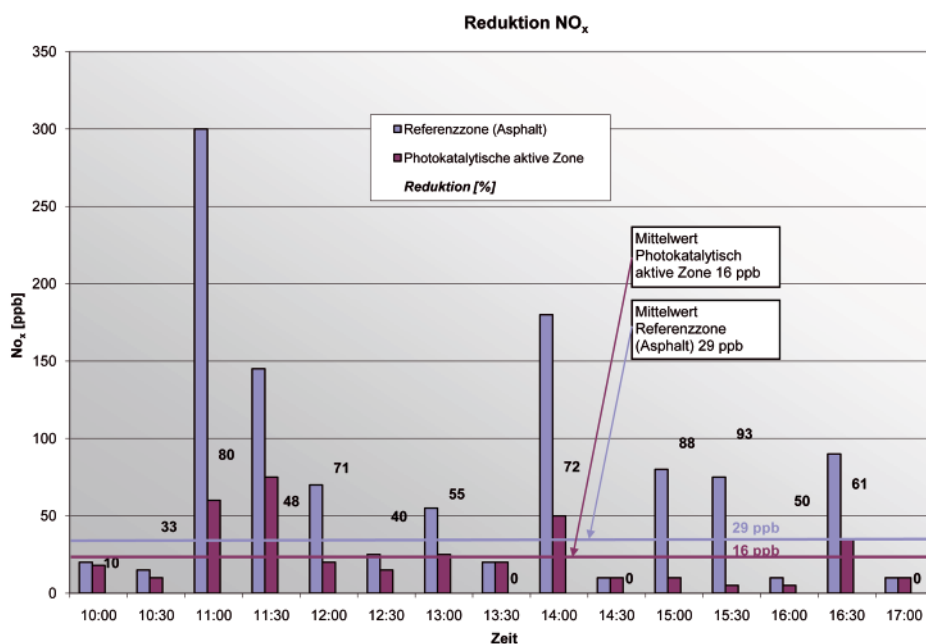
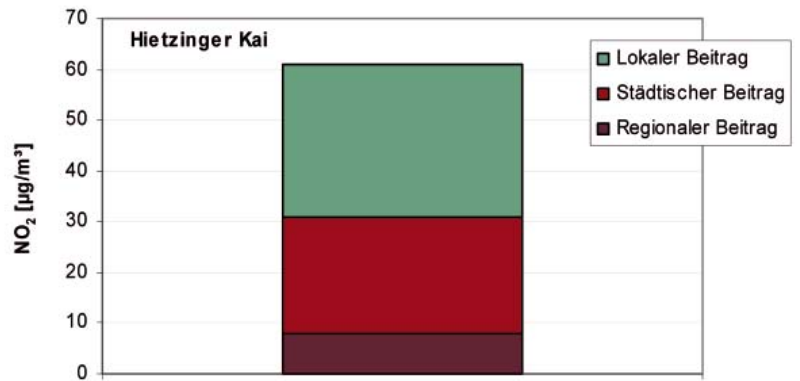


Abbildung 4: Reduktion der NO_x -Konzentration durch photokatalytisch aktive Pflasterflächen im Vergleich zu einer Referenzfläche (Asphalt) [nach 8]



NO_x-Emissionen nach Quellgruppen



NO_x-Emissionen am Hietzinger Kai [µg/m³]

Abbildung 5: Anteile der verschiedenen Quellgruppen an den NO_x-Emissionen in Wien sowie Beiträge regionaler Emissionen, städtischer Emission und lokaler Emissionen zur NO₂-Belastung am Hietzinger Kai [10]

Die Gesamtbelastung für Wien beträgt nach Basisszenario 2000-2002 laut Emissionsdatenmanagement der Stadt Wien [4] 8.913 Tonnen (vgl. Tabelle 1 und 2). Dem Straßenverkehr können davon etwa 56 % also 4.953 Tonnen zugeteilt werden.

Modellrechnungen zeigen, wie groß das Reduktionspotential an Stickoxiden durch Verwendung von photokatalytisch aktiven Straßenbaustoffen ist.

Die Gesamtlänge des Wiener Straßennetzes beträgt etwa 2.800 km, davon sind 51 km Autobahnen bzw. Schnellstraßen und 216 km Hauptstraßen B (ehemalige Bundesstraßen) [11]. In Summe ergeben die Verkehrsflächen etwa 40 km² oder einen Anteil von 10 % der Gesamtfläche des Wiener Stadtgebietes von 414 km² [14].

