

# **Stoffeintrag in Straßenrandböden Messzeitraum 2005/2006**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 198**

**bast**



# **Stoffeintrag in Straßenrandböden Messzeitraum 2005/2006**

von

Birgit Kocher

Unter Mitwirkung von

Susanne Brose  
Antonia Chlubek  
Nurgül Karagüzel  
Nicole Klein  
Ingrid Siebertz

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 198**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt AP 03 636**  
Stoffeintrag in Straßenrandböden  
Messzeitraum 2005/2006

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-86918-056-4

Bergisch Gladbach, September 2010

## Kurzfassung – Abstract

### **Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2005/2006**

An drei BAB (A 4, A 555, A 61) wurden Messstandorte eingerichtet, um die Einträge von Schadstoffen aus dem Straßenverkehr in den Boden bzw. in Entwässerungseinrichtungen beurteilen zu können. Die ersten 18 Monate der Messungen werden im Rahmen des vorliegenden Berichtes dokumentiert.

Die drei Standorte decken bei vergleichbarer Gesamtverkehrsstärke von etwa 70.000 Kfz/24h mit 5.4 % bis 19.8 % ein breites Spektrum von Lkw-Anteilen am DTV ab. Ihre Lage ermöglicht die Untersuchung verschiedener Stoffausbreitungsvarianten.

Die Ergebnisse der Messperiode von Januar 2005 bis Juni 2006 zeigen, dass außer Schwermetallen auch große Mengen an Massenelementen aus dem Straßenverkehr in den Straßenseitenraum gelangen. Dabei handelt es sich nicht nur um Natrium aus Tausalzeinsatz, dessen Einfluss in Staub- und Wasserproben eindeutig nachzuweisen ist, sondern auch um Calcium und Eisen in fast ebenso hohen Konzentrationen und Frachten. Es gibt Hinweise aus laufenden Forschungsprojekten, dass diese Einträge zur Verbesserung des Schadstoffbindungsvermögens im Bankett und in den partikulären Anteilen des Straßenabflusses beitragen.

Die in der vorliegenden Untersuchung bestimmten Stoffeinträge liegen in 1.5 m Höhe meist oberhalb der Vergleichswerte für Hintergrundmessstellen und städtische Räume. Die bodennah ermittelten Depositionsraten sind höher. Der Einfluss der Luv- und Leelage der Messpunkte lässt sich sowohl an der Höhe der fahrbahnnahen Stoffeinträge als auch an der räumlichen Verteilung belegen. Es besteht an allen Messstandorten ein starker Zusammenhang zwischen Höhe des Stoffeintrages und Entfernung vom Fahrbahnrand. Die räumlichen Verteilungen der Stoffeinträge zeigen zusätzlich klare Unterschiede für die drei Autobahnstandorte. Der Standort A 61 mit einem zwei- bzw. dreimal höheren Lkw-Anteil als A 4 und A 555 weist auch die höchsten Staubbiederschlagsmengen und Depositionsraten auf. Trotz leicht höherer Verkehrsstärke und höherem Lkw-Anteil liegen die Depositionsraten an der A 4 etwas niedriger als an der A 555. Dies ist wahrscheinlich durch die unterschiedliche Lage der

Standorte zur Hauptwindrichtung bedingt. Ein Einfluss auf den Stoffeintrag durch die Lage der Messpunkte der A 4 in Außen- oder Innenkurve mit entsprechender Entwässerung ließ sich dagegen nicht feststellen.

In den Straßenabflussproben weisen viele der Metalle (z. B. Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel) Werte nahe an oder unter der Bestimmungsgrenze auf. Fast 90 % der Konzentrationswerte der Schwermetalle Cadmium und Zink liegen unterhalb oder im Bereich der Sickerwasserprüfwerte der Bodenschutzverordnung, bei den anderen Schwermetallen fast alle Werte.

Vergleichbare Untersuchungen existieren bisher nicht. Eine Abschätzung des UBA zu Stoffeinträgen in Boden und Wasser aus diffusen Quellen zeigt, dass der Kraftfahrzeugverkehr erheblichen Anteil an den Einträgen von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden hat. Die Berechnungen basieren allerdings auf teilweise sehr alten Emissionsdaten und Emissionsabschätzungen. Die hier dokumentierten Messungen sollen die Straßenbauverwaltung bei der Mitwirkung an den nationalen und europäischen Regelwerken zu Boden- und Wasser-schutz stützen und bilden eine Datengrundlage für die Bearbeitung weiterführender Fragestellungen. Die Messungen werden im Rahmen eines weiteren Projektes fortgesetzt.

Der Bericht enthält als Anhänge die Anschriften der zuständigen Autobahnmeistereien sowie einen umfangreichen Tabellenteil zu den Forschungsergebnissen. Sie sind dem vorliegenden Heft auf CD beigefügt.

### **Material deposition in roadside soils – measuring period 2005/2006**

Measuring points were installed on three federal motorways (A4, A555 and A61) to determine the deposition of pollutants from road traffic in the soil or in the drainage system. This reports documents the first 18 months of the measuring period.

The three measuring sites each have comparable total traffic flows of approx. 70000 vehicles/24h and cover a broad range of truck participation in the total traffic volume, ranging from 5.4% to 19.8%.

The location of the points facilitates the investigation of different ways of substance dispersion.

The results of the measuring period from January 2005 to June 2006 show that heavy metals as well as large amounts of mineral compounds are moving from the road traffic to the roadside area. This includes sodium used in de-icing, which can be clearly detected in dust and water samples, as well as calcium and iron in almost comparable concentrations and loads. Current research projects indicate that these deposits help to improve the pollutant-binding abilities of the shoulder and the particular matter in the road runoff.

The material deposits measured in the current study occur at a height of 1.5 m and are thus above the comparative values for background measuring points and urban areas. The deposition rates measured near the ground are higher. Windward and sheltered measuring points show different results for deposition near the road surface as well as different special distributions. All points show a strong correlation between the amount of material deposition and the distance from the side of the road. The spatial distribution of material deposits also shows clear differences between the three motorway measuring points. The A61 point has a two to three times higher truck component than the A4 point and the A555 point shows the highest values for dust deposition and other deposits. The deposition rates along the A4 are slightly lower than along the A555, although the A4 has a slightly higher traffic load and a higher truck component. This may be due to the different location of the points relative to the main wind direction. However, no difference in material deposition could be found between measuring points at the inside and the outside of a bend on the A4, which both had appropriate drainage.

Road runoff samples contain many metals (e.g. chromium, cobalt, copper, molybdenum, nickel) near or below the detection threshold. Nearly 90% of the concentrations of the heavy metals cadmium and zinc are below or in the range of the test values for seepage water in the Soil Protection Ordinance. Nearly all concentrations of other heavy metals are in that range.

There are currently no comparable investigations. An estimate of the Federal Office for the Environment concerning material deposition from

diffuse sources in soil and water shows that motor vehicle traffic plays a considerable role in the deposition of copper, zinc and lead in water and soil. However, the calculations are based on very old emission data and emission estimates. The measurements documented here are intended to support the road-building authorities in their contribution to national and European regulations concerning soil and water protection and to provide basic data for further inquiries. The measurements will be continued as part of another project.

This report contains the addresses of the relevant motorway maintenance centres as well as extensive tables with research results as appendices. They are attached to this brochure in the form of a CD.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Fragestellung</b> .....	7
<b>2</b>	<b>Standorte</b> .....	9
2.1	Kriterien für die Standortwahl .....	9
2.2	Standort A 555 Widdig .....	11
2.3	Standort A 61 Ringen-Vettelhoven- Meckenheim .....	11
2.4	Standort A 4 Bensberg .....	13
<b>3</b>	<b>Methoden</b> .....	14
3.1	Probenahme im Feld .....	14
3.1.1	Staubniederschlag .....	14
3.1.2	Straßenabflusswasser .....	16
3.1.3	Bodenproben .....	17
3.2	Labormethoden .....	17
3.2.1	Staubniederschlag .....	17
3.2.2	Straßenabflusswasser .....	18
3.2.3	Bodenproben .....	18
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Boden- untersuchungen</b> .....	19
4.1	Bodeneigenschaften und Stoffbestand .....	19
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Messperiode 2005/2006</b> .....	21
5.1	Staubniederschlag – bulk deposition .....	22
5.1.1	Räumliche Verteilung .....	24
5.1.2	Zeitlicher Verlauf .....	32
5.2	Straßenabflusswasser .....	34
<b>6</b>	<b>Fazit</b> .....	37
6.1	Zusammenfassung .....	37
6.2	Ausblick .....	38
<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	38



## 1 Fragestellung

Durch Emissionen des Straßenverkehrs werden Schadstoffe in den Straßenseitenraum eingetragen. Durch die Auswirkungen der Benzinbleigesetze hat sich zwar der Eintrag von Blei wesentlich verringert (z. B. FARMER et al. 1996, HELMERS et al. 1994), aber aufgrund des weiter steigenden Verkehrsaufkommens nehmen andere Einträge aus indirekten Emissionen des Verkehrs eher zu. Beispiele dafür sind Zink und Cadmium aus Reifenabrieb oder Kupfer, Blei und Zink aus Bremsbelagabrieb (z. B. HARRISON/JOHNSTON 1985, PFEFFER 1994). Diese und weitere Stoffe werden sowohl als Schwebstaub weit in der Umgebung verteilt als auch mit absetzbarem Staub auf dem Bankett bzw. am Rand der Fahrbahn abgelagert. Sie gelangen dann mit dem Straßenabfluss und über trockene Deposition auf und in den angrenzenden Boden (z. B. BARBOSA/HVITVED-JACOBSEN 1999, GÄTH et al. 1991, GOLWER/ZEREINI 1998, HEWITT/RASHED 1990a, b, KRAUTH/KLEIN 1982, KRAUTH/STOTZ 1987, LECHNER et al. 1987, LEGRET/PAGOTTO 1999, SIEKER/GROTTKER 1988).

Auch eine Studie des UBA (HILLENBRAND et al. 2005) zeigt, dass der Bereich Kraftfahrzeuge eine erhebliche Bedeutung bei den Emissionen und diffusen Einträgen von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden hat. Andere Stoffe wurden dort jedoch nicht untersucht. Als hauptsächliche straßenverkehrsbedingte Quellen der drei Schwermetalle wurden Emissionen aus Reifenabrieb mit 1.620 t Zink/a, Bremsabrieb mit 930 t Kupfer/a, 61.5 t Blei/a und 309 t Zink/a und Emissionen aus Fahrbahnabrieb mit 149 t Zink/a ermittelt. Die Autoren erwarten, dass die Bleiemissionen aus Bremsbelägen und in geringeren Mengen aus Reifenabrieb, Auswuchtgewichten und sonstigen fahrzeugspezifischen Quellen durch die EU-Altfahrzeugverordnung stark sinken werden. Die Emissionen von Kupfer, die nach HILLENBRAND et al. überwiegend aus Bremsbelägen stammen, und die von Zink, das vorwiegend dem Reifenabrieb entstammt, werden nach Schätzungen der Autoren aber ansteigen. Das Verhältnis der aus dem Straßenverkehr freigesetzten Mengen innerorts und außerorts wird auf etwa 1 zu 3 geschätzt. Als Hauptsenke aller drei Stoffe werden außerorts die Böden neben den Straßen gesehen, da den Autoren keine Daten zum Anteil der Straßen mit Hochborden und zu Einleitungen in Gewässer vorlagen.

Durch jahre- und jahrzehntelangen Eintrag haben sich neben den Fahrbahnen stark befahrener Straßen Böden mit relativ hohen Schwermetallgehalten gebildet, auch organische Stoffe wie PAK weisen oft gegenüber der Umgebung erhöhte Konzentrationen auf (GOLWER 1991, RADTKE et al. 1990, REINIRKENS 1996, WARREN/BIRCH 1987 u. v. a.). Eine zusammenfassende Bewertung der Literaturdaten zu diesen Konzentrationen zeigt, dass die Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung für die Stoffe Blei, Cadmium, Kupfer und Zink im Bodenfeststoff in Straßennähe häufig überschritten werden (KOCHER/PRINZ 1998).

Die Auswertung verschiedener Forschungsarbeiten zeigt jedoch auch, dass selbst an stark befahrenen Straßen und in empfindlichen Böden die Schwermetallkonzentrationen im Bodensickerwasser meist unterhalb der Prüfwerte der Bodenschutzverordnung (BMU 1999) liegen (KOCHER/WESSOLEK 2002, DIERKES/GEIGER 1999). Diese Prüfwerte dienen dem Schutz des Grundwassers und müssen im Kapillarsaum bzw. in Höhe des Grundwasserspiegels eingehalten werden. Die genannten Arbeiten zeigen, dass dies bei kalkhaltigem Bankett schon in 30 cm Tiefe und bei kalkfreien Sandböden in weniger als 1 m Tiefe der Fall ist. Das bedeutet, dass die Filter- und Pufferwirkung der Böden noch nicht erschöpft ist und keine Gefahr für das Grundwasser oder Verschlechterungen der Grundwasserqualität zu befürchten sind. Die Stoffeinträge überschreiten jedoch oft in einem schmalen Streifen entlang des Fahrbahnrandes die Frachtgrenzwerte der Bodenschutzverordnung für vorbelastete Böden. Bei unverändert hohen Einträgen muss damit gerechnet werden, dass die Filter- und Pufferwirkung der Böden auf Dauer nicht ausreichen wird. Das zeigen zum Beispiel Ergebnisse aus der Untersuchung „Vergleich von Rechenmodellen zur Beschreibung der Schwermetallverlagerung in Straßenrandböden“ (KOCHER 2004).

Der seit langem bestehenden Anforderung des Grundwasserschutzes an Straßen wird in den Regelwerken der Straßenbauverwaltung Rechnung getragen: Verschiedene Regelwerke (RiStWaG, „BeStWaG“, Ras-Ew, Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und Unterbaues im Straßenbau) machen Vorgaben zum Umgang mit Straßenablaufwässern und urbanen Oberflächenwässern in Abhängigkeit von deren Menge und stofflicher Belastung. Alle diese Regelungen bauen auf den Schutz des Grundwassers durch die Bindung der Schadstoffe im Boden oder in den grundwasserüber-

deckenden Schichten. Diese Vorgehensweise ist auch außerhalb der Straßenbauverwaltung üblich (siehe z. B. ATV-Arbeitsblatt 138 zur Niederschlagsversickerung). Einerseits soll die Qualität des Grundwassers als unersetzliche Ressource weitestgehend geschützt werden, andererseits wird dafür bei der Versickerung von Oberflächenwässern die Akkumulation von persistenten Schadstoffen im durchsickerten Boden in Kauf genommen.

Neben dem Grundwasserschutz ist seit 1998 auch der Schutz des Bodens in Deutschland gesetzlich verankert. Die Bodenschutzverordnung konkretisiert die Anforderungen des Bodenschutzgesetzes u. a. durch Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte. Vorsorgewerte zeigen die Obergrenze der weit verbreiteten natürlichen Konzentrationen. Wenn sie überschritten werden, besteht laut Gesetz der Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung. Die Prüfwerte sollen dazu dienen, diesen Verdacht zu erhärten oder abzuweisen. Wenn Maßnahmenwerte überschritten werden, muss eine Sanierung oder Sicherung des belasteten Bodens erfolgen. Wenn die Vorsorgewerte überschritten sind, tritt eine Begrenzung der zulässigen weiteren Frachten in Kraft, um eine weitere Erhöhung der Schadstoffkonzentrationen im Boden zu verhindern. In der Begründung zur Bodenschutzverordnung (BMU 9/1998) wird die Anwendbarkeit dieser Begrenzung jedoch mit Verweis auf unvermeidbare Einträge aus dem Straßenverkehr relativiert. Die Begrenzung der zulässigen Einträge unterliegt dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit in Bezug auf die Nutzung des Grundstückes: „So müssen z. B. bei Verkehrswegen bestimmte Schadstoffeinträge und -gehalte als unvermeidlich hingenommen werden, ohne dass eine Überschreitung von Vorsorgewerten entsprechende Minderungsmaßnahmen auslösen könnte“ (BMU 9/1998). Vor dem Hintergrund des Vorsorgegedankens des Bodenschutzgesetzes wird die üblicherweise praktizierte breitflächige Versickerung jedoch häufiger infrage gestellt. Kritikpunkt ist das Hinnehmen weiterer Einträge, auch wenn der Boden schon die Vorsorgewerte einzelner Schadstoffe erreicht bzw. überschritten hat. Dies betrifft vorwiegend stark befahrene Straßen. Die Entwicklung dieser Diskussion ist unklar.

Die eigene Beobachtung der Eintragssituation nach anerkannten Verfahren und die Identifikation der Hauptschadstoffquellen können die Straßenbauverwaltung bei der Mitwirkung an den diesbezüglichen nationalen und europäischen Regelwerken stützen. Beispiele dafür sind Überlegungen, die Zuordnungswerte des LAGA-Merkblattes 20 der Länder-

arbeitsgemeinschaft Abfall für die Verwertung mineralischer Abfälle und die Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung in die europäische Normung einzubringen oder die Bewertung der Stoffeinträge (zurzeit: Zink) an Straßenrändern in der EG-Altstoffbewertung. Die Kenntnisse aus der eigenen Beobachtung erlauben gezielte Initiativen zur Minderung der Einträge und zur Verbesserung der Schadstoffbindung im Boden. Ein positiver Nebeneffekt einer Minderung der Einträge wären verringerte Probleme bzw. Kosten durch Schadstoffgehalte in Bankettschälgut, Kehrgut, Schlamm aus Entwässerungsbecken und luftgetragenen Partikeln.

Ein wichtiger Schritt ist das verlässliche Messen der derzeitigen Einträge in den Straßenseitenraum, wobei nicht nur die direkten Emissionen aus den Fahrzeugabgasen, sondern insbesondere auch die indirekten Emissionen aus Reifen-, Bremsbelag- und Fahrbahnabrieb erfasst werden sollen. Dies ist durch die Messmethodik der klassischen Immissionsmessstellen bis jetzt nicht gewährleistet, da diese keine bodennahen Depositionsdaten liefern und deshalb keine genauen Aussagen über Stoffeinträge in Böden und Grundwasser ermöglichen.

Im vorliegenden Bericht werden daher Schadstoffeinträge in den Straßenseitenraum an drei Autobahnstandorten zur Beurteilung der Schadstoffeinträge und zur beispielhaften Kontrolle der Belastung von Boden und Grundwasser durch den Straßenverkehr untersucht.

Aus KOCHER/WESSOLEK (2003) liegen neuere Messungen der Stoffeinträge an einem Straßenstandort vor. Diese umfassen jedoch lediglich vier Monate während des Sommerhalbjahres 2000. Die Umweltverwaltungen verfügen über Immissionsmessstellen, an denen teilweise auch straßennahe Einträge untersucht werden. Diese liegen jedoch meist auch im Einfluss anderer Emittenten. Es ist der BAST nur ein Messstandort unmittelbar an einer stark befahrenen Straße bekannt, an dem ohne den Einfluss anderer Emittenten über mehrere Jahre hinweg die Stoffeinträge in Boden und Grundwasser beobachtet wurden. Dieser wird von der Landesanstalt für Umweltschutz und der UMEG Baden-Württemberg betrieben und liegt an der BAB 5 bei Bruchsal. Auch dort wird trotz umfangreichen Messprogramms der Straßenabfluss nicht beprobt.

Um die Einträge in den Boden bzw. in Entwässerungseinrichtungen und die mit dem Sickerwasser transportierte Schadstoffmenge sowie den Erfolg von Minderungsmaßnahmen beurteilen zu können,

wurden an mehreren stark befahrenen Straßen Messstandorte eingerichtet, die über mehrere Jahre hinweg betrieben werden sollen. Die ersten 18 Monate der Messungen (Februar 2005 bis Juli 2006) werden im Rahmen des vorliegenden Berichtes dokumentiert.

## 2 Standorte

### 2.1 Kriterien für die Standortwahl

Die Auswahl der Messstandorte wurde räumlich mit den Luftschadstoff-Immissionsmessungen der BAST koordiniert, um eine gemeinsame Datenauswertung zu ermöglichen. Dies vereinfacht den zu leistenden Mess- und Wartungsaufwand, und der Vergleich verschiedener Parameter (z. B. Stoffgehalte in  $PM_{10}$ , Staubbiederschlag und bodennaher Deposition) verbessert die Verlässlichkeit, Interpretierbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse. Dabei soll im Rahmen der Messungen auch geprüft werden, ob im weiteren das Untersuchungsprogramm bei guter Korrelation verschiedener Parameter vereinfacht werden kann. Die Untersuchungsmethoden wurden so gewählt, dass sie mit anerkannten Umweltmonitoringverfahren vergleichbar sind und den zu erwartenden Anforderungen der EU entsprechen.

Zwei Messstandorte der BAST für Luftschadstoffe für Luftschadstoffmessungen bestanden schon vor dieser Untersuchung. Sie erfüllen die Kriterien für einen optimalen Messstandort beide nicht vollständig, sodass ein zusätzlicher Standort gesucht wurde. Der bestehende Standort an der A 4 bei Bensberg liegt im Wald und ist auf der Nordseite mit einer Lärmschutzwand ausgestattet, weist also ungleichmäßige und damit eher ungünstige Ausbreitungsbedingungen für die Emissionen auf. Der zweite Standort an der A 61 bei Meckenheim weist zwar freie Ausbreitungsbedingungen auf, liegt aber in der Nähe einer Parkplatzausfahrt, sodass nicht alle vorbeifahrenden Fahrzeuge mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fahren. Zu diesen beiden Standorten sollte ergänzend ein Standort mit sowohl freier Ausbreitung als auch uneingeschränktem Verkehrsfluss gefunden werden.

Die potenziellen Messstandorte wurden auf die Einhaltung folgender Kriterien untersucht (in abnehmender Wichtigkeit):

- Gleichmäßige Schadstoffausbreitung möglich, dazu wurden möglichst gleichmäßige Land-

schaftsgestalt in der Umgebung und gleichförmiger Bewuchs sowie gleichmäßiger Verkehrsfluss gesucht,

- hohe Verkehrsstärke (DTV größer als 70.000 Kfz/d),
- Lkw-Anteil etwa gleich wie am bisher bestehenden Standort für Luftschadstoffmessungen an der A 4 oder deutlich geringer, beispielsweise ein Drittel des Lkw-Anteils am schon bestehenden Standort an der A 61,
- Abwesenheit anderer Emittenten,
- Bodenverhältnisse für Untersuchung der Schadstoffverlagerung geeignet (z. B. kein Festgestein),
- Lage in der Nähe einer Dauerzählstelle, Verfügbarkeit eines Stromanschlusses,
- letzter Ausbau einige Jahre zurückliegend, in den nächsten zehn Jahren kein weiterer Ausbau geplant,
- eindeutig unterscheidbare Luv- und Leeseite der Straße, dementsprechend Lage möglichst quer zur Hauptwindrichtung,
- gute Zugänglichkeit und gute Erreichbarkeit von der BAST aus.

Die Vorauswahl der möglichen Messstandorte anhand der Verkehrsdaten und geologischer und topografischer Karten ergab 15 mögliche Standorte im Umkreis von etwa 1.5 h Fahrzeit von der BAST. Nach den ersten Geländebegehungen konnte keiner der vorgewählten Standorte befürwortet werden. Gründe waren vorwiegend das Vorhandensein von Lärmschutzeinrichtungen und anderen Ausbreitungshindernissen, die aus den topographischen Karten nicht zu erkennen sind, des Weiteren an wenigen Standorten auch geplante oder zurzeit durchgeführte Um- und Ausbaumaßnahmen und Vandalismusgefahr durch zu leichte Zugänglichkeit von angrenzenden Wohngebieten aus. Um die Auswahl in Frage kommender Standorte zu verbessern, wurde die ursprünglich vorgesehene Untergrenze von 70.000 Fahrzeugen je 24 h auf 60.000 gesenkt und kein Mindestanteil an Lkw vorausgesetzt. Die Tabelle 1 enthält zum Vergleich die durchschnittlichen Verkehrsstärken und Lkw-Anteile auf Außerortsstraßen in Deutschland.

