



3. FORTSCHREIBUNG LUFTREINHALTEPLAN FREIBURG

BETRACHTUNG DER AUSWIRKUNG DER TUNNELLÜFTUNG DES SCHÜTZENALLEETUNNELS AUF DIE STICKSTOFFDIOXIDIMMISSIONEN IN DER STADT FREIBURG

– Gutachten Block 2.2 –

Auftraggeber: Regierungspräsidium Freiburg
 Referat 54.1 – Luftreinhaltung
 Schwendistraße 12
 79102 Freiburg

Durchführung: Ingenieurbüro Rau
 Bottwarbahnstraße 4
 D-74081 Heilbronn

Inhaltsverzeichnis

Glossar	v
1 Aufgabenstellung	1
2 Vorgehensweise	3
2.1 Allgemeine Einschätzung	3
2.2 Gewählte Vorgehensweise für die Bearbeitung	4
2.2.1 Einschätzung der derzeitigen und zukünftigen Situation	4
2.2.2 Maßnahme 1: NO ₂ -Reduktion bei optimierter Tunnellüftung.....	4
2.2.3 Maßnahme 2: NO ₂ -Reduzierung durch photokatalytische Materialien	5
3 Immissionsseitige Einschätzung der derzeitigen Situation bzw. der Trendentwicklung	6
3.1 Beurteilung der Immissionssituation im Nahbereich des westlichen Tunnelportals auf Basis von Messungen	6
3.1.1 Sondierende NO ₂ – und Benzolmessungen im Bereich des Schützenalleetunnels in Freiburg aus dem Jahr 2003	6
3.1.2 NO ₂ -, Ruß- und Benzolmessungen im Bereich der Tunnelportale des Schützenalleetunnels in Freiburg Februar 2003 – Mai 2006.....	10
3.1.3 Vertiefte Betrachtung der lufthygienischen Situation bei Wegfall der Umkehrlüftung und Schließung der Öffnung zwischen Nord- und Südröhre	11
3.1.4 Kurzauswertung der Stickstoffdioxidmessungen 2010/2011 bzw. März 2012 an der Messstation Freiburg Tunnel-West.....	11
3.1.5 Zusammenfassung.....	12
3.2 Abschätzung des maximalen Immissionsbeitrags im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße durch die Tunnelabluft.....	13
3.2.1 Screening-Modell RLuS	13
3.2.2 Mikroskalige Ausbreitungsberechnung MISKAM.....	15
3.2.3 Zusammenfassung.....	17
4 Maßnahme NO₂-Reduktion bei optimierter Tunnellüftung	19
4.1 Beschreibung des Lüftungssystems des Schützenalleetunnels	19
4.2 Darstellung der für den Schützenalleetunnel geeigneten Lüftungsvariante	21
4.3 Abschätzung der Wirksamkeit der möglichen Lüftungsvariante „Absaugung“	21

5	Maßnahme NO₂-Reduzierung durch katalytische Materialien	23
5.1	Beschreibung der Wirkungsweise der katalytischen Beschichtung	23
5.2	Überblick über den Einsatz von Titandioxid (TiO ₂)	23
5.2.1	Einsatz von TiO ₂ im Bereich von Straßen	23
5.2.2	Einsatz von TiO ₂ im Bereich von Tunneln	27
5.3	Prüfung der Einsatzmöglichkeiten für den Schützenalleetunnel in Freiburg	29
5.4	Abschätzung der Wirksamkeit photokatalytisch wirksamer Oberflächen	31
6	Ergebnis der Untersuchung für die Maßnahmen „optimierte Tunnellüftung“ (Maßnahme 1) und „katalytische Materialien“ (Maßnahme 2)	32
6.1	Maßnahme NO ₂ -Minderung bei optimierter Tunnellüftung	32
6.2	Maßnahme NO ₂ -Minderung durch katalytische Materialien	33
6.3	Spannbreite der Immissionskonzentrationen im Bereich der Luftmessstation für die Planfälle des Gutachtens 2.1 mit / ohne Tunnelabluft	34
7	Zusammenfassung	38
8	Literaturverzeichnis	41

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1:	Lage der Messpunkte im Bereich des Westportals [2].	7
Abb. 3-2:	Standorte für Profilmessungen zur Ermittlung der Konzentrationsspitzen [2].	7
Abb. 3-3:	Messungen der Gesamtbelastung am 25.03.2003 an den Messpunkten W3 und W8 [2].	9
Abb. 3-4:	Ergebnisse zum tunnelbedingten NO _x -Anteil am Messpunkt W3 [2].	10
Abb. 3-5:	Ergebnisse zum tunnelbedingten NO _x -Anteil am Messpunkt W8 [2].	10
Abb. 3-6:	Lage der Messstation Tunnel-West [6].	12
Abb. 3-7:	Abklingkurve nach RLuS vom Tunnelportal längs der Straße.	14
Abb. 3-8:	An der Luftmessstation mit MISKAM berechnete Immissionskonzentrationen mit und ohne Portalabluft.	18
Abb. 4-1:	Lüftungssystem mit Abluftabsaugung ohne zusätzliche Zuluft [9].	20
Abb. 4-2:	Lüftungssystem „Querlüftung“ mit Absaugung und Zuluft [9].	20
Abb. 4-3:	Längslüftung mit Portalabsaugung [10].	21
Abb. 5-1:	Gemessene 8h NO _x -Mittelwerte (09:00 bis 17:00Uhr) im Bereich mit (69-TX) und ohne (103 Asphalt) Beschichtung [16].	25
Abb. 5-2:	Prozentuale Minderung der NO _x -Gesamtbelastung an der Hohenheimer Straße	26
Abb. 5-3:	Schematisches Aussehen der entwickelten Tunnelkassette [20].	28
Abb. 5-4:	Schematische Vorder- und Seitenansicht des Realisierungsvorschlages für die Kassette [23] [21].	29
Abb. 6-1:	NO ₂ -Jahresmittelwerte für die Trendentwicklung und alle betrachteten Maßnahmen der Studie IBRau, 2017 [1] an der Luftmessstation in 1,5 m über Grund mit und ohne Portalabluft.	36
Abb. 6-2:	NO ₂ -Jahresmittelwerte für die Trendentwicklung und alle betrachteten Maßnahmen der Studie IBRau, 2017 [1] an der Luftmessstation in Höhe des Messfühlers (3,0 m über Grund) mit und ohne Portalabluft.	37

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Mögliche Minderung der jahresmittleren NO ₂ -Immissionskonzentrationen bei vollständiger Unterbindung der Ableitung der Tunnelabluft über das Westportal.	16
Tab. 6-1:	Jahresmittlere NO ₂ -Immissionskonzentrationen an der Luftmessstation Schwarzwaldstraße bei Annahme eines maximalen NO _x -Minderungspotenzials von 50% durch eine optimierte Tunnellüftung.	33
Tab. 6-2:	Jahresmittlere NO ₂ -Immissionskonzentrationen an der Luftmessstation Schwarzwaldstraße bei Annahme einer maximal wirksamen NO _x -Minderung von 20% durch photokatalytisch wirksame Materialien.	34

Glossar

AKS	s. Ausbreitungsklassenstatistik
Ausbreitungsklassenstatistik	Häufigkeitsverteilung der in Klassen zusammengefassten meteorologischen Größen Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Stabilität der Atmosphäre (Klug/Manier) nach VDI 3782 Blatt 1 (KRdL 2009) und Blatt 6 (KRdL 2015).
Ausbreitungsmodell	Modell zur Berechnung von Konzentrationswerten von in der Luft befindlichen Luftschadstoffen.
CFD-Modell	Computational Fluid Dynamics: etablierte Modellfamilie der numerischen Strömungsmechanik.
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke. In der Regel ein Jahresmittelwert, der in Kfz/d angegeben wird.
Emission	Freisetzung von Schadstoffen; meist angegeben in Masse pro Zeiteinheit.
Gesamtbelastung	An einem Immissionsort ist die Gesamtbelastung die Summe aus regionaler und urbaner Hintergrundbelastung sowie der lokalen Zusatzbelastung.
JMW	Jahresmittelwert.
Kfz	Kraftfahrzeug.
LRP	Luftreinhalteplan.
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
Luftschadstoffe	Alle in der Umwelt vorkommenden Luftverunreinigungen, die auf Schutzgüter schädlich wirken können.

MISKAM	Prognostisches Detailmodell, das die Ausbreitungsberechnung innerhalb komplexer Bebauungssituationen ermöglicht.
MLuS	Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung, 2005.
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxid. Sammelbezeichnung für verschiedene gasförmige Verbindungen, die aus Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) zusammengesetzt sind.
Nutzfahrzeuge, schwere (sNFz)	Kfz über 3,5 t zulässiger Gesamtmasse.
PICADA	Forschungsvorhaben: Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment; Untersuchung photokatalytisch wirksamer Farben/Beschichtungen.
Pkw	Personenkraftwagen.
Photokatalyse	Durch Licht ausgelöste chemische Reaktion.
RLuS	Richtlinien zur Ermittlung der Luftqualität an Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung, 2012.
Screeningmodell	Vereinfachter Modellierungsansatz zur Berechnung von Konzentrationen in unbebauten oder bebauten Straßenabschnitten.
SynAKS	Auf numerischen Berechnungen basierende Wind- und Ausbreitungsklassenstatistik.
Tracergasmessung	Spurengasmessung.
Verkehrsaufkommen	Anzahl der Ortsveränderungen von Personen oder Fahrzeugen je Zeiteinheit in einem Erhebungsgebiet oder an einem Querschnitt.

Verkehrsstärke	Anzahl der Kfz, die pro Zeiteinheit einen Straßenquerschnitt oder eine Fahrspur passieren.
Verkehrszusammensetzung	Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes nach Fahrzeugkategorien.
Vorbelastung	Immissionsbelastung, die aus Emissionen stammt, die bei einer Ausbreitungsberechnung nicht explizit berücksichtigt werden.
Zusatzbelastung	Immissionsbelastung, die aus Emissionen stammt, die bei einer Ausbreitungsberechnung explizit berücksichtigt werden. I.d.R. das Ergebnis von Berechnungen mit einem Screening- oder Detailmodell.

1 Aufgabenstellung

An der B31 in Freiburg werden im Bereich der von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) betriebenen Luftmessstation Schwarzwaldstraße seit Jahren die für Freiburg höchsten Belastungen durch Stickstoffdioxid (im Jahr 2015 lag der Jahresmittelwert bei $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$, im Jahr 2017 bei $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$) gemessen. Aus diesem Grund prüft das RP Freiburg im Zuge der Fortschreibung des Luftreinhalteplans Freiburg (LRP Freiburg) weitere Maßnahmen, mit denen der NO_2 -Grenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Jahresmittel möglichst schnell eingehalten werden kann.

In dem vorliegenden Gutachten liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung eines möglichen Einflusses der über das Westportal des Schützenalleeetunnels freigesetzten Tunnelabluft auf das Immissionsniveau an der Luftmessstation Schwarzwaldstraße. Dazu erfolgt zunächst die immissionsseitige Einschätzung der derzeitigen Situation (Bestandssituation) auf Basis bisheriger Messungen und auf Basis von Ausbreitungsrechnungen.

Als mögliche Maßnahmen werden anschließend geprüft und diskutiert:

- Maßnahme 1: optimierte Tunnellüftung: eine Änderung des derzeitigen Lüftungsregimes des Tunnels zur Verminderung der über das Westportal freigesetzten Tunnelabluft
- Maßnahme 2: photokatalytische Materialien: Einsatz von photokatalytisch wirksamen Materialien zur Verminderung der über das Westportal abgegebenen Tunnelabluft.

Aufgabe des Gutachtens ist die Prüfung, ob mit diesen beiden Maßnahmen unter Berücksichtigung der Umsetzbarkeit das Ziel des Luftreinhalteplans, den NO_2 -Immissionsgrenzwert so schnell wie möglich einzuhalten, erreicht werden kann.

Das Gutachten ist folgendermaßen gegliedert:

In Kapitel 2 wird zunächst die allgemeine Vorgehensweise bei der Untersuchung eines möglichen Einflusses der über das Westportal des Schützenalleeetunnels freigesetzten Tunnelabluft auf das Immissionsniveau an der Luftmessstation Schwarzwaldstraße kurz zusammengefasst. In Kapitel 3 folgt zunächst die immissionsseitige Einschätzung der derzeitigen Situation (Bestand) anhand der Auswertungen von Messkampagnen im Bereich des Westportals und mit Hilfe von Modellrechnungen. In Kapitel 4 werden unterschiedliche Tunnellüftungssysteme diskutiert und in Hinblick auf eine mögliche NO_2 -Immissionsreduzierung hin qualitativ bewertet (Maßnahme optimierte Tunnellüftung). Das Kapitel 5 beschäftigt sich mit dem Einsatz photokatalytischer Materialien im Tunnel bzw. Tunnelnahbereich zur möglichen Minderung von NO_2 im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße (Maßnahme katalytische Materialien). Die möglichen Auswirkungen der in diesem Gutachten betrachteten Maßnahmen auf die Ergebnisse der in dem

Fachgutachten 2.1 untersuchten Planfälle werden in Kapitel 6 zusammenfassend dargestellt und diskutiert.

2 Vorgehensweise

2.1 Allgemeine Einschätzung

Bei der Ausbreitung von Abluft, die über Tunnelportale innerhalb bebauter Gebiete freigesetzt wird, handelt es sich um einen komplexen Vorgang. Die Abluffahne ist im Nahbereich des Portals mit der Ausbreitung eines Halbstrahls zu vergleichen, der durch die Strahlgeschwindigkeit und -turbulenz geprägt wird. Mit zunehmender Distanz zum Portal gewinnt die Umgebungsmeteorologie immer mehr an Bedeutung und dominiert das weitere Ausbreitungsverhalten. Bei Tunnelportalen in Tieflage bzw. innerhalb komplexer Bebauung (innerstädtische Tunnel wie im vorliegenden Fall) wird das Strömungs- und Ausbreitungsverhalten zusätzlich durch gebäude- und geländeinduzierte Turbulenz beeinflusst. Eine korrekte Modellierung des Nahfeldes setzt voraus, dass die Bebauung im Nahbereich des Portals, die Tieflage des Tunnelportals und der Abluftimpuls möglichst realistisch abgebildet werden. Mit zunehmender Entfernung von einem Tunnelportal spielen die Freisetzungsbefindungen eine immer geringere Rolle.

Numerische prognostische Modelle wie bspw. das Modell MISKAM, die in aller Regel bei Ausbreitungsuntersuchungen innerhalb komplexer Bebauungsstrukturen zum Einsatz kommen, können den Portalnahbereich mit Horizontalimpuls sowie, wie bei dem zu betrachtenden Schützenalleeetunnel gegeben, die Tieflage des Portals mit anschließender Rampe nicht vollständig abbilden. Letzteres liegt unter anderem daran, dass das Modell MISKAM das Rechengebiet in kleine rechtwinklige Volumenzellen zerlegt. Die Rampe wird somit „gestuft“ aufgelöst. Mikroskopisch betrachtet bilden sich somit in der real kontinuierlich ansteigenden Rampe kleine Turbulenzen an den Übergängen der einzelnen Gittervolumina. Aus diesem Grund wird das Portal näherungsweise als ebenerdig angesetzt. Die Portalabluft wird wie eine Volumenquelle behandelt und auf den ersten Dekametern in Lee des Portals „verschmiert“. Durch diesen Ansatz wird die Vorverdünnung, die sich in Realität durch die Überlagerung des Abluftstrahls mit der Umgebungsluft ergibt, näherungsweise abgebildet. Allerdings wird damit die komplexe Ausbreitungssituation bei Winden auf das Portal bzw. seitlich zur Rampe im unmittelbaren Nahfeld nur unzureichend genau wiedergegeben.

CFD-Modelle sind bzgl. der Nachbildung des Abluftstrahls sowie der Geländenachbildung mit Tieflage des Portals leistungsstärker. Defizite sind je nach Modell bei diesem Modelltyp eher in der Turbulenzmodellierung der atmosphärischen Turbulenz sowie im Rechenaufwand bei großen Modellgebieten zu sehen.

Eine Alternative stellen Modellierungen im Windkanal dar, bei denen sowohl die Modellumgebung als auch die strömungsmechanischen Feinheiten wie Überlagerung von Strahlerturbulenz und atmosphärischer Turbulenz bestmöglich dargestellt werden können.

Im vorliegenden Fall ist im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße aufgrund der Distanz zum Westportal des Schützenallee-Tunnels mit einem geringen Immissionsbeitrag durch die Portalabluft rechnen, so dass für eine Potenzialabschätzung eine Modellierung, bspw. mit dem Modell MISKAM und dem vorab beschriebenen Ansatz, hinreichend genau ist. Falls die Berechnungen zeigen sollten, dass ein nennenswerter Beitrag zur Gesamtimmissionsbelastung am Messpunkt und ein Minderungspotenzial durch die zu untersuchenden Maßnahmen zu erwarten ist, wäre eine exakte Modellierung in einem Windkanal sachgerecht. Die Entscheidung für ergänzende Windkanaluntersuchungen wird erst nach Bewertung der Ergebnisse dieser Untersuchung erfolgen.

