

Schadstoffgehalte von Bankettmaterial

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 167

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page, partially overlapping a vertical white line that runs down the right side of the cover.

Schadstoffgehalte von Bankettmaterial

Bundesweite Datenauswertung

von

Birgit Kocher

unter Mitwirkung von

Susanne Brose

Ingrid Siebertz

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 167

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 **BASt-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 06636 des Arbeitsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen:
Schadstoffgehalte von Bankettmaterial
– Bundesweite Datenauswertung

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
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-86509-800-9

Bergisch Gladbach, März 2008

Kurzfassung – Abstract

Schadstoffgehalte von Bankettmaterial

Es wurde eine Datenauswertung von Schadstoffgehalten in Bankettmaterial an 840 Proben und 40 Parametern durchgeführt. Bei getrennter Betrachtung der Straßentypen zeigen sich Autobahnen als die am stärksten belasteten Straßen. Hier ist für Blei, Cadmium, Kupfer und Zink sowohl bei den Feststoffgehalten als auch bei den Eluatgehalten ein deutlicher Unterschied zu den deutlich weniger belasteten Bundes-, Landes- und Kreisstraßen zu sehen. Die Vorsorgewerte vieler Stoffe sind an Autobahnen deutlich häufiger überschritten. Bei den anderen Schwermetallen tritt dieser Unterschied nicht in Erscheinung. Die Feststoffgehalte der organischen Schadstoffe PAK, MKW, PCB und EOX überschreiten häufig die Vorsorgewerte.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass 95 % der Eluatkonzentrationen von Blei, Zink und Cadmium ebenso wie von Chlorid, Sulfat, Cyanid, Arsen, Nickel, Chrom und Quecksilber die Geringfügigkeitsschwellen und Prüfwerte für Sickerwasser unterschreiten. Bei Kupfer dagegen wird die Geringfügigkeitsschwelle auch bei niedrigen Verkehrsstärken oft überschritten, und bei den Autobahnen liegen mehr als 50 % der Messwerte oberhalb des Z0/Z0*-Wertes für die uneingeschränkte Verwertung von Bodenmaterial. Über 90 % der Kupfer-Eluatwerte unterschreiten jedoch den derzeit gültigen Prüfwert der Bodenschutzverordnung.

Auf Anregung des UBA wurden Säulenversuche mit feldfrischem Bankettmaterial durchgeführt. Es ist vorgesehen, diese Methode zukünftig zur Bewertung der löslichen Schadstoffanteile in Böden und mineralischen Abfällen anzuwenden. Die Versuche zeigten eine sehr starke Bindung der PAK und aller Schwermetalle außer Kupfer an das Bankettmaterial. Die Geringfügigkeitsschwellen der LAWA werden von allen Stoffen außer Kupfer eingehalten.

Eine vergleichende Auswertung von Labor- und Felduntersuchungen zur Reinigungsleistung von Straßenbankettböden und Entwässerungseinrichtungen zeigte für MKW, PAK und alle Schwermetalle sehr guten Rückhalt der eingetragenen Konzentrationen und Frachten mit Wirkungsgraden von 70 bis 95 %. Kupfer erreichte in Sandböden nur einen Fracht-Wirkungsgrad von 50 %, die Konzen-

trationen im Sickerwasser überschritten jedoch nicht die Prüfwerte der Bodenschutzverordnung.

Anhand dieser Informationen wurden problematische Stoffe in Bankettmaterial identifiziert. Das sind Kupfer, polychlorierte Biphenyle (PCB) und extrahierbare halogenierte Kohlenwasserstoffe (EOX). Die Recherche möglicher Ursachen ergab, dass der Abrieb von kupferhaltigen Bremsbelägen die Hauptquelle für hohe Kupfergehalte und wahrscheinlich auch für die hohen eluierbaren Anteile im Bankett ist. Er ist nach Angaben des UBA und der EU-Kommission auch eine Hauptquelle für Kupferemissionen insgesamt. Eine vergleichbar eindeutige Quelle konnte für die hohen PCB- und EOX-Konzentrationen mancher Bankettproben nicht gefunden werden.

Das belastete Material emittiert nicht, sondern bindet weiterhin Schadstoffe. Die partikulären Stoffe im Straßenabfluss tragen zum Erhalt der Schadstoffbindungsfähigkeit in den Banketten bei. Insofern steht einer weiteren Verwendung oder Verbleib im Bankett durch Umlagerung lediglich die umstrittene Einstufung als zu entsorgender Abfall entgegen, nicht jedoch die Funktionsfähigkeit in Bezug auf die Reinigungsleistung.

Quellen und Rückhaltevermögen des Banketts für PCB und EOX sollten geprüft werden. Die Emissionen von Kupfer aus dem Straßenverkehr sollten deutlich gesenkt werden.

Pollutant content in roadside soil material

At the border of rural roads and highways dust and wear debris are deposited. They accumulate at the grassy shoulder of the roads and often get abundantly covered with vegetation. In Germany this built-up soil material is scraped off every five to twelve years to ensure the drainage of the roads and maintain road safety. The resulting 2.3 million tons of roadside soil material (Bankettmaterial) consist mainly of mineral particles, but also of humus, plant residues and contaminants.

Data concerning the pollutant content in roadside soil material, including 840 samples and 40 parameters, were analysed. A separate analysis of the road types showed that motorways were the

most highly stressed roads. They showed a significant difference for lead, cadmium, copper and zinc in the eluate and solids content when compared to the less traffic loaded federal, national, and regional roads. The precautionary values of many substances were significantly more often exceeded on motorways. Other heavy metals do not show this pattern. The solids content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), mineral-oil-based hydrocarbons (MOH), polychlorinated biphenyls (PCB) and extractable, halogenated hydrocarbons (EOX) often exceed the precautionary values.

The results further showed that 95% of the eluate concentrations of lead, zinc, cadmium chloride, sulphate, cyanide, arsenic, nickel, chromium and mercury were below the negligibility thresholds and the test values for soil seepage water. However the negligibility threshold for copper was often exceeded, even for low traffic loads. On motorways, more than 50% of the measured values were above the Z0/Z0* values for unrestricted use of soil material. However, more than 90% of the copper eluate values were below the currently valid test value of the Soil Protection Ordinance.

Column tests with roadside soil material freshly obtained from the field were performed. The tests showed strong retention of PAH and all heavy metals except copper. The negligibility thresholds of the LAWA (German Working Group on water issues of the Federal States and the Federal Government) were not exceeded by any material except copper.

A comparative evaluation of laboratory and field investigations concerning the cleaning effect of road shoulder soils and drainage devices showed that concentrations and charges of MOH, PAH and heavy metals were very well retained. Efficiencies of 70 to 95% were achieved. The charge retention efficiency for copper in sandy soils was only 50%, but the concentrations in the soil seepage water did not exceed the test values of the Soil Protection Ordinance.

The results were used to identify critical substances in the hard shoulder material. They include copper, PCB and EOX. An investigation of possible causes indicated the wear of brake liners containing copper as a main source for the high copper content and possibly also for the high content of eluable components in the hard shoulder. According to literature, this also contributes a major share of the overall copper emission. No obvious source of this

kind could be found for the high PCB and EOX concentrations found in some samples. The stressed material does not release the pollutants, but continues to bind them. The particular matter in the road effluent contributes towards retaining the ability of a hard shoulder covered with soil and grass to bind pollutants. The only obstacle to the further use of roadside soil material or to its retention in the hard shoulder is the disputed classification as waste to be disposed of, whereas their continued cleaning capacity seems to be an advantage.

Sources of PCB and EOX and the retention capability of the hard shoulder for these substances should be investigated. The emissions of copper from road traffic should be significantly reduced.

Inhalt

1	Einführung und Stand der Forschung	7	4.2	Mögliche Quellen auffälliger Stoffe im Bankettmaterial	39
1.1	Bankett und Banketterhaltung	7	4.2.1	Kupfer	41
1.2	Stoffeintrag in Bankette	10	4.2.2	PAK, MKW	43
1.3	Gegenstand der Untersuchung	12	4.2.3	PCB, EOX	44
2	Methoden	12	4.3	Empfehlungen zum Umgang mit Bankettmaterial	46
2.1	Datenquellen	12	4.4	Zukünftig zu beachtende Stoffe	47
2.2	Vergleich mit Vorsorgewerten, Zuordnungswerten und Prüfwerten ...	13	5	Fazit	48
2.3	Säulenversuche	15	5.1	Zusammenfassung	48
2.3.1	Hintergrund	15	5.2	Ausblick	49
2.3.2	Methodenbeschreibung	16	6	Literatur	50
2.3.3	Probenahme	17			
2.4	Methoden- und Standortbeschreibung der zitierten Untersuchungen zum Schadstoffrückhalt im Bankett ...	19			
3	Ergebnisse	20			
3.1	Datenauswertung von Bankettmaterial	20			
3.1.1	Schwermetalle in Feststoff und Eluaten	21			
3.1.2	Organische Schadstoffe	26			
3.1.3	Weitere Parameter	28			
3.1.4	Zuordnung der Ergebnisse zu Z-Werten für die Verwertung mineralischer Abfälle	30			
3.2	Säulenversuche	33			
3.2.1	PAK in Feststoff und Eluat	33			
3.2.2	Schwermetalle und anorganische Parameter	34			
3.3	Rückhaltewirkung von Bankettmaterial und Straßenrandböden	37			
4	Diskussion	39			
4.1	Vergleichbarkeit der Untersuchungen	39			

1 Einführung und Stand der Forschung

1.1 Bankett und Banketterhaltung

Bankette sind der „unmittelbar neben der Fahrbahn oder dem befestigten Seitenstreifen liegende Teil der Straße“ (FGSV 2000a). Sie gehören wie auch die Böschungen zum Erdkörper der Straße und sind zum Schutz gegen Erosion und zur Einbindung des Bauwerkes in die Landschaft meistens mit einer Grasnarbe bedeckt. Sie erfüllen die bautechnische Funktion, den beim Befahren der Straße auftretenden seitlichen Druck aufzufangen und damit die befestigten Teile des Straßenkörpers zu stützen und das Oberflächenwasser abzuleiten. Sie müssen aus Sicherheitsgründen von Hindernissen freigehalten werden, auch Verkehrszeichen, Schutzplanken und andere Teile der Straßenausstattung sind mit einem Sicherheitsabstand vom befestigten Teil der Straße aufzustellen.

Bild 1 zeigt die im Straßenbauregelwerk vorgegebenen Gefälle, die für die Funktionen des Bauwerkes eingehalten werden müssen. Zur Sicherstellung der Entwässerung der Fahrbahn oder befestigter Verkehrsnebenflächen müssen Bankette (unbefestigte Seitenstreifen) eine Neigung zur Böschung hin aufweisen, dazu sind sie mit einer Querneigung von 12 % nach außen anzulegen. Sie sind etwa 3 cm tiefer an den Rand der befestigten Flächen anzuschließen. Durch geeignete Maßnahmen ist dem Hochwachsen der Seitenstreifen entgegenzuwirken, z. B. durch Schälen der Bankette. Werden die Fahrbahn oder befestigte Verkehrsnebenflächen nicht über den Seitenstreifen entwässert, erhält der Seitenstreifen eine Querneigung von 6 % (FGSV 2005).

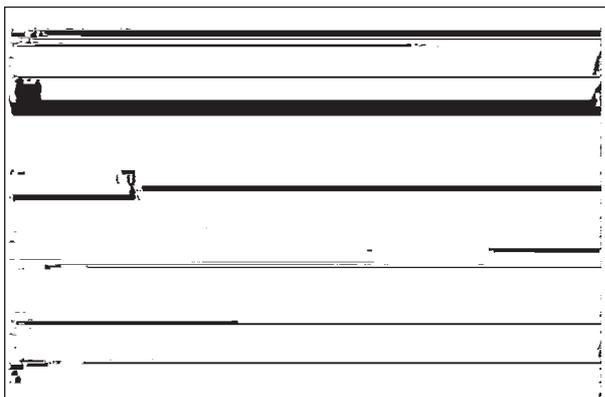


Bild 1: Randausbildung von Straßen ohne Bord (VELSKE 2002)

An Straßen mit freier Entwässerung über Bankett und Böschung wächst das Bankett im Lauf der Jahre hoch. Ursache dafür ist der Eintrag von Stäuben, beispielsweise aus Abrieben von Reifen, Fahrbahn und Fahrzeugen, die luftgetragen und mit dem Straßenabfluss in das Bankett gelangen. Aber auch gröbere Stoffe, z. B. aus Ladungsverlusten von schlecht abgedeckten Lkw, tragen zum Hochwachsen der Bankette bei.

Hochgewachsene Bankette stellen ein Hindernis für den Straßenabfluss dar, sodass die Gefahr von Aquaplaning steigt. Die längere oder gar dauernde Feuchthaltung der Ränder der Straßendecke führt zu häufigeren Bauwerksschäden durch Verwitterung und Frostaufbrüche. Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und zur Erhaltung der Bauwerke werden deshalb die Bankette reguliert, sodass die vorgegebenen Gefälleverhältnisse wieder hergestellt werden. Dieses Bankettschälen oder Bankettfräsen erfolgt nach einer Umfrage bei den bundesdeutschen Meistereien in Abständen von fünf bis zwölf Jahren (KOCHER/WIRTZ 2004, siehe auch Bilder 2 und 3). Bankettregulierungen werden fast ausschließlich an Außerortsstraßen mit freier Entwässerung über das Bankett durchgeführt. Sie sind eine anerkannte und notwendige Maßnahme zur Bauwerkserhaltung und zur Verkehrssicherung.

Aufgrund einer teilweise ungeklärten Rechtslage bestehen seit einigen Jahren große Unsicherheiten, wie mit Bankettmaterial umgegangen werden soll. Das beim Fräsen oder Schälen früher häufig praktizierte Verschieben oder Verblasen von Bankettmaterial in den Straßenseitenraum wird von vielen Umweltbehörden sehr kritisch gesehen. Sie leiten aus der in einigen Bundesländern eingeführten Vollzugshilfe zu § 12 der Bodenschutzverordnung die Forderung nach Einhaltung der Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung beim Einsatz des Bankettmaterials ab.

Bankettmaterial hält diese Vorsorgewerte oft nicht ein, genügt dagegen aber häufig den Zuordnungswerten der LAGA-Mitteilung 20 zur Verwertung mineralischer Abfälle für den offenen Einbau. Diese Regelung ist jedoch nicht in allen Bundesländern eingeführt, und Bankettmaterial fällt wegen seines Gehaltes an Humus und Pflanzenresten eigentlich nicht in ihren Geltungsbereich. Im Erdbau wird Bankettmaterial bisher wegen seiner als ungünstig angesehenen bautechnischen Eigenschaften ungern verwendet.



Bild 2: Wie wird Bankett geschält? Beispiele von oben links nach unten rechts: a) Schälern mit seitlichem Verschieben, b) Fräsen mit Aufnehmen, c) Fräsen mit Verblasen, d) Grabenräumen mit Aufnehmen

Dies führt dazu, dass weit mehr Bankettschälgut auf Deponien landet, als es aufgrund seines hohen mineralischen Anteils von meist über 90 % und aufgrund seiner vergleichsweise niedrigen Schadstoffgehalte notwendig wäre.

Im Rahmen des Projektes „Entwicklung eines Entsorgungskonzeptes für Abfälle im Bereich von Straßen- und Autobahnmeistereien“ (BALD et al. 2003) wurde ein Fragebogen zur Praxis der Entsorgung von Abfällen aus der betrieblichen Straßenunterhaltung an alle Straßen- und Autobahnmeistereien (SM/AM) verschickt. Der Rücklauf war mit fast 90 % auswertbaren Antworten von 823 verschickten Fragebögen sehr hoch, sodass die Ergebnisse als repräsentativ gelten können. Im Rahmen des Projektes „Untersuchungen zur Abfallentsorgung an Bundesfernstraßen, Teil III“ (WIRTZ et al. 2003) wurde daraus eine Datenbank aufgebaut, die alle Ergebnisse des Fragebogens aus dem vorgenannten Projekt enthält. Die Fragen 26 bis 29 dieses Fragebogens befassen sich mit Bankettschälgut.

Es wurden unter anderem Informationen zu Schälhäufigkeit, Maßnahmen zur Reduzierung der Schälmenge, Prüfung auf Schadstoffe sowie zu praktizierten Entsorgungswegen und deren Kosten abgefragt. In den „Untersuchungen zur Abfallentsorgung an Bundesfernstraßen, Teil: Bankettschälgut“ (KOCHER/WIRTZ 2004) wurden die Ergebnisse ausgewertet. Daraus werden hier einige Auszüge vorgestellt.

Die Meistereien haben jeweils Streckenabschnitte bzw. ein Netz zwischen 30 bis 480 km Länge zu betreuen. Darin nimmt bei den AM der Anteil vierstreifiger Streckenabschnitte die Hauptlänge ein, bei SM sind es die zweistreifigen. Die zeitlichen Abstände der Schälungen an einem Standort liegen meist zwischen 5 und 12 Jahren. Dabei wird an Autobahnen in etwas längeren Zeitabständen geschält als an Bundes- und Landesstraßen (Bild 3). Die Abschnitte werden üblicherweise nach Bedarf, also nach der Höhe des aufgewachsenen Bankettes, ausgewählt. Dadurch ergibt sich, dass im Som-

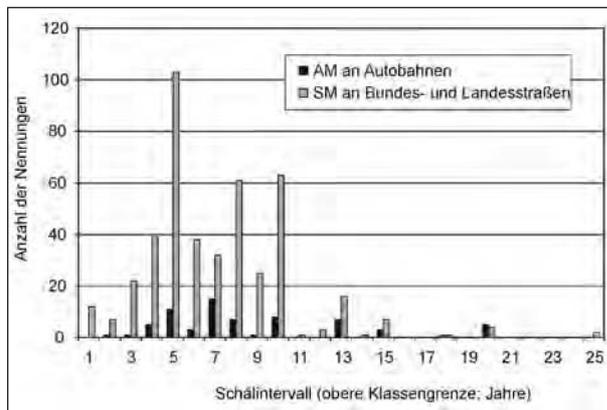


Bild 3: Zeitliche Abstände von Bankettschälungen der Autobahnmeistereien an Autobahnen und der Straßenmeistereien an Bundes- und Landesstraßen

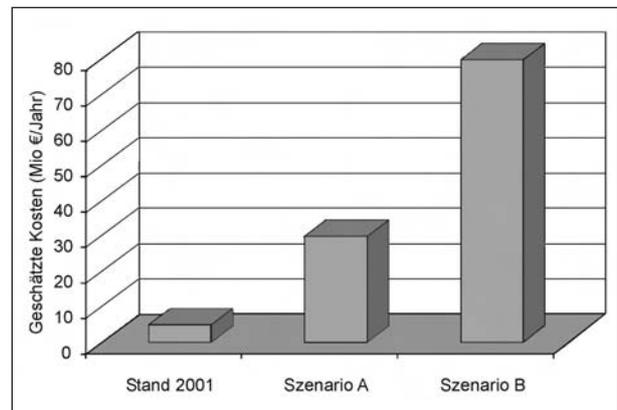


Bild 5: Änderung der geschätzten bundesweit anfallenden Entsorgungskosten für Bankettschälgut von klassifizierten Straßen

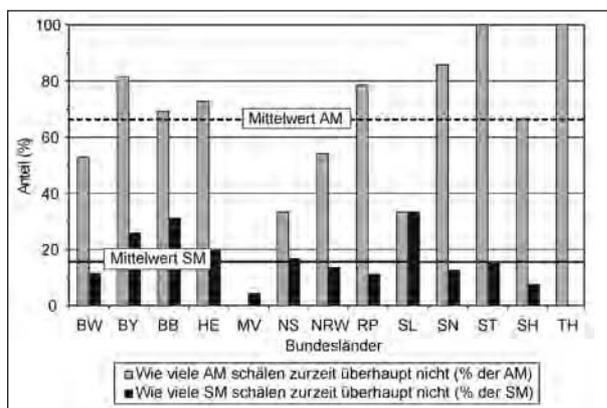


Bild 4: Anteil der Meistereien, die keine Bankettschälungen durchführen, nach Meistereityp und Bundesländern (Stand Befragung 2001)

mer jeweils ein entsprechender Anteil des Straßennetzes, für das eine Meisterei zuständig ist, reguliert wird. Dieser lässt sich aus den Schälabständen mit etwa vier bis acht Prozent des Netzes schätzen.

Deswegen ist es auffällig, dass zum Befragungszeitpunkt viele der Meistereien keine Bankettschälungen durchführten (Bild 4). Das betrifft insbesondere die Autobahnmeistereien. Trotz der anerkannten Notwendigkeit, hochgewachsene Bankette aus Gründen der Verkehrssicherheit und Bauwerkserhaltung zu regulieren, werden die Maßnahmen in den letzten Jahren sehr häufig zurückgestellt oder vollständig ausgesetzt. Die Bemerkungen, die in den Fragebögen dazu abgegeben wurden, zeigen, dass die Gründe vor allem in Schwierigkeiten mit der Lagerung, Wiederverwendung oder Entsorgung des Materials liegen (Rechtsfragen und Kostengründe).

Die Befragung aller Straßen- und Autobahnmeistereien zum Aufkommen und Verbleib von Bankettmaterial durch die BASt (KOCHER/WIRTZ 2004)

	Netzlänge (km)	DTV Kfz/24h	Lkw-Anteil (%)	Bankettmaterial (Mio. t/a)
Autobahnen	12 174	49 400	15,4	0,12
Bundesstraßen	40 969	9 340	8,2	0,41
Landesstraßen	87 278	3 789	8,8	0,87
Kreisstraßen	91 046	1 665	8,3	0,91
Summe	231 467	-	-	2,31

Tab. 1: Streckenlängen und Verkehrsstärken der klassifizierten Straßen (ELSNER 2007, DIW 2006) und geschätzte Mengen von Bankettschälgut nach Straßenklassen (aus KOCHER/WIRTZ 2004 und KUKOSCHKE 1998)

ergab, dass die Bankette häufig nicht reguliert werden, da unklar ist, was mit überschüssigem Bankettmaterial geschehen soll. Die Etats der Meistereien enthalten keine Mittel für die teilweise geforderte aufwändige Entsorgung. Aus den Antworten auf die Frage zum Verbleib des Bankettmaterials in derselben Untersuchung ging hervor, dass zum Befragungszeitpunkt große Anteile des Materials im Straßenseitenraum belassen wurden, in Forst- und Landwirtschaft Verwendung fanden oder auf einfachen Erddeponien abgelagert werden konnten. Dadurch ergeben sich für das Jahr 2001 geschätzte Entsorgungskosten für die klassifizierten Straßen aller Bundesländer von ca. 5 Mio. € (Bild 5).

Das geschätzte jährliche Aufkommen von Bankettmaterial beträgt bundesweit für alle klassifizierten Straßen etwa 2,3 Mio. Tonnen (Tabelle 1). Bis zur Hälfte davon wird auf Deponien verbracht.

Die Forderung nach Einhaltung der Vorsorgewerte des Bodenschutzgesetzes auch bei technischen Bauwerken verringert zunehmend den Anteil von Bankettmaterial, der im Straßenbauwerk verbleibt

oder direkt wieder eingesetzt wird. Änderungen im Deponierecht führten aber auch zu höheren Anforderungen bei der Deponierung, auch wenn das Material nur schwach belastet ist. Je nach Verfügbarkeit geeigneter Anlagen entstehen dadurch deutlich höhere Entsorgungskosten und zum Teil unverhältnismäßig weite Transportwege.

Zur Einschätzung der zukünftigen Kostenentwicklung wurden in KOCHER/WIRTZ (2004) zwei Szenarien erstellt, ein pragmatisches mit nur relativ geringen Änderungen der Entsorgungswege (Szenario A) und eines, das eine strenge Interpretation der rechtlichen Vorgaben und dadurch große Verschiebungen der Verwertungs- und Entsorgungswege enthält (Szenario B). Danach ist mit einer Steigerung der bundesweiten Kosten von ca. 5 Mio. € pro Jahr in 2001 auf 30 Mio. € pro Jahr (Szenario A) bis über 80 Mio. € pro Jahr (Szenario B) zu rechnen (Bild 5). KUKOSCHKE (1998) berechnete für ein vergleichbares Szenario Kosten von 115 Mio. € pro Jahr, dieser Betrag enthält noch zusätzlich Transportkosten von fast 50 %. Die Berücksichtigung der Transportkosten ist mit größeren Unsicherheiten behaftet als die der Entsorgungskosten, da sich durch Deponieschließungen auch deutlich weitere Wege als 2001 ergeben können. Durch Verlängerung von Transportwegen können die in Bild 5 geschätzten Kosten auch noch deutlich höher ausfallen.

1.2 Stoffeintrag in Bankette

Zu den Besonderheiten straßennaher Böden gehören kontinuierlicher Schadstoffeintrag durch luftgetragene Deposition und diskontinuierlicher Eintrag durch Straßenabfluss und Spritzwasser. Dabei liefern die mit dem Straßenabfluss transportierten Stoffe, in 1 m Entfernung vom befestigten Fahrbahnrand gemessen, meistens den höchsten Anteil am Stoffeintrag (Bild 6).

Durch den Straßenverkehr werden beträchtliche Stoffmengen freigesetzt, die zum größten Teil mit dem Straßenabflusswasser und als Staubbiederschlag in den Straßenseitenraum transportiert werden. Zum überwiegenden Teil stammen diese Stoffe vom Abrieb verschiedenener Komponenten im System Fahrzeug-Straße, das heißt von Reifen-, Bremsbelag-, Kupplungs- und Fahrbahnabrieb (MUSCHACK 1990, HILLENBRAND et al. 2005). Ein großer Anteil davon wird mit dem Straßenabflusswasser und als Staubbiederschlag in den

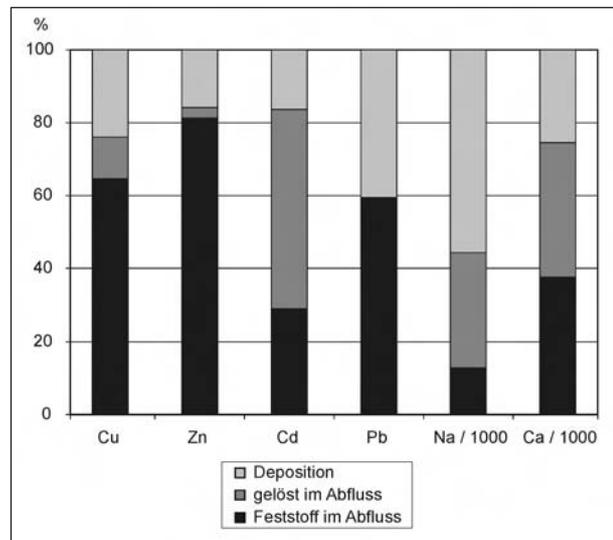


Bild 6: Anteile der Pfade am Stoffeintrag im Bankett an der BAB 7 nördlich von Hannover, Entfernung vom Fahrbahnrand 1 m, Sommer 2000 (KOCHER/WESSOLEK 2003)

Straßenseitenraum transportiert. Dabei handelt es sich vor allem um Schwermetalle sowie um schwer flüchtige und eher langsam biologisch abbaubare organische Schadstoffe. Sie sind vorwiegend an Partikel gebunden, können aber auch teilweise gelöst vorliegen (XANTHOPOULOS 1990, MAKEPEACE et al. 1995, KOCHER/WESSOLEK 2003). Die Abgase der Kfz dagegen liegen durch verbesserte Motor- und Abgasreinigungstechnik vorwiegend als Gase und feinverteilte Stäube vor, sodass sie weiter transportiert werden können. Sie werden hier nicht betrachtet.

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. 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 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 freige-

setzten Mengen innerorts und außerorts wird auf etwa 1 zu 3 geschätzt. Als Hauptsenke aller drei Stoffe werden außerorts die Böden neben den Straßen gesehen. Den Autoren lagen allerdings keine Daten zum Anteil der Straßen mit Hochbor-den und zu Einleitungen in Gewässer vor.

Straßenabflusswasser zeigt gegenüber Niederschlagswasser erhöhte Konzentrationen an Schwermetallen und verschiedenen organischen Schadstoffen. Die wichtigsten davon sind Pb, Zn, Cd, Cu, Ni, Cr, Taustoffe wie NaCl, CaCl₂ und organische Stoffe wie PAK, MKW, MTBE (LEGRET/PAGOTTO 1999, MAKEPEACE et al. 1995, GOLWER 1999). Diese Stoffe werden durch Straßenabfluss, Spritzwasser und luftgetragenen Transport zum angrenzenden Bankett und auf die Böschung transportiert. Der stark betroffene Bereich umfasst ca. 1 m Entfernung von der Straße, da hier ein großer Anteil des Straßenabflusses versickert (LECHNER/LUDWIG 1987, KOCHER/WESSOLEK 2003). Wenn der Straßenabfluss stark befahrener Straßen dagegen gesammelt und in Oberflächengewässer abgeleitet wird, kann das die Ursache relevanter Gewässerbelastung sein.

Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass die Schadstoffkonzentrationen in straßennahen Böden von der Verkehrsstärke der Straße und von der Entfernung der Beprobungspunkte vom Straßenrand abhängen. Daraus kann wegen der Verschiedenheit der lokalen Bedingungen und der Bankett- und Bodeneigenschaften aber kein allgemeiner Zusammenhang abgeleitet werden. Trotzdem nehmen i. d. R. die Gesamtkonzentrationen der Schadstoffe mit zunehmender Entfernung bis zum Hintergrundwert ab (HARRISON/JOHNSTON 1985, LAGERWERFF/SPECHT 1970, WHEELER/ROLFE 1979, WIGINGTON et al. 1986, weitere in BOLLER et al. 2005, DIERKES/GEIGER 1999, KOCHER/WESSOLEK 2003, NADLER/MEIßNER 2004). Die Reichweite der messbar erhöhten Konzentrationen in Böden ist dabei stark standort- und stoffabhängig und kann nach einer Literaturlauswertung zwischen 1 m und über 100 m liegen (KOCHER/PRINZ 1998). Die Reichweite der deutlich erhöhten Schadstoffeinträge ist mit der des Spritzwassers gleichzusetzen und lässt sich mit etwa fünf bis zehn Meter angeben (KOCHER/WESSOLEK 2003, KOCHER/TÄUMER/WESSOLEK 2003, GOLWER 1991, 1999).

Die Sorption von Schwermetallen an Bodenpartikel findet schon im Straßenstaub und Sediment statt. Das ist das Ergebnis einer Untersuchung von Blei

und Chrom in Straßenstäuben und Sedimenten aus Sickerschächten (MURAKAMI et al. 2006). Gelbe Markierungsfarben wurden in derselben Untersuchung als Quellen für Blei und Chrom an stark befahrenen Straßen ermittelt. Eisenhaltige Materialien (bzw. rostfreier Stahl) sind zusätzliche Quellen für Chrom. Blei wird von den Autoren immer noch als „Indikatorschadstoff“ für verkehrsbedingte Belastung angesehen, obwohl in Japan seit 1977 kein verbleites Benzin mehr verkauft wird. Es sind auch im straßennahen Staubniederschlag in Deutschland noch erhöhte Bleikonzentrationen zu finden (KOCHER 2006). In dickeren Sedimentschichten aus Sickerschächten (soaka way sediment) fanden MURAKAMI et al. (2006) viel höhere Metallgehalte als im Straßenstaub oder als in dünnen Sedimentschichten. Dies sehen sie als Hinweis auf einen Rückhalt der untersuchten Stoffe über die schon in den Sedimentschichten vorhandene Konzentration hinaus an.