So konnten einige weitere infrage kommende Standorte identifiziert werden, von denen sich nach Geländebegehungen ein Abschnitt an der A 555

zwischen den Anschlussstellen Wesseling und Bornheim in der Nähe der Ortschaft Widdig als sehr gut geeignet erwies und nach Absprache mit dem Landesbetrieb Straßen NRW und der zuständigen Autobahnmeisterei Bonn ausgewählt wurde. Dort wird zurzeit auch die Station zur Messung der Luftschadstoffe aufgebaut. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Eigenschaften des neuen Standortes und der beiden bestehenden Standorte zusammengestellt. Die Adressen der zuständigen Autobahnmeistereien finden sich im Anhang.

Die Standorte wurden so ausgewählt, dass sie auch für ggf. durchzuführende Verlagerungsunter-

	DTV Kfz/24h	Lkw-Anteil (%)
Autobahnen	47.800	15.1
Bundesstraßen	9.270	8.4
Landstraßen	3.789	8.8
Kreisstraßen	1.660	9.3

Tab. 1: Durchschnittliche Verkehrsstärken im deutschen Straßennetz nach Straßentypen (Zahlen: DIW/BMVBW 2000, Kreisstraßen: 1990)

suchungen im Boden geeignet sind. Die Ergebnisse solcher Messungen liefern Ausgangsdaten für die langfristige Prognose der Stoffverlagerung in Boden und Sickerwasser mit Hilfe von Modellrechnungen. Die dafür verwendeten Verfahren können auch bei der Beurteilung der Auswirkungen von Recyclingbaustoffen und Bauprodukten auf Boden und Sickerwasser eingesetzt werden.

Standort	A 555 Widdig	A 61 Meckenheim	A 4 Bensberg
Autobahn-km	13,2	177,4	92,7
Nächstgelegene Dauerzählstelle	Godorf/Wesseling, Nr. 5036	Ringen-Vettelhofen, Nr. 7149	Bensberg-Frankenforst, Nr. 5015
AS 1	Wesseling	Kreuz Meckenheim	Bensberg
AS 2	Bornheim	Ahrweiler	Moitzfeld
DTV (Kfz/24h)	69368	73310	71220
SV-Anteil (%)	5,4	19,8	8,5
Zahl der Fahrspuren	6	5	4
Standstreifen	beidseitig	beidseitig	beidseitig

Tab. 2: Übersicht der Eigenschaften der Messstandorte; Verkehrsdaten: BAST 2005

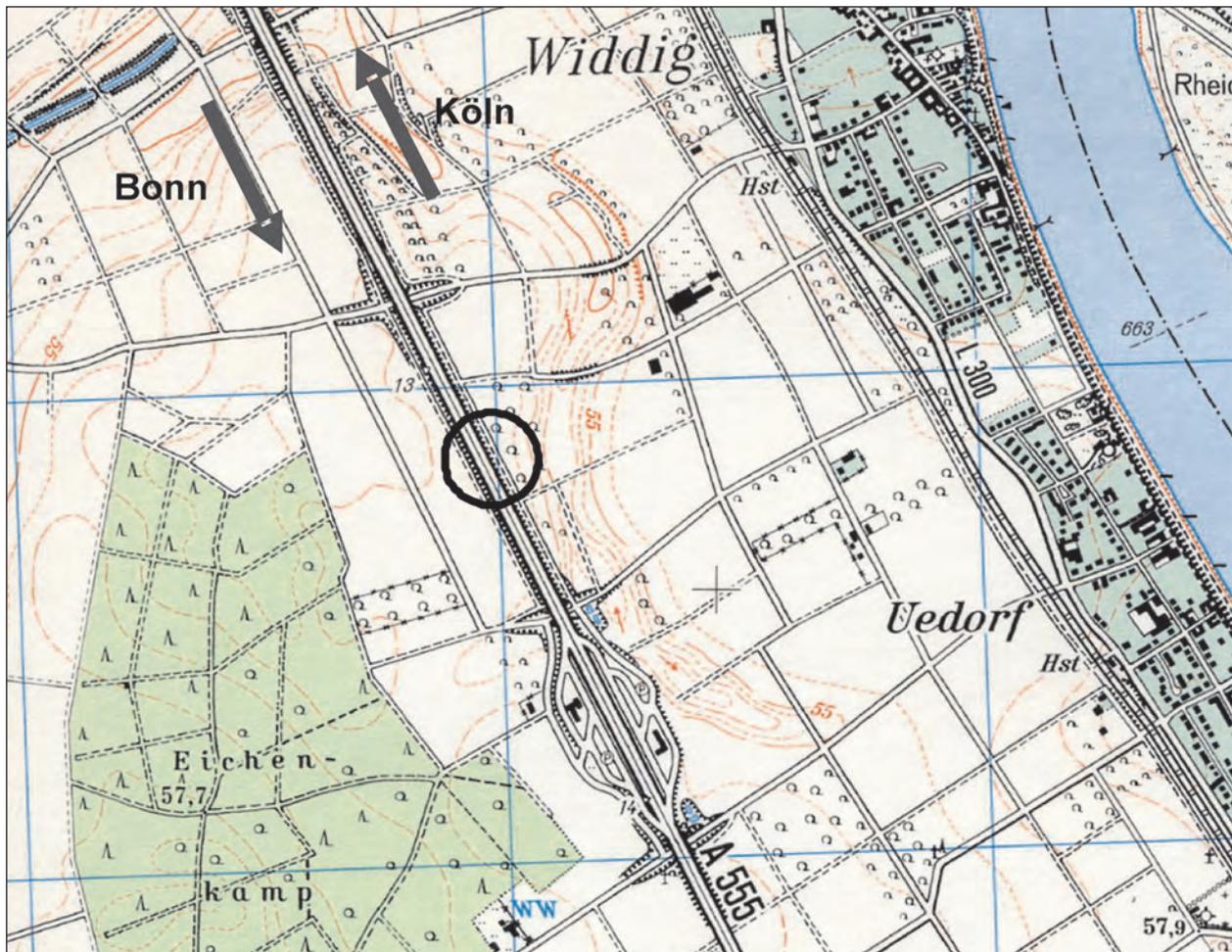


Bild 1: Messstelle A 555 Widdig, vergrößerter Ausschnitt aus TK 25 Blatt 5208 Bonn

## 2.2 Standort A 555 Widdig

Der Standort liegt nördlich von Bonn und westlich der Ortschaft Widdig an der A 555 Bonn-Köln zwischen den Anschlussstellen Bornheim und Wesseling bei km 13.2. Bild 1 zeigt die Lage des Standortes auf einem Ausschnitt der topografischen Karte TK 25, Blatt 5208 Bonn.

Der Standort liegt 57 m üNN. Die A 555 verläuft hier auf Flussaufschüttungen der eiszeitlichen Rhein-Niederterrasse. Sie haben hier die Ausprägung von oberflächlich verlehmtem, in der Tiefe kalkigem Sand mit schwer durchlässigem Lehmuntergrund (RAUFF, ZIMMERMANN, KEGEL 1916), auf dem sich Braunerden entwickelt haben. Der Autobahndamm ist an den untersuchten Stellen aus anstehendem Material geschüttet und somit sandig und gut wasserdurchlässig.

Das umgebende Gelände ist fast vollständig flach und waldfrei, bis auf das Waldstück „Eichenkamp“, das westlich des Messstandortes in ca. 400 m Entfernung beginnt (Bild 2). Der Damm ist ca. 2 m hoch, an seinem Fuß sind beidseits lockere, schmale Schutzpflanzungen aus Laubgehölzen angelegt, die in der Umgebung des Messstandortes teilweise mehrere Meter breite Lücken aufweisen (Bild 2). Die Staubbiederschlagssammler und der Abflusssammler wurden in breiteren Lücken so installiert, dass zu beiden Seiten jeweils mindestens zwei Meter Abstand zum nächsten Gehölz verbleiben, um Düseneffekte der Luftströmung zu vermeiden.

Die Fahrstreifen sind asphaltiert, der Standstreifen besteht auf beiden Seiten aus Betonplatten (Bild 2). Beiderseits und auf dem nur schwach bewachsenen Mittelstreifen sind Schutzplanken vorhanden.

Ausbauplanungen liegen nach dem Bedarfsplan für die Bundesfernstraßen (BMVBW 2004) nicht vor.

## 2.3 Standort A 61 Ringen-Vettelhoven-Meckenheim

Der Standort liegt südöstlich des Meckener Kreuzes, südlich der Ortschaft Eckendorf und nördlich der Ortschaft Vettelhoven an der A 61 Koblenz-Köln bei km 177.5 bis 177.4. Bild 3 zeigt die Lage des Standortes auf einem Ausschnitt der topografischen Karte TK 25, Blatt 5408 Ahrweiler.

Der Standort liegt 210 m üNN. Die A 61 verläuft hier auf mehrere Meter mächtigen eiszeitlichen Lößablagerungen. Sie sind am Messstandort bis zu 1.5 m entkalkt und verlehmt und bilden einen schwer durchlässigen Untergrund (EBERT, KAISER, FUCHS 1916). Der sehr flache Autobahndamm ist an den untersuchten Stellen aus anstehendem Material geschüttet und somit lehmig, nur im Bankett ist Lavagrus eingebracht, vermutlich zur besseren Entwässerung. Durch die Baumaßnahmen ist der Lößlehm in Fahrbahnnähe stark verdichtet und sehr schwer durchlässig, der Boden weist Merkmale von Pseudovergleyung auf, die auf schlechte Durchlüftung und teilweise reduzierendes Milieu hinweist.

Das umgebende Gelände ist leicht gewellt und fast vollständig waldfrei (Bild 3 und 4). Etwa 500 m südwestlich des Standortes überquert die A 61 das Tälchen des Swistbaches, das gegenüber der Umgebung etwa 10 m eingetieft ist. In 25 m Entfernung von der nordöstlichen Fahrbahnseite verläuft teilweise eine relativ dichte und hohe Hecke aus Laubgehölzen (Bild 4 rechts). Die Staubbiederschlags-



Bild 2: Umgebung des Messstandortes A 555, Blick nach Süden Richtung Bonn

messungen werden an einer Stelle ohne Hecke durchgeführt, um vollständig freie Ausbreitungsverhältnisse zu gewährleisten. Da das Bankett häufig befahren wird, wie an Reifenspuren zu erkennen ist, und das Gefälle an dieser Stelle nicht für den Abfluss in die Sammelgefäße ausreichte, wurde der Abflusssammler südöstlich der Brücke über den

Swistbach eingebaut. Damit soll das Risiko des Überfahrens des Sammlers vermindert werden. Es können dadurch eventuell höhere Zinkeinträge als an einer Stelle ohne Schutzplanke gefunden werden, dies muss bei der Datenauswertung berücksichtigt werden.



Bild 3: Messstelle A 61, Ausschnitt aus TK 25, Blatt 5408 Ahrweiler



Bild 4: Umgebung des Messstandortes A 61, Blick nach Nordwesten Richtung Köln

Der Mittelstreifen ist schmal, vollständig versiegelt und mit Schutzplanken versehen. Durch die Absicherung des Parkplatzes „Goldene Meile“ und seiner Zu- und Abfahrt sowie der benachbarten Brücke der A 4 über die Kreisstraße 34 sind in der näheren Umgebung des Messstandortes weitere kurze Abschnitte mit Schutzplanken vorhanden.

Die drei Fahrstreifen und der Standstreifen in Fahrtrichtung Köln sind asphaltiert, in Richtung Koblenz sind nur zwei Fahrstreifen plus Standstreifen vorhanden. Nach dem Bedarfsplan für die Bundesfernstraßen (BMVBW 2004) ist eine Erweiterung von 2 auf 3 Fahrstreifen auf der Westseite, Fahrtrichtung Koblenz, im „weiteren Bedarf“ enthalten.

Aufgrund der Geländegestaltung und der Lage der schon vorhandenen Abgas- und Schwebstaubmessgeräte zwischen der Parkplatzausfahrt und der Brücke über die Kreisstraße konnten auf der Luvseite keine Staubbiederschlagssammler installiert werden. Da die dort zu erwartenden Einträge

geringer sind als auf der Leeseite der Autobahn und der Standort Widdig an der A 555 sehr gute Möglichkeiten zur Untersuchung der Unterschiede zwischen Luv- und Leelage bietet, wird hier ein auf der Leeseite in größerem Abstand installierter Staubbiederschlagssammler in 1.5 m Höhe zur Ermittlung der Hintergrundbelastung als ausreichend angesehen.

## 2.4 Standort A 4 Bensberg

Der Standort liegt südlich von Bergisch Gladbach-Frankenforst im nördlichen Teil des Königsforstes an der A 4 Köln-Olpe zwischen den Anschlussstellen Bensberg und Moitzfeld bei km 92.75. Bild 5 zeigt die Lage des Standortes auf einem Ausschnitt der topografischen Karte TK 25, Blatt 5008 Köln-Mülheim.

Der Standort liegt 100 m üNN. Die A 4 verläuft hier auf den Bensberger Schichten des Unteren Devon.

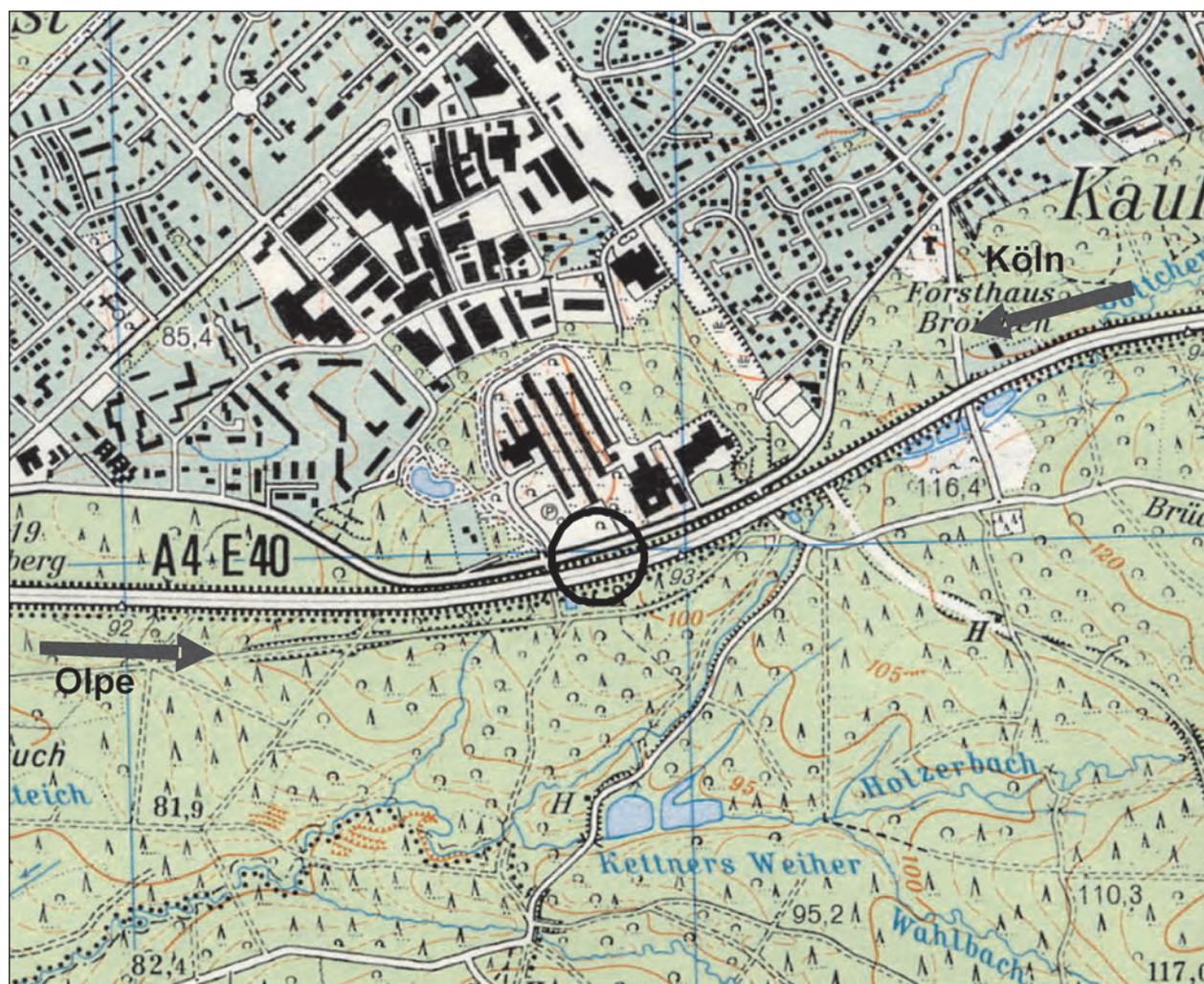


Bild 5: Messstelle A 4 Bensberg, vergrößerter Ausschnitt aus TK 25, Blatt 5008 Köln-Mülheim



**Bild 6:** Umgebung des Messstandortes A 4, Blick nach Westen Richtung Köln (angrenzend Lärmschutzwand) und nach Osten Richtung Olpe (angrenzend Laubwald)

Sie bestehen hier aus heller Arkose (Sandstein mit Gehalten von über 25 % Feldspat) mit grauem und rotem Schiefer (FLIEGEL, ASSMANN, ZIMMERMANN 1915). Diese sind teilweise zu holozänen Ablagerungen der nahe liegenden Bäche (BÖTTCHERBACH, HOLZERBACH) umgearbeitet. Sie sind am Messstandort sandig-kiesig ausgeprägt, oberflächlich entkalkt und bilden einen gut durchlässigen Untergrund, auf dem sich unter Wald eine teilweise podsolierte Braunerde entwickelt hat. Der etwa 5 m hohe Autobahndamm ist an den untersuchten Stellen aus anstehendem Material geschüttet, somit sandig/kiesig, und ebenfalls gut wasserdurchlässig.

Das umgebende Gelände ist leicht gewellt und geht nach Osten hin in die Hügel des bergischen Landes über. Auf der Südseite der A 4 ist die Umgebung vollständig, auf der Nordseite teilweise waldbedeckt. Dabei überwiegt Laubwald, einzelne Fichtenpflanzungen sind forstlich eingebracht. Auf der Nordseite verläuft 5 m neben dem Rand der befestigten Fahrbahn, noch auf dem Damm, eine 5 m hohe Lärmschutzwand aus gegliederten Betonelementen (Bild 6). Sie ist teilweise mit rankenden Pflanzen bewachsen und dient dem Schutz der anliegenden, im Wald eingebetteten Wohngebiete. Außer dem Wohngebiet befinden sich auf der Nordseite der A 4 an diesem Standort in der Nähe noch weitere bebaute Flächen wie das Gelände der BAST und ein Gewerbegebiet.

Auf beiden Seiten der Autobahn und auf dem mit bis etwa 1.5 m hohen Sträuchern bewachsenen Mittelstreifen sind Schutzplanken angebracht. Die Fahrstreifen sind asphaltiert, die Standstreifen bestehen aus Betonplatten. Nach dem Bedarfsplan

für die Bundesfernstraßen (BMVBW 2004) ist eine Erweiterung von 4 auf 6 Fahrstreifen im „weiteren Bedarf“ enthalten.

## 3 Methoden

### 3.1 Probenahme im Feld

#### 3.1.1 Staubbiederschlag

Der Staubbiederschlag wird nach der VDI-Richtlinie 2119 (1996) durch Aufstellen von Bergerhoffgefäßen (Weckgläsern) auf Ständern mit Vogelschutzkorb in 1.5 bis 2 m Höhe aufgefangen. Durch Auswiegen wird die Menge der Staubdeposition ermittelt, und die gesammelten Stäube können chemisch aufgeschlossen und auf ihre Inhaltsstoffe analysiert werden.

Diese Methode ist eine akzeptorunabhängige Methode, die den Gesamtstaubbiederschlag („bulk deposition“) erfasst. Das heißt, alle Arten von Niederschlag und die Trockenwetterdeposition werden gesammelt, da die Sammler ständig offen sind. Die Ergebnisse sind operationale Größen, die nur auf den jeweiligen Sammlertyp bezogen sind. Vor allem die trockene Deposition variiert hinsichtlich Aufkommen und Stoffinhalt sehr und hängt stark von der Oberfläche und Gestalt des Akzeptors (hier: des Sammlers) ab (DVWK-Merkblatt 229/1994). Der gebräuchlichste Sammler zur Untersuchung anorganischer Schadstoffe ist das Bergerhoffgefäß, ein „bulk-sampler“ vom Typ der Topf-Sammler.

Das Ziel der Untersuchung ist eine möglichst realistische Erfassung der Stoffeinträge in den Boden.



**Bild 7:** Berghoffgefäße in 1.5 m Höhe, Südseite der A 4 und Hintergrundmesspunkt 50 m südlich der A 4 in lockerem Laubwald



**Bild 8:** Berghoffgefäße bodennah aufgestellt in 1 m Entfernung von der Fahrbahnkante, Westseite der A 555 und Nordseite der A 4

Da die bodennahen Luftströmungsgeschwindigkeiten viel geringer sind als in der von der VDI-Richtlinie vorgesehenen Höhe von 1.5 bis 2 m, und um Spritzwasser und Sprühfahnen mit zu erfassen, wird hier von dieser Aufstellungshöhe abgewichen. Die Berghoffgefäße werden bodennah aufgestellt und dazu so in den Boden eingegraben, dass ihr oberer Rand 10 cm über der Bodenoberfläche liegt (Bild 8). Diese Methode wurde bereits in mehreren Arbeiten mit Erfolg angewandt (NORRA 1995, KOCHER/WESSOLEK 2002).

Je vier mit destilliertem Wasser gespülte Berghoffgefäße werden jeweils auf der Leeseite der Autobahnen bodennah in 1 m, 2.5 m, 5 m und 10 m Entfernung vom Straßenrand aufgestellt. Zum Vergleich werden je Messpunkt in Fahrbahnnähe und in größerer Entfernung (50 bis 150 m) Berghoffgefäße auf Ständern in 1.5 m Höhe aufgestellt, wie nach VDI-RL 2119 vorgesehen (Bild 7). Es werden Gläser mit 9.5 cm Durchmesser der Öffnung verwendet. Sie werden regelmäßig alle 30 Tage ( $\pm 1$  Tag) durch frische ersetzt, verschlossen und bis zu

weiteren Bearbeitung im Labor kühl und dunkel aufbewahrt.

### 3.1.2 Straßenabflusswasser

#### 3.1.2.1 Bestimmung der Abflussmenge und Probenahme zur Bestimmung der Wasserinhaltsstoffe

Zur Sammlung von Abflusswasser von Straßen ist keine Standardmethode definiert.

Die Messstellen weisen keine Hochborde auf, welche die Einträge in die benachbarten Böden beeinflussen würden und eine Korrelation mit der Gesamtdeposition nach Kapitel 3.3.1 stören würden. An den ohne seitliche Einfassung endenden Fahrbahnen erfolgt die Beprobung durch speziell entwickelte Abflusssammler direkt am Rand der versiegelten Straßenoberfläche.

Der Bau der Abflusssammler erfolgte nach einer Idee des Department of Air Quality der Netherlands Energy Research Foundation ECN (Bild 9 links). Dieser Sammlertyp wurde anfangs an der A 555 und A 61 verwendet. Bild 9 (rechts) zeigt den Sammlertyp, der seit Mitte 2005 an der A 555 und A 61 eingebaut ist. Die Konstruktion wurde

modifiziert, um bessere Stabilität und besseren Sedimenttransport im Sammler zu erreichen. Die Sammler bestehen vollständig aus Plexiglas. Die Zuführung des Straßenabflusses erfolgt durch eine kurze Rampe aus wasser- und frostfestem Zement, die direkt an der Straßenkante anschließt, die Abführung des gesammelten Straßenabflusses in die Sammelgefäße erfolgt über die Ablaufstutzen in PE-Schläuchen.