2.2 Gewählte Vorgehensweise für die Bearbeitung

Im Folgenden werden die einzelnen Bearbeitungsschritte erläutert.

2.2.1 Einschätzung der derzeitigen und zukünftigen Situation

Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, den maximal möglichen Immissionsanteil, der an der Luftmessstation Schwarzwaldstraße durch die Tunnelabluft bei Entlüftung über das westliche Portal verursacht wird, für den Bestand (Bezugsjahr 2015) und die Trendjahre 2018, 2020 und 2022 (Nullfälle) zu ermitteln.

Beurteilung der Immissionssituation für den Bestand im Nahbereich des westlichen Tunnelportals auf Basis von Messungen: Für eine erste Einschätzung werden vorliegende Messergebnisse, die in der Vergangenheit im Bereich des westlichen Tunnelportals durchgeführt wurden, in Hinblick auf ihre räumliche Entwicklung im Nahbereich des Portals analysiert. Dies lässt erste Rückschlüsse auf einen möglichen Anteil der Tunnelabluft an den Messergebnissen der Luftmessstation Schwarzwaldstraße zu.

Abschätzung des maximalen Immissionsbeitrags im Bereich der Luftmessstation durch die Tunnelabluft des westlichen Tunnelportals: Für den Bestand (Bezugsjahr 2015) und die Trendjahre 2018, 2020 und 2022 (Nullfälle) werden aus der vor kurzem abgeschlossenen Untersuchung [1] die Verkehrsdaten sowie die daraus berechneten Emissionsmengen für die Tunnelstrecken und für die Straßen des Untersuchungsgebietes übernommen. Anschließend werden zum einen abschätzende Berechnungen mit einem Screening-Modell, zum anderen Berechnungen mit dem Detailmodell MISKAM durchgeführt, um den Immissionsbeitrag, der im Bereich der Luftmessstation durch die Tunnelabluft verursacht wird, zu quantifizieren. Dabei werden die Randbedingungen so gewählt, dass ein konservatives Ergebnis im Sinne einer Maximalabschätzung erzielt wird.

2.2.2 Maßnahme1: NO₂-Reduktion bei optimierter Tunnellüftung

Im Rahmen einer Literaturrecherche werden Tunnelentlüftungssysteme für innerstädtische Straßentunnel diskutiert. Diese werden unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten bzgl.

ihrer Eignung für den Schützenalleetunnel diskutiert.

Für eine als geeignet erscheinende Lüftungsvariante wird die maximale reduzierende Wirkung auf die NO₂-Immissionskonzentration am Ort der Luftmessstation abgeschätzt.

2.2.3 Maßnahme 2: NO₂-Reduzierung durch photokatalytische Materialien

Durch die Beschichtung mit photokatalytischen Materialien kann NO_x an Oberflächen gebunden und damit schlussendlich die NO₂-Immissionskonzentration lokal gemindert werden. Hierzu werden auf Basis einer Literaturrecherche mögliche Minderungspotenziale analysiert und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet. Unter Berücksichtigung der tatsächlichen baulichen und örtlichen Gegebenheiten wird ein mögliches maximales Minderungspotenzial abgeschätzt.

3 Immissionsseitige Einschätzung der derzeitigen Situation bzw. der Trendentwicklung

3.1 Beurteilung der Immissionssituation im Nahbereich des westlichen Tunnelportals auf Basis von Messungen

Um die Frage zu beantworten, ob im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße ein maßgeblicher Anteil des Immissionswertes durch die Tunnelabluft bei vollständiger Ableitung über das Westportal verursacht wird, wurden Messungen, die nach Inbetriebnahme des Tunnels über mehrere Jahre durchgeführt wurden, gesichtet. Die wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert.

3.1.1 Sondierende NO₂ – und Benzolmessungen im Bereich des Schützenalleetunnels in Freiburg aus dem Jahr 2003

Der Planfeststellungsbeschluss zur Änderung der Anschlussstelle Schwarzwaldstraße der B 31 Ost (neu) im Januar 1995 erfolgte mit der Maßgabe, dass an den höchstbelasteten Gebäuden sowohl im Einflussbereich des westlichen als auch des östlichen Tunnelportals fest vorgegebene Schadstoffbelastungswerte tunnelbedingt nicht überschritten werden dürfen. Maßgebend war damals ein NO₂-Immissionsgrenzwert von 80 µg/m³ im Jahresmittel.

Entsprechend dieser Maßgabe sollten nach Inbetriebnahme des Schützenalleetunnels mehrjährige Messungen am jeweils höchstbelasteten Gebäude durchgeführt werden. Um diese Gebäudepunkte zu ermitteln, erfolgten zunächst sondierende Messungen durch die UMEG - Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg - im Bereich des Ost- und Westportals. Die Ergebnisse der sondierenden Messungen für das Ostportal sind in dem Bericht [2] dokumentiert. Auf sie wird im Folgenden nicht näher eingegangen, da sie zur Beantwortung der Frage nach einem möglichen Einfluss der Tunnelportalabluft im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße nicht relevant sind.

Im Rahmen der sondierenden Messungen im Einflussbereich des Westportals wurden an insgesamt 18 Standorten (W1 bis W17) NO₂- und Benzolpassivsammler zur Ermittlung des Ortes der höchsten mittleren Konzentrationen in einer Höhe von 2,5 m installiert. An den Messpunkten W1 bis W6 und W8 wurde zusätzlich in 2,5 m und 4,0 m Höhe gemessen. Die Lage dieser Messpunkte ist in Abb. 3-1 vermerkt.



Abb. 3-1: Lage der Messpunkte im Bereich des Westportals [2].

Um den Ort mit den höchsten Konzentrationsspitzen herauszufinden, wurden an den Messpunkten (WM1 bis WM9, Abb. 3-2) zusätzlich mit kontinuierlich arbeitenden Messgeräten 15-Min-Mittelwerte (sondierende Profilmessungen) erfasst.

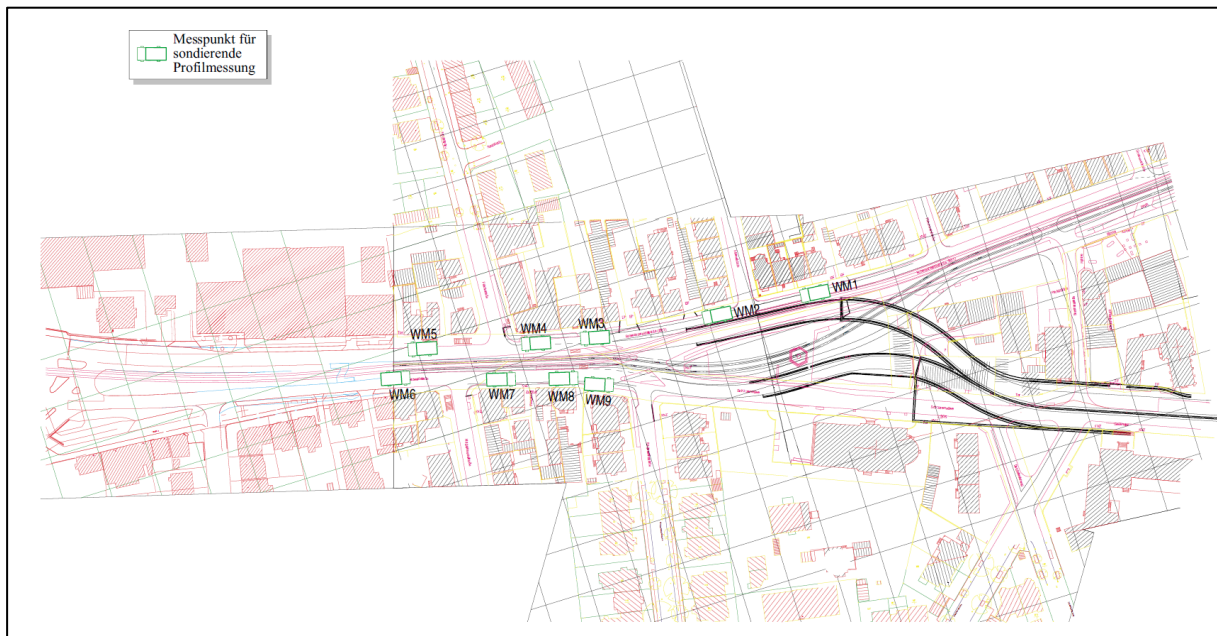


Abb. 3-2: Standorte für Profilmessungen zur Ermittlung der Konzentrationsspitzen [2].

Mit den Messungen wurde nach Inbetriebnahme des Tunnels am 24.10.2002 begonnen.

Die Messungen ergaben insgesamt ein sehr inhomogenes Bild. Bei der Auswertung der mittleren Belastungen und der Konzentrationsspitzen im Bereich des Westportals zeigte sich keine eindeutige Belastungsverteilung für NO_2 . Unmittelbar im Einflussbereich des Tunnelportals wurde eine NO_2 -Konzentration zwischen 44 und 57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen, wobei die Werte auf der Südseite systematisch in allen Entfernungen höher als die Werte auf der Nordseite waren. Eine eindeutige Zuordnung der Immissionsbelastung zur Tunnelabluft wurde auf Basis der Passivsammlermessungen als schwierig erachtet. In dem Bericht wurden die Messpunkte W14 bis W17 – diese liegen ca. 350 bis 400 m westlich des Westportals - als Messpunkte ohne Einfluss der Tunnelluft eingestuft, d.h. nach Einschätzung der damaligen Autoren spiegeln die Messwerte nur den fließenden Verkehr wieder.

Die Profilmessungen, deren Positionen in Abb. 3-2 dargestellt sind, zeigten ein sehr ähnliches Resultat wie die mittleren Belastungsmessungen mit Passivsammlern. Auch diese Messungen ergaben kein einheitliches Bild. Aus diesem Grund wurden über einen begrenzten Zeitraum zusätzlich kontinuierliche Messungen an den Messpunkten W3, W8 und W11 mit automatischen Kleinmessstationen, die die Konzentration zeitlich hochaufgelöst im Halbstundenrhythmus erfassen, durchgeführt. Sie sollten unter anderem auch dazu dienen, den Einfluss unterschiedlicher Betriebsweisen der Tunnellüftung zu bestimmen. Tracergasmessungen mittels SF_6 (Schwefelhexafluorid) dienten zusätzlich der Ermittlung des Anteils der aus dem Tunnel stammenden Abgase. Die erweiterten kontinuierlichen Messungen zeigten die höchsten Konzentrationen am Messpunkt W11 (zwischen den beiden Richtungsfahrbahnen westlich des Westportals). Die weiter entfernt liegenden Messpunkte W3 und W8 zeigten etwas geringere Konzentrationen.

Zusätzlich wurde im Rahmen der sondierenden Messungen überprüft, welche Auswirkungen die Änderung des Lüftungsregimes auf die Immissionskonzentrationen hat. Dazu wurde die Lüftungssteuerung an zwei Tagen mit Hand betrieben und eine Umlenkung der Tunnelabluft aus der Nordröhre in die Südröhre zwischen 0 % und 100 % über die Zwischenwandöffnung realisiert. An den Messpunkten W11, W1, W3 und W8 (s. Abb. 3-1) wurde ausgewertet, welchen Einfluss die unterschiedlichen Lüftungsregimes auf die Gesamtbelastung haben. Um ermitteln zu können, wie sich die Tunnelabluft vom Portal hin zum Messpunkt verdünnt, wurde der Tunnelabluft ein nicht in der normalen Außenluft enthaltenes Tracergas zugesetzt und an den Messpunkten gemessen. Die daraus ableitbare Verdünnungsfunktion wurde auf die realen NO_x -Emissionen, berechnet aus Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung, übertragen und daraus der NO_x -Konzentrationswert am Messpunkt ermittelt. Die folgende Abbildung (Abb. 3-3) zeigt diese gemessenen NO_x -Immissionen vom 25.02.2003 für die Messpunkte W3 und W8

(Gesamtbelastung)¹. Die grüne Kurve zeigt die Variation des Abluftanteils am Westportal. Danach wurde zwischen 9:00 und 19:00 in einem 1-h-Rhythmus die Lüftung ein- und ausgeschaltet. Die rote und die blaue Kurve zeigt die NO_x-Konzentration an den beiden Messpunkten W3 und W8. Dabei folgen die NO_x-Immissionen vor allem dem Tagesgang des Verkehrs und nur zum Teil den Änderungen des Lüftungsregimes. Auch gegenläufige Trends zwischen Portalemission „ja/nein“ (grüne Kurve) und Immissionsbelastung an den Messpunkten W3 (blaue Kurve) sowie W8 (rote Kurve) wurden verzeichnet.

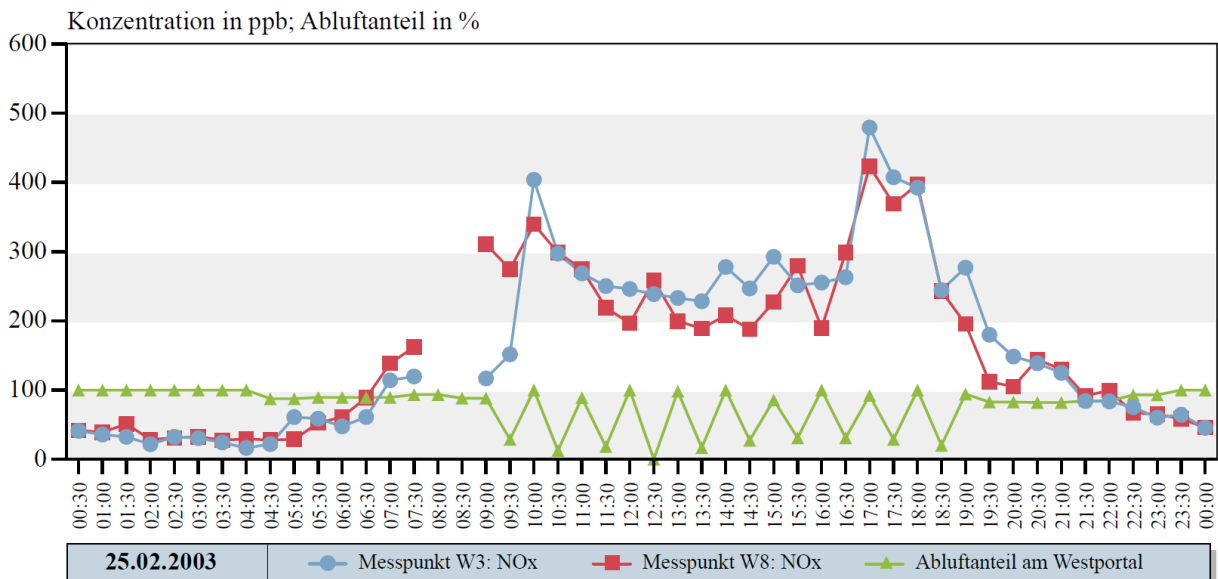


Abb. 3-3: Messungen der Gesamtbelastung am 25.03.2003 an den Messpunkten W3 und W8 [2].

Mit Hilfe der Tracergasmessungen konnte, unter Berücksichtigung der Messung der Gesamtbelastung, der tunnelbedingte Anteil der Immissionen an den Messpunkten ermittelt werden. Die Ergebnisse für den Messpunkt W3 sind in **Abb. 3-4** und für den Messpunkt W8 in **Abb. 3-5** dargestellt. Die blaue Kurve stellt die Immissionsbelastung ohne Tunnelanteil (Sockelbetrag), die rote Kurve die NO_x-Gesamtimmission dar. Die Differenz der beiden Kurven ergibt den durch die Tunnelabluft verursachten Anteil der Immissionen an dem jeweiligen Messpunkt. Ohne Umlenkung der Portalabluft aus der Nordröhre in die Südröhre beträgt der tunnelbedingte NO_x-Anteil 20 bis 30 % an der Gesamtimmissionsbelastung. Bei der damals angestrebten Umlenkung in die Südröhre von 60 % ergibt sich ein tunnelbedingter NO_x-Anteil von 10 bis 15 % an der Gesamtimmissionsbelastung. Im Vergleich zur allgemeinen

¹ Die in **Abb. 3-3** gezeigten NO_x-Konzentrationen sind in ppb angegeben und sind qualitativ zu verstehen. Eine Umrechnung in [µg/m³] ist nicht möglich, da keine weiteren Angaben dazu vorliegen, in welchem Verhältnis NO und NO₂ in dem angegebenen NO_x-Wert enthalten sind.

Verkehrsbelastung in der Schwarzwaldstraße wurde dieser Anteil als gering eingestuft [2]. Es wird darauf hingewiesen, dass sich der Messpunkt W3 etwa 130 m und der Messpunkt W8 etwa 145 m westlich des westlichen Tunnelportals befinden (siehe auch Abb. 3-1). Die Luftmessstation Schwarzwaldstraße liegt dagegen in etwa 340 m westlich des Westportals.