Nur von relativ wenigen Standorten sind Messungen von Konzentrationen im Grundwasser (GRANATO et al. 1995; Mikkelsen et al. 1996; GOLWER 1973, 1999) oder im Bodensickerwasser (REINIRKENS 1996) veröffentlicht. Eine Zusammenstellung und Umweltbewertung der tatsächlich genutzten Möglichkeiten zur Versickerung von Straßenablaufwasser wurden von LANGE (1996) anhand der Auswertung von Literaturdaten durchgeführt. Dort wird auch auf das hohe Infiltrationsvermögen der untersuchten Bankette und Böschungen hingewiesen, das dazu führt, dass Oberflächenabfluss nicht sehr häufig auftritt. Im ersten Meter vom versiegelten Fahrbahnrand können dementsprechend ständig hohe Bodenfeuchtegehalte und hohe Infiltrations- und Perkulationsraten, die gelegentlich auch bis in größere Entfernung reichen, festgestellt werden (SPEERSCHNEIDER 1992, KOCHER/TÄUMER/WESSOLEK 2003).

Dies führt zur Verlagerung mobiler Stoffe wie Tausalze. Gleichzeitig wird durch die Rückhaltewirkung der straßennahen Böden im Lauf der Nutzungsdauer der Straßen ein großer Anteil der weniger mobilen eingetragenen Stoffe im Straßenseitenraum akkumuliert. Das ist die Ursache für die erhöhten Schadstoffgehalte im Bankettmaterial. Bisher sind jedoch keine Untersuchungen veröffentlicht worden, in denen der zurückgehaltene Anteil der eingetragenen Stoffe praxisrelevant beschrieben wird. Deshalb werden im vorliegenden Bericht Daten aus verschiedenen Untersuchungen in Bezug auf den Wirkungsgrad des Schadstoffrückhaltes ausgewertet (siehe Kapitel 3.3).

1.3 Gegenstand der Untersuchung

Die Schadstoffgehalte aus dem Straßenverkehr in Bankettmaterial sind in der Regel niedrig, überschreiten aber an stark befahrenen Straßen häufig die Vorsorgewerte der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV, BMU 1999). Durch eine unklare Rechtslage sind Verwertung und Entsorgung von Bankettmaterial teilweise problematisch. Zudem wurden in letzter Zeit in einzelnen Bundesländern stark erhöhte Konzentrationen an Schadstoffen festgestellt, die bisher nicht als straßenverkehrsrelevant galten, insbesondere polychlorierte Biphenyle (PCB).

Eine bestehende Datensammlung der BAST von Bankettmaterialproben aus mehreren Bundesländern wird im vorliegenden Projekt durch aktuelle Daten aus den anderen Flächenländern ergänzt, mit älteren Literaturdaten verglichen und statistisch ausgewertet. Insbesondere werden Untersuchungen zu löslichen Anteilen der Stoffe einbezogen, da diese für mögliche Umweltschäden durch Transport der Schadstoffe und für die Bewertung von Möglichkeiten zur Verwertung des Bankettmaterials besonders relevant sind. Es wird ermittelt, ob die neu festgestellten Schadstoffe tatsächlich flächenhaft auftreten und durch den Straßenverkehr bedingt sind. Ergebnisse einer bundesweiten Befragung aller Straßen- und Autobahnmeistereien, die 2001 im Rahmen eines externen FE-Projektes durchgeführt wurde, werden ebenfalls einbezogen. Die Auswertung der breiten Datengrundlage ist insbesondere für die in Arbeit befindliche Richtlinie zum Umgang mit Bankettmaterial von Bedeutung, aber auch für die Überarbeitung von Regelwerken zur Straßenentwässerung, beispielsweise der „Richtlinien zur Anlage von Straßen, Teil Entwässerung“ (RAS Ew, FGSV 2005) und der „Richtlinien für Straßen in Wasserschutzgebieten“ (RiStWag, FGSV 2002b).

Ergebnisse einer bundesweiten Datenauswertung von Bankettproben vermitteln eine Übersicht zur Schadstoffsituation. Es werden Stoffe identifiziert, die häufig zu Überschreitungen der bisherigen Zuordnungswerte führen. Anhand der Zuordnung von Straßenklassen und Verkehrsstärken zu diesen Proben werden Empfehlungen für einen differenzierten Umgang mit dem Material gegeben.

2 Methoden

2.1 Datenquellen

Auf der Basis unveröffentlichter Messdaten der Bundesländer von Bankettschälungen wurde eine Datenbank aufgebaut. Die darin enthaltenen 840 Proben wurden in den letzten Jahren im Rahmen von Bankettregulierungsmaßnahmen in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Hessen und Baden-Württemberg entnommen. Die Daten werden in den Ländern meist nicht zentral erfasst und sind deswegen schwer zugänglich. Die in der Datenbank vertretenen Bundesländer und Standorte decken die in Deutschland verbreiteten Bedingungen hinsichtlich der Verkehrsstärken, der Besiedlungsdichte und der zu erwartenden Böden bzw. Bodenmaterialien gut ab.

Die Feststoffgehalte der Schwermetalle wurden aus dem Königswasseraufschluss bestimmt, wie es nach LAGA und u. a. für die Vorsorgewerte in der Bodenschutzverordnung vorgesehen ist. Die Eluatgehalte wurden aus dem Eluat mit Wasser nach DIN 38414 – 4 (10/1984) bestimmt. Dieses Verfahren ist in den LAGA-Mitteilungen vorgesehen und ebenfalls in der Bodenschutzverordnung zur Abschätzung der Sickerwasserkonzentrationen. Von den untersuchten organischen Schadstoffen liegen nur Feststoffwerte vor. Für PAK wurden meist das Merkblatt LUA NRW Nr. 1 und DIN ISO 13877 (beide in der Bodenschutzverordnung genannt) angewandt und von einem Labor eine Methode in Anlehnung an EPA 8100. Die Arbeiten werden jeweils an akkreditierte Labors vergeben.

Für die statistische Gesamtauswertung der Bankettproben wurde für die Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze deren halber Wert eingesetzt. Generell lagen die von den Labors angegebenen Bestimmungsgrenzen deutlich unter den jeweiligen Vorsorge- oder Zuordnungswerten, mit der Ausnahme von MKW. Hier liegt bei manchen Untersuchungen die Bestimmungsgrenze bei 50 oder 100 mg/kg und der Zuordnungswert Z0 bei ebenfalls 100 mg/kg. Hier sind auch Methodenunterschiede häufig. Es werden auch nicht immer die Kettenlängen C10-C40 analysiert, jedoch wurden die Ergebnisse mit anderen Kettenlängen bei der Schlussauswertung nicht berücksichtigt.

Mittelwert und Standardabweichung sind verbreitete Maße zur Beschreibung einer Datengruppe.

Schadstoffgehalte in Umweltmedien sind meistens nicht normal verteilt, sondern ihre Verteilungen sind linksschief, mit sehr vielen kleinen Werten und wenigen hohen Werten. Sie weisen häufig eine Normalverteilung der logarithmierten Werte auf (Log-Normalverteilung). Arbeiten, die große Mengen von Schadstoffmessungen in Böden verarbeitet haben, sind ebenfalls zu diesem Ergebnis gekommen, beispielsweise die Untersuchung der Länderarbeitsgemeinschaft Boden zur Ableitung von Boden-Hintergrundwerten (LABO 1995).

Daher werden hier zur Einschätzung der Abweichungen weitere Größen ermittelt, die die Verteilung der Daten besser beschreiben. Das Minimum ist der kleinste vorkommende Wert, entsprechend das Maximum der größte. 10- und 90-Perzentil sowie der Median (= 50-Perzentil) geben jeweils an, unterhalb von welchem Zahlenwert 10 %, 90 % bzw. 50 % der Werte liegen. Diese Größen sind nicht so anfällig gegen einzelne sehr hohe oder sehr niedrige Werte wie Mittelwert und Standardabweichung und geben deshalb einen robusteren Eindruck von der Verteilung der Beobachtungen.

2.2 Vergleich mit Vorsorgewerten, Zuordnungswerten und Prüfwerten

Die Tabelle 2 enthält eine beispielhafte Zusammenstellung von Hintergrundwerten und die Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung. Als „Hintergrundwerte I“ sind Werte der LABO (2004) angegeben. Sie wurden für Grünland auf Oberboden aus Sand, Geschiebemergel, Löss und periglaziären Deckschichten über Carbonatgestein zusammengestellt. Es handelt sich um das 50-Perzentil. Die Werte für periglaziäre Deckschichten

über Tongesteinen und basischen Magmatiten liegen teilweise deutlich höher. Die „Hintergrundwerte II“ sind Ergebnisse aus einer Literaturlauswertung (KOCHER/PRINZ 1998). Sie wurden aus im Freiland gemessenen Schadstoff-Querprofilen an Straßen abgeleitet, die Entfernungsbereiche von 0-25 m bis zu 0-260 m vom Fahrbahnrand umfassen. Dabei wurde jeweils der niedrigste gemessene Wert des Querprofils verwendet und aus diesen für alle Querprofile der Mittelwert berechnet. Es wurden zwischen 30 (Quecksilber) und 120 (Blei) Querprofile je Element ausgewertet. Sie berücksichtigen damit auch ggf. siedlungsbedingt erhöhte Hintergrundgehalte, die nicht direkt straßenverkehrsbedingt sind. Sie liegen im mittleren Bereich der von der LABO für Grünland ermittelten Hintergrundwerte.

Eine umfangreichere Zusammenstellung enthalten die Tabellen 3 und 4. Dort sind zum Vergleich auch Prüfwerte der Bodenschutzverordnung aufgeführt. Diese dienen für die jeweilige Nutzung zur Abgrenzung, ob der Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung ausgeräumt werden kann oder ob eine eingehendere Prüfung stattfinden muss.

Ebenso sind Zuordnungswerte für die Verwertung von Bodenmaterial nach den „Technischen Regeln Boden“ der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA; 2004 a) einbezogen. Diese Werte sind in einigen Bundesländern eingeführt. Weitere Zuordnungswerte wurden von der LAGA im Eckpunktepapier für die geplante Verordnung des Bundes zur Verwertung von Bodenmaterial in bodenähnlichen Anwendungen und Überarbeitung der Bundesbodenschutzverordnung vorgeschlagen (LAGA 2004b) und wurden hier aufgrund der Diskussionen um die geplante Verwertungsverordnung aufgenommen.

Stoff	Dimension	Hintergrundwerte I	Hintergrundwerte II	BBodSchV		
				Vorsorgewert Sand	Vorsorgewert Schluff	Vorsorgewert Ton
Blei	mg/kg TS	16 – 42	30	40	70	100
Cadmium	mg/kg TS	0.15 – 0.40	0.27	0.4	1	1.5
Chrom (gesamt)	mg/kg TS	7 – 33	18.3	30	60	100
Kupfer	mg/kg TS	4.9 – 21	11.7	20	40	60
Nickel	mg/kg TS	1.3 – 29	14.7	15	50	70
Quecksilber	mg/kg TS	< 0.08	0.06	0.1	0.5	1
Zink	mg/kg TS	19 – 85	47	60	150	200

Tab. 2: Feststoffgehalte im Boden: Hintergrundwerte I (LABO 2004), Hintergrundwerte II (KOCHER/PRINZ 1998) und Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung

		BBodSchV								EP Boden LAGA 31.08.2004				LAGA TR Boden 2004	
Stoff	Dimension	Vorsorge- wert Sand	Vorsorge- wert Schluff	Vorsorge- wert Ton	Vorsorge- wert <= 8 % Humus	Vorsorge- wert > 8 % Humus	Prüfwert Park- und Freizeit- anlagen	Prüfwert Industrie- und Gewerbe- flächen	Maßnah- menwert Grünland	Z0 (Sand)	Z0 (Lehm/ Schluff)	Z0 (Ton)	Z0* ¹⁾	Z1	Z2
Arsen	mg/kg TS	–	–	–	–	–	125	140	50	10	15	20	15 ²⁾	45	150
Blei	mg/kg TS	40	70	100	–	–	1.000	2.000	1.200	40	70	100	140	210	700
Cadmium	mg/kg TS	0.4	1	1.5	–	–	50	60	20	0.4	1	1.5	1 ³⁾	3	10
Chrom (gesamt)	mg/kg TS	30	60	100	–	–	1.000	1.000	–	30	60	100	120	180	600
Kupfer	mg/kg TS	20	40	60	–	–	–	–	1.300 (200)	20	40	60	80	120	400
Nickel	mg/kg TS	15	50	70	–	–	350	900	1.900	15	50	70	100	150	500
Thallium	mg/kg TS	–	–	–	–	–	–	–	15	0.4	0.7	1	0,7 ⁴⁾	2,1	7
Quecksilber	mg/kg TS	0.1	0.5	1	–	–	50	80	2	0.1	0.5	1	1	1,5	5
Zink	mg/kg TS	60	150	200	–	–	–	–	–	60	150	200	300	450	1.500
Cyanide, gesamt	mg/kg TS	–	–	–	–	–	50	100	–	–	–	–	–	3	10

Tab. 3: Bezugswerte für anorganische Schadstoffe im Bodenfeststoff aus Bodenschutzverordnung, LAGA-Mitteilung 20 Technische Regeln Boden Stand: 31.08.2004, Eckpunktepapier Boden (LAGA 2004b). Die Zahlenwerte Z0 und Z0* darin sind identisch mit LAGA Technische Regeln Boden 2004)

Erläuterungen zu Tabelle 3 bei Tabelle 4

		BBodSchV								EP Boden LAGA 31.08.2004				LAGA TR Boden 2004	
Stoff	Dimension	Vorsorge- wert Sand	Vorsorge- wert Schluff	Vorsorge- wert Ton	Vorsorge- wert <= 8 % Humus	Vorsorge- wert > 8 % Humus	Prüfwert Park- und Frei- zeitanla- gen	Prüfwert Industrie- und Gewerbe- flächen	Maßnah- menwert Grünland	Z0 (Sand)	Z0 (Lehm/ Schluff)	Z0 (Ton)	Z0* ¹⁾	Z1	Z2
TOC	(Masse-%)	–	–	–	–	–	–	–	–	0.5 (1.0) ⁵⁾	0.5 (1.0) ⁵⁾	0.5 (1.0) ⁵⁾	0.5 (1.0) ⁵⁾	1.5	5
EOX	mg/kg TS	–	–	–	–	–	–	–	–	1	1	1	1 ⁶⁾	3 ¹⁾	10
Kohlenwasser- stoffe	mg/kg TS	–	–	–	–	–	–	–	–	100	100	100	200 (400) ⁷⁾	300 (600)	1.000 (2.000)
BTX	mg/kg TS	–	–	–	–	–	–	–	–	1	1	1	1	1	1
LHKW	mg/kg TS	–	–	–	–	–	–	–	–	1	1	1	1	1	1
PCB6	mg/kg TS	–	–	–	0.05	0.1	2	40	0.2	0.05	0.05	0.05	0.1	0.15	0.5
PAK16	mg/kg TS	–	–	–	3	10	–	–	–	3	3	3	3	3 (9) ³⁾	30
Benzo(a)pyren	mg/kg TS	–	–	–	0.3	1	–	–	–	0.3	0.3	0.3	0.6	0.9	3

Erläuterungen zu Tabellen 3 und 4:

1) maximale Feststoffgehalte für die Verfüllung von Abgrabungen unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen (siehe „Ausnahmen von der Regel“ für die Verfüllung von Abgrabungen in Nr. II.1.2.3.2 in LAGA 2004 b)

2) Der Wert 15 mg/kg gilt für Bodenmaterial der Bodenarten Sand und Lehm/Schluff. Für Bodenmaterial der Bodenart Ton gilt der Wert 20 mg/kg

3) Der Wert 1 mg/kg gilt für Bodenmaterial der Bodenarten Sand und Lehm/Schluff. Für Bodenmaterial der Bodenart Ton gilt der Wert 1,5 mg/kg

4) Der Wert 0,7 mg/kg gilt für Bodenmaterial der Bodenarten Sand und Lehm/Schluff. Für Bodenmaterial der Bodenart Ton gilt der Wert 1,0 mg/kg

5) Bei einem C:N-Verhältnis > 25 beträgt der Zuordnungswert 1-Masse-%.

6) Bei Überschreitung ist die Ursache zu prüfen.

7) Die angegebenen Zuordnungswerte gelten für Kohlenwasserstoffverbindungen mit einer Kettenlänge von C10 bis C22. Der Gesamtgehalt, bestimmt nach E DIN EN 14039 (C10 bis C40), darf insgesamt den in Klammern genannten Wert nicht überschreiten

Tab. 4: Bezugswerte für organische Schadstoffe im Bodenfeststoff aus Bodenschutzverordnung, LAGA-Mitteilung 20 Technische Regeln Boden, Stand: 31.08.2004, Eckpunktepapier Boden (LAGA 2004b). Die Zahlenwerte Z0 und Z0* darin sind identisch mit LAGA Technische Regeln Boden 2004

Parameter	Einheit	Hintergrundwerte aus Lysimetern ¹⁾ 95-Perzentil/Median	Hintergrundwerte Grundwasser ^{2), 3)}	GFS LAWA	Prüfwert Sickerwasser BBodSchV	Z0/Z0*-Wert Eckpunktepapier Boden LAGA 2004
pH-Wert	–	8,9/7,3	–	–	–	6,5 – 9,5
El. Leitfähigkeit	µS/cm	1.500/680	–	–	–	250
Chlorid	mg/L	–	2,5 – 50 (6.000) 2)	250	–	30
Sulfat	mg/L	–	3,5 – 100 (1.000) 2)	240	–	20
Cyanid	µg/L	–	–	5 (50)*	50/10 **	5
Arsen	µg/L	7,4/0,72	5	10	10	14
Blei	µg/L	6/0,28	5	7	25	40
Cadmium	µg/L	0,96/0,14	0,5	0,5	5	1,5
Chrom (gesamt)	µg/L	26/4,6	2,5	7 (Cr III)	50	12,5
Kupfer	µg/L	34/4,0	10	14	50	20
Nickel	µg/L	170/8,9	10	14	50	15
Quecksilber	µg/L	< 0,14	0,1	0,2	1	< 0,5
Zink	µg/L	290/19	200	58	500	150
15 PAK	µg/L	-	-	0,20	0,20	-

Quellen:
1) BIELERT/HEINRICHS/BECKER (1999)
2) HÖLTING (1991)
3) GFS-Konzept LAWA (2004)
* 50 µg/L, wenn kein freies Cyanid vorliegt
** 10 µg/L für leicht freisetzbares Cyanid

Tab. 5: Hintergrundwerte Bodensickerwasser aus Lysimetern und Grundwasser, Geringfügigkeitsschwellenwerte, Prüfwerte für Sickerwasser und Z0/Z0*-Werte für Bodenmaterial zur Verwertung

Tabelle 5 enthält Hintergrundwerte von Bodensickerwasser aus Lysimetern und Grundwasser, Geringfügigkeitsschwellenwerte, Prüfwerte für Sickerwasser und die im Eckpunktepapier (LAGA 2004b) vorgesehenen Z0/Z0*-Werte für Bodenmaterial zur Verwertung. Die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) für Grundwasser wurden von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) abgeleitet und zur Anwendung empfohlen (LAWA 2004). Sie stellen die umweltfachliche Grundlage zur Abgrenzung erheblicher von geringfügig erhöhten Stoffkonzentrationen im Grundwasser dar. Es ist geplant, die GFS bei der vorgesehenen Überarbeitung der Bodenschutzverordnung als Prüfwerte festzusetzen. Dadurch ergibt sich für die meisten Stoffe eine Verschärfung bisher bestehender Anforderungen.

2.3 Säulenversuche

2.3.1 Hintergrund

Zur Unterstützung der Datenlage zur Ausgestaltung der Bundesverwertungsverordnung und Bodenschutzverordnung wurden zusätzlich zur Datenauswertung in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover und der Universität Tübingen, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Säulenversuche durchgeführt. Auf der Basis einer neuen, aus einem umfangreichen BMBF-Verbundvorhaben abgeleiteten Methode wurde das Elutionsverhalten von feldfrischem Bankettschälgut untersucht. Die Entstehung und Bedeutung dieser Methode sollen kurz beleuchtet werden.

Aus verschiedenen Rechtsbereichen werden Anforderungen an Böden und Material gestellt, das die durchwurzelbare Bodenzone bildet oder zur Herstellung einer durchwurzelbaren Bodenzone eingesetzt werden soll. Diese Anforderungen betreffen nicht nur Feststoffgehalte verschiedener

Schadstoffe, sondern auch Konzentrationen im versickernden Bodenwasser bzw. Grundwasser. Im Bodenschutzrecht sind das die Prüfwerte für Sickerwasser in der Bodenschutzverordnung (BMU 1999) und im Wasserhaushaltsrecht die von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser empfohlenen Geringfügigkeitsschwellen (GFS) für Grundwasser (LAWA 2004).

Um die schwierige und aufwändige direkte Beprobung der Bodenlösung zu vermeiden, wird durch verschiedene Verfahren versucht, die Bodenlösung bzw. Grundwasser im Labor aus Bodenproben nachzubilden. An diesen Lösungen/Eluaten werden dann die Schadstoffkonzentrationen bestimmt. Die bisher angewandten Verfahren sind die Elution mit 10 Teilen Wasser („S4-Eluat“, DIN 38414-S4) und der Bodensättigungsextrakt („BSE“, BMU 1999). Das Problem dieser Verfahren ist, dass durch „naturferne“ Aufbereitung der Proben unerwünschte Effekte auftreten. Ein Beispiel dafür ist die Freisetzung organischer Substanz, die auch Schadstoffe mobilisieren kann, die vorher im Boden gebunden waren. Da Bodenproben ein sehr breites Spektrum physikalisch-/chemischer Eigenschaften aufweisen, sind manche Versuchsschritte schlecht reproduzierbar, beispielsweise die Zugabe von Wasser „bis zur Fließgrenze“. Insgesamt führt dies zu ungenügend reproduzierbaren und ungenauen Ergebnissen.

Eine der Aufgaben des BMBF-Verbundvorhabens „Sickerwasserprognose“ (BMBF 2001) war die Entwicklung eines neuen Verfahrens, das diese Nachteile vermeidet. Es soll den Test verschiedener Wasser-/Feststoffverhältnisse ermöglichen, ohne Zerkleinerung der Proben auskommen und wenn möglich Filtrationsschritte vermeiden.

Das Ergebnis der zusammenfassenden Auswertung des Verbundvorhabens durch den Forschungsbeirat und das LANUV NRW sind Methoden zur Durchführung von Säulenversuchen und ein Schütteltest. Für beides liegen inzwischen Normentwürfe vor (E DIN 19528/-29, Juli 2007). Sie enthalten Anleitungen für

1. einen Säulenversuch von ca. 2 Tagen Dauer für die „grundlegende Charakterisierung“ des Probenmaterials (rechnerische Kontaktzeit Perkolat/Probe ca. 5 Stunden, Perkolations bis zum Wasser-Feststoff-Verhältnis (W/F) 4:1, Entnahme mehrerer Proben bei verschiedenen W/F-Verhältnissen),

2. einen Säulenschnelltest für eine Übereinstimmungsuntersuchung (wie 1., das Eluat wird bis W/F 2 in einem Gefäß gesammelt und dann analysiert),
3. einen Schütteltest von 24 h Dauer mit 2-L-Wasser/kg-Probe (W/F 2:1) für die „Übereinstimmungsuntersuchung“ des Materials.

Versuche 1 und 2 sind für die Bestimmung organischer und anorganischer Stoffe im Eluat geeignet, Versuch 3 nur für die Bestimmung anorganischer Stoffe.

2.3.2 Methodenbeschreibung

2.3.2.1 Mischprobenherstellung

Die Einzelproben wurden aus 8 Spateneinstichen von 12 cm Tiefe, in 50 cm Entfernung vom Fahrbahnrand, jeweils im 5-m-Abstand entnommen. Es wurde jeweils alle 5 Meter parallel zur Straße 12-15 cm tief in 50 cm Entfernung vom Fahrbahnrand ein Quader ausgestochen. Dieser wurde geviertelt, und aus den gegenüberliegenden Ecken je ca. 200-300 Gramm von 0 bis 10 cm Tiefe abgetrennt. Alle 16 Stücke je Probe wurden in einer großen Schale aus lebensmittelechtem Kunststoff vereinigt, von Hand leicht zerkleinert, lange Grashalme und Wurzeln entfernt, die Teilproben gut durchmischt und als Mischprobe in einen 6-L-Gefrierbeutel gefüllt. Die wenigen Steine > 32 mm wurden von Hand ausgelesen.

2.3.2.2 Versuchsdurchführung

Bei einem Säulenversuch wird das zu untersuchende Substrat in eine Glassäule gefüllt. Die Übergänge zu den Schraubverschlüssen werden mit Quarzsand aufgefüllt. Doppelt destilliertes Reinstwasser wird aus dem Vorratsgefäß mittels einer Peristaltikpumpe mit konstanter Förderrate durch die senkrecht stehende Säule gepumpt. Sie wird dabei unter vollständig wassergesättigten Bedingungen in der Regel von unten nach oben durchströmt.

Zur Bestimmung des Wasser-/Feststoffverhältnisses ist es wichtig, das genaue Volumen sowie den Wassergehalt des eingefüllten Substrates zu kennen. Für die Analyse des Eluates sind folgende Wasser-/Feststoffverhältnisse zur Probenentnahme festgelegt:

Eluat-1	0-0,25 l/kg TS,
Eluat-2	0,25-050 l/kg TS,

Eluat-3	0,50-1,00 l/kg TS,
Eluat-4	1,00-2,00 l/kg TS,
Eluat-5	2,00-3,00 l/kg TS.

A.) Versuchsvorbereitung

Glassäulen waschen, mit HNO_3 und Aceton konditionieren und trocknen. Auf der Flasche mit Edding-Stift eine Strecke von 25 cm kennzeichnen. Zur Abdichtung das Gewinde an beiden Öffnungen der Säule mit Teflonband umwickeln. An der Unterseite der Säule einen Schraubverschluss (mit Bohrung und Septum versehen) bis zum Anschlag aufdrehen. Säule in ein Stativ einspannen, ca. 2 cm Glaswolle einfüllen und andrücken. Darauf Quarzsand (Baumarkt, ca. 1-3 mm, mehrmals mit dest. Wasser gewaschen) bis zur unteren Markierung der Messstrecke einfüllen und verdichten.

Da das Prüfgut im feldfeuchten Zustand eingewogen wird, muss der Wassergehalt bestimmt und im Messprotokoll notiert werden.

Zur Feststellung des Tara-Gewichtes wird die Säule nun gewogen. Anschließend wird das Prüfgut bis zur oberen Markierung eingefüllt. Dabei muss das Material alle 3-5 cm durch Klopfen bzw. Rütteln verdichtet werden. Nach Erreichen der oberen Markierung wird die Säule wieder gewogen und das Nettogewicht im Messprotokoll notiert.

Nach der Wägung wird Quarzsand bis ca. 2 cm unter den oberen Rand eingefüllt, der Rest wird mit Glaswolle verfüllt. Eine Schraubkappe mit Bohrung und Septum verschließt die Säule.

Die mit Probenbezeichnung bzw. Labornummer beschriftete Glassäule wird nun an den Stativklammern befestigt. Mit der Spitze einer Laborspritze wird ein kleines Loch in jedes Septum gestochen, damit sich das V2A-Rohr leichter in das Septum einstecken lässt. Das Rohr an der Säulenunterseite wird mit dem Schlauch der Peristaltikpumpe verbunden, da das Wasser die Säule von unten nach oben durchströmen muss. Das V2A-Rohr an der Oberseite der Säule leitet das Eluat in eine Vorratsflasche.

Bei der Probenentnahme für die organische Analytik besteht die Probenflasche aus Braunglas. Sie wird mit einer Schraubkappe (mit Bohrung und Septum) verschlossen, das V2A-Rohr wird durch das Septum hindurchgestochen. Dabei ist auf eine ausreichende Entlüftung des Gefäßes zu achten.

B.) Versuchsablauf

Vor Versuchsbeginn müssen die Säulen gleichmäßig aufgesättigt werden. Bei einer Durchflussrate von ca. 18 ml/Minute wird Reinstwasser von unten nach oben durch die Säule gedrückt. Dabei ist auf eine ausreichende Entlüftung am oberen Ende der Säule zu achten. Wenn nach 90 Minuten alle Säulen gleichmäßig durchfeuchtet worden sind, kann die Messung beginnen. Jeder Versuchsdurchlauf dauert insgesamt 90 Stunden (Montag bis Freitag).

Die Durchflussmenge wird an der Peristaltikpumpe auf 0,33 ml/Minute eingestellt. Die erste Probenentnahme erfolgt nach genau 6 Stunden, dann hat sich eine Eluatmenge von 110-120 ml angesammelt. Der zweite Flaschenwechsel erfolgt nach weiteren 12 Stunden am nächsten Morgen um 8 Uhr (ca. 240-250 ml), jeder weitere Wechsel nach jeweils 24 Stunden (ca. 500 ml). (...)

Falls sich die Länge der Versuchsstrecke von normalerweise 25 cm durch Schrumpfung oder Quellung des Versuchsgutes ändert, muss die aktuelle Länge bei Versuchsende in das Messprotokoll eingetragen werden.

C.) Analytik

Von jeder Eluatprobe werden sofort nach Ende einer Messreihe der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Danach muss das Eluat gefiltert werden, da sich in den meisten Fällen Schwebstoffe gelöst haben und die Probe verunreinigen. Dazu wird das Eluat mit einer Hebelspritze durch einen Filter (0,45 μm) gedrückt. Danach können Anionen und Kationen sowie Schwermetalle im DOC, ICP-OES sowie ICP-MS gemessen werden.

(Abschnitte A – C: BGR 2007)

Zur Bestimmung organischer Schadstoffe, wie z. B. PAK, wird das ungefilterte Eluat des Säulenversuchs zentrifugiert und dann extrahiert und analysiert.