Die Sammler beproben eine Strecke von 0,5 lfdm Straße. Diese verhältnismäßig kleine Ausführung der Sammler ermöglicht die vollständige Erfassung der gesamten abgeflossenen Wassermenge und die Gesamtauswaage an abfiltrierbaren Stoffen.

Die Sammler sind in fünf gleich große Kammern unterteilt, die jeweils über einen separaten Abflussschlauch aus PE in die tiefer liegenden Sammelgefäße entwässern. Zu den regelmäßigen Beprobungsterminen wird die angefallene Probenmenge erfasst. Aus jedem Sammelgefäß wird eine repräsentative Teilprobe von etwa 1 Liter Abflusswasser und abgespültem Straßensediment entnommen und in Duranglasflaschen bis zur Analyse aufbewahrt.



**Bild 9:** Abflusssammler: rechts der erste Sammlertyp, links die verbesserte Sammlerkonstruktion

### 3.1.3 Bodenproben

Die Bodenbeprobung erfolgte in 0 bis 10 cm Tiefe und in 1 m, 2.5 m, 5 m und 10 m Entfernung vom befestigten Straßenrand, sofern die räumlichen Verhältnisse dies erlaubten. Es wurden je Probe etwa 1.5 kg Bodenmaterial als Mischprobe aus mehreren Einstichen entnommen, in verschlossenen PE-Tüten transportiert und bis zur weiteren Bearbeitung im Labor kühl und dunkel gelagert. Die Körnung wurde nach AG Boden (1994) mit der Fingerprobe im Feld ermittelt.

## 3.2 Labormethoden

### 3.2.1 Staubniederschlag

#### 3.2.1.1 Menge des Staubniederschlages

Die Menge des Staubniederschlages je Beprobungszeitraum wird weitgehend entsprechend der VDI-RL 2119 ermittelt. Da die Feststoffe und das Filtrat zusätzlich auf ihre Gehalte an Schwermetallen und anderen Elementen hin untersucht werden, werden entsprechend vorgereinigte Laborgeräte verwendet und die Vorgehensweise der DIN so geändert, dass keine Fremdstoffe eingetragen werden können.

Aus den Depositionsgefäßen werden im Labor Insekten oder Blätter entfernt und abgespült, danach wird im Trockenschrank die Flüssigkeit (Niederschlagswasser) bei 60 °C verdunstet. Dann werden die Stäube mit Reinstwasser und mit Hilfe eines Teflonwischers in die später zum Aufschluss verwandten Teflontiegel überführt und im Trockenschrank

bei 105 °C getrocknet. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur im Exsiccator wird das Gewicht des Staubniederschlags bestimmt und in die Einheit  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  umgerechnet.

#### 3.2.1.2 Inhaltsstoffe des Staubniederschlages – Aufschluss

Die aus dem Straßenabfluss abfiltrierten Stoffe und die Depositionstäube werden mit einem Gemisch aus Salpetersäure und Flusssäure aufgeschlossen. Der Aufschluss dient dazu, die in der Probe vorhandenen anorganischen Stoffe, insbesondere Schwermetalle, in eine lösliche Form zu bringen, damit ihre Konzentration in der Probe genau bestimmt werden kann. Der Aufschluss wurde gegenüber den in VDI-RL 2267, Blatt 14 vorgeschlagenen Aufschlussmöglichkeiten etwas geändert, um mit Sicherheit alle in den Proben enthaltenen Schwermetallanteile vollständig aufzuschließen.

Die Proben werden dazu mit Flusssäure (HF) und Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) versetzt und in einem vollständig geschlossenen Mikrowellensystem aufgeschlossen (Bild 10). Damit können sowohl Elementverluste durch Verflüchtigung wie auch der Kontakt des Laborpersonals mit Säuredämpfen praktisch vollständig vermieden werden. Die Flusssäure und das in der Probe enthaltene Silizium bzw.  $\text{SiF}_4$  werden anschließend im gleichen Gerät abgeraucht. Die dabei entstehenden Gase werden durch einen Flusssäure-Wäscher geleitet und dort durch Fällung in einer  $\text{CaOH}_2$ -Lösung abgetrennt.



Bild 10: Mikrowellen-Aufschlussanlage (links) mit nachgeschaltetem Flusssäure-Wäscher (rechts)

### 3.2.1.3 Analyse der Aufschlusslösungen

Die Bestimmung der Schwermetall-, Natrium- und Calciumkonzentrationen in den aufgeschlossenen Proben von Depositionsstaub, Feststoffen des Straßenabflusses und Bodenmaterial sowie den filtrierten Proben des Straßenabflusses erfolgt durch Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES). Um eine niedrigere Bestimmungsgrenze zu erreichen, wird die Cadmiumkonzentration durch Graphitrohr-Atom-Absorptions-Spektrometrie (G-AAS) bestimmt.

## 3.2.2 Straßenabflusswasser

### 3.2.2.1 pH-Wert und Leitfähigkeit

Im Labor erfolgt die Messung von pH-Wert und Leitfähigkeit in den Originalgefäßen, wobei die Messgeräte nach jeder Probe gut mit Reinstwasser abgespült und mit Einmaltuch getrocknet werden. Es wird ein pH-Meter der Fa. WTW mit temperaturkorrigierter Einstabmesskette verwendet. Zur Messung der Leitfähigkeit kommt ein Messgerät derselben Firma zum Einsatz.

### 3.2.2.2 Trennung von Feststoff und gelösten Anteilen (Filtration)

Die Menge der abfiltrierbaren Substanz wird weitgehend entsprechend der DIN 38409-02 (3/1987) ermittelt. Da die Feststoffe und das Filtrat auf ihre Schwermetallgehalte hin untersucht werden sollen, werden entsprechend vorgereinigte Laborgeräte verwendet und die Vorgehensweise so geändert, dass keine Fremdstoffe eingetragen werden können.

Zur Bestimmung des Feststoffgehaltes des Straßenabflusses werden jeweils mehrere Liter Abflusswasser inklusive Sediment aus der 50-l-Auffangflasche über Papierfilter filtriert und das Gewicht des Filtrates bezogen auf die Menge des filtrierten Wassers ermittelt. Dazu wurden die Papierfilter 595 1/2 der Firma Schleicher & Schüll mit einem Durchmesser von 150 mm vor dem Filtrieren durch Spülen mit 200 ml Reinstwasser und Trocknen konditioniert und nach Abkühlung im Exsikkator gewogen. So werden eventuell im Filtermaterial enthaltene Salze vollständig ausgewaschen. Dadurch werden sowohl Verfälschungen des Probengewichts wie auch der Inhaltsstoffe vermieden. Nach dem Filtrieren werden die Filter wieder bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und erneut das Gewicht bestimmt. Die Differenz aus

Ein- und Auswaage ergibt das Feststoffgewicht bzw. – bezogen auf die filtrierte Wassermenge – die Feststoffkonzentration. Zur Kontrolle wurde zusätzlich bei den ersten Beprobungen der gesamte Inhalt einer 10-l-Auffangflasche filtriert und das Filtratgewicht ermittelt.

### 3.2.2.3 Gesamtaufschluss der abfiltrierten Stoffe des Straßenabflusses

Die getrockneten Filter werden in säuregespülten Porzellantiegeln 24 h bei 300 °C im Muffelofen verascht, um den Einsatz oxidierender Säuren beim Aufschluss zu minimieren und das Volumen so zu reduzieren, dass die Proben in die Aufschlussiegel passen. Die Tiegel werden dabei mit einem Porzellandeckel abgedeckt, um eventuell aufliegende Asche zurückzuhalten. Die relativ niedrig gewählte Temperatur dient dazu, das Entweichen leichtflüchtiger Schwermetalle wie z. B. Cadmium zu verhindern. Die veraschten Filter werden in jeweils einen Teflontiegel überführt und wie die Depositionsstäube weiterbehandelt und aufgeschlossen.

### 3.2.2.4 Analyse der Aufschlusslösung aus den Feststoffen

Die Analyse der Aufschlusslösung aus den Feststoffen wird wie bei den aufgeschlossenen Depositionsproben durchgeführt.

### 3.2.2.5 Analyse des Filtrates

Die Analyse des Filtrates des Straßenabflusswassers wird wie bei den aufgeschlossenen Depositionsproben durchgeführt.

## 3.2.3 Bodenproben

### 3.2.3.1 Trocknen, Sieben, Mahlen

Die Bodenproben werden im Labor im Trockenschrank mit Frischluftzufuhr bei 30 °C luftgetrocknet. Jede Probe wird vollständig mit einem 2-mm-Analysensieb in Feinboden < 2 mm und Skelett > 2 mm getrennt. Dazu werden Bodenaggregate wenn notwendig im Porzellanmörser zerteilt. Das auf 2 mm gesiebte Material wird zur Aufbewahrung in Hartkunststoffbehälter gefüllt. Aus dem Feinbodenmaterial werden mit einem Probenteiler etwa 10 g repräsentative Probe abgeteilt und in Achatgefäßen mit einer Scheibenschwingmühle analysenfein gemahlen. Achatgefäße haben nur einen sehr geringen Abrieb und bestehen praktisch vollständig

aus Siliziumdioxid. So können beim Mahlen keine metallischen Verunreinigungen in die Probe gelangen.

### 3.2.3.2 Bestimmung von pH-Wert und Leitfähigkeit

Von den lufttrockenen Bodenproben werden je 10 g in Kunststoffbecher eingewogen und mit 25 ml 0.01-molarer  $\text{CaCl}_2$ -Lösung bzw. 25 ml deionisiertem Wasser aufgefüllt. Die Gefäße werden verschlossen und kurz geschüttelt, um die vollständige Benetzung des Bodens zu erreichen. Nach mindestens einer Stunde Standzeit und nochmaligem Aufschütteln werden der pH-Wert in Wasser und in  $\text{CaCl}_2$ -Lösung sowie die elektrische Leitfähigkeit bestimmt (mit denselben Messgeräten wie bei den Straßenabflussproben). Der pH-Wert in Wasser zeigt die aktuelle, z. B. jahreszeitlich veränderliche pH-Situation des Bodens an. Der pH-Wert in  $\text{CaCl}_2$ -Lösung zeigt zusätzlich die mobilisierbaren  $\text{H}^+$ -Ionen an den Ionenaustauscherplätzen des Bodenmaterials und liegt deswegen niedriger. Er ist im Jahreslauf in etwa konstant und wird deswegen zum Vergleich verschiedener Standorte verwendet.

### 3.2.3.3 Aufschluss mit Königswasser

Die Schwermetallkonzentrationen in den Bodenproben wurden aus den gesiebten, gemahlene Proben aus dem Königswasseraufschluss (DIN ISO 11466 1997-06) bestimmt.

Der Aufschluss mittels Königswassers nach o. g. DIN ISO ist in der BBodSchV vorgeschrieben, um eine Beurteilung der potenziellen Gefährdung eines Bodens durch Schadstoffbelastung anhand der Vorsorgewerte vorzunehmen. Dieses Verfahren ist zur Ermittlung der Schwermetallbelastung von Böden weit verbreitet, ein vergleichbares Verfahren (DIN 38414-7) war in der Klärschlammverordnung (Abf-KlärV 1982) für Bodenproben vorgeschrieben.

Die mit diesem Verfahren extrahierbaren Gehalte werden häufig als Gesamtgehalte bezeichnet. Diese Bezeichnung ist nicht ganz richtig, da das Bodenmaterial durch Königswasser nicht vollständig in Lösung gebracht wird, bestimmte Silikate und Oxide werden nicht aufgeschlossen. „Die Extraktionsausbeute ist je nach Element und Matrix verschieden, z. B. werden die Gehalte an Cr erheblich unterschätzt, die Gehalte an Ni, Cu, Zn, Cd und Pb werden in der Regel zu mehr als 80 % erfasst, in quarzreichen, sandigen Böden können auch bei

diesen Elementen die Minderbefunde größer als Faktor 2 werden“ (DIN ISO 11466, 06.97: Nationales Vorwort; Anmerkung 1). Die als unlöslicher Rest verbleibenden Minerale, im Wesentlichen Quarz, verwitterungsstabile Schwerminerale und Titanoxide, weisen in der Regel nur noch geringe Gehalte an Schwermetallen auf, die darüber hinaus ausschließlich lithogenen Ursprungs sind (BLUME 1990). Anthropogen zugeführte Mengen werden dagegen vollständig gelöst. Dies ist für die Fragestellung der wichtigste Anteil.

Der Vorteil dieser Methode besteht in ihrem hohen Standardisierungsgrad und ihrer guten Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit. Sie wurde in Ringuntersuchungen der VDLUFA getestet und in einer DIN als Standardverfahren festgelegt, es stehen umfangreiche Ergebnisse mit dieser Methode und zertifizierte Referenzproben zur Verfügung.

### 3.2.3.4 Analyse der Aufschlusslösung der Bodenproben

Die Bestimmung der Schwermetall-, Natrium- und Kalziumkonzentrationen in den aufgeschlossenen Bodenproben erfolgte durch Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES).

## 4 Ergebnisse der Bodenuntersuchungen

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen werden mit Literaturdaten und den Vorsorgewerten der Bodenschutzverordnung verglichen, um die Einordnung in das dort festgestellte Wertespektrum zu ermöglichen.

### 4.1 Bodeneigenschaften und Stoffbestand

Die pH-Werte und Leitfähigkeiten zweier Tiefenprofile am Standort A 61 in 1 m und 10 m Entfernung vom Fahrbahnrand, eines Entfernungsprofils am Standort A 555 und für den Standort an der A 4 zwei Messwerte in Fahrbahnnähe sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Deutlich zu erkennen sind an allen Standorten die in Fahrbahnnähe erhöhten pH-Werte, die auch stark von den unterschiedlichen Ausgangsmaterialien geprägt sind. Das sandige Substrat an der A 555 weist in Fahrbahnnähe nur pH-Werte von knapp über 7 auf, in der angrenzenden

Standort	Nutzung/Bewuchs und Entfernung zum Fahrbahnrand	Beprobungstiefe	pH-Wert (in H <sub>2</sub> O)	Leitfähigkeit ms/cm
A 61	Bankett 1 m	0-10 cm	8,37	4,05
A 61	Bankett 1 m	0-23 cm	9,58	2,71
A 61	Bankett 1 m	23-45 cm	9,42	4,9
A 61	Grünland 10 m	0-10 cm	8,14	2,94
A 61	Grünland 10 m	10-20 cm	8,13	1,84
A 61	Grünland 10 m	20-48 cm	8,26	1,52
A 61	Grünland 10 m	48- > 60 cm	8,64	1,79
A 555	Bankett 1 m	0-10 cm	7,28	1,72
A 555	Acker 5 m	0-10 cm	6,43	0,58
A 555	Acker/Grünbrache 15 m	0-10 cm	6,25	0,63
A 4	Bankett 1 m	0-10 cm	6,77	3,27
A 4	Bankett 0,2 m	0-10 cm	8,13	2,53

Tab. 3: pH-Werte in Wasser und Leitfähigkeiten des Bodenmaterials

den Grünbrache liegen die Werte etwa eine pH-Stufe tiefer. Das ebenfalls sandige Substrat an der A 4 weist einen erstaunlich starken Unterschied der pH-Werte von anderthalb pH-Stufen über eine Entfernung von nur 0.8 m auf. Möglicherweise liegt hier ein Einfluss von Fremdmaterial vor. Das lehmigsteinige Substrat an der A 61 dagegen zeigt relativ homogene pH-Werte, die in die Tiefe deutlich ansteigen. Die Lage aller Werte oberhalb von pH 8 und das Ansteigen schon in relativ geringer Tiefe deuten hier auf das Vorhandensein von Kalk im Boden hin, während die Böden der beiden anderen Standorte bis auf die Probe an der A 4 in 0.2 m Entfernung kalkfrei sind. Die Leitfähigkeit des in Wasser suspendierten Bodenmaterials ist in Fahrbahnnähe und in der Nähe der Bodenoberfläche deutlich erhöht, wahrscheinlich durch Tausalzeinsatz bedingt.

An der A 555 ist der Skelettanteil (Materialanteil > 2 mm in Massen-%) im anstehenden Boden mit < 2 % sehr gering, im Bankett dagegen bis 35 %. Der Boden ist gut wasser- und luftdurchlässig und weist eine geringe Lagerungsdichte auf.

An der A 61 ist der Skelettanteil im anstehenden Boden hoch und stark schwankend, er liegt zwischen 5 % bis fast 30 %. Zum Teil sind Blöcke aus Verwitterungsresten des unterliegenden Festgesteins zu finden. Im Bankett liegt der Skelettanteil durch eingebrachten Lavagrus ebenfalls hoch. Das Bankett ist verdichtet, aber grabbar und gut wasser- und luftdurchlässig. Der anstehende Boden dagegen weist im natürlichen Zustand schon hohe Lagerungsdichten auf und ist durch die Baumaßnah-

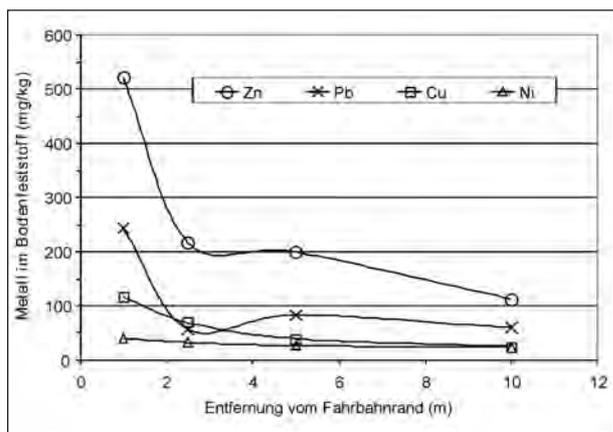
men in Fahrbahnnähe sehr stark verdichtet. Dadurch ist er schwer wasser- und luftdurchlässig und kaum grabbar. Deswegen und durch den hohen Gehalt an nicht gerundeten Steinen ist er schlecht für Stoffverlagerungsuntersuchungen geeignet, da Messgeräte zur Entnahme von Bodenwasser und zur Untersuchung des Bodenwasserhaushaltes kaum unzerstört eingebaut werden können und Modellrechnungen für Stofftransport in inhomogenem lehmigem Substrat mit hohen Fehlern behaftet sind.

An der A 4 ist der Skelettanteil im Bankett mit 5 % eher niedrig, im anstehenden Boden liegt er durch den Kiesanteil etwa in derselben Höhe. Auch hier ist der Boden gut wasser- und luftdurchlässig und die Lagerungsdichte gering. Sowohl der Standort an der A 555 als auch der an der A 4 sind gut für Stoffverlagerungsuntersuchungen geeignet, da Messgeräte zur Entnahme von Bodenwasser und zur Untersuchung des Bodenwasserhaushaltes in den sandigen oder nur anlehmigen Boden gut eingebaut werden können. Modellrechnungen für sandiges Substrat mit geringem Steinanteil sind gut durchführbar.

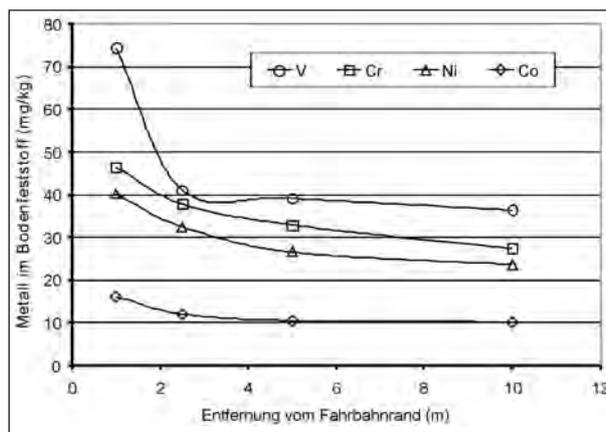
Die Bilder 11 und 12 zeigen die Entfernungsabhängigkeit der Schwermetalle und einiger Indikatorelemente am Standort A 61. Die Indikatorelemente Vanadium, Molybdän und Cobalt wurden ausgewählt, weil technische Anwendungen, hier der Straßenverkehr, als eine ihrer Hauptquellen gelten. Für sie sind keine Vorsorgewerte in der Bodenschutzverordnung festgelegt. Molybdän war nur in der fahrbahnnächsten Probe bestimmbar. Die anderen Werte lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze, sodass kein Verlauf in der Abbildung dargestellt werden kann.

Alle Metalle zeigen in Straßennähe erhöhte Werte. Besonders auffällig ist der Anstieg bei Zink, Blei und Kupfer, die in 1 m Entfernung die vier- bis fünffache Konzentration wie in 10 m Entfernung aufweisen (Bild 11). Auch Vanadium erreicht in 1 m Entfernung vom Fahrbahnrand fast die doppelte Konzentration wie in 2.5 und 10 m Entfernung. Cobalt, Chrom und Nickel dagegen erreichen in Fahrbahnnähe nur etwa die anderthalbfache Konzentration wie in 10 m Entfernung und weisen einen allmählichen Konzentrationsabfall auf (Bild 12).

Die Metalle Blei, Kupfer und Zink überschreiten bis zur Entfernung von 5 m bis 8 m vom Fahrbahnrand die Prüfwerte für die Bodenart Lehm/Schluff (70/40/150 mg/kg), die an diesem Standort anzu-



**Bild 11:** Verteilung von Schwermetallen im Bodenfeststoff am Standort A 61 (0 bis 10 cm Tiefe)



**Bild 12:** Verteilung von Indikatorelementen im Bodenfeststoff am Standort A 61

Böden	Cadmium	Blei	Chrom	Kupfer	Quecksilber	Nickel	Zink
Bodenart Ton	1,5	100	100	60	1	70	200
Bodenart Lehm/Schluff	1	70	60	40	0,5	50	150
Bodenart Sand	0,4	40	30	20	0,1	15	60
Böden mit naturbedingt und großflächig siedlungsbedingt erhöhten Hintergrundgehalten	unbedenklich, soweit eine Freisetzung der Schadstoffe oder zusätzliche Einträge nach § 8 Abs. 2 und 3 dieser Verordnung keine nachteiligen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen erwarten lassen						

**Tab. 4:** Vorsorgewerte für Bodenfeststoff (BMU 1999)

wenden wären (Tabelle 4). Cadmium überschreitet den Vorsorgewert von 1 mg/kg nur in der fahrbahnächsten Probe mit dem Wert von 1.5 mg/kg, alle anderen Konzentrationen liegen unter 0.8 mg/kg.

Die gemessenen Schwermetallkonzentrationen weisen denselben absinkenden Verlauf mit zunehmender Entfernung vom Fahrbahnrand auf, wie er aus der Literatur und eigenen Untersuchungen bekannt ist. Die Konzentrationen liegen genau im Bereich der Werte, die in anderen Arbeiten an vielbefahrenen Straßen festgestellt wurden. Dazu sind Daten aus der Literaturlauswertung in KOCHER/PRINZ 1998 in Tabelle 12 im Anhang zusammengestellt.

## 5 Ergebnisse der Messperiode 2005/2006

Bei der Darstellung der Ergebnisse wird der beprobte Autobahnquerschnitt jeweils als „Messstandort“ bezeichnet (A 555, A 61, A 4), der halbe Querschnitt als „Messstelle“ (A 555 West, A 555 Ost, A 61 Ost, A 4 Süd, A 4 Nord) und eine einzelne Entfernung als „Messpunkt“ (Beispiel „A 61 E

10“ = A 61, Ostseite, 10 m Entfernung vom Rand der asphaltierten Fläche). Die Grenze zwischen der befestigten Straßenfläche und dem unbefestigten Seitenstreifen wird als Bezugspunkt für die Ermittlung des Abstandes der Messpunkte vom „Emissionsort“ verwendet und wird im folgenden als „Rand der Fahrbahn“ bezeichnet. „SN“ wird in den Grafiken als Kurzbezeichnung für den Gesamtstaubniederschlag verwendet.