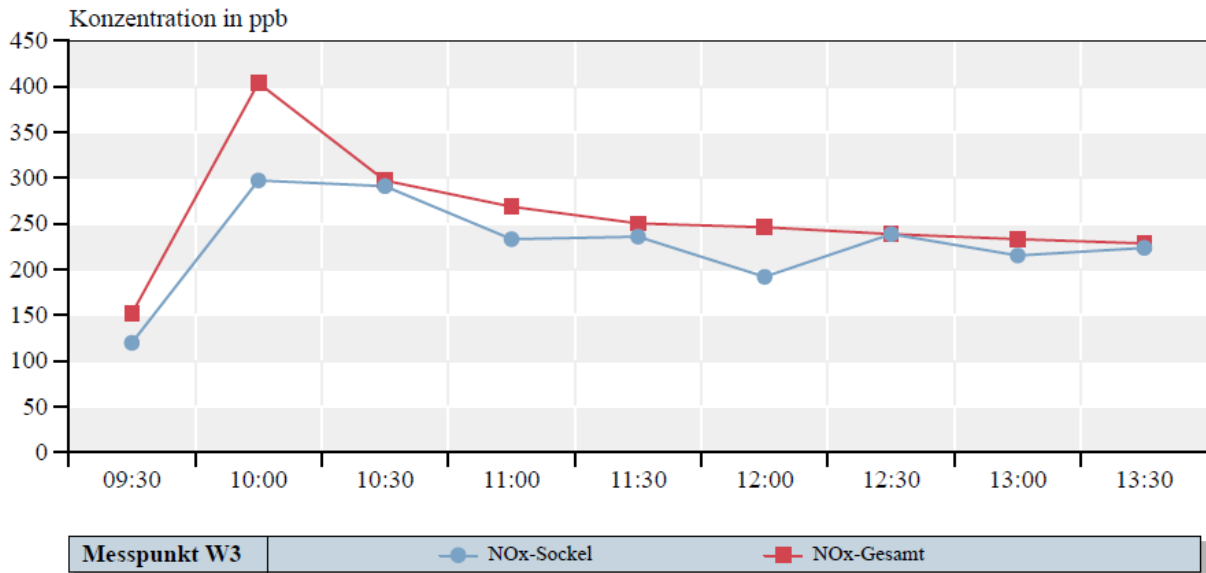


Abb. 3-4: Ergebnisse zum tunnelbedingten NO_x-Anteil am Messpunkt W3 [2].

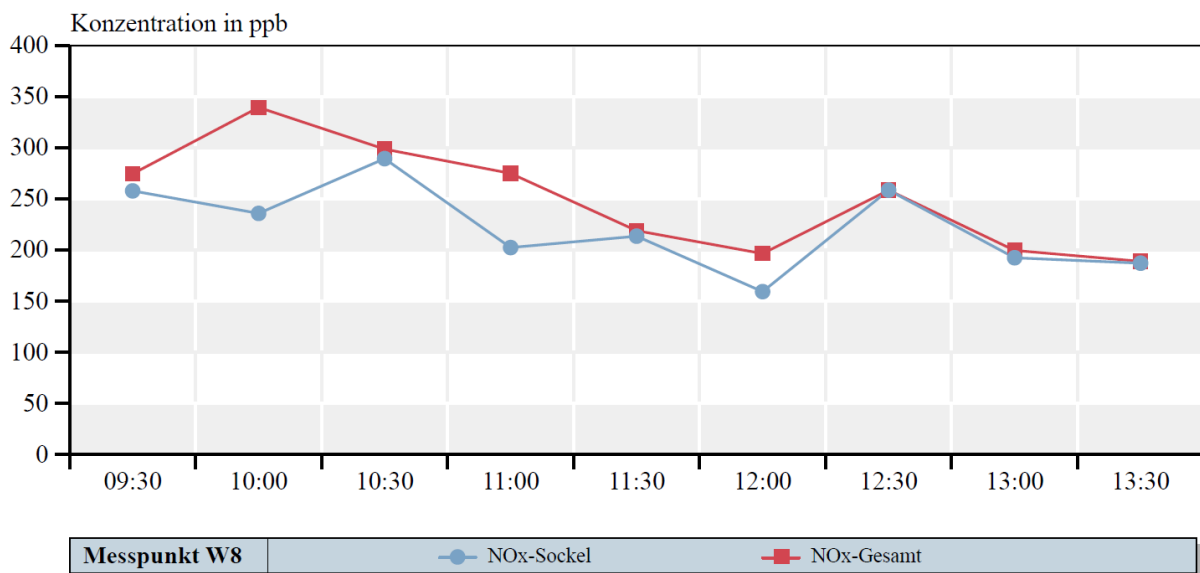


Abb. 3-5: Ergebnisse zum tunnelbedingten NO_x-Anteil am Messpunkt W8 [2].

3.1.2 NO₂-, Ruß- und Benzolmessungen im Bereich der Tunnelportale des Schützenallee-Tunnels in Freiburg Februar 2003 – Mai 2006

Aufgrund der nicht klaren Ergebnisse aus den Sondierungsuntersuchungen wurden im Jahr 2003

weitere Messungen an drei Messstationen durchgeführt [3]. Eine der Messstationen befand sich im direkten Einflussbereich des Westportals vor dem Haus Nr. 69, eine weitere Messstation befand sich im Bereich des Ostportals und die dritte Messstation diente als Referenzmesspunkt für die Hintergrundbelastung und befand sich im Bereich der Betriebsstation des Tunnels. Die Messungen endeten im Jahr 2006.

Wie zu erwarten war die Immissionsbelastung an der Messstation am Westportal deutlich höher als an den beiden anderen Messstationen. Der höchste Jahresmittelwert für NO₂ wurde dort mit 60 µg/m³ gemessen. Der zum Zeitpunkt des Planfeststellungsbeschlusses gültige Grenzwert für das Jahresmittel von NO₂ 80 µg/m³ wurde somit sicher eingehalten.

3.1.3 Vertiefte Betrachtung der lufthygienischen Situation bei Wegfall der Umkehrlüftung und Schließung der Öffnung zwischen Nord- und Südröhre

Die Messungen aus den Jahren 2003 bis 2006 hatten eindeutig ergeben, dass der im Planfeststellungsbeschluss vorgegebene maximale NO₂-Wert von 80 µg/m³ im Jahresmittel an beiden Tunnelportalen eingehalten werden konnte. Aus diesem Grund und aus sicherheitsrelevanten Überlegungen heraus wurde im Jahr 2009 von der Gruner AG ein Rückbau der Mittelwandöffnung zwischen der Nord- und der Südröhre (Aufhebung der Luftumleitung in die Südröhre) geprüft [4]. Dazu wurden Screening-Berechnungen mit dem PC-Berechnungsverfahren MLuS [5] durchgeführt. Dabei wurde ein Belastungsmaximum durch den Einfluss der Tunnelemissionen in einer Entfernung von ca. 45 m Entfernung westlich des Portals ermittelt. Die Abschätzungen mit MLuS in Kombination mit vorliegenden Messergebnissen ergaben, dass die Vorgaben des Planfeststellungsbeschlusses auch bei Abschalten der Umkehrlüftung eingehalten werden können. Zusätzliche Berechnungen mit dem Immissionsmodell ImmProg bestätigten die Ergebnisse, wobei weitere Messungen empfohlen wurden.

3.1.4 Kurzauswertung der Stickstoffdioxidmessungen 2010/2011 bzw. März 2012 an der Messstation Freiburg Tunnel-West

Wie von der Gruner AG empfohlen erfolgten in den Jahren 2010 bis 2012 Messungen am Westportal des Schützenallee-Tunnels, um mögliche Auswirkungen nach Schließung der Mittelwand zu prüfen [6]. Die Lage der Messstation Tunnel-West ist in Abb. 3-6 dargestellt. Sie lag etwa 130 m westlich des Westportals, ähnlich wie Messpunkt W3 (Abb. 3-1).

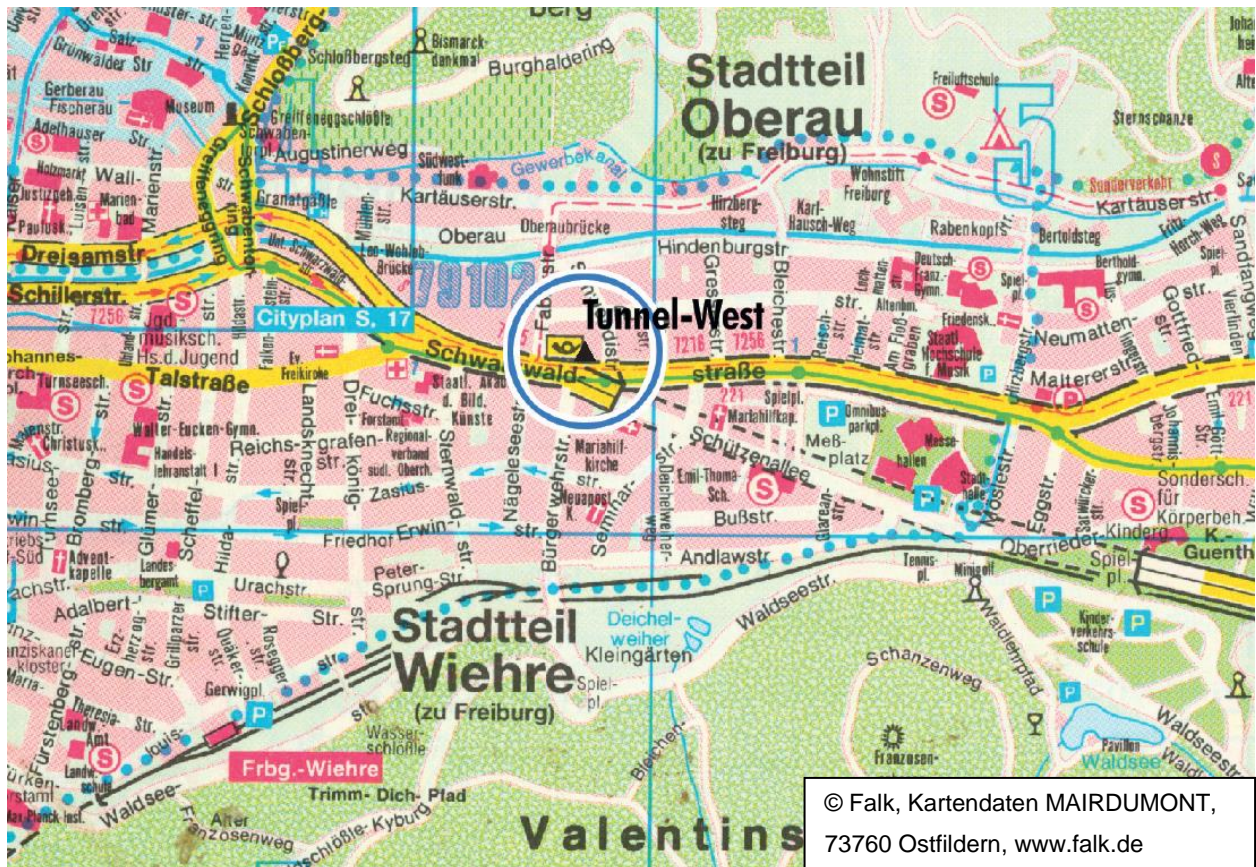


Abb. 3-6: Lage der Messstation Tunnel-West [6].

Dabei wurde zunächst der Status quo ermittelt. Im Anschluss daran erfolgten Messungen bei abgeschalteter Umkehrlüftung und schlussendlich nach Verschluss der Zwischenwand zwischen den beiden Röhren. Die Auswertung der Messungen zeigte einen Anstieg der mittleren NO_2 -Konzentrationen um ca. 8 % an der Messstelle Tunnel-West bei Verschluss der Zwischenwand im Vergleich zum Status quo. Diese geringe Belastungszunahme führte nicht zu einer Überschreitung des im Planfeststellungsbeschluss festgelegten Wertes von $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.1.5 Zusammenfassung

Insgesamt ergaben die sondierenden Messungen kein eindeutiges Bild der Immissionsbelastung im Bereich des Westportals. Zudem konnte auf Basis der Messungen nicht klar abgegrenzt werden, wie weit sich die Tunnelabluf in der Umgebung des Westportals ausbreitet. Der tunnelbedingte Anteil wurde auf Basis der Messungen im Vergleich zur Gesamtbelastung eher als gering eingestuft. Tunnelbedingte Immissionsbelastungen konnten bis in etwa 150 m Entfernung vom westlichen Tunnelportal festgestellt werden. Ein Belastungsmaximum wurde in wenigen Dekametern Entfernung vom westlichen Tunnelportal gemessen.

Messungen bei abgeschalteter Umkehrlüftung und schlussendlich nach Verschluss der Zwischenwand zwischen den beiden Röhren ergaben eine geringe Belastungszunahme der mittleren NO_2 -Konzentrationen um ca. 8 % an der Messstelle Tunnel-West (s. Abb. 3-6) bei

Verschluss der Zwischenwand im Vergleich zum Status quo.

3.2 Abschätzung des maximalen Immissionsbeitrags im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße durch die Tunnelabluft

Zur Abschätzung des maximalen Immissionsbeitrags durch die Tunnelabluft des Westportals im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße wurden zwei unterschiedliche Modellansätze gewählt. Zum einen erfolgt eine grobe Abschätzung mit dem Screeningmodell RLuS [7], zum anderen erfolgt eine Ausbreitungsberechnung mit dem mikroskaligen Ausbreitungsmodell Miskam [8].

3.2.1 Screening-Modell RLuS

RLuS [7] dient der Abschätzung von verkehrsbedingten Schadstoffimmissionen nach den Richtlinien zur Ermittlung der Luftqualität an Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung. Dieses Modell enthält zudem ein Tunnelmodul zur Berücksichtigung des Tunnelabluftstrahls, der sich in Folge der durch den Verkehr im Tunnel induzierten Tunnelluftgeschwindigkeit einstellt.

Unter folgenden Bedingungen ist das Berechnungsverfahren anwendbar:

- Verkehrsstärken über 5 000 Kfz/24 h,
- Innerorts >50 km/h,
- Trogtiefen und Dammhöhen unter 15 m,
- Längsneigung der Straßen bis 6%,
- maximaler Abstand vom Fahrbahnrand 200 m,
- Lücken innerhalb der Randbebauung > 50%,
- Abstände zwischen den Gebäuden und dem Fahrbahnrand ≥ 2 Gebäudehöhen und
- Gebäudebreite ≤ 2 Gebäudehöhen

Um eine Berechnung mit dem Screening-Modell RLuS durchführen zu können, sind Angaben zu den baulichen Abmessungen des Tunnels, dem Verkehrsaufkommen, der Verkehrszusammensetzung (getrennt nach DTV und dem Anteil der schweren Nutzfahrzeuge), der Anzahl der Fahrspuren und dem Tempolimit notwendig.

Folgende Eingangsparameter wurden der Screeningberechnung zugrunde gelegt:

- Prognosejahr 2015
- IO > 50 km/h
- DTV Weströhre 18600 Kfz/d, 8,7% sNFz(Quelle: Bestand aus [1], Abb. 3-4 und 3-5)
- 2-streifig
- Richtungsverkehr
- Portalhöhe 5 m
- Tunnellänge 887,5 m
- Portalbreite 10,5 m

Die Berechnungen mit RLuS berücksichtigen nur eine mittlere Windgeschwindigkeit. Diese wurde aus der für die Miskamberechnungen (s. Kapitel 2 in [1]) verwendeten synthetischen AKS mit 1,6 m/s übernommen. Mit RLuS können die Wände neben den Tunnelportalen nicht berücksichtigt werden.

Aus den oben genannten tunnelspezifischen Eingangsdaten errechnet sich mit RLuS eine Tunnelluftgeschwindigkeit von 1,7 m/s.

Die folgende Abbildung (Abb. 3-7) zeigt die mit RLuS berechnete Abklingkurve unter den oben genannten Bedingungen. Dargestellt ist die Entwicklung der Immissionen in Prozent längs zur Straße bis zu einem Abstand von 400 m vom Portalausgang. Die Belastung direkt am Tunnelportal wurde zu 100 % gesetzt.