2.3.3 Probenahme

Es wurden an zehn Straßenstandorten Proben von Bankettmaterial entnommen (siehe Tabelle 6). Je Standort wurde eine Mischprobe aus acht Einzelproben hergestellt. Die jeweils ca. vier kg Probenmaterial < 32 mm wurden am selben Tag feldfrisch und ungesiebt der BGR übergeben, dort in den un-

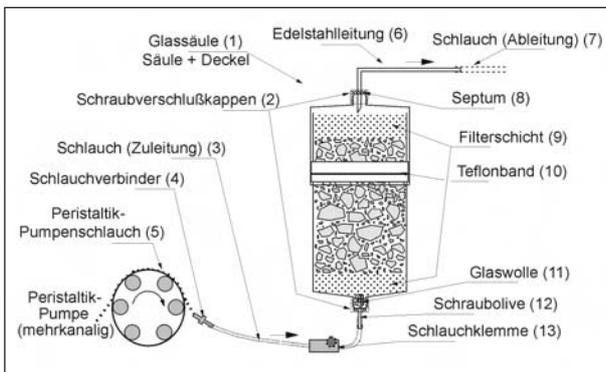


Bild 7a: Versuchskomponenten beim Säulenversuch (Quelle: BGR/Dr. Hansjörg WEIß, Tübingen)

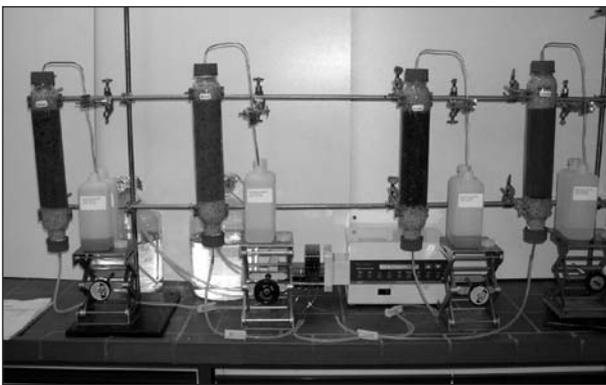


Bild 7b: Aufbau Säulenversuche (Foto: BGR)

verschlossenen Tüten gekühlt aufbewahrt und innerhalb weniger Tage eluiert. (Bild 7a, b).

Die Randbedingungen der Säulenversuche (zulässige Säulendimensionen, Einbaumächtigkeiten, Aufsättigung, Kontaktzeiten und Probenahmezeitpunkte) wurden so gewählt, wie sie bei den Untersuchungen für die Modellberechnungen des LANUV festgesetzt wurden (BGR 2007). Dies entspricht weitgehend dem Vorgehen, wie es im Entwurf der inzwischen vorliegenden DIN 19528 beschrieben ist, und ist im Kapitel 2.3.2.2 zusammengefasst.

Tabelle 6 zeigt die Probenahmestandorte und ihre wichtigsten Eigenschaften. Die Proben wurden zum großen Teil an Standorten entnommen, deren Vorgeschichte und Belastungssituation aus vorherigen Untersuchungen bekannt sind. Die Standorte der Proben 2 bis 5, 7, 9 und 10 sind in KOCHER/WES-SOLEK (2003) beschrieben, der Standort der Probe 1 in KOCHER (2006). Bei den Standorten 2-5, 7, 9 und 10 handelt es sich um Sandböden. Am Standort 1 ist die Böschung stark umgelagert und hoch verdichtet, es wurde viel Fremdmaterial im Bankett eingebaut (poröser Basaltgrus). Daher wurde zusätzlich ein Standort an der BAB A 7 auf

Lfd. Nr.	Straße	DTV Kfz/24 h	Lage zur Straße	Tiefe (cm)	Textur	Durchwurzelung	Steingehalt	Bemerkungen
1	A 61, Beckenheim	75.000	Lee/Ostseite	0-8	Bankettmaterial + Lehm + Basaltgrus	schwach	< 5 %	mit Schutzplanke, Asphaltdecke
2	A 7, Berkhof I	70.000	Lee/Ostseite	0-10	Bankettmaterial, sandig	stark	< 2 %	ohne Schutzplanke, Betondecke
3	A 7, Berkhof II	70.000	Lee/Ostseite	0-10	Bankettmaterial, sandig	stark	< 2 %	ohne Schutzplanke, Betondecke
4	A 7, Fallingbostel I	50.000	Lee/Ostseite	0-10	Bankettmaterial, sandig-schluffig	stark	> 5 %	ohne Schutzplanke, Betondecke
5	A 7, Fallingbostel II	50.000	Lee/Ostseite	0-10	Bankettmaterial, sandig-schluffig	stark	> 5 %	mit Schutzplanke, Betondecke
6	A 7 Hildesheim I	60.000	Lee/Ostseite	0-10	Bankettmaterial, schluffig, über Lösslehm	mittel	< 2 %	ohne Schutzplanke, Fahrbahn Asphalt, Standstreifen Beton
7	B 214, Altencelle	17 500	Luv/Westseite	0-10	Bankettmaterial, sandig	mittel	< 2 %	ohne Schutzplanke, Asphaltdecke
8	A 7 Hildesheim II, nördlich AS Drispfenstedt	60.000	Luv/Westseite	0-10	Bankettmaterial, schluffig, über Lösslehm	mittel	< 2 %	ca. 15 m nördlich beginnt eine Schutzplanke, Entwässerung zum Mittelstreifen, Fahrbahn Asphalt, Standstreifen Beton
9	B 188, Gifhorn West	17.500	Südseite	0-10	Bankettmaterial, Lehm, Splitt	sehr schwach	5-10 %, vorwiegend Splitt	ohne Schutzplanke, Asphaltdecke, Probe bei Entnahme sehr nass
10	B 214, Flackenhorst	17.500	Luv/Westseite	0-10	Bankettmaterial, sandig	stark	< 2 %	ohne Schutzplanke, Asphaltdecke

Tab. 6: Probenahmestandorte für die Säulenversuche

Lössboden (Hildesheimer Börde) ausgewählt. Die A 7 hat dort eine Verkehrsstärke von etwa 60.000 Kfz/d, der Abschnitt wurde etwa 1995 sechsstreifig ausgebaut.

Die Proben 1 bis 6 und 8 repräsentieren Autobahnen überdurchschnittlicher Verkehrsstärke, die Proben 7, 9 und 10 sehr stark befahrene zweistreifige Bundesstraßen. Die durchschnittlichen Verkehrsstärken auf vergleichbaren Straßen finden sich in Tabelle 1. An allen Standorten außer Nr. 8 erfolgt die Entwässerung der gesamten Breite ab Mittelstreifen im freien Abfluss über das Bankett. Am Standort 8 erfolgt die Entwässerung der gesamten Breite ab Bankett zum Mittelstreifen hin, sodass das Bankett Spritzwasser, jedoch keinen Straßenabfluss erhält. Mit der Bezeichnung „Bankettmaterial“ in Tabelle 6 ist dunkles, humoses Oberbodenmaterial aus akkumulierten Stäuben gemeint, nicht das Baumaterial des Straßendamms. Dieses wird bei hochgewachsenen Banketten und einer Beprobungstiefe von 10 cm fast nie erfasst.

Bei der Probenahme gab es zweimal Auffälligkeiten: Die Probe 8 ist die einzige der zehn Proben, die an einer Stelle des Banketts entnommen wurde, wo die Entwässerung zum Mittelstreifen gerichtet ist. Sie war deutlich weniger schwärzlich gefärbt als die anderen Proben und wies nur humoses Braun auf. Trotz Vorregen war sie auch deutlich trockener als alle anderen Proben. Die Probe 9 war durch Regen und Straßenabfluss so nass, dass sie vor dem Herstellen der Mischprobe über Nacht bei Raumtemperatur vorgetrocknet werden musste, bis kein Wasser mehr austrat.

2.4 Methoden- und Standortbeschreibung der zitierten Untersuchungen zum Schadstoffrückhalt im Bankett

Die Ergebnisse der hier kurz vorgestellten Studien werden in Kapitel 3.3 eigenen Messergebnissen gegenübergestellt.

DIERKES und GEIGER (1999) untersuchten den Schadstoffrückhalt in Bankettböden. Dazu wurden an fünf Autobahnstandorten Lysimeter mit freier Drainage in das Bankett eingebaut. Je Standort kamen drei Lysimeter mit 0.4 m Durchmesser und 0.3 m Höhe aus rostfreiem Edelstahl zur Anwendung. Sie wurden im Bankett in 1 m Entfernung von der befestigten Fahrbahnfläche installiert, indem je

eine ungestörte Bodensäule von 0 bis 0.3 m Tiefe durch Eindrücken der angeschärften Lysimeterwand gewonnen wurde. Um Randumläufigkeiten abzuschätzen, wurden Sickerwasser aus dem Randbereich und dem Kernbereich der Lysimeter getrennt beprobt.

Die gewählten Autobahnen und Bundesstraßen hatten Verkehrsstärken (DTV) zwischen 35.000 und 90.000 Kfz pro Tag. Es wurden Standorte mit lehmigem und kalkhaltigem Bankettmaterial ausgewählt. Die Gehalte an organischem Kohlenstoff lagen bei 7 bis 10 Massen-%, die pH-Werte bei 7.1 bis 7.7. Die oberste Bodenschicht zeigte oft starke Bioturbation, sodass viele Grobporen vorhanden waren. Der Kalkgehalt der oberen Bodenschichten war 0.3 bis 5.6 Massen-%, der der unteren Bodenschichten und Frostschuttschichten 10 bis 70 Massen-%.

Das Sickerwasser wurde alle zwei Wochen beprobt und auf Schwermetalle und Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) und polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) untersucht. Die Schadstofffrachten im Sickerwasser wurden berechnet. Zusätzlich wurden drei ebenso große Säulen mit Bankettmaterial für Labortests entnommen. Diese wurden in gleichartigen Lysimetern mit echtem Straßenablaufwasser beaufschlagt. Diese zusätzlichen Wassermengen und Schadstofffrachten entsprachen etwa der Infiltrationsrate von 20 Jahren. Aus den Ergebnissen der Laborlysimeter wurden die Schadstoffretentionsraten (Wirkungsgrade) berechnet.

Die Studie von KOCHER und WESSOLEK (2003) befasst sich mit der Verlagerung von straßenverkehrsbedingten Schadstoffen in straßennahen Böden. Dazu wurden die Konzentrationen von Blei, Cadmium, Kupfer und Zink in Bodenfeststoff und Bodenlösung ermittelt. Es wurden Standorte auf sandigen, kalkfreien Böden mit vergleichsweise niedrigen pH-Werten (3.5 bis 7.2 in 0.01M CaCl₂, Mittelwert 5.6) an je vier Autobahnen und Bundesstraßen ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Standorte seit mindestens 10 Jahren nicht mehr baulich verändert worden waren. Die benachbarten natürlichen Böden waren ab einer Entfernung von 3 bis 5 m vom befestigten Fahrbahnrand weitgehend ungestört. Es handelte sich um Podsole, podsolige und pseudovergleyte Braunerden und sandig-schluffige Gleye. Die Bankette waren aus anstehendem Bodenmaterial aufgeschüttet, meist feinsandiger Mittelsand und mittelsandiger Feinsand. Die Standorte hatten Verkehrsstärken (DTV) zwischen 50.000

und 90.000 Kfz/Tag auf den Autobahnen und 15.000 bis 20.000 auf den Bundesstraßen.

An jedem Standort wurden 16 Saugkerzen in den Entfernungen 1 m, 2,5 m, 5 m und 10 m vom Fahr- bahnrand und, je nach Vegetation, in 1,0 oder 1,5 m Tiefe eingebaut. In jeder Entfernung wurden 4 Saugkerzen parallel betrieben, um eine Mischprobe aus einem größeren Bodenvolumen und mehr Bodenlösung zu gewinnen. Von 1999 bis 2001 wurden alle drei bis vier Wochen Proben der Bodenlösung entnommen. Der Straßenabfluss wurde an einem der Autobahnstandorte mit einer direkt am Fahr- bahnrand angeschlossenen PVC-Rinne beprobt. Die Konzentrationen von Pb, Cd und Cu in Boden- lösung und Straßenabfluss wurden an allen Pro- ben, MKW und PAK nur an ausgewählten Proben bestimmt. Mit Klimadaten aus dem Raum Hannover und den im Bankett ermittelten Randbedingungen wurden Abflussmenge und Grundwasserneubil- dung berechnet. Die eingetragenen und ausgetra- genen Schadstofffrachten wurden aus den gemes- senen Konzentrationen und transportierten Was- sermengen ermittelt.

LANGE et al. (2001) untersuchten die Reinigungs- leistung von zwei Entwässerungsbecken für Stra- ßenablaufwasser. Es wurden ein Betonbecken (RiStWag-Abscheider) und ein gedichtetes Erd- becken mit vorgeschaltetem Absetzbecken ausge- wählt. Beide Becken erhalten den größten Teil ihres Zuflusses von Autobahnen, die DTV-Werte von etwa 70.000 Kfz/Tag aufweisen. Der Straßenab- fluss wird in Regenwasserkanälen und gepflaster- ten Gräben gesammelt; eine Vorreinigung des Wassers durch Sedimentation auf grasbedeckten Banketten oder Gräben findet nur bei sehr starken Regenereignissen statt, da nur dann grasbedeckte Flächen überströmt werden. Beide Becken liegen in der Nähe von Köln, etwa 5 km voneinander ent- fernt. So kann davon ausgegangen werden, dass die klimatischen Bedingungen vergleichbar sind.

Das Betonbecken hat ein Einzugsgebiet von 7,6 ha. Davon sind 88 % versiegelte Fläche (Autobahn und gepflasterte Gräben) und 12 % grasbedeckte Ban- kette und Böschungen. Die Höhe des Dauerstaus im Becken beträgt im Mittel 1,5 m, das Dauerstau- volumen 275 m³. Die maximal einstaubare zusätzli- che Wassermenge beträgt 790 m³. Der Auslass führt unter einer Betontauchwand hindurch. Das Becken arbeitet als Leichtstoffabscheider und Absetzbecken und hat nur einen geringen hydraulischen Retentionseffekt. Das spezifische Speicher- volumen beträgt 118 m³/ha.

Das Erdbecken hat ein Einzugsgebiet von 5,13 ha. Davon sind 69 % versiegelt (Autobahn und ge- pflasterte Gräben), und 31 % grasbedeckte Ban- kette und Böschungen. Die Höhe des Dauerstaus im Becken beträgt im Mittel 0,8 m, das Dauerstau- volumen 720 m³ und die Wasseroberfläche bei die- ser Einstauhöhe 910 m². Das Becken ist ziemlich dicht mit Schilf und Rohrkolben bewachsen (*Phrag- mites australis*, *Typha latifolia*), nur wenig freie Wasserfläche ist übrig. Die maximal einstaubare zusätzliche Wassermenge beträgt 1.130 m³ und das spezifische Speichervolumen 318 m³/ha.

Die Konzentrationen von Pb, Cd, Cu, Zn, PAK und MKW wurden im Straßenablaufwasser und im Beckenablauf gemessen. Die zu- und ablaufenden Wassermengen wurden ermittelt, um die Frachten berechnen zu können.

3 Ergebnisse

3.1 Datenauswertung von Bankett- material

Im folgenden Abschnitt werden die Schadstoffkon- zentrationen aus einer umfangreichen Auswertung von Bankettproben vorgestellt. Die 840 Proben wurden in den letzten Jahren im Rahmen von Ban- kettregulierungsmaßnahmen in Schleswig-Hol- stein, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Nordrhein-Westfalen, Rheinland- Pfalz, Hessen und Baden-Württemberg entnom- men. Etwa 32 % der Proben stammen von Auto- bahnen, 30 % von Bundesstraßen, 31 % von Lan- desstraßen und 6 % von Kreisstraßen. Proben von Autobahnen und Bundesstraßen sind also hier im Verhältnis zu ihrem Anteil am Straßennetz sehr deutlich überrepräsentiert (siehe Tabelle 1). Die Straßen wiesen durchschnittliche tägliche Ver- kehrsstärken (DTV) zwischen 300 Kfz/24 h und 158.000 Kfz/24 h auf. Der Mittelwert der Verkehrs- stärke beträgt 24.000, der Median 9.900 Kfz/24 h (Tabelle 7). Die Proben wurden in der für die Regu- lierung geplanten Schälfentfernung und -tiefe ent-

	Anzahl n	Minimum	Median	Mittel- wert	90- Perzentil	Maxi- mum
DTV	669	302	9.934	24.306	68.000	158.000
SV	398	50	633	3240	12.000	23.295
% SV	398	1,0	9,2	10,9	20,7	30,4

Tab. 7: Verkehrsstärken und Anteile an Schwerverkehr (SV) der Probenahmestandorte

nommen, das entspricht etwa 0 bis 10 cm Tiefe und 0 bis 1 m, maximal 2 m Entfernung vom Rand der befestigten Fläche.

In allen folgenden Grafiken ist auf der x-Achse die Verkehrsstärke dargestellt (DTV, Kfz/24h im Jahresmittel und Mittel der Wochentage). Es handelt sich ausschließlich um Proben von klassifizierten Straßen. Die Stoffgehalte sind jeweils auf der y-Achse aufgetragen. Die Straßentypen sind durch unterschiedliche Signaturen dargestellt. Diese sind in allen Schadstoff-DTV-Diagrammen dieselben:

3.1.1 Schwermetalle in Feststoff und Eluaten

Die Tabelle 8 und 9 enthalten statistische Kenngrößen für die Schwermetallgehalte im Bodenfeststoff und im Eluat der Proben. Für die meisten der dargestellten Parameter ist schon anhand der großen Unterschiede der Median- und Mittelwerte die Linksschiefe der Verteilungsfunktionen zu erkennen. Das heißt, dass es gemessen am Mittel-

wert wesentlich mehr niedrige Messwerte als hohe gibt. Wenige hohe Messwerte führen zu Mittelwerten, die teilweise mehr als doppelt so hoch liegen wie die Medianwerte. Stoffe, bei denen das nicht der Fall ist, sind im Bodenfeststoff nur Thallium (Tl) und Arsen (As). In den Eluaten der Bankettproben sind für etwas mehr Stoffe Mittelwerte und Median ähnlich: Cadmium (Cd), Chrom (Cr) und Nickel (Ni). An den danach folgenden Darstellungen der Einzelmesswerte gegen die Verkehrsstärke (Bilder 8 bis 24) ist zu sehen, dass diese Stoffe jeweils kaum einen Zusammenhang mit der Verkehrsstärke zeigen und auch häufig unterhalb der Vorsorge- bzw. Zuordnungswerte liegen.

Die Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung und die Z0-Werte für die Verwertung von Bodenmaterial sind nach Bodenart (Korngrößenverteilung) abgestuft. Es sind Werte für die Bodenarten Sand, Lehm/Schluff und Ton angegeben. Für die Grafiken wurden die Werte für die Bodenarten Lehm/Schluff eingesetzt. Die Werte für die Boden-

	Anzahl n	Min	10- Perzentil	Median	Mittelwert	90- Perzentil	95- Perzentil	99- Perzentil	Max	Standard- abw.
Pb (mg/kg)	713	2,5	14	41	116	320	457	759	2.000	177
Zn (mg/kg)	721	4,6	44	127	228	482	672	1.784	4.590	371
Cd (mg/kg)	712	0,03	0,10	0,25	0,98	2,00	2,60	6,96	118	4,69
Cu (mg/kg)	705	0,2	9,3	36,0	54,8	120	161	310	912	73
Ni (mg/kg)	531	3,4	6,4	21,0	42,3	127	154	205	295	50,2
Hg (mg/kg)	516	0,013	0,025	0,10	0,18	0,25	0,30	1,46	10,0	0,61
Cr (mg/kg)	531	0	8,3	24,2	41,5	110	137	208	287	44,4
Tl (mg/kg)	155	0,015	0,208	0,25	0,23	0,25	0,25	0,25	0,25	0,06
As (mg/kg)	499	0,50	2,23	5,00	5,47	8,10	11,3	34,0	79,0	6,33

Tab. 8: Schwermetallgehalte im Feststoff (Königswasseraufschluss)

	Anzahl n	Min	10- Perzentil	Median	Mittelwert	90- Perzentil	95- Perzentil	99- Perzentil	Max	Standard- abw.
As mg/L	479	0,00125	0,0015	0,0025	0,0042	0,0050	0,0111	0,0463	0,0820	0,0074
Pb mg/L	543	0,001	0,002	0,005	0,011	0,020	0,036	0,110	0,230	0,021
Cd mg/L	538	0,00005	0,00025	0,0005	0,0005	0,0005	0,0010	0,0020	0,0030	0,0004
Cr mg/L	459	0,0005	0,001	0,003	0,003	0,006	0,008	0,009	0,033	0,003
Cu mg/L	538	0,0005	0,005	0,0140	0,0228	0,0483	0,0572	0,0875	1,5000	0,0664
Ni mg/L	480	0,0005	0,001	0,005	0,004	0,010	0,010	0,014	0,023	0,003
Hg mg/L	479	0,00001	0,00005	0,00010	0,00043	0,00015	0,00015	0,00200	0,05000	0,00395
Zn mg/L	542	0,003	0,009	0,010	0,037	0,089	0,166	0,316	0,410	0,059
Tl mg/L	160	0,00010	0,00010	0,00010	0,00025	0,00050	0,00050	0,00116	0,00150	0,00024

Tab. 9: Schwermetallgehalte im Eluat (Schüttelversuch W/F 1:10)

art Ton werden zusätzlich angegeben, weil aufgrund günstiger pH-Werte und relativ hoher Humusgehalte ein guter Stoffrückhalt im Bankett erwartet werden kann, der für viele Stoffe mit dem Rückhalt in tonigen Böden vergleichbar ist. Da der Straßenrandbereich ständigen Stoffeinträgen aus dem Verkehr unterliegt, kann eventuell für das Verschieben und den Wiedereinbau von Bankettmaterial ein höherer Bewertungshorizont gewählt werden. Für die geplante Bundesverwertungsverordnung ist hierfür der doppelte Vorsorgewert oder der Z0*-Wert in der Diskussion. Um grafisch deutlich zu machen, für welche Stoffe eine solche Regelung wünschenswert wäre, um Bankettmaterial im Straßenraum weiterverwenden zu können, sind die doppelten Vorsorgewerte für Ton in den Grafiken dargestellt.

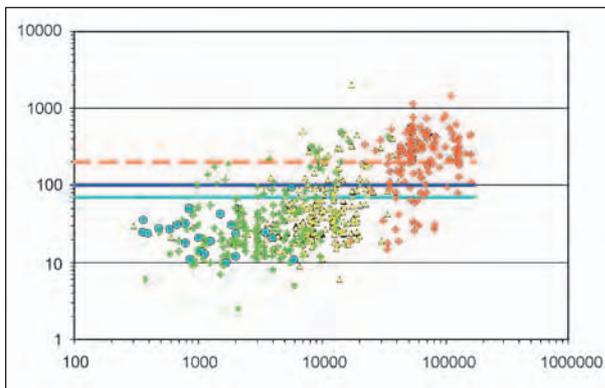
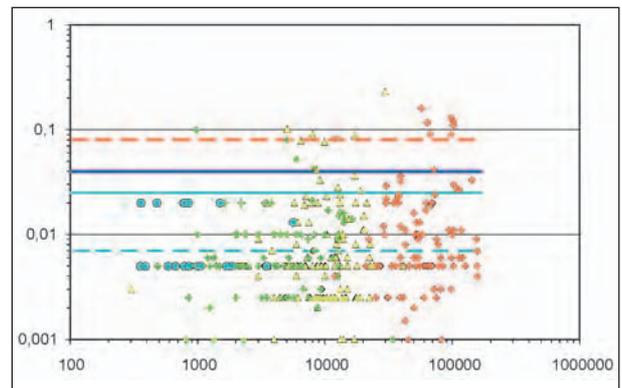
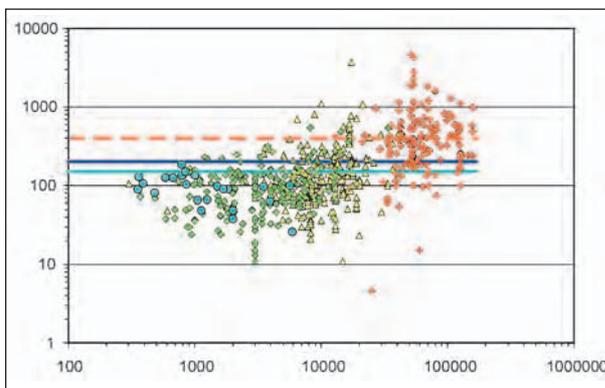
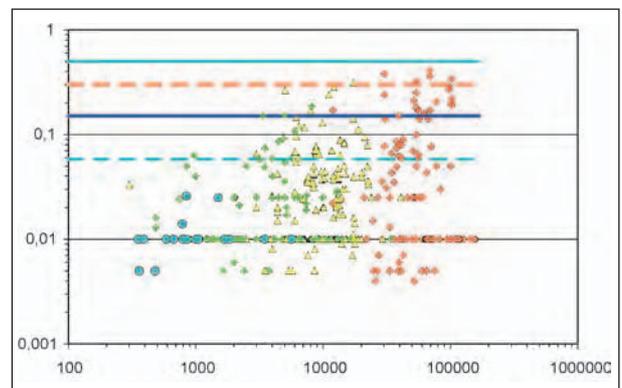
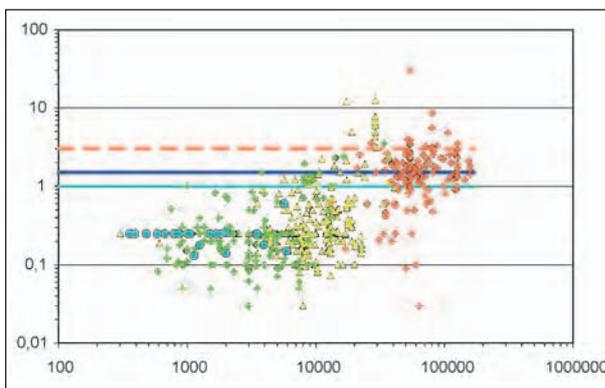
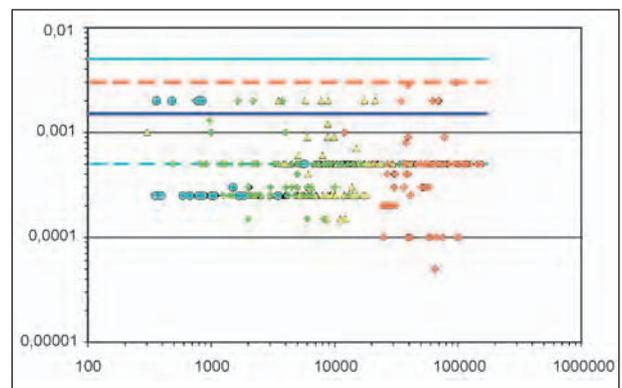
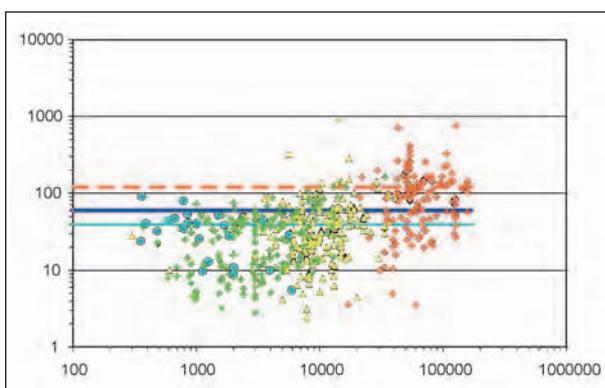
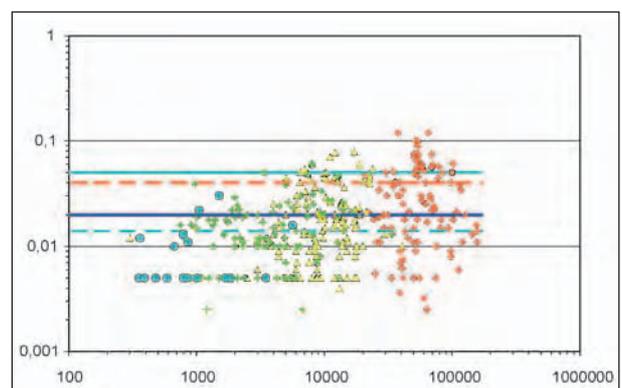
Für die Bewertung der löslichen Gehalte in Bodenproben ist keine Unterscheidung nach Bodenarten vorgesehen. Auch hier sind zusätzlich zu den Prüfwerten für Sickerwasser, den Geringfügigkeitsschwellen und den Z0/Z0*-Werten die doppelten Vorsorgewerte für die Bodenart Ton dargestellt.

Prüfwerte oder Maßnahmenwerte der Bodenschutzverordnung im Bodenfeststoff für Flächen vergleichbarer Nutzung (Tabellen 3 und 4) werden von den Proben weit unterschritten. Diese Bezugswerte sind in den Grafiken nicht dargestellt.

Blei, Cadmium, Kupfer und Zink gehören zu den Stoffen, von denen schon seit langem verkehrsbedingte Anreicherungen in Straßenrandböden bekannt sind. Die Feststoffwerte von Blei, Kupfer, Zink und Cadmium liegen häufig oberhalb der Vorsorgewerte. Dennoch ist für die Feststoffkonzentrationen, die in den Grafiken dargestellt sind, die Abhängigkeit zur Verkehrsstärke der Probenahmestandorte eher undeutlich, weil der Wertebereich der Konzentrationen bei jeder Verkehrsstärke sehr groß ist. Trotzdem treten vor allem bei höheren Verkehrsstärken hohe Konzentrationen häufiger und niedrige seltener auf als bei geringer Verkehrsstärke.

Wenn nach Straßentypen getrennt ausgewertet wird, ist aber auch eine deutliche Abhängigkeit der Konzentrationen vom Straßentyp zu erkennen. Die Tabellen 10 und 11 zeigen die Medianwerte der klassifizierten Straßen für Schwermetalle im Feststoff und Eluat. Sowohl in den Bildern 8 bis 15 als auch in den Tabellen 10 und 11 zeigen sich Autobahnen als die am stärksten belasteten Straßen. Hier ist für Blei, Cadmium, Kupfer und Zink sowohl bei den Feststoffgehalten als auch bei den Eluatgehalten ein klarer Unterschied zu den deutlich weniger belasteten Bundes-, Landes- und Kreisstraßen zu sehen. Diese liegen bei Blei, Zink und Cadmium im Vergleich zu den Geringfügigkeitsschwellen und Prüfwerten niedrig.