Mit den Ergebnissen kann die Höhe der Stoffeinträge bestimmt werden. Es können aber auch Annahmen zur Verteilung der Emissionen im Straßenseitenraum überprüft werden. Diese Annahmen sind Übertragungen aus den Erkenntnissen über die Ausbreitung von Luftschadstoffen, und wurden an bodennahen Stoffeinträgen bisher nicht untersucht:

- Es besteht ein Unterschied in den Gesamtstoffeinträgen zwischen der windzugewandten und der windabgewandten Seite der Autobahnen:
  - Der straßennahe Stoffeintrag ist auf der Leeseite höher.
  - Die eingetragenen Stoffe verteilen sich auf der Leeseite über einen größeren Entfernungsbereich.

- Es besteht kein Unterschied im Stoffeintrag zwischen Straßen, die quer und parallel zur Hauptwindrichtung liegen. Nur die räumliche Verteilung (Luv/Lee) ist verschieden.
- Es besteht ein Unterschied in den Gesamtstoffeinträgen zwischen einem Straßenabschnitt mit Entwässerung der gesamten Straßenbreite über das Bankett und einem Abschnitt mit Entwässerung einer oder mehrerer Fahr- bzw. Standstreifen in Regenwasserkanäle: Der Stoffeintrag ist bei freier Entwässerung über das Bankett höher.
- Es besteht ein Unterschied in den Gesamtstoffeinträgen zwischen Straßen mit gleicher Verkehrsstärke, aber unterschiedlichen Lkw-Anteilen: Der Stoffeintrag ist bei höherem Lkw-Anteil höher.
- Es besteht ein Unterschied in den Gesamtstoffeinträgen zwischen Straßen mit freier Schadstoffausbreitung und Straßen, an denen Geländegegebenheiten, Hecken und Wald oder Lärmschutzeinrichtungen die Strömungsgeschwindigkeit vermindern: Der straßennahe Stoffeintrag ist bei Vorhandensein von Strömungshindernissen höher.
- Es besteht ein Unterschied in den Gesamtstoffeinträgen zwischen Straßen unterschiedlicher Verkehrsstärke: Der Stoffeintrag ist bei höherer Verkehrsstärke höher.

Die Eigenschaften der ausgewählten Messstandorte lassen trotz einer Überlagerung verschiedener Einflüsse die Überprüfung der meisten Thesen zu. Da die Verkehrsstärken der drei Standorte sehr ähnlich sind, kann die Abhängigkeit des Stoffeintrages von der Verkehrsstärke nicht untersucht werden. Der Einfluss von Strömungshindernissen und der Lage quer oder parallel zur Hauptwindrichtung kann an der A 4 und A 555 betrachtet werden. Allerdings überlagern sich diese beiden Faktoren, da die A 4 beidseitig Strömungshindernisse aufweist und parallel zur Hauptwindrichtung verläuft, während die A 555 bis auf eine lückige Schutzpflanzung freie Ausbreitungsbedingungen aufweist und quer zur Hauptwindrichtung liegt. Dagegen können sehr gut die Luv/Lee-Verteilung am Standort A 555, entwässerungsbedingte Unterschiede an der A 4 und der Einfluss des Lkw-Anteils im Vergleich aller drei Standorte untersucht werden.

## 5.1 Staubniederschlag – bulk deposition

Der Gesamtstaubniederschlag wird in  $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$  angegeben. Er liegt nach einer Vergleichsuntersuchung in VDI-RL 2119 zwischen  $6 \text{ mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$  (ländliche Höhenlage, gering belastet) und  $530 \text{ mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$  (Industriegebiet in Ballungsraum). Dieser Wertebereich wird in 1.5 m Höhe an der A 555 und A 4 im Jahresmittel auch 1 m neben der asphaltierten Fahrbahnfläche nicht überschritten (Tabelle 24, 26, 30, 32 im Anhang). An der A 61 treten dagegen in 2.5 m Entfernung deutlich höhere Werte auf. An der A 555 zeigen die beiden Hintergrundmessstellen in 100 m Entfernung vom Fahrbahnrand ebenfalls höhere Werte. Beide stehen auf bzw. am Rand von Ackerflächen, die über Teile des Jahres nicht bewachsen sind. Die bodennahen Messpunkte weisen dagegen zum Teil wesentlich höhere Gesamtstaubniederschläge auf als die in 1.5 m Höhe.

Typische Depositionsraten ausgewählter Elemente im Gesamtstaubniederschlag sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Sie werden je nach Größenordnung in  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$  oder  $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$  angegeben.

Element	Deposition $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	
	ländlich	städtisch
Gesamtstaubniederschlag $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	6	530
Aluminium Al	200 bis 400	300 bis 500
Arsen As	0,1 bis 1,4	0,7 bis 2,2
Blei Pb	10 bis 20	20 bis 35
Cadmium Cd	0,2 bis 0,6	0,3 bis 1,0
Calcium Ca	1.000 bis 5.000	1.000 bis 27.000
Chrom Cr	1 bis 5	5 bis 10
Eisen Fe	300 bis 600	1.000 bis 4.000
Kalium K	400 bis 500	400 bis 1.000
Kobalt Co	0,1 bis 0,5	1
Kupfer Cu	5 bis 10	10 bis 50
Magnesium Mg	300 bis 1.000	500 bis 1.000
Mangan Mn	10 bis 30	50 bis 300
Natrium Na	1.000 bis 5.000	1.000
Nickel Ni	1 bis 3	5 bis 20
Vanadium V	2 bis 10	10 bis 70
Zink Zn	10 bis 60	100 bis 1.000

Tab. 5: Typische Niederschlagsbereiche von Elementen (aus VDI-RL 2267, Blatt 14)

Tabelle 6 zeigt im Vergleich dazu den Gesamtstaubniederschlag und die Depositionsraten verschiedener Elemente an den Hintergrundmesspunkten der drei Standorte. Die Werte liegen an der A 4 und auf der Westseite der A 555 in den typischen Wertebereichen der Tabelle 5. Die Messpunkte in 100 m Entfernung von der Ostseite der A 555 und erstaunlicherweise auch in 130 m Entfernung von der Westseite der A 61 zeigen dagegen etwas erhöhte Gesamtstaubniederschläge, erhöhte Depositionsraten für Calcium, Kupfer, Vanadium und Zink und sehr stark erhöhte Depositionsraten für Blei (nur A 61), Eisen und Natrium. Offensichtlich können diese Messpunkte nicht als echte Hintergrundmesspunkte betrachtet werden. Zwar weisen die hohen Calciumeinträge auch auf einen möglichen Einfluss umliegenden Bodenmaterials hin, auch ein Teil der Eiseneinträge könnte so zu erklären sein, aber die sehr hohen Natriumkonzentrationen zeigen eindeutig, dass der Einfluss der Straße für diese drei Elemente hier noch festzustellen ist.

Die Ergebnisse für alle hier untersuchten Elemente finden sich in den Tabellen 13 bis 32 im Anhang. Es fällt vor allem auf, dass der über den Messzeitraum gemittelte Eintrag von Na sowohl am Fahrbahnrand als auch in größerer Entfernung und 1.5 m Höhe (Bilder 16 bis 21) sehr hoch sein kann. Selbst am straßenfernsten Messpunkt 150 m südlich der A 4 im Wald wird der Bereich von 1 bis 5 mg/m<sup>2</sup>\*d, der in Tabelle 5 als typischer Wertebereich angegeben ist, leicht überschritten (Bild 23). An den getrockneten Staubbiederschlagsproben lässt sich der hohe Salzgehalt teilweise anhand von Kristallen offensichtlich feststellen (Bild 30). Die Konzentrationen und Depositionsraten von Calcium und Eisen sind fast ebenso hoch wie die von Natrium (Bild 13 und 14).

Alle bodennahen Schwermetalldepositionsraten (Tabelle 7) überschreiten die typischen Bereiche in Tabelle 5, der Staubbiederschlag in 1.5 m Höhe weist dagegen teilweise so niedrige Einwaagen und Gehalte an Schwermetallen auf, dass die Bestim-

Element	Straßenferne Deposition in 1.5 m Höhe µg/(m <sup>2</sup> *d)			
	A 555 W (Luv) 100 m	A 555 E (Lee) 100 m	A 61 (Luv) 130 m	A 4 (Wald) 150 m
Gesamtstaubniederschlag mg/(m <sup>2</sup> *d)	640	740	360	152
Blei Pb	n. n.	5.54	149	n. n.
Cadmium Cd	0.63	0.52	0.69	0.152
Calcium Ca	2.130	37.800	10.700	2.590
Eisen Fe	1.190	30.300	7.310	1.210
Kupfer Cu	44	19	273	25
Natrium Na	13.800	112.000	22.900	3.040
Vanadium V	14.3	266	31.7	3.48
Zink Zn	76.1	1.949	197	61.2

Tab. 6: An den Messstellen ermittelte Hintergrund-Depositionsraten einiger Elemente (Mittelwerte über den Messzeitraum)

Element	Deposition in 0.1 m Höhe am Fahrbahnrand µg/(m <sup>2</sup> *d)				
	A 555 W (Luv)	A 555 E (Lee)	A 61 E (Lee)	A 4 Süd	A 4 Nord
Gesamtstaubniederschlag mg/(m <sup>2</sup> *d)	2.930	4.270	8.210	3.380	3.040
Blei Pb	275	407	623	288	300
Cadmium Cd	3.15	6.38	5.22	4.76	5.08
Calcium Ca	71.440	101.520	247.500	80.520	71.670
Eisen Fe	69.120	106.950	205.830	68.690	68.930
Kupfer Cu	580	748	1.557	697	789
Natrium Na	129.800	231.000	396.200	162.000	190.400
Vanadium V	144	229	581	136	129
Zink Zn	1.439	2.153	4.132	2.222	2.132

Tab. 7: An den Messstellen in 1 m Abstand vom Fahrbahnrand bodennah ermittelte Depositionsraten einiger Elemente (Mittelwerte über den Messzeitraum)

mungsgrenze in der Aufschlusslösung nicht erreicht wird.

Für Blei, Cadmium und Chrom liegen die meisten der Werte in 1.5 m Höhe oberhalb der typischen Bereiche, für Zink liegen sie im unteren Bereich der als typisch angegebenen Depositionsrates von 100 bis 1.000 µg/m<sup>2</sup>\*d in städtischen Gebieten (Tabelle 13 bis 32 im Anhang).

Im Folgenden werden die Mittelwerte der Messungen über den gesamten Messzeitraum vorgestellt und diskutiert. Sie ergeben trotz hoher Variabilität der Einzelmessungen ein konsistentes Bild der Elementeinträge in den Straßenseitenraum.

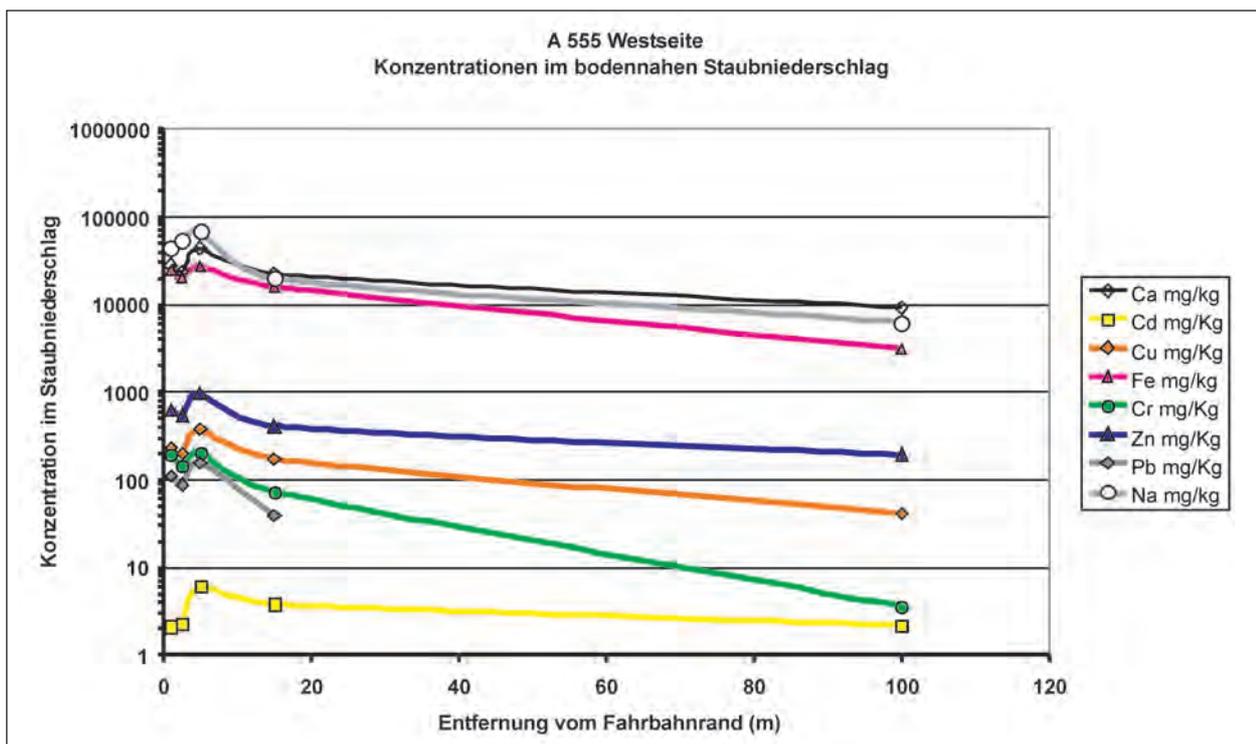
**5.1.1 Räumliche Verteilung**

An jeder Messstelle weist die räumliche Verteilung der Konzentrationen aller untersuchten Stoffe im Staubbiederschlag einen ähnlichen Verlauf auf. Das gilt sowohl für die bodennahen als auch für die in 1.5 m Höhe gemessenen Werte. Als Beispiel sind in Bild 13 und 14 die Mittelwerte der Konzentrationen der wichtigsten Elemente im bodennahen Staubbiederschlag und in 1.5 m Höhe für die Westseite der A 555 dargestellt. Der Hintergrundmesspunkt in 100 m Entfernung ist ebenfalls dargestellt. Auffällig ist hier, dass das bodennahe Konzentra-

tionsmaximum aller Stoffe in 5 m Entfernung vom Fahrbahnrand liegt. In 1.5 m Höhe liegt das Konzentrationsmaximum dagegen beim fahrbahn-nächsten Messpunkt in 1 m Entfernung vom Fahrbahnrand.

An allen Messstellen zeigt sich, dass die Konzentrationen in 1.5 m Höhe meist höher liegen als in Bodennähe (Bilder 13 und 14, Tabellen 13 bis 32 im Anhang). Das gilt auch jeweils für alle untersuchten Entfernungen. Auch die Konzentrationen der Hintergrundmesspunkte liegen in 1.5 m Höhe für viele Elemente (hier Zn, Fe, Na, Ca) höher als in Bodennähe. Eine mögliche Ursache dafür kann der Eintrag von Staub bzw. Bodenmaterial aus der direkten Umgebung sein. Das Bodenmaterial weist auch am Fahrbahnrand geringere Konzentrationen auf als der Staubbiederschlag in 1.5 m Höhe (Tabelle 11 und Tabelle 13 bis 32 im Anhang), sodass es zur „Verdünnung“ der bodennahen Proben kommen kann. Die eingetragenen Frachten werden jedoch davon nicht beeinflusst.

Der Vergleich der bodennahen Staubbiederschlagsmengen auf der Luv- und Leeseite des Standortes A 555 zeigt deutlich höhere Werte für die Leeseite (Bild 15). Die Mittelwerte der Staubbiederschläge auf der Leeseite sind etwa doppelt so hoch, in 5 m Entfernung sogar etwa fünfmal so



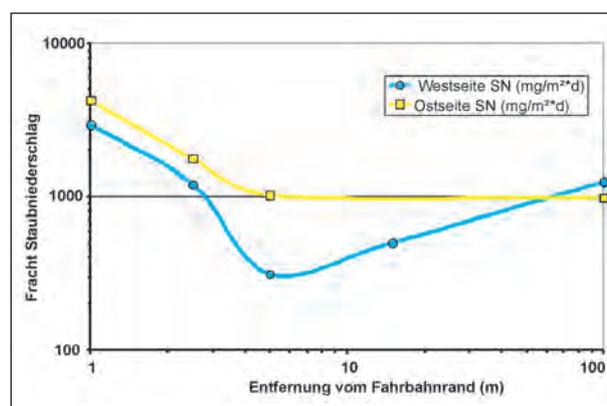
**Bild 13:** Räumliche Verteilung der Konzentration von Schadstoffen im bodennahen Staubbiederschlag am Standort A 555 (Westseite, Mittelwerte über den Messzeitraum)

hoch wie auf der Luvseite. Die Geländeform ist auf beiden Seiten der A 555 gleich. Allerdings ist die Luvseite sehr dicht mit krautigen Pflanzen bewachsen, während die Leeseite zwar höhere und größere Bäume aufweist, aber am Boden nur wenig Bewuchs aus Gras und Brombeerranken. Eine abschirmende Wirkung des dichten Staudenbewuchses, der im Sommer durch monatliches Mähen kaum zu bändigen war, auf den Staubbiederschlag in 5 und 15 m Entfernung von der westlichen Fahrbahnkante ist wahrscheinlich.

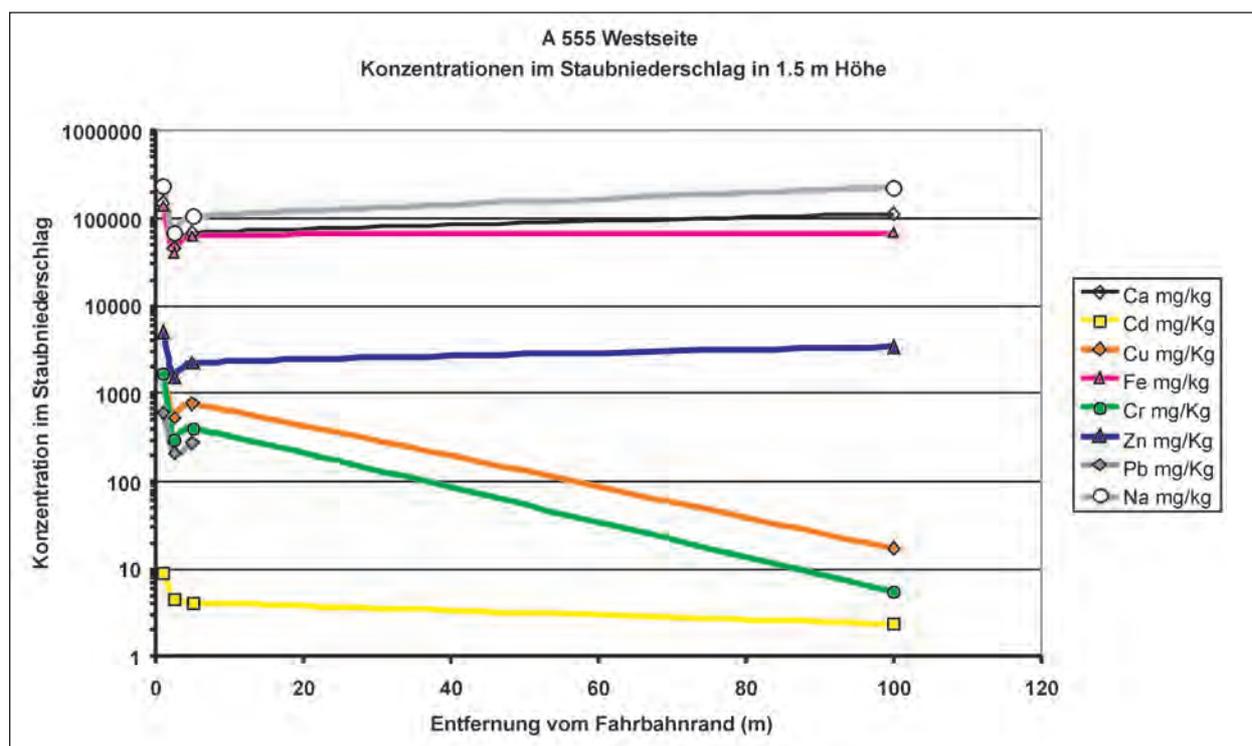
Trotz des auffälligen Minimums in 5 m Entfernung (Bild 15) zeigen die bodennahen Stofffrachten im Staubbiederschlag einen mit zunehmender Entfernung von der befestigten Fahrbahn stetig abnehmenden Verlauf (Bild 16). Die Form des Verlaufs ist auf der Luv- und Leeseite der BAB für die untersuchten Stoffe sehr ähnlich. Alle Stoffe bis auf Cadmium zeigen ein stark ausgeprägtes Eintragsmaximum in 1 m Entfernung vom Fahrbahnrand und eine schnelle Abnahme der Depositionsraten mit der Entfernung. Das gilt auch für die anderen Standorte. Diese Abnahme zwischen den Messpunkten in 1 m und 5 m beträgt auf der Westseite der A 555 (Luv) etwa eine Größenordnung, auf der Ostseite (Lee) etwas weniger. Dort deutet der Kurvenverlauf zwischen 1 m und 5 m Entfernung auch

an, dass die Hintergrundwerte in 10 oder 15 m Entfernung noch nicht erreicht sind, dass sich der straßenverkehrsbedingte Eintrag also über eine größere Fläche verteilt (Bild 17). Auf der Westseite dagegen sind die Unterschiede der Depositionsraten zwischen 5 m, 15 m und 100 m Entfernung relativ gering, nur Chrom und Eisen zeigen bis 100 m Entfernung sinkende Depositionsraten (Bild 16).