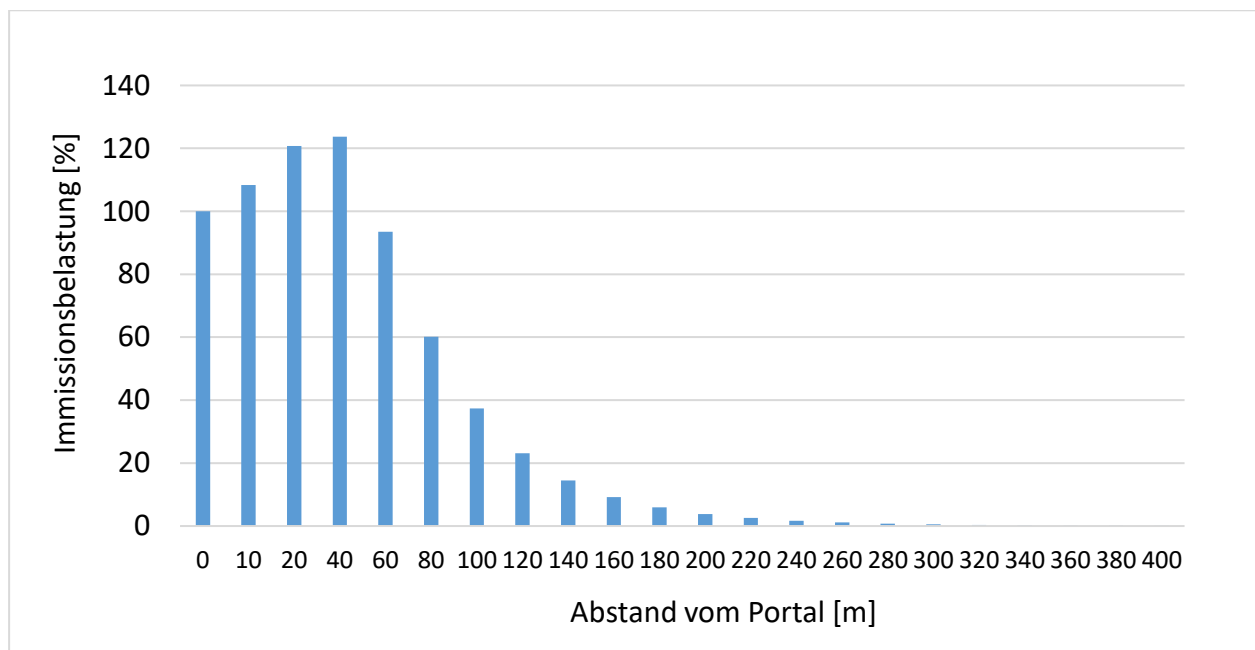


Abb. 3-7: Abklingkurve nach RLuS vom Tunnelportal längs der Straße.

In einem Abstand von ca. 40 m tritt ein Konzentrationsmaximum auf. In 340 m Entfernung vom Westportal – dies entspricht in etwa der Entfernung Tunnelportal – Luftmessstation Schwarzwaldstraße – wird mit RLuS ein NO_x -Wert von unter 1% der Konzentration, die in 40 m Entfernung vom Portal berechnet wird, abgeschätzt. Die Abnahme der Konzentration von Portal bis in die Entfernung der Luftmessstation ist aller Voraussicht nach mit RLuS zu stark ausgeprägt, da keine Randbebauung berücksichtigt werden kann, die die Luftschadstoffverdünnung im Straßenraum eher reduziert würde. Trotzdem gibt diese Abschätzung Hinweise darauf, dass im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße die Tunnelabluft der Weströhre einen eher geringen Beitrag liefert.

3.2.2 Mikroskalige Ausbreitungsberechnung MISKAM

Auf Basis der Messungen, die in Kapitel 3.1 analysiert wurden, kann keine eindeutige Aussage getroffen werden, wie groß der Anteil der Tunnelabluft im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße unter realen Bedingungen tatsächlich ist. In einigen Messberichten wurde der Bereich der Luftmessstation als unbeeinflusst von der Tunnelabluft, die über das Westportal abgegeben wird, eingestuft.

Die Abschätzung der Immissionsbelastung durch die Tunnelabluft mit dem Screening-Verfahren RLuS ergab Hinweise darauf, dass im Bereich der Luftmessstation die Tunnelabluft der Weströhre einen nur geringen Beitrag liefert.

Für eine genauere Analyse der im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße zu erwartenden Immissionsbelastung durch die Tunnelabluft wurden deshalb mikroskalige Modellrechnungen mit dem Modell MISKAM durchgeführt. Das Modell sowie die Randbedingungen, die den Modellrechnungen zugrunde gelegt wurden, sind ausführlich in dem Gutachten „Luftreinhalteplan Freiburg – Gutachten im Rahmen der 3. Fortschreibung“ [1] beschrieben und werden hier übernommen.

Der Tunnelabluftstrahl kann modelltechnisch nicht vorgegeben werden. Die sehr komplexe Überlagerung des Tunneljets, verursacht durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge und/oder die Längslüftung, mit den meteorologischen Verhältnissen im Bereich des Tunnelportals wird deshalb vereinfacht abgebildet, indem die Tunnelemissionen über 80 m im Bereich der Rampe über eine abklingende E-Funktion verteilt werden. Untersuchungen aus Windkanälen zeigen, dass mit diesem Emissionsansatz die Immissionskonzentrationen in größerer Entfernung vom Portal – die Luftmessstation Schwarzwaldstraße liegt ca. 340 m westlich des Portals - gut wiedergegeben werden können. Dieser Sachverhalt wurde bereits in Kapitel 2.1 ausführlich diskutiert.

Die Ausbreitungsrechnungen wurden einmal mit und einmal ohne Tunnelportalabluft durchgeführt. Berechnet wurde jeweils die NO₂-Gesamtbelastung unter Berücksichtigung der Hintergrundbelastung, wie in [1] beschrieben. In Abb. 3-8 sind die im Bereich der Luftmessstation berechneten NO₂-Jahresmittelwerte der Gesamtbelastung für folgende Fälle dargestellt:

- Bestand 2015
- Bestand 2018
 - ohne Öffnung Kronenbrücke
- Nullfall 2020
 - mit Öffnung Kronenbrücke
- Nullfall 2022
 - mit Öffnung Kronenbrücke

Die Immissionskonzentrationen sind in der Höhe des Messfühlers (3,0 m ü.G.) sowie in 1,5 m ü.G. angegeben. Die absoluten und prozentualen Minderungen sind zusätzlich in Tab. 3-1 zusammengestellt.

Abb. 3-8 und Tab. 3-1 zeigen, dass im Bezugsjahr 2015 (Bestand) die Immissionskonzentration unter der Maßgabe, dass eine Ableitung der Tunnelabluft über das Westportal komplett unterbunden werden kann, der berechnete NO₂-Jahresmittelwert in Höhe des Messfühlers an der Luftmessstation von 56,5 µg/m³ auf 53 µg/m³ (-6,3%) reduziert wird, in 1,5 m Höhe von 59,7 µg/m³ auf 56,1 µg/m³ (-6,1%).

Im Jahr 2018 (Fall Bestand 2018) liegen die Minderungen bei 2,8 µg/m³ (-6%) in 3 m Höhe bzw. 2,9 µg/m³ (5,8%) in 1,5 m Höhe. Der Grenzwert wird in beiden Höhen sowohl mit als auch ohne Portalabluft noch überschritten.

Im Jahr 2020 könnte ohne weitere Maßnahme (Nullfall 2020) und ohne eine Abluftableitung über das Westportal im Bereich des Messfühlers der Grenzwert in Messfühlerhöhe (3 m) bereits knapp eingehalten werden. In 1,5 m Höhe liegt der Wert mit 41,5 µg/m³ noch darüber. Im Jahr 2022 liegen die berechneten Immissionskonzentrationen ohne weitere Maßnahme (Nullfall 2022) sowohl mit als auch ohne Portalabluft in beiden Höhen unterhalb des Grenzwertes.

Tab. 3-1: Mögliche Minderung der jahresmittleren NO₂-Immissionskonzentrationen bei vollständiger Unterbindung der Ableitung der Tunnelabluft über das Westportal.

	Minderung NO ₂ - Gesamtbelastung in 3,0m ü.G. [µg/m ³]	Minderung NO ₂ - Gesamtbelastung in 3,0m ü.G. [%]	Minderung NO ₂ - Gesamtbelastung in 1,5m ü.G. [µg/m ³]	Minderung NO ₂ - Gesamtbelastung in 1,5m ü.G. [%]
Bestand 2015	-3,5	6,3%	-3,6	6,1%
Bestand 2018	-2,8	6,0%	-2,9	5,8%
Nullfall 2020	-2,3	5,4%	-2,3	5,3%
Nullfall 2022	-1,9	5,0%	-1,9	4,9%

3.2.3 Zusammenfassung

Die Screening-Berechnungen haben Hinweise darauf gegeben, dass im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße die Tunnelabluft der Weströhre nur einen geringen Beitrag liefert. Die MISKAM-Ergebnisse im Bereich der Luftmessstation weisen einen höheren Anteil der Tunnelabluft im Bereich der Luftmessstation aus, was mit der deutlich detaillierteren und realitätsnäheren Modellierung erklärt werden kann. Die sondierenden Messungen im Jahre 2003 (Kapitel 3.1.1) ergaben, dass ca. 350 bis 400 m vom Portal entfernt kein Einfluss der Tunnelluft vorhanden ist, d.h. die Messwerte spiegeln nur den fließenden Verkehr wieder. Weitere detailliertere Messungen ergaben deutlich höhere Anteile der Portalabluft an Messpunkten in unmittelbarer Nähe zum Westportal, erlauben jedoch keine belastbare Aussage über den Anteil der Portalabluft im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße.

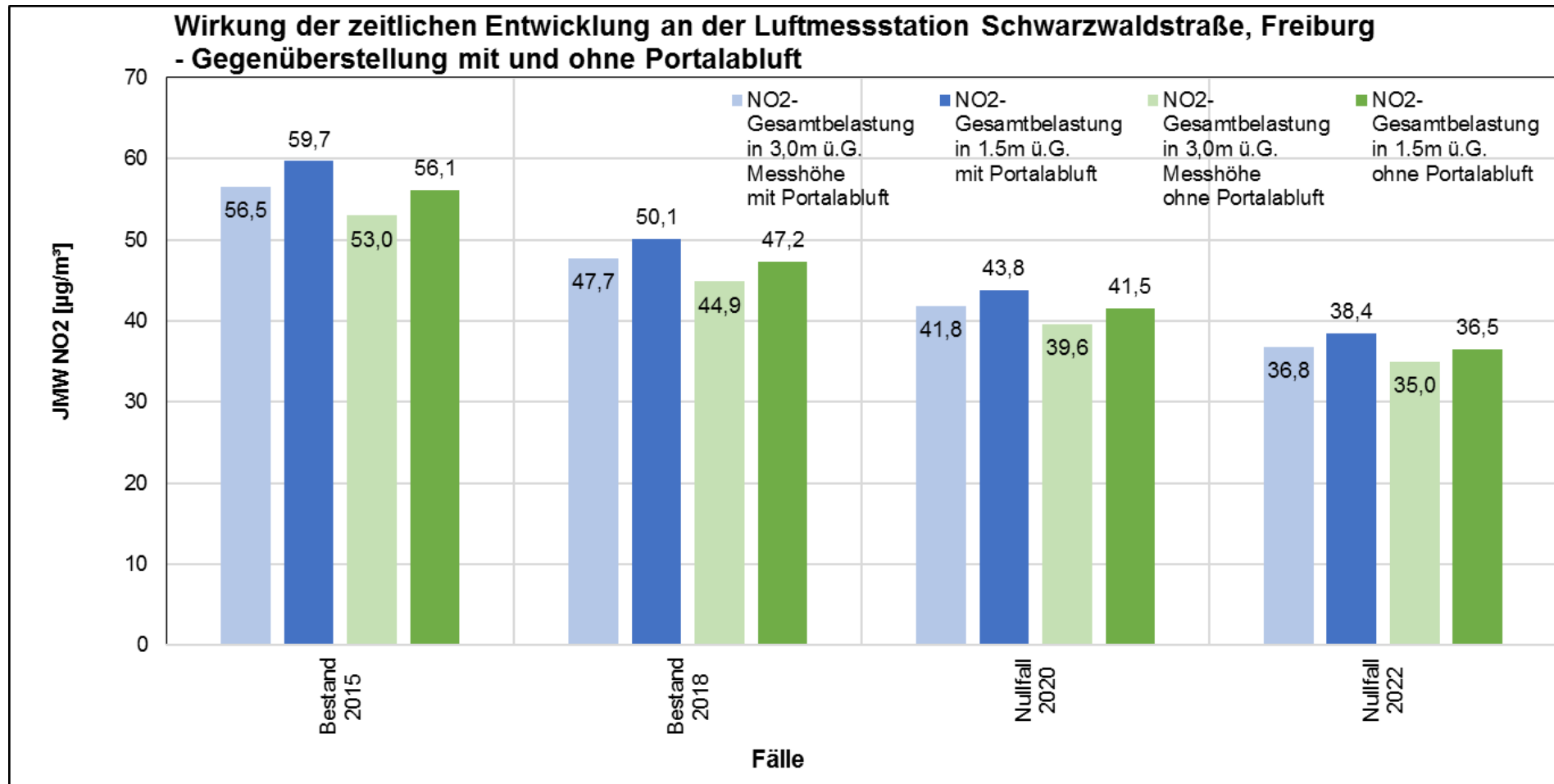


Abb. 3-8: An der Luftmessstation mit MISKAM berechnete Immissionskonzentrationen mit und ohne Portalabluft.

4 Maßnahme NO₂-Reduktion bei optimierter Tunnellüftung

4.1 Beschreibung des Lüftungssystems des Schützenalleetunnels

Der Schützenalleetunnel ist seit dem Jahr 2002 in Betrieb und besteht aus einer Nord- und einer Südröhre, die im Richtungsverkehr mit jeweils zwei Fahrspuren betrieben werden. Die Südröhre hat eine Länge von 804 m, die Nordröhre von 887 m. Im Osten schließt sich an die Nordröhre eine ca. 275 m lange Galeriestrecke an, die in Richtung Südröhre geöffnet ist. Beide Röhren waren zunächst durch eine in der Nähe des Westportals gelegene Mittelwandöffnung baulich und aerodynamisch miteinander verbunden. Im Jahr 2010 wurde die Mittelwandöffnung in der Nähe des Westportals aus Brandschutzgründen verschlossen. Damit waren die beiden Tunnelröhren vollständig baulich und aerodynamisch voneinander getrennt.

Der Schützenalleetunnel ist mit einem mechanischen Lüftungssystem aus 24 reversierbaren Stahlventilatoren mit einem Laufraddurchmesser von 630 mm und einer Ausblasgeschwindigkeit von 33,7 m/s in Fahrtrichtung ausgestattet. Die Stahlventilatoren sind paarweise in 6 Stahlventilatorgruppen im Bereich von Ventilatornischen an der Tunnelwand bzw. -decke angebracht. Die mechanischen Lüftungssysteme beider Tunnelröhren werden in Abhängigkeit der gemessenen Sichttrübung und CO-Werte getrennt gesteuert. In Abhängigkeit dieser Messwerte wird eine entsprechende Anzahl von Stahlventilatoren in Betrieb genommen.

Im Normalbetrieb, bei fließendem Verkehr und nicht zu hoher Verkehrsdichte, erfolgt die Belüftung natürlich, induziert durch die Kolbenwirkung infolge des Verkehrs, durch Temperaturunterschiede und Winddruckunterschiede an den Portalen.

Neben der derzeit im Schützenalleetunnel realisierten Längslüftung gibt es alternative Zu- und Abluftsysteme, die üblicherweise in innerstädtischen Straßentunneln realisiert sind, und zwar die Abluftabsaugung ohne Zuluftzuführung, die Halbquerlüftung und die Querlüftung.

Die folgende Abb. 4-1 zeigt schematisch ein Lüftungssystem mit Abluftabsaugung ohne zusätzliche Zuluftzuführung. Hierbei erfolgt eine Absaugung der belasteten Luft über einen oberhalb der Tunnelröhre befindlichen Abluftkanal. Dieser wird über steuerbare Abluftklappen im Kanal reguliert. In Abhängigkeit der Tunnellänge führen eine entsprechende Anzahl von Kaminen die Abluft aus dem Kanal in die Umgebung ab [9].

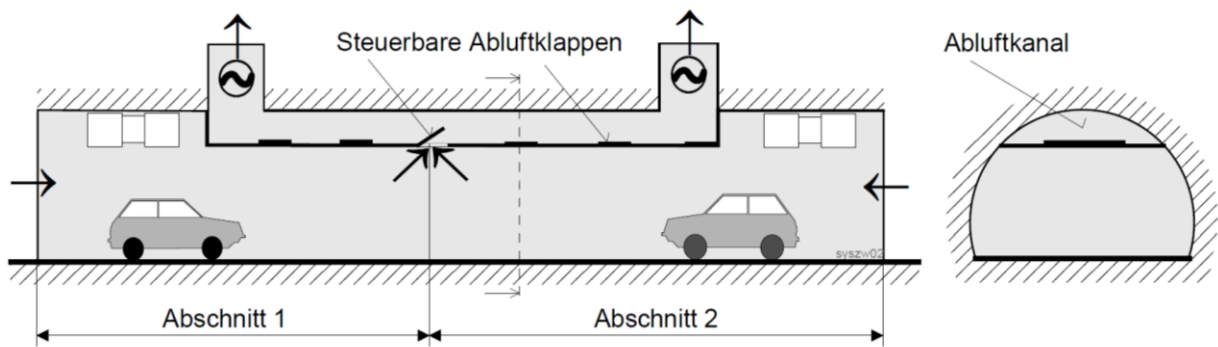


Abb. 4-1: Lüftungssystem mit Abluftabsaugung ohne zusätzliche Zuluft [9].

