

**Hochschule Ostwestfalen-Lippe**  
*University of Applied Sciences*

**Fachbereich Bauingenieurwesen**



**Prof. Dr.-Ing. Carsten Schlötzer**  
**Lehrgebiet Geotechnik**  
**Emilienstraße 45**  
**32756 Detmold**

**Wissenschaftliche Überprüfung der photokatalytischen  
Reaktion von TiO<sub>2</sub>- Betonoberflächen des neuen  
Zentralen Omnibus-Bahnhofs in Detmold**

**Abschlussbericht**

**Az 29963-23**

**DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt**

**Referat 14**

**Prof. Dr.-Ing. Carsten Schlötzer, Dipl.-Ing. Claus Deis,  
Dipl.-Ing. M. Sc. Michael Naarmann**

**Detmold, September 2015**

**Prof. Dr.-Ing. Carsten Schlötzer**  
**Lehrgebiet Geotechnik**  
**Emilienstraße 45**  
**32756 Detmold**

**Wissenschaftliche Überprüfung der photokatalytischen  
Reaktion von TiO<sub>2</sub>- Betonoberflächen des neuen  
Zentralen Omnibus-Bahnhofs in Detmold**

**Abschlussbericht**

**Az 29963-23**

**DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt**

**Referat 14**

**Prof. Dr.-Ing. Carsten Schlötzer, Dipl.-Ing. Claus Deis,  
Dipl.-Ing. M. Sc. Michael Naarmann**

**Detmold, September 2015**

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>29963-23</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>125.000 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Wissenschaftliche Überprüfung der photokatalytischen Reaktion von TiO<sub>2</sub>-Betonoberflächen des neuen Zentralen Omnibus-Bahnhofs in Detmold</b>			
<b>Stichworte</b>					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>36 Monate</b>	<b>12.06.2012</b>	<b>11.06.2015</b>			
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>		Hochschule Ostwestfalen-Lippe FB Bauingenieurwesen Prof. Dr.-Ing. Carsten Schlötzer Emilienstraße 45  32756 Detmold		Tel 05231/769-732 Fax 05231/769-748 Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Carsten Schlötzer Bearbeiter M. Sc. M. Naarmann, B. Eng. D. Damoulakis Dipl.-Ing. C. Deis	
<b>Kooperationspartner</b>					
<p><b>Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens</b></p> <p>Die Umwelt in der Umgebung von Omnibushaltestellen und zentralen Omnibusbahnhöfen ist besonders häufig durch Stickoxide belastet. Die Ursache dafür liegt unter anderem an dem vermehrten Ausstoß von Abgasen beim Anfahren und dem Betrieb der Fahrzeuge im Stand. Um die Stickoxidbelastung unmittelbar am Entstehungsort zu reduzieren, scheint eine Anwendung von photokatalytischen Oberflächen, die durch Beimischung von Titandioxid im Beton erreicht werden kann, im Bereich der Verkehrsflächen sinnvoll.</p> <p>Die Stadt Detmold hat die Oberflächen des neuen zentralen Omnibusbahnhofs (ZOB) mit photokatalytischen Oberflächen ausgestattet. Zielsetzung des Forschungsvorhabens war es, durch entsprechende ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen die Wirksamkeit der photokatalytischen Oberflächen zu bestätigen. Dabei sollte der Nitratgehalt des abfließenden Oberflächenwasser von zwei zu vergleichenden Betonflächen untersucht werden. Eine der beiden Betonflächen ist ohne photokatalytische Oberfläche ausgerüstet und dient somit als Referenzfläche.</p> <p><b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b></p> <p>In einem ersten Bearbeitungsschritt sollten geeignete Flächen mit etwa gleicher Verkehrsbelastung ausgewählt werden. Anschließend sollte ein kombiniertes Mess- und Erfassungssystem entwickelt werden, mit dem das Oberflächenwasser gezielt gesammelt werden kann, ohne dass der 1. Spülstoß verloren geht. Die Funktion sollte im Labor des Fachbereichs zunächst überprüft werden. Die Planung des Sammelsystems war in die städtische Planung des Neubaus des ZOB zu integrieren. Während der Bauphase sollten die für die spätere Photokatalyse relevanten und die für die Untersuchung notwendigen Baumaßnahmen bautechnisch begleitet werden. Nach Fertigstellung der photokatalytischen Oberflächen sollten die Untersuchungen zur Beurteilung der Wirksamkeit der hergestellten Fläche beginnen. Parallel zur regelmäßigen Nitratuntersuchung wurden über mehr als ein Jahr Stickoxide, Temperatur, Globalstrahlung, Niederschlagsmenge, Windstärke und -richtung im betreffenden Bereich aufgezeichnet. Die Auswertung und Ergebnisdarstellung sollte parallel zu den laufenden Untersuchungen erfolgen. Das Programm wurde durch naturwissenschaftliche Begleituntersuchungen des Fraunhofer Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie begleitet.</p>					
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a></small>					

## **Ergebnisse und Diskussion**

Im Rahmen der hier durchgeführten ingenieurmäßigen Beurteilung der Wirksamkeit photokatalytisch aktivierter Flächen wurde im Unterschied zur bisherigen Vorgehensweise mit einer Bewertung der gemessenen Stickoxidabbaurate auf das entstehende Reaktionsprodukt Nitrat der photokatalytischen Reaktion zurückgegriffen. Insoweit handelt es sich hierbei um eine sogenannte indirekte Wirksamkeit, da sie sich nicht unmittelbar beziehungsweise quantitativ auf eine Reduktion der Stickoxidkonzentrationen bezieht. Für eine Ableitung dieser indirekten Wirksamkeit wurden aus den Einzelwerten für die Nitratkonzentrationen Jahresmittelwerte gebildet. Der sich jeweils ergebende Differenzwert zwischen den gemessenen Nitratkonzentrationen von den Flächen mit und den Referenzflächen ohne TiO<sub>2</sub> wurde dann auf den Sockelwert beziehungsweise auf die Hintergrundbelastung des Niederschlagswassers bezogen. Dabei wurde die Nitrat-Hintergrundbelastung über die Referenzflächen ohne TiO<sub>2</sub>-haltige Baustoffe bestimmt. In einem zweiten Schritt wurden die trendmäßigen Steigungen der Summenlinien berechnet und auf die Steigungen der Summenlinien der Referenzflächen bezogen. Diese rechnerischen Ermittlungen der indirekten Wirksamkeit führen bei allen Untersuchungsflächen auf eine Größenordnung von etwa 30 %. Sie wurden durch eine entsprechende Auswertung der Stickstoffmengen, die im Sinne einer Plausibilitätsprüfung durchgeführt wurde, bestätigt.

Damit konnte die Wirksamkeit der hergestellten und photokatalytisch aktivierten Verkehrsflächen ingenieurmäßig auch in situ unter natürlichen Einflüssen und Randbedingungen nachgewiesen werden.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Fachzeitschriften:

- Deine Bahn (Mitarbeiterzeitung der Deutschen Bahn AG), Ausgabe 11/2013, „Neue Perspektiven beim Bau von Omnibusbahnhöfen“
- Baublatt CH, Ausgabe 4/2015
- Betonbauteile, geplant

Presse:

- Die Glocke 27.07.2012
- Lippische Landeszeitung 19.11.2013
- Anfrage Titelgeschichte "Lux - Intelligente Energie" Beilage SZ

Radio:

- Regionalnachrichten vom 19.11.2013 mit Schwerpunkt „Grüner Beton“, WDR 2
- Westblick 20.11.2013, WDR 5

Fernsehen:

- Lokalzeit OWL, WDR, 20.11.2013
- Lokalzeit Düsseldorf, WDR, 21.10.2014
- Galileo, ProSieben, Dreharbeiten abgeschlossen

Vorträge:

- 10.02.2015, VSVI-Seminar Detmold
- 19.02.2015, FGSV Köln
- 03./04.03.2015, BASt-Kolloquium Bergisch-Gladbach
- 09.-11.09.2015 ICCBP-Tagung Dresden, abgesagt

## **Fazit**

Im Ergebnis der insgesamt durchgeführten Maßnahme und der ingenieurmäßigen Begleitung der Bauarbeiten sowie der Ermittlung der Wirksamkeit ist zu empfehlen, zumindest in innerstädtischen Bereichen mit hoher Verkehrsbelastung entsprechende Baustoffe zu verwenden, um die gesundheitsgefährdende Stickoxidbelastung zu reduzieren. Die hierfür anfallende Kostenerhöhung in lediglich Prozentgrößenordnung lässt zumindest im Sinne einer ganzheitlichen Planung den Schluss zu, dass der Einsatz photokatalytisch wirksamer Baustoffe im Vergleich zu Alternativen sehr einfach mit den gängigen bautechnisch erprobten Methoden durchzuführen ist und einen nur geringen und sehr überschaubaren Kostenaufwand bedingt.

## Inhalt

1	Einleitung .....	8
2	Durchführung der Untersuchungen.....	13
2.1	Allgemeines.....	13
2.2	Beschreibung der Versuche .....	13
2.2.1	Große Untersuchungsflächen .....	13
2.2.2	Kleine Untersuchungsflächen.....	15
2.2.3	Nitratanalytik .....	16
2.2.4	Laboruntersuchung .....	16
3	Darstellung der Ergebnisse .....	17
3.1	Allgemeines.....	17
3.2	Klimadaten .....	17
3.3	Ergebnisse der Analysen an den Wasserproben .....	21
3.3.1	Vorbemerkungen .....	21
3.3.2	Große im Bereich der befahrenen Bussteige liegende Versuchsflächen .....	22
3.3.3	Kleine auf dem Containerdach liegende Versuchsflächen aus Betonpflastersteinen und –platten .....	25
3.4	Ergebnisse der Untersuchungen in der Messzelle .....	31
4	Interpretation und Bewertung der Untersuchungsergebnisse.....	32
5	Zusammenfassung und Ausblick .....	36
	Quellenverzeichnis .....	37

## Abbildungsverzeichnis

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Ermittlungen der sogenannten indirekten Wirksamkeit der photokatalytisch wirksamen Flächen beziehungsweise Verkehrsflächenbefestigungen aus dem jeweiligen Jahresmittel der Einzelwerte und aus den abgeleiteten Steigungen der Summenlinien 347

Abbildung 1.1	Schematische Darstellung der Photokatalyse [HCA15]	9
Abbildung 2.1:	Lage der großen Versuchsflächen und der Messeinrichtungen	14
Abbildung 2.2:	Versuchsaufbau Schnitt durch Sammelschacht	15
Abbildung 2.3:	Anordnung kleine Versuchsflächen	16

Abbildung 3.1: Zeitliche Entwicklung der Niederschlagsmengen am ZOB Detmold in mm beziehungsweise L/m <sup>2</sup> für den Messzeitraum 2014	18
Abbildung 3.2: Zeitliche Entwicklung der Globalstrahlung am ZOB Detmold in W/m <sup>2</sup> für den Messzeitraum 2014	18
Abbildung 3.3: Zeitliche Entwicklung der Stickstoffkonzentrationen am ZOB Detmold in ppb für den Messzeitraum 2014	19
Abbildung 3.4: Gegenüberstellung der je Kalenderwoche summarisch aufgetragenen Globalstrahlung und der der Stickstoffkonzentration am ZOB Detmold für den gesamten Messzeitraum August 2013 bis April 2015	19
Abbildung 3.5: Gegenüberstellung der Globalstrahlung und der der Stickstoffkonzentration am ZOB Detmold für den im Winter liegenden Messzeitraum (Januar 2014)	20
Abbildung 3.6: Gegenüberstellung der Globalstrahlung und der der Stickstoffkonzentration am ZOB Detmold für den im Herbst liegenden Messzeitraum (Oktober 2014)	21
Abbildung 3.7: Nitratkonzentration in mg/L im Bereich der großen Untersuchungsflächen für die Bussteige mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	23
Abbildung 3.8: Stoffmenge in mmol im Bereich der großen Untersuchungsflächen für die Bussteige mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	23
Abbildung 3.9: Summenlinien des Nitrats in mg im Bereich der großen Untersuchungsflächen für die Bussteige mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	24
Abbildung 3.10: Summenlinien der Stoffmengen in mg/L im Bereich der großen Untersuchungsflächen für die Bussteige mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	25
Abbildung 3.11: Nitratkonzentration in mg/L im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonpflastersteine mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	26
Abbildung 3.12: Nitratkonzentration in mg/L im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonplatten mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	27
Abbildung 3.13: Stoffmenge in mmol im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonpflastersteine mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	27
Abbildung 3.14: Stoffmenge in mmol im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonplatten mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	28

Abbildung 3.15: Summenlinien des Nitrats in mg im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonpflastersteine mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	29
Abbildung 3.16: Summenlinien des Nitrats in mg im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonplatten mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	29
Abbildung 3.17: Summenlinien der Stoffmengen in mmol im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonpflastersteine mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	30
Abbildung 3.18: Summenlinien der Stoffmengen in mmol im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonplatten mit und ohne TiO <sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014	30
Abbildung 3.19: Ergebnisse der durch das beteiligte Fraunhofer-Institut durchgeführten Untersuchungen zur Wirksamkeit photokatalytisch aktivierter Flächen in der Laborzelle an Betonplattenprüfkörpern	31

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Ermittlungen der sogenannten indirekten Wirksamkeit der photokatalytisch wirksamen Flächen beziehungsweise Verkehrsflächenbefestigungen aus dem jeweiligen Jahresmittel der Einzelwerte und aus den abgeleiteten Steigungen der Summenlinien	34
--	----

## 1 Einleitung

Die Luftqualität ist insbesondere in urbanen Ballungsgebieten durch Feinstaub, industriell und verkehrsbedingt ausgestoßene Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und flüchtig organische Verbindungen – volatile organic compounds (VOC) – zunehmend belastet. Gesundheitliche Schäden vor allem der Atemwege sind eine mögliche Folge und treten bereits bei vergleichsweise geringer Konzentration von Stickoxiden in der Umgebungs- beziehungsweise Atemluft auf. Eine weitere Gefahrenquelle ist die Reaktion von VOC mit Stickstoffdioxiden, da diese bereits in bodennahen Schichten die Vorläufersubstanz von umwelt- und gesundheitsschädlichem Ozon darstellen [Bo11/UBA11]. Darüber hinaus tragen Stickoxide deutlich zum sogenannten Treibhauseffekt bei.

Im Bereich stark frequentierter Verkehrsanlagen werden Stickoxide als Verbrennungsprodukte nach wie vor in hohem Maß emittiert. Bereits stattgefundenere Optimierungen im Bereich der Motorentechnologie oder die Verwendung effektiverer Abgasreinigungsanlagen beziehungsweise auch der Einsatz alternativer Antriebe wie Elektromotoren oder der Hybridtechnologie haben diese Entwicklung zumindest bisher nicht aufhalten können. Besonders in Bereichen wie beispielsweise Kreuzungen und Einmündungen, in denen konventionell betriebene Fahrzeuge anfahren oder im Stand betrieben werden, ist mit einem entsprechend hohem Potenzial für eine Stickoxidbelastung zu rechnen. Dies gilt auch für Busbahnhöfe oder Haltestellen mit der Folge einer vergleichsweise hohen Gefährdung der Nutzer öffentlicher Verkehrssysteme. Aus diesem Grund ist eine Reduktion der Belastung mindestens in den genannten Bereichen sinnvoll.

Um die Stickoxidbelastung unmittelbar am Entstehungsort zu reduzieren, scheint eine Anwendung von photokatalytischen Oberflächen, die durch eine Beimischung von Titandioxid als Katalysator im verwendeten Baustoff erreicht werden kann, sinnvoll. Dabei werden Stickoxide durch die natürliche, auf die Oberflächen einwirkende UV-Strahlung photokatalytisch zu wasserlöslichem Nitrat reduziert, welches als Salz ausfällt und mit dem Oberflächenwasser als Lösung abgeführt wird (Abbildung 1.1).