Eine mögliche Abschätzung des Reduktionspotentials setzt sich aus zwei Anteilen, den Emissionen die

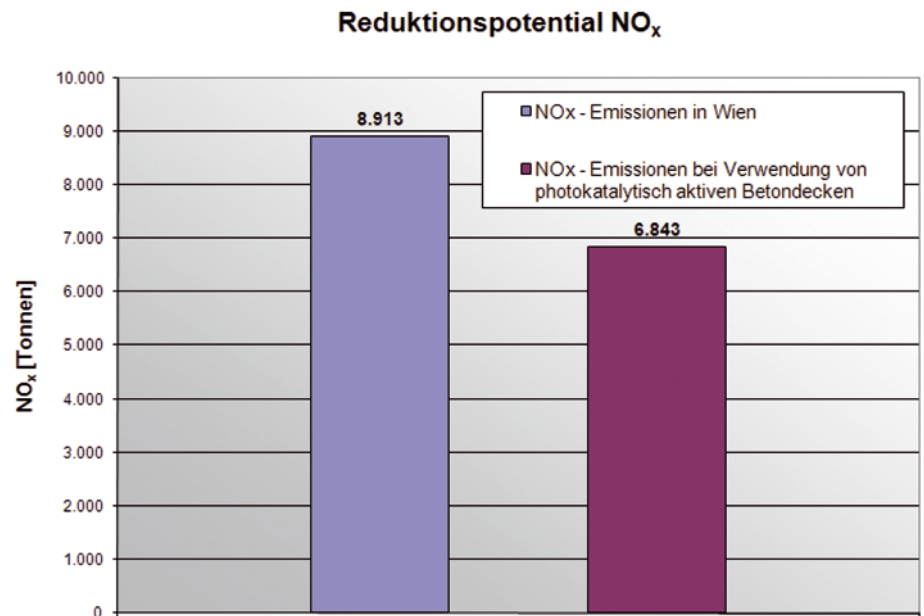


Abbildung 6: Reduktionspotential der NO_x-Emission bei Verwendung von photokatalytisch aktiven Betondecken im Wiener Straßennetz

vom Straßenverkehr stammen und einem Teil der städtischen Emissionen zusammen. Der regionale Anteil wird aufgrund der Komplexität von Verfrachtung und dergleichen in der

nachfolgend beschriebenen Abschätzung nicht berücksichtigt. Als Wirkungsgrad für photokatalytisch aktive Oberflächen wird in dieser Abschätzung der auf den Ergebnissen

der in Italien durchgeführten Untersuchungen beruhende Wert von 43 % angenommen (siehe oben).

Insgesamt ergibt sich rechnerisch ein gesamtes Reduktionspotential für Wien von 2.070 Tonnen NO_x oder 23,2 % der Gesamtemission von Wien (siehe Abbildung 6). Die durchgeführte Abschätzung bezieht sich auf den Einsatz von photokatalytisch aktiven Betonoberflächen auf dem gesamten Wiener Straßennetz. D. h. 40 km² Stadtfläche werden in dieser fiktiven Abschätzung zur Reduktion der NO_x-Belastung herangezogen.

Da Hauptdurchzugsstraßen generell einen höheren Beitrag zur NO_x-Belastung liefern, wäre auf diesen durch den Einsatz von photokatalytischen Materialien auch das Reduktionspotential bezogen auf das Gesamtstraßennetz prozentuell höher. Speziell an diesen hoch frequentierten Verkehrswegen wäre auch aufgrund der Verkehrsbelastung eine Bauweise mit photokatalytisch aktiven Betonfahrbahndecken statt Asphalt sinnvoll. Eine Reduktion der lokalen Emission bewirkt auch eine Reduktion der Gesamt-NO_x-Emission in einem Gebiet. Somit könnte, wie hier nicht berücksichtigt, bei Einsatz von photokatalytisch aktiven Fahrbahnoberflächen auch der regionale Anteil der Emission aus dem Verkehr reduziert werden.

Abschließend sei noch zu erwähnen, dass die höchsten Konzentrationen von Stickoxiden unmittelbar in Fahrbahnnähe auftreten, also etwas niedriger als die Messhöhe der genormten Messstellen. Genau dort setzen

die photokatalytischen Betonfahrbahnoberflächen mit der Reduktion von Stickoxiden an.

Zusammenfassung

Versuchsprojekte haben unter realitätsnahen Bedingungen gezeigt, dass ein Reduktionspotential der mittleren Stickoxidkonzentration von bis zu knapp 50 % möglich ist. Besonders hervorzuheben sei, dass besonders die Spitzenbelastungswerte reduziert werden konnten. Die bei den Versuchsprojekten ermittelten Ergebnisse erbringen den Beweis, dass die Verwendung von photokatalytisch aktiven Metalloxiden in Betonoberflächen zu einer wesentlichen Verbesserung der Luftqualität führen und die für den menschlichen Organismus schädlichen Belastungswerte von Stickoxiden auf ein tolerables Maß reduzieren. Weiters führt die Verwendung von Beton durch die niedrigeren Bauteiltemperaturen zu geringerer Umgebungstemperatur und damit zu einem niedrigerem Kühlenergiebedarf (Gebäudeklimaanlagen, etc.). Dies hat wiederum eine Reduktion des Kohlendioxidausstoßes aufgrund geringerer Energieproduktion zur Folge [15].