Die Höhe der Einzelwerte und die Flächen unter den Kurven der Depositionsraten an der A 555



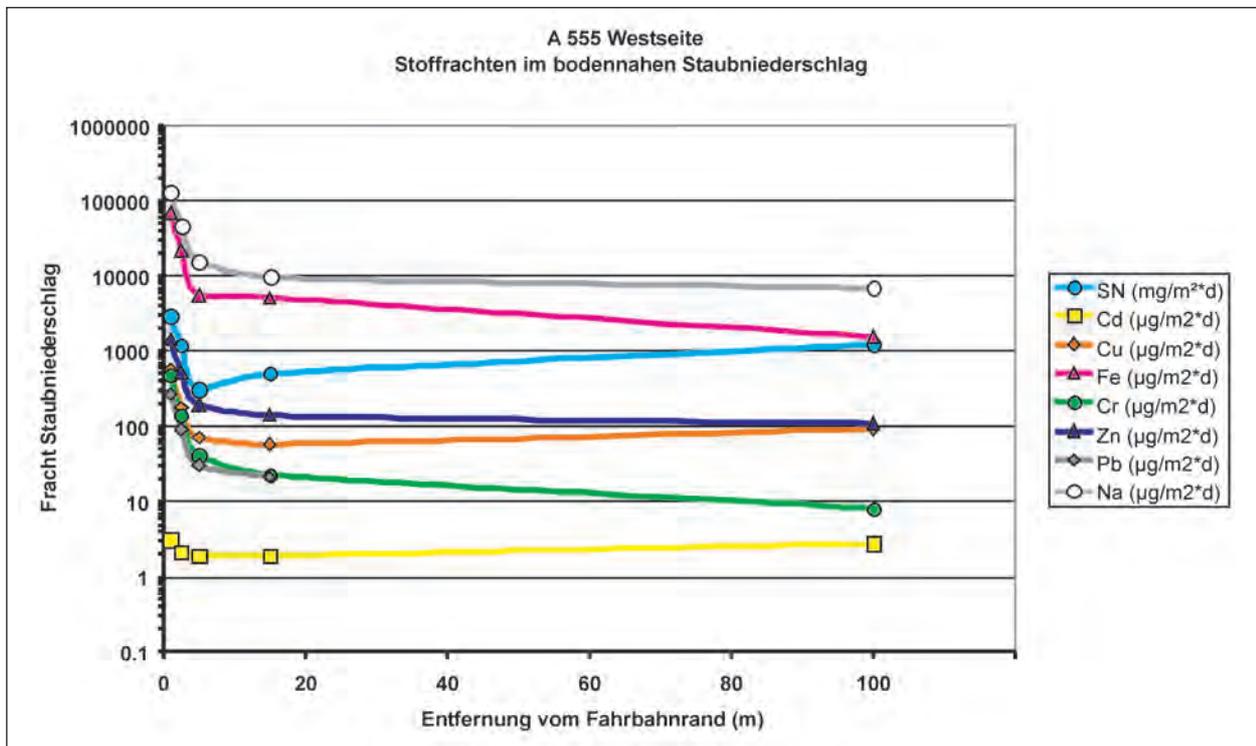
**Bild 15:** Vergleich der räumlichen Verteilung der bodennahen Staubbiederschlagsmenge am Standort A 555 West- und Ostseite (Luv und Lee, Mittelwerte über den Messzeitraum)



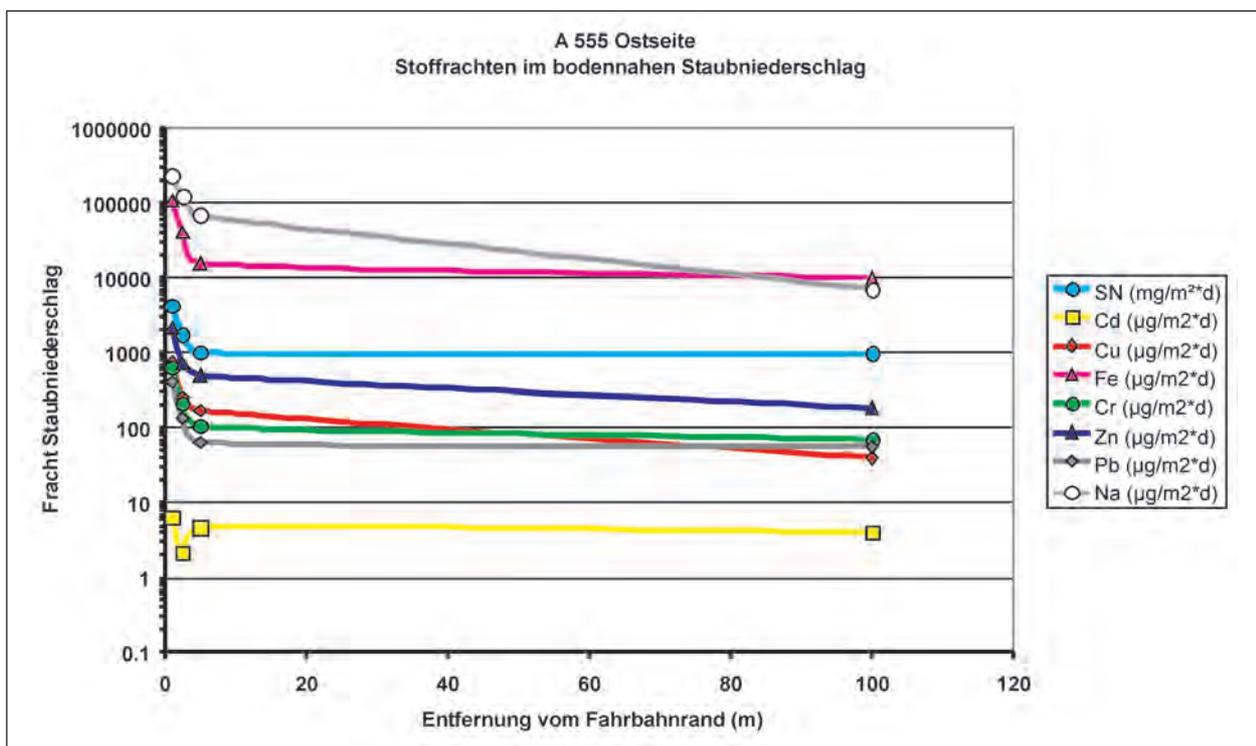
**Bild 14:** Räumliche Verteilung der Konzentration von Schadstoffen im Staubbiederschlag in 1.5 m Höhe am Standort A 555 (Westseite, Mittelwerte über den Messzeitraum)

zeigen, dass die Leeseite nicht nur einen weiteren Einflussbereich der verkehrsbedingten Stoffeinträge aufweist, sondern auch insgesamt höhere Einträge aller untersuchten Stoffe erhält (Bilder 16

und 17, Tabelle 23-26 im Anhang). Es ist an den Ergebnissen der A 4 auch zu sehen, dass eine ausreichende Zahl von Messpunkten insbesondere in direkter Straßennähe nötig ist, um das



**Bild 16:** Räumliche Verteilung der Stofffrachten im bodennahen Staubniederschlag am Standort A 555 (Westseite, Mittelwerte über den Messzeitraum)



**Bild 17:** Räumliche Verteilung der Stofffrachten im bodennahen Staubniederschlag am Standort A 555 (Ostseite, Mittelwerte über den Messzeitraum)

schnelle Abfallen der Stoffeinträge gut zu beschreiben.

An der A 555 sind die Depositionsraten der untersuchten Elemente in 1.5 m Höhe auf der Ostseite (Bild 19) deutlich höher als auf der Westseite (Bild 18). Insbesondere auffällig sind auf der Ostseite die hohen Hintergrundwerte in 100 m Entfernung von der Fahrbahn (Bild 19), die schon die Überlegung nahelegen, ob hier überhaupt noch von Hintergrundwerten gesprochen werden kann oder ob sich hier noch ein deutlicher Einfluss der Autobahn zeigt. Von der A 61 liegen hierzu keine vergleichenden Daten vor, da der Hintergrundwert auf der Luvseite gemessen wird.

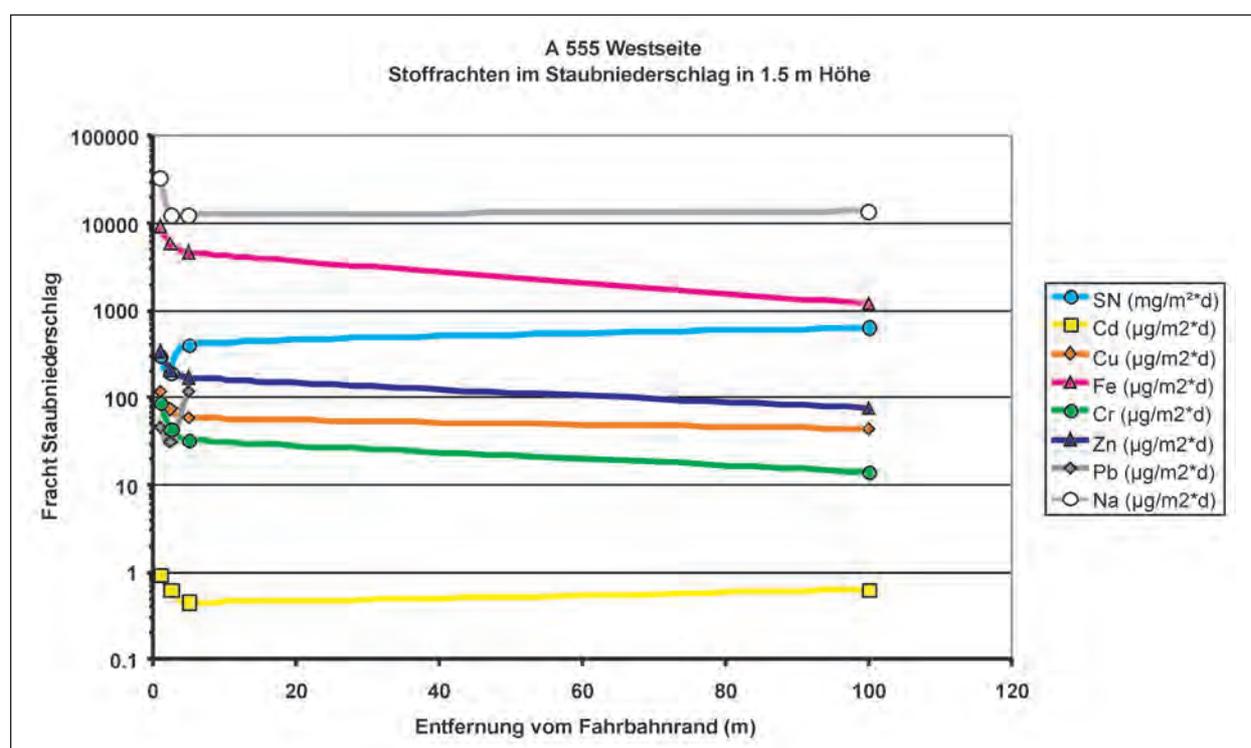
Der Vergleich der Depositionsraten in Bodennähe und 1.5 m Höhe zeigt für die A 555 und A 61 ausgeprägte Maxima in Fahrbahnnähe, die bodennah aber deutlich höhere Werte zeigen als in 1.5 m Höhe (Bilder 16 bis 22). Dagegen ist bei einigen Elementen die Depositionsrate in größerer Entfernung in 1.5 m Höhe größer als am Boden. Das sind an der A 555 (beide Seiten) und an der A 61 Natrium, Blei und Chrom und nur auf der Ostseite der A 555 zusätzlich noch Eisen und Zink.

An der A 4 zeigen die Depositionsraten teilweise andere Verläufe als an den beiden anderen Stand-

orten. Wie an A 555 und A 61 zeigt sich auf der Nordseite der A 4 für alle Elemente außer Cadmium ein ausgeprägtes Maximum der Depositionsraten in 1 m Entfernung vom Fahrbahnrand. Am nächsten Messpunkt in 50 m Entfernung liegen die Werte um ein bis zwei Größenordnungen tiefer (Bild 22). Der Entfernungsbereich, in dem die Werte abfallen, ist aber durch die andere Entfernungsverteilung der Messpunkte nur schlecht abzugrenzen, sodass die Grafik fälschlich höhere Gesamteinträge zeigt. Die Depositionsraten in 150 m Entfernung liegen für fast alle Elemente sogar etwas höher als in 50 m Entfernung.

In 1.5 m Höhe zeigen die Depositionsraten eine ähnliche räumliche Verteilung wie an den beiden anderen BAB-Standorten. Die Werte in Fahrbahnnähe liegen für alle Elemente niedriger als bei den bodennahen Messungen (Bilder 22/23 und 25/26). In größerer Entfernung (hier 50 m) liegen die Depositionsraten der meisten Elemente dagegen über denen in Bodennähe am gleichen Messpunkt (Bild 24). In dieser Höhe sind geringere Unterschiede zwischen den Depositionsraten südlich und nördlich der A 4 festzustellen, das Verhalten der Elemente ist auch nicht eindeutig (Tabelle 8).

Auf der Nordseite der A 4 sind nur drei Messpunkte in 1 m, 2.5 m und 4 m Entfernung vorhanden. In



**Bild 18:** Räumliche Verteilung der Stofffrachten im Staubniederschlag in 1.5 m Höhe am Standort A 555 (Westseite, Mittelwerte über den Messzeitraum)

5 m Entfernung vom Fahrbahnrand befindet sich eine Lärmschutzwand, dahinter liegt ein Wohn- und Gewerbegebiet. Zwar weisen alle Elemente vor der Lärmschutzwand eine deutlich sinkende Tendenz der bodennahen Depositionsraten mit zunehmender Entfernung auf, aber der Unterschied zwischen 1 m und 4 m Abstand erscheint auf den ersten Blick geringer als bei der A 555 und A 61 zwischen 1 m und 5 m Entfernung (Bild 23). Wenn die bodennahen Depositionsraten der A 4 Nord im gleichen Maßstab dargestellt werden wie die

der anderen Messstellen, ist aber deutlich zu erkennen, dass auch hier ein sehr deutliches Depositionsmaximum in Fahrbahnnähe vorliegt und dass die Depositionsraten in 4 m Entfernung um über eine halbe Größenordnung geringer sind. Außerdem liegen die Stoffeinträge aller Elemente außer Cadmium und Kupfer leicht unter denen auf der Südseite der A 4 (Tabelle 8). Das widerspricht der These, dass die Lärmschutzwand, die sich auf der Nordseite in 5 m Entfernung vom Fahrbahnrand befindet, als Strömungshindernis wirkt

Element	Deposition in 1.5 m Höhe am Fahrbahnrand $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$				
	A 555 W (Luv) 1 m Abstand	A 555 E (Lee) 1 m Abstand	A 61 E (Lee) 2.5 m Abstand	A 4 Süd 1 m Abstand	A 4 Nord 1 m Abstand
Staubniederschlag $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	303	533	1.785	496	204
Blei Pb	46.1	50.4	157	41.1	31.3
Cadmium Cd	0.941	1.45	2.31	1.13	2.28
Calcium Ca	10.350	16.130	70.720	13.400	7.160
Eisen Fe	9.327	12.920	52.780	6.870	6.350
Kupfer Cu	116	130	337	102	111
Natrium Na	33.120	76.420	81.510	24.820	15.840
Vanadium V	20.5	31.4	162	14.8	13.5
Zink Zn	342	353	1.012	325	288

Tab. 8: An den Messstellen in 1 m Abstand vom Fahrbahnrand ermittelte Depositionsraten einiger Elemente in 1.5 m Höhe (Mittelwerte über den Messzeitraum)

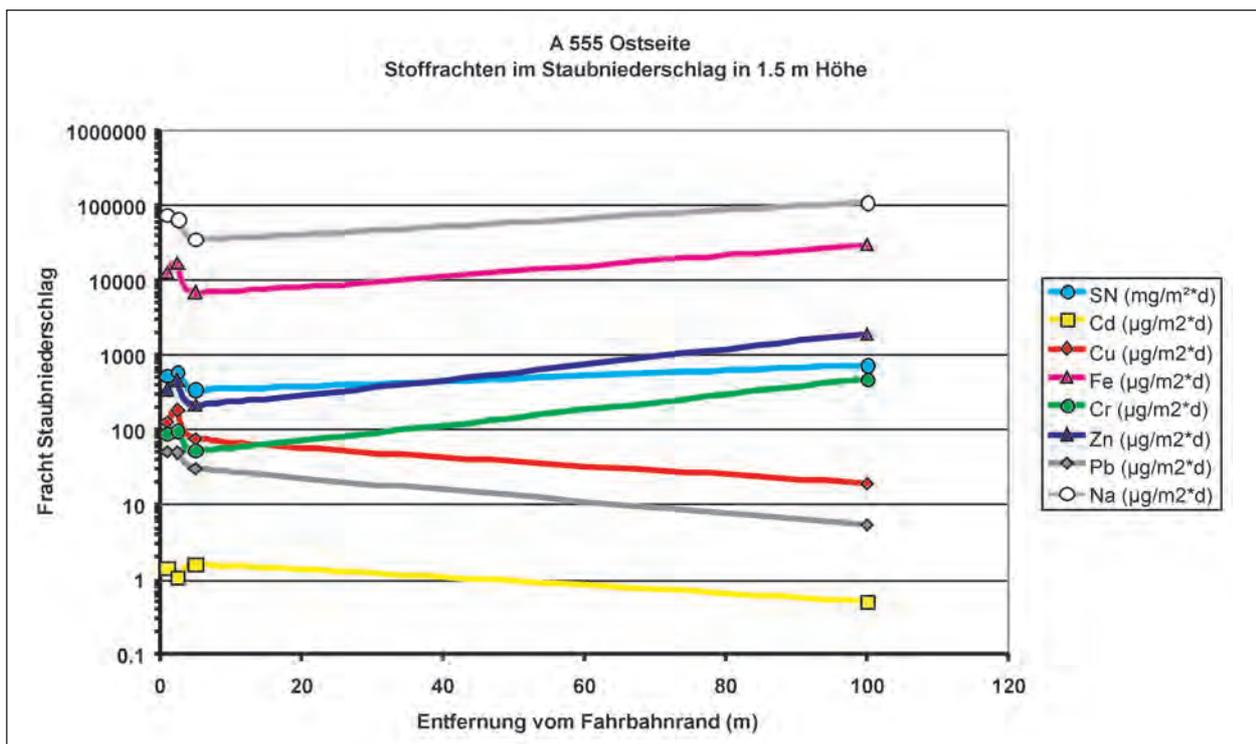
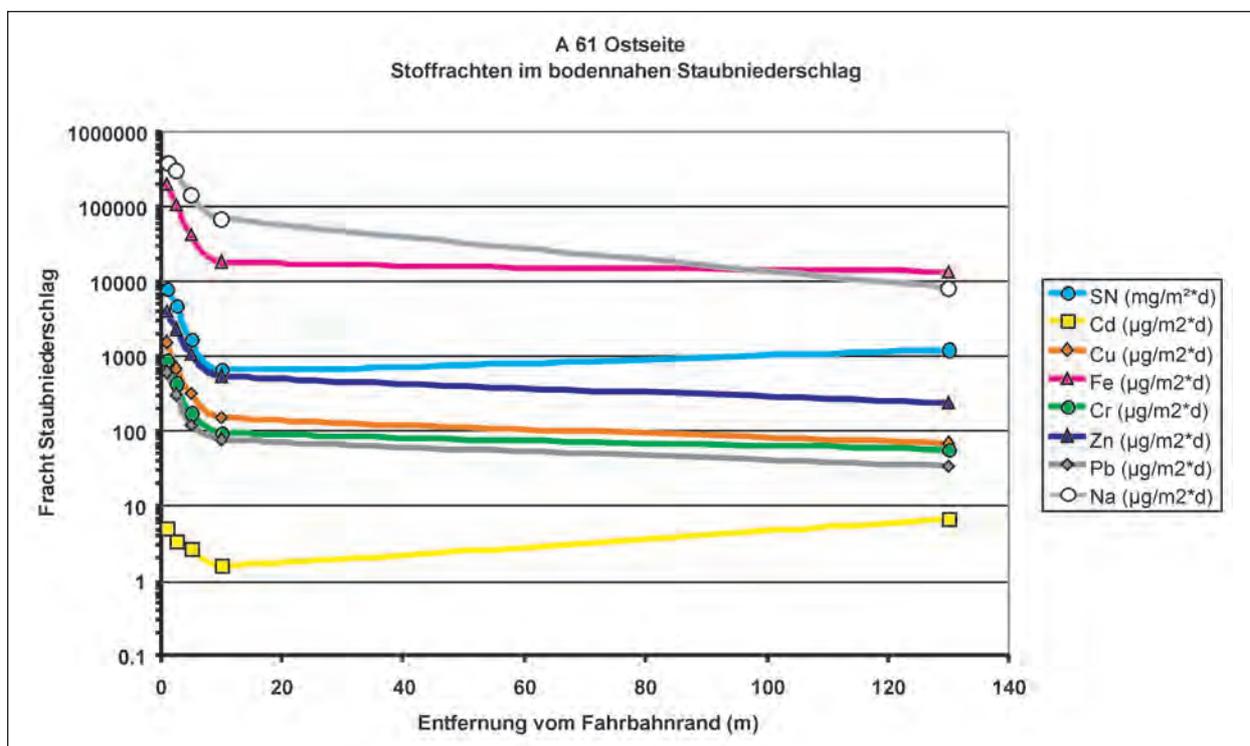


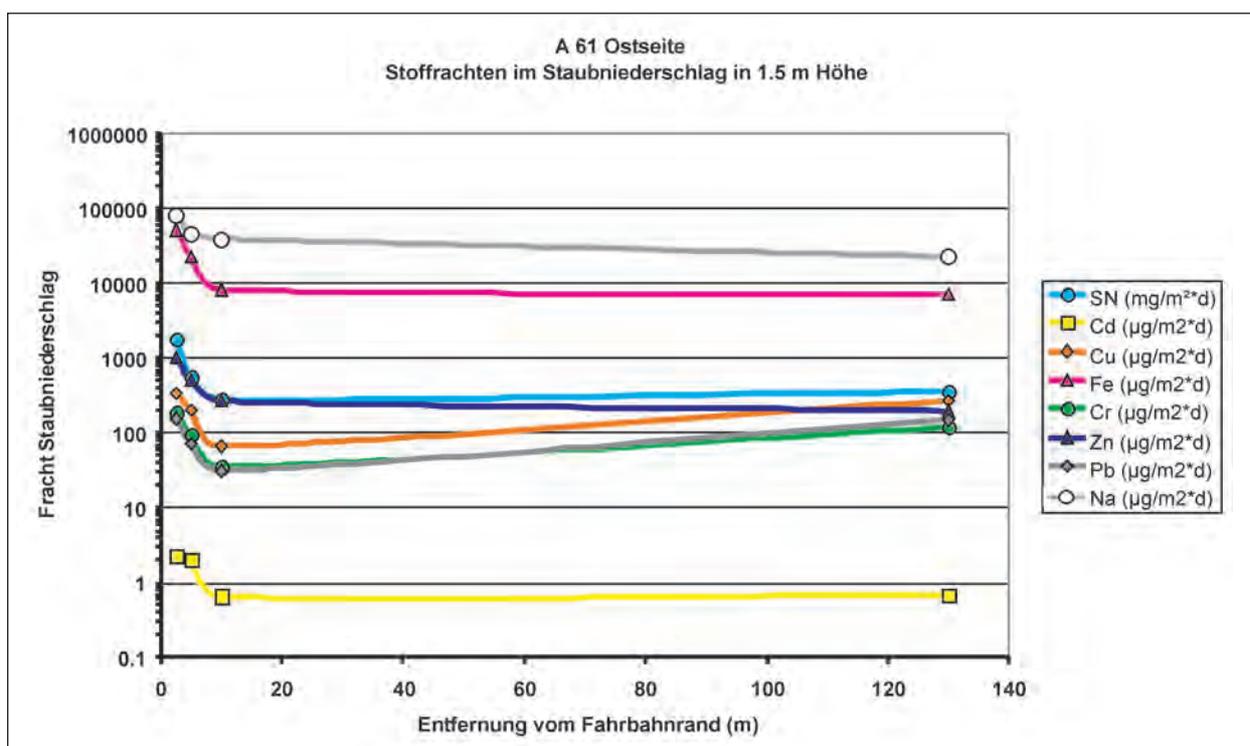
Bild 19: Räumliche Verteilung der Stofffrachten im Staubniederschlag in 1.5 m Höhe am Standort A 555 (Ostseite, Mittelwerte über den Messzeitraum)

und es zu höheren Stoffeinträgen vor der Lärm-  
schutzwand kommt.