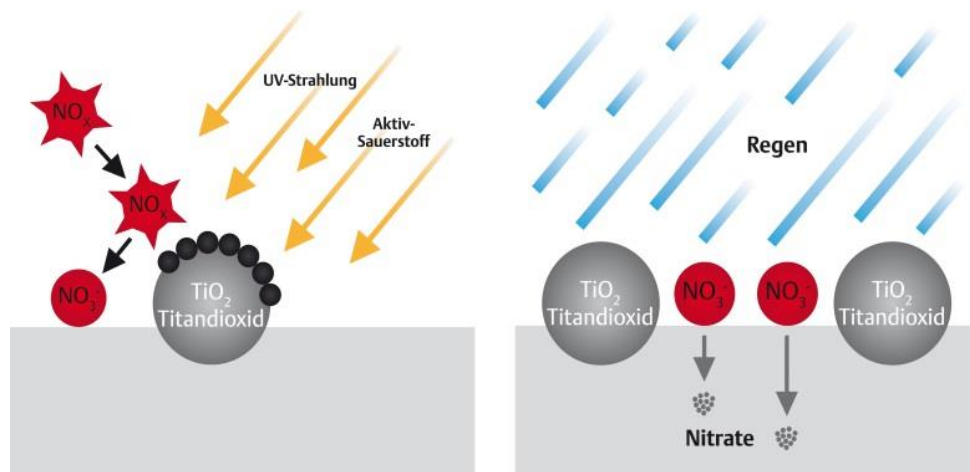


Abbildung 1.1 Schematische Darstellung der Photokatalyse [HCA15]

Für die Herstellung von photokatalytischen Oberflächen stellt die Art der Verarbeitung des Titandioxids einen wichtigen Aspekt dar. Hierbei kann die Zugabe des TiO<sub>2</sub> als Beschichtung auf eine gegebenenfalls bereits vorhandene, prinzipiell beliebig orientierte Bauteilfläche oder durch Beimengung in den Baustoff selbst als sogenannte „In-Masse-Verarbeitung“ erfolgen [BD03/Ben09/Bol11/Bol05/FIM11/WS07]. Beschichtungen werden oberflächlich aufgebracht und beeinflussen die Eigenschaften eines darunter als Konstruktionsbaustoffs vorhandenen Betons bezüglich seiner Festigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit nicht [Jun05]. Dennoch weist diese Art der Verarbeitung aufgrund der oberflächlichen Fixierung eine geringe Stabilität gegenüber mechanischen Beanspruchungen auf. Zur langzeitigen Sicherstellung der photokatalytischen Aktivität im Gebrauchszustand werden Beschichtungen daher vorzugsweise für vertikale Bauteile wie beispielsweise Fassadenelemente und Lärmschutzwände verwendet [Jun05]. Bei der „In-Masse-Verarbeitung“ erfolgt die Beimischung des TiO<sub>2</sub> in den Zement oder als Zusatzstoff direkt in den Beton. Wechselwirkungen mit anderen klassischen Bindemitteln wie Kalk, Zement oder Gips sind nicht zu erwarten, da sich das Titandioxid im basischen Milieu weitgehend inert verhält [Jun05]. Bezogen auf den Zement- und/oder Kalkgehalt liegt die Zugabemenge des TiO<sub>2</sub> im Allgemeinen zwischen 0,5 Massen-% bis 5 Massen-% und muss daher in der Rezeptur eines photokatalytischen Betons in Bezug auf den Mehlkorngelhalt berücksichtigt werden [BD03/Jun05]. Folglich erhöht sich der Wasseranspruch, sodass entsprechend modifizierte Betone einen Wasser-Zementwert (w/z-Wert) von etwa 0,6 aufweisen sollten [BK11]. Zur Einhaltung des höchstzulässigen w/z-Wertes in Abhängigkeit der gewählten Expositionsklasse muss dem photokatalytischen Beton noch ein Betonverflüssiger beziehungsweise ein Fließmittel hinzugegeben werden [BK11], was gleichzeitig auch die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verbessert. Dies ist erforderlich, da photokatalytische Betone gegenüber Normalbetonen ein geringeres Ausbreitmaß aufweisen [Jun05]. Nachteilige Wechselwirkungen zwischen dem TiO<sub>2</sub> und verschiedenen Betonzusatzmitteln

wie Verflüssiger, Fließmittel, Luftporenbildner oder Verzögerer beziehungsweise Beschleuniger wurden bisher nicht festgestellt. Darüber hinaus konnte auch noch der Nachweis erbracht werden, dass puzzolanische Betonzusatzstoffe des Typs II, die einen geringen Anteil an Eisenoxid enthalten, eine Erhöhung der photokatalytischen Reaktion bewirken [BK11/Lac02]. Lackhoff [Lac02] begründet dies mit synergetischen Wirkungen des Eisen- und Titandioxids. Des Weiteren stellten Lackhoff [Lac02] sowie Junghannß [Jun05] in entsprechenden Untersuchungen fest, dass während des Hydratationsprozesses eine verminderte Freisetzung von Calciumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) innerhalb der ersten Tage erfolgt. Das  $\text{TiO}_2$  wird chemisch in die Zementsteinmatrix eingebunden, sodass der modifizierte Frischbeton einen pH-Wert von 12,5 aufzeigt. Nach 28 Tagen konnte eine weitere, verminderte Freisetzung von  $\text{Ca(OH)}_2$  nicht festgestellt werden, sodass der photokatalytische Beton einen pH-Werte von 11,8 aufweist und damit einem unmodifizierten konventionellem Beton entspricht. Eine dauerhafte Abnahme der Alkalität des Festbetons ist unter Ausschluss der natürlichen Umgebungsbedingungen, die die Carbonatisierung beeinflussen könnten, nicht gegeben [Jun05/Lac02]. Prüfungen zur Druck- und Biegezugfestigkeit führte Bolte [Bol05] durch. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Druck- und Biegezugfestigkeiten sowie auch der E-Modul photokatalytischer Betone gegenüber Normalbetonen erhöht ausfallen. Dies wurde auf den erhöhten Mehlkornanteil zurückgeführt. Des Weiteren konnte im Bereich der Dauerhaftigkeit eine Erhöhung des Frost-Tausalzwidehrstands an Betonpflastersteinen, ebenfalls begründet auf den erhöhten Mehlkorngehalt, nachgewiesen werden [FIM11]. Gegenüber mechanischen Beanspruchungen, die den Abriebwiderstand betreffen, hat Bolte [Bol05] den Nachweis erbracht, dass die Zugabe des Titandioxids in den Beton keinen Einfluss hat.

Probeflächen in Japan, Italien und Deutschland haben bereits gezeigt, dass durch den Einbau entsprechender Pflasterflächen Stickoxidreduktionen bis in Größenordnungen von etwa 50 % bezogen auf die Ausgangskonzentration langfristig zu erwarten sind [Tis11]. Allerdings wurde der Nachweis der Wirksamkeit solcher Flächen bisher anhand vergleichsweise aufwendiger Mess- und Analyseverfahren festgestellt. Im Allgemeinen wird hierbei im Labor innerhalb einer Messzelle ein photokatalytisch wirksamer Prüfkörper mit einem Gasgemisch mit einer definierten Stickstoffkonzentration mit konstantem Volumenstrom beaufschlagt und bei einer definierten UV-Strahlung die Abbaurate bestimmt. Diese Technik ist in situ nicht oder nur mit einer besonders ausgerüsteten Messzelle möglich. Allerdings werden bei solchen Messungen im Labor wie auch mit der Messzelle in situ Einflüsse wie Strömungsverhältnisse mit der Folge von Verwirbelungen oder unterschiedliche Verkehrsbelastungen, wenn überhaupt, nur ansatzweise erfasst. Zudem liegen bisher ebenfalls bedingt durch die aufwändigen Messmethoden im Allgemeinen nur Ergebnisse von Flächen im Bereich von Gehwegen oder Anlagen des ruhenden Verkehrs vor.

Allerdings ermöglichen die bisher gewonnenen Erkenntnisse nunmehr eine ingenieurwissenschaftliche Betrachtung und Beurteilung des Maßnahmenerfolges.

Die Stadt Detmold hat im Juli 2013 den für insgesamt rund 2,6 Mio. Euro erneuerten zentralen Omnibusbahnhof (ZOB) in Betrieb genommen. Diese Verkehrsanlage wird als Schnittstelle zwischen dem Eisenbahn- und regionalem sowie kommunalem Busverkehr zumindest werktäglich von rund 800 Bussen angefahren. Die Oberflächen des neuen, etwa 7.000 m<sup>2</sup> großen ZOB wurden nahezu vollständig mit photokatalytischen Oberflächen ausgestattet. Dabei fallen rund 2.000 m<sup>2</sup> auf die Betonfahrbahnen der Bussteige und der zugehörigen Umfahrt und rund 5.000 m<sup>2</sup> auf die gepflasterten Fußgängerflächen beziehungsweise Wartebereiche. Die 24 cm starken Betonfahrbahnen wurden in einem Arbeitsgang unter Verwendung des Zements TioCem<sup>®</sup> CEM II/A-S 42,5 R (tx) in der zugehörigen Frischbetonrezeptur und die Pflasterflächen mit dem Betonpflasterstein AirClean-VS-5<sup>®</sup> der Karl Vogt Betonwerk Porta Westfalica GmbH&Co.KG, Porta Westfalica, hergestellt. An diesem ZOB sollte auf Initiative der Stadt Detmold und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) die Wirksamkeit der photokatalytischen Verkehrsflächenbefestigungen in Beton- und Pflasterbauweise ingenieurmäßig im laufenden Betrieb und über einen längeren Betrachtungszeitraum zumindest qualitativ nachgewiesen werden. Dabei wurde auf verschiedenen Versuchsflächen der Nitratgehalt von abfließendem Oberflächenwasser untersucht, wobei jeder Fläche jeweils noch eine Referenzfläche ohne photokatalytische Wirksamkeit zugeordnet wurde. Hierfür wurden einerseits geeignete Bussteige mit etwa gleicher Verkehrsbelastung ausgewählt sowie andererseits Flächen hergestellt, die durch ihre Lage beispielsweise vor anthropogenen Einwirkungen geschützt waren. Mit eigens hierfür entwickelten, im Zuge des Baus besonders hergestellten und jeweils unterflur liegenden Fassungssystemen wurde das Oberflächenwasser der verschiedenen Untersuchungsflächen zunächst gesammelt und anschließend auf seinen Nitratgehalt untersucht.

Parallel zur regelmäßigen Probennahme mit den nachgeschalteten Nitratuntersuchungen wurden während der Laufzeit des Vorhabens von etwa eineinhalb Jahren die Parameter Stickoxidgehalt in der Luft, Temperatur, Globalstrahlung und Niederschlagsmenge im Bereich der betreffenden Bussteige mittels einer entsprechend ausgerüsteten Messstation aufgezeichnet.

Die Bestimmungen des Nitratgehaltes an den gewonnenen Wasserproben wurden durch das Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie in Schmallenberg durchgeführt. Darüber hinaus wurden für einen Abgleich entsprechend der bisherigen Vorgehensweise beziehungsweise Messmethodik photokatalytisch aktive und inaktive Bauwerkskörper auch noch im Labormaßstab untersucht. Hierzu wurden die Probekörper unter definierten Randbedingungen bestrahlt

Während bisher die Wirksamkeit im Ergebnis der Labor- beziehungsweise Bestrahlungsversuche auf die verringerte Stickoxidkonzentration bezogen wurde, liefert die hier angewendete ingenieurmäßige Betrachtungsweise naturgemäß auch nur eine indirekte Beurteilung der Wirksamkeit. Dementsprechend wurde als Kennzahl für die Beurteilung der Wirksamkeit die photokatalytisch bedingte Nitratbildung herangezogen und auf den zugehörigen Hintergrund- beziehungsweise Sockelwert bezogen.

## **2 Durchführung der Untersuchungen**

### **2.1 Allgemeines**

Der Nachweis der Wirksamkeit photokatalytisch aktiver Flächen wurde bisher im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte anhand vergleichsweise aufwendiger Mess- und Analyseverfahren geführt. Er wurde entweder durch vergleichende Vorher-/Nachher-Messungen der Schadstoffkonzentration in der Luft oder durch den Einsatz besonderer Messzellen in-Situ oder im Labor erbracht.

Hier wird nun das Abbauprodukt der photokatalytischen Reaktion Nitrat (Nitrit) als Indikator für die Wirksamkeit zu Grunde gelegt. Das Nitrat lagert sich auf den photokatalytisch aktiven Oberflächen an, wird anschließend im Regen- bzw. Spülwasser gelöst und fließt ab.

Der Nitratgehalt des abfließenden Oberflächenwassers sollte jeweils von zwei zu vergleichenden Prüfflächen untersucht werden. Eine der beiden Betonflächen ist ohne photokatalytische Oberfläche ausgerüstet und dient somit als Referenzfläche. Die Prüfflächen wurden einerseits im unmittelbaren Bereich des Omnibusbahnhofs angelegt und unterliegen somit betrieblichen aber auch möglichen anthropogenen und sonstigen Einflüssen beziehungsweise Störungen. Dementsprechend sollte darüber hinaus der Nitratgehalt von abfließenden Oberflächenwässern von kleineren weitestgehend von anthropogenen Einflüssen freien Flächen ermittelt werden.

Erstmalig soll mit dieser ingenieurwissenschaftlichen Methode die Wirksamkeit photokatalytisch aktiver Verkehrsflächen an Ort und Stelle quasi kontinuierlich im laufenden Betrieb erfasst werden.

### **2.2 Beschreibung der Versuche**

#### **2.2.1 Große Untersuchungsflächen**

Die Untersuchung wurde als vergleichende Methode angelegt. Im Zuge der erforderlichen Bau- und Sanierungsmaßnahmen wurden zwei Busfahrwege und die zugehörigen Bussteige des ZOB in Detmold als Untersuchungsflächen mit jeweils einer kontrollierten Fassung von abfließendem Oberflächenwasser ausgebildet. Die Prüfflächen hatten jeweils eine Größe von rd. 170 m<sup>2</sup> und wurden so ausgewählt, dass sie einer etwa gleich starken Frequentierung durch den Busverkehr unterliegen. Dabei wurde eine Untersuchungsfläche zum Vergleich als Referenzfläche mit konventionellem Beton und die zweite mit photokatalytisch aktivem Beton hergestellt. Die Lage der Untersuchungsflächen zeigt Abbildung 2.1.