Bei Lüftungssystemen mit Absaugung und Zuluft sind ein Zuluft- und ein Abluftkanal erforderlich. Die Zuluft wird bei zunehmender Schadstoffkonzentration über einen separaten Kanal über die Tunnellänge auf Straßenniveau kontinuierlich eingebracht. Der Abluftkanal befindet sich wie der Zuluftkanal oberhalb der Tunnelröhre und ist über steuerbare Abluftklappen mit der Tunnelröhre verbunden. Bei der so genannten Halbquerlüftung wird die mit Abgasen belastete Luft bei geschlossenen Abluftklappen über die Tunnelportale abgeführt. Bei der so genannten Querlüftung wird zusätzlich über teilweise geöffnete Abluftklappen Abluft aus dem Fahrraum abgesaugt [9], wie in Abb. 4-2 dargestellt.

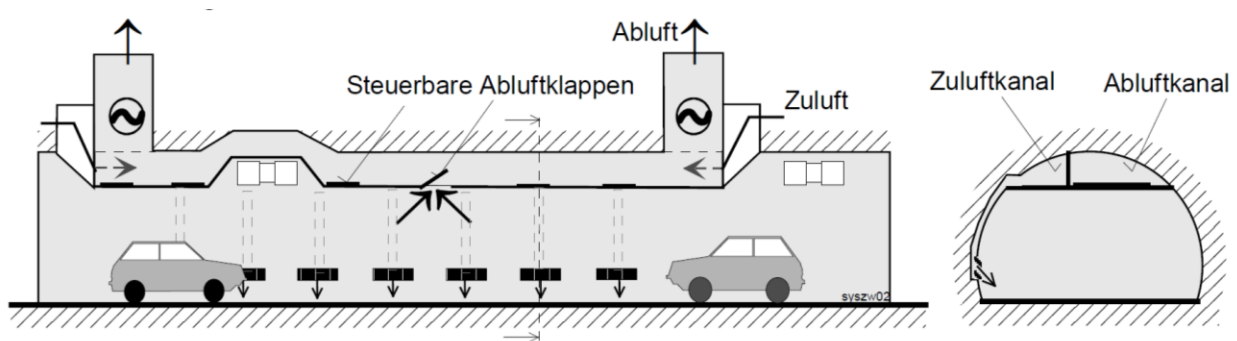


Abb. 4-2: Lüftungssystem „Querlüftung“ mit Absaugung und Zuluft [9].

Aus lüftungstechnischen Gründen wurde im Zuge der damaligen Genehmigung eine Längslüftung, wie oben beschrieben, als ausreichend erachtet. Ein Lüftungssystem mit zusätzlicher Frischluftzufuhr und ggf. zusätzlicher Abluftabsaugung ist aus rein lüftungstechnischen Gründen für den Tunnel nicht notwendig. Allerdings würde durch eine Frischluftzufuhr über die Tunnellänge eine kontinuierliche Vorverdünnung der Tunnelabluft und durch die Abluftabsaugung eine Minderung der über das Portal ausgeblasenen Tunnelabluftkonzentration erzielt werden können.

Eine nachträgliche Realisierung einer Halbquer- bzw. Querlüftung mit den dafür notwendigen Zu- und/oder Abluftkanälen oberhalb des Fahrraumes sowie den Abluftbauwerken ist nach unserer Einschätzung technisch im Nachhinein nicht realisierbar und scheidet aus Kostengründen aus.

4.2 Darstellung der für den Schützenalleetunnel geeigneten Lüftungsvariante

Messungen haben ergeben, dass bei Schließung der Mittelwandöffnung die Immissionskonzentrationen im Nahbereich des westlichen Tunnelportals ansteigen. Diese Erhöhung führt jedoch nicht zu einer Überschreitung der $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aus dem Planfeststellungsbeschluss, dürften aber an dem Ort mit höchster Immissionsbelastung lokal oberhalb der derzeit gültigen Grenzwerte der 39. BImSchV [10] liegen. Aus brandschutztechnischen Gründen wurde diese Mittelwandöffnung geschlossen. Dabei wurden Risiken und Kosten gegenüber der erzielbaren Minderung bei geöffneter Mittelwand gegeneinander abgewogen.

Eine alternative Möglichkeit, die Immissionskonzentrationen am Westportals des Tunnels zu reduzieren, wäre eine Absaugung der Tunnelluft über ein Lüftungsbauwerk im Bereich des Tunnelausgangs (Westportal). Schematisch könnte diese Lüftungsvariante wie in Abb. 4-3 dargestellt aussehen. Die verkehrsinduzierte Kolbenwirkung sowie die installierte Längslüftung würden wie bisher die Lüftung des Tunnelraums sicherstellen. Durch das Lüftungsbauwerk (Abluftventilator mit Abluftkamin) kurz vor dem Westportal würde die Schadstoffbelastungen im Nahfeld des Ausfahrtportals verringert werden.

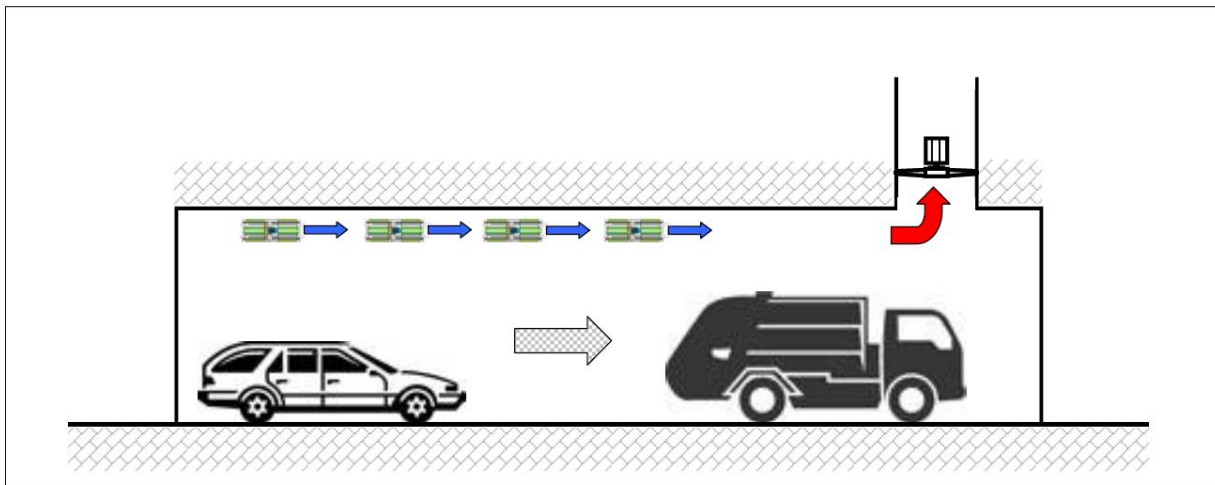


Abb. 4-3: Längslüftung mit Portalabsaugung [10].

4.3 Abschätzung der Wirksamkeit der möglichen Lüftungsvariante „Absaugung“

Durch ein Abluftbauwerk kurz vor dem Westportal dürfte eine ähnliche Reduktion der NO_x -Konzentration erzielbar sein wie durch die Öffnung der Mittelwand mit Umlenkung der Abluft der nördlichen Tunnelröhre in die südliche Tunnelröhre. Auf Grund gutachtlicher Erfahrung und unter

Wertung der gesichteten Unterlagen gehen wir für die weitere Abschätzung im Rahmen dieses Gutachtens von einer maximal möglichen NO_x-Minderung von 50 % im Bereich des Westportals aus.

5 Maßnahme NO₂-Reduzierung durch katalytische Materialien

5.1 Beschreibung der Wirkungsweise der katalytischen Beschichtung

Die Luftqualität ist insbesondere in urbanen Ballungsgebieten durch Feinstaub, Stickoxide (NO_x) und flüchtige organische Verbindungen (VOC) belastet. Vor allem im Bereich stark frequentierter innerstädtischer Hauptverkehrsstraßen werden Stickoxide als Verbrennungsprodukte emittiert mit der Folge, dass die NO₂-Grenzwerte häufig überschritten werden. Mögliche Maßnahmen zur Senkung der NO_x-Emissionen und damit auch NO₂-Immissionen sind zum einen eine Verbesserung der Fahrzeugflotte hin zu schadstoffärmeren Fahrzeugen, zum anderen verkehrslenkende und verkehrsvermeidende Maßnahmen an so genannten Hot Spots. Daneben werden auch so genannte technische Maßnahmen diskutiert wie z.B. die Verwendung photokatalytischer Materialien. Bei der Photokatalyse werden Stickoxide durch die natürliche, auf die Oberflächen einwirkende UV-Strahlung zu wasserlöslichem Nitrat oxidiert. Das entstandene Nitrat wird dann durch Regenwasser ausgewaschen. Als Photokatalysator eignen sich z. B. mit Titandioxid beschichtete Oberflächen.

Die Wirksamkeit der photokatalytischen Oxidation von Stickoxiden zu Nitrat ist im Rahmen von Laboruntersuchungen unter definierten Randbedingungen nachgewiesen worden. Eine Überprüfung dieser Wirksamkeit in Feldversuchen bzw. eine Realisierung in der praktischen Anwendung ist allerdings ausgesprochen schwierig. Dies ist vor allem den vielen weiteren Einflussfaktoren, wie Verkehrsaufkommen, meteorologischen Parametern aber auch Ausbreitungsbedingungen vor Ort zuzuschreiben.

Die Ergebnisse einiger Untersuchungen zu diesem Thema, die in den letzten Jahren im Rahmen von Labor- und Feldversuchen durchgeführt wurden, werden im Folgenden vorgestellt.

5.2 Überblick über den Einsatz von Titandioxid (TiO₂)

5.2.1 Einsatz von TiO₂ im Bereich von Straßen

Das PICADA-Projekt [12] hatte es sich zum Ziel gesetzt, unterschiedliche innovative Baustoffe wie Putz, Mörtel, Baubeton oder Anstriche, die Titandioxid (TiO₂) enthalten, zu entwickeln und deren Wirksamkeit zur Reduzierung von NO₂ zu untersuchen. Unter anderem wurde die Wirksamkeit dieser Baustoffe in einem Straßencanyon, der auf einem Versuchsgelände aus Containern aufgebaut wurde, getestet. Die Containerflächen wurden mit TiO₂ behandelt. Ein Motor diente als NO_x-Quelle. Neben der Messung der NO_x-Immissionsbelastung wurden auch meteorologische Daten aufgenommen. Die Untersuchung fand in den Monaten Juli bis September 2004 statt, in Monaten mit hoher Sonneneinstrahlung. Aus dem Vergleich der NO_x-Belastung im Canyon mit und ohne TiO₂-behandelten Containeroberflächen konnte eine Minderung der NO_x-Konzentration von 40 bis 80 % erreicht werden [13] [12]. Allerdings war die

gewählte Geometrie (Canyonhöhe zu -breite) im Versuch eher untypisch für reale Verhältnisse. Das Verhältnis von photokatalytisch aktiver Fläche zu Bezugsvolumen lag in den Versuchen bei $0,8 \text{ m}^{-1}$, wobei dieses Verhältnis für reale Straßenschluchten eher im Bereich von $0,1 \text{ m}^{-1}$ liegt

Eine Untersuchung des Fraunhofer Institut IME hat sich im Projekt „Saubere Luft durch Pflastersteine“ zum Ziel gesetzt, neuartige Pflastersteine und ihre Wirksamkeit für typisch deutsche Verhältnisse bzgl. der Lichtintensität und Sonnenscheindauer zu prüfen. Dabei wurden Pflastersteine mit höchster photokatalytischer Effizienz entwickelt (AirClean®) und in einem eigens dafür angelegten Straßencanyon getestet. Im Messzeitraum konnte eine NO_x -Reduktion von 20 bis 30 % bei wechselnden Wind- und Helligkeitsverhältnissen [14] [15] nachgewiesen werden. Auch hier war das Verhältnis von photokatalytisch aktiver Fläche zum Bezugsvolumen mit $0,33 \text{ m}^{-1}$ höher als üblicherweise in der Realität.

Messungen am Gothaer Platz in Erfurt, der bereits mit dem Pflasterstein AirClean® belegt wurde, ergaben in drei Metern Höhe eine durchschnittliche Reduktion von 20 % NO_x im Vergleich zu einer 300 m entfernten Luftmessstation der THLUG [15].

Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat im Kolloquium „Luftreinhaltung durch Photokatalyse“ Anwendungsmöglichkeiten und erste Ergebnisse der Pilotstudie zur Photokatalyse an Straßenbauwerken vorgestellt. Dabei ging es um Feldversuche an der A1 in Niedersachsen, die ein Verkehrsaufkommen von ca. 57.000 Kfz/Tag aufweist. Der untersuchte Streckenabschnitt befand sich zwischen der Anschlussstelle Osnabrück-Nord und der Anschlussstelle Osnabrück-Hafen. Dort wurde eine beschichtete und eine unbeschichtete Lärmschutzwand von jeweils 1 km Länge und 5 m Höhe auf beiden Seiten der Straße realisiert. Die beschichtete Oberfläche wurde durch eine gewellte Oberfläche vergrößert und erreichte eine Fläche von ca. 30.000 m^2 . Es erfolgten Messungen an der Autobahn jeweils im Bereich der Beschichtung und in einem Bereich ohne Beschichtung. Vorabmodellierungen gingen von Minderungen im Bereich von etwa 3 % bis 7 % unter Idealbedingungen aus. Die Auswertung der Messungen gestaltete sich recht schwierig, da die Messungen vielfältigen Einflüssen ausgesetzt waren. Zudem waren die geometrischen und baulichen Verhältnisse im Bereich der beschichteten bzw. unbeschichteten Lärmschutzwand unterschiedlich, was eine vergleichende Auswertung zusätzlich erschwerte. Realistisch ergaben sich NO_2 -Minderungen, bezogen auf die Gesamtbelastung, im unteren einstelligen Prozentbereich [16].

In der italienischen Stadt Bergamo auf der Via Borgo Pallazo in Italien wurde im Jahr 2006 über eine Länge von 500 m ein photokatalytisch wirksames Pflaster mit einer Gesamtfläche von 7.250 m^2 verlegt. Gemessen wurde in 1,6 m Höhe über dem beschichteten Belag und an einem Referenzpunkt in einen Bereich ohne Beschichtung. Zudem wurden meteorologische Parameter und die Verkehrszahlen erfasst. Die Ergebnisse der Messperiode im November 2006 sind in Abb. 5-1 dargestellt.

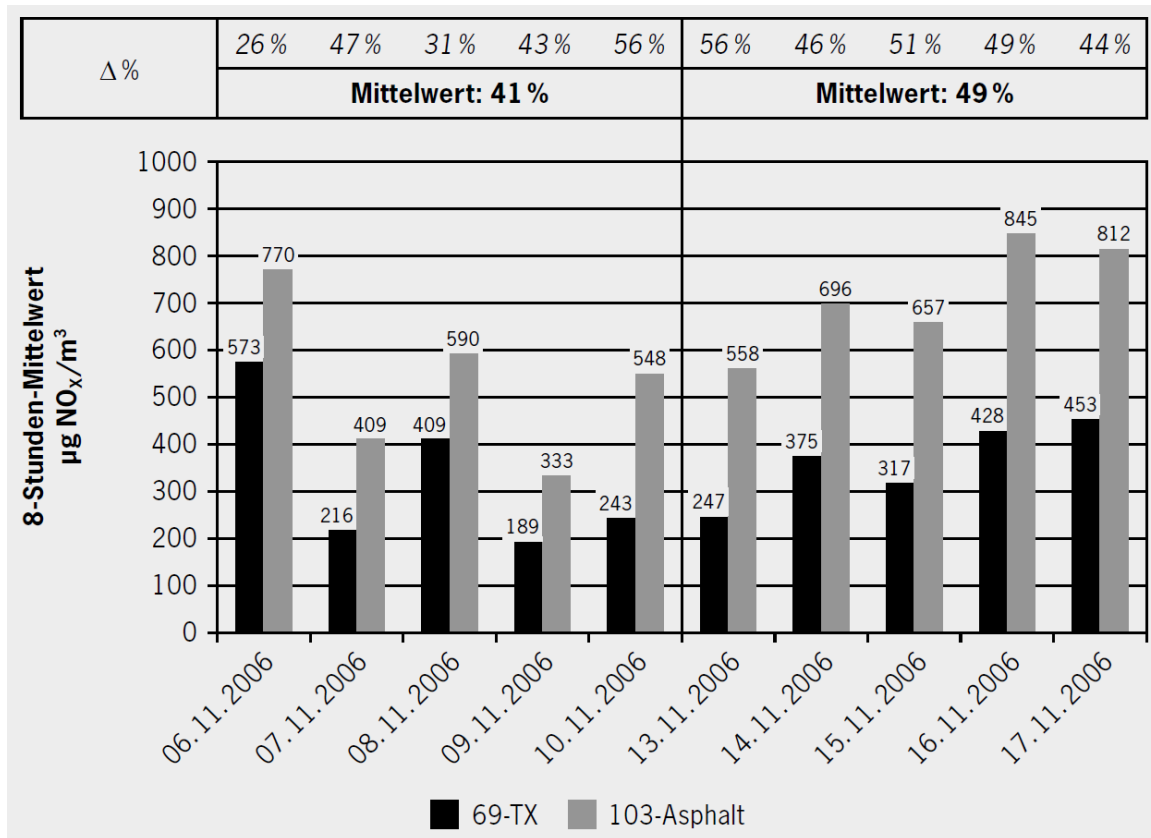


Abb. 5-1: Gemessene 8h NO_x-Mittelwerte (09:00 bis 17:00Uhr) im Bereich mit (69-TX) und ohne (103 Asphalt) Beschichtung [16].