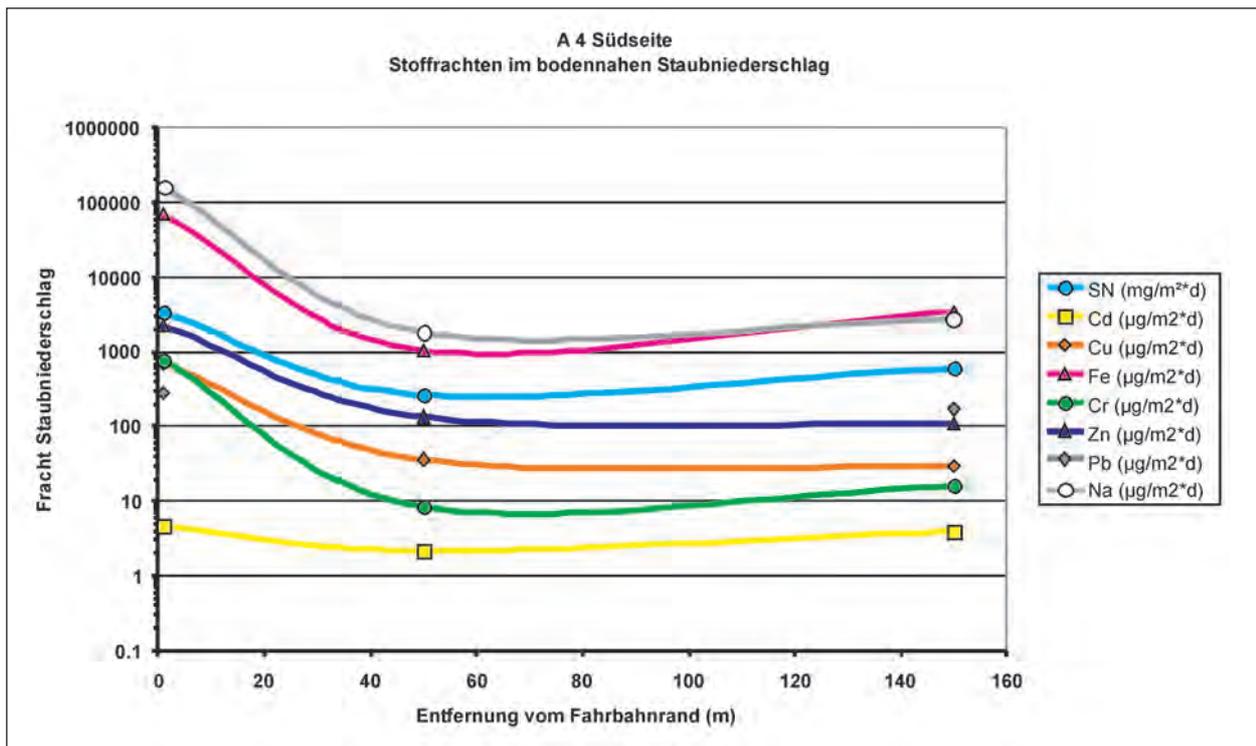
Bei Betrachtung der Depositionsraten in 1.5 m  
Höhe auf der Nordseite der A 4 zeigt sich dagegen  
eine andere räumliche Verteilung als bei den bo-



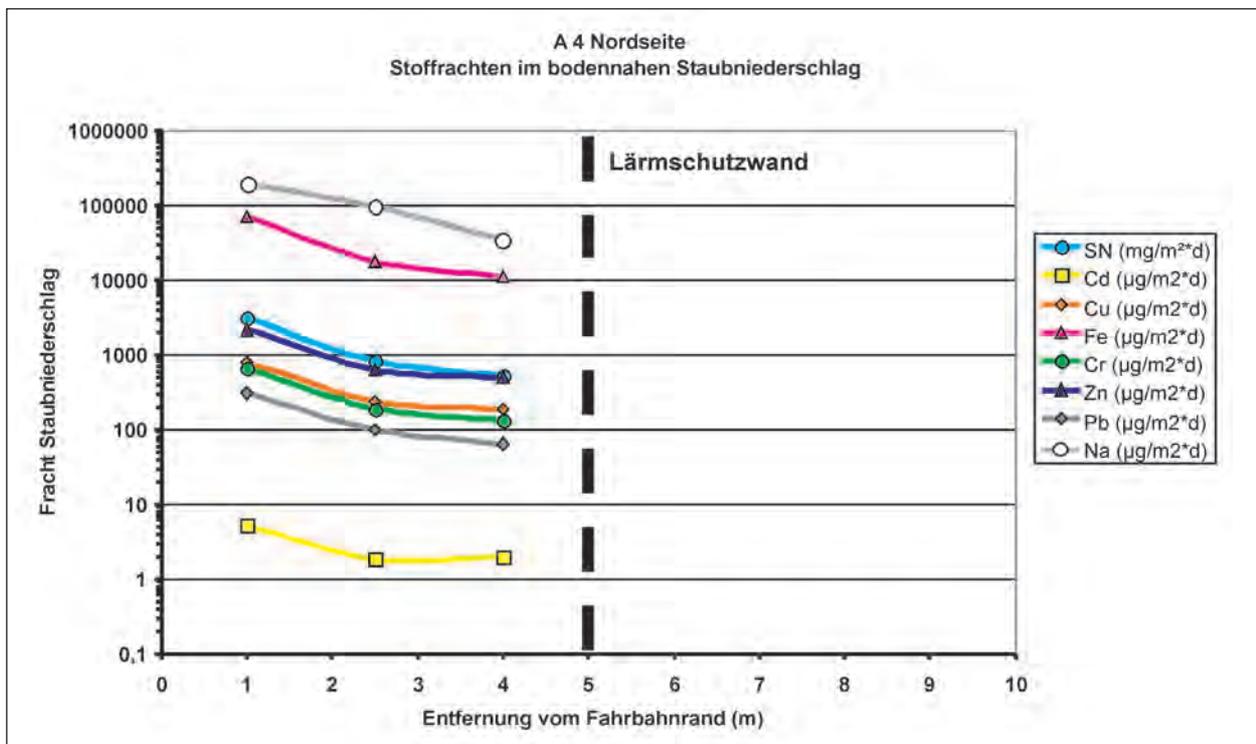
**Bild 20:** Räumliche Verteilung der Stofffrachten im bodennahen Staubbiederschlag am Standort A 61 (Lee, Mittelwerte über den Messzeitraum), der Messpunkt in 150 m Entfernung befindet sich auf der Luvseite



**Bild 21:** Räumliche Verteilung der Stofffrachten im Staubbiederschlag in 1.5 m Höhe am Standort A 61 (Lee, Mittelwerte über den Messzeitraum), der Messpunkt in 150 m Entfernung befindet sich auf der Westseite



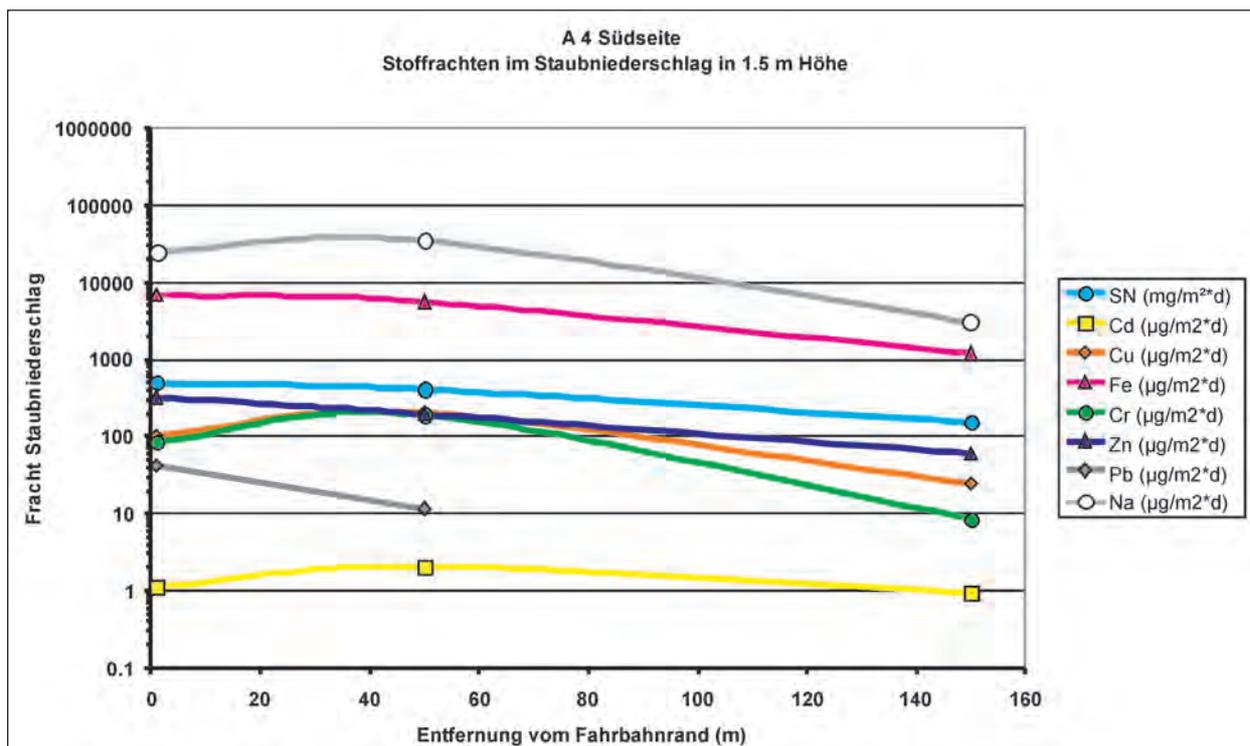
**Bild 22:** Räumliche Verteilung der Stofffrachten im bodennahen Staubniederschlag am Standort A 4 (Südseite, Mittelwerte über den Messzeitraum), die Messpunkte in 50 und 150 m Entfernung liegen in Laubwald



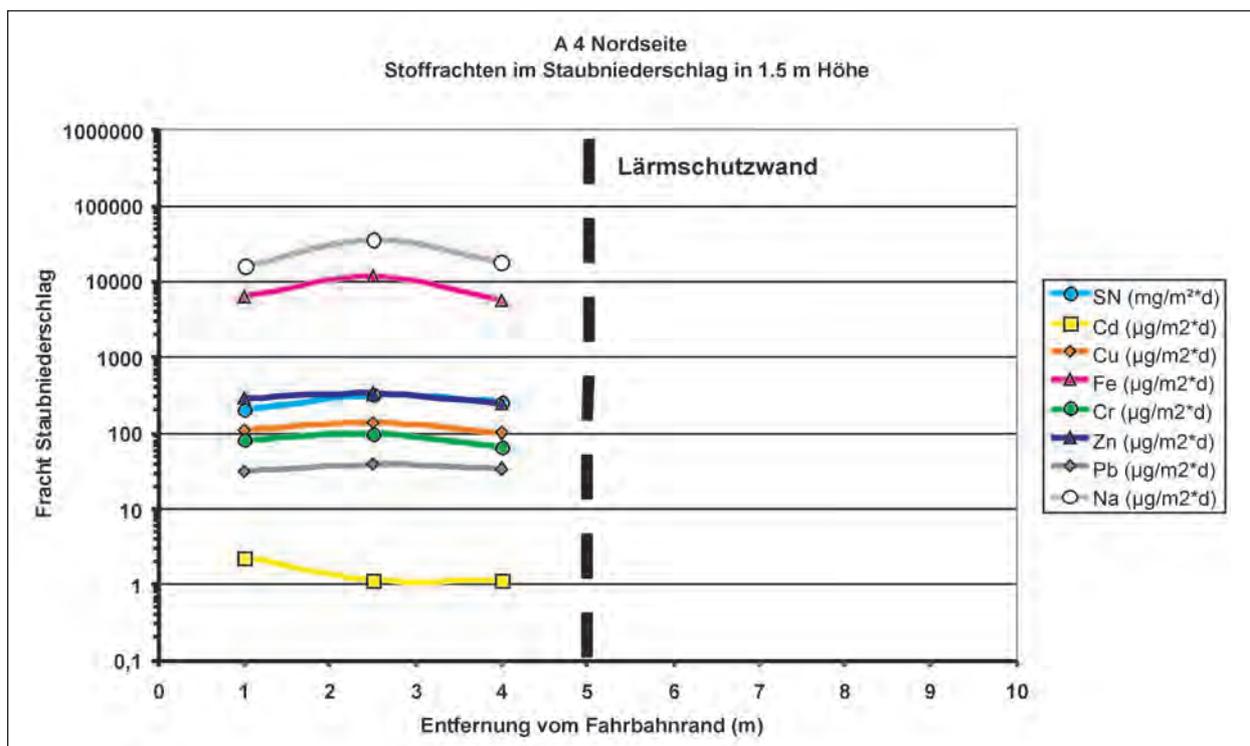
**Bild 23:** Räumliche Verteilung der Stofffrachten im bodennahen Staubniederschlag am Standort A 4 (Nordseite, Mittelwerte über den Messzeitraum), in 5 m Entfernung vom Fahrbahnrand befindet sich eine Lärmschutzwand

dennahen Einträgen (Bild 25). Bis auf Cadmium sind die Stoffeinträge in 1 m und 4 m Abstand vom Fahrbahnrand fast gleich, und dazwischen wird in 2.5 m Abstand ein Maximum erreicht. Hier ist ein

Einfluss der Lärmschutzwand auf die Messergebnisse zu vermuten. Die A 4 verläuft hier in Ost-West-Richtung, also weitgehend parallel zur Hauptwindrichtung. Offensichtlich führt die durchmi-



**Bild 24:** Räumliche Verteilung der Stofffrachten im Staubbiederschlag in 1.5 m Höhe am Standort A 4 (Südseite, Mittelwerte über den Messzeitraum), die Messpunkte in 50 und 150 m Entfernung liegen in Laubwald



**Bild 25:** Räumliche Verteilung der Stofffrachten im Staubbiederschlag in 1.5 m Höhe am Standort A 4 (Nordseite, Mittelwerte über den Messzeitraum), in 5 m Entfernung vom Fahrbahnrand befindet sich eine Lärmschutzwand

schende Wirkung der Luftströmung bzw. das wegen Wald und Lärmschutzwand fast völlige Fehlen einer Strömung quer zur BAB zur einer relativ gleichmäßigen Verteilung der Depositionsraten in

1.5 m Höhe. Das gilt sowohl für die Verteilung vor der Lärmschutzwand wie auch für den Vergleich der Werte auf der Nord- und Südseite.

Sowohl A 555 als auch A 61 weisen in Fahrbahnnähe höhere bodennahe Depositionsraten als die A 4 auf (Tabelle 7). An der A 4 wurde bei den ersten Messungen der Voruntersuchung ein deutlicher Unterschied zwischen den fahrbahnnahen Depositionsraten der Nord- und Südseite festgestellt. Die Nordseite, über die die gesamte Breite der Fahrbahn in Fahrtrichtung Köln entwässert, wies deutlich höhere Depositionsraten auf als die Südseite, über die nur der Standstreifen Fahrtrichtung Olpe entwässert. Diese Erwartung wird durch die vorliegenden Messungen nicht bestätigt, ganz im Gegenteil sind die bodennahen Stoffeinträge auf der Südseite der A 4 höher.

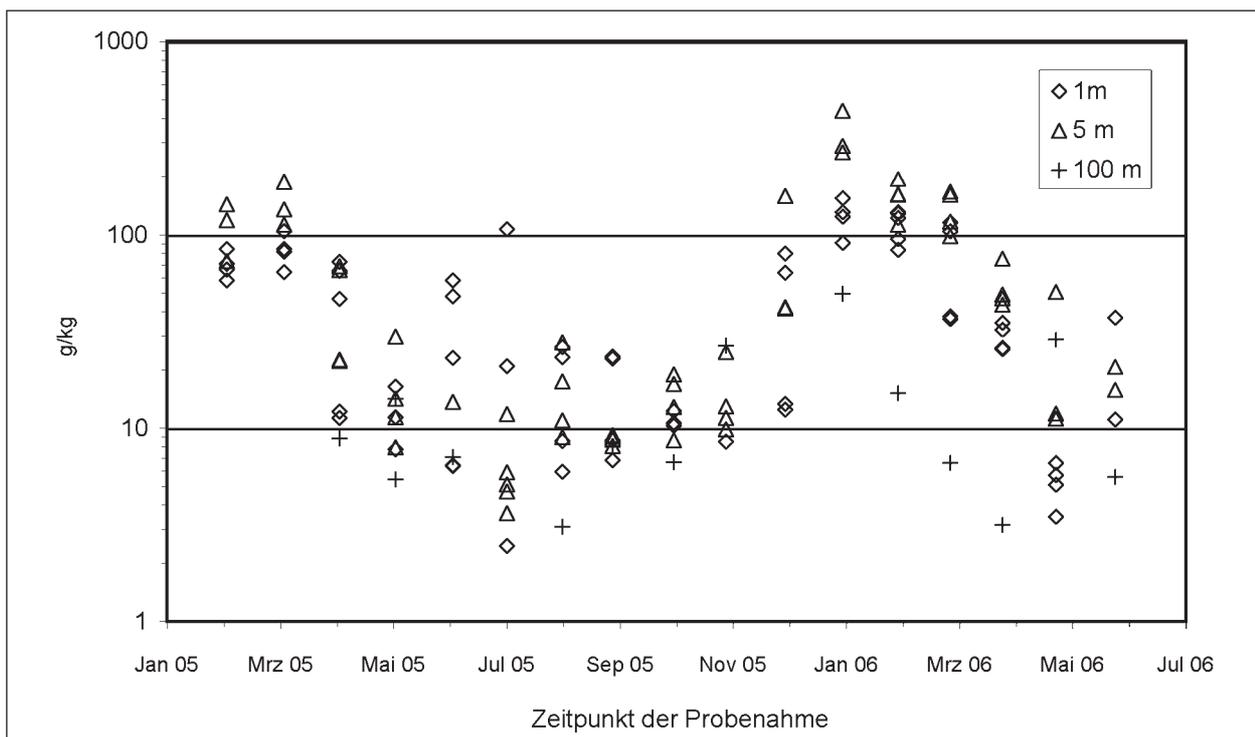
Die bodennah ermittelten Depositionsraten an beiden Seiten der A 4 liegen zwischen denen der Luv- und Leeseite der A 555 (Tabelle 7). Damit deutet sich an, dass die Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Stoffeinträge, die durch die Lage der Straße zur Windrichtung bedingt sind, die Gesamteintragsmenge an einem Standort nicht beeinflussen. Dies bestätigt die am Beginn des Kapitels getroffene Annahme. Allerdings kann dadurch auch kein Einfluss des unterschiedlichen Lkw-Anteils am Standort A 4 und A 555 festgestellt werden. Das widerspricht den ursprünglichen Annahmen.

### 5.1.2 Zeitlicher Verlauf

Die deutlichsten Unterschiede im zeitlichen Verlauf zeigen sich erwartungsgemäß beim Element Natrium, das im höheren Konzentrationsbereich fast ausschließlich aus Tausalz stammen dürfte. Als Beispiel sind hier die bodennahen Depositionsraten (Bild 28) und Konzentrationen (Bild 26) von Natrium an der A 555 für den gesamten Messzeitraum von Februar 2005 bis Juli 2006 dargestellt.

Die Variabilität der Einzelmessungen an jeweils einem Messpunkt ist hoch. Als Beispiele können die Konzentrationen und Frachten von Natrium und Cadmium dienen, von denen in den Bildern 26 bis 29 die Einzelmesswerte im zeitlichen Verlauf dargestellt sind. Zwar handelt es sich methodenbedingt um Monatsmittelwerte, doch durch jahreszeitliche Unterschiede in Witterung, Windrichtung und Faktoren wie Bewirtschaftung der angrenzenden Äcker, Mähen von Wiesen und Banketten, Vorhandensein von Blättern, Blütenbestandteilen oder zahlreichen Insekten in den Probengefäßen treten tatsächliche Unterschiede und unvermeidbare Probenahmefehler auf. Dies ist beispielsweise an den Unterschieden der anfangs durchgeführten drei Parallelmessungen je Messpunkt zu erkennen (Bilder 26 bis 29), die nicht immer gute Übereinstimmung zeigen.

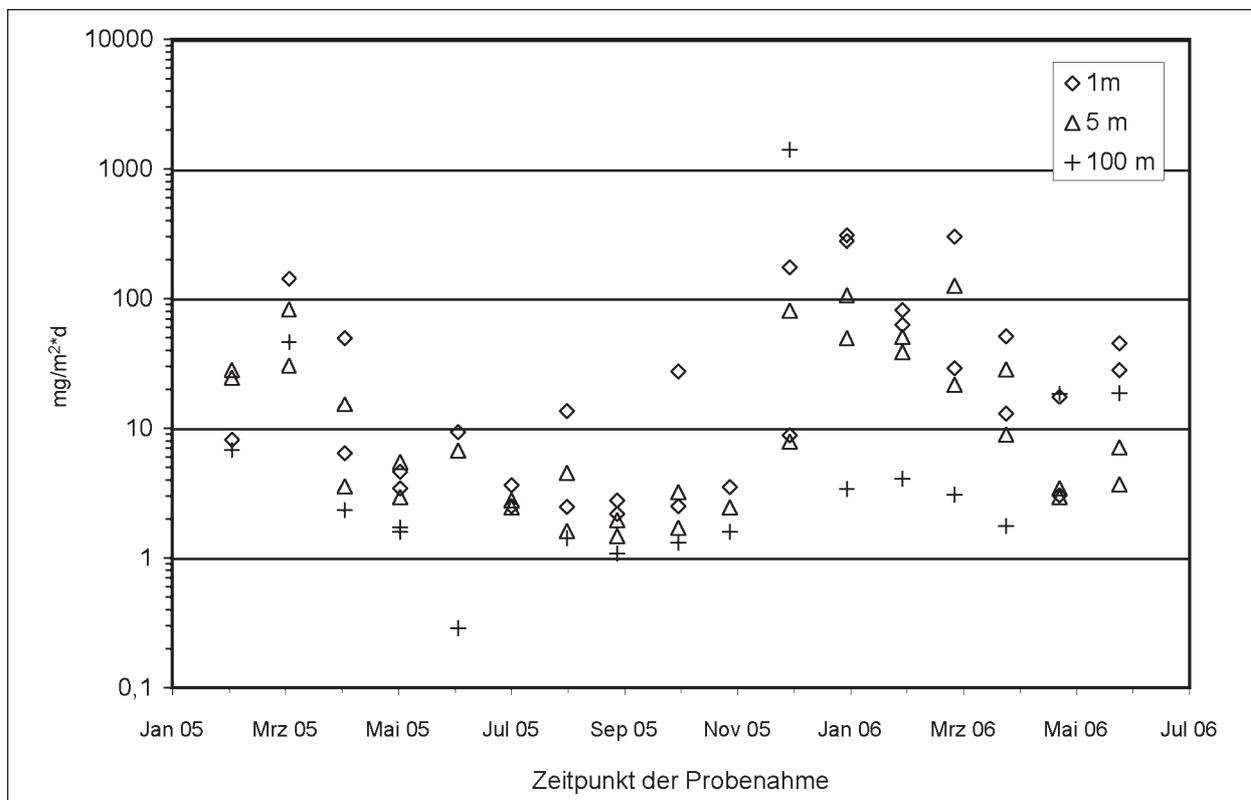
Wie aus den Grafiken der räumlichen Verteilung schon deutlich wurde (z. B. Bild 16), sind die Unter-



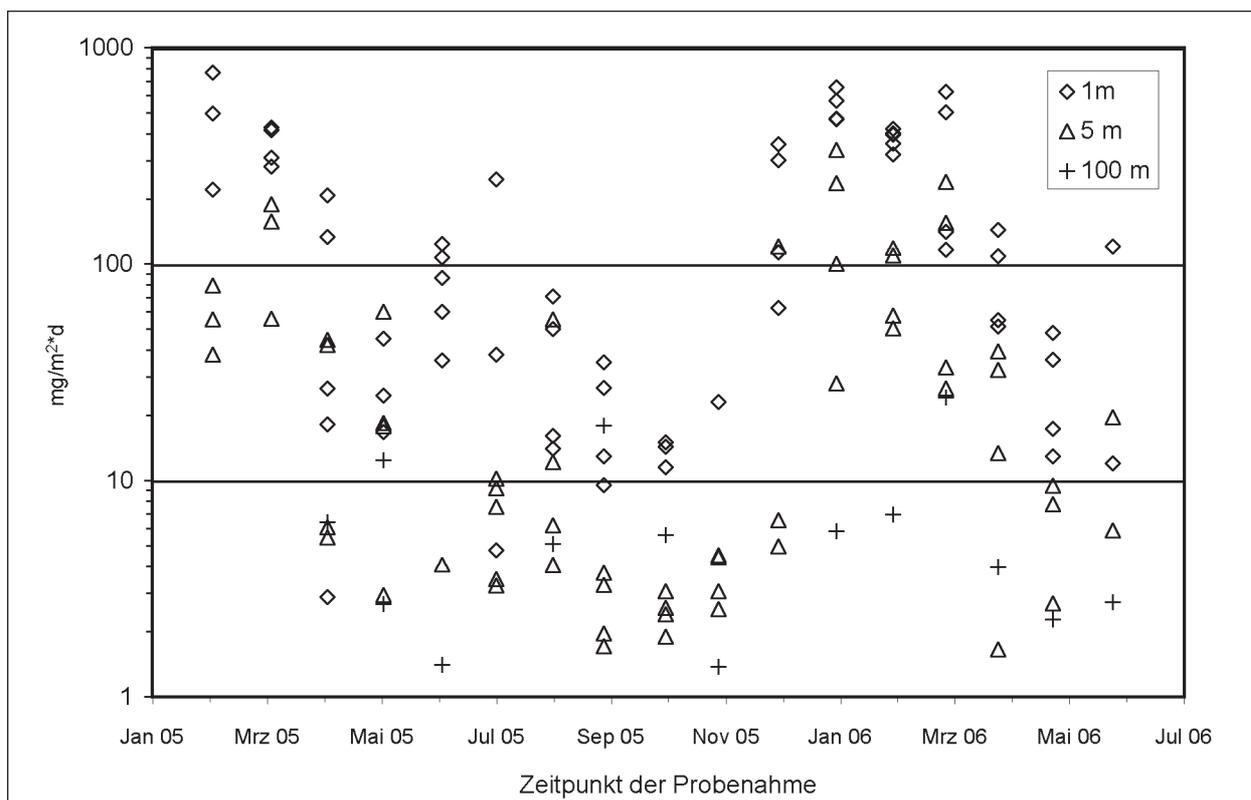
**Bild 26:** Zeitlicher Verlauf der Konzentration von Natrium im bodennahen Staubbiederschlag am Standort A 555 (Einzelmesswerte)

schiede zwischen fahrbahnnahe und weiter entfernten Messpunkten in Bild 26 und 28 deutlich zu erkennen. Trotz großer Streubreite der Einzelmess-