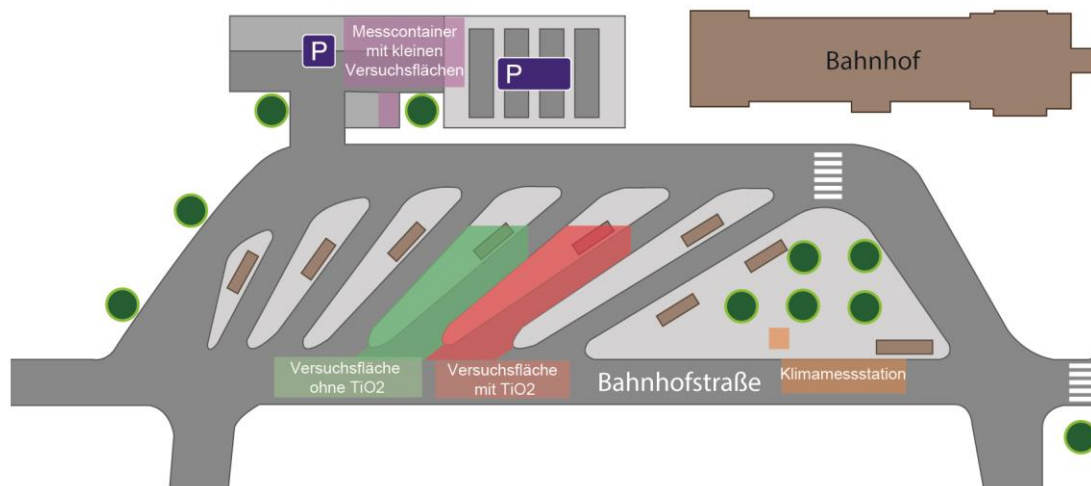


Abbildung 2.1: Lage der großen Versuchsflächen und der Messeinrichtungen

Die von den Prüfflächen abfließenden Wassermengen wurden in besonders hierfür ausgerüsteten Entwässerungsschächten unterflur gesammelt. Dabei wurde das Sammelsystem aus jeweils fünf nachgeschalteten Behältern so ausgerüstet, dass der erste Spülstoß getrennt erfasst werden konnte. Insgesamt konnten in jedem Behälter bis zu 30 L Wasser je Untersuchungszeitpunkt und Prüffläche gesammelt und hieran der Nitratgehalt untersucht werden. Die nachfolgende Abbildung 2.2 zeigt einen Schnitt durch die Sammelschächte in den Bussteigen.

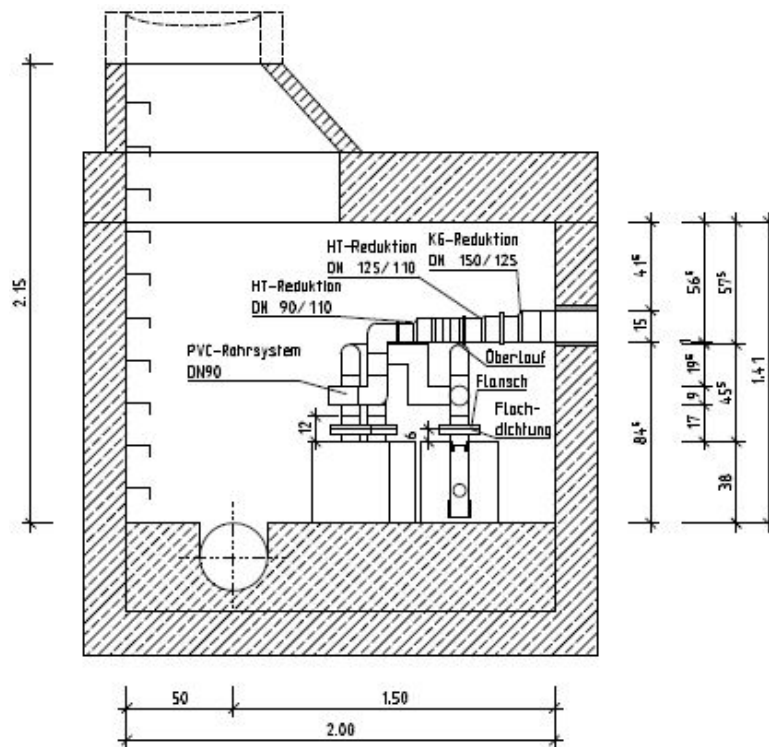


Abbildung 2.2: Versuchsaufbau Schnitt durch Sammelschacht

## 2.2.2 Kleine Untersuchungsflächen

Zu den beiden großen Prüfflächen wurden zusätzlich jeweils zwei nebeneinander liegende kleinere Untersuchungsflächen mit einer Fläche von ca. 60 cm x 60 cm errichtet. Eine dieser Flächen bestand aus photokatalytisch aktiven Betonpflastersteinen bzw. Betonprüflingen, die andere aus Pflastersteinen ohne  $\text{TiO}_2$  beziehungsweise Normalbeton. Die Flächen wurden erhöht und mit einem leichten Winkel auf dem Dach eines Containers in einer Höhe von rund 2 m aufgestellt, um Stör- bzw. Querkontaminationen z.B. durch Hundekot oder -urin zu vermeiden und die Möglichkeit eines vollständigen Abflusses des Regenwassers zu ermöglichen. Das abfließende Regenwasser wurde auch hier in nachgeschalteten Behältern getrennt gesammelt, um Konzentrationsspitzen erfassen zu können. Die folgende Abbildung 2.3 zeigt die Anordnung der kleinen Versuchsflächen

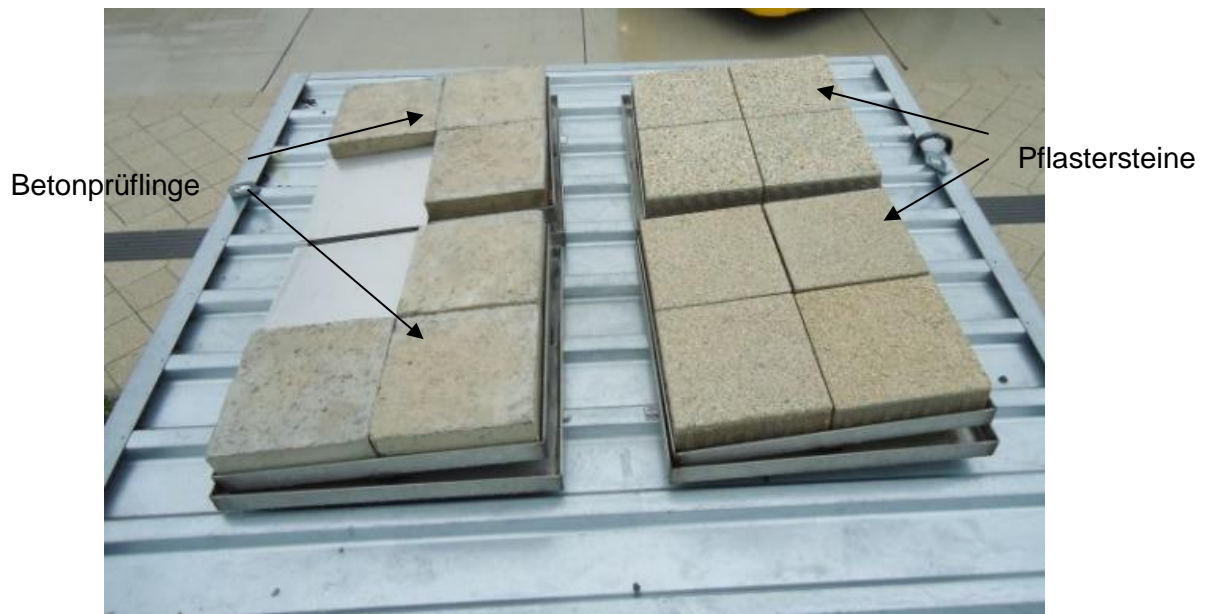


Abbildung 2.3: Anordnung kleine Versuchsflächen

### 2.2.3 Nitratanalytik

Die gesammelten Oberflächenwässer wurden nach Probengewinnung eingefroren und in mehreren Chargen für die Untersuchung der Nitratkonzentration an das Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie, Schmallenberg, übergeben. Die Nitrat-Analytik wurde mittels Ionenchromatographie durchgeführt. Eine möglicherweise notwendige Aufarbeitung der Wasserproben wurde so ausgelegt, dass Nachweis- und Bestimmungsgrenzen eine ausreichend genaue Unterscheidung zwischen photokatalytisch aktiver und konventioneller Fläche ermöglichen sollten.

### 2.2.4 Laboruntersuchung

Nachgeschaltet wurden die Prüflinge der kleinen Flächen zur vergleichenden Abschätzung der Effizienz zwischen photokatalytisch aktiven und inaktiven Flächen unter Laborbedingungen untersucht. Der Vorteil dieser Untersuchung lag darin, dass die Effizienzuntersuchungen unter kontrollierten Bedingungen und damit ohne nicht reproduzierbare Einflüsse (z.B. durch weitere Nitratreinträge oder durch vorherrschende atmosphärische Bedingungen) durchgeführt wurden. Die Bestrahlung der photokatalytisch aktiven und inaktiven Prüflinge wurde in einer Bestrahlungsapparatur nach ISO 22197-1 durchgeführt. Die Bestrahlungsbedingungen wurden wie folgt definiert: Schwarzlichtlampe mit Strahlung im Bereich von 300 nm bis 400 nm und einer Intensität von 5 Watt pro m<sup>2</sup> bis 40 Watt pro m<sup>2</sup>. Die NO<sub>x</sub>-Konzentration liegt bei 1 ppm, der Durchfluss bei 1 L pro min. Die bestrahlten Oberflächen betragen etwa 5 cm x 10 cm.



## **3 Darstellung der Ergebnisse**

### **3.1 Allgemeines**

Nachfolgend werden zunächst die über den Untersuchungszeitraum erhaltenen Ergebnisse zu den Wasseranalysen an den verschiedenen Versuchsflächen und zum Verlauf der mit dem Messcontainer aufgenommenen Klimadaten und Luftschadstoffwerte zusammenfassend dargestellt. Hinsichtlich der Wasseranalysen wird hierfür sowohl bei den großen als auch den kleinen Versuchsflächen jeweils die Wasserprobe aus dem ersten Untersuchungsbehälter berücksichtigt, da hier naturgemäß die Nitratkonzentration am höchsten und dementsprechend auch der Einfluss der Photokatalyse am deutlichsten sind. Für die weitergehende Auswertung werden einerseits die an den Wasserproben seitens des Fraunhofer Instituts analysierten Nitratkonzentrationen in mg/L als wesentlicher Indikator der Wirksamkeit der Photokatalyse und andererseits auch zur Plausibilitätsprüfung die bestimmten Stickstoffmengen in mmol herangezogen. Dabei ist die Stickstoffmenge jeweils aus dem Produkt der summarischen Nitrit- und Nitratkonzentrationen mit dem Probenvolumen ermittelt worden.

Hinsichtlich der Klimadaten werden im Wesentlichen die Stickstoffkonzentrationen und die gemessene Globalstrahlung dargestellt. Dabei ist die Globalstrahlung die Summe aus der UV-Strahlung, dem sichtbaren Licht und der Infrarotstrahlung. Aufgrund der Lage des Messcontainers und von Einflüssen wie beispielsweise Windstärke und -richtung oder Verwirbelungen können diese Daten beziehungsweise die daraus über die Zeit entwickelten Messwertverläufe nur Grundlage einer qualitativen Betrachtung beziehungsweise ebenfalls von Plausibilitätsprüfungen sein. Darüber hinaus wurde auch noch die Niederschlagsentwicklung aufgezeichnet.

Im Rahmen einer abschließenden Aus- beziehungsweise Bewertung der insgesamt enthaltenen Messwerte und Messwertverläufe werden einerseits die verschiedenen Messwerte zunächst vergleichend gegenübergestellt und andererseits aus den Nitratkonzentrationen und Stickstoffmengen Wirksamkeiten abgeleitet. Da sich diese nicht auf die photokatalytisch bedingten Abbauraten der Stickoxidkonzentrationen beziehen, wie sie bisher mittels den verwendeten Messzellen zumindest im Labor bestimmt wurden, sondern auf die Nitratbildungen, sind sie, wie bereits erwähnt, als sogenannte indirekte Wirksamkeiten anzusehen.

### **3.2 Klimadaten**

Mit dem im Untersuchungsbereich am ZOB Detmold aufgestellten Messcontainer wurden im Zeitraum von August 2013 bis Dezember 2014 unter anderem die Niederschlagsmengen, die Globalstrahlung und die Stickstoffkonzentration in der Umgebungsluft gemessen und

kontinuierlich aufgezeichnet. In den nachfolgenden Diagrammen der Abbildung 3.1 bis Abbildung 3.1 sind zunächst jeweils die zeitlichen Entwicklungen der Messparameter Niederschlag in mm beziehungsweise  $L/m^2$ , Globalstrahlung in  $W/m^2$  und Stickstoffkonzentration in ppb im Einzelnen für das Jahr 2014 dargestellt. Diese lassen insbesondere auch im Hinblick auf die jahreszeitlichen Entwicklungen jeweils einen insgesamt plausiblen Verlauf erkennen [Plö15].

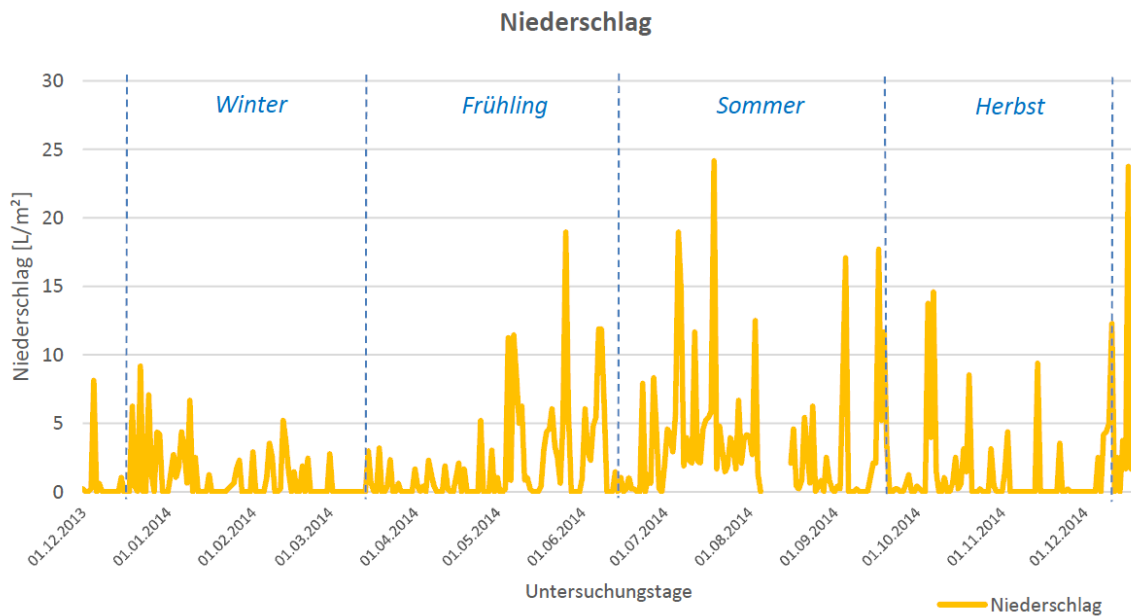


Abbildung 3.1: Zeitliche Entwicklung der Niederschlagsmengen am ZOB Detmold in mm beziehungsweise  $L/m^2$  für den Messzeitraum 2014