Bei diesen Messungen wurde mit im Mittel 44% tagsüber eine vergleichsweise hohe NO_x-Reduzierung im Bereich mit aktiver photokatalytischer Beschichtung gegenüber dem Referenzpunkt ermittelt.

An zwei Straßen in den Niederlanden (A1 in Terschuur und A28 in Putten) wurden TiO₂ Beschichtungen auf Lärmschutzwände aufgetragen. Neben den Stickoxiden wurden auch meteorologische Komponenten gemessen. Bei diesen Untersuchungen herrschten ungünstige meteorologische Bedingungen. Messtechnisch konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nahezu keine Verminderung der NO_x-Konzentration festgestellt werden [18].

Im Rahmen einer Straßensanierungsmaßnahme an der Petersberger Straße in Fulda wurden die Gehwege über eine Länge von 500 m mit TiO₂-beschichtetem Straßenpflaster ausgelegt. Das Verkehrsaufkommen war mit 24.000 bis 30.000 Fahrzeugen pro Tag recht hoch. Die Untersuchungen wurden vom Hessischen Landesamt für Geologie und Umwelt durchgeführt. Es wurden drei Messpunkte (zwei innerhalb und einer als Referenzmesspunkt außerhalb des beschichteten Bereiches) festgelegt. Auch hier war eine Auswertung der Messergebnisse ausgesprochen schwierig. Die Mittelwertbetrachtungen lassen eine Wirkung der TiO₂-Beschichtung bzgl. der NO₂-Belastung erwarten; eine detaillierte Betrachtung der zeitlichen

Verläufe der Einzelmessungen zeigten dagegen keine signifikanten Effekte, die eindeutig der Beschichtung zuzuschreiben waren [19].

Unter Laborbedingungen mit klar definierten Randbedingungen kann eine Reduktion von Stickoxiden gut nachgewiesen werden, wie eingangs in Kapitel 5.1 bereits erwähnt. Dagegen ist der Nachweis im Feldversuch wegen der nicht konstanten Randbedingungen meist schwierig. Eine Möglichkeit, verlässlichere Aussagen für die praktische Anwendung ableiten zu können, ist die Simulation von Labor- und Freilandexperimenten mit numerischen Modellen.

Das Ingenieurbüro Lohmeyer hat eine derartige Simulation mit dem prognostischen, dreidimensionalen, mikroskaligen Modell Miskam durchgeführt. Die notwendige Abbaugeschwindigkeit, mit der der Umwandlungs- und Depositionsprozess durch die Beschichtung näherungsweise abgebildet werden kann, wurde dabei aus Laboruntersuchungen abgeleitet. Zur Modellvalidierung wurde eine Ausbreitungsberechnung für einen realen Feldversuch (Italien / Bergamo) durchgeführt. Mit Hilfe der so kalibrierten Modellvorgaben wurden dann Minderungspotentiale für einfache Straßenschluchtgeometrien berechnet. Eine Beispielanwendung für die Hohenheimer Straße in Stuttgart zeigt Abb. 5-2. Unter optimierten Bedingungen (Tagsituation mit Windgeschwindigkeiten unter 1 m/s und UVA-Strahlungsintensität von mehr als 15 W/m²) hat sich hier ein maximales Minderungspotential der NO_x-Gesamtbelastung von 15 % ergeben [19] [20].

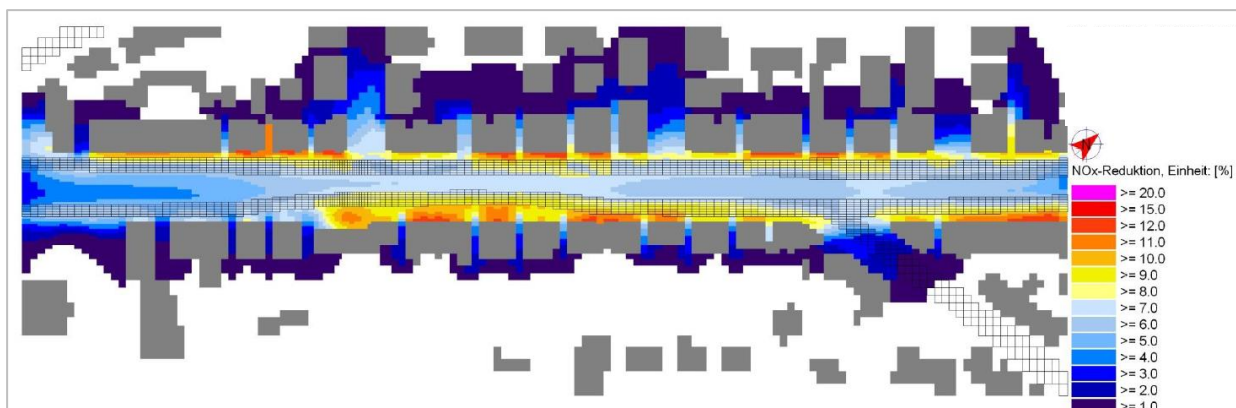


Abb. 5-2: Prozentuale Minderung der NO_x-Gesamtbelastung an der Hohenheimer Straße

Fazit: Ein Nachweis der Wirksamkeit von photokatalytisch beschichteten Materialien im realen Feldversuch ist oft schwierig, da meteorologische Parameter und Ausbreitungsbedingungen, die zum einen die NO_x-Belastung, zum anderen aber auch den photokatalytischen Abbau beeinflussen, stark schwanken. Es ist somit schwierig, den „reinen“ Effekt der Photokatalyse herauszuarbeiten.

Untersuchungen an Straßen führen meist zu sehr heterogenen Ergebnissen. Zum Teil werden hohe Minderungseffekte festgestellt. Aber es gibt auch eine Vielzahl an Untersuchungen, die nur

geringe oder keine Minderungseffekte aufzeigen.

Als besonders schwierig stellt sich die Wertung der in den Projekten angegebenen Minderungseffekte dar, da oft unklar ist, worauf sich die ausgewiesenen Ergebnisse beziehen. Manches Mal sind Werte ausgewiesen, die während der Tagzeiten (also unter Sonneneinstrahlung) ermittelt wurden; in einigen Versuchen sind Tagesmittelwerte ausgewiesen, d.h. unter Einbeziehung der nicht wirksamen Nachtstunden. Manches Mal sind Maximalwerte ausgewiesen, wobei oft nicht klar wird, ob diese bei optimaler Bestrahlung ermittelt wurden. Des Weiteren werden manches Mal NO_x -Minderungen, manches Mal NO_2 -Minderungen ausgewiesen.

5.2.2 Einsatz von TiO_2 im Bereich von Tunneln

Neben Feldversuchen an stark befahrenen Straßen wurden auch Untersuchungen im Bereich von Tunneln durchgeführt. Im Folgenden werden einige Feldversuche und ihre Ergebnisse vorgestellt.

Über das EU-Programm LIFE+ geförderte Projekt PhotoPAQ fand von Juni 2011 bis Januar 2013 eine umfangreiche, dreistufige Messkampagne im Leopold-II-Tunnel in Brüssel statt. Der Tunnel weist ein Verkehrsaufkommen von bis zu 65.000 Kfz/Tag auf und stellt eine wichtige Zufahrt ins Zentrum von Brüssel dar. Zur Verbesserung der Luftqualität wurde in der zum Stadtzentrum führenden Tunnelröhre eine photokatalytische Zementbeschichtung mit TiO_2 an den Seitenwänden auf einer Länge von 70 m und an der Decke der Tunnelröhre auf einer Länge von 160 Metern angebracht. Die Aktivierung erfolgte durch ein extra installiertes UV-Lampensystem. Im Ergebnis der mehrwöchigen Messkampagne lag die Minderung von Stickoxiden (NO_x) unter den statistischen Unsicherheiten des Experimentes von zwei Prozent. Als eine Ursache der geringen Wirksamkeit wurde die starke Verschmutzung des Tunnels und damit eine nur schwach aktive Oberfläche gesehen. Zudem lag die Beleuchtungsstärke mit nur knapp zwei Watt UV-A-Strahlung pro Quadratmeter unter dem angestrebten Wert von vier Watt pro Quadratmeter. Ein anderer zusätzlicher negativer Effekt war die hohe Windgeschwindigkeit von bis zu fünf Metern pro Sekunde innerhalb des Tunnels, die die Kontaktzeit zwischen den Schadstoffen und der photokatalytisch beschichteten Tunneloberfläche begrenzte [22].

Ein ganz aktuelles Projekt führen derzeit die Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, EUROVIA und die BAST am Krohnenstiegtunnel in Hamburg durch. Hier wird im Rahmen von Feldversuchen die photokatalytische Wirksamkeit des NOXEPUR® Materials getestet. Der NOXEPUR®-Belag (Asphaltträgergestützte Zementmörtel) wurde auf der Fahrbahn außerhalb des Tunnelportals (Ausfahrtstrog der Nordröhre) über eine Strecke von 175 m aufgebracht. Messtechnisch begleitet wurde der Feldversuch zum einen durch Passivsammlermessungen und Höhenprofilmessungen über 26 Wochen im Bereich des Belags sowie 50 m entfernt, zum anderen durch kontinuierliche

Messungen. Die Ergebnisse waren ernüchternd. Es wurden lediglich NO_2 -Minderungen von maximal 0,4 % ermittelt [16]. In der Veröffentlichung fehlen Angaben über den Zeitraum der Messungen.

Eine weitere Untersuchung zur Reduzierung von NO_x im Bereich von Tunneln ist ein derzeit von der BAST gefördertes Projekt mit dem Titel „Hauptstudie zur Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen“ (FE 09.0184/2011/ARB). Das Projekt hat eine Laufzeit bis 2018. Ziel ist die Erarbeitung von technischen Lösungen zur Stickoxidreduktion an einem Tunnelstandort. Dabei sollen abgeschlossene photokatalytische Reaktoren (sog. Tunnelkassetten) konstruiert, gebaut und im realen Tunnel validiert werden. Der Praxistest für die Tunnelkassetten soll im Tunnel „Rudower Höhe“ an der BAB A 113 in Berlin durchgeführt werden. Die erste Phase des Projektes ist abgeschlossen. In dieser Phase wurde ein geschlossenes System (Kassette/Reaktor) entwickelt, in das mit NO_x verunreinigte Luft gesaugt und dort photokatalytisch gereinigt wird. Die Tunnelkassetten weisen eine große photokatalytisch aktive Oberfläche und eine hohe Strahlungsintensität auf. Die folgende Abbildung Abb. 5-3 zeigt die Tunnelkassette schematisch [21].

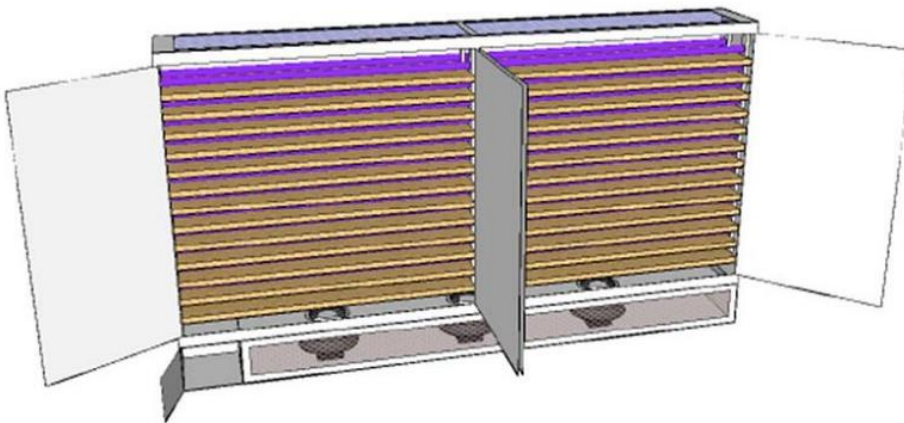
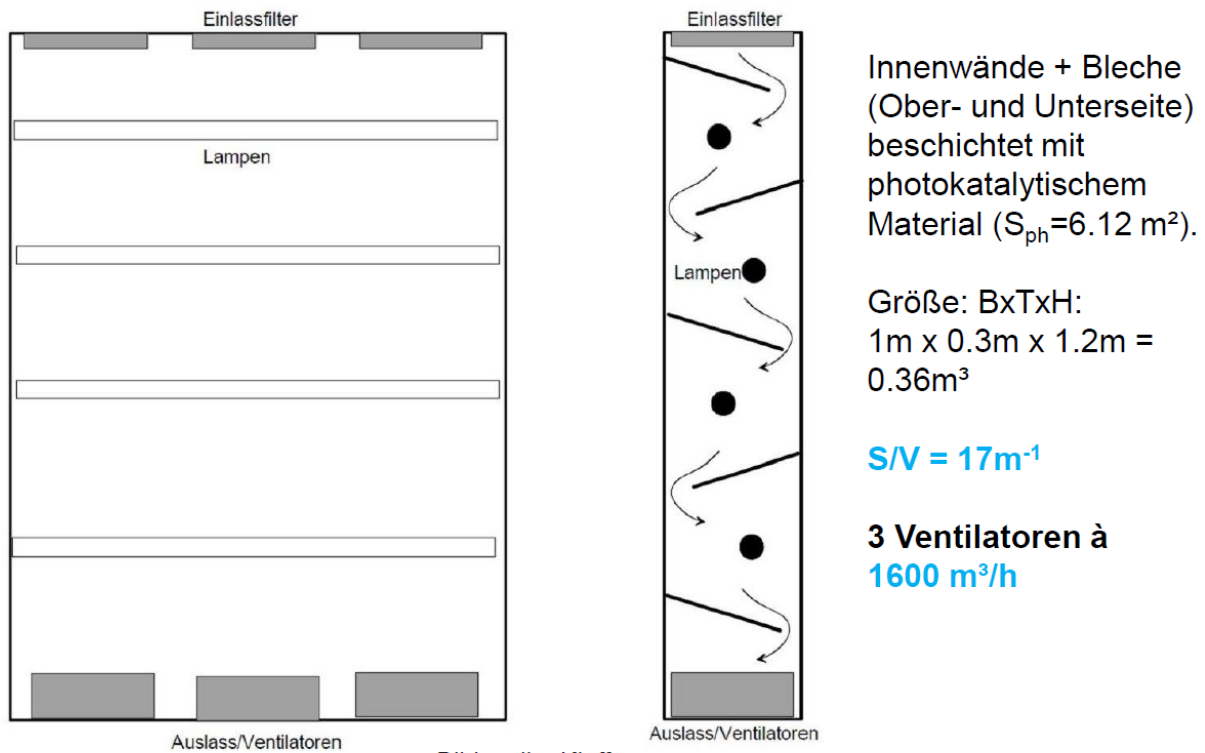


Abb. 5-3: Schematisches Aussehen der entwickelten Tunnelkassette [20].

Sie besteht aus 2 x 13 photokatalytisch beschichteten Schaumstoffen (in braun), 2 x 2 x 13 UV-Lampen (in lila) und Ventilatoren zur Ansaugung der Tunnelluft. Die Anordnung der Schaumstoffmatten und der UV-Lampen ist schematisch in Abb. 5-4 dargestellt. Eine Tunnelkassette hat ein Gewicht von 190 bis 240 kg und ist ca. 3 m breit und 1,7 m hoch.



Bildquelle: Kleffmann

Abb. 5-4: Schematische Vorder- und Seitenansicht des Realisierungsvorschlages für die Kasette [23] [21].

Es wird derzeit davon ausgegangen, dass mit 100 Tunnelkassetten eine NO_x -Minderung von 15 % erzielt werden kann [21]. In der folgenden Phase 2 des Projektes sollen nun in einem Feldversuch 10 Tunnelkassetten gebaut und getestet werden.

Fazit: Die hier aufgeführten Untersuchungen zur Wirksamkeit von photokatalytisch beschichteten Wänden bzw. Straßenbelägen im Tunnel oder außerhalb des Tunnels im Portalbereich haben keine signifikante Verbesserung der NO_2 -Belastung zur Folge gehabt. Vor allem im Tunnel war eine mögliche Ursache die starke Verschmutzung des Tunnels und damit eine Schwächung bzw. Deaktivierung der katalytisch wirksamen Oberfläche. Zudem konnte die notwendige Beleuchtungsstärke in der Praxis nicht realisiert werden. Und schließlich war die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel teilweise zu hoch für eine optimale Wirksamkeit des Katalysators. Die Untersuchungen zu Tunnelkassetten als weitere technische Möglichkeit zur Optimierung der Photokatalyse sind noch nicht abgeschlossen. Belastbare Ergebnisse hierzu liegen deshalb noch nicht vor.