Legende zu den folgenden Abbildungen – klassifizierte Straßentypen:			
	Bundesautobahnen		Landesstraßen
	Bundesstraßen		Kreisstraßen
Legende zu den folgenden Abbildungen der Feststoffgehalte:		Legende zu den folgenden Abbildungen der Eluatgehalte:	
	Vorsorgewert bzw. Z0-Wert Lehm/Schluff		Geringfügigkeitsschwelle (GFS) LAWA
	Vorsorgewert bzw. Z0-Ton		Prüfwert für Sickerwasser (Bodenschutzverordnung)
	doppelter Vorsorgewert bzw. Z0-Wert Bodenart Ton		Z0/Z0*-Wert nach LAGA (2004)
			doppelter Z0/Z0*-Wert nach LAGA (2004)

**Bild 8:** Blei im Feststoff, mg/kg**Bild 9:** Blei im Eluat, mg/L**Bild 10:** Zink im Feststoff, mg/kg**Bild 11:** Zink im Eluat, mg/L**Bild 12:** Cadmium im Feststoff, mg/kg**Bild 13:** Cadmium im Eluat, mg/L**Bild 14:** Kupfer im Feststoff, mg/kg**Bild 15:** Kupfer im Eluat, mg/L

	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Tl (mg/kg)	As (mg/kg)	CN (mg/kg)
Median alle Daten	41	127	0,25	36,0	21,0	0,10	24,2	0,25	5,00	0,250
Median BAB	242	338	1,50	84,6	24,0	0,15	35,0	0,25	5,10	0,250
Median BS	38	119	0,25	31,2	11,7	0,05	14,9	0,25	3,41	0,250
Median LS	26	87	0,25	27,3	24,0	0,09	24,2	0,25	5,00	0,250
Median KS	26	105	0,25	32,0	45,0	0,15	40,0	0,25	5,00	0,250
Anzahl Messwerte n										
Alle klassifizierten Straßen	713	721	712	705	531	516	531	155	499	144
BAB	171	171	169	171	130	105	130	20	99	21
BS	237	245	238	229	171	173	171	40	170	37
LS	227	227	227	227	177	181	177	66	177	63
KS	70	70	70	70	45	49	45	26	45	20

Tab. 10: Konzentrationen in Bankettmaterial differenziert nach Straßentypen – anorganische Stoffe im Feststoff

	LF (µS/cm)	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	TOC mg/L	NH ₄ (mg/L)	Nitrit mg/L	CN (mg/L)	As mg/L	Pb mg/L	Cd mg/L	Cr mg/L	Cu mg/L	Ni mg/L	Hg mg/L	Zn mg/L	Tl (mg/L)
Median alle Daten	166	3,50	1,00	6,90	0,030	0,130	0,003	0,0025	0,005	0,0005	0,003	0,0140	0,005	0,00010	0,010	0,00010
Median BAB	184	3,00	2,70	7,40	0,070	0,222	0,003	0,0025	0,009	0,0005	0,003	0,0210	0,005	0,00010	0,021	0,00050
Median BS	153	6,66	1,10	6,20	0,023	0,209	0,003	0,0025	0,005	0,0005	0,001	0,0140	0,002	0,00005	0,020	0,00010
Median LS	152	2,30	1,00	6,10	0,015	0,023	0,003	0,0025	0,005	0,0004	0,004	0,0120	0,005	0,00010	0,010	0,00010
Median KS	144	3,70	1,00	8,65	0,040	0,135	0,0	0,0025	0,005	0,0003	0,005	0,0100	0,005	0,00010	0,010	0,00010
Anzahl Messwerte n																
Alle klassifizierten Straßen	580	379	258	266	147	9	180	479	543	538	459	538	480	479	542	160
BAB	143	69	29	69	21	4	21	115	163	158	116	157	116	116	162	21
BS	188	153	87	49	32	2	46	157	165	165	155	166	157	156	165	44
LS	182	124	109	98	56	1	69	144	148	148	140	148	144	144	148	66
KS	50	29	29	34	22	2	28	46	50	50	44	50	46	46	50	26

Tab. 11: Konzentrationen in Bankettmaterial differenziert nach Straßentypen – Stoffe im Eluat

Legende zu den folgenden Abbildungen – klassifizierte Straßentypen:	
◆ Bundesautobahnen	● Landesstraßen
▲ Bundesstraßen	● Kreisstraßen

Legende zu den folgenden Abbildungen der Feststoffgehalte:	Legende zu den folgenden Abbildungen der Eluatgehalte:
— Vorsorgewert bzw. Z0-Wert Lehm/Schluff	— Geringfügigkeitsschwelle (GFS) LAWA
— Vorsorgewert bzw. Z0-Ton	— Prüfwert für Sickerwasser (Bodenschutzverordnung)
- - - doppelter Vorsorgewert bzw. Z0-Wert Bodenart Ton	— Z0/Z0*-Wert nach LAGA (2004)
	- - - doppelter Z0/Z0*-Wert nach LAGA (2004)

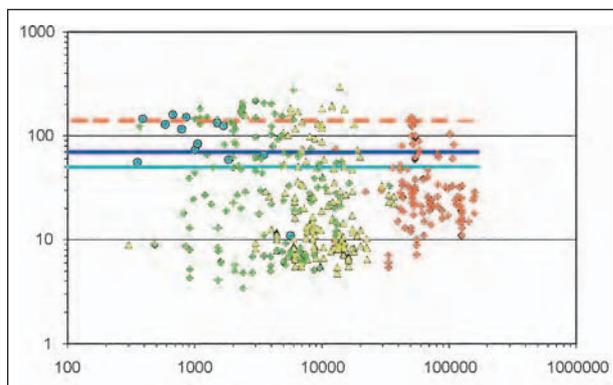


Bild 16: Nickel im Feststoff, mg/kg

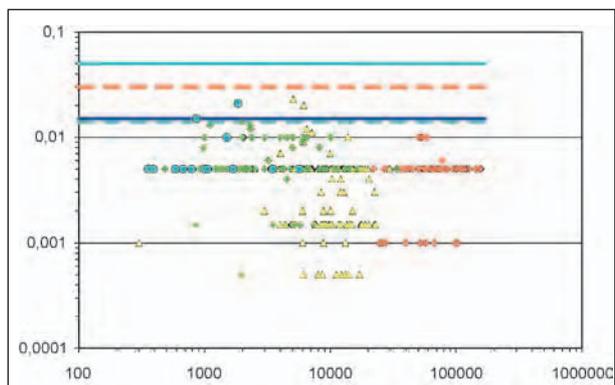


Bild 17: Nickel im Eluat, mg/L

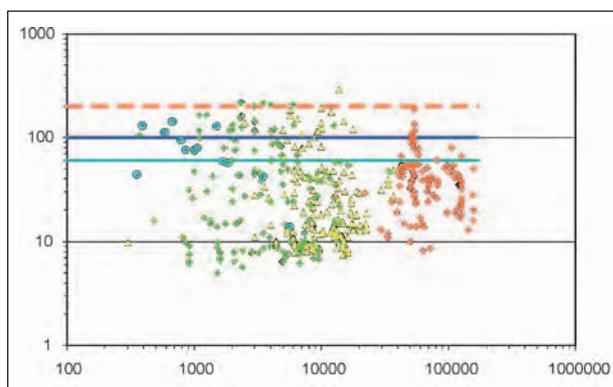


Bild 18: Chrom im Feststoff, mg/kg

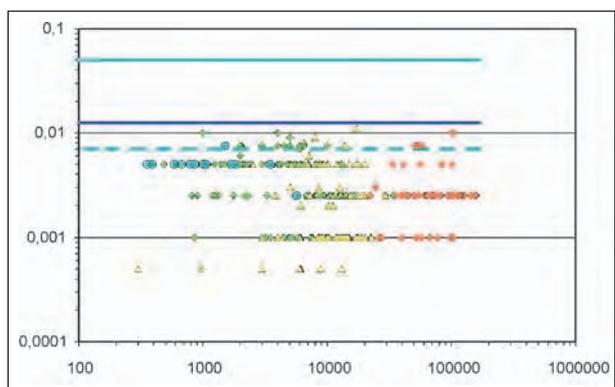


Bild 19: Chrom im Eluat, mg/L

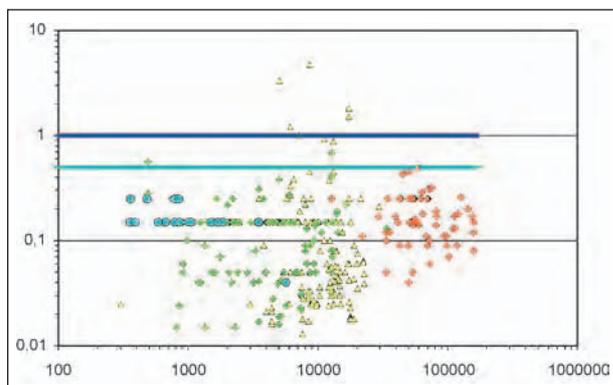


Bild 20: Quecksilber im Feststoff, mg/kg

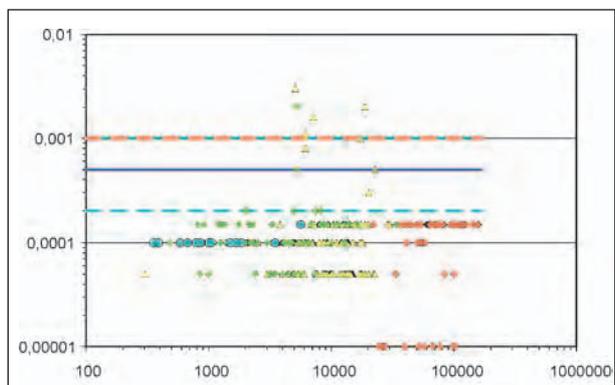


Bild 21: Quecksilber im Eluat, mg/L

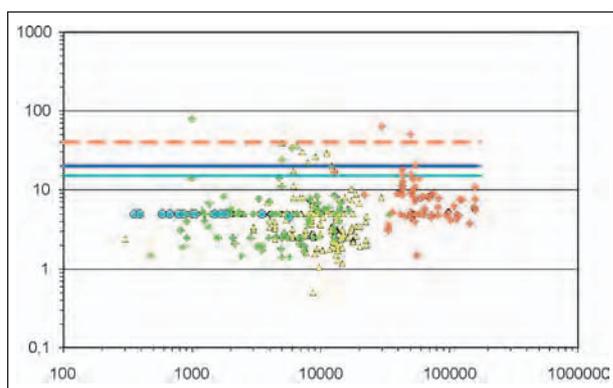


Bild 22: Arsen im Feststoff, mg/kg

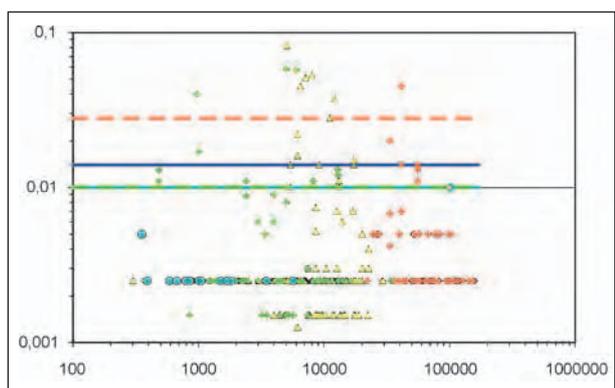


Bild 23: Arsen im Eluat, mg/L

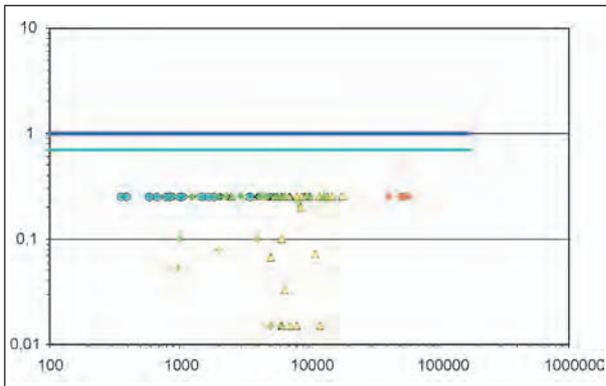


Bild 24: Thallium im Feststoff, mg/kg

Die Feststoffgehalte der restlichen Metalle (Bilder 16 bis 24) liegen vorwiegend unterhalb der Vorsorgewerte für Lehm/Schluff. Ausnahmen sind die Konzentrationen von Nickel und Chrom, die an vielen Straßen mit niedriger Verkehrsstärke relativ hohe Werte aufweisen. Bei vielen Daten aus dem Bundesland Hessen war den Laborberichten der Hinweis beigefügt, dass im Herkunftsgebiet geogen erhöhte Nickel- und Chromgehalte vorhanden sind. Teilweise wird dort regional anstehendes vulkanisches Hartgestein mit erhöhten Nickel- und Chromgehalten im Fahrbahnoberbau eingesetzt (BBPW 2006).

Erhöht sind auch weniger als 5 % der Messwerte für Quecksilber an Landesstraßen. Die erhöhten Konzentrationen lassen keinerlei Zusammenhang zur Verkehrsstärke erkennen. Hier liegen sehr wahrscheinlich Einzelfälle mit lokalen Belastungen vor, keine straßenverkehrsbedingten Ursachen.

Bemerkenswert ist, dass die Eluatgehalte aller Parameter außer Kupfer vollständig oder bis auf wenige Messwerte unterhalb der derzeit gültigen Prüfwerte der Bodenschutzverordnung für den Pfad Boden-Grundwasser liegen. Diese Werte wurden zum Schutz des Grundwassers in das Bodenschutzrecht aufgenommen und sind zur Bewertung von Bodensickerwasser bei seinem Eintritt ins Grundwasser abgeleitet worden. Für die Überarbeitung der Bodenschutzverordnung ist nach Angabe des BMU vorgesehen, die Geringfügigkeitsschwellen (GFS) der LAWA als neue Prüfwerte festzusetzen. Diese liegen für alle Parameter außer Arsen deutlich niedriger als die zurzeit gültigen Prüfwerte. Die GFS werden von Chlorid, Sulfat, Cyanid, Arsen, Nickel, Chrom und Quecksilber bei 95 % oder mehr der Proben eingehalten. Für alle weiteren Parameter im Eluat außer Leitfähigkeit und Kupfer halten mehr als 95 % der

Messwerte die $Z0/Z0^*$ -Werte ein. Das belegt die starke Bindung der meisten Schadstoffe an das Bankettmaterial und den für Schwermetallsorption günstigen pH-Wert-Bereich von 7 bis 8.

Problematisch sind die hohen Eluatgehalte von Kupfer (50-55 % der Werte über GFS). Bei den Eluatgehalten von Cadmium liegen viele Werte genau auf der Höhe der GFS bzw. knapp oberhalb des $Z0/Z0^*$ -Wertes (Bild 13). Die Ursache ist eine zu ungenaue Bestimmungsgrenze der Analyselabors. Für Zink liegen 20-25 % der Werte, für Blei ca. 35 bis 40 % der Werte über der Geringfügigkeitsschwelle. Die GFS sollen im Grundwasser gelten, und die Bestimmung der Eluatgehalte im Schüttelversuch ist als geeignete Methode zur Nachbildung von Sickerwasserwerten umstritten. Das sollte bei der Bewertung dieser Ergebnisse berücksichtigt werden. Interessant hierzu sind die Ergebnisse der „realitätsnäheren“ Gewinnung von Eluatproben mit der Methode der Säulenversuche, deren Ergebnisse in Kapitel 3.2 vorgestellt werden.

3.1.2 Organische Schadstoffe

Die Zusammenstellung statistischer Kenngrößen für die organischen Schadstoffe im Bodenfeststoff zeigt ebenso wie für die Schwermetallgehalte oft sehr deutliche Unterschiede zwischen Medianwerten und Mittelwerten (Tabelle 12). Ausgenommen davon sind der Summenparameter für Benzol, Toluol und Xylol (BTX), Benzol als Einzelparameter, der Phenolindex und der Summenparameter für leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW). Fast alle Messwerte dieser Stoffe sind deutlich entfernt von den Vorsorge- bzw. Zuordnungswerten $Z0$ (Bilder 25 bis 31). Die Stoffe, deren Mittelwerte die größten Abweichungen von den Medianwerten zeigen, weisen dagegen auch in den Darstellungen der Einzelmesswerte das auffälligste Verhalten auf. Wenige sehr hohe Messwerte der sechs untersuchten polychlorierten Biphenyle (6 PCB) und des Summenparameters für extrahierbare organische halogenierte Verbindungen (EOX) dominieren bei hohen Verkehrsstärken das Bild (Bilder 27 und 28).

Für die Bewertung der Gehalte organischer Feststoffe in Bodenproben ist keine Unterscheidung nach Bodenarten vorgesehen. Der Anforderungswert zur Verwertung von Bodenmaterial unterscheidet sich bei manchen Stoffen nach der Anzahl der bei der Analytik erfassten Stoffe eines

Summenparameters. Wenn alle Kohlenstoffkettenlängen von C10 bis C40 bei der MKW-Bestimmung einbezogen werden, liegt der dazugehörige Z0*-Wert mit 400 mg/kg doppelt so hoch wie bei der Erfassung eines kleineren Spektrums von Kettenlängen. Da die vorliegenden Messwerte für KW die Kettenlängen C10 bis C40 umfassen, wurde dieser Wert in dem Bild 26 verwendet.

Des Weiteren gibt es für PAK in der Bodenschutzverordnung zwei Vorsorgewerte, deren Höhe vom Humusgehalt des Bodens abhängig ist. Es wird zwischen Proben mit Humusgehalten von 8 % und niedriger und solchen mit über 8 % Humusanteil

unterschieden. Da der Mittelwert der Humusgehalte in den untersuchten Bankettproben bei 7 % liegt, sind hier beide Werte eingetragen. Die Vorsorgewerte und Z0-Werte der verschiedenen Bodenarten (Sand, Lehm/Schluff, Ton) sind dagegen gleich und liegen als zweifarbige Linie übereinander.

PAK, B(a)P und KW weisen viele Messwerte oberhalb der Vorsorgewerte auf. Auch die doppelten Vorsorgewerte werden von PAK und B(a)P recht häufig überschritten. Den Z0*-Wert für die Kettenlängen C10 bis C40 von den Kohlenwasserstoffen überschreiten dagegen von weniger als 10 % der Messwerte.

	Anzahl n	Min	10- Perzentil	Median	Mittel- wert	90- Perzentil	95- Perzentil	99- Perzentil	Max	Stand- ard- abw.
Naphthalin (mg/kg)	161	0,00	0,00	0,01	0,10	0,15	0,22	1,91	2,85	0,35
B(a)P (mg/kg)	496	0	0	0,14	0,43	0,89	1,51	4,20	20,41	1,24
16 PAK EPA (mg/kg)	547	0	0,250	1,50	4,56	9,1	16,0	40,3	164,6	13,0
6 PCB (mg/kg)	160	0,005	0,005	0,005	0,198	0,57	1,40	2,43	4,05	0,54
KW C10-C40 (mg/kg)	714	5,0	25,0	81	128	279	381	736	1700	149
BTX (mg/kg)	166	0,050	0,100	0,100	0,109	0,100	0,250	0,250	0,250	0,038
EOX (mg/kg)	342	0,0	0,1	0,25	1,69	2,00	8,51	28,5	51,1	5,63
Benzol (mg/kg)	157	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	–
Phenolindex (mg/kg)	164	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,013	0,023	0,002
Summe LHKW (mg/kg) (= LCKW)	155	0,0005	0,0019	0,1.000	0,0749	0,1.000	0,1.000	0,1000	0,1000	0,0414

Tab. 12: Organische Schadstoffgehalte im Feststoff

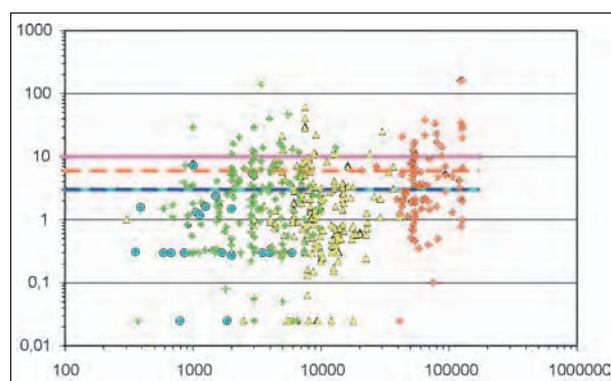


Bild 25: PAK (16 PAK/EPA) im Feststoff, mg/kg

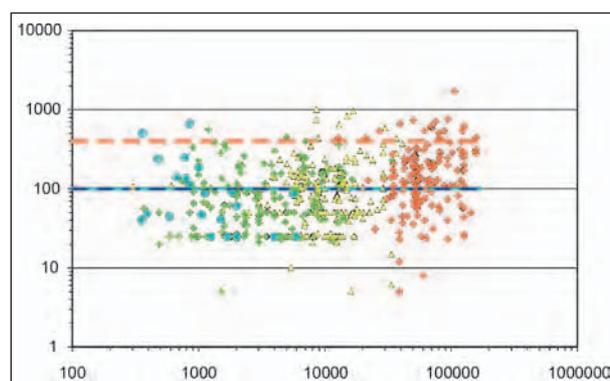


Bild 26: KW (C10-C40) im Feststoff, mg/kg

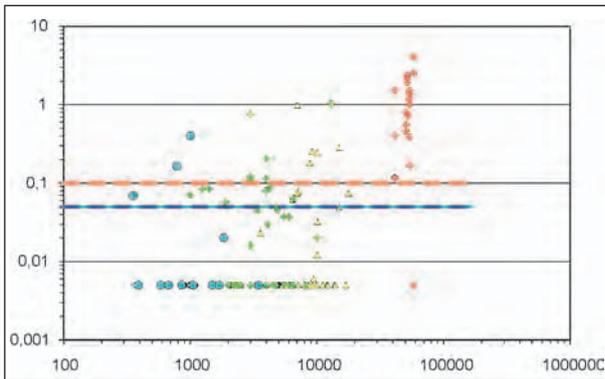


Bild 27: PCB im Feststoff, mg/kg

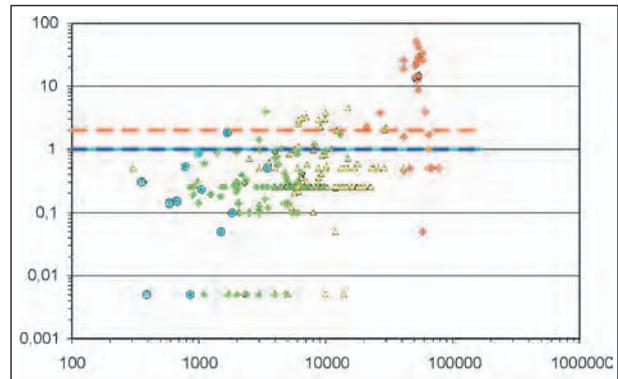


Bild 28: EOX im Feststoff, mg/kg

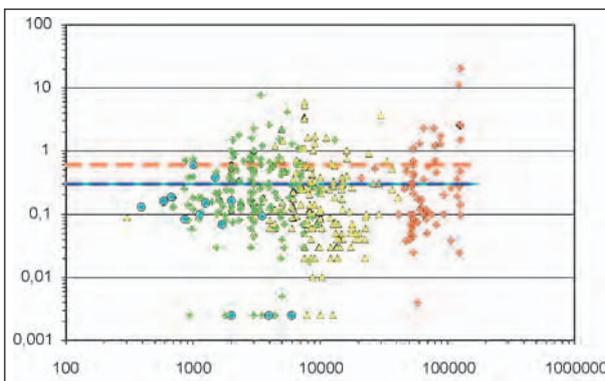


Bild 29: B(a)P im Feststoff, mg/kg

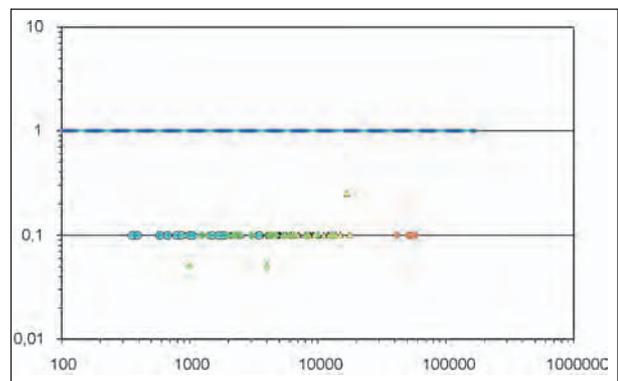


Bild 30: BTX im Feststoff, mg/kg

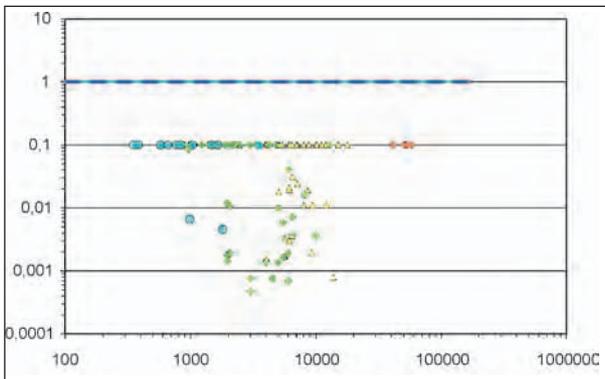


Bild 31: LHKW im Feststoff, mg/kg

In Bild 25 ist auch der Vorsorgewert der Bodenschutzverordnung für Böden mit Humusgehalten von 8 Massen-% oder mehr eingefügt. Über 90 % der PAK-Messwerte der untersuchten Bankettproben liegen unterhalb dieses Vorsorgewertes.

BTX und LHKW überschreiten die Vorsorgewerte nicht. Besonders auffällig sind dagegen die zum Teil sehr hohen Messwerte für PCB und EOX, die alle bei hohen Verkehrsstärken auftreten (Bilder 27 und 28). Die Konzentrationsverteilung der PCB- und EOX-Messwerte unterscheidet sich allerdings von Stoffen, die bekanntermaßen durch den Straßenverkehr freigesetzt werden, wie PAK, MKW, Blei oder Zink. Bei diesen treten Messwerte sowohl

im Vergleich mit den Vorsorgewerten als auch in Bezug auf die Verkehrsstärke in einer relativ breiten Verteilung auf. PCB und EOX dagegen weisen viele Werte nahe oder unterhalb der Vorsorgewerte bzw. Z0-Werte auf, kaum Messwerte im mittleren Konzentrationsbereich und wenige extrem hohe Werte, alle an Autobahnen (Tabelle 13). PCB werden bei der Extraktion für die Bestimmung von EOX mit erfasst, die beiden Größen enthalten also teilweise dieselbe Information. Darauf wird bei der Diskussion näher eingegangen.

3.1.3 Weitere Parameter

Weitere Parameter, die für die Beurteilung der Verwertungsmöglichkeiten und für die Deponierbarkeit von Bankettmaterial interessant sein können, sind in der Tabelle 14 zusammengestellt.

Für die Bewertung der löslichen Gehalte in Bodenproben ist keine Unterscheidung nach Bodenarten vorgesehen. Der Anforderungswert zur Verwertung von Bodenmaterial unterscheidet sich nur bei Cyanid je nach der Geschwindigkeit der Löslichkeit (freies Cyanid 10 µg/L, Gesamtcyanid 50 µg/L).

Auffällige Werte sind in Tabelle 14 und den Bildern 32 bis 35 die elektrische Leitfähigkeit und die Hu-

	B(a)P	PAK EPA (mg/kg)	6 PCB (mg/kg)	KW C10-C40 (mg/kg)	BTX (mg/kg)	EOX (mg/kg)	LHKW (mg/kg)
Median alle Daten	0,14	1,48	0,005	81	0,100	0,25	0,1000
Median BAB	0,13	2,70	1,015	129	0,100	4,45	0,1000
Median BS	0,12	1,07	0,005	70	0,100	0,25	0,1000
Median LS	0,18	1,60	0,005	63	0,100	0,25	0,1000
Median KS	0,10	0,48	0,005	69	0,100	0,23	0,1000
Anzahl Messwerte n							
Alle klassifizierten Straßen	492	543	160	710	166	345	155
BAB	87	105	21	176	21	38	21
BS	181	194	44	242	50	149	39
LS	184	195	66	219	66	125	66
KS	42	48	26	69	26	29	26

Tab. 13: Konzentrationen in Bankettmaterial differenziert nach Straßentypen – organische Stoffe im Feststoff

	Anzahl n	Min	10- Perzentil	Median	Mittelwert	90- Perzentil	95- Perzentil	99- Perzentil	Max	Standard- abw.
TOC Boden (M.-%)	194	0,01	1,00	2,94	3,01	5,48	5,99	7,69	8,26	1,77
AT ₄ (mg O ₂ /gTS x4)	57	0,05	0,05	0,58	0,69	1,36	1,58	2,23	2,42	0,53
CN (mg/kg)	144	0,10	0,25	0,25	0,37	0,81	1,19	1,39	2	0,30
pH-Wert Boden in CaCl ₂	263	4,34	5,73	6,73	6,66	7,50	7,60	7,81	8,30	0,70
pH-Wert Eluat	596	4,41	6,80	7,51	7,54	8,31	8,60	9,01	10,7	0,65
el. LF (µS/cm)	580	11	65	166	171	284	339	427	669	94
Cl (mg/L)	379	0,2	0,5	3,50	8,24	19,0	29,7	63,2	96	12,5
SO ₄ (mg/L)	258	0,23	0,5	1,00	2,05	4,12	7,71	15,69	20,50	2,85
TOC (mg/L)	266	0,25	2,60	6,90	8,56	18,9	23,0	27,8	32,0	6,35
Glühverlust (M.-%)	155	1,7	3,60	6,37	6,94	11,5	12,4	13,7	14,4	3,0
CN (mg/L)	180	0,0010	0,0025	0,0025	0,0033	0,0050	0,0050	0,0086	0,0140	0,0016
NH ₄ (mg/L)	147	0,01	0,02	0,03	0,12	0,33	0,44	1,37	1,40	0,23
Nitrit (mg/L)	9	0,010	0,020	0,130	0,186	0,425	0,468	0,502	0,510	0,181

Tab. 14: Weitere Parameter im Feststoff und Eluat

musgehalte (Glühverlust). Die erhöhte Leitfähigkeit wird vermutlich vorwiegend durch den Einsatz von Tausalz hervorgerufen, auf den aus Verkehrssicherungsgründen nicht verzichtet werden kann. Die Werte bleiben aber praktisch immer unterhalb des doppelten Vorsorgewertes. Die Humusgehalte sind mit einem Mittel von 7 % relativ hoch, liegen aber im Bereich natürlicher Böden. Möglicherweise ist ein Teil des Glühverlustes durch organische Staubeinträge (Gummiabrieb) hervorgerufen, dazu liegen jedoch keine Daten vor. Eventuell leistet dieser Abrieb einen Beitrag zum festgestellten hohen Schadstoffrückhalt im Bankettmaterial, darauf wird in der Diskussion eingegangen.

Sowohl pH-Werte wie auch Leitfähigkeiten in den Eluaten sind mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen im Straßenabfluss vergleichbar (Tabelle 15). Dort treten allerdings an Einzelproben sehr viel

Quelle	Ort und Zeitpunkt der Messung	pH-Wert	Leitfähigkeit [µS/cm]
DIEHL (2001)	Deutschland, Autobahn A 7, DTV 70.000 (Sommer 2000)	9,78	111
		6,8-10,65	70-150
BARBOSA/HVITVED-JACOBSEN (1999)	Portugal, Gebirgsstraße, DTV 6.000 (vor 1999)	6,4	43
LEGRET/PAGOTTO (1999)	Frankreich, Autobahn A 11, DTV 12.000 (1995/1996)	7,4	280
		6,3-7,9	60-17.620
LYGREN et al. (1984)	Norwegen, Autobahn E 6, DTV 10.000 (1982)	7,4	688
		6,7-9,1	27-5870

Tab. 15: pH-Werte und Leitfähigkeit in Straßenabflusswasser aus Literaturdaten (aus DIEHL 2001, oberer Wert: Median, unten: Wertebereich)

höhere Leitfähigkeitswerte auf, die auf Messungen im Straßenabfluss im Winter zurückgehen.