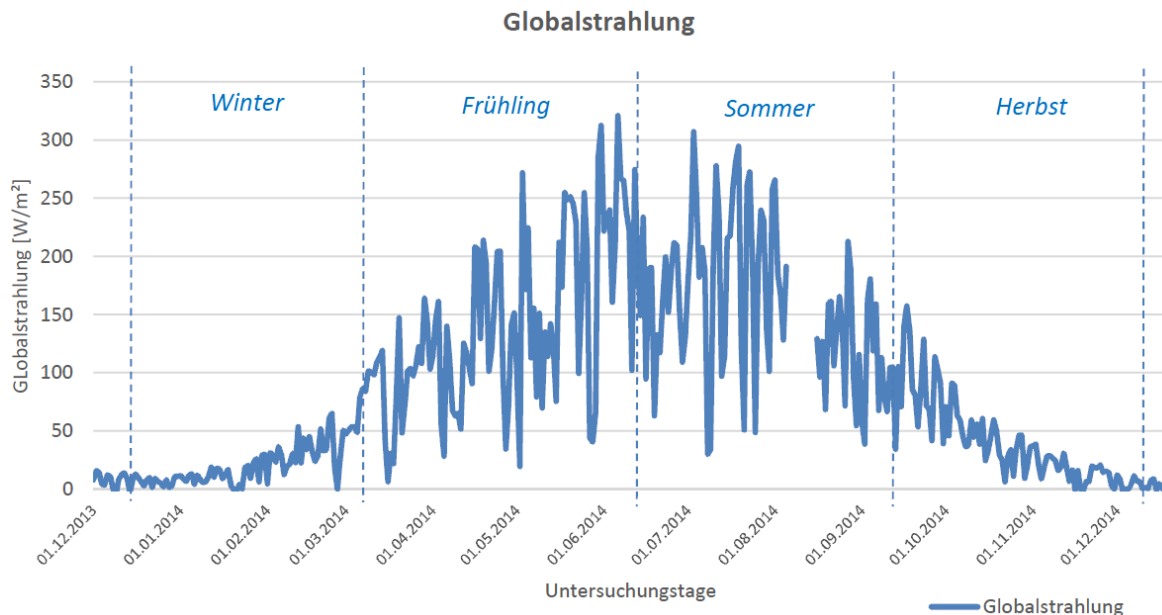


Abbildung 3.2: Zeitliche Entwicklung der Globalstrahlung am ZOB Detmold in  $W/m^2$  für den Messzeitraum 2014

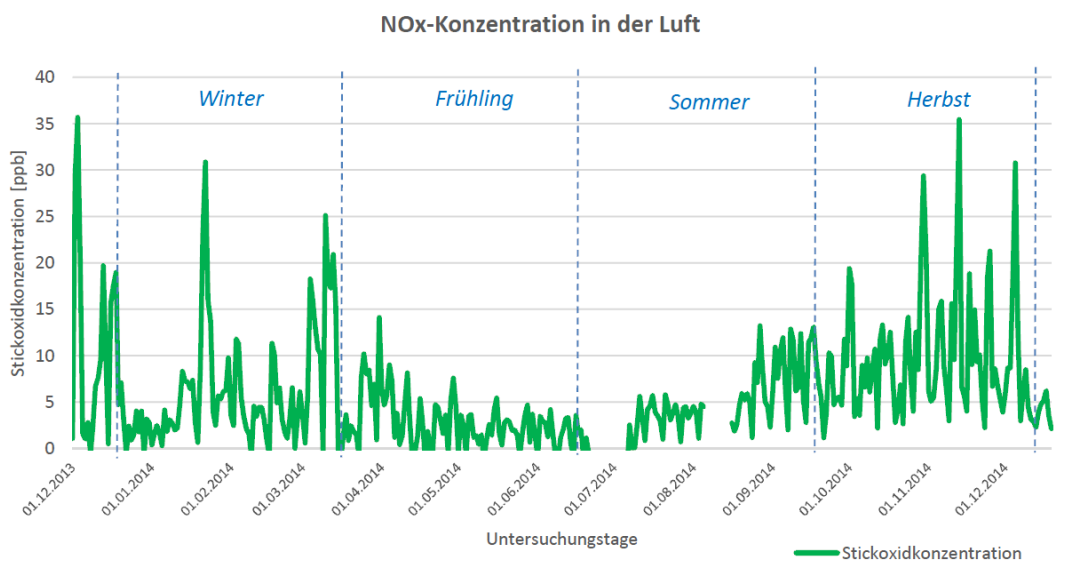


Abbildung 3.3: Zeitliche Entwicklung der Stickstoffkonzentrationen am ZOB Detmold in ppb für den Messzeitraum 2014

In der Abbildung 3.4 ist auch als Ergebnis einer Plausibilitätsprüfung der aufgezeichneten Messwerte für den Gesamtzeitraum vom August 2013 bis zum April 2014 der Verlauf der Stickstoffkonzentration in der Umgebungsluft dem Verlauf der Globalstrahlung gegenübergestellt. Dabei wurden jeweils Summenwerte über die einzelnen Kalenderwochen gebildet.

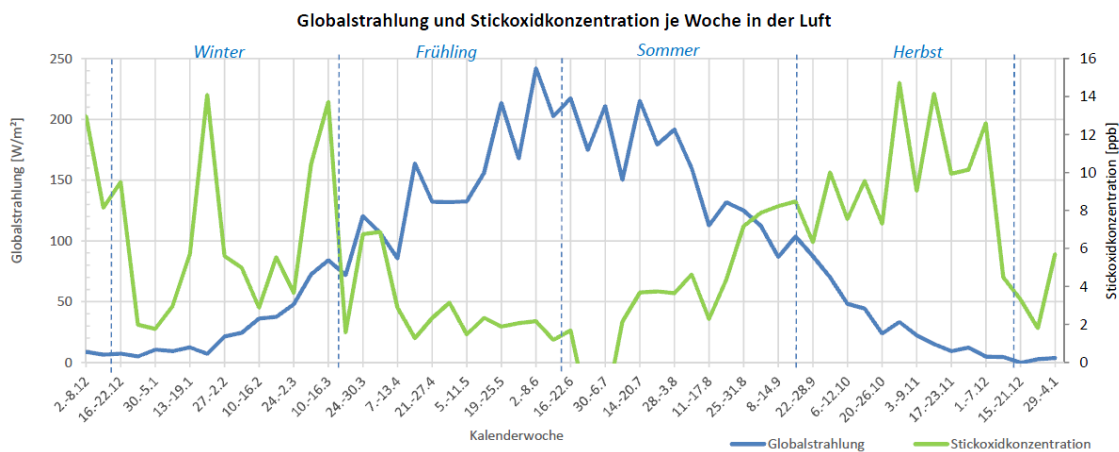


Abbildung 3.4: Gegenüberstellung der je Kalenderwoche summarisch aufgetragenen Globalstrahlung und der der Stickstoffkonzentration am ZOB Detmold für den gesamten Messzeitraum August 2013 bis April 2015

Die Gegenüberstellung der Abbildung 3.4 lässt bei einer erwartungsgemäß hohen Globalstrahlung im Frühling und im Sommer zumindest qualitativ bereits eine vergleichsweise geringere Stickstoffkonzentration im Bereich des ZOB Detmold erkennen. Allerdings ist dieses nicht nur auf die Verwendung photokatalytisch wirksamer

Verkehrsflächenbefestigungen sondern auch auf weitergehende Einflüsse beziehungsweise sogenannte Überlagerungseffekte zurückzuführen.

Für eine weitergehende qualitative Auswertung der gewonnenen Daten insbesondere im Hinblick auf eine Gegenüberstellung der Messwerte Globalstrahlung und Stickstoffkonzentrationen sollen auch noch die beiden folgenden Diagramme in den Abbildungen Abbildung 3.5 und Abbildung 3.6 zugrunde gelegt werden. Das Diagramm der Abbildung 3.5 zeigt die Gegenüberstellung für einen Zeitraum im Winter zwischen dem 08. und dem 15.01.2015. Erwartungsgemäß liegt die Globalstrahlung im Winter auf einem vergleichsweise geringeren Niveau, die sich kaum auf die Entwicklung der Stickstoffkonzentrationen auswirkt. Demgegenüber lassen sich für den in der Abbildung 3.6 dargestellten Messzeitraum im Oktober 2014, der somit im Frühherbst mit noch deutlich längerer Tageslichteinwirkung und höherer Strahlungsintensität liegt, erwartungsgemäß deutlich höhere Globalstrahlungen erkennen.

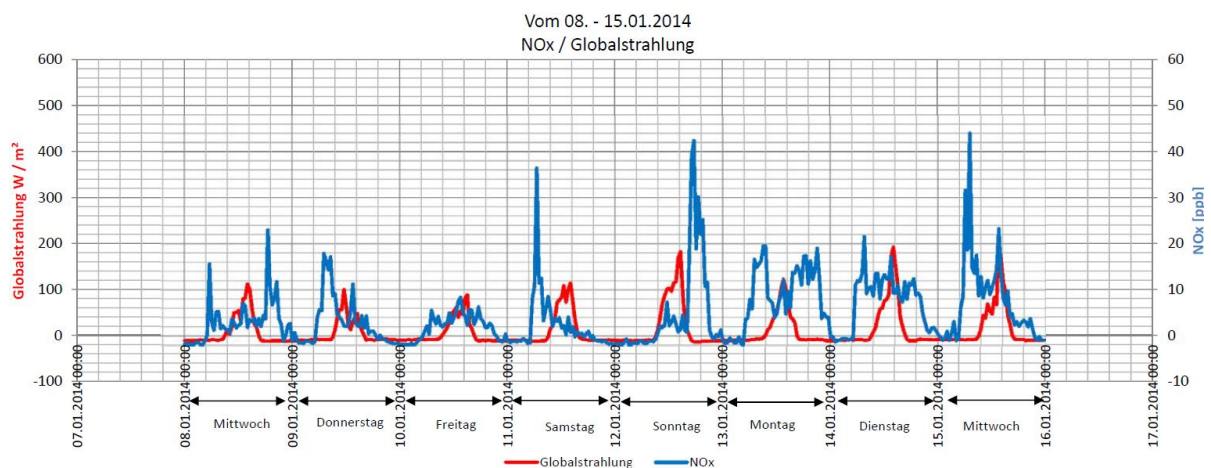


Abbildung 3.5: Gegenüberstellung der Globalstrahlung und der der Stickstoffkonzentration am ZOB Detmold für den im Winter liegenden Messzeitraum (Januar 2014)

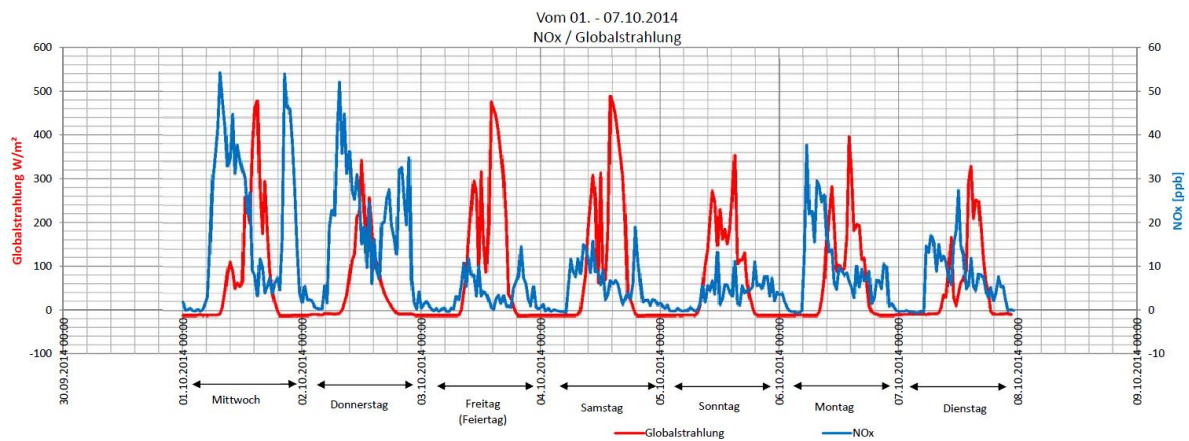


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung der Globalstrahlung und der der Stickstoffkonzentration am ZOB Detmold für den im Herbst liegenden Messzeitraum (Oktober 2014)

Zumindest qualitativ lässt sich aus der Gegenüberstellung der Globalstrahlung mit der Stickstoffkonzentration in der genannten Abbildung 3.6 auch die Tendenz ableiten, dass eine hohe Globalstrahlung die Stickstoffkonzentration derart beeinflusst, dass sie sich zurückentwickelt. Bei hoher Globalstrahlung fallen auch die durch hohes Verkehrsaufkommen bedingten Spitzen der Stickstoffkonzentration offenbar geringer aus. Aus diesen Einzeldarstellungen ist im Hinblick auf die Plausibilität der Messwerte auch noch erkennbar, dass hohe werktägliche Verkehrsbelastungen im Umfeld des ZOB Detmold erwartungsgemäß auf hohe und beispielsweise an Sonn- oder Feiertagen entsprechend geringere und im Tagesverlauf zu einem späteren Zeitpunkt anfallende Verkehrsbelastungen auch auf entsprechend geringere Stickstoffkonzentrationen führen.

### 3.3 Ergebnisse der Analysen an den Wasserproben

#### 3.3.1 Vorbemerkungen

Nachfolgend sollen die Ergebnisse der Analysen an den gewonnenen Wasserproben für die verschiedenen Versuchsflächen zusammenfassend dargestellt werden. Wie bereits erwähnt, wurde jeweils auf die Wasserprobe aus dem ersten Auffangbehälter zurückgegriffen, da hier aufgrund des anfänglichen Spülstoßes auch die höchsten Nitratkonzentrationen im abfließenden Wasser zu erwarten sind. Im Rahmen dieser Ergebnisauswertungen werden zunächst die im gesamten Zeitraum gemessenen Nitratkonzentrationen und die daraus abgeleiteten Stoffmengen für die sogenannten großen Untersuchungsflächen im Bereich der Bussteige und der auf dem Containerdach liegenden sogenannten kleinen Versuchsflächen mit den Betonpflastersteinen und den Betonplatten dargestellt. Dabei sind in den jeweils zugehörigen Diagrammen auch die Messwerte aus den ohne  $\text{TiO}_2$  hergestellten und insoweit photokatalytisch unwirksamen Referenzflächen erfasst. Da im Winter 2014 aufgrund

der vorherrschenden Witterung keine Proben entnommen und nachgeschalteten Wasseranalysen durchgeführt wurden, weisen die Ergebnisdiagramme jeweils eine entsprechende Lücke auf.

Aus den Nitratkonzentrationen und den Stoffmengen wurden dann Summenlinien gebildet und deren zeitliche Entwicklung in entsprechenden Diagrammen aufgetragen. Auch hier wurden die Summenlinien aus den Versuchsflächen mit und den Referenzflächen ohne  $\text{TiO}_2$  beziehungsweise photokatalytischer Wirksamkeit jeweils gegenübergestellt. Die Summenbildungen wurden durchgeführt, um die aus den Messwertverläufen ableitbaren Tendenzen detaillierter herauszuarbeiten.

### **3.3.2 Große im Bereich der befahrenen Bussteige liegende Versuchsflächen**

Nachfolgend werden zunächst die an den sogenannten großen Versuchsflächen erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Hierbei handelt es sich, wie bereits erwähnt, einerseits um die befahrenen Bussteige und andererseits um die zugehörigen Fußgängerflächen und Wartebereiche. In den Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8 sind zunächst die Nitratkonzentrationen in mg/L und die Stoffmengen in mmol für den gesamten diesbezüglichen Untersuchungszeitraum vom Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014 für die Flächen mit  $\text{TiO}_2$  und die Referenzflächen ohne photokatalytische Wirksamkeit gegenübergestellt.