Vereinfachte Berechnungen für Wien haben gezeigt, dass bei einem Einsatz von photokatalytisch aktiven Betonflächen im Straßennetz des Stadtgebietes eine Reduktion der Stickoxidbelastung erreicht werden kann. Würde man in Zukunft in Wien Straßenoberflächen mit photokatalytisch aktiven Betonoberflächen versehen, wären mit der Nutzung von etwa 1/10 der Fläche des Stadtgebietes

eine Reduktion von nahezu 1/4 der NO_x-Gesamtjahresbelastung (Reduktion von über 2000 t) möglich. Besonders hervorzuheben sei abschließend, dass durch photokatalytische Oberflächen an stark frequentierten Verkehrswegen speziell die Spitzenbelastungen direkt an der Schadstoffquelle reduziert werden könnten.

Literaturverzeichnis

- [1] Gefahrenstoff ACE 81 Stickstoffdioxid NO₂: Betriebsanweisung zum Anorganischen Praktikum II, Prof. Dr. A. Pfitzner, Universität Regensburg
www.chemie.uni-regensburg.de/Anorganische_Chemie/Pfitzner/data/betriebsanweisungen.pdf.
- [2] Augustyn, R. et al: Jahresbericht 2006, Luftgütemessungen der Umweltschutzabteilung der Stadt Wien (MA22); 30. Juli 2007.
- [3] Siebenter Umweltkontrollbericht des Umweltministers an den Nationalrat: Berichtszeitraum 1.1.2001-31.12.2003, Umweltbundesamt 2004.
- [4] Orthofer, R. et al: emikat.at – Emissionsdatenmanagement für die Stadt Wien, systems research, April 2005.
- [5] Augustyn, R. et al: Statuserhebung NO₂ – 2002 & 2003 in Wien gemäß Immissionsschutzgesetz – Luft, MA 22 -687/2005.
- [6] Austria's Annual Air Emission Inventory 1990 – 2005: Submission under National Emission Ceilings Directive 2001/81/EC.

- [7] Beeldens, A.; Redant, K.: Air purification and self – cleaning materials: photocatalytic pavement blocks on the ‘leien’ of Antwerp.
- [8] Plassais, A.; Guillot, L.: De – pollution activity assessment of photocatalytic cement-based materials: from laboratory to real scale testing.
- [9] Fachgrundlagen für eine Statuserhebung zur NO₂-Belastung an der Messstelle Wien-Hietzinger Kai: Überschreitung der Summe aus Grenzwert und Toleranzmarge das NO₂-Jahresmittelwertes in den Jahren 2002 und 2003, Umweltbundesamt.
- [10] Spangl, W.; Nagl, C.; Schneider, J.: Jahresbericht der Luftgütemessungen in Österreich 2005, Umweltbundesamt.
- [11] Straßen Wien (MA28) – Zahlen und Fakten, 29.08.2007, <http://www.wien.gv.at/verkehr/strassen/fakten/zahlen.html>.
- [12] Schneider, J.; Spangl, W.: Analyse der Überschreitung des Immissionsgrenzwertes für NO₂ am Hietzinger Kai am 10.5.2005, Umweltbundesamt im Auftrag der MA22; Wien im Juli 2000.
- [13] Gobiet, W. et al: Emissionsgesteuerter Verkehr über die Alpen ALP-EMIV, Endbericht des theoretisch wissenschaftlichen Teils: 5 Verkehrliche Emissionen in ökologisch sensiblen Gebieten, Forschungsprojekt Graz 2006.
- [14] Statistisches Jahrbuch 2005: Statistik Austria, Herausgeber: Österreichischer Städtebund, Wien 2006.
- [15] Krispel, St.; Peyerl, M.: Erwärmungseffekte durch befestigte Flächen im städtischen Bereich. Zement & Beton, Heft 4, 2007.
- [16] Photokatalyse in zementgebundenen Baustoffen, Cement International 6/2006.
- [17] Tseng, Y.; Kuo, C.; Huang, C.; Li, Y.; Chou, P.; Cheng, C.; Wong, M.: Visible-light-response nano TiO₂ with mixed crystal lattice and its photocatalytic activity, Nanotechnology 17, 2006.
- [18] Innovative Werkstoffe mit Titan-dioxid – selbst reinigende und photokatalytische aktive Baustoffoberflächen: Cement International 6/2006.
- [19] Dr. C. Nagl, Umweltbundesamt, Persönliche Mitteilung.