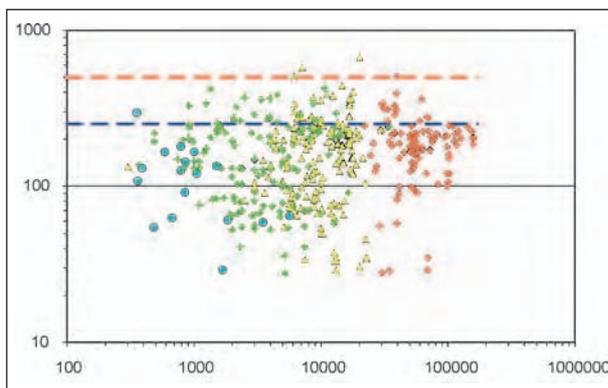
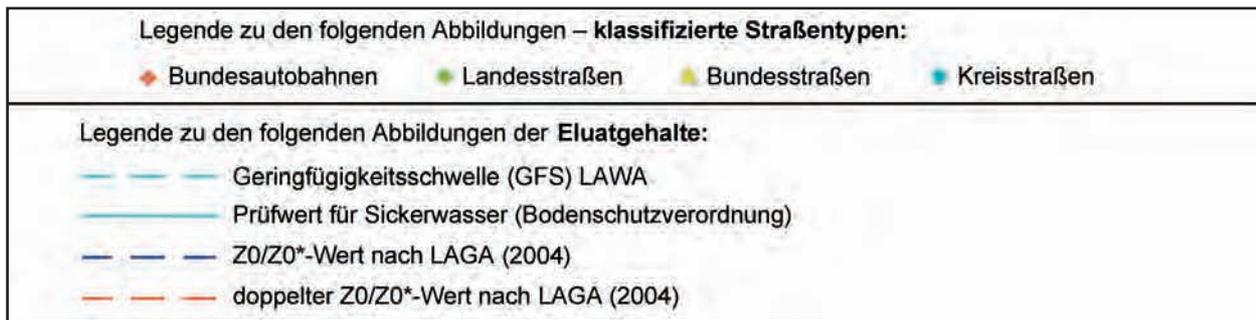


Bild 32: Elektrische Leitfähigkeit im Eluat, µS/cm

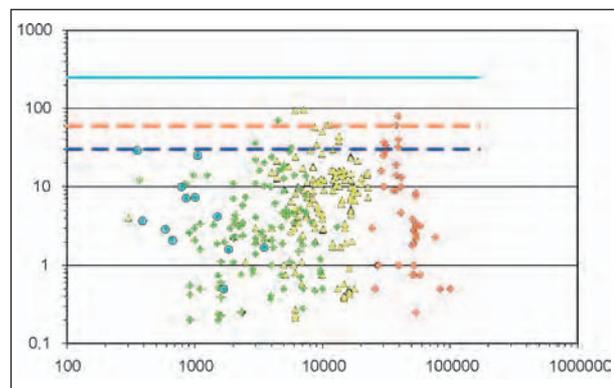


Bild 33: Chlorid im Eluat, mg/L

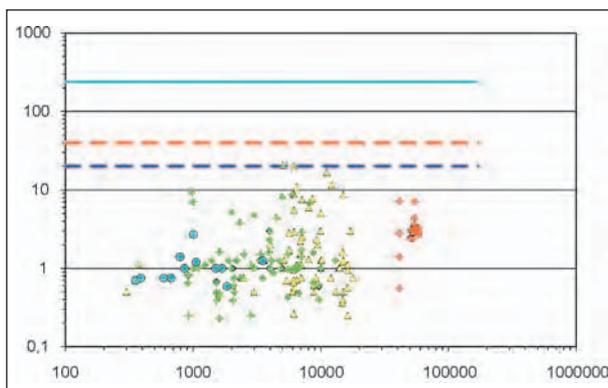


Bild 34: Sulfat im Eluat, mg/L

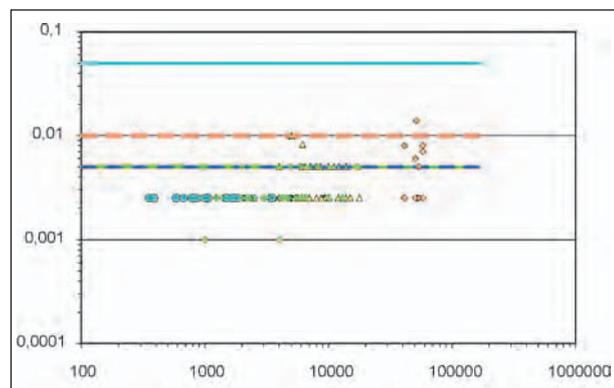


Bild 35: Cyanid im Eluat, mg/L

3.1.4 Zuordnung der Ergebnisse zu Z-Werten für die Verwertung mineralischer Abfälle

Die Auswertung aller einzelnen Messwerte ergibt die in den Tabellen 16 und 17 zusammengestellten Zuordnungen. Es ist jeweils der Prozentanteil der Messungen, der in die jeweilige Klasse fällt, angegeben.

Bei Blei, Kupfer sowie Zink, B(a)P und PAK treten am häufigsten Überschreitungen der Vorsorgewerte der Bundesbodenschutzverordnung bzw. der Z0-Werte im Bodenfeststoff auf. Für die meisten Parameter liegen aber höchstens 10 % der Messwerte im Bereich von Z2 und höher. Blei und B(a)P weisen dagegen mehr als 10 % der Werte im Bereich

von Z2 oder höher auf. Auffällig sind die 11 % Messwerte für PCB im Bereich > Z2, bei gleichzeitig wenigen Werten im Bereich Z0 bis Z2. In der vorliegenden Auswertung lagen 30 Messungen vor.

Im Eluat dagegen sind außer teilweise erhöhten Leitfähigkeitswerten nur die Kupfergehalte auffällig (Tabelle 17). Diese liegen bei einem Drittel der Proben im Bereich von Z 1.2. Alle Parameter außer Kupfer und Leitfähigkeit weisen keine oder bis höchstens 6 % der Werte über Z0 auf. Es treten keine Werte im Bereich von Z 1.1 auf, da die festgesetzten Eluatwerte mit den Z0-Werten identisch sind. Eluatwerte oberhalb von Z2 wurden ebenfalls nicht festgestellt.

%	Pb mg/kg	Zn mg/kg	Cd mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Cr mg/kg	BaP mg/kg	PAK EPA mg/kg	6 PCB mg/kg	MKW mg/kg	BTX mg/kg	EOX mg/kg
<= Z0	64	60	77	55	74	81	66	67	71	100	100	87
Z0*	12	21	0	26	12	12	13	0	8	0	0	0
Z1	6	8	20	15	8	5	6	22	3	0	0	5
Z2	17	9	3	4	6	2	16	8	7	0	0	3
> Z2	2	1	0	0	0	0	0	2	11	0	0	5

Tab. 16: Zuordnung der Messwerte zu Z-Werten LAGA (2004c) – Feststoffgehalte (Angaben in Prozent, gerundet)

%	LF µS/cm	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	As mg/L	Pb mg/L	Cd mg/L	Cr mg/L	Cu mg/L	Ni mg/L	Zn mg/L
<= Z0	84	95	100	97	95	96	100	67	99	94
Z 1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z 1.2	16	3	0	1	2	4	0	30	0	2
Z2	0	2	0	2	3	0	0	3	0	4
> Z2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 17: Zuordnung der Messwerte zu Z-Werten LAGA (2004c) – Eluatgehalte (Angaben in Prozent, gerundet)

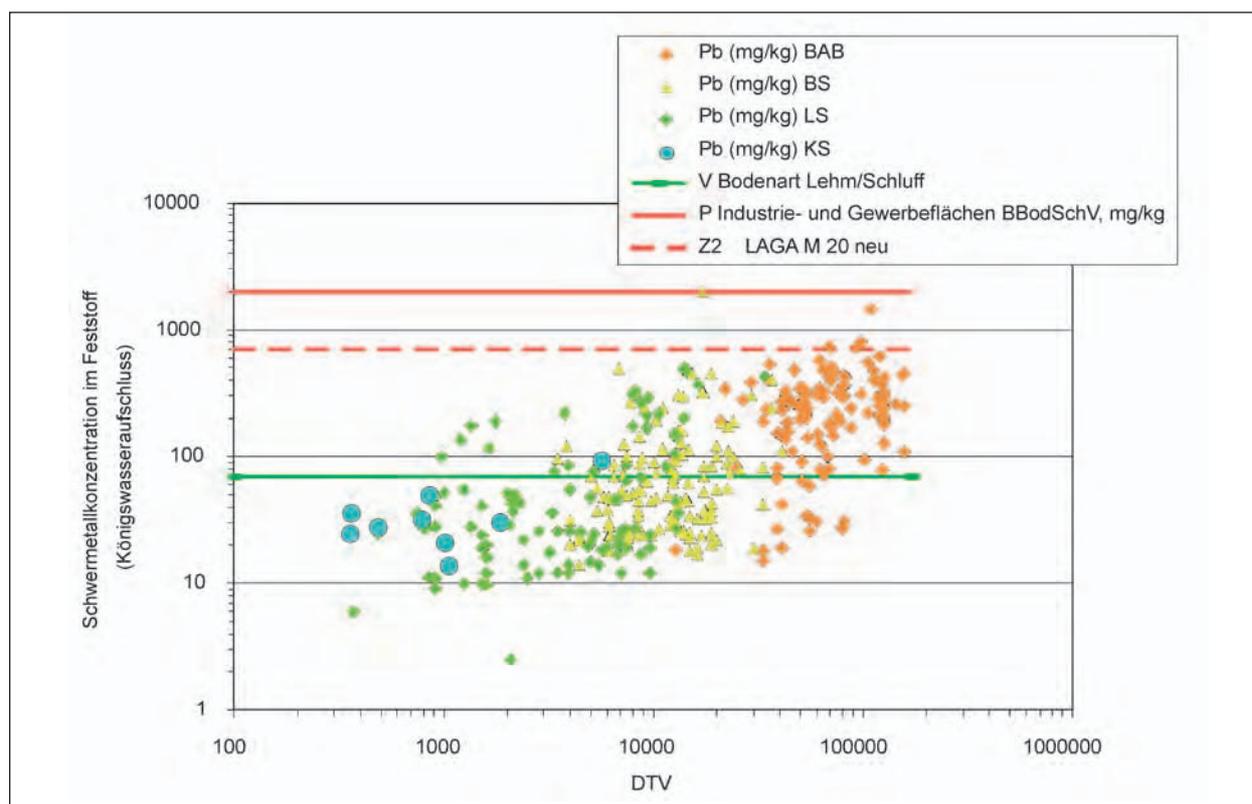


Bild 36: Bleikonzentration im Bodenfeststoff in 0 bis 10 cm Tiefe und 0 bis 2 m vom Rand der befestigten Fahrbahn an Straßen verschiedener Klassen und Verkehrsstärke. V = Vorsorgewert, P = Prüfwert der Bodenschutzverordnung für Industrie- und Gewerbeflächen

Bei den Substanzen Arsen, Cyanid, Quecksilber, Thallium, BTX und LCKW im Feststoff sowie Cyanid, Quecksilber und Thallium im Eluat traten trotz zahlreicher Messwerte keine oder nur wenige erhöhte Werte und keine Überschreitungen von Z0-Werten nach LAGA M20 (2004c) auf. Für diese Stoffe ist der Straßenverkehr vermutlich keine rele-

vante Quelle, zumindest kommt es nicht zu einer Anreicherung in den Banketten.

Als grafische Beispiele sind die Einzelmesswerte für Blei im Feststoff und Kupfer im Eluat in den Bildern 36 und 37 dargestellt. Für beide Parameter zeigen sich deutlich erhöhte Gehalte in den Proben.

Viele der Messwerte liegen über den Z0-Werten, fast alle unter den Z2-Werten der LAGA M20 (2004c). Keiner der Messwerte liegt über den nutzungsbezogenen Prüfwerten der Bodenschutzverordnung. Bei allen anderen Stoffen, die in Straßennähe deutlich erhöhte Werte zeigen, liegen die Einzelmesswerte weniger hoch im Vergleich zu den Vorsorge-, Prüf- und Zuordnungswerten (siehe Tabelle 8 und 9). Eine Abhängigkeit der Konzentrationen von der Verkehrsstärke ist bei allen Stoffen nur schwach oder gar nicht erkennbar.

Es wurde außerdem eine Bewertung der kompletten Datensätze für jede Probe nach LAGA M20 (2004c) durchgeführt. Dabei wurde für jeden Parameter die Einhaltung der verschiedenen Zuordnungswerte geprüft und dann für alle Parameter einer Probe die jeweils höchste Zuordnungsstufe ermittelt. Dieser Klasse wird die Probe als Ganzes dann zugeordnet. Das entspricht genau dem Verfahren, wie eine Charge Bankettmaterial bei Abgabe als Abfall anhand der zugehörigen Probe/n bewertet werden würde.

Dabei zeigt sich, dass die Berücksichtigung der Feststoffgehalte und Eluatgehalte für mehr als 70 % der Proben von Bundes-, Landes- und Kreisstraßen zu einer Einstufung als Material führt, das im Bereich der Z0- oder Z1-Werte liegt und damit für den offenen Einbau geeignet wäre (Bild 38). Im

Einflussbereich der Stoffeinträge aus dem Straßenverkehr sollte solches Bankettmaterial ohne Untersuchung umgelagert oder für kleine Ausbesserungsmaßnahmen eingesetzt werden können. An Autobahnen dagegen weisen etwa 60 % der Proben eine Einstufung als Z2- oder höher belastetes Material auf. Hier ist eine Untersuchung auf Schadstoffgehalte vor einer Verwendung auf Straßengrundstücken bzw. vor der Abgabe zur Verwertung an Dritte erforderlich.

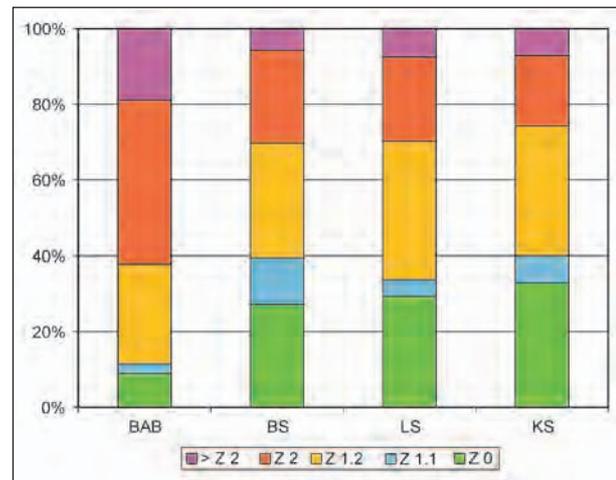


Bild 38: Zuordnung der Proben zu Z-Werten (LAGA M20 2004) nach Straßenklassen; BAB = Autobahnen, BS = Bundesstraßen, LS = Landesstraßen, KS = Kreisstraßen

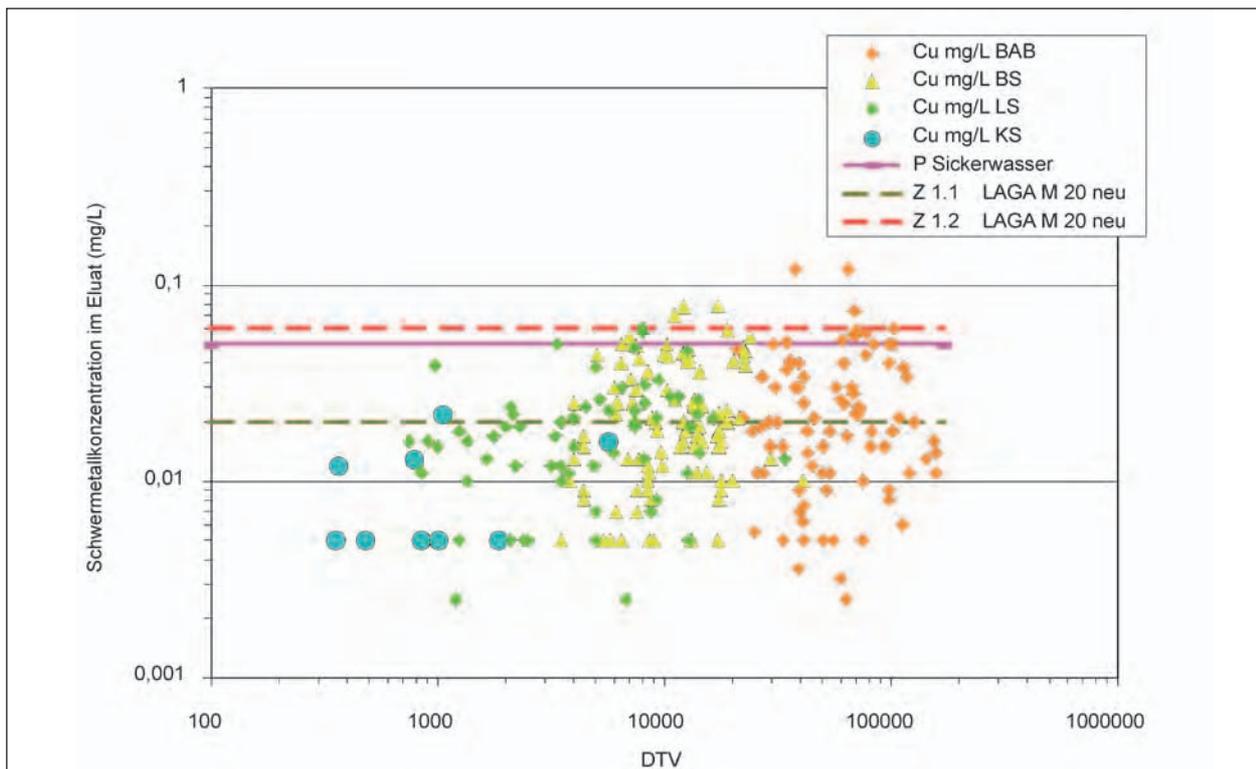


Bild 37: Kupferkonzentration im Eluat in Proben aus 0 bis 10 cm Tiefe und 0 bis 2 m vom Rand der befestigten Fahrbahn an Straßen verschiedener Klassen und Verkehrsstärke. P = Prüfwert der Bodenschutzverordnung für Sickerwasser

3.2 Säulenversuche

3.2.1 PAK in Feststoff und Eluat

Die Konzentration aller 16 EPA-PAK im Feststoff der 10 Bankettproben (Tabelle 18) liegt zwischen Median und 90-Perzentil der Proben aus der Gesamtauswertung der Bankettproben (Tabelle 12). Dem Spektrum an Verkehrsstärken, das durch die untersuchten 10 Standorte abgedeckt wird, entspricht ein relativ hoher PAK-Gehalt im Feststoff. Die Methodik der Extraktion und Bestimmung der hier dargestellten Werte sind direkt mit den Messwerten in Tabelle 12 vergleichbar.

Im Gegensatz dazu ist die Elution im Säulenversuch eine Methode, deren Ergebnisse nicht direkt mit der Elution mit dem „S4-Eluat“ (W/F 1:10, 24 h Schütteln) vergleichbar sind. Allerdings stellt die Analytik der sehr geringen PAK-Gehalte, die sich in den Wasserproben der Eluate einstellen, hohe Ansprüche an die Labors. Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren dieser Parameter nicht mehr als Zuordnungswert der LAGA M 20 geführt und deswegen auch bei den konventionellen Eluatproben nicht bestimmt (s. Tabelle 9 mit den Eluatkonzentrationen der Gesamtauswertung). Deshalb können die Ergebnisse in Tabelle 19 nicht

Probe Nr.	Nap	Any	Ace	Fln	Phe	Ant	Fth	Py	BaA	Chr	BbF-BkF	BaP	Inde-no	DahA	BghiP	Summe 16 EPA-PAK
1	34	< 15	< 15	< 15	77	< 15	163	165	83	118	234	79	86	< 20	197	1.236
2	28	< 15	< 15	< 15	98	21	527	490	447	464	1.403	662	725	154	703	5.723
3	62	22	< 15	< 15	119	29	695	622	634	571	1.850	934	1.232	250	1.171	8.190
4	38	< 15	< 15	< 15	114	< 15	249	223	127	181	392	164	211	38	311	2.048
5	34	< 15	< 15	< 15	98	26	185	171	147	253	416	152	160	29	259	1.932
6	36	< 15	< 15	< 15	113	< 15	172	155	75	106	230	88	83	< 20	174	1.233
7	< 15	19	< 15	< 15	162	48	806	613	543	623	1.167	535	418	94	389	5418
8	30	< 15	< 15	< 15	58	< 15	111	88	65	80	166	64	55	< 20	83	799
9	< 15	< 15	28	43	861	186	1.740	1.163	760	743	1.144	558	363	69	344	8.002
10	< 15	< 15	< 15	< 15	67	< 15	185	153	131	153	355	173	168	24	167	1.577
Quarzsand	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< BG

Abkürzungen der PAK:
 Nap: Naphthalin; Any: Acenaphthylen; Ace: Acenaphthen; Fln: Fluoren; Phe: Phenanthren;
 Ant: Anthracen; Fth: Fluoranthen; Py: Pyren; BaA: Benz(a)anthracen; Chr: Chrysen;
 BbF-BkF: Benzo(b)fluoranthen/Benzo(k)fluoranthen;
 BaP: Benzo(a)pyren; Indeno: Indeno(1,2,3-c,d)pyren; DahA: Dibenz(a,h)anthracen; BghiP: Benzo(g,h,i)perylene

Tab. 18: Feststoffgehalte PAK ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Probe Nr.	Nap	Any	Ace	Fln	Phe	Ant	Fth	Py	BaA	Chr	BbF-BkF	BaP	Indeno	DahA	BghiP	Summe 16 EPA-PAK
1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.00
2	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.01	0.03
3	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.04	0.02	0.03	< 0,01	0.05	0.14
4	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.00
5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.00
6	0.04	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.04
7	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.07	0.03	0.02	< 0,01	0.04	0.23
8	0.02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.02
9	0.02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.02
10	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0.03	0.01	0.02	< 0,01	0.03	0.10

Tab. 19: Eluatgehalte PAK; Proben aus Säulenperkolat entnommen bei Wasser/Feststoffverhältnis zwischen 1:1 und 2:1 (W/F 1-2); in mg/L

mit den Ergebnissen anderer Straßenstandorte verglichen werden, sondern nur mit den Geringfügigkeitsschwellen der LAWA (GFS), den Z0/Z0*-Werten des Eckpunktepapiers und den Prüfwerten der Bodenschutzverordnung. Davon sind von der Methode der Probengewinnung her eigentlich nur GFS und Prüfwerte für den direkten Vergleich geeignet, da die Ableitung der Z0-Werte für 1:10-Eluate aus Schüttelversuchen erfolgte.

Nach Angabe des Labors der Universität Tübingen waren die Eluate leicht braun gefärbt. Dies hat aber keine Auswirkungen auf die Qualität der Ergebnisse für PAK. Probe 7 überschreitet den Prüfwert der Bodenschutzverordnung für Sickerwasser von 0,2 µg/L, der identisch mit dem GFS-Wert ist (Tabelle 20)

Lfd. Nr.	Standort	Summe 16 EPA-PAK (mg/kg)	Summe 16 EPA-PAK (mg/kg) > Z0	Summe 16 EPA-PAK (µg/L)	Summe 16 EPA-PAK (µg/L) > GFS LAWA
1	A 61, Meckenheim	1,24		0,00	
2	A 7, Berkhof I	5,72	5,72	0,03	
3	A 7, Berkhof II	8,19	8,19	0,14	0,14
4	A 7, Fallingbostal I	2,05		0,00	
5	A 7, Fallingbostal II	1,93		0,00	
6	A 7, Hildesheim I	1,23		0,04	
7	B 214, Altencelle	5,42	5,42	0,23	0,23
8	A 7, Hildesheim II	0,80		0,02	
9	B 188, Gifhorn West	8,00	8,00	0,02	
10	B 214, Flackenhorst	1,58		0,10	

Tab. 20: Bewertung der PAK-Feststoffkonzentrationen und Eluatwerte aus Säulenversuchen

3.2.2 Schwermetalle und anorganische Parameter

Die Bilder 39 bis 48 zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen der Ergebnisse der Säulenversuche für Leitfähigkeit, pH-Wert, Chloridgehalt und die Schwermetalle. Die x-Achse zeigt ansteigend die Erhöhung des Wasser-/Feststoff-Verhältnisses (L/S), dem die Proben im Verlauf des Säulenversuches ausgesetzt sind. Es ist ein Maß für die Menge an Wasser, das die Probe durchströmt hat, aber wegen der gleichmäßig eingestellten Durchflussgeschwindigkeit indirekt auch eine Darstellung der seit Versuchsbeginn vergangenen Zeit.

Sehr deutlich wird, dass fast alle Parameter mit ihren Mittelwerten und Standardabweichungen beim Wasser-/Feststoffverhältnis von etwa zwei unterhalb der Geringfügigkeitsschwellen oder Z0/Z0*-Werte bleiben. Nur bei den Bleigehalten im Eluat liegt die obere Grenze der Standardabweichung etwas darüber. Allerdings ist der hohe Kupfergehalt der Eluate, der schon bei den konventionellen Eluatuntersuchungen festgestellt wurde, hier noch wesentlich verstärkt.

Eine differenzierte Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die drei Proben von Bundesstraßen und sieben Proben von Autobahnen (Bild 43) ergibt ein nur wenig besseres Bild. Zwar liegen die Kupferwerte der Proben von Bundesstraßen anfangs gleich hoch, im Versuchsverlauf aber deutlich niedriger als die der Autobahnen. Aber auch bei den Bundesstraßen liegt der Mittelwert der Eluatkonzentrationen deutlich über GFS und Z0/Z0*-Wert. Insbesondere bei Probe 5 weisen Kupfer- und Nickelgehalte beim Wasser-/Feststoffverhältnis von 2 extrem hohe Werte auf (Tabelle 21). Im Versuchsverlauf davor und danach sind die

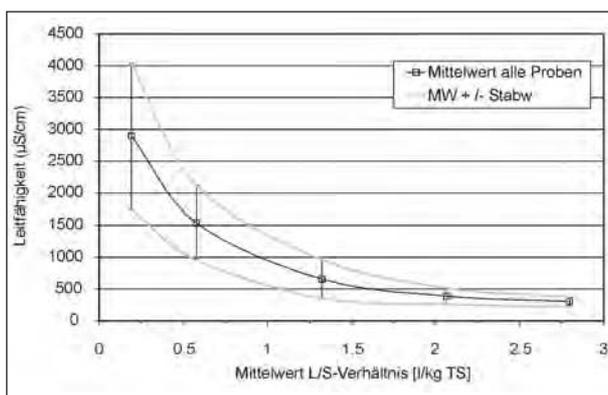


Bild 39: Säuleneluate: Verlauf der el. Leitfähigkeit

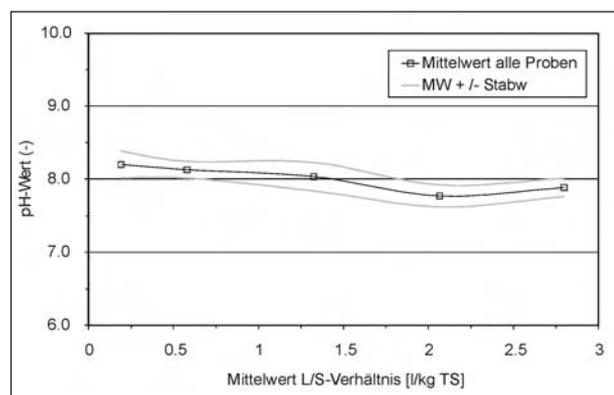


Bild 40: Säuleneluate: Verlauf der pH-Werte

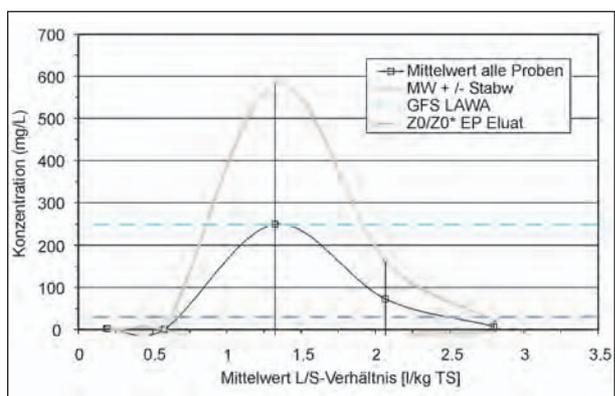


Bild 41: Säuleneluat: Verlauf der Chloridgehalte

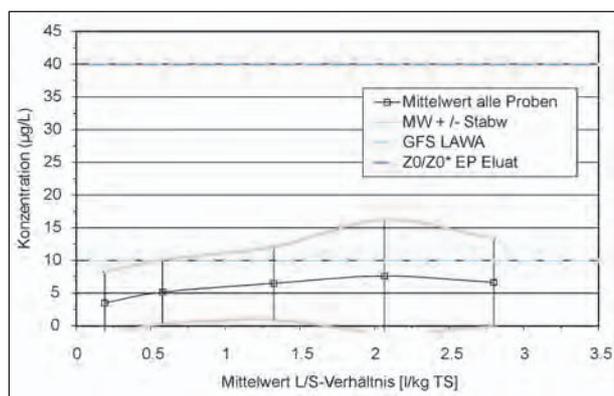


Bild 42: Säuleneluat: Verlauf der Bleigehalten

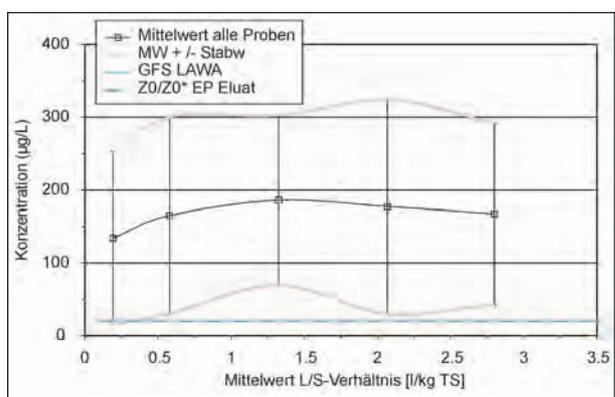


Bild 43: Säuleneluat: Verlauf der Kupfergehalten

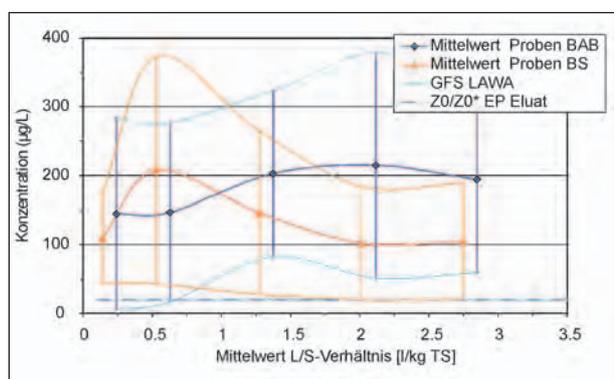


Bild 44: Kupfer in den Eluaten getrennt nach Proben von Autobahnen und Bundesstraßen

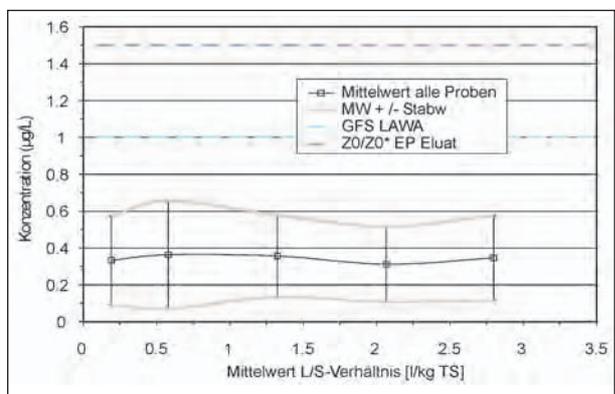


Bild 45: Säuleneluat: Verlauf der Cadmiumgehalten

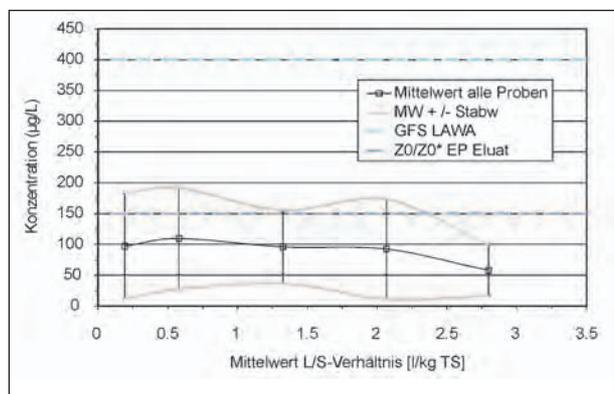


Bild 46: Säuleneluat: Verlauf der Zinkgehalten

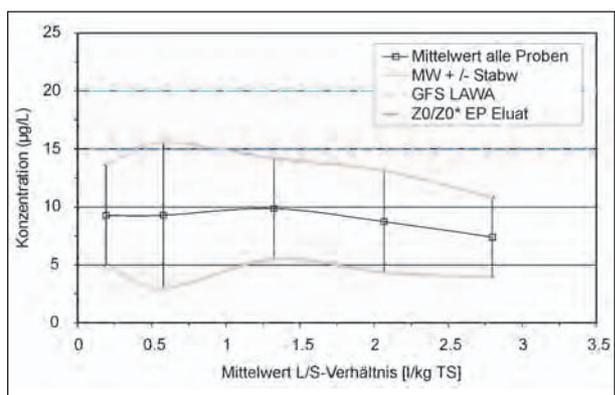


Bild 47: Säuleneluat: Verlauf der Nickelgehalten

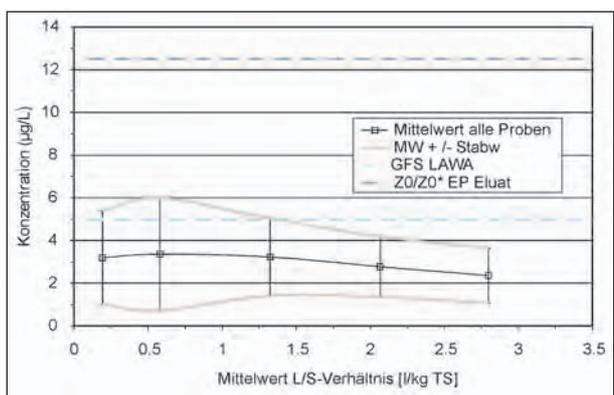


Bild 48: Säuleneluat: Verlauf der Chromgehalten

Werte für Kupfer zwar wie oben beschrieben hoch, liegen jedoch im Bereich der anderen Proben. Auch die Nickelkonzentration vor und nach der Entnahme des Eluates 4 liegt im Konzentrationsbereich der anderen Proben (Tabelle 22). Das Material ist sandig/schluffig und stammt von der A7 bei Fallingb. Die Ursache für die hohen Einzelwerte

konnte nicht ermittelt werden. Diese beiden Messwerte wurden für die Berechnung der Mittelwerte nicht verwendet.