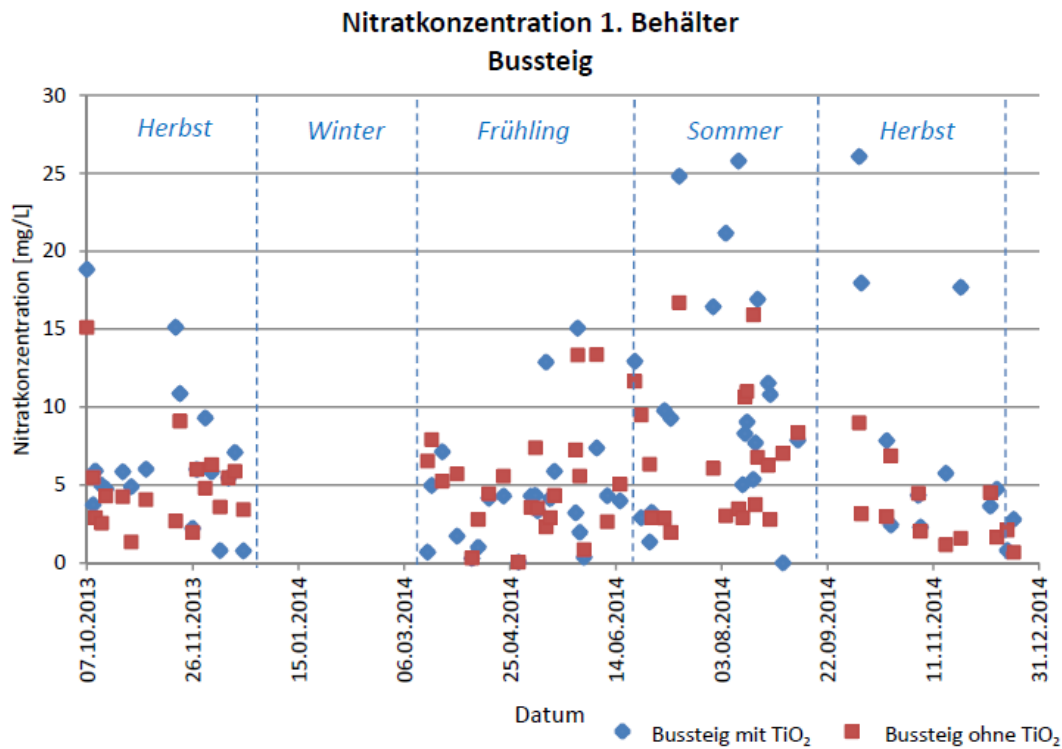


Abbildung 3.7: Nitratkonzentration in mg/L im Bereich der großen Untersuchungsflächen für die Bussteige mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014

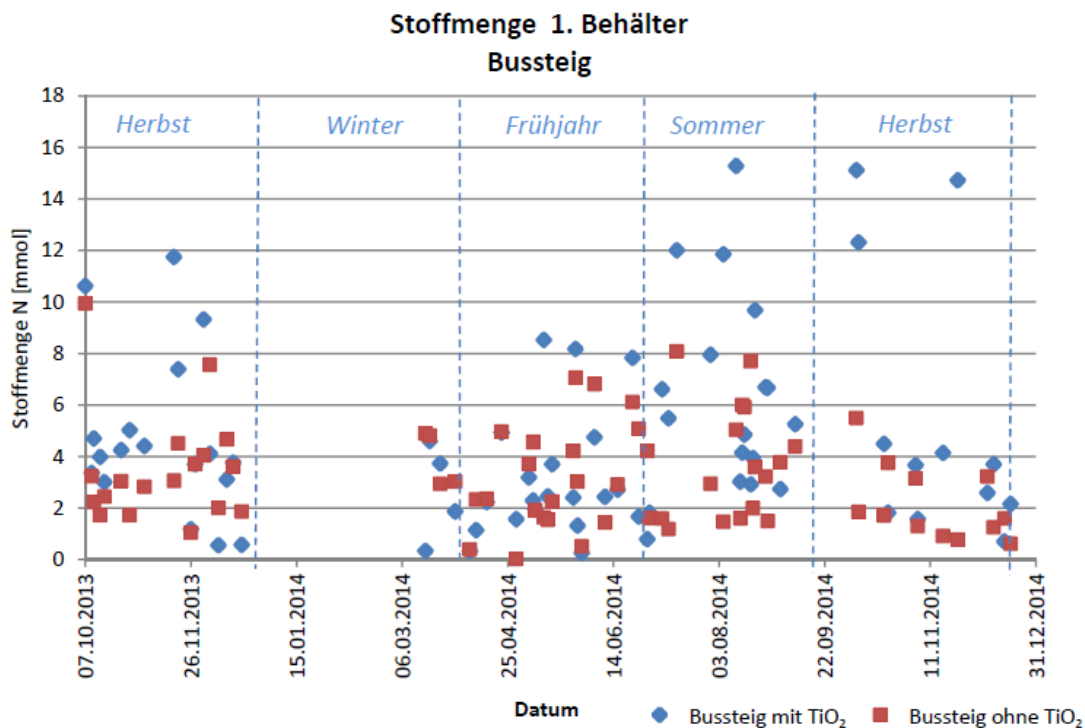


Abbildung 3.8: Stoffmenge in mmol im Bereich der großen Untersuchungsflächen für die Bussteige mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014

Die nachfolgenden Abbildung 3.9/Abbildung 3.10 enthalten jeweils eine Gegenüberstellung der Summenlinien der Nitratmengen und der Stoffmengen für die großen Versuchsfelder beziehungsweise Bussteige mit und ohne  $\text{TiO}_2$ . Erwartungsgemäß liefern die mit  $\text{TiO}_2$  hergestellten Bussteige aufgrund ihrer photokatalytischen Wirksamkeit sowohl eine höhere Nitratkonzentration in den untersuchten Wasserproben als Reaktionsprodukt der Photokatalyse als auch eine höhere Stoffmenge als Produkt aus der Summe der Nitrat- und der Nitritkonzentration mit dem jeweiligen Probenvolumen. Darüber hinaus sind in jahreszeitlichen Phasen mit höherer Globalstrahlung zumindest tendenziell auch höhere Steigungen der Summenlinien zu verzeichnen, die auf eine entsprechend stärkere Intensität der Nitrat- beziehungsweise Stickstoffbildung schließen lassen.

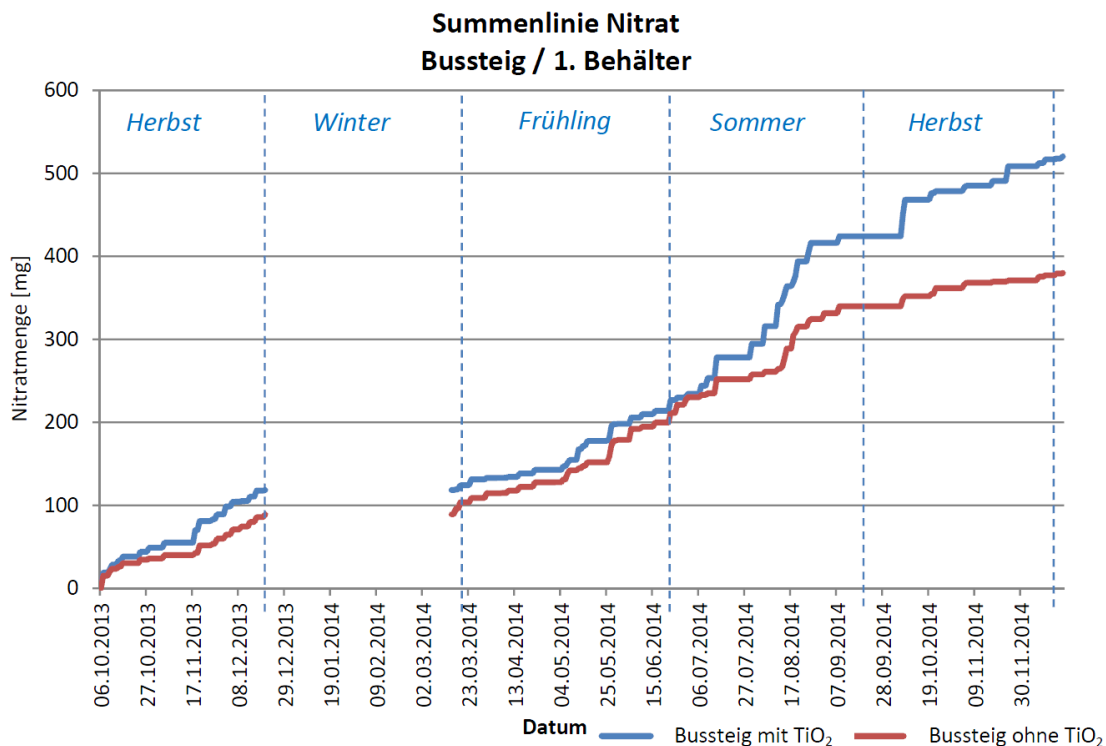


Abbildung 3.9: Summenlinien des Nitrats in mg im Bereich der großen Untersuchungsflächen für die Bussteige mit und ohne  $\text{TiO}_2$  im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014



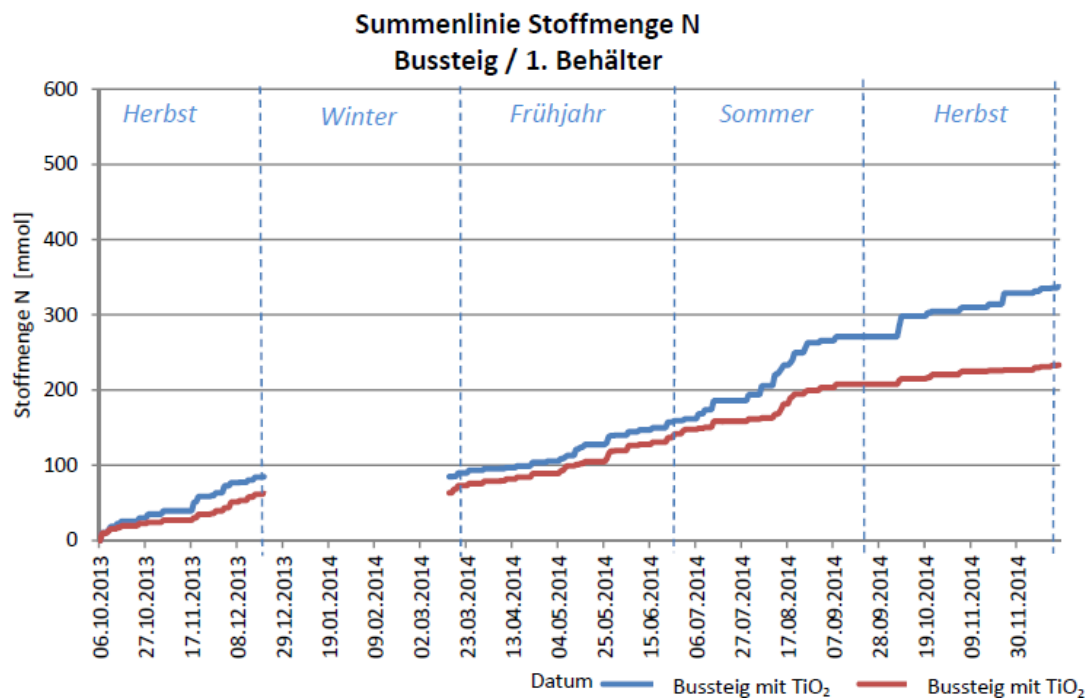


Abbildung 3.10: Summenlinien der Stoffmengen in mg/L im Bereich der großen Untersuchungsflächen für die Bussteige mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014

### 3.3.3 Kleine auf dem Containerdach liegende Versuchsflächen aus Betonpflastersteinen und –platten

Im Folgenden werden auch die an den sogenannten kleinen Versuchsflächen erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Hierbei handelt es sich, wie bereits erwähnt, einerseits um die Betonpflastersteine und andererseits um die Betonplatten, die zur Vermeidung maßgeblicher insbesondere anthropogener Störeinflüsse im Bereich des ZOB Detmold auf einem Containerdach etwa 2 m über der Verkehrsfläche angeordnet wurden.

In den Abbildung 3.11Abbildung 3.14 sind zunächst die Nitratkonzentrationen in mg/L und die Stoffmengen in mmol für den gesamten diesbezüglichen Untersuchungszeitraum vom Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014 für die Flächen mit TiO<sub>2</sub> und die Referenzflächen ohne photokatalytische Wirksamkeit gegenübergestellt.

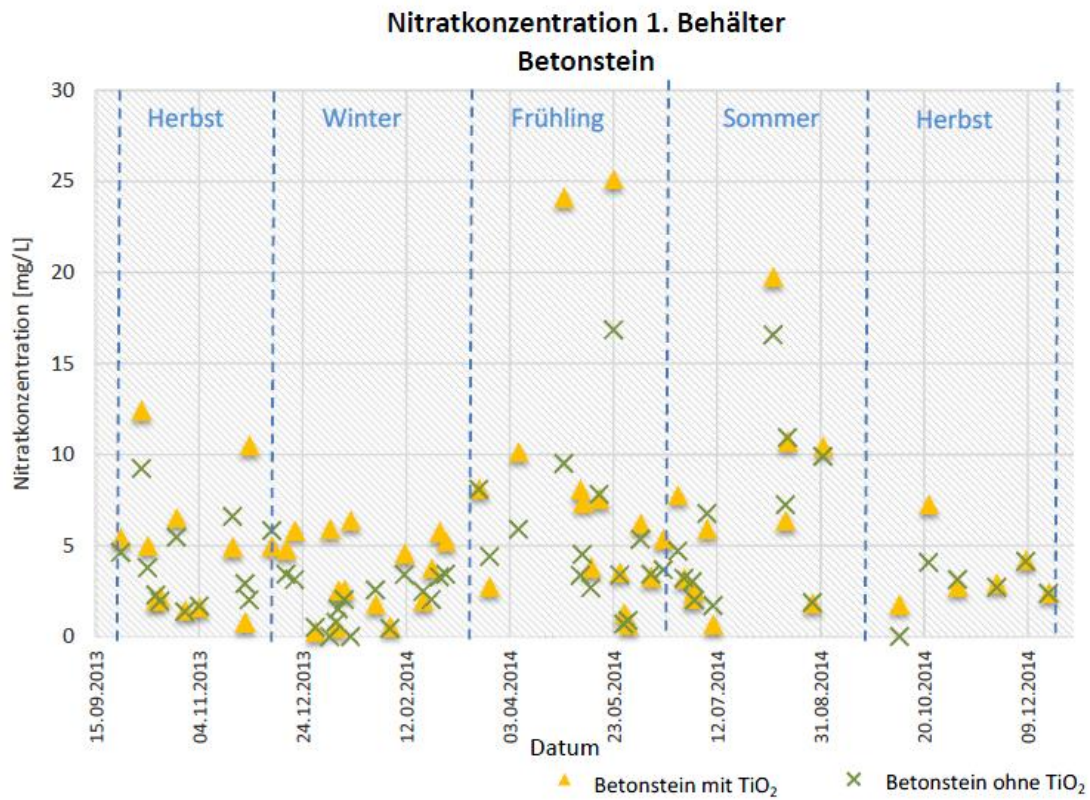


Abbildung 3.11: Nitratkonzentration in mg/L im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonpflastersteine mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014