5.3 Prüfung der Einsatzmöglichkeiten für den Schützenalleetunnel in Freiburg

Die Wirksamkeit photokatalytisch beschichteter Straßenbeläge und Wände im Bereich von Tunneln oder Lärmschutzwänden hat bei bisher durchgeführten Feldversuchen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen geführt.

Die Wirksamkeit hängt vor allem von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen sowie einer Reihe technischer Randbedingungen ab.

So muss eine möglichst große photokatalytisch beschichtete Oberfläche hergestellt werden. Hier besteht die Möglichkeit, die Straßenoberfläche im Anschluss an das Tunnelportal und / oder die Tunnelwände mit photokatalytischem Material zu beschichten. Dabei kann ggf. durch Waben- oder Wellenstrukturen eine Vergrößerung der photokatalytisch aktiven Flächen im Bereich der Tunnelwände erzielt werden.

Bei einer Beschichtung innerhalb des Tunnels muss, da in Tunnelbauwerken kein natürliches Licht vorhanden ist, für eine wirksame Photokatalyse eine UV-Lichtquelle im Tunnel installiert werden. Die Lichtquelle sollte in einem Wellenlängenbereich unter 400 nm liegen und eine UV-Intensität von mehr als 10 W/m² aufweisen. Diese Bedingungen sollten für den gesamten photokatalytisch beschichteten Bereich gewährleistet sein.

Ein wichtiger Parameter für eine optimale Wirksamkeit einer photokatalytischen Beschichtung ist schließlich eine möglichst hohe Kontakt- bzw. Reaktionszeit zwischen belasteter Luft und photokatalytisch beschichteter Oberfläche. Ein eher geringer Tunnelquerschnitt und eine bidirektionale Verkehrsführung beeinflussen die Wirksamkeit positiv, da das Oberflächen- / Volumenverhältnis verbessert und die Strömungsturbulenz durch eine bidirektionale Verkehrsführung erhöht werden.

Der Schützenalleetunnel besteht aus zwei voneinander getrennten Tunnelröhren, die jeweils einen Querschnitt von ca. 52 m² aufweisen. Durch die richtungsgetrennte Verkehrsführung ergibt sich durch die Kolbenwirkung bei kontinuierlichem Verkehrsfluss eine verkehrsinduzierte Tunnelluftgeschwindigkeit von mindestens etwa 1,7 m/s. Damit liegt die Tunnelluftgeschwindigkeit im Normalbetrieb eher über den für die Photokatalyse als optimal angesehenen Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 1 m/s.

Die Nordröhre hat eine Länge von 887,5 m, eine Höhe von 5 m und eine Breite von 10,5 m. Daraus ergibt sich bei Beschichtung der beiden Seitenwände ein Verhältnis von aktiver Fläche S zu Bezugsvolumen von 0,19 m⁻¹. Dieses Verhältnis liegt im unteren Bereich der in den Feldversuchen umgesetzten Verhältnisse. Besser wäre ein größeres Verhältnis zur Optimierung der Wirksamkeit der Photokatalyse.

Die in dem Schützenalleetunnel gegebenen Randbedingungen (Querschnitt, Strömungsgeschwindigkeit, Turbulenz) sind somit nicht optimal zur Erzielung einer hohen Wirksamkeit durch eine TiO₂-Beschichtung.

Die sich derzeit noch in der Entwicklungsphase befindlichen Tunnelkassetten stellen eine weitere Möglichkeit dar, die NO_x-Emissionen und damit die NO₂-Konzentration zu senken. Man geht unter optimalen Bedingungen bei etwa 100 installierten Tunnelkassetten von einer NO_x-

Minderung von 15 % aus. Praktische Erfahrungen stehen hier allerdings noch aus. Die Kosten und der Installationsaufwand für Tunnelkassetten ist aller Voraussicht nach eher als hoch einzustufen.

5.4 Abschätzung der Wirksamkeit photokatalytisch wirksamer Oberflächen

Die Erkenntnisse zur Wirksamkeit photokatalytisch beschichteter Oberflächen in Straßentunneln bzw. im Nahbereich von Tunnelportalen zur Minderung der NO₂-Belastungen in der Luft sind sehr inhomogen, wie in den vorstehenden Kapiteln diskutiert wurde. Unter äußerst optimalen Bedingungen kann ggf. eine 20 -prozentige Minderung der NO₂-Belastung erzielt werden. Für die weitere Abschätzung im Rahmen dieses Gutachtens gehen wir von dieser NO₂-Minderung im Bereich des Westportals aus.

6 Ergebnis der Untersuchung für die Maßnahmen „optimierte Tunnellüftung“ (Maßnahme 1) und „katalytische Materialien“ (Maßnahme 2)

6.1 Maßnahme NO₂-Minderung bei optimierter Tunnellüftung

Beide Röhren des Schützenalleetunnels waren ursprünglich durch eine in der Nähe des Westportals gelegene Mittelwandöffnung baulich und aerodynamisch miteinander verbunden. Damit sollte ein Teil der Abluft der Nordröhre in die Südröhre umgelenkt und anschließend über das Ostportal abgeleitet werden. Eine erhöhte Belastung im Bereich der Bebauung am Westportal sollte somit verhindert werden. Gefordert wurden im Zuge der Planfeststellung, dass 60% der Tunnelabluft der Nordröhre über die Südröhre abgeleitet werden, was, eine optimale Durchmischung der Tunnelabluft vorausgesetzt, einer 60%igen NO_x-Minderung des Abluftmassenstroms, der über das Portal abgeleitet würde, entspräche. Die Öffnung wurde aus brandschutztechnischen Gründen später wieder geschlossen. Alternative Lüftungssysteme mit dem Ziel, die Portalabluft, die über das Westportal abgeleitet wird, zu verringern, würden eine komplette Umgestaltung des Tunnels nach sich ziehen und sind nach unserer Einschätzung sowohl baulich als auch finanziell fast nicht zu realisieren. Die einzige Alternative könnte die gezielte Abluftabsaugung über ein Abluftbauwerk, das im Bereich des Westportals installiert werden müsste, sein.

Geht man im Sinne einer Abschätzung des maximalen Minderungspotenzials davon aus, dass über eine Absaugung oder Umlenkung entsprechend der damals avisierten Planung eine NO_x-Minderung von etwa 50% erzielbar wäre, so wäre eine Minderung der NO₂-Gesamtbelastung im Bereich der Luftmessstation für das Analysejahr 2015 von maximal etwa 1,7 µg/m³ auf 54,8 µg/m³ in 3 m über Grund (Höhe Messfühler) bzw. um 1,8 µg/m³ auf 57,9 µg/m³ in 1,5 m Höhe über Grund möglich (s. Abb. 3-8). Dies entspricht in etwa, wenn auch nicht ganz wegen der Nichtlinearität infolge der Ozonchemie bei Umwandlung von NO_x in NO₂, der Hälfte der Differenz der Immissionskonzentrationen für den Fall mit Tunnelportalabluft (100%) bzw. ohne Tunnelportalabluft (0%). Für den Bestand 2018 sowie die Nullfälle 2020 und 2022 ergeben sich entsprechend Immissionskonzentrationen zwischen der Situation mit Tunnelportalabluft und ohne Tunnelportalabluft. Sie sind in Tab. 6-1 zusammengestellt.

Tab. 6-1: Jahresmittlere NO₂-Immissionskonzentrationen an der Luftmessstation Schwarzwaldstraße bei Annahme eines maximalen NO_x-Minderungspotenzials von 50% durch eine optimierte Tunnellüftung.

	NO ₂ - Gesamtbelastung in 3,0m ü.G. mit Portalabluft [µg/m ³]	NO ₂ - Gesamtbelastung in 3,0m ü.G. mit optimierter Tunnellüftung [µg/m ³]	Minderung NO ₂ - Gesamtbelastung in 1,5m ü.G. mit Portalabluft [µg/m ³]	NO ₂ - Gesamtbelastung in 1,5m ü.G. mit optimierter Tunnellüftung [µg/m ³]
Bestand 2015	56,5	54,7	59,7	57,9
Bestand 2018	47,7	46,3	50,1	48,7
Nullfall 2020	41,8	40,7	43,8	42,7
Nullfall 2022	36,8	35,9	38,4	37,5

6.2 Maßnahme NO₂-Minderung durch katalytische Materialien

Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden die Möglichkeiten einer NO_x- bzw. NO₂-Minderung durch die Photokatalyse analysiert. Im Tunnelbereich gibt es im Wesentlichen drei Möglichkeiten, und zwar Aufbringung einer Katalysatorbeschichtung (bspw. TiO₂) im Bereich der Rampe und/oder der seitlichen Begrenzungswände im Rampenbereich, die Beschichtung innerhalb des Tunnels im Bereich des Westportals sowie den Einbau von Kassetten zur Photokatalyse im Tunnel im Bereich des Westportals. Die in der Praxis nachgewiesenen Minderungspotentiale weisen eine enorme Schwankungsbreite auf. Die Aufbringung einer Katalysatorbeschichtung innerhalb des Tunnels hatte meist kaum nachweisbare Effekte auf die NO₂-Konzentration. Effektiver scheint die Methode mit Kassetten zu sein. Hier wird von einer NO_x-Minderung im Bereich von 15 % ausgegangen. Allerdings ist diese Technik noch in der Erprobung und in jedem Fall kostenintensiv und auch technisch sehr aufwändig.

Im Maximalfall kann ggf. durch eine Kombination beider Methoden eine NO_x-Minderung von etwa 20 % in der Tunnelabluft erzielt werden. Dies führt insgesamt zu einer Minderung der NO₂-Belastung an der Luftmessstation von 0,7 µg/m³ im Analysefall auf 55,8 µg/m³ in 3 m über Grund (Höhe Messfühler) bzw. um 0,6 µg/m³ auf 59,1 µg/m³ in 1,5 m Höhe über Grund. Für den Bestand 2018 sowie die Nullfälle 2020 und 2022 ergeben sich entsprechende Minderungen der Immissionskonzentrationen, die allerdings absolut gesehen geringer sind als die genannten Minderungen für das Analysejahr 2015. Sie sind in Tab. 6-2 zusammengestellt.

Tab. 6-2: Jahresmittlere NO₂-Immissionskonzentrationen an der Luftmessstation Schwarzwaldstraße bei Annahme einer maximal wirksamen NO_x-Minderung von 20% durch photokatalytisch wirksame Materialien.

	NO ₂ - Gesamtbelastung in 3,0m ü.G. mit Portalabluft [µg/m ³]	NO ₂ - Gesamtbelastung in 3,0m ü.G. mit katalytischer Wirkung [µg/m ³]	Minderung NO ₂ - Gesamtbelastung in 1,5m ü.G. mit Portalabluft [µg/m ³]	NO ₂ - Gesamtbelastung in 1,5m ü.G. mit katalytischer Wirkung [µg/m ³]
Bestand 2015	56,5	55,8	59,7	59,0
Bestand 2018	47,7	47,1	50,1	49,6
Nullfall 2020	41,8	41,4	43,8	43,4
Nullfall 2022	36,8	36,5	38,4	38,0

6.3 Spannbreite der Immissionskonzentrationen im Bereich der Luftmessstation für die Planfälle des Gutachtens 2.1 mit / ohne Tunnelabluft

In den Abbildungen Abb. 6-1 und Abb. 6-2 sind für alle Planfälle, die im Rahmen des abgeschlossenen Gutachtens (IBRau, 2017 [1]) untersucht wurden, die Jahresmittelwerte der NO₂-Immissionskonzentrationen an der Luftmessstation Schwarzwaldstraße jeweils für den Fall „100% Portalabluft über das Westportal“ bzw. „0% Portalabluft über das Westportal“ getrennt für 1,5 m Höhe über Grund (Abb. 6-1) und 3 m über Grund (Höhe des Messfühlers; Abb. 6-2) dargestellt. Wie in den beiden vorstehenden Kapiteln ausgeführt würden sich die Minderungen durch jede der beiden Maßnahmen getrennt bzw. eine Kombination der beiden Maßnahmen in diesem Rahmen bewegen. Eine genaue Quantifizierung ist aus den vorab diskutierten Gründen nicht möglich.

In Planfall 1 (Maßnahme Pförtnerung, Optimierung LSA-Steuerung und Tempolimit) wird im Jahr 2020 bei Ableitung der Tunnelabluft über das Portal in Höhe des Messfühlers der Grenzwerte bei berechneten 39,6 µg/m³ gerade eingehalten, in 1,5 m über Grund mit 41,4 g/m³ überschritten. Wenn keine Tunnelabluft über das Portal abgeleitet werden würde (0%), würde für den Planfall 1 der Grenzwert im Jahr 2020 mit 39,4 µg/m³ in 1,5 m über Grund bereits knapp eingehalten, in Höhe des Messfühlers sicher eingehalten. Mit den beiden im Rahmen dieses Gutachtens untersuchten Maßnahmen (keine additive Betrachtung der Maßnahmen!) ist im Jahr 2020 bei Umsetzung des Planfalls 1 in 1,5 m Höhe eine Unterschreitung des Grenzwertes aller Wahrscheinlichkeit nach nicht gegeben.

Bei Planfall 2 (Maßnahme Optimierung LSA-Steuerung und Tempolimit) ist in 1,5 m Höhe sowohl bei Maßnahme „optimierte Tunnellüftung“ als auch „katalytische Materialien“ im Jahr 2020 noch keine Einhaltung des Grenzwertes sichergestellt. In Höhe des Messfühlers dürfte die Maßnahme „optimierte Tunnellüftung“ zu einer Grenzwerteinhaltung führen, die Maßnahme „katalytische Materialien“ wahrscheinlich noch nicht.

Für den Planfall 3 (Einbezug B31 in grüne Umweltzone) reichen die im Rahmen dieses Gutachtens untersuchten Maßnahmen nicht aus, um im Jahr 2020 in 1,5 m über Grund bereits eine Einhaltung des Grenzwertes zu gewährleisten. Allerdings ist in Höhe des Messfühlers bei beiden Maßnahmen von der Einhaltung des Grenzwertes auszugehen.

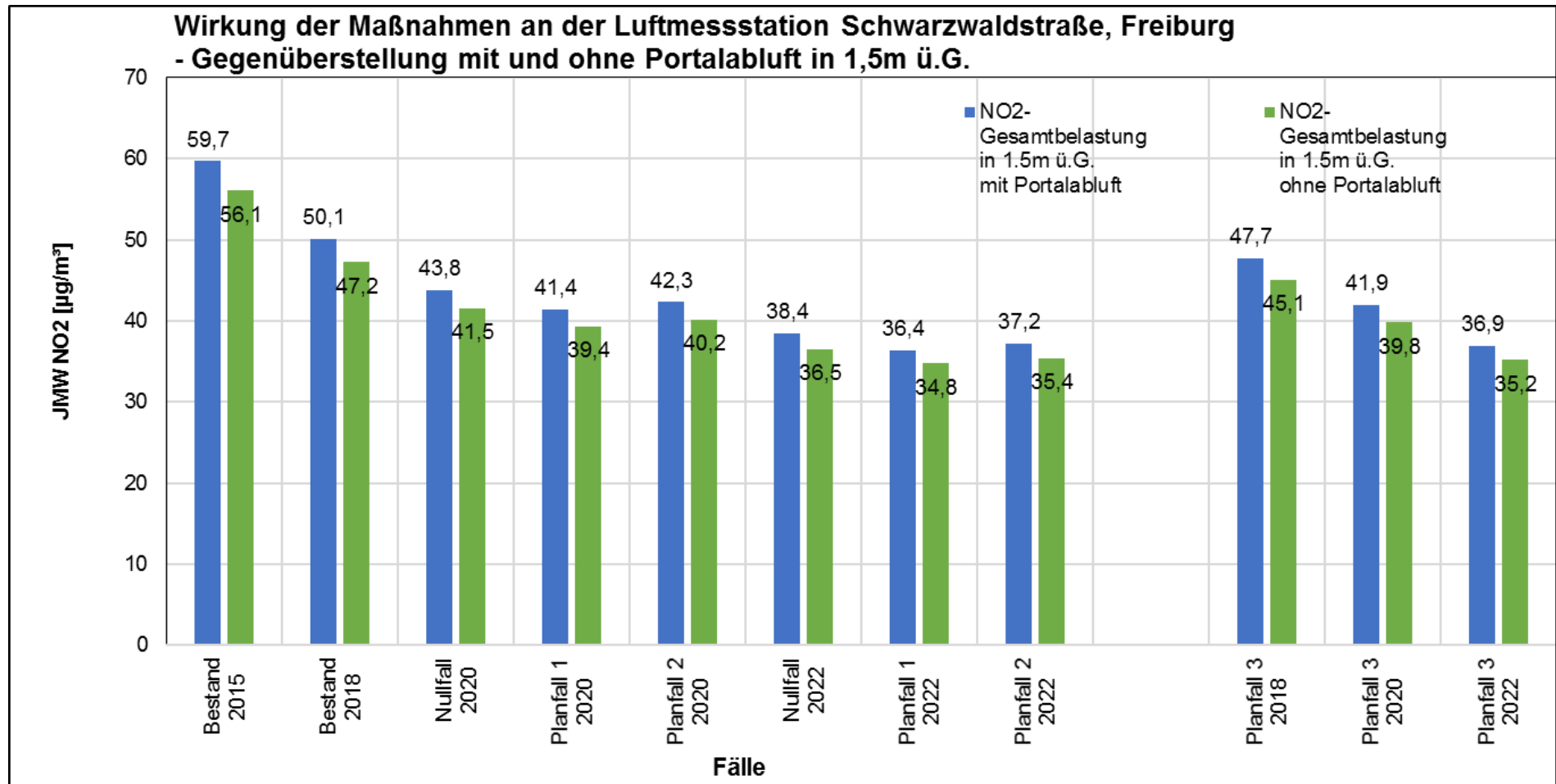


Abb. 6-1: NO₂-Jahresmittelwerte für die Trendentwicklung und alle betrachteten Maßnahmen der Studie IBRau, 2017 [1] an der Luftmessstation in 1,5 m über Grund mit und ohne Portalabluft.