Die Schwermetallfeststoffgehalte der 10 Proben der Säulenversuche konnten aus Kapazitätsgründen bisher nicht bestimmt werden. Dazu liegen jedoch

Probe	L/S-Verhältnis [l/kg TS]	El. LF ($\mu\text{S/cm}$)	PH (-)	As $\mu\text{g/L}$	Cd $\mu\text{g/L}$	Cl mg/L	Cr $\mu\text{g/L}$	Cu $\mu\text{g/L}$	Ni $\mu\text{g/L}$	Pb $\mu\text{g/L}$	Zn $\mu\text{g/L}$
1	1,8	426	7,77	3,7	0,476	20,2	3,67	432,25	19,14	9,2	160,8
2	2,2	491	7,85	< 1,5	0,128	17,5	1,95	82,89	3,9	2,71	25,42
3	2,3	535	7,83	< 1,5	0,376	5,84	3,34	255,13	8,01	5,15	54,78
4	2,1	364	7,48	< 1,5	0,557	152	4,78	376,58	6,9	30,65	132,21
5	2,5	201	7,6	4,5	0,181	15,7	2,86	1767,9	140,43	6,84	272,36
6	2,6	596	7,77	4,4	0,274	212	3,16	57,55	8,49	5,62	28,98
7	2,2	247	7,83	3,5	0,145	6,71	1,44	140,03	6,83	1,68	35,96
8	2,0	275	8,12	5,3	0,151	15	1,57	68,24	8,02	1,83	28,03
9	1,6	280	7,75	4,1	0,896	5,64	4,79	156,01	10,59	8,73	93,98
10	2,3	300	7,74	< 1,5	0,106	0,76	0,57	8,11	5,43	0,51	30,98

Tab. 21: Ausgewählte Eluatgehalte der anorganischen Parameter beim Wasser-/Feststoffverhältnis (L/S) von 2:1

Tab. 22: Eluatgehalte der anorganischen Parameter in den Säuleneluat

umfangreiche Daten anderer Proben vor, die in Tabelle 8, Kapitel 3.1, vorgestellt sind. Bei den PAK-Analysen der 10 Proben wurden keine außergewöhnlichen Gehalte festgestellt, und die Ergebnisse der Säuleneluat (Tabelle 19) deuten auch nicht auf Abweichungen der Feststoffgehalte gegenüber Proben von vergleichbaren Straßen hin (Tabellen 8 und 22).

3.3 Rückhaltungswirkung von Bankettmaterial und Straßenrandböden

Anhand einer weitergehenden Auswertung eigener Daten und Literaturdaten aus zwei gut dokumentierten Quellen wurde die Reinigungswirkung verschiedener Behandlungsmöglichkeiten, die an Außerortsstraßen in Deutschland verbreitet sind, untersucht. Die Reinigungsleistung durch zwei verschiedene Entwässerungsbecken wird mit der Versickerung des Straßenabflusses durch zwei Gruppen von Böden, die in Bankette eingebaut waren, verglichen.

Für Straßenrandböden (KOCHER/WESSOLEK 2003), Bankettlysimeter (DIERKES/GEIGER 1999) und zwei Typen von Entwässerungsbecken (LANGE et al. 2001) wurden der Eintrag und Austrag von Schwermetallen, Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) und polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) ermittelt. Die beprobten Standorte lagen vorwiegend an Autobahnen, die Straßen hatten im Untersuchungszeitraum Verkehrsstärken zwischen 35-90.000 Kfz/d (Autobahnen) und 15-20.000 Kfz/d (Bundesstraßen). Die untersuchten Straßenrandböden sind sandig und weisen ohne Straßeneinfluss niedrige pH-Werte auf,

die Böden in den Bankettlysimetern wiesen neutrale pH-Werte auf und enthielten z. T. große Anteile an kalkhaltigem Schotter. Eines der Entwässerungsbecken ist ein Betonbecken, das andere ein gedichtetes Erdbecken mit vorgeschaltetem Absetzbecken. Der Eintrag und Austrag von Schwermetallen, MKW und PAK wurden in den Straßenrandböden, in Bankettlysimetern und in den Zu- und Abläufen der Entwässerungsbecken bestimmt, der Stoffrückhalt wurde für jede Reinigungsmöglichkeit berechnet und verglichen. Eine zusammenfassende Beschreibung der in den Originalarbeiten untersuchten Standorte und verwendeten Methoden findet sich in Kapitel 2.4.

In den Tabellen 23 und 24 sind die Konzentrationen der Messungen aller drei Studien vergleichend ausgewertet. In Tabelle 24 ist für die untersuchten organischen Schadstoffe der Anteil der Konzentrationsmesswerte eingetragen, der unterhalb des Prüfwertes für den entsprechenden Stoff liegt. Dieser kann als Wirkungsgrad für das Einhalten niedriger Konzentrationen in den Abflüssen der Becken bzw. Sickerwässern der Bankettschichten betrachtet werden.

Außerdem sind in Tabelle 23 der pH-Wert-Bereich der Wasserproben und in Tabelle 24 das Alter der Standorte im Sinne einer Standzeit angegeben. Es kann davon ausgegangen werden, dass an den meisten Straßenstandorten seit dem Bau der Straße Veränderungen im Bankett- oder Böschungsbereich stattgefunden haben. Dabei wurde das Bodenmaterial aber möglicherweise nur umgelagert, sodass die Standzeit wahrscheinlich höher ist als die seit der letzten Baumaßnahme verstrichene Zeit. Für das Erdbecken kann davon ausge-

Konzentrationen im	pH-Wert(-)	Cadmium (µg/L)	Kupfer (µg/L)	Blei (µg/L)	Zink (µg/L)
Straßenabfluss	7.2-8.5	0.5-2.4	62-98	11-27	812-1.832
Bodenlösung in 1-.5 m Tiefe, Substrat sandig, kalkfrei, 1 m Entfernung vom Fahrbahnrand	7.1-7.6	< 0.1-0.33	3.6-32	< 0.5-1.56	< 50-142
Bodenlösung in 1-1.5 m Tiefe, Substrat sandig, kalkfrei, 2.5 m Entfernung vom Fahrbahnrand	5.5-7.7	< 0.1-0.33	4.4-29	< 0.5-1.53	< 50-73
Bodenpassage Laborlysimeter, 0.3 m Mächtigkeit, kalkhaltig, 1 m Entfernung vom Fahrbahnrand	7.4-7.7	< 0.4	31-50	< 5-11	44-274
Bodenpassage Freilandlysimeter, 0.3 m Mächtigkeit, kalkhaltig, 1 m Entfernung vom Fahrbahnrand	7.4-8.0	0.5-0.9	26-52	< 4-5	160-490
Ablauf Betonbecken	6.6-7.9	Meist < 0.2	100	39	380
Ablauf Erdbecken	6.3-7.9	Meist < 0.2	27	21	87
Prüfwert Sickerwasser (BBodSchV)		5	50	25	500

Tab. 23: Konzentrationsbereiche der Schwermetalle und pH-Werte (Originaldaten KOCHER/WESSOLEK 2003; DIERKES/GEIGER 1999; LANGE et al. 2001)

Konzentrationen im:	Alter des Standortes (Jahre)	MKW Anteil der Werte unter dem Prüfwert	PAK (16/EPA) Anteil der Werte unter dem Prüfwert
Straßenabfluss	-	10 %	0 %
Bodenlösung in 1-1.5 m Tiefe, Substrat sandig, kalkfrei, 1 m Entfernung vom Fahrbahnrand	Mindestens 20, bis < 70	97 %	97 %
Bodenlösung in 1-1.5 m Tiefe, Substrat sandig, kalkfrei, 2.5 m Entfernung vom Fahrbahnrand	Mindestens 20, bis < 70	97 %	97 %
Bodenpassage Laborlysimeter, 0.3 m Mächtigkeit, kalkhaltig, 1 m Entfernung vom Fahrbahnrand	24 + 20 zusätzliche Jahresfrachten	n. b.	n. b.
Bodenpassage Freilandlysimeter, 0.3 m Mächtigkeit, kalkhaltig, 1 m Entfernung vom Fahrbahnrand	24	0.1 mg/L (bis 0.8, analytische Probleme)	n. b.
Ablauf Betonbecken	?, < 2	40 %	0 %
Ablauf Erdbecken	Mehrere Jahre	97 %	80 %
Prüfwert Sickerwasser (BBodSchV)		0.2 mg/L	0.2 µg/L

Tab. 24: Alter der Standorte und Konzentrationsbereiche der MKW und PAK im Vergleich zu Prüfwerten; n. b. = nicht bestimmt (Originaldaten KOCHER/WESSOLEK 2003; DIERKES/GEIGER 1999; LANGE et al. 2001)

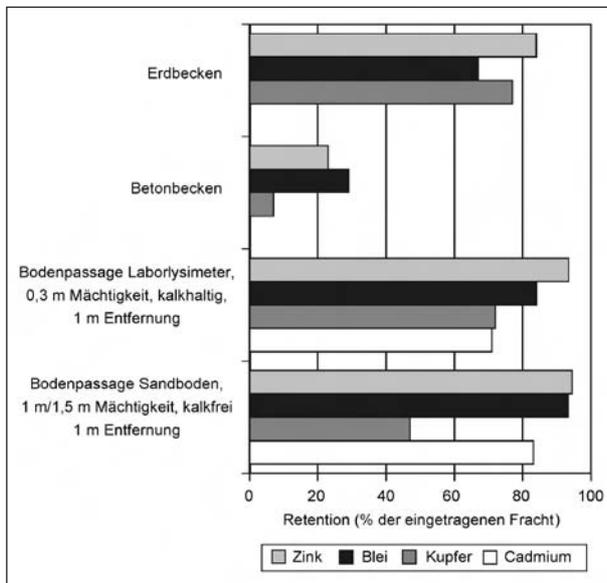


Bild 49: Vergleich der Frachtwirkungsgrade – Rückhalt von Schwermetallen in Böden und Entwässerungsbecken

gangen werden, dass seit dem Bau kein wesentlicher Sedimentaustrag stattgefunden hat, sodass die Standzeit des Sedimentmaterials im Becken der Zeit seit dem Bau etwa gleichzusetzen ist. Am Erdbecken zeigte sich im Lauf der zweijährigen Untersuchungszeit, dass das Sediment aus dem Becken bei sehr starken Regenereignissen teilweise oder ganz ausgeräumt wurde, sodass die „Standzeit“ mit unter zwei Jahren anzusetzen ist.

Die Bilder 49 und 50 zeigen vergleichend den Frachtwirkungsgrad der verschiedenen Verfahren für die untersuchten Schadstoffe. Es zeigt sich, dass sogar an Standorten mit sandigen kalkfreien Böden mit niedrigen pH-Werten die breitflächige Versickerung über das Bankett effektiver für den

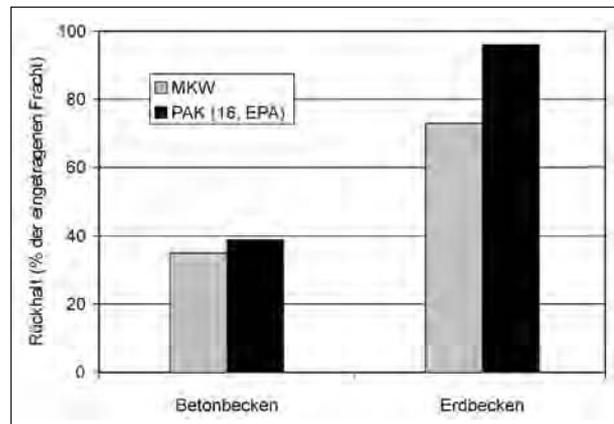


Bild 50: Vergleich der Frachtwirkungsgrade – Rückhalt von MKW und PAK in den zwei Entwässerungsbecken

Rückhalt der Schwermetalle Pb, Cd und Zn ist als beide Beckentypen. Das gilt sowohl für die Konzentrationsbereiche der Zu- und Abläufe (Tabellen 23 und 24) als auch für die Frachten dieser Stoffe. Für Cu ist dagegen die Reinigungsleistung des Erdbeckens höher als die der Bodenpassage, insbesondere verglichen mit der Passage durch die kalkfreien Sandböden (Bild 49).

Für die Konzentrationen der organischen Schadstoffe ist das Ergebnis der Verfahren vergleichbar (Tabelle 24), nur das Betonbecken erreicht bei weitem nicht denselben Stoffrückhalt. Zum Vergleich der Frachtwirkungsgrade der PAK und MKW waren für die Bodenpassage nicht genug Daten verfügbar, sodass nur die deutlich höhere Rückhaltefähigkeit des Erdbeckens für MKW und PAK hervorgehoben werden kann (Bild 50). Das Betonbecken hatte gravierende Probleme, weil während des Versuchszeitraumes durch zwei Starkregenereignisse die vorher abgelagerten Sedimente mobilisiert und

ausgetragen wurden. Das ist eine Hauptursache für den geringen Wirkungsgrad des Betonbeckens in dieser Untersuchung. Durch eine Umgestaltung des Einlaufes und ggf. der Tauchwände kann aber ein wesentlich besserer Schadstoffrückhalt erreicht werden (GROTEHUSMANN/KASTING/KUNZE, 2006)

Es zeigte sich, dass die Passage von nicht gesammeltem Straßenablaufwasser durch bewachsenen Bankettboden, selbst wenn dieser aus kalkfreiem Sand besteht, zu besserem Rückhalt und niedrigeren Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser führt, als es die hier untersuchten Entwässerungsbecken in ihrem Ablauf erreichen konnten.

Für Cu kann die beste Reinigungsleistung mit dem Erdbecken und durch den bewachsenen kalkhaltigen Boden erreicht werden. Bei MKW zeigen sowohl die Passage durch bewachsenen Boden als auch das Erdbecken gute Reinigungsleistung, wesentlich besser als das Betonbecken. Auch für den PAK-Rückhalt sind Bodenpassage und Erdbecken sehr viel wirkungsvoller als das Betonbecken. Für die Problematik der Ausräumung des Betonbeckens durch Starkregenereignisse wurden durch GROTEHUSMANN/KASTING/KUNZE (2006) Lösungsvorschläge erarbeitet und geprüft. Durch die breitflächige Entwässerung über das Bankett oder ggf. den Bau von Erdbecken kann diese Problematik ebenfalls vermieden werden.

Bei der Behandlung von Straßenabflüssen vor der Einleitung in Oberflächengewässer werden seit einiger Zeit auch Retentionsbodenfilteranlagen eingesetzt. Zur Ermittlung der Reinigungsleistung dieser Anlagen wurden halbtechnische Bodenfilterversuche durchgeführt (KASTING/GROTEHUSMANN 2007). Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass es durch den Eintrag von Feststoffen, die mit dem Fahrabfluss auf den Filter aufgebracht werden, zu einer Zunahme des Ton- und Schluffgehaltes, der Eisen-, Mangan-, und Aluminiumoxide und der organischen Substanz in der oberen Filterschicht kommt. Die Reinigungsleistung des Filters wird so durch bessere Filtration und Adsorption erhöht. Durch den Stoffeintrag während der Betriebszeit verringert sich also die Bedeutung des eingesetzten Filtermaterials für die Reinigungsleistung der Bodenfilteranlage. Diese Ergebnisse können auf Straßenbankette übertragen werden, da die infiltrierende Menge an Straßenabfluss dort vergleichbar oder etwas geringer ist (KOCHER/WESSOLEK 2003).

Eine umfangreiche und langjährige Untersuchung in einer Lysimeteranlage an einer Kreisstraße bei Augsburg zum Test verschiedener platzsparender Versickerungsvarianten für Straßenablaufwasser (NADLER A., MEIßNER E. 2004) sowie eine sehr detaillierte Untersuchung von Straßenbanketten auf Schadstoffeinträge und ihren Schadstoffrückhalt (BOLLER et al. 2005) belegen beide ebenfalls die langjährig sehr gute Reinigungsleistung von Banketten.

4 Diskussion

4.1 Vergleichbarkeit der Untersuchungen

Die Vergleichbarkeit von Bankettuntersuchungen, die nach LAGA M20 erhoben wurden, mit Daten, die nach Bodenschutzrecht erhoben wurden, halten wir im vorliegenden Fall für gegeben. Die große Streubreite der gefundenen Werte bei den Bankettuntersuchungen entsteht eher aufgrund der unterschiedlichen Verkehrsstärken und Ablagerungsbedingungen am Fahrbahnrand, nicht aufgrund von methodenbedingten Unterschieden. Die Auswirkungen nicht auszuschließender Methodenunterschiede auf Ergebnisse der vorliegenden Auswertung werden als unbedeutend angesehen.

4.2 Mögliche Quellen auffälliger Stoffe im Bankettmaterial

Mit der vorliegenden Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die untersuchten anorganischen Stoffe trotz zum Teil recht hoher Gehalte im Bankettmaterial sehr gut gebunden werden. Im Eluat oder Sickerwasser sind nur leichtlösliche Bestandteile wie beispielsweise Chlorid zu finden. Die Geringfügigkeitsschwellen und die Z0/Z0*-Werte für die uneingeschränkte Verwertung von Bodenmaterial werden von den Eluatgehalten der meisten Proben nicht überschritten. Dies bestätigen außer den ausgewerteten Bankettanalysen auch umfangreiche Felduntersuchungen verschiedener Autoren unter realistischen Bedingungen an Straßen.

Ein Stoff, der nicht so gut zurückgehalten wird, ist Kupfer.

Tabelle 25 zeigt die Unterschreitung bzw. Überschreitung der Bezugswerte für Eluate durch die 90-Perzentile der Messwerte aller Proben. Über-

Parameter	Einheit	90-Perzentil Bakett Daten	90-Perzentil Bakett Daten DTV < 20.000	GFS LAWA	Prüfwert Sickerwasser BBodSchV	Z0/Z0*-Wert Eckpunktpapier Boden LAGA
pH-Wert	-	8,31	8,2			+
EI Leitfähigkeit	µS/cm	284	278			-
Chlorid	mg/L	19	20	+		+
Sulfat	mg/L	4,12	4,82	+		+
Arsen	µg/L	5,0	8,9	+	+	+
Blei	µg/L	20	20	-	+	+
Cadmium	µg/L	0,5	0,5	+	+	+
Chrom (gesamt)	µg/L	6,0	5,0		+	+
Kupfer	µg/L	48,3	38,4	-	+	-
Nickel	µg/L	10	10	+	+	+
Quecksilber	µg/L	0,15	0,15	+	+	+
Zink	µg/L	89	70	-	+	+
PAK EPA	µg/L	10 Säuleneluate:	0,14	+	+	

Tab. 25: Unterschreitung bzw. Überschreitung der Bezugswerte für Eluate durch die 90-Perzentile der Messwerte aller Proben und der Proben mit Verkehrsstärken unter 20.000 Kfz/24 h; für PAK liegen Säuleneluate von 10 Proben vor

schreitungen der Leitfähigkeitswerte werden hier nicht näher betrachtet, da sie vorwiegend durch den Tausalzeinsatz bedingt, zur Zeit unvermeidlich und nicht persistent sind. Alle 90-Perzentile der Schadstoffe halten die Prüfwerte der Bodenschutzverordnung ein. Das 90-Perzentil von Kupfer hält den Prüfwert der Bodenschutzverordnung ein, überschreitet aber die Geringfügigkeitsschwelle und den Z0/Z0*-Wert des Eckpunktepapiers der LAGA. Bei der ausschließlichen Betrachtung der Proben mit DTV < 20.000 verändern sich die 90-Perzentile, sie liegen bis auf Arsen tiefer. Die Zuordnung der Über- und Unterschreitungen verändert sich aber dadurch nicht.

Für organische Stoffe liegen nur zehn Eluatwerte für PAK aus den Säulenversuchen vor. Das 90-Perzentil davon unterschreitet sowohl den Prüfwert der Bodenschutzverordnung als auch die Geringfügigkeitsschwelle der LAWA.

Aufgrund der Konzentrationsverteilung in Bodenfeststoff und Eluaten, des Verhaltens bei den Säulenversuchen und der bekannten oder vermuteten Quellen können die untersuchten Schadstoffe und Parameter in Gruppen eingeteilt werden:

- A Feststoff bzw. Eluat oder beides unproblematisch: Quecksilber, Thallium, Chlorid, Sulfat, Cyanid, BTX, LHKW.
- B Geogen z. T. erhöhte Gehalte, kaum verkehrsabhängig, Eluat unproblematisch: Nickel, Chrom, Arsen.

C Verkehrsbedingt, Feststoff erhöhte Gehalte, Eluat unproblematisch: Blei, Zink, Cadmium.

D Vermutlich verkehrsbedingt, Feststoff erhöht, nur wenige oder keine Eluatwerte vorhanden, Rückhalt durch starke Bindung an Humusgehalte im Bankett: EPA-PAK, B(a)P, MKW, 6 PCB, EOX.

E Verkehrsbedingt, Feststoff erhöhte Gehalte, Eluat ebenfalls: Kupfer.

Als auffällig werden hier die Gruppen D und E betrachtet, also Kupfer, MKW, PCB und EOX, eingeschränkt auch PAK, da die Eluat-Datenbasis nicht sehr umfangreich ist. Für Kupfer überschreitet das 90-Perzentil die Z0/Z0*-Werte des Eckpunktepapiers. Für die organischen Stoffe liegen nur wenige bzw. keine Eluatwerte vor, sodass der Stoffrückhalt nur vermutet und nicht geprüft werden kann. Um eine bessere Einschätzung möglicher Quellen der organischen Stoffe zu geben, werden die Stoffgruppen jeweils kurz vorgestellt. Die Angaben sind überwiegend aus Bodenschutz- und Altlastenwebsites der Landesumweltämter entnommen. Die entsprechenden Links sind am Ende des Literaturverzeichnisses zusammengestellt.

4.2.1 Kupfer

HILLENBRAND et al. (2005) haben eine umfangreiche Zusammenstellung von Literaturwerten der Gehalte von Blei, Kupfer und Zink in Bremsbelägen, Reifen und Fahrbahnabrieb erarbeitet. Die

	Abrieb (t/a)	Kupfer (t/a)	Blei (t/a)	Zink (t/a)
Fahrbahn	1.737.120	4,3	7,1	149
Verlust und Korrosion von Auswuchtgewichten aus Blei	n. b.	n. b.	8,77	n. b.
Bremsbeläge	12.350	928	61,5	309
Reifen	111.420	n. b.	2,69	1.620
Summe Emission Fahrzeugverkehr	n. b.	932	80,1	2.078
Davon außerorts freigesetzt	n. b.	685	58,9	1.528
Einträge aus Kfz in den Boden (direkt/diffus weitverteilt)	n. b.	356/441	37,3/29,7	1.215/455
Eintrag aus Straßenausrüstung in Böden	n. b.	n. b.	n. b.	207

Tab. 26: Gesamtabrieb und Gesamtemissionsraten von Kupfer, Blei und Zink aus dem Straßenverkehr und Straßenausrüstung (Zusammenstellung nach HILLENBRAND et al. 2005)

Zinkabtragsrate der Oberfläche von Straßenausstattungsgegenständen wie Schutzplanken und Verkehrsschildern wurde geschätzt. Durch Kombination dieser Gehalte mit mittleren Abriebsraten haben sie fahrzeugspezifische Emissionsraten und Abriebsraten für verzinkte Oberflächen berechnet und Gesamtemissionsmengen der drei Metalle abgeschätzt. Daraus sind in Tabelle 26 die für Straßenverkehr und Straßenausrüstung spezifischen Werte zusammengestellt. Die Angabe zur Fahrbahnabriebsrate aus MUSCHACK (1989) mit 1 mm/a für Autobahnen und 0,8 mm/a für Bundesstraßen ist möglicherweise zu hoch. Beim Vergleich der Emissionsraten in Tabelle 26 zeigt sich jedoch, dass dies auf die Abschätzung der Gesamtemission keinen großen Einfluss hat.

Für Kupfer ist die Freisetzung aus diffusen Quellen gleich oder sogar höher als der Gesamtausstoß aus Großanlagen. So betrug nach einer Erhebung der EU (EU-Kommission 2006) in den Jahren 2001-2003 der jährliche Ausstoß an Kupfer durch den Straßenverkehr in der EU-25 insgesamt 260 Tonnen, beinahe das Doppelte der Menge, die einschlägigen Rechtsvorschriften unterliegende Großanlagen in der EU-25 im Jahr 2004 freigesetzt haben. Als Hauptursache für die Emission von Kupfer in die Atmosphäre sehen die Autoren den Kupferanteil in Pkw-Bremsen. Auch in der Landwirtschaft wird Kupfer in größeren Mengen eingesetzt, vor allem als Fungizid. Die Aufwandmenge in Deutschland beträgt nach Angabe von HILLENBRAND et al. etwa 320 t/a. Der größte Teil davon verbleibt direkt in den landwirtschaftlich genutzten Böden.

Im Widerspruch zu den EU-Angaben steht die Menge, die HILLENBRAND et al. (2005) für die Freisetzung von Kupfer aus Bremsabrieb mit 930 t

Kupfer pro Jahr allein in Deutschland ermittelt haben. Die Autoren erwarten, dass die Emissionen von Kupfer, die nach ihren Quellen überwiegend aus Bremsbelägen stammen, weiter ansteigen werden. Sie weisen darauf hin, dass für die hohen Kupfergehalte in Bremsbelägen keine technische Notwendigkeit bestehe, da im Ersatzteilmarkt auch kupferfreie Bremsbeläge erhältlich seien.

Die in Tabelle 26 abgeschätzten Daten weisen große Unsicherheiten auf. Beispielsweise ergaben sich bei der Ermittlung der fahrzeugspezifischen Emissionsfaktoren relativ breite Spannen, deren Standardabweichungen so groß sind wie die Mittelwerte. Das sollte bei der Bewertung berücksichtigt werden. Für die ebenfalls berechneten Einträge der drei Schwermetalle in Gewässer konnten HILLENBRAND et al. anhand von Daten aus Regenwasserkanälen und Kläranlagen eine Plausibilisierung vornehmen, die eine sehr gute Übereinstimmung erbrachte. Für die Einträge in Böden ist das nicht ohne weiteres möglich, da hier bisher keine vergleichbaren Daten vorliegen. Insofern ist die Stoffbilanzierung für Bankettmaterial in Tabelle 27 ein Beitrag zur Verbesserung der Informationslage.

Auf Basis der Datenauswertung von Bankettproben (Tabelle 27) und der Mengenverteilung von Bankettmaterial von klassifizierten Straßen wurde für Schwermetalle der Stoffbestand in Bankettmaterial berechnet (Tabelle 28). Bei Schwermetallen machen die Hintergrundwerte meist einen großen Anteil des Stoffbestandes aus. Dieser Anteil wurde berechnet und vom Gesamtstoffbestand subtrahiert. So kann die Zusatzbelastung fahrbahnnaher Standorte mit Schwermetallen durch den Straßenverkehr und Straßenausrüstung abgeschätzt werden.