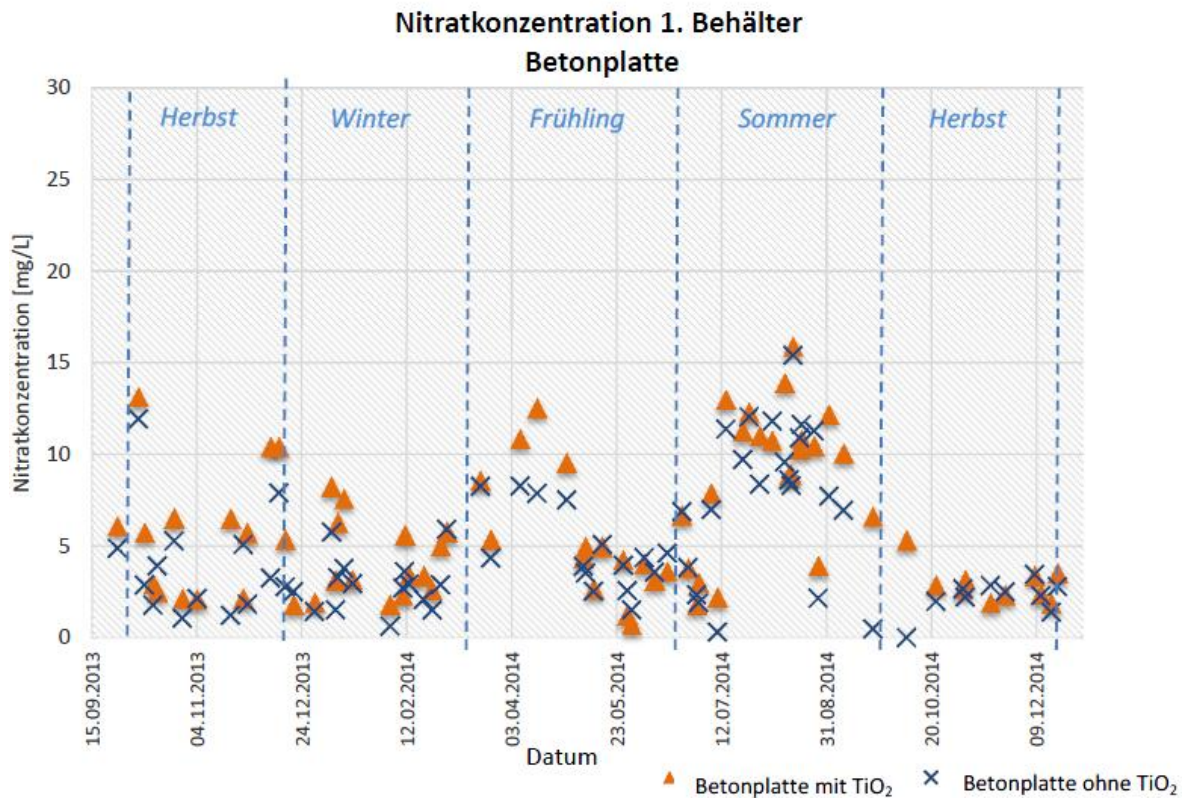


Abbildung 3.12: Nitratkonzentration in mg/L im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonplatten mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014

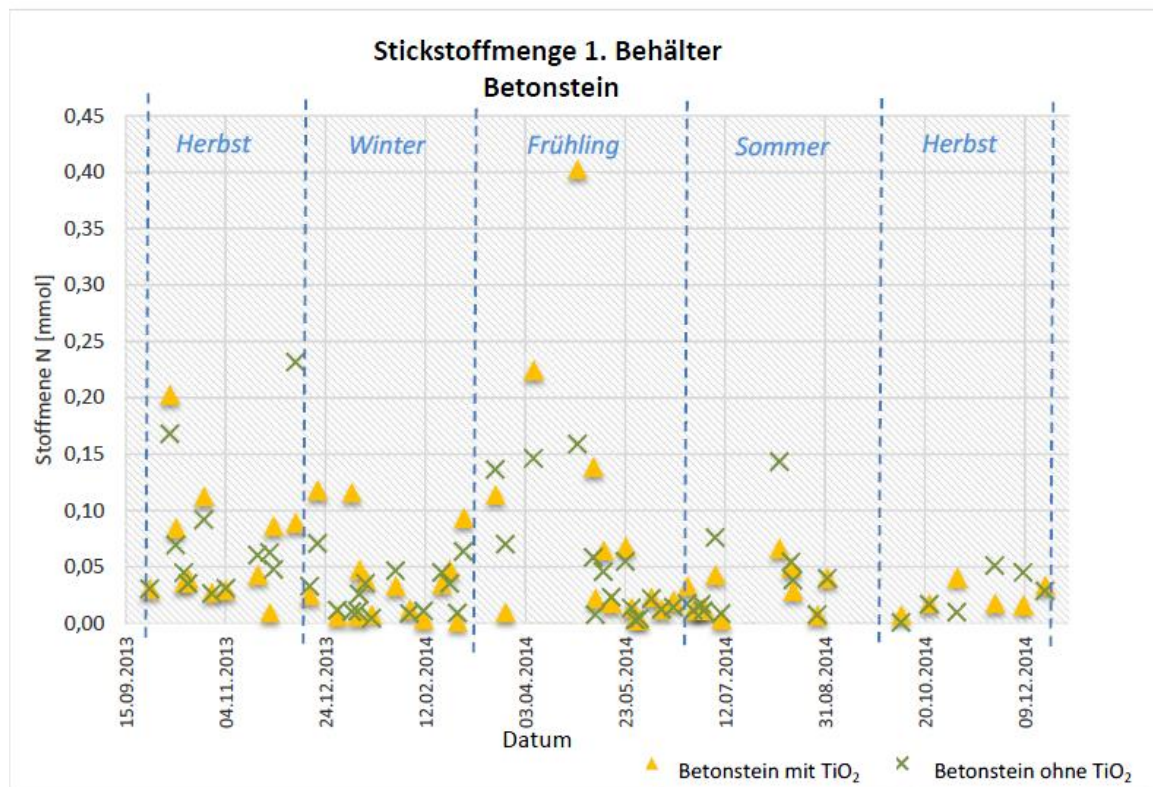


Abbildung 3.13: Stoffmenge in mmol im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonpflastersteine mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014



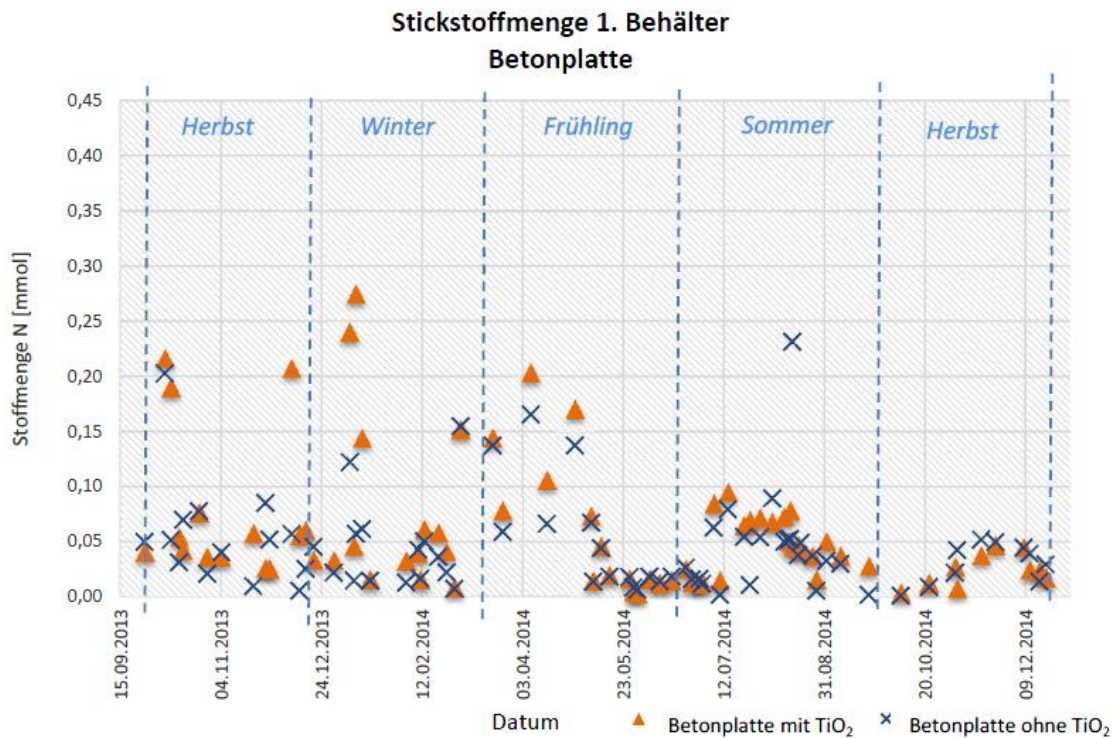


Abbildung 3.14: Stoffmenge in mmol im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonplatten mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014

Die nachfolgenden Abbildung 3.15 bis Abbildung 3.18 enthalten ebenfalls jeweils eine Gegenüberstellung der Summenlinien der Nitratmengen und der Stoffmengen für die kleinen Versuchsfelder beziehungsweise Betonpflastersteine und -platten mit und ohne TiO<sub>2</sub>. Erwartungsgemäß liefern auch hier die mit TiO<sub>2</sub> hergestellten Betonsteine und -platten aufgrund ihrer photokatalytischen Wirksamkeit sowohl eine höhere Nitratkonzentration in den untersuchten Wasserproben als auch eine höhere Stoffmenge als Produkt aus der Summe der Nitrat- und der Nitritkonzentration mit dem jeweiligen Probenvolumen. Darüber hinaus sind auch bei den kleinen Versuchsfeldern in jahreszeitlichen Phasen mit höherer Globalstrahlung auch höhere Steigungen der Summenlinien zu verzeichnen, die ebenfalls auf eine entsprechend stärkere Intensität der Nitrat- beziehungsweise Stickstoffbildungen schließen lassen.

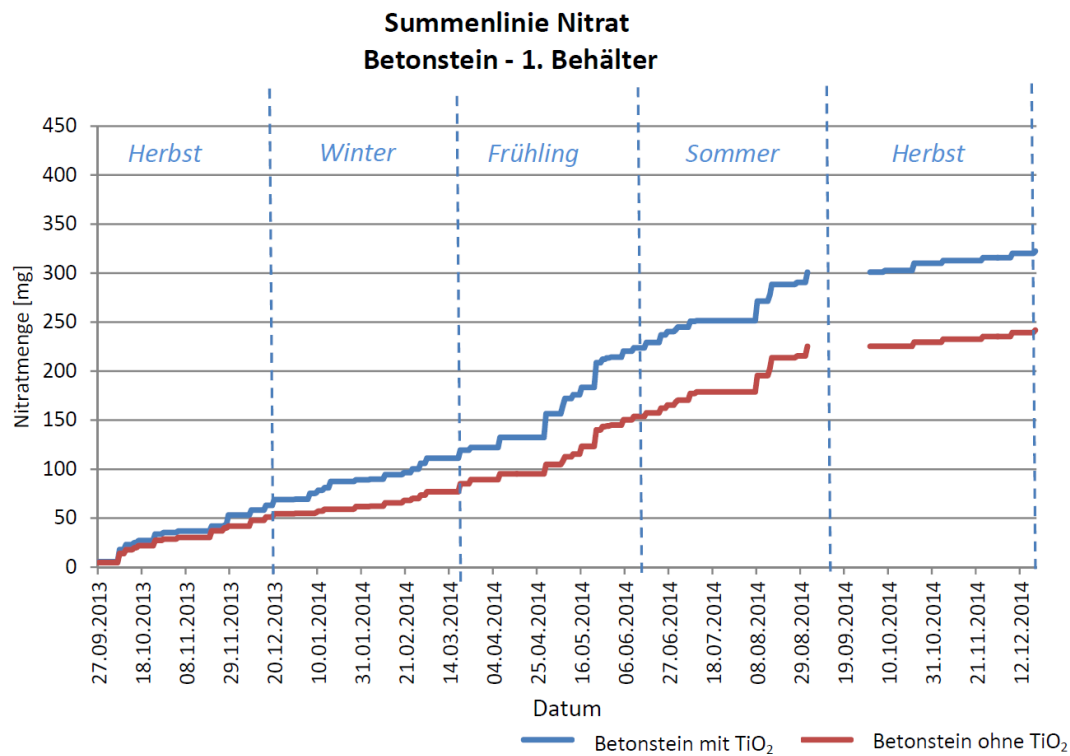


Abbildung 3.15: Summenlinien des Nitrats in mg im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonpflastersteine mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014

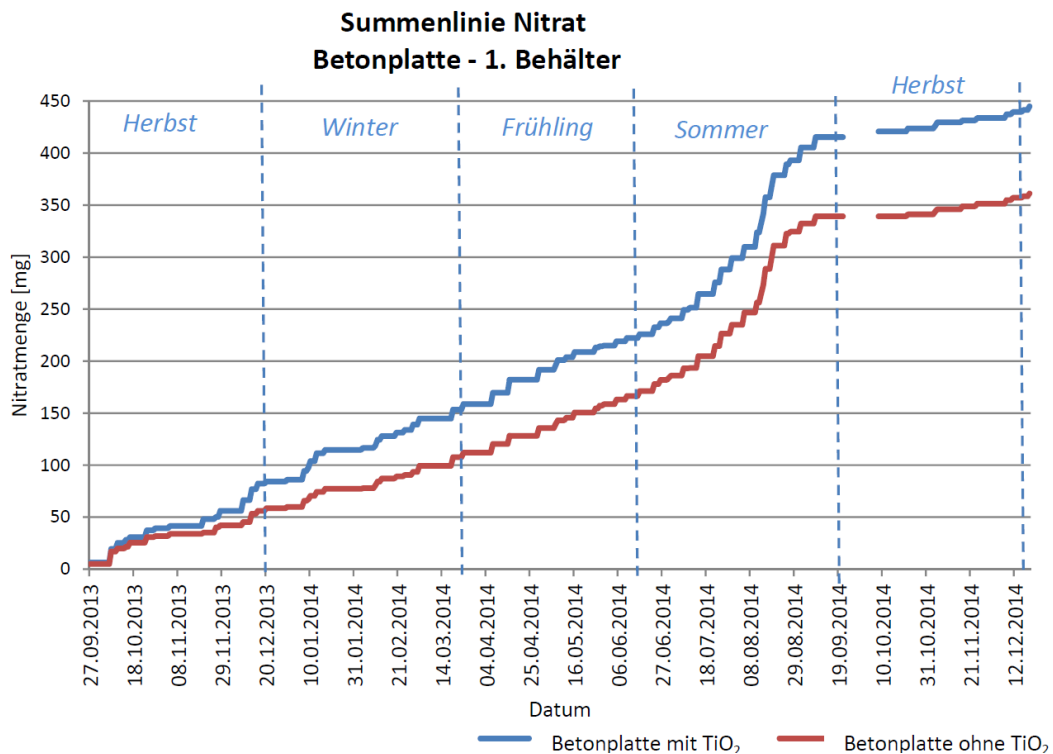


Abbildung 3.16: Summenlinien des Nitrats in mg im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonplatten mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014

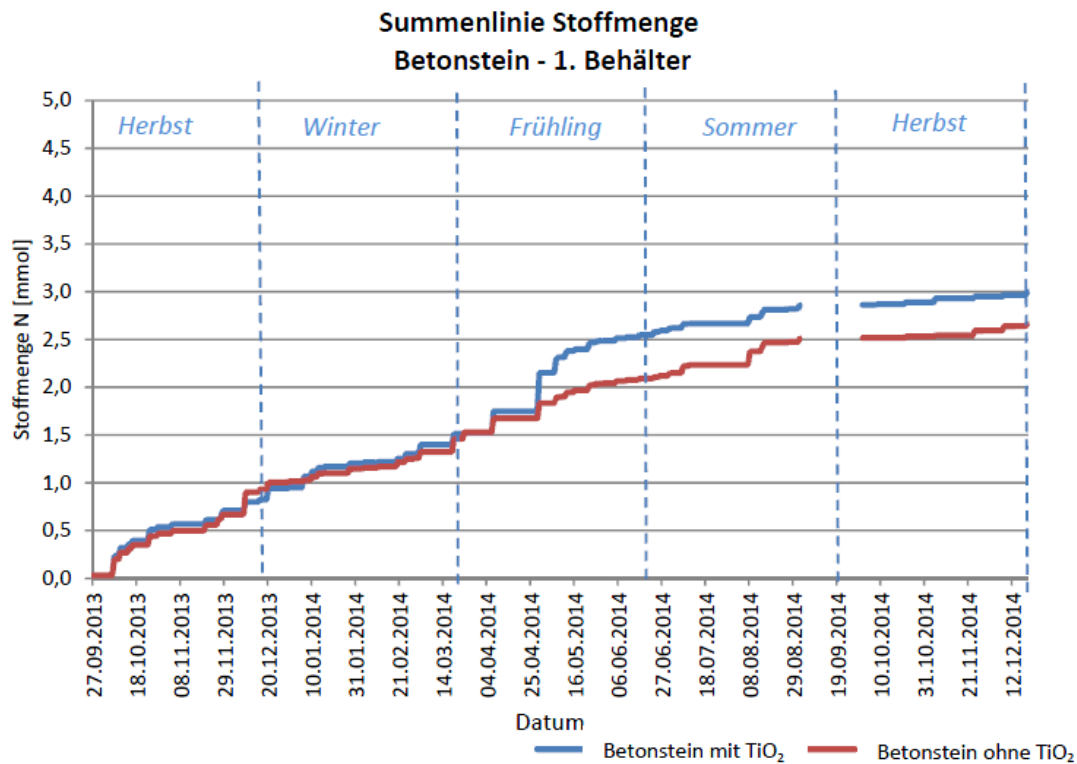


Abbildung 3.17: Summenlinien der Stoffmengen in mmol im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonpflastersteine mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014