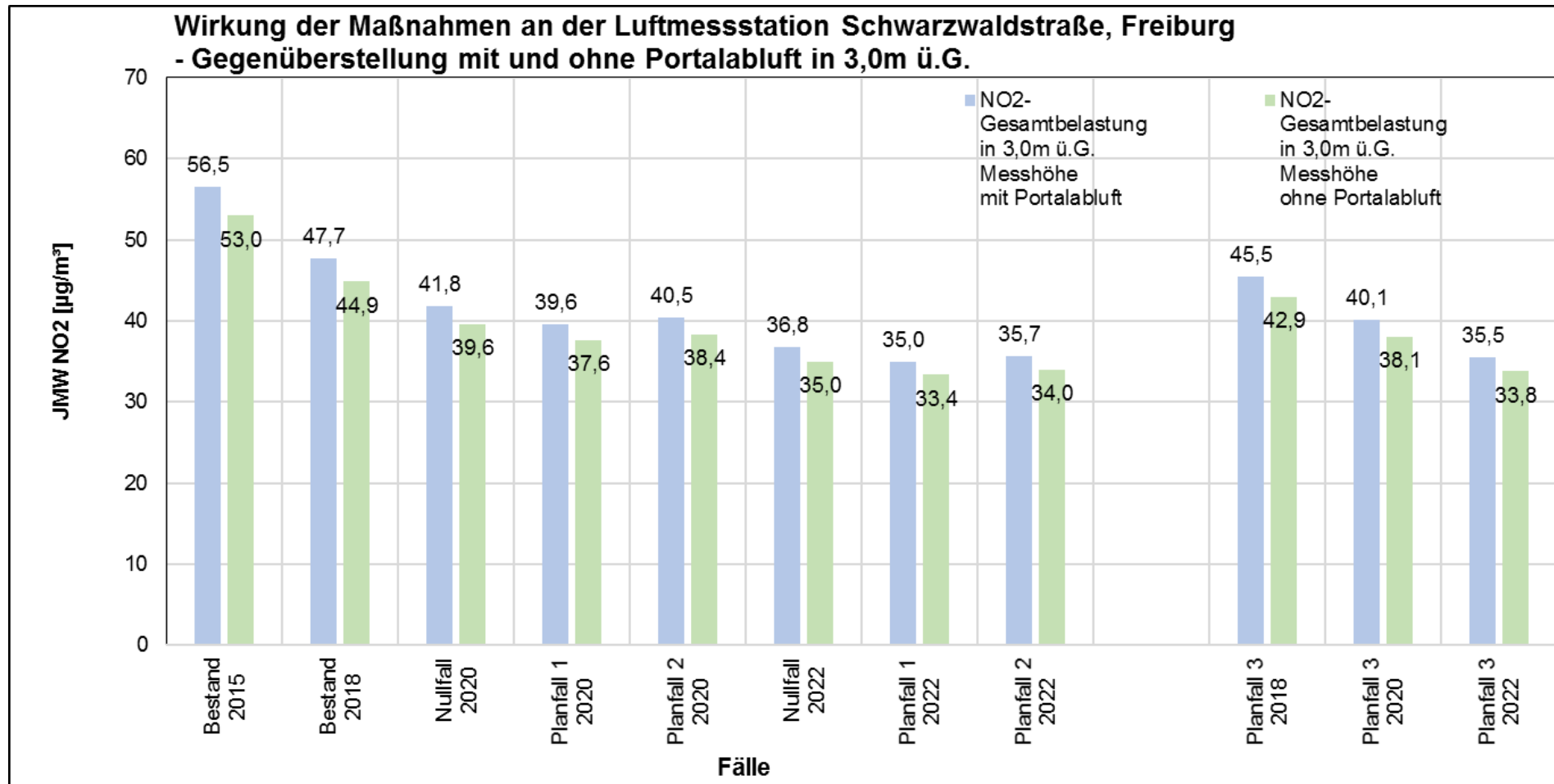


Abb. 6-2: NO₂-Jahresmittelwerte für die Trendentwicklung und alle betrachteten Maßnahmen der Studie IBRau, 2017 [1] an der Luftmessstation in Höhe des Messfühlers (3,0 m über Grund) mit und ohne Portalabluft.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Gutachtens wurde untersucht, ob und um wieviel die Immissionskonzentrationen im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße mit Maßnahmen, die über das westliche Tunnelportal abgeleitete NO_x-Emissionen mindern, reduziert werden können. Als Maßnahmen untersucht wurden

- eine Reduzierung des NO_x-Emissionsmassenstroms durch Lüftungstechnische Maßnahmen (Maßnahme 1: NO₂-Reduktion bei optimierter Tunnellüftung) und
- eine Reduzierung des NO_x-Emissionsmassenstroms durch photokatalytische Maßnahmen (Maßnahme 2: NO₂-Reduktion durch photokatalytische Materialien).

In einem ersten Schritt wurde die Istsituation (Bestand 2015) geprüft. Hierzu wurden Messungen, die in den Folgejahren nach Inbetriebnahme des Schützenalleetunnels durchgeführt wurden, in Hinblick auf Aussagen zur Immissionssituation im Nahbereich des westlichen Tunnelportals analysiert. Insbesondere wurde geprüft, ob belastbare Aussagen zum Anteil der Tunnelabluft an der gemessenen NO₂-Gesamtimmisionskonzentration ableitbar sind. Des Weiteren erfolgte eine Abschätzung des maximalen Immissionsbeitrags im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße durch die Tunnelabluft des westlichen Tunnelportals auf Basis von Screening-Berechnungen sowie Berechnungen mit dem Detailmodell MISKAM.

In einem zweiten Arbeitsschritt wurde für die Trendjahre 2018 (Bestand 2018), 2020 und 2022 (Nullfälle 2020 und 2022) der im Bereich der Luftmessstation durch die Tunnelabluft der Nordröhre maximal zu erwartende NO₂-Immissionsbeitrag mit dem Detailmodell berechnet.

In einem dritten Schritt wurde ein mögliches Minderungspotenzial durch die beiden Maßnahmen

- NO₂-Reduzierung bei optimierter Tunnellüftung und
- NO₂-Reduzierung durch katalytische Materialien

auf Basis von Literaturrecherchen abgeschätzt.

In einem vierten Arbeitsschritt wurde, basierend auf der Abschätzung eines möglichen Minderungspotenzials, die daraus resultierende Immissionsminderung im Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße bestimmt sowie die Auswirkungen auf die im Rahmen des bereits vorliegenden Fachgutachtens 2.1 [1] untersuchten Planfälle ermittelt.

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte sind im Folgenden zusammengefasst.

Hinweis: In der Leistungsbeschreibung waren auch Windkanaluntersuchungen mit aufgenommen worden. Auf Grund der im Rahmen dieses Gutachtens ermittelten Ergebnisse wurde keine Notwendigkeit für detaillierte Windkanaluntersuchungen gesehen. Auf Windkanaluntersuchungen wurde somit nach Absprache mit dem Auftraggeber verzichtet.

Erster Arbeitsschritt:

Insgesamt ergaben die unterschiedlichen Messungen kein eindeutiges Bild der Immissionsbelastung im Bereich des Westportals. Zudem konnte auf Basis der Messungen nicht klar abgegrenzt werden, wie weit sich die Tunnelabluft in der Umgebung des Westportals ausbreitet. Der tunnelbedingte Anteil wurde im Vergleich zur Gesamtbelastung bei den Messungen eher als gering eingestuft. Tunnelbedingte Immissionsbelastungen konnten bis in etwa 150 m Entfernung vom Tunnelportal messtechnisch festgestellt werden. Für den Bereich der Luftmessstation Schwarzwaldstraße lagen keine Messergebnisse vor, die eine belastbare Aussage zum Anteil der Tunnelabluft zugelassen hätten.

Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Berechnungen mit dem Detailmodell MISKAM ergaben für den Bestand 2015 im Bereich der Luftmessstation einen Anteil der Tunnelabluft von 6,3% (3,0 m Höhe) bzw. 6,1% (1,5 m Höhe) der jährlichen NO₂-Gesamtimmisionskonzentration.

Zweiter Arbeitsschritt:

Für das Jahr 2018 (Fall Bestand 2018) liegt der Anteil der Tunnelabluft in beiden untersuchten Höhen (Messfühlerhöhe 3 m Höhe und 1,5 m Höhe) bei 6,0% und 5,8 %, für die beiden Nullfälle 2020 und 2022 zwischen 4,9% und 5,4%.

Dritter Arbeitsschritt:

Für die Maßnahme NO₂-Reduktion bei optimierter Tunnellüftung wurde, basierend auf Angaben aus der Literatur bzw. den Erfahrungswerten für den Schützenalleeetunnel bei geöffneter Tunnelmittelwand, eine mögliche NO_x-Minderung in der Tunnelabluft von 50 % im Bereich des Westportals als realistisch eingestuft. Für das Bestandsjahr 2015 bedeutet dies eine Minderung der NO₂-Gesamtimmisionskonzentration von maximal etwa 3% in 3 m über Grund (Höhe Messfühler) bzw. 1,5 m Höhe über Grund. Für die Trendjahre 2018, 2020 und 2022 ergeben sich Minderungen in der NO₂-Immisionskonzentration in beiden untersuchten Höhenstufen von etwa 3% (Bestand 2018) bzw. 2,5% (Nullfälle 2020 und 2022).

Für die Maßnahme NO₂-Reduktion durch katalytische Materialien wurde auf Basis einer intensiven Literaturrecherche eine 20 -prozentige Minderung der NO_x-Belastung unter optimalen Randbedingungen angesetzt. Für das Bestandsjahr 2015 bedeutet dies eine Minderung der NO₂-Gesamtimmisionskonzentration von maximal etwa 1,2% in 3 m über Grund (Höhe Messfühler) bzw. 1,5 m Höhe über Grund. Für die Trendjahre 2018, 2020 und 2022 ergeben sich Minderungen in der NO₂-Immisionskonzentration in beiden untersuchten Höhenstufen von ebenfalls ca. 1,2% im Jahr 2018 (Bestand 2018) bzw. ca. 1% für die beiden Nullfälle 2020 und 2022.

Vierter Arbeitsschritt:

In diesem Arbeitsschritt wurde geprüft, wie sich die beiden in diesem Gutachten untersuchten Maßnahmen 1 und 2 auf das Ergebnis der in dem Fachgutachten 2.1 untersuchten Planfälle auswirken.

In Planfall 1 (Maßnahme Pförtnerung, Optimierung LSA-Steuerung und Tempolimit) wurde im Jahr 2020 bei Ableitung der Tunnelabluft über das Portal in Höhe des Messfühlers der Grenzwerte bei berechneten $39,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gerade eingehalten, in 1,5 m über Grund mit $41,4 \text{g}/\text{m}^3$ überschritten. Mit den beiden im Rahmen dieses Gutachtens untersuchten Maßnahmen (keine additive Betrachtung der Maßnahmen!) ist im Jahr 2020 bei Umsetzung des Planfalls 1 in 1,5 m Höhe eine Unterschreitung des Grenzwertes aller Wahrscheinlichkeit nach noch nicht gegeben.

Bei Planfall 2 (Maßnahme Optimierung LSA-Steuerung und Tempolimit) ist in 1,5 m Höhe sowohl bei Maßnahme „optimierte Tunnellüftung“ als auch „photokatalytische Materialien“ im Jahr 2020 keine Einhaltung des Grenzwertes sichergestellt. In Höhe des Messfühlers (3 m über Grund) dürfte die Maßnahme „optimierte Tunnellüftung“ zu einer Grenzwerteinhaltung führen, die Maßnahme „photokatalytische Materialien“ wahrscheinlich noch nicht.

Für den Planfall 3 (Einbezug B31 in grüne Umweltzone) reichen die im Rahmen dieses Gutachtens untersuchten Maßnahmen nicht aus, um im Jahr 2020 in 1,5 m über Grund bereits eine Einhaltung des Grenzwertes zu gewährleisten. Allerdings ist in Höhe des Messfühlers bei beiden Maßnahmen, getrennt betrachtet, von der Einhaltung des Grenzwertes auszugehen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] IBRau, AVISO, R+T Ingenieure, "3. Fortschreibung Luftreinhalteplan Freiburg - Bestimmung der Emissions- und Immissionsseitigen Auswirkungen mehrerer verkehrlicher Maßnahmen," RP Freiburg, Heilbronn.
- [2] UMEG, Referat 44-Straßenplanung, "Sondierende NO₂ – und Benzolmessungen im Bereich des Schützenalleeetunnels in Freiburg, Bericht-Nr. 31-4/2003," Karlsruhe, 2003.
- [3] LUBW, "NO₂, Ruß und Benzolmessungen im Bereich der Tunnelportale des Schützenalleeetunnels in Freiburg Februar 2003 – Mai 2006," Karlsruhe, 2006.
- [4] Gruner AG Ingenieure und Partner, "Vertiefte Betrachtung Lufthygiene bei Wegfall der Umkehrlüftung und Schließung der Öffnung zwischen Nord- und Südröhre," RP Freiburg, Basel, 2009.
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, "Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen ohne und mit lockerer Randbebauung," Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2002.
- [6] LUBW, "Kurzauswertung der Stickstoffdioxidmessungen 2010/2011 bzw. März 2012 an der Messstation Freiburg Tunnel-West," Karlsruhe, 2011.
- [7] Lohmeyer GmbH, IFEU, "PC-Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Luftqualität an Straßen ohne oder mit oder mit lockerer Randbebauung", RLuS 2012 Version 1.2, BAST, Bergisch Gladbach, 2012.
- [8] Eichhorn, J., "Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen, mikroskaligen Stadtklimamodells". Diss. Meteorol. Inst. Univ. Mainz, Mainz, 1989.
- [9] Schweizerische Eidgenossenschaft, "Lüftung der Strassentunnel," Bundesamt für Strassen ASTRA, 2008.
- [10] ASFINAG Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft "Tunnel-Lüftung (TLü)," 2013.
- [11] Bundesanstalt für Straßenwesen. Available:
http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Publikationen/Veranstaltungen/V3-Luftqualitaet-2011/luftqualit%C3%A4t-vortrag-flassak.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

- [12] PICADA Available:
<http://www.picada-project.com/domino/SitePicada/Picada.nsf?OpenDataBase>.
- [13] Fraunhofer IME Available:
https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/documents/md8_AUGUST_tcm7-59839.pdf.
- [14] Fraunhofer IME, "Forschungsarbeiten - Saubere Luft durch Pflastersteine-Clean Air by AirClean".
- [15] BAST, Vortrag: "Anwendungsmöglichkeiten und erste Ergebnisse aus Pilotstudien zur Photokatalyse an Straßenbauwerken", 2015.
- [16] G. L. P. E. Guerrini, "Photocatalytic Cementitious roads for depollution," in International RILEM Symposium on Photocatalysis, Florenz, Italien, 2007.
- [17] Center for Transport and Navigation "Dutch Air Quality Programme," 2010.
- [18] S. Jacob, "Jahresbericht: NO₂-Reduzierung durch photokatalytisch wirksame Oberflächen? Modellversuch Fulda," Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie , 2012.
- [19] Ingenieurbüro Lohmeyer, "Numerische Simulation der Wirksamkeit von photokatalytisch aktiven Betonoberflächen für die Hohenheimer Straße in Stuttgart," Karlsruhe, 2014.
- [20] Ingenieurbüro Lohmeyer, Vortrag: "Minderungsmöglichkeiten der Stickoxid-Belastungen in einem Tunnel und am Tunnelportal mit Hilfe von photokatalytisch aktives Material enthaltenden Tunnelkassetten", Karlsruhe, 2015.
- [21] TROPOS Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, "<https://www.tropos.de>," 2015.
Available: <https://www.tropos.de/aktuelles/pressemitteilungen/details/photokatalytische-beschichtungen-nur-unter-bestimmten-umweltbedingunge/>].
- [22] J. Kleffmann "Photokatalyse - eine Maßnahme zur Verbesserung der Luftqualität?" Ergebnisse aus Feldstudien, Bergische Universität Wuppertal, 2015.
- [23] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., "Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen," Köln, 2015.