	Blei	Zink	Cadmium	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Chrom gesamt
Stoffkonzentrationen	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
Median alle Daten	41	127	0,25	36,0	21,0	0,10	24,2
Median Autobahnen (BAB)	242	338	1,50	84,6	24,0	0,15	35,0
Median Bundesstraßen (BS)	38	119	0,25	31,2	11,7	0,05	14,9
Median Landesstraßen (LS)	26	87	0,25	27,3	24,0	0,09	24,2
Median Kreisstraßen (KS)	26	105	0,25	32,0	45,0	0,15	40,0
Hintergrundwerte	30	47	0,27	11,7	14,7	0,06	18,3

Tab. 27: Stoffkonzentrationen in Bankettmaterial und Hintergrundwerte II aus Tabelle 2 für die klassifizierten Straßentypen

	Bankett- material	Blei	Zink	Cadmium	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Chrom gesamt
	(Mio. t/a)	(t/a)	(t/a)	(t/a)	(t/a)	(t/a)	(t/a)	(t/a)
Stoffbestand in BSG								
Alle klassifizierten Straßen	2,31	95,4	293,4	0,578	83,2	48,5	0,231	55,9
BAB	0,12	29,0	40,6	0,180	10,2	2,9	0,018	4,20
BS	0,41	15,6	48,8	0,103	12,8	4,8	0,021	6,11
LS	0,87	22,4	75,7	0,218	23,8	20,9	0,078	21,1
KS	0,91	23,7	95,1	0,228	29,1	41,0	0,137	36,4
Stoffbestand ohne Hintergrundwerte (Zusatzbelastung)								
Alle klassifizierten Straßen		26,1	184,8	0	56,1	14,6	0,09	13,6
BAB		25,4	34,9	0,15	8,7	1,12	0,01	2,0
BS		3,3	29,5	0	8,0	0	0,00	0
LS		0	34,8	0	13,6	8,1	0,03	5,1
KS		0	52,3	0	18,5	27,6	0,08	19,7

Tab. 28: Stoffbestand von Schwermetallen in Bankettmaterial gesamt und abzüglich der Hintergrundwerte II aus Tabelle 2 für die klassifizierten Straßentypen

Die Zusammenstellung des in Bankettmaterial enthaltenen Stoffbestandes in Tabelle 28 kann unterschiedliche Verteilungen durch Strecken mit und ohne Schutzplanken oder auf Böden mit verschiedenen Eigenschaften nicht berücksichtigen. Auch ist die Wahl eines pauschalen Hintergrundwertes für alle Standorte eine starke Vereinfachung. Beispielsweise sind die hohen Zusatzbelastungen von Nickel und Chrom an Kreisstraßen sicher ein Effekt höherer Hintergrundwerte als der hier verwendeten. Dadurch können sich auch geringe negative Werte ergeben, diese wurden hier gleich null gesetzt.

Teilweise ist der Stoffbestand, der aus den Hintergrundwerten berechnet wird, größer als der aus der Zusatzbelastung. Dies zeigt zwar auch Schwächen bei der Wahl der Hintergrundwerte, macht aber auch deutlich, dass viele der Proben im Schwan-

kungsbereich der gesteinsabhängigen Hintergrundwerte liegen, obwohl die Hintergrundwerte in Tabelle 2 ohne Böden aus stark belasteten natürlichen Gesteinen zusammengestellt wurden. Die Entfernung von Bankettmaterial aus dem Straßenseitenraum würde diesen Bereich weniger von Schadstoffen entfrachten als es auf den ersten Blick bei Betrachtung der Gesamtschadstoffgehalte erscheint.

Böden haben eine Filter- und Pufferfunktion für viele Schadstoffe. Diese ist im Fall von Bankettmaterial ebenfalls nachgewiesen und langjährig wirksam, auch wenn durch vorangegangene Einträge schon erhöhte Konzentrationen vorliegen. Die einzige Ausnahme sind die hier festgestellten erhöhten Kupfergehalte im Eluat. Die löslichen Anteile des Schwermetalls Kupfer im Bankett sind deutlich größer als bisher bekannt war. Dies wurde sowohl

an Laboranalysen als auch bei Feldversuchen festgestellt. In größerer Tiefe treten noch erhöhte Konzentrationen auf. Aber auch auf den empfindlichsten Böden, kalkfreien Sandböden, ist ein Rückhalt vorhanden. Nach einer Sickerstrecke von einem Meter wird die Geringfügigkeitsschwelle für Kupfer an den vier untersuchten stark befahrenen Bundesstraßen und an zwei der vier untersuchten Autobahnstandorten eingehalten (KOCHER/WESSOLEK 2003).

Es sollte darüber nachgedacht werden, ob es eine wirksame und angemessene Vorsorgemaßnahme ist, Bankettmaterial von der Emissionsquelle zu entfernen, solange diese weiterbesteht. Das Material erfüllt im direkten Einflussbereich der straßenverkehrsbedingten Stoffeinträge sehr wirksam die Funktion, deponierbare Stäube und Inhaltsstoffe des Straßenabflusswassers zu binden und zurückzuhalten.

Es wäre dessen ungeachtet wünschenswert, die Kupferemissionen und damit die Einträge von Kupfer in den Straßenseitenraum stark zu reduzieren. Dadurch würde sich auch die hier nicht betrachtete Freisetzung von Kupfer in den luftgetragenen Transport verringern, die nach HILLENBRAND et al. einen großen Anteil der straßenverkehrsbedingten Kupferemissionen ausmacht und zur weit verteilten diffusen Belastung von Böden, Gewässern und Lebewesen beiträgt.

4.2.2 PAK, MKW

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) bilden eine Stoffgruppe von organischen Verbindungen, die aus mindestens zwei und mehreren miteinander verbundenen Benzolringen bestehen. PAK sind überwiegend chemisch neutral und unpolare. Sie sind nur sehr gering wasserlöslich. Mit zunehmender Anzahl Ringe bzw. mit zunehmender Molekülgröße sind PAK schwerer flüchtig und schwerer löslich in Wasser. PAK sind natürlicher Bestandteil von Kohle und Erdöl. Der bei der Verkokung von Steinkohle anfallende Teer enthält hohe Anteile an PAK. Daher ist seine Verwendung im Straßenbau und z. B. als Dachpappe in der BRD seit etwa 1970 verboten. Im Gegensatz dazu enthält das bei der schonenden Destillation von Erdöl entstehende Bitumen nur geringe Spuren an PAK.

PAK entstehen bei der Pyrolyse (unvollständige Verbrennung) von organischem Material (z. B. Kohle, Heizöl, Kraftstoff, Holz, Tabak) und sind deswegen weltweit nachzuweisen. Der überwiegende

Anteil der PAK stammt heute aus anthropogenen Prozessen, sie können aber auch natürlichen Ursprungs sein (Waldbrände).

Insgesamt weisen die PAK eine geringe Löslichkeit auf. Während Naphthalin noch mit ca. 30 mg/L relativ gut löslich ist, kann Benzo(a)pyren nur mit maximal 2 µg/L gelöst werden, d. h., mit zunehmender molarer Masse nimmt die Löslichkeit schnell ab. Gleichzeitig nimmt auch die Tendenz zur Sorption zu. Höhermolekulare PAK mit vier und mehr Ringen liegen in der Luft und im Boden überwiegend partikelgebunden vor (Chrysen, Pyren, Benzo(a)anthracen, Dibenz(a,h)anthracen, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(a)pyren, Benzo(g,h,i)perylen, Indeno(1,2,3-cd)pyren). Niedermolekulare PAK mit zwei und drei Ringen liegen in der Luft auch gasförmig vor, im Untergrund teilweise gelöst im Sicker- oder Grundwasser (Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Anthracen, Phenanthren, Fluoren). Generell gelten PAK bis 3 Ringe als gut abbaubar, danach nimmt die Abbaubarkeit wegen Abnahme der Bioverfügbarkeit stark ab. Dies führt dazu, dass im Lauf der Zeit eine relative Anreicherung höherkerniger PAK stattfinden kann.

Fast alle PAK, die aus mehr als vier Benzolringen bestehen, sind nachweislich karzinogen (krebserregend). Wegen ihrer Persistenz, ihrer Toxizität und ihrer ubiquitären Verbreitung haben PAK eine große Bedeutung als Schadstoffe in der Umwelt. Bereits in den 1980er Jahren hat die amerikanische Bundesumweltbehörde (USEPA) aus den mehrere hundert zählenden PAK-Einzelverbindungen 16 Substanzen in die Liste der „Priority Pollutants“ aufgenommen. Diese 16 „EPA-PAK“ werden seitdem hauptsächlich und stellvertretend für die ganze Stoffgruppe analysiert.

Benzo(a)Pyren (B(a)P) ist ein aus 5 Benzolringen bestehender polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoff (PAK) und stark kanzerogen. Er entsteht wie PAK allgemein beim Erhitzen von organischem Material unter Luftabschluss und bei unvollständiger Verbrennung.

Mineralölkohlenwasserstoffe (KW/MKW) sind Verarbeitungsprodukte von Rohölen, z. B. Ottokraftstoffe, Diesel, Heizöle, Motoröle oder Schweröle. Die MKW fassen daher eine Vielzahl von Substanzgruppen zusammen, die wiederum aus zahlreichen Einzelsubstanzen bestehen.

MKW werden bevorzugt unter aeroben Bedingungen biologisch abgebaut. Mit zunehmender Ketten-

länge oder Verzweigung weisen die Alkane eine abnehmende Wasserlöslichkeit und damit abnehmende Bioverfügbarkeit auf. Der Abbau der langkettigen n-Alkane nimmt deshalb mehr Zeit in Anspruch. Insgesamt führen die unterschiedlichen Abbaugeschwindigkeiten zu einer Fraktionierung der MKW in Boden oder Grundwasser. Die aerobe biologische Abbaubarkeit ist gut für Molekülgrößen von C4-C17, dagegen nur mäßig für längere Ketten und Iso- oder Cycloalkane.

Die chemische Analytik auf KW C10-C40 erfolgt gaschromatografisch. Die dabei gefundenen Molekülgrößen repräsentieren etwa die folgenden Stoffe: C5-C10: Ottokraftstoffe; C10-C21: Diesellokraftstoff, C9-C23: Heizöl EL; C10-C16: Kerosin; C17-C40: Schmieröle.

Dass PAK und MKW durch den Straßenverkehr emittiert werden, ist schon lange bekannt. Durch verbesserte Fahrzeugtechnik und Katalysatoren haben sich die Emissionen in den letzten Jahrzehnten deutlich verringert. Eine Stoffbilanzierung vergleichbar der der Schwermetalle ist nicht bekannt. Die Rückhaltung von MKW und PAK in Bankettböden konnte von mehreren Autoren nachgewiesen werden (KOCHER/WESSOLEK 2003, BOLLER et al. 2005). Für die organischen Schadstoffe PAK und MKW wurde wie für die Schwermetalle eine starke Bindung an die Bodensubstanz, vor allem an den Humusanteil des Oberbodens bzw. des Bankettmaterials, festgestellt. Im Unterschied zu Schwermetallen und anderen anorganischen Parametern liegen allerdings nur wenige Messwerte der eluierbaren Anteile vor. Hier lieferten die Säulenversuche wichtige neue Informationen für PAK. An neun von zehn beprobten Standorten an Autobahnen und stark befahrenen Bundesstraßen wurden die PAK-Geringfügigkeitsschwelle für Grundwasser und der Prüfwert der Bodenschutzverordnung für den Pfad Boden-Grundwasser schon im Eluat des Bankettmaterials eingehalten.

4.2.3 PCB, EOX

Polychlorierte Biphenyle (PCB): Die chemische Grundstruktur dieser Stoffgruppe ist das Biphenyl-Molekül. Die 209 Kongenere unterscheiden sich durch Anzahl und Stellung von Chloratomen. Analysiert werden 6 besonders umweltrelevante Kongenere.

Folgende Anwendungsbereiche lagen für offene Systeme vor: Weichmacher für Lacke, Harze und Kunststoffe; Imprägnier- und Flammschutzmittel für

Papier, Gewebe und Imprägnierfarben; Schmiermittel; Beschichtung von Transparent- und Durchschlagpapier; Zusatzstoff in Klebstoffen und Kittungen; Zusatz zu Insektiziden zur Verlängerung der Wirkdauer. Die Hauptanwendung PCB-haltiger Fugmassen im Betonfertigbau fand zwischen 1955 und 1975 statt. Das Verwendungsmaximum lag zwischen 1964 und 1972. Anwendungsbereiche in sog. geschlossenen Systemen (PCB sind durch ein Gehäuse gegenüber der Umwelt abgeschottet) sind: Isolier- und Kühlflüssigkeit für Transformatoren und Gleichrichter; Hydraulikflüssigkeit in Hubwerkzeugen (vor allem im Bergbau); Zusatzdielektrikum in Starkstromkondensatoren; Wärmeüberträgerflüssigkeit in Kühlsystemen und Radiatoren. Bis etwa 1981-83 enthielten nahezu alle Kleinkondensatoren als Elektroisierflüssigkeit PCB. Die Verwendung von PCB wurde 1978 auf sog. geschlossenen Systeme beschränkt. Die Produktion von PCB wurde in der BRD 1982 eingestellt. Die maßgebliche gesetzliche Regelung ist die PCB-Verbotsverordnung von 1989. Kontaminationen der Raumluft sind in der Mehrzahl auf PCB-haltige Fugmassen, PCB-haltige Anstriche oder Leckagen PCB-haltiger Kondensatoren zurückzuführen

PCB sind nur gering flüchtig. Die biologische Abbaubarkeit ist gering, die Verbindungen sind sehr stabil. PCB kommen natürlich nicht vor. Sie wirken immuntoxisch. Es findet eine Anreicherung in der Nahrungskette statt, da PCB lipophil u. gering abbaubar sind. Der Abbau im Boden ist extrem langsam, mit zunehmender Chlorierung nimmt die Abbaubarkeit ab. Die Wasserlöslichkeit ist sehr gering, dadurch weisen die PCB nur eine geringe Mobilität auf. Sie adsorbieren leicht an Huminsäure u. Eisenoxiden, auch dies verringert die Mobilität. Allerdings zeigen neuere Untersuchungen zur Mobilität widersprüchliche Ergebnisse, die vermutlich u. a. mit der Art der eingesetzten Stoffe und Modellsysteme zusammenhängen.

Extrahierbare Halogenierte Kohlenwasserstoffe (EOX) sind ein Summenparameter für schwerflüchtige organische Halogene, die mit einem unpolaren Lösungsmittel wie Hexan extrahierbar sind, PCB, Dioxine, Furane, Pestizide sind darin enthalten bzw. werden bei Extraktion und Analyse mit erfasst.

Für mehrere bisher nur wenig untersuchte organische Stoffgruppen wurden zum Teil deutlich erhöhte Gehalte im Bankettmaterial festgestellt. Das betrifft PCB und EOX. Diese Stoffgruppe ist als prioritäre Verunreinigung der Gruppe der „persistent organic pollutants“ (POPs) eingestuft, da die Be-

standteile in der Natur nicht oder kaum vorkommen, nur sehr wenig biologisch abbaubar sind, sich sehr gut in biologischen Geweben akkumulieren und sowohl chronische als auch akute hohe oder sehr hohe Toxizität aufweisen.

Bisher wurde das Auftreten dieser Stoffe in Banketten und Straßenrandböden noch nicht festgestellt oder systematisch untersucht. Es waren Einzelmesswerte in einigen Bundesländern aufgefallen, die aber für Ausreißer gehalten wurden. Die Quellen der hohen Gehalte sind nach Aussage der Bundesländer bisher nicht bekannt. Vermutet wurden bisher Verunreinigungen in Reifen und erhöhte Konzentrationen aus belastetem Bankettbaumaterial.

Dazu wurde neuere Literatur ausgewertet. Daten aus Seesedimenten, die den Zeitraum von 1848 bis 1999 umfassen, zeigen aktuell gegenüber den 1960er Jahren deutlich gesunkene Einträge an PCB und anderen schwerflüchtigen halogenierten Verbindungen (ZENNEGG et al. 2007). Das betrifft ebenso Untersuchungen an Sedimenten in Teichen und Seen, die direkt Abflusswasser stark befahrener Straßen erhalten, wie beispielsweise der Pücklerpfuhl in Berlin. Im Sediment dieser innerstädtischen Versickerungsanlage konnte durch tiefenzonierete Beprobung festgestellt werden, dass die PCB ein Zufuhrmaximum in den 60er Jahren hatten (PERNAK/LESCHBER 1992). Der straßenspezifische Parameter PAK zeigte hingegen keine Zufuhrabnahme in der jüngeren Vergangenheit (LAMBERT 2007). Die PCB-Gehalte der 80ziger Jahre in den Sedimenten der Versickerungsanlage Pücklerpfuhl, wo ausschließlich Straßenabfluss zufließt, zeigten mit dem innerstädtischen Plötzensee, in den kein Straßenabfluss eingeleitet wird, vergleichbare PCB-Gehalte. Hingegen konnte bei dem straßenspezifischen Schwermetall Zink am Plötzensee um den Faktor 10 geringere Gehalte festgestellt werden (LAMBERT 2007), sodass der Straßenverkehr als PCB-Quelle kaum in Frage kommt.

Die Konzentrationen von PCB im Greifensee nahmen zwischen 1930 und 1960 um mehr als eine Größenordnung von 0,0057 mg/kg auf 0,130 mg/kg zu (ZENNEGG et al. 2007). Nach diesem Maximum nahmen die Konzentrationen aufgrund des Produktionsstopps für PCB wieder ab, bis etwa Mitte der 1980er Jahre der Stand von 1930 erreicht war. Dieser hier beschriebene Konzentrationsbereich der 1980er Jahre entspricht fast genau dem Konzentrationsbereich zwischen dem Median- und Mittel-

wert der PCB-Gehalte in den Bankettproben (Tabelle 12), also einem verbreiteten Konzentrationsbereich ohne extreme Messwerte. Bei den hier ausgewerteten Bankettproben treten sehr viele Werte von PCB und EOX unter der Bestimmungsgrenze auf, kaum Werte im mittleren Konzentrationsbereich und etwa 10 bis 15 % der Werte in einem sehr hohen Konzentrationsbereich. Das deutet zusammen mit der oben dargestellten Zeitabhängigkeit der anderenorts festgestellten Immissionen nicht auf straßenverkehrsbezogene Quellen, sondern auf standortbezogene Quellen hin.

Hohe EOX-Gehalte können durch PCB, aber auch durch andere schwerflüchtige halogenierte Verbindungen, wie polychlorierte/fluorierte Dioxine (PCDD/F) oder halogenierte Pestzide, hervorgerufen werden. Die in den ausgewerteten Proben gemessenen EOX-Konzentrationen weisen auf weitere schwerflüchtige chlorierte Kontaminanten hin, da die Konzentrationen deutlich höher liegen als die der PCB.

PCDD/F weisen nach ZENNEGG et al. im Greifensee allerdings dasselbe zeitliche Verhalten wie PCB auf, sodass aktuell hohe Emissionen ebenfalls nicht zu erwarten sind. Andere Autoren stellen ebenfalls keine ubiquitären hohen Konzentrationen in dicht besiedelten Gebieten fest (ZHANG et al. 2007). Allerdings gibt es Hinweise, dass sich PCB schwermetallkatalysiert in Flugaschen von Verbrennungsprozessen bilden können. DYKE et al. (2007) stellten fest, dass in Dieselabgasen PCDD/F und PCB enthalten sein können und dass ein oxidierender Katalysator deren Konzentrationen um etwa $3/4$ vermindert.

Für PCB und EOX liegen keine direkt an Straßen durchgeführten Untersuchungen zur Mobilität vor. Es kann jedoch aus den chemisch-physikalischen Eigenschaften dieser Stoffe und den oben genannten Untersuchungen aus verwandten Umweltbereichen auf ihr Verhalten geschlossen werden. Eine Verlagerung dieser relativ schwerlöslichen und schwerflüchtigen Stoffe in tiefere Bankettbereiche oder das Grundwasser ist damit nahezu ausgeschlossen.

Aufgrund der Persistenz der Stoffgruppen PCB und EOX ist aber mit weiter ansteigenden Konzentrationen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten zu rechnen, wenn tatsächlich ein Eintrag durch den Straßenverkehr stattfinden sollte. Diese Frage konnte durch die Literatur- und Datenauswertung nicht abschließend geklärt werden.

Wenn so belastetes Material als Abfall entsorgt werden soll, muss mit höherem Kostenaufwand und je nach Bundesland ggf. einer Einstufung als gefährlicher Abfall gerechnet werden. Eine genauere Untersuchung einiger betroffener Standorte ist zu empfehlen, um die Ursache der Belastung feststellen zu können.

4.3 Empfehlungen zum Umgang mit Bankettmaterial

Die in Kapitel 3.3 zusammengefassten Studien belegen, dass schon die oberen 30 cm eines bewachsenen kalkhaltigen Banketts eine sehr hohe Reinigungsleistung erbringen, ebenso ein Bankett aus einer 1 m mächtigen Schicht aus kalkfreiem Sand mit bewachsenem humosem Oberboden. Die eingetragenen partikulären Stoffe tragen zum Erhalt der Sorptionsfähigkeit bei, sodass Unterschiede der Bodenart relativiert werden. Die breitflächige Verteilung des Straßenabflusses über das Bankett und die Versickerung in Bankett und Böschung durch den bewachsenen Oberboden stellten sich als das wirksamste Reinigungsverfahren heraus, auch nach jahrzehntelanger Standzeit der Bankette.

Diese Standardmethode zur Behandlung von Straßenablaufwasser ist in den meisten Ländern auch bei stark befahrenen Autobahnen gebräuchlich. Bankette und Böschungen dienen dabei nicht nur der Standfestigkeit des Straßenbauwerkes. Auch ihre Wirkung als hydraulischer Zwischenspeicher für Straßenabfluss und Filter- und Puffermedium für die eingetragenen Schadstoffe sollte mehr ins Bewusstsein rücken. Als Ergebnis des Rückhalts von Schwermetallen und organischen Schadstoffen stellen sich jedoch in der Literatur gut beschriebene Anreicherungen dieser Stoffe in den oberen Schichten von Bankett und straßennahen Böden ein. Im Bereich der obersten straßennahen Schichten kann es zu Überschreitungen der Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung kommen. Wenn solches Material aus dem Zuständigkeitsbereich der Straßenbauverwaltung entfernt wird, muss es nach dem Bundesbodenschutzgesetz untersucht und müssen Vorgaben für die zukünftige Verwendung beachtet werden.

Über die Entnahme von Bankettmaterial ist der Entzug größerer Schadstofffrachten aus dem „System Straße“ möglich. Es sollte allerdings bedacht werden, dass viele der Stoffe, die vom Straßenverkehr emittiert werden, auch relevante Hintergrundkon-

zentrationen haben, sodass ein großer Teil der dann entzogenen Frachten natürlichen Ursprungs oder weit verbreitet vorhanden ist.

Deshalb stellt sich die Frage, ob der Verbleib von Bankettmaterial im Einflussbereich der straßenverkehrsbedingten Schadstoffeinträge nicht eine wirkungsvollere Umweltschutzmaßnahme ist als die Entnahme und der Transport an einen anderen Ort. Dieses Material bindet trotz der Vorbelastung weiterhin Schadstoffe. Die Reichweite der deutlich erhöhten Schadstoffeinträge kann mit der des Spritzwassers gleichgesetzt werden und lässt sich mit etwa fünf bis maximal zehn Meter angeben.

In Frage kommt die Verwendung als Oberbodenmaterial im Einflussbereich der Straßenverkehrsimmissionen. Dafür gelten keine Anforderungen an den Gehalt organischer Substanz (TOC), aber die bisher gestellten Anforderungen an die Schadstoffgehalte im Feststoff sind schwer einzuhalten. Hier könnte eine DTV-Grenze festgelegt werden, unterhalb welcher die Verwendung ohne Anforderungen oder besondere Untersuchungen generell möglich ist. Dazu wird im Ausblick ein Vorschlag gemacht.

Außerhalb des Einflussbereiches der Schadstoffeinträge ist die Verwendung im Erdbau für technische Bauwerke möglich. Allerdings kann die Anforderung der LAGA M20 (2004) an die TOC-Gehalte für die Verwertung mineralischer Abfälle oft nicht eingehalten werden. Da es sich dabei aber um Humus handelt, also um einen natürlichen Bodenbestandteil, sollten hier Einschränkungen nur in bautechnischer Hinsicht gemacht werden. Zahlreiche Messwerte belegen, dass das Bankettmaterial trotz hoher Kohlenstoffgehalte niedrige Atmungs- bzw. Gasbildungsrate aufweist (Tabelle 14), sodass eine Verwertung auch unterhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht ohne negative Folgen möglich ist.

Mehr als 70 % der untersuchten Bankettproben an Bundes-, Landes- und Kreisstraßen sind nach den Zuordnungswerten der LAGA M20 (2004) für den offenen Einbau geeignet. Überschreitungen der Z0-Werte werden fast ausschließlich durch Feststoffgehalte verursacht, nicht durch Eluatgehalte. Durch eine einfache Aufbereitung in Form von Sieben zur Entfernung von Gras und Störstoffen können die bautechnischen Eigenschaften verbessert bzw. die TOC-Werte deutlich verringert werden (KUKOSCHKE et al. 2007).

Die hohen mobilen Gehalte von Kupfer erscheinen für den Verbleib bzw. Einsatz von Bankettmaterial im Straßenseitenraum auf den ersten Blick problematisch. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass dennoch über 90 % der Messwerte den derzeitigen Prüfwert der Bodenschutzverordnung für Bodensickerwasser von 50 µg/L einhalten. Bis zum Erreichen des Kapillarsaums im Boden, wo der Prüfwert nach dem Bodenschutzgesetz als Bewertungsgrundlage gilt, ist bei Straßenbauwerken wegen der vorgeschriebenen Bauweise noch eine Sickerstrecke von mindestens einem Meter zurückzulegen, meistens deutlich mehr. Die ausgewerteten Felduntersuchungen zeigen, dass in dieser Tiefe die Konzentrationen außer an Autobahnen auch auf kalkfreien Sandböden die Geringfügigkeitsschwelle einhalten. Angesichts der ständigen verkehrsbedingten Stoffeinträge könnte es zielführend sein, für die Bewertung mobiler Kupfergehalte in Bankettmaterial abweichende Werte festzulegen. Dasselbe gilt für Feststoffgehalte der straßenverkehrsbedingten Schadstoffe und den organischen Kohlenstoffgehalt.

Da an Straßenstandorten ein weitgehend vergleichbares Stoffspektrum zu finden ist, kann empfohlen werden, vor der Umlagerung von Bankettmaterial nur solche Standorte zu beproben, an denen eine deutliche Wahrscheinlichkeit besteht, die doppelten Vorsorgewerte für Ton (bzw. bei MKW C10-C40 die Z0*-Werte) zu überschreiten. Die Merkmale von Standorten, auf die das zutrifft, werden anhand der vorliegenden, ggf. erweiterten Datenauswertung abgegrenzt.

4.4 Zukünftig zu beachtende Stoffe

In Kürze sollen eine Prognose und Bewertung von Stoffen gegeben werden, die für den Boden- und Gewässerschutz an Straßen in Zukunft relevant werden können. Insbesondere die Verpflichtungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) zum Erhalt und zur Verbesserung der Gewässerqualität spielen hier eine Rolle. In den Entwurf zum Anhang X der WRRL (EU 2000) sind viele Stoffe aufgenommen worden, die bisher in Straßenabfluss und Bankettmaterial nicht untersucht wurden. Im Vergleich dazu sind bodenbezogene Regelungen auf EU-Ebene erst in einigen Jahren und mit wesentlich geringerem Detaillierungsgrad zu erwarten.

In Kläranlagen und Gewässern sind Benzothiazole aus Reifenabrieb nachweisbar (KRUMWIEDE

2001). Sie werden dort teilweise, aber nicht vollständig abgebaut und sind sowohl in Klärschlamm als auch im geklärten Wasser noch nachweisbar. Weitere Quellen sind bisher unklar. Benzothiazole werden vor allem als Vulkanisationsbeschleuniger in der Gummiindustrie verwendet, u. a. bei der Herstellung von Reifen (53 % des Jahresverbrauches, UBA 1996 in KRUMWIEDE). Die durchschnittliche Beschleunigermenge beträgt 0,38 Massen-%, und der Verbrauch in Deutschland bezogen auf die Leitchemie der Substanzgruppe Mercapto-Benzothiazol (MTB) 3.700 bis 4.900 t/a. Nach der Vulkanisation liegen die Benzothiazole in der Kautschukmatrix verteilt vor und sind mit Wasser teilweise aus den Produkten auslaugbar. KRUMWIEDE (2001) untersuchte auch die Sorption an Böden. Sie weist substanz- und bodenabhängige Unterschiede auf und ist deutlich abhängig vom Humusgehalt (Corg-Gehalt). Dieser war bei den 3 Testböden 0,12 bis 2,51 Masse-%. MTB sorbierte unerwartet stark und zum Teil irreversibel.

STACHEL et al. (2007) haben im Stadtgebiet von Hamburg eine orientierende Beprobung von Autobahnabflüssen auf die prioritären Stoffe des Anhangs X der WRRL durchgeführt. Die meisten der untersuchten Stoffe lagen unter oder im Bereich der Bestimmungsgrenzen. Einige weisen jedoch im Vergleich mit den vorgeschlagenen Umweltqualitätsnormen der WRRL (UQN, EU 2007) sehr hohe Konzentrationen auf. Der Vergleich mit den UQN kann hier nur dazu dienen, auf eventuell relevant werdende Stoffe oder Stoffgruppen aufmerksam zu machen, nicht dazu, die Abflüsse der Autobahnen damit zu bewerten. Die Umweltqualitätsnormen der WRRL sind für die Bewertung von Oberflächengewässern vorgesehen. Abflüsse von Straßen mit DTV > 2000 dürfen nach RAS Ew nicht ungereinigt in Gewässer eingeleitet werden, sondern sind breitflächig zu versickern oder anders zu behandeln. Die Stoffe, die sich bei der Untersuchung von STACHEL et al. (2007) als auffällig erwiesen, sind Benzo(g,h,i)perylen und andere PAK, 4-tert.-Octylphenol, 4-iso-Nonylphenol, Di(2-ethylhexyl)phtalat (DEHP) und 2,2'-Bis(4-hydroxyphenyl)propan (BPA).

DEHP ist der wichtigste Vertreter einer ganzen Stoffgruppe von Weichmachern, die in Kunststoffprodukten eingesetzt werden und aus diesen im Lauf der Lebensdauer wieder entweichen. BPA, 4-tert.-Octylphenol und 4-iso-Nonylphenol sind u. a. Stabilisatoren für Polycarbonate und andere Polymere und können wie auch viele Weichmacher hor-

monähnliche Wirkung haben. Da diese für Gewässerorganismen bedeutsam sind, sollte das Auftreten dieser Stoffe in Straßenabfluss unbedingt geprüft werden. Da sich die Messstellen im Stadtgebiet befanden, kann es sich auch um Hintergrundbelastungen handeln. Andererseits sind in Kfz große Mengen von Kunststoffen verarbeitet, die durch Abriebe oder Verdampfung solche Chemikalien freisetzen können. In Reifenkautschuk werden beispielsweise etwa 6 Massen-% Weichmacher zugegeben (UBA 2003).