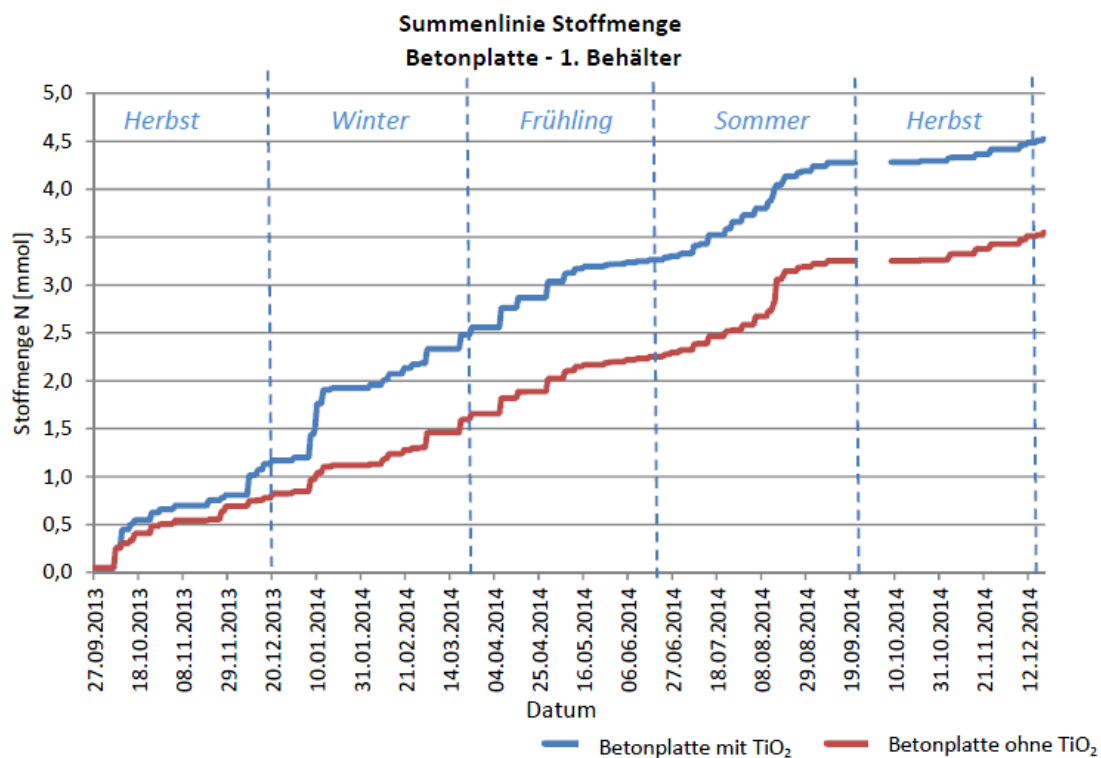


Abbildung 3.18: Summenlinien der Stoffmengen in mmol im Bereich der kleinen Untersuchungsflächen für die Betonplatten mit und ohne TiO<sub>2</sub> im Messzeitraum Oktober 2013 bis Ende Dezember 2014

### 3.4 Ergebnisse der Untersuchungen in der Messzelle

Zu Vergleichszwecken wurden ebenfalls durch das beteiligte Fraunhofer Institut auch noch Untersuchungen im Labor in der Messzelle nach DIN ISO 22197 an verschiedenen Probekörpern durchgeführt. In der folgenden Abbildung 3.19 ist exemplarisch der Messwertverlauf der Abbaurrate an Stickoxyden für Betonplattenprüfkörper dargestellt. Demnach wurde zumindest an diesen Probekörpern eine Wirksamkeit von lediglich etwa 5 % bis 10 % ermittelt, die somit im unteren Schwankungsbereich der in der Literatur bisher mitgeteilten Wirksamkeiten liegt.

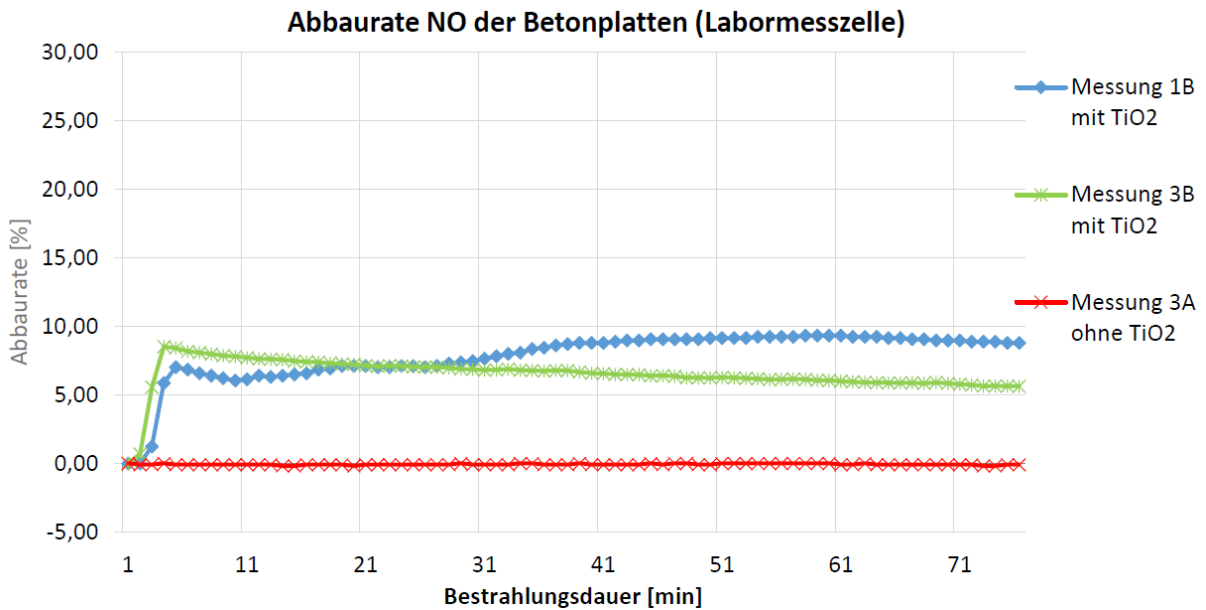


Abbildung 3.19: Ergebnisse der durch das beteiligte Fraunhofer-Institut durchgeführten Untersuchungen zur Wirksamkeit photokatalytisch aktivierter Flächen in der Laborzelle an Betonplattenprüfkörpern

## 4 Interpretation und Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Die über den gesamten Untersuchungszeitraum nach Fertigstellung des ZOB Detmold zwischen dem August 2013 und dem Dezember 2014 mit dem installierten Messcontainer aufgenommenen Werte lassen zunächst insgesamt plausible Verläufe erkennen. Aus der gemessenen Stickoxidbelastung ist jeweils die Verkehrsbelastung und deren tägliche Entwicklung für Werk- und Sonn- beziehungsweise Feiertage ersichtlich. Die festgestellten Niederschlagsmengen und die über die Jahreszeiten gemessenen Globalstrahlungen entwickeln sich dabei erwartungsgemäß. Somit kann aus diesen Daten zunächst abgeleitet werden, dass die aufgenommenen Messwerte einerseits plausibel sind und es sich andererseits um einen repräsentativen innerstädtischen Standort mit zyklischer vergleichsweise hoher Verkehrsbelastung handelt. Insbesondere solche stark belasteten Flächen scheinen für die Verwendung photokatalytisch wirksamer Baustoffe prädestiniert. Somit ist der gewählte Standort für eine ingenieurmäßige Betrachtungsweise der Wirksamkeit photokatalytisch aktivierter Flächen in situ geeignet und hinsichtlich einer Übertragbarkeit auf andere Bereiche als repräsentativ anzusehen.

Aus den aufgenommenen und gegenüberstellend entsprechend aufgetragenen Messwertentwicklungen wird auch deutlich, dass im betreffenden Bereich bei einer hohen Globalstrahlung vergleichsweise geringe Stickoxidwerte festzustellen sind. Dies ist zumindest qualitativ zu einem gewissen Anteil auch auf die Wirksamkeit der photokatalytisch aktivierten Flächen zurückzuführen. Insbesondere eine diesbezüglich detaillierter tägliche Auswertung lässt diese Tendenz ohne weiteres erkennen. Sowie eine entsprechende Globalstrahlung vorliegt, entwickeln sich die Stickstoffkonzentrationen zum Teil deutlich zurück und es treten keine mehr so ausgeprägten Belastungsspeaks auf. Aufgrund einer Vielzahl von Störeinflüssen und Überlagerungseffekten, von Sekundärreaktionen und der naturgemäß vorhandenen Luftströmungen mit der Folge von Verwirbelungen ist allerdings eine darüber hinausgehende quantitative Bewertung dieser Messergebnisse mit entsprechender Kennzahlenbildung zur Wirksamkeitsanalyse nicht beziehungsweise nicht ohne weiteres möglich.

Die Ergebnisse der Analysen an den gewonnenen Wasserproben hinsichtlich ihres Nitratgehalts und die daraus abgeleiteten Stickstoff- beziehungsweise Stoffmengen lassen bereits bei einer reinen Gegenüberstellung der Messwerte erkennen, dass bei den photokatalytisch wirksamen Flächen im ablaufenden Niederschlagswasser höhere Nitratkonzentrationen und Stoffmengen festzustellen sind. Dies gilt für alle untersuchten Flächen gleichermaßen. Besonders deutlich wird diese Tendenz naturgemäß bei einer summarischen Darstellung der Messwertentwicklungen. Hier liegen die Summen der Nitramengen wie auch der Stoffmengen ebenfalls bei allen Versuchsflächen bei den photokatalytisch wirksamen Flächen durchgehend über denjenigen der Flächen ohne  $\text{TiO}_2$ . Tendenziell ist zumindest aus einigen dieser Gegenüberstellungen auch erkennbar, dass bei



jahreszeitlich höherer Globalstrahlung, wie sie beispielsweise im Frühjahr und im Sommer aufgrund der längeren Tageslicht- beziehungsweise Einstrahlungszeiten und der höheren Strahlungsintensitäten auftreten, auch eine relativ höhere Nitratbildung zu verzeichnen ist.

Bisher wurde die Wirksamkeit photokatalytisch aktivierter Flächen im Allgemeinen im Labor sowie bereits auch in situ mit einer Messzelle untersucht. Dabei wurde eine Probefläche mit einer definierten Stickoxidmenge beaufschlagt und unter einer definierten UV-Strahlung die Abbauraten gemessen. Aus dem Verhältniswerten der Stickoxidkonzentrationen im Zu- und Ablauf der Messzelle kann somit eine Wirksamkeit definiert werden. Diese liegt nach den publizierten Messergebnissen in Größenordnungen bis zu etwa 50 %. Bei einer bereits durchgeführten in situ Messung im Bereich von Lärmschutzwänden an der Autobahn A1 in der Nähe von Osnabrück wurden demgegenüber in einem von der Bundesanstalt für Straßenwesen aufgelegten Messprogramm keine maßgeblichen Wirksamkeiten abgeleitet. Hierbei handelt es sich um vertikale, mit einem  $\text{TiO}_2$ -haltigen Baustoff beschichtete Wandsysteme, vor denen in einem gewissen Abstand Messanlagen aufgestellt sind, in denen Luftproben gewonnen und anschließend analysiert wurden [SMB15]. Es ist zu vermuten, dass einerseits die Wirksamkeit der vertikal orientierten Wände im Vergleich zu horizontal orientierten Verkehrsflächenbefestigungen schon aufgrund des Eintrittswinkels der Strahlungsvektoren geringer ist und Luftströmungen, Verwirbelungen und weitere Stör- und Überlagerungseffekte einen maßgeblichen Einfluss haben. Somit muss auf der Basis der vorliegenden Kenntnisse davon ausgegangen werden, dass eine auf die photokatalytisch bedingte Abbaureaktion an Stickoxyden bezogene Wirksamkeit nur im Labor und in situ kaum oder nur mit sehr hohem Aufwand nachweisbar ist. Zudem dürfte eine solche in situ ermittelte Wirksamkeit als Kennzahl auch nur eine vergleichsweise geringe Auflösung beziehungsweise Stabilität besitzen und im Hinblick auf die projektmäßig bestimmten Größenordnungen zu den auch in der Literatur genannten hohen Schwankungsbreiten führen.

Im Rahmen der hier durchgeführten ingenieurmäßigen Beurteilung der Wirksamkeit einer photokatalytisch aktivierten Verkehrsflächenbefestigung wurde demgegenüber auf das entstehende Reaktionsprodukt der photokatalytischen Reaktion zurückgegriffen, in dem die als Produkt der Photokatalyse ausgefallenen und im Niederschlagswasser wieder gelösten Salze zugrunde gelegt und dementsprechend die Nitratkonzentrationen im Ablaufwasser gemessen wurden. Insoweit handelt es sich hierbei um eine indirekte Wirksamkeit, da sie sich nicht unmittelbar auf eine Reduktion der Stickoxydkonzentrationen bezieht.

Für eine solche rechnerische Ermittlung einer indirekten Wirksamkeit wurde nach zwei verschiedenen Methoden vorgegangen. In einem ersten Schritt wurden aus den aufgenommenen Einzelwerten für die Nitrat- und die Stoffkonzentrationen zunächst rechnergestützt mittels eines hierfür erstellten Exceltool Jahresmittelwerte gebildet. Der sich jeweils ergebende Differenzwert zwischen den Flächen mit und den Referenzflächen ohne  $\text{TiO}_2$  wurde dann auf den Wert der Referenzfläche bezogen. Somit wird die

Nitratkonzentration aus den Ablaufmengen der Referenzflächen auch als Sockelwert beziehungsweise Hintergrundbelastung des Niederschlagswassers angesehen. In einem zweiten Schritt wurden, auch für eine entsprechende Plausibilitätsprüfung, die Steigungen der Summenlinien berechnet und ebenfalls die sich zwischen den Flächen mit und ohne TiO<sub>2</sub> ergebenden Differenzen auf die Steigungen der Summenlinien der Referenzflächen bezogen. Die bei diesen rechnerischen Ermittlungen der definierten indirekten Wirksamkeit erhaltenen Werte sind in der folgenden Tabelle 4.1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Ermittlungen der sogenannten indirekten Wirksamkeit der photokatalytisch wirksamen Flächen beziehungsweise Verkehrsflächenbefestigungen aus dem jeweiligen Jahresmittel der Einzelwerte und aus den abgeleiteten Steigungen der Summenlinien

Fläche	Basis	Jahresmittelwerte in %	Steigung der Summenlinien in %
große Versuchsflächen Bussteige	Nitratkonzentration	37	26
	Stoffmenge	43	28
kleine Versuchsflächen Betonpflastersteine	Nitratkonzentration	33	38
	Stoffmenge	12	14
kleine Versuchsflächen Betonplatten	Nitratkonzentration	25	29
	Stoffmenge	28	37

Nach den Angaben in der voranstehenden Tabelle schwanken die aus den Jahresmittelwerten abgeleiteten indirekten Wirksamkeiten für die verschiedenen Flächen zwischen etwa 25 % bis 37 % für die Nitratkonzentrationen und zwischen etwa 12 % bis 43 % für die Stoffmengen. Die entsprechenden Schwankungsbreiten liegen bei der Auswertung über die Steigungen der Summenlinie bei 26 % bis 29 % für die Nitratkonzentrationen und bei 14 % bis 37 % für die Stoffmengen. Somit ergeben sich für die Stoffmengen jeweils vergleichsweise größere Schwankungsbreiten. Allerdings ist auch erkennbar, dass die abgeleiteten indirekten Wirksamkeiten mit Ausnahme der Stoffmengen bei den Betonpflastersteinen in einem vergleichsweise einheitlichen Bereich zwischen etwa 25 % bis 43 % liegen. Zudem ist auch noch erkennbar, dass im Bereich der großen Versuchsflächen in der Verkehrsanlage selbst mit entsprechenden betrieblichen und auch anthropogenen Einflüssen zumindest bei den Jahresmittelwerten prinzipiell höhere indirekte Wirksamkeiten gemessen werden. Dies könnte auf zusätzliche über die photokatalytisch bedingten hinausgehenden nitratbildenden Einflüsse zurückzuführen sein.

