

# Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten

FA 5.160

Forschungsstelle: Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie, FG Standortkunde und Bodenschutz (Prof. Dr. G. Wessolek)  
 Bearbeiter: Werkethin, M. / Kluge, B.  
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn  
 Abschluss: Dezember 2014

## 1 Aufgabenstellung

Die Entwässerung von Außerortsstraßen erfolgt in Deutschland häufig über das angrenzende Bankett. In der Regel weist Straßenabflusswasser im Vergleich zu Niederschlagswasser erhöhte Konzentrationen an Schadstoffen auf (Golwer, 1991; Kayhanian et al., 2012). Durch die Entwässerung über das Bankett kommt es, neben dem luftgetragenen Transport, zu einem Schadstoffeintrag in den Straßenrandbereich.

In straßennahen Böden können erhöhte Schwermetallkonzentrationen auftreten, wie Untersuchungen von Dierkes und Geiger (1999), Kocher und Wessolek (2003) und Kluge und Wessolek (2012) zeigen. Diese überschreiten häufig die Vorsorgewerte der Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999). Die Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser dagegen liegen, trotz teilweise langjährigem Bestehen von Straßen und Banketten (bis zu 100 Jahre), häufig unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV (Kocher und Wessolek, 2003). Die bestehenden Straßenbankette verfügen demnach über ein gutes Schwermetallrückhaltevermögen.

Neu angelegte Bankette müssen gemäß den "Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau" (ZTV E-StB 09) über eine definierte Tragfähigkeit verfügen, die das Befahren im Notfall ermöglicht. Gemäß den ZTV E-StB 09 sind für die Herstellung standfester Bankette die folgenden Böden und Baustoffe beziehungsweise Baustoffgemische mit einem Größtkorn von 32 mm geeignet:

- (1) Gemischtkörnige Böden der Bodengruppen GU, GT;
- (2) Gemische aus gebrochenen Gesteinskörnungen, RC-Baustoffe und industriell hergestellte Gesteinskörnungen, sofern sie den vorgenannten Bodengruppen entsprechen;
- (3) Schotterrasen mit einem Oberbodenanteil von 15 M.-%.

Wie effektiv Schwermetalle aus dem Straßenabflusswasser von Banketten zurückgehalten werden, die gemäß ZTV E-StB 09 konstruiert wurden, ist bislang nicht geklärt. Da sich das verwendete Material deutlich von dem unterscheidet, was in der Vergangenheit zur Bankettkonstruktion eingesetzt wurde, ist davon auszugehen, dass sich auch das Schwermetallrückhaltevermögen des Banketts verändert. Darüber hinaus werden die Geringfügigkeitsschwellenwerte gemäß den Vorgaben der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 2004) möglicherweise in nationales Recht umgesetzt, was eine Absenkung der bisher geltenden Grenzwerte zur Folge hätte.

Das Ziel der Arbeit war es daher, das Schwermetallrückhaltevermögen von standfesten und nicht standfesten Banketten zu untersuchen und zu vergleichen. Dabei sollte auch geklärt werden, ob es bei einer Versickerung von Straßenabflusswasser über standfeste Bankette zu einer Überschreitung der Prüfwerte der BBodSchV kommt.

## 2 Laboruntersuchungen – Säulenversuch

Im Labormaßstab wurde untersucht, wie effektiv die im Straßenabfluss befindlichen Schwermetalle von unterschiedlichen, im Bankettbau eingesetzten Materialien zurückgehalten werden. Es wurden sieben verschiedene zu untersuchende Bankettaufbauten festgelegt (Tabelle 1). In Tabelle 2 sind die im Säulenversuch eingesetzten Baustoffe/Materialien der Bankettaufbauten genauer definiert.

Die Beregnung erfolgte mit künstlich hergestelltem Straßenabfluss. Die Eluate der einzelnen Beregnungsdurchgänge wurden separat erfasst (jeweils vor dem Start des nächsten Beregnungsdurchgangs) und analysiert. Der Säulenversuch lief über einen Zeitraum von 16 Wochen, es wurden insgesamt 32 Beregnungsdurchgänge durchgeführt. Zur Abtrennung partikulärer und kolloidaler Stoffe aus dem Eluat wurde ein Teil der aufgefundenen Probe ultrazentrifugiert und die überstehende Lösung dekantiert.