Die Einhaltung von Anforderungen, die sich aus der vorgesehenen Einführung der Geringfügigkeitsschwellen der LAWA als Prüfwerte für Bodensickerwasser ergeben können, wird in der vorliegenden Untersuchung schon diskutiert und wird an der Begrenzung der technischen Bauwerke erreicht.

Die Relevanz „neuer“ ebenso wie „alter“ Stoffe ist vor allem unter dem Gesichtspunkt des Stoffrückhaltes im Bankett zu sehen. Die Einhaltung von Vorsorgewerten im direkt straßennahen Bereich kann ebenso wenig erwartet werden wie die Einhaltung von Sickerwasserprüfwerten oder Geringfügigkeitsschwellen im Oberboden. Dagegen sollte es erklärtes Ziel sein, einen effektiven Rückhalt von deponierbaren Stäuben und eingetragenen Schadstoffen in der belebten Bodenzone des Straßenbankettes auch weiterhin sicherzustellen. Ebenso sollte dieser Rückhalt anhand exemplarischer Untersuchungen nachgewiesen werden und in angemessenen Zeitabständen überprüft werden. Viele der bisher durchgeführten Untersuchungen solcher Art waren Worst-case-Studien auf sehr empfindlichen Standorten und an stark verkehrsbelasteten Straßen. Das muss bei der Bewertung ihrer Ergebnisse berücksichtigt werden

5 Fazit

5.1 Zusammenfassung

Es wurde eine Datenauswertung von Schadstoffgehalten in Bankettmaterial an 840 Proben mit 40 Parametern durchgeführt. Bei getrennter Betrachtung der Straßentypen zeigen sich Autobahnen als die am stärksten belasteten Straßen. Hier ist für Blei, Cadmium, Kupfer und Zink sowohl bei den Feststoffgehalten als auch bei den Eluatgehalten ein deutlicher Unterschied zu den deutlich weniger belasteten Bundes-, Landes- und Kreisstraßen zu sehen. Die Vorsorgewerte vieler Stoffe sind an Au-

tobahnen deutlich häufiger überschritten. Bei den anderen Schwermetallen tritt dieser Unterschied nicht in Erscheinung. Die Feststoffgehalte der organischen Schadstoffe PAK, MKW, PCB und EOX überschreiten häufig die Vorsorgewerte. An den Messwerten ist nur für PCB und EOX eine Abhängigkeit von der Verkehrsstärke zu erkennen, während Literaturdaten bei diesen Stoffen gegen eine Straßenverkehrsabhängigkeit sprechen.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass 95 % der Eluatkonzentrationen von Blei, Zink und Cadmium ebenso wie von Chlorid, Sulfat, Cyanid, Arsen, Nickel, Chrom und Quecksilber die Geringfügigkeitsschwellen und Prüfwerte für Sickerwasser unterschreiten. Bei Kupfer dagegen wird die Geringfügigkeitsschwelle auch bei niedrigen Verkehrsstärken oft überschritten, und bei den Autobahnen liegen mehr als 50 % der Messwerte oberhalb des Z0/Z0*-Wertes für die uneingeschränkte Verwertung von Bodenmaterial. Über 90 % der Kupfer-Eluatwerte unterschreiten aber den derzeit gültigen Prüfwert der Bodenschutzverordnung für Sickerwasser.

Auf Anregung des UBA wurden Säulenversuche mit feldfrischem Bankettmaterial durchgeführt. Es ist seitens des BMU vorgesehen, diese Methode zukünftig zur Bewertung der löslichen Schadstoffanteile in Böden und mineralischen Abfällen anzuwenden. Die Versuche zeigten eine sehr starke Bindung der PAK und Schwermetalle außer Kupfer an das Bankettmaterial. Die (sehr niedrigen) Geringfügigkeitsschwellen der LAWA werden von allen Stoffen außer Kupfer eingehalten. Kupfer dagegen weist sehr starke Überschreitungen der Geringfügigkeitsschwelle und des Prüfwertes auf.

Eine vergleichende Auswertung von Labor- und Felduntersuchungen zur Reinigungsleistung von Straßenbankettböden und Entwässerungseinrichtungen zeigte für MKW, PAK und alle Schwermetalle sehr guten Rückhalt der eingetragenen Konzentrationen und Frachten mit Wirkungsgraden von 70 bis 95 %. Kupfer erreichte in Sandböden nur einen Fracht-Wirkungsgrad von 50 %, die Konzentrationen im Sickerwasser überschritten jedoch nicht die Prüfwerte der Bodenschutzverordnung. Die partikulären Stoffe im Straßenabfluss tragen zum Erhalt der Schadstoffbindungsfähigkeit in den Banketten bei.

Anhand dieser Informationen wurden problematische Stoffe in Bankettmaterial identifiziert. Kriterien dazu sind, dass die Feststoffgehalte die Vorsorge-

werte der Bodenschutzverordnung oft und weit überschreiten und die Gehalte der Stoffe im Sickerwasser/Eluat erhöht oder nicht bekannt sind. Das sind Kupfer, polychlorierte Biphenyle (PCB) und extrahierbare halogenierte Kohlenwasserstoffe (EOX).

Die Recherche möglicher Ursachen ergab, dass der Abrieb von kupferhaltigen Bremsbelägen die Hauptquelle für hohe Kupfergehalte und wahrscheinlich auch für die hohen eluierbaren Anteile im Bankett ist. Er ist nach Angaben des UBA und der EU-Kommission auch eine Hauptquelle für Kupferemissionen insgesamt. Eine vergleichbar eindeutige Quelle konnte für die hohen PCB- und EOX-Konzentrationen mancher Bankettproben nicht gefunden werden.

Das belastete Material emittiert nicht, sondern bindet weiterhin Schadstoffe. Insofern steht einer weiteren Verwendung oder Verbleib im Bankett durch Umlagerung lediglich die umstrittene Einstufung als zu entsorgender Abfall entgegen, nicht jedoch die Funktionsfähigkeit in Bezug auf die Reinigungsleistung.

Quellen und Rückhaltevermögen des Banketts für PCB und EOX sollten geprüft werden. Die Emissionen von Kupfer aus dem Straßenverkehr sollten deutlich gesenkt werden.

5.2 Ausblick

Geeignete und allgemein akzeptierte Randbedingungen für einen ressourcenschonenden Umgang mit Bankettmaterial sind in einer Richtlinie zu erarbeiten. Bankettmaterial ist grundsätzlich geeignet, in ortsnahen Baumaßnahmen verwendet zu werden. Regelungen zum Einsatz in Erdbauwerken werden zurzeit erarbeitet (Bundes-Verwertungsverordnung, Richtlinie Bankettschälgut, Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau (TL BuB E)).

Ein Einsatz im Erdbau des Straßenbaus außerhalb des Einflussbereiches ständiger Schadstoffeinträge sollte nur bei Einhaltung der in der geplanten Bundesverwertungsverordnung und der TL BuB E vorgesehenen Schadstoffwerte erfolgen.

Da der Nahbereich neben Straßen ständigen Einträgen von Abrieben und Schadstoffen aus dem Straßenverkehr ausgesetzt ist, kommt ein Einsatz oder Verbleib dort jedoch in Frage, ohne dass eine Verschlechterung zu befürchten ist.

Unter diesen Aspekten wird derzeit diskutiert, für die Umlagerung und den Wiedereinbau von Bankettmaterial im Nahbereich der Straße einen höheren Bewertungshorizont zu wählen.

Die in der BBodSchV genannten Prüf- und Maßnahmenwerte dienen der Entscheidungsfindung bei Maßnahmen zur Gefahrenabwehr. Gleichwohl sind die Prüfwerte eine wichtige Beurteilungshilfe für die Frage, ob Anhaltspunkte für eine schädliche Bodenveränderung vorliegen (§ 3 Absatz 4 BBodSchV). Da bei Unterschreitung der Prüfwerte der Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung ausgeräumt ist (§ 4 Absatz 2 BBodSchV), können sie unter bestimmten Voraussetzungen als Obergrenze für eine hinnehmbare Belastung herangezogen werden. Zur Berücksichtigung eines nachhaltigen und umfassenden Bodenschutzes wurden in der BBodSchV Vorsorgewerte eingeführt. Da, wie gezeigt wurde, im Straßenseitenraum die Vorsorgewerte nicht durchgängig eingehalten werden können und da wegen der sich fortsetzenden Belastung und der guten Filter- und Pufferfunktion weniger strenge Bewertungsmaßstäbe begründbar sind, sollten sich diese Maßstäbe zwischen den Vorsorge- und den Prüfwerten bewegen.

Um Bankettmaterial im engeren Straßenraum weiterverwenden zu können, wäre es für die Stoffe/Parameter PAK, MKW, PCB und EOX im Feststoff, Kupfer im Eluat sowie den Humusanteil (Corg/TOC) wünschenswert, den doppelten Vorsorgewert oder den Z0*-Wert anzuwenden. Die hier ausgewerteten Untersuchungen ermöglichen anhand der doppelten Vorsorgewerte für Ton und bei MKW anhand des Z0*-Wertes für Bodenmaterial (für MKW C10 bis C40) die Abgrenzung von Standorttypen, an denen vor Bankettumlagerungen die Durchführung von Einzeluntersuchungen nicht notwendig ist.

Es können Grenzwerte der Verkehrsstärke ermittelt werden, unterhalb derer die o. g. Bewertung den Verbleib und die Verwendung des Bankettmaterials zulässt.

Anhand der hier ausgewerteten Daten würde sich dafür die Unterscheidung zwischen Autobahnen einerseits und Bundesstraßen, Landes- und Kreisstraßen andererseits oder eine DTV-Grenze von beispielsweise 20.000 Fahrzeugen pro Tag eignen. Unterhalb dieser Grenze halten die meisten Stoffe die Vorsorgewerte im Feststoff ein, und bis auf Kupfer treten keine erhöhten Eluatkonzentrationen auf. Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass trotz er-

höher Feststoffgehalte nicht die Gefahr des Entstehens einer schädlichen Bodenveränderung besteht.

Zwar deuten die Literaturangaben auf günstiges Bindungsverhalten der organischen Schadstoffe hin, trotzdem wird die Durchführung von weiteren Säulenversuchen mit Analytik der hier neu als hochkonzentriert festgestellten organischen Parameter (PCB, EOX) empfohlen. Wegen der geringen bisher vorhandenen Datenbasis sind dann auch PAK und MKW zu untersuchen, und für die EOX sollte eine differenziertere Bestimmung der Zusammensetzung durchgeführt werden.

Da bisherige Untersuchungen zu Schadstoffgehalten und Stoffmobilität im Bankett meist Worst-case-Situationen betrachtet haben und im hier ausgewerteten Datenbestand Straßen mit hohen Verkehrsstärken deutlich überrepräsentiert sind, ist die Datenauswertung von Bankettproben fortzuführen und vor allem um Straßen mit geringer Verkehrsbelastung zu ergänzen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht zur Frage der als auffällig identifizierten Stoffgruppe der Weichmacher und Stabilisatoren. Dazu sind Untersuchungen in Straßenabfluss, Bankettmaterial und im Säuleneluat von Bankettmaterial durchzuführen, da sie prioritäre Stoffe der EU-Wasserrahmenrichtlinie sind und aus Gewässern weitestmöglich fernzuhalten sind. Bewachsene Straßenbankette können dies vermutlich leisten, der Nachweis dafür existiert bisher nicht.

Es sollte eine deutliche Minderung der Emissionen von Kupfer aus dem Straßenverkehr stattfinden. Zur Verringerung der Löslichkeit von Kupfer in Straßenbanketten sollte eine praktikable Lösung gesucht und getestet werden.

6 Literatur

BALD, S., JAGER, J., CYPRA, Th., SCHÜLER, D., HARTARD, S., DETTE, B., HERMANN, A., BARTH, R. (2003): Entwicklung eines Entsorgungskonzeptes für Abfälle im Bereich von Straßen- und Autobahnmeistereien. Schlussbericht zum FE 03.334/2000/LGB des BMVBW, 273 S., TU Darmstadt, FG Straßenwesen und FG Abfalltechnik, Öko-Institut e. V. Darmstadt, Bereich Umweltrecht

BARBOSA, A. E., HVITVED-JACOBSEN, T. (1999): Highway runoff and potenzial for removal of heavy metals in an infiltration pond in Portugal. *The Science of the Total Environment* 235, 151-159, Elsevier Science

BASt/BMVBW (2001): Autobahnverzeichnis 2001. ca. 150 S., aufgestellt von der Bundesanstalt für Straßenwesen. Hrsg: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 2001

BBPW (2006): Schriftl. Mitteilung der Baustoff- und Bodenprüfstelle Wetzlar, 2006

BIELERT, U., HEINRICHS, H., BECKER, K.-W. (1999): Validierung von Boden-Eluatgehalten zur Prognose von Inhaltsstoffen des Boden-Sickerwassers für das untergesetzliche Regelwerk/BBodSchV. UBA-Texte 86/99, 55 s. + Anhang. UFORPLAN Forschungsbericht 297 73 00 8/02, Umweltbundesamt Berlin

BMBF (2001): www.fzk.de/fzk/idcplg?IdcService=FZK_NATIVE&dDocName=ID_052717; Zugriff 7/2007

BMU (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens vom 17. März 1998. Bundesgesetzblatt 1998 Teil I, s. 502

BMU (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 17. Juli 1999. Bundesgesetzblatt 1999 Teil I, s. 1554

BMU (9/1998): Begründung zur Bodenschutzverordnung. 88 S.

BOLLER, M., KAUFMANN, P., OCHSENBEIN, U., STEINER, M., LANGBEIN, S., SCHEIWILLER, E., BRACHER, M. (2005): Bankette bestehender Straßen. Forschungsauftrag VSS 2001/202 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen – und Verkehrsfachleute (VSS), 51 S.

DIEHL, D. (2001): Schwermetalleinträge in einen Straßenrandboden am Beispiel der Autobahn A7 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. 174 S., Forschungsbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen FE 05.107/1996/GGB

- DIN 19528 (Entwurf; Juli 2007): Elution von Feststoffen – Perkolations zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von organischen und anorganischen Stoffen für Materialien mit einer Korngröße bis 32 mm – Grundlegende Charakterisierung mit einem ausführlichen Säulenversuch und Übereinstimmungsuntersuchung mit einem Säulenschnelltest. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN
- DIN 19529 (Entwurf; Juli 2007): Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren mit einem Wasser-Feststoffverhältnis von 2 l/kg zur Untersuchung der Elution von anorganischen Stoffen für Materialien mit einer Korngröße bis 32 mm – Übereinstimmungsuntersuchung. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN
- DIN 38414-S4 (10/1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4), Beuth Verlag
- DIW (2006): Verkehr in Zahlen 2006/2007. 340 S. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Hrsg. BMVBS Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg
- DYKE, P. H., SUTTON, M., WOOD, D., MARS-HALL, J. (2007): Investigations on the effect of chlorine in lubricating oil and the presence of a diesel oxidation catalyst on PCDD/F releases from an internal combustion engine. *Chemosphere*, Volume 67, Issue 7, April 2007, pages 1275-1286
- EU-Kommission (2006): Kommission veröffentlicht erstes Verzeichnis der Umweltverschmutzung durch kleine oder nichtindustrielle Verursacher, IP/06/1204 vom 18. September 2006, Brüssel
- EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (ABl. L 327 vom 22.12.2000, S. 1)
- EU (2007): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG 12000/60/EC, document 5408/1/07 REV 1, 21.02.07
- FGSV (2000a): Begriffsbestimmungen – Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb (Ausgabe 2000). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- FGSV (2002b): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten (RiStWag) – Ausgabe 2002. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- FGSV (2005): Richtlinien für die Anlage von Straßen – RAS – Teil: Entwässerung (Ras-Ew). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- GOLWER, A. (1973): Beeinflussung des Grundwassers durch Straßen. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, Band 124, 435-446
- GOLWER, A. (1991): Belastung von Böden und Grundwasser durch Verkehrswege. *Forum Städte-Hygiene* 42 (8/9), 266-275
- GOLWER, A. (1999). Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit durch Straßenverkehr in Wasserschutzgebieten. *Geol. Jb. Hessen* 127. 131-146
- GRANATO, G. E., CHURCH, P. E., STONE, V. J. (1995). Mobilization of major and trace constituents of highway runoff in groundwater potentially caused by deicing chemical migration. *Transp. Res. Rec.* 1 483, 92-103
- GROTEHUSMANN, D., KASTING, U., KUNZE, M. (2006): Optimierung von Absetzbecken. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* 944, 120 S.
- 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
- 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

- HILLMANN, R. (2005): Umsetzung des Boden- und Grundwasserschutzes im Straßenbau. Straße + Autobahn 6/2005, 333-339
- HILLMANN, R. (2007): Umweltverträgliche Verwendung von RC-Baustoffen. Straße + Autobahn 6/2007, 307-314
- HÖLTING, B. (1991): Geogene Grundwasserbeschaffenheiten und ihre regionale Verbreitung in der Bundesrepublik Deutschland. Handbuch Bodenschutz, ergänzbare Loseblattsammlung, Nr. 1300/1991, 27 S., Erich-Schmidt-Verlag
- KIM, L.-H., KO, S.-O., JEONG, S., YOON, J. (2006): Characteristics of washed-off pollutants and dynamic EMCs in parking lots and bridges during a storm. Science of the Total Environment 376 (2007), 178-184, Elsevier
- KASTING, U., GROTEHUSMANN, D. (2007): Bodenfilteranlagen zur Behandlung von Straßenabflüssen – Halbtechnische Bodenfilterversuche, Teil 2: Versuche zur Salzbelastbarkeit. KA – Abwasser, Abfall 54/8, 789-797
- KOCHER, B. (2004): Vergleich von Rechenmodellen zur Beschreibung der Schwermetallverlagerung in Straßenrandböden. Unveröffentlichter Forschungsbericht der BAST (AP 01653)
- KOCHER, B. (2006): Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2005/2006. Forschungsbericht der BAST (AP 03636), Veröffentlichung in Vorbereitung
- 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
- KOCHER, B., TÄUMER, K., WESSOLEK, G. (2002): Schadstofftransport in straßennahen Böden. Straße und Autobahn 53 (2002) 6, 297-302
- KOCHER, B., WESSOLEK, G. (2003): Verlagerung straßenverkehrsbedingter Stoffe mit dem Sickerwasser. 99 S., Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 864, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Bonn
- KOCHER, B., WIRTZ, H. (2004): Untersuchung zur Abfallentsorgung an Bundesfernstraßen, Teil Bankettschälgut. Unveröffentlichter Forschungsbericht der BAST, 47 S., Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- KRUMWIEDE, D. (2001): Umwelteintrag von Benzothiazolen aus dem Reifenabrieb über Kanalisation und Kläranlage und vergleichende Untersuchungen zu umweltrelevanten Eigenschaften von Benzothiazolen, Benzoimidazolen und Benzoxazolen. Dissertation an der Universität Bremen, Fachbereich Biologie/Chemie, 155 S., Dissertation.de – Verlag im Internet – www.dissertation.de, Berlin
- KUKOSCHKE, K. G., KOCHER, B., DAHMEN, G., BURMEIER, H. (2007): Verwertung und Entsorgung von Bankettschälgut. Altlasten-Spektrum, 11 S., im Druck
- KUKOSCHKE, K.-G. (1998): Strategien zur Verwertung von Bankettschälgut. Straße und Autobahn 4/98, 200-205
- LABO Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2004): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. In: ROSENKRANZ et al. (Hrsg.), Bodenschutz: Ergänzbares Handbuch, 40. Lfg. III/04, Kapitel 9006, 50 s. + Anhang, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- LAGA (2004a): LAGA- Mitteilung 20, Teil II – Technische Regeln für die Verwertung, Teil II – Bodenmaterial und sonstige mineralische Bau- und Abbruchabfälle, Stand: 31.08.2004, 19 S., Ländrarbeitsgemeinschaft Abfall, November 2004
- LAGA (2004b): Eckpunkte (EP) der LAGA für eine „Verordnung über die Verwertung von Bodenmaterial in bodenähnlichen Anwendungen“, Stand: 31.08.2004
- LAGA (2004c): Eckpunkte (EP) der LAGA für eine „Verordnung über die Verwertung von mineralischen Abfällen“, Stand: 31.08.2004
- LAGERWERFF, J. V., SPECHT, A. W. (1970). Contamination of roadside soil and vegetation with cadmium, nickel, lead, and zinc. Environ. Sci. Technol. 4: 583-586
- LAMBERT, B. (2007): Freundl. schriftl. Mitteilung, unveröffentliche Messdaten. Sinsheim-Steinsfurt
- LANGE, G. (1996): Versickerung von Regenwasser im Straßenraum. Straße und Autobahn 7/1996, 379-382

- LANGE, G., GROTEHUSMANN, D., KASTING, U., SCHÜTTE, M., DIETERICH, M., SONDERMANN, W. (2001): Wirksamkeit von Entwässerungsbecken im Bereich von Bundesfernstraßen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* 861. Bundesverkehrsministerium, Bonn. 170 S.
- LAWA (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser. 33 s. + Anhang. „Unterausschuss „Geringfügigkeitsschwellen“ des ständigen Ausschusses Grundwasser und Wasserversorgung der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser“, Kulturbuch-Verlag, Berlin
- 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 run-off 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
- MIKKELSEN, P. S., HÄFLIGER, M., OCHS, M., TJELL, J. C., JACOBSON, P., BOLLER, M. (1996): Experimental Assessment of Soil and Groundwater Contamination from Two Old Infiltration Systems for Road Run-off in Switzerland. *Sci. Total Environ* 189/190, 341-347
- MURAKAMI, M., NAKAJIMA, F., FURUMAI, H., TOMIYASU, B., OWARI, M. (2006): Identification of particles containing chromium and lead in road dust and soak-away sediment by electron probe microanalyser. *Chemosphere* 67, 2000-2010, Elsevier
- MUSCHACK, W. (1989): Straßenoberflächenwasser – eine diffuse Quelle der Gewässerbelastung. *Vom Wasser* 72, 267-282
- MUSCHACK, W. (1990): Pollution of Street Run-off by Traffic and Local Conditions. *The Science of the Total Environment* 93, 419-431, Elsevier, Amsterdam
- NADLER, A., MEIßNER, E. (2004): Entwicklungsvorhaben: Versickerung des Niederschlagswassers von befestigten Verkehrsflächen – Oktober 2000 bis Oktober 2003-3. Zwischenbericht. 88 siehe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München
- NOLTE, C., GUNKEL, G., JEKEL, M. (1996): Verhalten von polychlorierten Biphenylen (PCB) in Wasserkörper und Sediment des Plötzensees (Berlin). *Vom Wasser* 86, 127-139
- PERNAK, D., LESCHBER, R. (1992): Tiefenverteilung persistenter Schadstoffe im Sediment einer Regenwasserversickerungsanlage. *Vom Wasser* 79, 323-331
- 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-
- SPEERSCHNEIDER, R. (1992): Wasser- und Chlordinamik in Straßenrandböden: Einfluss von Gefüge und Versiegelung. Diss. Univ. Hannover, 104 S., Grauer, Wendlingen 1992
- STACHEL, B., TEGGE, K. T., JANTZEN, E. (2007): Schadstoffe in Hamburger Autobahnabwässern und ihre Einschätzung unter Berücksichtigung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL). *Straße und Autobahn 6.2007*, 326-333, Kirschbaum-Verlag
- UBA (2003): OECD Emission Scenario Document – Additives in the Rubber Industry IC 11 (polymer industry). Exposure Assessment of the environmental Releases of Chemicals in the Rubber Industry. Final Draft, 27 S., Umweltbundesamt Berlin, 2003
- VELSKE, S., MENTLEIN, H., EYMANN, P. (2002): *Straßenbautechnik*. 5. Auflage 2002, 295 S., Werner-Ingenieur-Texte, Werner Verlag Düsseldorf
- Verschiedene Autoren (1995-2006): Unveröffentlichte Analysedaten von Bankettproben der Bundesländer
- WHEELER, G. L., ROLFE, G. L. (1979): The relationship between daily traffic volume and the distribution of lead in roadside soil and

vegetation. Environmental Pollution. 18: 265-274

WINGTON, P. J., CLIFFORD, W. R., GRIZZARD, T. J. (1986): Accumulation of selected trace metals in soils of urban run-off swale drains. Water Resources Bulletin. 22: 73-79

WIRTZ, H., SIEBERTZ, I., HABERMANN, M. (2003): Untersuchung zur Abfallentsorgung an Bundesfernstraßen, Teil 3. Bericht zum Arbeitsprogramm der BAST, AP- Nr. 02 650, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

XANTHOPOULOS, C. (1990): Niederschlagsbedingter Schmutzstoffeintrag in Kanalsystemen – Erneute Bilanzierung aufgrund weitergehender Erfassung von Ereignissen. BMFT-Verbundprojekt: Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Band 58, 115-145, Universität Karlsruhe

ZENNEGG, M., KOHLER, M., HARTMANN, P. C., STURM, M., GUJER, E., SCHMID, P., GERECKE, A. C., HEEB, N. V., KOHLER, H. P., GIGER, W. (2007): The historical record of PCB and PCDD/F deposition at Greifensee, a lake of the Swiss plateau, between 1848 and 1999. Chemosphere 67, 1754-1761, Elsevier

ZHANG, H. B., LUO, Y. M., WONG, M. H., ZHAO, Q. G., ZHANG, G. L. (2007): Concentrations and possible sources of polychlorinated biphenyls in the soils of Hong Kong. Geoderma 138 (3-4), 244-251

Angaben zu PAK, MKW, PCB und LHKW:

http://www.umwelt.sachsen.de/lfug/salfaweb/salfaweb-nt/berichte/mza1_00/mza1_00-5.3.2.html 20.08.07

http://de.wikipedia.org/wiki/Polyzyklische_Aromatische_Kohlenwasserstoffe; 20.08.07

<http://www.agoef.de/agoef/schadstoffe/pcb.html>

http://www.umwelt.sachsen.de/lfug/salfaweb/salfaweb-nt/berichte/mza1_00/mza1_00-5.2.html 20.08.07

<http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb05/tbb050037.html> 20.08.07

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2003

- V 100: Verkehrsqualität unterschiedlicher Verkehrsteilnehmerarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage
Brilon, Miltner € 17,00
- V 101: Straßenverkehrszählung 2000 – Ergebnisse
Lensing € 13,50
- V 102: Vernetzung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen
Kniß € 12,50
- V 103: Bemessung von Radverkehrsanlagen unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten
Falkenberg, Blase, Bonfranchi, Cossè, Draeger, Kautzsch, Stapf, Zimmermann € 11,00
- V 104: Standortentwicklung an Verkehrsknotenpunkten – Randbedingungen und Wirkungen
Beckmann, Wulfhorst, Eckers, Klönne, Wehmeier, Baier, Peter, Warnecke € 17,00
- V 105: Sicherheitsaudits für Straßen international
Brühning, Löhe € 12,00
- V 106: Eignung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen gemäß den Anforderungen nach DIN EN 1317
Ellmers, Balzer-Hebborn, Fleisch, Friedrich, Keppler, Lukas, Schulte, Seliger € 15,50
- V 107: Auswirkungen von Standstreifenumnutzungen auf den Straßenbetriebsdienst
Moritz, Wirtz € 12,50
- V 108: Verkehrsqualität auf Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen
Baier, Kathmann, Baier, Schäfer € 14,00
- V 109: Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf auf b2+1-Strecken mit allgemeinem Verkehr
Weber, Löhe € 13,00

2004

- V 110: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2001 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Laffont, Nierhoff, Schmidt, Kathmann € 22,00
- V 113: Car-Sharing in kleinen und mittleren Gemeinden
Schweig, Keuchel, Kleine-Wiskott, Hermes, van Acken € 15,00
- V 114: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Car-Sharing
Loose, Mohr, Nobis, Holm, Bake € 20,00
- V 115: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2002 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Kathmann, Laffont, Nierhoff € 24,50
- V 116: Standardisierung der Schnittstellen von Lichtsignalanlagen – Zentralrechner/Knotenpunktgerät und Zentralrechner/Ingenieurarbeitsplatz
Kroen, Klod, Sorgenfrei € 15,00
- V 117: Standorte für Grünbrücken – Ermittlung konfliktreicher Streckenabschnitte gegenüber großräumigen Wanderungen jagdbarer Säugetiere
Surkus, Tegethof € 13,50

- V 118: Einsatz neuer Methoden zur Sicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer
Steinauer, Maier, Kemper, Baur, Meyer € 14,50

2005

- V 111: Autobahnverzeichnis 2004
Kühnen € 21,50
- V 119: Alternative Methoden zur Überwachung der Parkdauer sowie zur Zahlung der Parkgebühren
Boltze, Schäfer, Wohlfarth € 17,00
- V 120: Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung
Hautzinger, Stock, Mayer, Schmidt, Heidemann € 17,50
- V 121: Fahrleistungserhebung 2002 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko
Hautzinger, Stock, Schmidt € 12,50
- V 122: Untersuchungen zu Fremdstoffbelastungen im Straßenseitenraum
Beer, Herpetz, Moritz, Peters, Saltzmann-Koschke, Tegethof, Wirtz € 18,50
- V 123: Straßenverkehrszählung 2000: Methodik
Lensing € 15,50
- V 124: Verbesserung der Radverkehrsführung an Knoten
Angenendt, Blase, Klöckner, Bonfranchi-Simović € 15,50
- V 125: PM₁₀-Emissionen an Außererststraßen – mit Zusatzuntersuchung zum Vergleich der PM₁₀-Konzentrationen aus Messungen an der A1 Hamburg und Ausbreitungsberechnungen
Düring, Böisinger, Lohmeyer € 17,00
- V 126: Anwendung von Sicherheitsaudits an Stadtstraßen
Baier, Heidemann, Klemps, Schäfer, Schuckließ € 16,50
- V 127: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2003
Fitschen, Koßmann € 24,50
- V 128: Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Sicherheitsüberprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation
Boltze, Reusswig € 17,00
- V 129: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst
Badelt, Breitenstein € 13,50
- V 130: Fortschreibung der Emissionsdatenmatrix des MLuS 02
Steven € 12,00
- V 131: Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken
Friedrich, Dammann, Irzik € 14,50
- V 132: Vernetzung dynamischer Verkehrsbeeinflussungssysteme
Boltze, Breser € 15,50

2006

- 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_x-Belastungen an BAB**
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 138: **Kontinuierliche Stickoxid (NO_x)- und Ozon (O₃)-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, Klemps, Peter-Dosch € 15,50
- V 146: **Prüfung von Sensoren für Glättemeldealagen**
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
- 2007**
- V 151: **Städtischer Liefer- und Ladeverkehr – Analyse der kommunalen Praktiken zur Entwicklung eines Instrumentariums für die StVO**
Böhl, Mause, 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**
Klöckner, Fleisch, Balzer-Hebborn € 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**
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 in Vorbereitung
- V 164: **Straßenverkehrszählung 2005 – Ergebnisse**
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,00
- 2008**
- V 165: **Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM₁₀-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: **Schadstoffgehalte von Bankettmaterial – Bundesweite Datenauswertung**
Kocher, Brose € 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
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.