Im Ergebnis kann eine indirekte Wirksamkeit der Versuchsflächen in einer Größenordnung von etwa 30 % aus den insgesamt vorliegenden Daten abgeleitet werden. Damit konnte das grundlegenden Ziel dieses Forschungsvorhabens erreicht werden, die Wirksamkeit der hergestellten und photokatalytisch aktivierten Verkehrsflächen ingenieurmäßig auch in situ nachzuweisen. Eine Ableitung der photokatalytisch bedingten Stickstoffreduktion ist aus den Messdaten und insbesondere aus den mit dem Messcontainer vor Ort aufgenommenen

Daten erkennbar, kann aber naturgemäß mit dieser Methode zahlenmäßig nicht erfasst werden.

Nach den seitens der Stadt Detmold gegebenen Informationen lagen die Baukosten für den ZOB bei rund 2,6 Mio. Euro. Die Mehrkosten für die Herstellung der photokatalytisch wirksamen Flächen ergeben sich zu grob etwa 3 % bezogen auf die genannte Bausumme. Diese entfallen im Wesentlichen auf die höheren Baustoffkosten bei der Verwendung der entsprechenden Betonpflastersteine im Bereich der Fußgängerflächen und Wartebereiche und auf die Verwendung des entsprechend teureren  $\text{TiO}_2$ -Zements bei der Herstellung der Betonfahrbahnen. Die Verarbeitung vor Ort wird durch die Verwendung der photokatalytisch aktivierten Baustoffe im Vergleich zur Verwendung konventioneller Baustoffe nicht beeinflusst. Zumindest nach den derzeit vorliegenden Kenntnissen ist die Dauerhaftigkeit des erstellten Bauwerks einer konventionellen Bauweise vollumfänglich vergleichbar.

Es ist somit im Ergebnis der insgesamt durchgeführten Maßnahme und der ingenieurmäßigen Begleitung der Bauarbeiten und der Ermittlung der Wirksamkeit zu empfehlen, zumindest in innerstädtischen Bereichen mit hoher Verkehrsbelastung entsprechende Baustoffe zu verwenden, um die gesundheitsgefährdende Stickoxidbelastung zu reduzieren. Das können Anlagen des straßengebundenen öffentlichen Nahverkehrs, Kreuzungen und Einmündungen oder Kreisverkehre sowie auch staulastige Straßenabschnitte sein. Auch im Bereich stark frequentierter Logistikanlagen oder Anlagen für den Güterumschlag schein eine Anwendung solcher Baustoffe zur Reduktion der entstehenden Schadstoffe sinnvoll. Die Verwendung der genannten Baustoffe hat zudem den Vorteil, dass sie, soweit sie nicht mechanisch durch die laufende Verkehrsbelastung abgetragen werden, langfristig aktiv sind, da keine Reaktanten im Verlauf der Photokatalyse verbraucht werden. Die genannte Kostenerhöhung in lediglich Prozentgrößenordnung lässt zumindest im Sinne einer ganzheitlichen Planung den Schluss zu, dass eine solche Maßnahme im Vergleich zu Alternativen wie etwa der Steigerung der Elektromobilität mit einer Verlagerung der Emissionen an den Kraftwerksstandort und einem hohen Aufwand für die Batterieherstellung oder die Umstellung einer kommunalen Busflotte auf Hybrid- oder Elektrofahrzeuge mit entsprechend hohem Kostenaufwand auch im Hinblick auf induktive Lademöglichkeiten für den durchgehenden Tagesbetrieb solcher Fahrzeuge sehr einfach mit den gängigen Methoden durchzuführen ist und einen nur geringen und sehr überschaubaren Kostenaufwand bedingen. Dies gilt im Prinzip auch für Sanierungsmaßnahmen im Bereich bestehender Verkehrsflächen. So ist es denkbar, Fahrbahnen durch das sogenannte Whitetopping-Verfahren wieder herzustellen, wobei die dafür verwendeten Betonrezepturen einen  $\text{TiO}_2$ -haltigen Zement enthalten. Auch bei der Herstellung offenporiger Asphaltbeläge ist eine Füllung mit einem  $\text{TiO}_2$ -haltigen Zementmörtel denkbar und zumindest in versuchsabschnitten auch bereits ausgeführt. Aufgrund der Nähe zu den Emissionsstellen, und dem optimalen Aufttrittswinkel der Strahlungsvektoren sollte zumindest aus ingenieurtechnischer Sicht überwiegend horizontal orientierten Flächen der Vorzug gegeben werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Verwendung  $\text{TiO}_2$ -haltiger Baustoffe können Stickoxyde aus der Luft an der Oberfläche beispielsweise von Verkehrsflächenbefestigungen unter der Einwirkung der natürlichen UV-Strahlung in Nitratsalze reduziert werden, die mit dem Niederschlagswasser über die Entwässerungsanlagen abfließen. Im Zuge der Erneuerung des Omnibusbahnhofs in Detmold (ZOB) wurden solche Baustoffe auf einer Fläche von grob etwa 7.000 m<sup>2</sup> verarbeitet. Mit den eigens hierfür entwickelten und im laufenden Betrieb des ZOB Detmold durchgeführten Untersuchungen sollte die Wirksamkeit dieser photokatalytisch aktivierten Betonoberflächen zur Schadstoffreduktion in verkehrlich stark belasteten Bereichen ingenieurmäßig bestätigt werden. Dabei konnte die Nitratbildung auf verschiedenen Versuchsflächen im Vergleich zu Referenzflächen ohne  $\text{TiO}_2$ -haltige Baustoffe nachgewiesen werden. Eine ingenieurmäßig daraus abgeleitete sogenannte indirekte Betrachtungsweise führt auf eine Wirksamkeit der hergestellten Flächen in einer Größenordnung von etwa 30 %. Ausdrückliche ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass sich diese indirekte Wirksamkeit auf die photokatalytisch bedingte Nitratbildung als Reduktionsprodukt, nicht aber auf die Größenordnung des Stickoxidabbaus bezieht.

Aus der Literatur sind bezogen auf die Stickstoffreduktion Wirksamkeitsangaben bis in eine Größenordnung von etwa 50 % bekannt. Die Wirksamkeit wird durch die hier gewählte Betrachtungsweise prinzipiell bestätigt, allerdings kann quantitativ aufgrund der unterschiedlichen Bezugsgrößen keine Vergleichbarkeit hergestellt werden.

Die Mehrkosten des erneuerten ZOB betragen für die Herstellung der photokatalytisch wirksamen Verkehrsflächen lediglich etwa 3 % der Gesamtkosten. Dementsprechend sollte der Einsatz solcher schadstoffreduzierender Baustoffe in entsprechenden Anlagen des rollenden und ruhenden Verkehrs mit hoher Belastung generell überlegt werden. Auch für die Sanierung bestehender Verkehrsablagen bietet sich die Verwendung solcher Baustoffe an. Insbesondere im Vergleich zu den Kosten der Elektromobilität, zur derzeitigen Akzeptanz dieser Mobilitätsform in der Gesellschaft, zur Frage der Energieversorgung beziehungsweise Ladung von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs im Betrieb und zur Frage der Herstellung, Dauerhaftigkeit und insbesondere der Entsorgung oder des Recyclings von Batterien stellt die untersuchte passive Maßnahme eine sofort verfügbare Alternative dar, die mit konventionellen Methoden baulich hergestellt werden kann. Sie kann somit einen maßgeblichen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität in verkehrlich hoch belasteten Stadtgebieten liefern.

Zukünftig sollte bewertet werden, inwieweit die hier abgeleitete indirekte Wirksamkeit auch auf eine Abbaureaktion der Stickstoffmengen schließen lässt. Damit würde sich eine weitergehende Möglichkeit zum Vergleich mit den bisherigen Messungen ergeben.

## Quellenverzeichnis

- [BD03] Benedix, R.; Dehn, F.: Anwendung photokatalytisch aktiver Metalloxide zur Entwicklung schadstoffzersetzender und/ oder selbstreinigender Betonoberflächen. beton 4/2003, S. 184-189.
- [Ben09] Benedix, R.: Titandioxid- Photokatalyse und ihrer Anwendung im Bauwesen. Detail 5, 2009, S. 502-505.
- [BK11] Berhorst, A.; Kaminski, S.: geführter Schriftverkehr per E-Mail der Verfasserin der Bachelorarbeit „Photokatalytischer Beton“ an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Alexandra Berhorst, mit der Heidelberg Cement AG, vertreten durch Frau Silke Kaminski, zur Beantwortung von Fragen bezüglich photokatalytischen Zement/ Beton. Zeitraum 04.04.2011-06.04.2011.
- [Bol11] Bolte, G.: Innovative Baustoffe- Luftschadstoffreduktion mit TioCem®. www.tis-online.info, 02.04.2011. Dateigröße 309 KB.
- [Bol05] Bolte, G.: Photokatalyse in zementgebundenen Baustoffen. CEMENT INTERNATIONAL, Jahrgang 4, Nr. 3, 2005, S. 92-97.
- [Cas05] Cassar, L.: Mineralische Bindemittel und Fotokatalyse. BFT 01/2005, S. 10-16.
- [DBC11] Deutsche Bauchemie: Nanotechnologie in der Bauchemie, Sachstandsbericht. www.deutsche-bauchemie.de, 09.05.2011.
- [DD06] Dienemann, W.; Declerck, P.: Selbstreinigende Fassadenplatten aus Beton. BFT 02/2006 Kongressunterlagen 50th BetonTage, S. 14-16.
- [FE11] Fontana, D.; Egger, C.: Farbiger Beton photokatalytisch. www.btf-online.info/de, 05.04.2011
- [FIM10] Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie; F.C. Nüdling Betonelemente GmbH + Co.KG: Verbesserung der Luftqualität durch photokatalytisches Pflaster. Abschlussbericht, 2010. www.dbu.de, 22.04.2011. Dateigröße 2,9 MB
- [HCA15] Heidelberg Cement AG: Betonprodukte aus TioCem® mit TXActive®. www.heidelbergcement.com, 31.03.2011.

- [HMW11] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung: Einsatz von Nanotechnologie in Architektur und Bauwesen. [www.hessen-nanotech.de](http://www.hessen-nanotech.de), 18.04.2011. Dateigröße 4,7 MB.
- [HHB08a] Hunger, M.; Hüskens, G.; Brouwers, J.: Photokatalytische Betonprodukte-Teil 1: Grundlagen und Testverfahren. ZKG INTERNATIONAL, Nr. 8, 2008, Volume 61, S. 77-85.
- [HHB08b] Hunger, M.; Hüskens, G.; Brouwers, J.: Photokatalytische Betonprodukte-Teil 2: Einflussgrößen und Leistungspotenzial. ZKG INTERNATIONAL, Nr. 10, 2008, Volume 61, S. 76-84.
- [IBC11] Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie: Nanomaterialien-Herausforderung für den Arbeits- und Gesundheitsschutz. [www.igbce.de](http://www.igbce.de), 20.04.2011. Dateigröße: 461 KB.
- [Jun05] Junghannß, U.: Entwicklung und mikrobiologische Testung photokatalytisch aktiver Beschichtungen zur Unterbindung der Besiedlung und Beschädigung von Bauwerken mit Algen im Innen- und Außenbereich. Schlussbericht, 2005. <http://edok01.tib.uni-hannover.de>, 31.03.2011. Dateigröße 16,1 MB
- [Lac02] Lackhoff, M.: Photokatalytische Aktivität ambienter Partikelsysteme. Technische Universität München, Fakultät für Chemie, Dissertation, 2002. <http://deposit.d-nb.de>, 07.04.2011. Dateigröße: 3,9 MB
- [LIT11] Lithonplus: photocatalytic air balance. <http://umweltschutz.lithonplussteinmanufaktur.de>, 29.04.2011.
- [NEL11] Nelskamp: ClimaLife. [www.nelskamp.de](http://www.nelskamp.de), 30.04.2011.
- [PIC11] PICADA-Projekt: Allgemeine Informationen. [www.picada-project.com](http://www.picada-project.com), 26.04.2011.
- [Spa07] Spaeth, M.: Pilze auf Baustoffen: Einfluss funktionaler Oberflächen auf deren Bewuchs. Universität Bonn, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Dissertation, 2007. <http://hss.ulb.uni-bonn.de>, 31.3.2011. Dateigröße: 2,4 MB
- [SW06] Stephan, D.; Wilhelm, P.: Innovative Werkstoffe mit Titandioxid – selbstreinigende und photokatalytisch aktive Baustoffoberflächen. CEMENT INTERNATIONAL, Jahrgang 4, Nr. 6, 2006, S. 76-82.

- [Tsc09] Tschirch, J.: Entwicklung optimierter photokatalytisch aktiver Schichten und verbesserter Photokatalysatoren. Universität Hannover, Naturwissenschaftliche Fakultät, Dissertation, 2009. <http://edok01.tib.uni-hannover.de>, 02.04.2001. Dateigröße: 8,2 MB
- [UBA11] Umweltbundesamt: Stickstoff- zuviel des Guten?. [www.umweltdaten.de](http://www.umweltdaten.de), 07.04.2011. Dateigröße: 10,8 MB.
- [WS07] Wilhelm G.; Stephan D.: Titandioxid für selbstreinigende Beschichtungen von Baustoffen. beton 5/2007, S. 202-205
- [Tis11] Tischer: Betonpflasterstein zum Schadstoffabbau – Illusion oder Realität? 19.12.2011. [http://www.hessen-umwelttech.de/mm/10\\_Tischler.pdf](http://www.hessen-umwelttech.de/mm/10_Tischler.pdf), Dateigröße 4,2 MB
- [SMB15] Sauer, J.; Metzger, S.; Baum, A.: Photokatalytisch aktive Lärmschutzwand-Oberflächen zur Minderung der Stickoxidbelastung. Kolloquium Luftqualität an Straßen 2015. Bundesanstalt für Straßenwesen; Bergisch Gladbach. Tagungsband S. 221-231
- [Plo15] Plöger, Th.: Masterarbeit „Effektivität photokatalytisch wirksamer Oberflächen am Beispiel ZOB Detmold“. Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Fachbereich Bauingenieurwesen, Zeitraum 20.04.2015 bis 20.08.2015