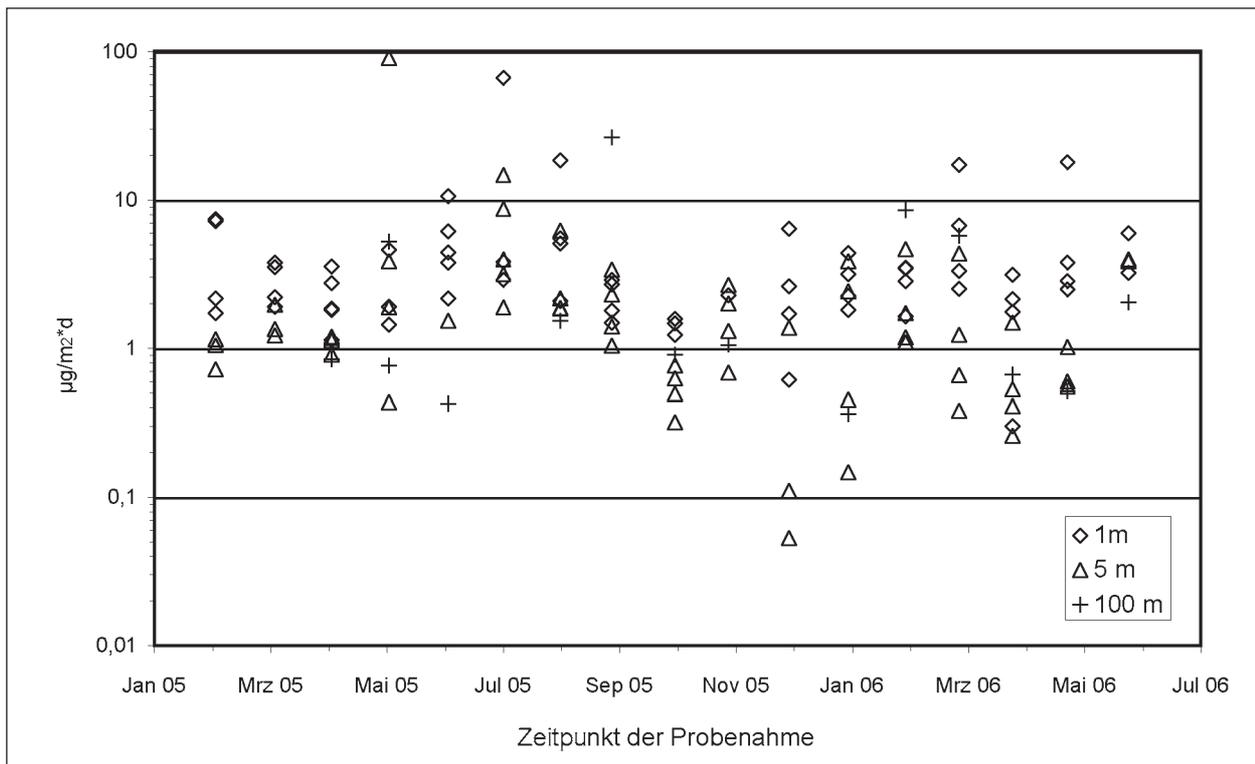
sungen eines Monats ist aber auch der Jahresgang mit niedrigen Werten im Sommer und bis zu zwei Größenordnungen höheren Werten im Winter sehr



**Bild 27:** Zeitlicher Verlauf der Fracht von Natrium im Staubbiederschlag in 1.5 m Höhe am Standort A 555 (Einzelmesswerte)



**Bild 28:** Zeitlicher Verlauf der Fracht von Natrium im bodennahen Staubbiederschlag am Standort A 555 (Einzelmesswerte)



**Bild 29:** Zeitlicher Verlauf der Fracht von Cadmium im bodennahen Staubniederschlag am Standort A 555 (Einzelmesswerte)



**Bild 30:** Depositionsgefäß nach Probenahme und Trocknung, in der Mitte sind kubische Natriumchloridkristalle zu erkennen

gut zu erkennen. Im Januar und Februar treten Depositionsraten auf, die mehr als das 100fache der in Tabelle 5 für ländliche Bereiche genannten Hintergrundwerte von 1 bis 5 mg/(m<sup>2</sup>\*d) erreichen. Sie sinken mit Ende des Winters nur langsam ab. Erst im Herbst liegen die Depositionsraten wieder im Bereich dieser Hintergrundwerte, erreichen aber in direkter Fahrbahnnähe teilweise über 10 mg/(m<sup>2</sup>\*d). Möglicherweise spielt für das langsame Absinken der Eintrag von bodenbürtigen Partikeln eine Rolle, die vom Winter noch erhöhte Natrium-

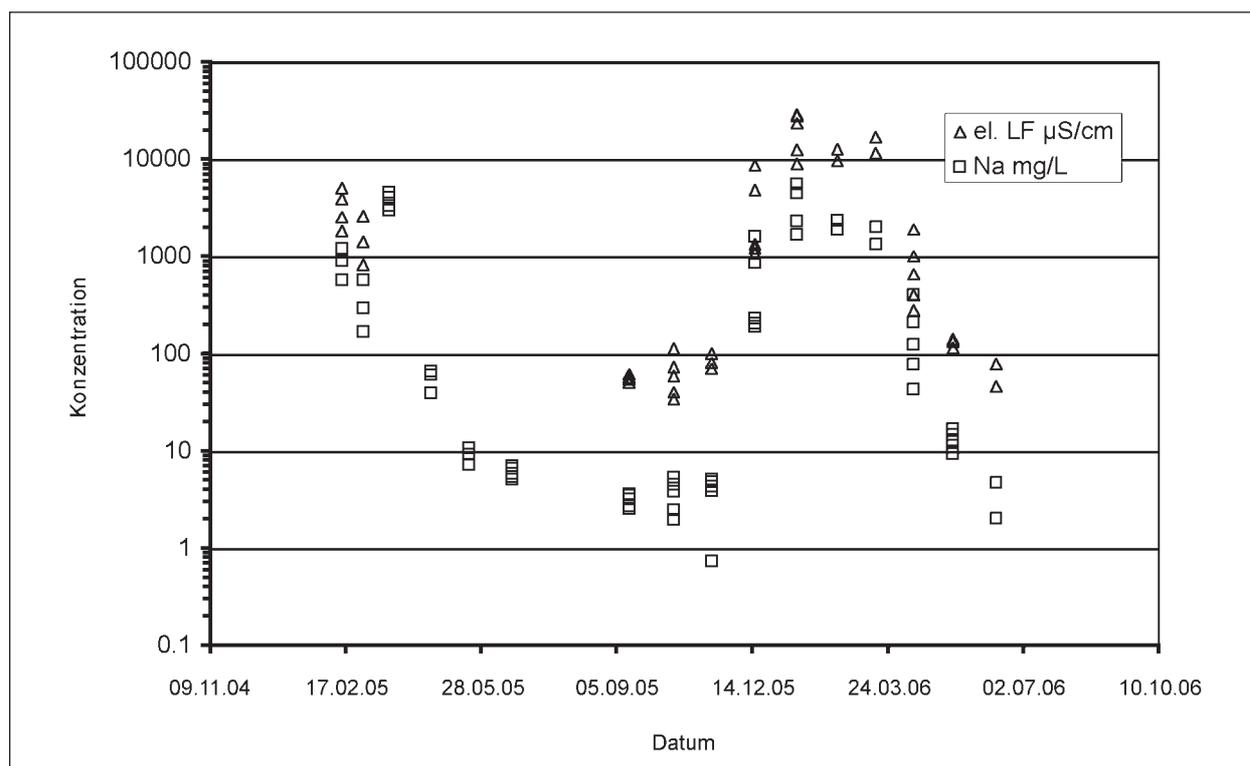
gehalte aufweisen. In 1.5 m Höhe scheinen die Werte früher abzusinken (Bild 27). Zur besseren Beurteilung sind hier aber Messungen über einen längeren Zeitraum abzuwarten.

Auch bei einzelnen Metallen scheint ein Jahresgang der Depositionsraten aufzutreten. Höhe und Lage sowie Ursachen sind bisher aber unklar. Als Beispiel ist in Bild 29 die Deposition von Cadmium an der A 555 dargestellt. Die Werte scheinen Maxima im Sommer und Winter und Minima im Frühjahr und Herbst zu zeigen. Möglicherweise überlagern sich mehrere Ursachen hierfür. Ob dieser Trend sich bestätigt, können erst Messungen über einen längeren Zeitraum zeigen.

## 5.2 Straßenabflusswasser

Das Straßenabflusswasser wird durch eine Reihe von Komponenten, wie die Dauer der Trockenperiode vor den Niederschlagsereignissen, die Regenhäufigkeit und -intensität, aber auch Verkehrsstärke, Windrichtung, Straßenoberflächenbeschaffenheit und kleinräumige Unebenheiten des Straßenbelages, geprägt.

Die Ergebnisse der Konzentrationsbestimmung sind für die drei Messstellen in den Tabellen 34 bis 36 im Anhang zusammengefasst. Viele der Metalle



**Bild 31:** Zeitlicher Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit und der Natriumkonzentration im Straßenabfluss der A 61 (Einzelmesswerte)

	el. LF $\mu\text{S/cm}$	Ca mg/L	Cd $\mu\text{g/L}$	Fe mg/L	Na mg/L	Zn mg/L	pH-Wert
Anzahl	99	204	205	205	205	205	77
Min	28	1.59	0.012	0.05	0	0.025	5.99
10-Perzentil	55	8.20	0.050	0.05	4	0.025	6.22
Median	330	18.9	0.105	0.05	41	0.101	6.76
Mittelwert	3.482	49.6	0.225	0.29	564	0.245	6.83
90-Perzentil	10.072	119	0.563	0.47	2.109	0.533	7.17
Max	28.500	602	2.034	14.49	5.574	4.421	9.50
Standardabw.	6.110	84.1	0.317	1.12	1.110	0.501	0.58

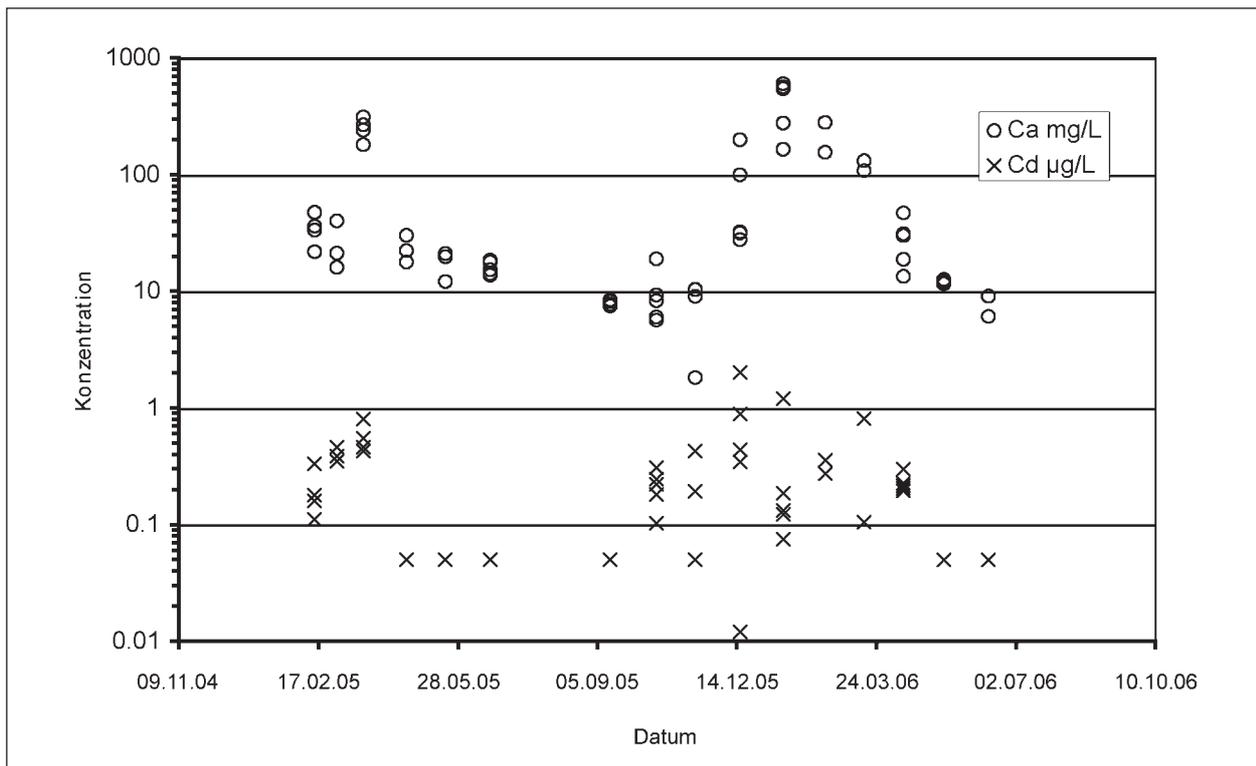
**Tab. 9:** Stoffkonzentrationen, pH-Werte und elektrische Leitfähigkeit des Straßenabflusswassers (alle Proben)

(z. B. Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel) weisen in fast allen Proben Werte nahe an oder unter der Bestimmungsgrenze auf (Tabelle 33). Die Tabelle 9 gibt eine Übersicht der Elemente, deren Werte häufig über der Bestimmungsgrenze lagen. 90 % der Konzentrationswerte der Schwermetalle Cadmium und Zink liegen unterhalb oder im Bereich der Sickerwasserprüfwerte der Bodenschutzverordnung, bei den anderen Schwermetallen fast alle.

Die Übersicht und Bild 31 zeigen, wie auch die Depositionsproben, deutlich den Einfluss des Tausalzinsatzes mit Leitfähigkeitswerten von bis über 20.000  $\mu\text{S/cm}$ . Natürliches Bodensickerwasser weist Leitfähigkeiten von unter 100 bis etwa 1.000

$\mu\text{S/cm}$  auf, die Leitfähigkeit von Regenwasser liegt meist noch niedriger. Die pH-Werte liegen knapp unterhalb des Neutralbereiches und damit eher unterhalb der Werte, die nach Literaturdaten an stark befahrenen Straßen zu erwarten sind.

Ein Teil der in Tabelle 10 zusammengestellten Untersuchungen aus der Literatur wurde an geringer befahrenen Straßen durchgeführt, sodass diese Ergebnisse nur bedingt vergleichbar sind. Auffällig sind die bei den Untersuchungen im Sommer (DIEHL 2001) bzw. einem südeuropäischen Land (BARBOSA/HVITVED-JACOBSEN 1999) festzustellenden niedrigen Leitfähigkeitswerte. Bei der Untersuchung von LEGRET/PAGOTTO, die 50 Nie-



**Bild 32:** Zeitlicher Verlauf der Calcium- und Cadmiumkonzentrationen im Straßenabfluss der A 61 (Einzelmesswerte)

Quelle	Ort und Zeitpunkt der Messung	pH-Wert	Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
DIEHL (2001)	Deutschland, Autobahn A 7, DTV 70.000 (Sommer 2000)	9,78 6,8 - 10,65	111 70 - 150
BARBOSA/HVITVED-JACOBSEN(1999)	Portugal, Gebirgsstraße, DTV 6.000 (vor 1999)	6,4 5,9 - 7,2	43 8,8 - 183,8
LEGRET/PAGOTTO (1999)	Frankreich, Autobahn A 11, DTV 12.000 (1995/1996)	7,4 6,3 - 7,9	280 60 - 17.620
LYGREN et al. (1984)	Norwegen, Autobahn E 6, DTV 10 000 (1982)	7,4 6,7 - 9,1	688 27 - 5.870

**Tab. 10:** pH-Werte und Leitfähigkeit in Straßenabflusswasser aus Literaturdaten (aus DIEHL 2001, oberer Wert: Median, unten: Wertebereich)

derschlagsereignisse in zwei Jahren beprobt haben, und der von LYGREN et al. wurden Leitfähigkeitswerte im Bereich der hier festgestellten gemessen. Die 90-Perzentile und Maximalwerte an den hier untersuchten Autobahnen liegen jedoch höher. Möglicherweise sind hier wegen der hohen Verkehrsstärken im Vergleich zu den Literaturdaten die NaCl- bzw. Tausalzeinträge höher.

Auch bei anderen Parametern ist ein Jahresgang im Straßenabfluss festzustellen. Als Beispiel ist in Bild 32 der zeitliche Verlauf der Konzentrationen von Calcium und Cadmium dargestellt. Beide weisen im Winter deutlich höhere Konzentrationen auf. Die Spannweite der Unterschiede umfasst bei beiden Stoffen über eine Größenordnung. Bei Calcium ist der Jahresgang noch ausgeprägter. Für Calcium

gibt es auch einen Erklärungsansatz, nämlich den Einsatz von Tausalz in Feuchtsalstechnik mit einem Soleanteil aus Calciumchloridlösung. Für Cadmium besteht die Möglichkeit, dass wegen der hohen Salz-, insbesondere Chloridkonzentrationen ein größerer Anteil des sonst im Straßensediment partikulär gebundenen Metalls in Chlorokomplexen in Lösung vorliegt. Dieser Effekt wurde von verschiedenen Autoren festgestellt, tritt allerdings eher bei niedrigen pH-Werten auf (SCHEFFER 1998). Der zeitliche Verlauf der Zinkkonzentrationen folgt demselben Muster (nicht dargestellt). Da die Streuung der Messwerte aber sowohl für Cadmium als auch für Zink im Vergleich zu den jahreszeitlichen Unterschieden relativ hoch ist, sollte erst ein längerer Messzeitraum abgewartet werden.

## 6 Fazit

### 6.1 Zusammenfassung

Zur Messung von Stoffeinträgen in straßennahe Böden wurden in Absprache mit dem Fachgebiet Luftschadstoffe drei Standorte an Bundesautobahnen ausgewählt. Zwei der drei Standorte weisen eine eindeutig unterscheidbare Luv- und Leeseite auf und liegen etwa quer zur Hauptwindrichtung. Eine gleichmäßige Schadstoffausbreitung ist an zwei von drei Standorten sehr gut möglich, gleichmäßiger Verkehrsfluss ist an zwei Standorten uneingeschränkt und an der A 61 etwas eingeschränkt vorhanden. Dadurch sind sowohl die Messung der Luftschadstoffe als auch die der Stoffeinträge in Böden sinnvoll möglich. Alle Verkehrsstärken sind größer als 65.000 Kfz/d und liegen damit über dem mittleren DTV auf den deutschen Autobahnen. Die drei Standorte decken bei vergleichbarer Gesamtverkehrsstärke mit 5.4 bis 19.8 % ein breites Spektrum von Lkw-Anteilen am DTV ab, sodass sich der Lkw-Einfluss gut untersuchen lässt.

Andere Emittenten als der Straßenverkehr sind nicht vorhanden oder liegen jeweils in ausreichender Entfernung, um ihren Einfluss vernachlässigbar zu halten. Die Bodenverhältnisse sind an zwei der drei Standorte für weiterführende Boden- und Sickerwasseruntersuchungen und Untersuchungen der Schadstoffverlagerung geeignet, weil gut durchlässige, sandige Böden ohne wesentlichen Grobanteil vorliegen. Alle Standorte liegen in der Nähe von bzw. direkt an einer Dauerzählstelle, sodass auch kurzzeitige Veränderungen der Konzentrationen der Luftschadstoffe verkehrsabhängig ausgewertet werden können.

Die Ergebnisse der Messperiode von Januar 2005 bis Juni 2006 zeigen, dass außer Schwermetallen auch sehr große Mengen an Massenelementen aus dem Straßenverkehr in den Straßenseitenraum gelangen. Das ist nicht nur Natrium aus Tausalzeinsatz, dessen Einfluss in Jahresgang und räumlicher Verteilung eindeutig nachzuweisen ist, sondern auch Calcium und Eisen in fast ebenso hohen Konzentrationen und Frachten. Es gibt Hinweise aus laufenden Forschungsprojekten, dass diese Massenelemente zur Verbesserung des Schadstoffbindungsvermögens im Bankett und in den partikulären Anteilen des Straßenabflusses beitragen.

Vergleichbare Untersuchungen anderer Autoren existieren bisher nicht. Eine Abschätzung zu Stoff-

einträgen in Boden und Wasser durch HILLENBRAND et al. (2005) zeigt, dass der Kraftfahrzeugverkehr erheblichen Anteil an den Einträgen von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden hat. Daten anderer Stoffe wurden von diesen Autoren wegen fehlender Datengrundlagen nicht untersucht.

Die hier untersuchten Stoffeinträge liegen in 1.5 m Höhe meist oberhalb der Vergleichswerte für Hintergrundmessstellen und städtische Räume. Die bodennah ermittelten Depositionsraten sind höher. Für viele der untersuchten Elemente wie Calcium, Chrom, Eisen, Kupfer und Nickel betragen die gemessenen mittleren Depositionsraten ein Mehrfaches der Vergleichswerte, andere wie Cadmium und Zink liegen nur wenig darüber. Die Ursache liegt unter anderem in einer gegenüber der Ermittlung der Vergleichswerte anderen Zielstellung. Die Vergleichswerte sind aus Immissionsmessungen zum Schutz der menschlichen Gesundheit abgeleitet, für die eine andere (fahrbahnfernere) Anordnung der Messpunkte vorgegeben ist.

Es besteht an allen Messstandorten ein starker Zusammenhang zwischen Höhe des Stoffeintrages und Entfernung vom Fahrbahnrand. Die räumlichen Verteilungen der Stoffeinträge zeigen zusätzlich klare Unterschiede für die drei Autobahnstandorte. Die Verkehrsstärken der drei Standorte unterscheiden sich nicht sehr stark, aber der Standort A 61 mit der höchsten Verkehrsstärke und einem zwei- bzw. dreimal höheren Lkw-Anteil als A 4 und A 555 weist auch die höchsten Staubbiederschlagsmengen und Depositionsraten für fast alle untersuchten Stoffe auf. Dagegen scheinen im Vergleich der Standorte A 555 und A 4 eher die Lage der Autobahn zur Hauptwindrichtung und die gefahrenen Geschwindigkeiten eine Rolle zu spielen. Trotz höherer Verkehrsstärke und höheren Lkw-Anteils liegen die Depositionsraten an der A 4 etwas niedriger als an der A 555 und im Wertebereich zwischen den Depositionsraten auf Luv- und Leeseite der A 555. Ein Einfluss der Lage der Messpunkte in Außen- oder Innenkurve mit entsprechender Entwässerung auf den Stoffeintrag ließ sich dagegen nicht feststellen.

Der Einfluss der Luv- und Leelage der Messpunkte lässt sich sowohl an der Höhe der fahrbahnnahe Stoffeinträge als auch an der räumlichen Verteilung der Depositionsraten belegen. Auf der Leeseite treten deutlich höhere Depositionsraten auf, und sie sinken mit zunehmender Entfernung auch langsamer wieder ab. Sowohl in Luv- als auch in Leelage

weisen die nach der VDI-Richtlinie in 1.5 m Höhe angeordneten Messpunkte straßennah niedrigere und straßenfern höhere Depositionsraten auf als die bodennah angeordneten.

Die hier dokumentierten Messungen bilden eine Datengrundlage für die Bearbeitung weiterführender Fragestellungen.

## 6.2 Ausblick

Die Messungen werden im Rahmen eines weiteren Projektes fortgesetzt.

An den Ergebnissen der A 4 zeigt sich, dass eine größere Zahl von Messpunkten insbesondere in direkter Straßennähe nötig ist, um das schnelle Abfallen der Stoffeinträge gut zu beschreiben. Damit soll vermieden werden, dass unnötig große Bereiche als belastet betrachtet werden. Vor diesem Hintergrund sollte die Messstelle an der A 4 auf der Südseite um zwei bis drei Messpunkte in 2.5 m, ggf. 5 m und 10 m erweitert werden. Bisher wurden diese Entfernungen nicht beprobt, da die Böschung sehr steil ist und schlecht für die Aufstellung von bodennahen Bergerhoffgefäßen geeignet erschien.

Die pH-Werte im Straßenabflusswasser liegen knapp unterhalb des Neutralbereiches und damit eher unterhalb der Werte, die nach Literaturdaten an stark befahrenen Straßen zu erwarten sind. Möglicherweise besteht ein Zusammenhang mit der Probenahmetechnik. Diese wird geprüft und falls nötig verändert.

Begleitend zu dieser Untersuchung wird zurzeit eine Diplomarbeit zur Evaluierung der Methodik der Erfassung der bodennahen Deposition durchgeführt. Es werden Versuche zur Verhinderung des Aufspritzens von Bodenpartikeln bei starken Niederschlägen durchgeführt. Dabei werden u. a. Bettungen aus technischen Glaskugeln um die Probenahmegefäße untersucht. Das Aufspritzen der Bodenpartikel kann die bodennahe Staubbodenschlagsmessung verfälschen, indem zu hohe Stoffeinträge in die Sammelgefäße erzeugt werden.

In der 4. Tochterrichtlinie zur Luftqualitätsrahmenrichtlinie der EU ist für die Gehalte einiger Stoffe in der Luft eine Beschränkung vorgegeben. Davon sind Cadmium, Nickel und polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) als straßenverkehrsrelevant anzusehen. Das ebenfalls genannte Arsen ist bisher nicht als straßenverkehrsrelevant

aufgefallen. Das kann anhand der Ergebnisse eines laufenden Forschungsprojektes zu Schadstoffgehalten in Bankettschälgut überprüft werden, um ggf. Arsen in das Messprogramm aufzunehmen. Über eine Veränderung des Parametersatzes entsprechend anderen besonders relevanten Substanzen kann ebenfalls nach Abschluss dieses Vorhabens entschieden werden. Vor dem Hintergrund der 4. Tochterrichtlinie zur Luftqualitätsrahmenrichtlinie der EU sollte überlegt werden, die Schwermetallgehalte des Schwebstaubes, der auf PM<sub>10</sub>-Filtern gesammelt wird, zu untersuchen.

## 7 Literatur

- AG Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. erw. Aufl., 392 S., Hrsg: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter in der BRD, Hannover 1994
- ATV-DVWK (2002): Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser (ATV-A 138). 50 S., ATV-DVWK, GFA Hennef 2002
- BARBOSA, A. E., HVITVED-JACOBSEN, T. (1999): Highway runoff and potential for removal of heavy metals in an infiltration pond in Portugal. *The Science of the Total Environment* 235, 151-159, Elsevier Science
- BASSt/BMVBW (2001): Autobahnverzeichnis 2001. Ca. 150 S., aufgestellt von der Bundesanstalt für Straßenwesen. Hrsg: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 2001
- BMVBW (2004): Karte zum Bedarfsplan für die Bundesfernstraßen, Anlage zum 5. FStr.AbÄndg vom 4.10.2004
- BMU (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Bonn, den 1.7.1999
- BMU (9/1998): Begründung zur Bodenschutzverordnung. 88 S.
- BROD, H. G. (1993): Langzeitwirkung von Streusalz auf die Umwelt. 165 S., Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 2. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- BROD, H. G. (1984): Auswirkungen der Auftausalze auf physikalische, chemische und biologische Bodenparameter. *Zeitschrift für Kulturtech-*

- nik und Flurbereinigung 25, 236-242, Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg
- Bundesregierung (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens vom 17. März 1998. Bundesgesetzblatt, 1998
- DANNECKER, W., AU, M., STECHMANN, H. (1990): Substance Load in Rainwater Runoff from Different Streets in Hamburg. *The Science of the Total Environment* 93, 385-392. Elsevier Amsterdam
- DIEHL, D. (2001): Schwermetalleinträge in einen Straßenrandboden am Beispiel der Autobahn A 7 Mellendorf. Projektarbeit im Studiengang Umwelttechnik der TU Berlin am Institut für Ökologie und Biologie, FG Standortkunde/Bodenschutz
- DIERKES, C., GEIGER, W. F. (1999): Dekontaminierende Wirkung belebter Bodenzonen bei verkehrsbedingten Beeinträchtigungen der Bodenqualität. Forschungsbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen FE 05.107/1996/GGB. 174 S.
- DIN ISO 11466 (6/1997): Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag
- DIN 38409 – 02 (3/1987): Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H) – Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe und des Glührückstandes (H<sub>2</sub>). 11 S. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag
- DIW/BMV (2000): Verkehr in Zahlen. Ausgabe 2000. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) Berlin, Bundesverkehrsministerium, Bonn
- DVWK-Merkblätter 229 (1994): Grundsätze zur Ermittlung der Stoffdeposition. 23 S. DVWK-Fachausschuss „Inhaltsstoffe des Niederschlages“, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn
- EBERT, A., KAISER, E., FUCHS, W. (1929): Geologische Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern 1:25000, Blatt 5408 Ahrweiler. Preußische Geologische Landesanstalt 1937
- ELLIS, J. B., REVITT, D. M. (1981): Incidence of Heavy Metals in Street Surface Sediments: Solubility and Grain Size Studies. *Water, Air, and Soil Pollution* 17 (1982), 87-100, D. Reidel Publishing Co. Dordrecht/Boston
- FARMER, J. G., EADES, L. J., MACKENZIE, A. B., KIRIKA, A., BAILEY-WATTS, T. E. (1996): Stable Lead Isotope Record of Lead Pollution in Loch Lomond Sediments since 1630 A. D. *Environmental Science and Technology* 30 (10), 3080-3083
- FGSV (2002): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten (RiStWag) – Ausgabe 2002. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- FGSV (2002): Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen, Teil: Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung – Ausgabe 2002 (MLuS-02). 28 S. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, Köln
- FGSV (1993): Hinweise für Maßnahmen an bestehenden Straßen in Wasserschutzgebieten. FGSV-Nr. 548, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- FGSV (1987): Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS) – Teil: Entwässerung (Ras-Ew). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- FLIEGEL, G., ASSMANN, P., ZIMMERMANN, E. (1915): Geologische Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten 1:25000, Blatt 5008 Mülheim am Rhein. Preußische Geologische Landesanstalt 1923
- GÄTH, S., STERNHEIM, M., FREDE, H.-G. (1991): Einfluss des Kraftfahrzeugverkehrs auf den Schwermetallgehalt von Straßenabflusswasser. *Forum Städte-Hygiene* 41, 235-238, Patzer Verlag, Hannover
- GOLWER, A. (1991): Belastung von Böden und Grundwasser durch Verkehrswege. *Forum Städte-Hygiene* 42 (8/9), 266-275
- GOLWER, A., ZEREINI, F. (1998): Einflüsse des Straßenverkehrs auf rezente Sedimente – Langzeituntersuchungen an einem Versickerbecken bei Frankfurt am Main. *Geol. Jb. Hessen* 126, 47-70, Wiesbaden 1998
- HARRISON, R. M., JOHNSTON, W. R. (1985): Deposition Fluxes of Lead, Cadmium, Copper

- and Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAH) on the Verges of a Major Highway. *The Science of the Total Environment* 46, 121-135, Elsevier Amsterdam
- HELMERS, E., WILK, G., WIPPLER, K. (1994): Lead in the Urban Environment – Studying the Strong Decline in Germany. *Chemosphere* 30 (1), 89-101, Pergamon
- HEWITT, C. N., RASHED, M. B. (1990a): An Integrated Budget for Selected Pollutants for a Major Rural Highway. *The Science of the Total Environment* 93, 375-384, Elsevier Amsterdam
- HEWITT, C. N., RASHED, M. B. (1990b): The Deposition of Selected Pollutants Adjacent to a Major Rural Highway. *Atmospheric Environment* 25A (576), 979-983, Pergamon Press, 1991
- HILLENBRAND, Th., TOUISSANT, D., BÖHM, E., FUCH, S., SCHERER, U., RUDOLPHI, A., HOFFMANN, M., KREIßIG, J., KOTZ, Ch. (2005): Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden – Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. UBA-Texte 19/05, Umweltbundesamt
- KOCHER, B. (2004): Vergleich von Rechenmodellen zur Beschreibung der Schwermetallverlagerung in Straßenrandböden. Unveröffentlichter Forschungsbericht der BAST (AP 01653)
- KOCHER, B., WESSOLEK, G. (2002): Verlagerung straßenverkehrsbedingter Stoffe mit dem Sickerwasser. 99 S., *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 864, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Bonn 2003
- KOCHER, B., PRINZ, D. (1998, unveröffentlicht): Herleitung von Kenngrößen zur Schadstoffbelastung des Schutzgutes Boden durch den Straßenverkehr. 150 S., Schlussbericht zum FE-Projekt 02.168 R95L, Bundesanstalt für Straßenwesen/Bundesverkehrsministerium
- KRAUTH, K., KLEIN, H. (1982): Untersuchungen über die Beschaffenheit des Oberflächenwassers von Bundesautobahnen, Teil I und Teil II. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Heft 363, 73 S., Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg
- KRAUTH, K., STOTZ, G. (1987): Menge und Beschaffenheit von Straßenoberflächenwasser beim Abfluss über bewachsene Seitenstreifen, Mulden und Böschungen (Auswertung von Forschungsarbeiten). In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Heft 509, 87-105, Bundesminister für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg
- LECHNER, K., LUDWIG, K., KRAUTH, K., STOTZ, G. (1987): Abflüsse von Straßen mit offenen Längsentwässerungen; Menge und Beschaffenheit von Straßenoberflächenwasser beim Abfluss über bewachsene Seitenstreifen, Mulden und Böschungen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Heft 509, S. 1-84, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn Bad-Godesberg
- LEGRET, M., PAGOTTO, C. (1999): Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway. *The Science of The Total Environment* 235, 143-150, Elsevier Science
- MAKEPEACE, D. K., SMITH, D. W., STANLEY, S. J. (1995): Urban Stormwater Quality: Summary of Contaminant Data. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 25 (2), 93-139, CRC Press
- MUSCHACK, W. (1990): Pollution of Street Run-Off by Traffic and Local Conditions. *The Science of the Total Environment* 93, 419-431, Elsevier, Amsterdam
- NORRA, S. (1995): Anorganische Schadstoffbelastung in Stäuben, Straßensedimenten, Böden und Pflanzen entlang innerstädtischer Straßen am Beispiel von sechs Standorten in Karlsruhe. Diplomarbeit, 246 S., Institut für Petrographie und Geochemie, Universität Karlsruhe
- PFEFFER, H.-U. (1994): Ambient Air Concentrations of Pollutants at Traffic-Related Sites in Urban Areas of North Rhine-Westphalia, Germany. *The Science of the Total Environment* 146/147, 263-273, Elsevier Amsterdam
- RADTKE, U., GAIDA, R., SAUER, K.-H. (1990): Verteilung von Blei und Zink in autobahnnahen Podsolen und Parabraunerden. In: *Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Böden – Einträge, Bewertung, Regelungen – Teil 1. VDI-Berichte* 837, 129-150, VDI-Verlag Düsseldorf
- RAUFF, H., ZIMMERMANN, E., KEGEL, W. (1916): Geologische Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten 1:25.000, Blatt 5208,

- Bonn. Preußische Geologische Landesanstalt  
1923
- REINIRKENS, P. (1996): Analysis of Emissions through Traffic Volume in Roadside Soils and their Effects on Seepage Water. *The Science of the Total Environment* 189/190, 361-369, Elsevier Amsterdam
- SCHEFFER, F. (14. Aufl. 1998): Lehrbuch der Bodenkunde (Scheffer/Schachtschabel). 494 S. Von P. SCHACHTSCHABEL, H. P. BLUME, G. BRÜMMER, K. H. HARTGE, U. SCHWERTMANN, unter Mitarbeit von K. AUERSWALD, L. BEYER, W. R. FISCHER, I. KÖGEL-KNABNER, M. RENGGER und O. STREBEL. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1998
- SIEKER, F., GROTTKER, M. (1988): Beschaffenheit von Straßenoberflächenwasser bei mittlerer Verkehrsbelastung. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Heft 530, 158 S., Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn Bad Godesberg
- THÖNI, L., SEITLER, E. (2004): Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz – Moosanalysen 1990-2000. *Umwelt-Materialien* Nr. 180 Luft, 140 S., BUWAL – Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2004
- VDI-Richtlinie 2119 Blatt 2 (1996): Messung partikelförmiger Niederschläge-Bestimmung des Staubbiederschlages mit Auffanggefäßen aus Glas (Bergerhoff-Verfahren) oder Kunststoff. 12 S. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Beuth Verlag, Berlin
- VDI-Richtlinie 2267 Teil 5 (1997, bestätigt 2004): Stoffbestimmung an Partikeln in der Außenluft – Messen der Massenkonzentration von Al, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, V, Zn als Bestandteile des Staubbiederschlages mit Hilfe der optischen Emissionsspektrometrie (ICP-OES). 23 S. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN-Normenausschuss KRdL, Beuth Verlag, Berlin
- VDI-Richtlinie 2267 Teil 14 (2003): Stoffbestimmung an Partikeln in der Außenluft – Messen der Massenkonzentration von Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, V, Zn mit Hilfe der optischen Emissionsspektrometrie (ICP-OES) nach Filterprobenahme und Aufschluss in oxidierendem Säuregemisch. 18 S. Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN, Beuth Verlag, Berlin
- WARREN, R. S., BIRCH, P. (1987): Heavy Metal Levels in Atmospheric Particulates, Roadside Dust and Soil along a Major Urban Highway. *The Science of the Total Environment* 59, 253-256. Elsevier, Amsterdam

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

### 2007

V 133: Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge Hübelt, Schmid	€ 17,50
V 134: Qualifizierung von Auditoren für das Sicherheitsaudit für Innerortsstraßen Gerlach, Kesting, Lippert	€ 15,50
V 135: Optimierung des Winterdienstes auf hoch belasteten Autobahnen Cypra, Roos, Zimmermann	€ 17,00
V 136: Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen Wermuth, Sommer, Wulff	€ 15,00
V 137: PM <sub>x</sub> -Belastungen an BAB Baum, Hasskelo, Becker, Weidner	€ 14,00
V 138: Kontinuierliche Stickoxid (NO <sub>x</sub> )- und Ozon (O <sub>3</sub> )-Messwertaufnahme an zwei BAB mit unterschiedlichen Verkehrsparametern 2004 Baum, Hasskelo, Becker, Weidner	€ 14,50
V 139: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen Wirtz, Moritz, Thesenvitz	€ 14,00
V 140: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2004 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen Fitschen, Koßmann	€ 15,50
V 141: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2003 Lensing	€ 15,00
V 142: Sicherheitsbewertung von Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs in Arbeitsstellen Fischer, Brannolte	€ 17,50
V 143: Planung und Organisation von Arbeitsstellen kürzerer Dauer an Bundesautobahnen Roos, Hess, Norkauer, Zimmermann, Zackor, Otto	€ 17,50
V 144: Umsetzung der Neuerungen der StVO in die straßenverkehrsrechtliche und straßenbauliche Praxis Baier, Peter-Dosch, Schäfer, Schiffer	€ 17,50
V 145: Aktuelle Praxis der Parkraumbewirtschaftung in Deutschland Baier, Klemp, Peter-Dosch	€ 15,50
V 146: Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen Badelt, Breitenstein, Fleisch, Häusler, Scheurl, Wendl	€ 18,50
V 147: Luftschadstoffe an BAB 2005 Baum, Hasskelo, Becker, Weidner	€ 14,00
V 148: Berücksichtigung psychologischer Aspekte beim Entwurf von Landstraßen – Grundlagenstudie – Becher, Baier, Steinauer, Scheuchenpflug, Krüger	€ 16,50
V 149: Analyse und Bewertung neuer Forschungserkenntnisse zur Lichtsignalsteuerung Boltze, Friedrich, Jentsch, Kittler, Lehnhoff, Reusswig	€ 18,50
V 150: Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst Rommeiß, Thrän, Schlägl, Daniel, Scholwin	€ 18,00

V 151: Städtischer Liefer- und Ladeverkehr – Analyse der kommunalen Praktiken zur Entwicklung eines Instrumentariums für die StVO Böhl, Mausa, Kloppe, Brückner	€ 16,50
V 152: Schutzeinrichtungen am Fahrbahnrand kritischer Streckenabschnitte für Motorradfahrer Gerlach, Oderwald	€ 15,50
V 153: Standstreifenfreigabe – Sicherheitswirkung von Umnutzungsmaßnahmen Lemke	€ 13,50
V 154: Autobahnverzeichnis 2006 Kühnen	€ 22,00
V 155: Umsetzung der Europäischen Umgebungslärmrichtlinie in Deutsches Recht Bartolomaeus	€ 12,50
V 156: Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen Badelt, Seliger, Moritz, Scheurl, Häusler	€ 13,00
V 157: Prüfung von Fahrzeugrückhaltesystemen an Straßen durch Anprallversuche gemäß DIN EN 1317 Klößner, Fleisch, Balzer-Hebborn, Ellmers, Friedrich, Kübler, Lukas	€ 14,50
V 158: Zustandserfassung von Alleebäumen nach Straßenbaumaßnahmen Wirtz	€ 13,50
V 159: Luftschadstoffe an BAB 2006 Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner	€ 13,50
V 160: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2005 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen Fitschen, Koßmann	€ 25,50
V 161: Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen – Infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe Listl, Otto, Zackor	€ 14,50
V 162: Ausstattung von Anschlussstellen mit dynamischen Wegweisern mit integrierter Stauinformation – dWiSta Grahl, Sander	€ 14,50
V 163: Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen Brilon, Wietholt, Wu	€ 17,50
V 164: Straßenverkehrszählung 2005 – Ergebnisse Kathmann, Ziegler, Thomas	€ 15,00

### 2008

V 165: Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM <sub>10</sub> -Emissionen von Straßen Quass, John, Beyer, Lindermann, Kuhlbusch, Hirner, Sulkowski, Sulkowski, Hippler	€ 14,50
V 166: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2006 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen Fitschen, Koßmann	€ 26,00
V 167: Schadstoffe von Bankettmaterial – Bundesweite Datenauswertung Kocher, Brose, Siebertz	€ 14,50
V 168: Nutzen und Kosten nicht vollständiger Signalisierungen unter besonderer Beachtung der Verkehrssicherheit Frost, Schulze	€ 15,50
V 169: Erhebungskonzepte für eine Analyse der Nutzung von alternativen Routen in übergeordneten Straßennetzen Wermuth, Wulff	€ 15,50
V 170: Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonals in Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen Roos, Zimmermann, Riffel, Cypra	€ 16,50

- V 171: Pilotanwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN)**  
Weinert, Vengels € 17,50
- V 172: Luftschadstoffe an BAB 2007**  
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50
- V 173: Bewertungshintergrund für die Verfahren zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge**  
Altreuther, Beckenbauer, Männel € 13,00
- V 174: Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PM<sub>x</sub>-Belastung an Straßen**  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Düring, Lohmeyer, Moldenhauer, Knörr, Kutzner, Becker, Richter, Schmidt € 29,00
- V 175: Maßnahmen gegen die psychischen Belastungen des Personals des Straßenbetriebsdienstes**  
Fastenmeier, Eggerdinger, Goldstein € 14,50

## 2009

- V 176: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von Pkw, Transportern und Lkw**  
Schulze, Hübel € 13,00
- V 177: Sicherheitswirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB A24**  
Lerner, Hegewald, Löhe, Velling € 13,50
- V 178: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2007 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen**  
Fitschen € 26,00
- V 179: Straßenverkehrszählung 2005: Methodik**  
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,50
- V 180: Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn**  
Hausmann € 14,50
- V 181: Voraussetzungen für dynamische Wegweisung mit integrierten Stau- und Reisezeitinformationen**  
Hülsemann, Krems, Henning, Thieme € 18,50
- V 182: Verkehrsqualitätsstufenkonzepte für Hauptverkehrsstraßen mit straßenbündigen Stadt-/Straßenbahnkörpern**  
Sümmermann, Lank, Steinauer, M. Baier, R. Baier, Klemps-Kohnen € 17,00
- V 183: Bewertungsverfahren für Verkehrs- und Verbindungsqualitäten von Hauptverkehrsstraßen**  
Lank, Sümmermann, Steinauer, Baur, Kemper, Probst, M. Baier, R. Baier, Klemps-Kohnen, Jachtmann, Hebel € 24,00
- V 184: Unfallrisiko und Regelakzeptanz von Fahrradfahrern**  
Alrutz, Bohle, Müller, Prahlow, Hacke, Lohmann € 19,00
- V 185: Möglichkeiten zur schnelleren Umsetzung und Priorisierung straßenbaulicher Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit**  
Gerlach, Kesting, Thiemeyer € 16,00
- V 186: Beurteilung der Streustoffverteilung im Winterdienst**  
Badelt, Moritz € 17,00
- V 187: Qualitätsmanagementkonzept für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes**  
Kirschfink, Aretz € 16,50

## 2010

- V 188: Stoffeinträge in den Straßenseitenraum – Reifenabrieb**  
Kocher, Brose, Feix, Görg, Peters, Schenker € 14,00
- V 189: Einfluss von verkehrsberuhigenden Maßnahmen auf die PM<sub>10</sub>-Belastung an Straßen**  
Düring, Lohmeyer, Pöschke, Ahrens, Bartz, Wittwer, Becker, Richter, Schmidt, Kupiainen, Pirjola, Stojiljkovic, Malinen, Portin € 16,50

- V 190: Entwicklung besonderer Fahrbahnbeläge zur Beeinflussung der Geschwindigkeitswahl**  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Lank, Steinauer, Busen € 29,50
- V 191: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2008**  
Fitschen, Nordmann € 27,00  
Dieser Bericht ist als Buch und als CD erhältlich oder kann ferner als kostenpflichtiger Download unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.
- V 192: Anprall von Pkw unter großen Winkeln gegen Fahrzeugrückhaltesysteme**  
Gärtner, Egelhaaf € 14,00
- V 193: Anprallversuche an motorradfahrerfreundlichen Schutzeinrichtungen**  
Klößner € 14,50
- V 194: Einbindung städtischer Verkehrsinformationen in ein regionales Verkehrsmanagement**  
Ansorge, Kirschfink, von der Ruhren, Hebel, Johanning € 16,50
- V 195: Abwasserbehandlung an PWC-Anlagen**  
Londong, Meyer € 29,50  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.
- V 196: Sicherheitsrelevante Aspekte der Straßenplanung**  
Bark, Kutschera, Baier, Klemps-Kohnen € 16,00
- V 197: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2008**  
Lensing € 16,50
- V 198: Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2005/2006**  
Kocher, Brose, Chlubek, Karagüzel, Klein, Siebertz € 14,50

---

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10  
D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.