Sowohl die zentrifugierten als auch die nicht zentrifugierten Lösungen wurden auf Schwermetalle untersucht. Die Analyse der wässrigen Lösung auf die Schwermetalle Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zn erfolgte mittels ICP-OES. Nach Beendigung des Beregnungsversuchs wurden die Säulen I, IV und VI (mit den Substraten OB, OB15 und BS) schichtweise beprobt. Die Proben wurden aus den Schichttiefen 0-2 cm, 4-6 cm und 8-10 cm entnommen und anschließend aufgeschlossen und analysiert.

Tabelle 1: Bankettaufbauten im Säulenversuch

Bankettaufbau	Baustoff	Verdichtungsgrad D <sub>Pr</sub> [%]	Dicke [cm]
Variante I (gem. ZTV E-StB 09)	Oberboden Boden GU oder GT	andrücken 100	5 15
Variante II (gem. ZTV E-StB 09)	Oberboden Baustoffgemisch aus RC-Beton	andrücken 100	5 15
Variante III (gem. ZTV E-StB 09)	Schotterrasen (mit 15 % OB)	100	20
Variante IV	Schotterrasen (mit 20 % OB)	100	20
Variante V (gem. Entwurf RAS-Ew 2005)	Oberboden	andrücken	20
Variante VI	Baustoffgemisch aus nat. Gesteinskörnung	100	20
Variante VII	Baustoffgemisch aus RC-Beton	100	20

Tabelle 2: Eigenschaften der Materialien/Baustoffe für den Säulenversuch

Baustoff		Regelwerk
1	<b>Oberboden (OB)</b> Sl <sub>2</sub> , C <sub>org</sub> < 4 %, GV < 8 %	---
2	<b>Boden GU oder GT (GU/GT)</b> Gemischtkörniger Boden der Boden- gruppen GU oder GT, Anteil < 0,063 mm zwischen 5 und 15 M.-%	DIN 18196
3	<b>Baustoffgemisch aus nat. Gesteins- körnung (BS)</b> Baustoffgemisch für Schottertrag- schichten (0/32) aus natürlicher Ge- steinskörnung, Anteil < 0,063 mm ≤ 5 M.-%	TL SoB-StB TL Gestein-StB
4	<b>Baustoffgemisch aus RC-Beton (RC)</b> Baustoffgemisch für Schottertrag- schichten aus RC-Beton, Anteil < 0,063 mm ≤ 5 M.-%	TL SoB-StB TL Gestein-StB
5	<b>Schotterrasen mit 15 % OB (OB15)</b> Baustoffgemisch für Schottertrag- schichten (0/32) aus natürlicher Ge- steinskörnung mit 15 M.-% des o. g. Oberbodens	ZTV E-StB, STLK LB 112
6	<b>Schotterrasen mit 20 % OB (OB20)</b> Baustoffgemisch für Schottertrag- schichten (0/32) aus natürlicher Ge- steinskörnung mit 20 M.-% des o. g. Oberbodens	---

### 2.1 Untersuchungsergebnisse

Die Schwermetalle, die mit dem künstlichen Straßenabfluss auf die Säulen gegeben wurden, sind von allen Substraten ausreichend zurückgehalten worden. Im Eluat der Varianten II, III und VII (OB+RC, OB15 und RC) wurden zwar einzelne Prüfwerte der BBodSchV überschritten, dies wurde jedoch vermutlich durch Schwermetall-desorption von der Festphase (Variante II (OB+RC), VII (RC) und Variante III (OB15)) verursacht. Nach anfänglichen Überschreitungen der Prüfwerte gingen die Konzentrationen im weiteren Untersuchungszeitraum stark zurück.

Nach dem Austausch von sechs Porenvolumina lagen die Konzentrationen im Sickerwasser aller Varianten unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV. Ein eindeutiger Anstieg der Sickerwasserkonzentration konnte nur bei Variante VI (BS) für Cu und Zn festgestellt werden. Dies liegt vermutlich an dem geringen Feinbodenanteil und niedrigem C<sub>org</sub>-Gehalt des Materials. Darüber hinaus wurden bei dieser Variante die meisten Porenvolumina ausgetauscht, was vermutlich zu einer nachlassenden Sorptionsfähigkeit des Substrats geführt hat. Ein partikulärer Schwermetalltransport fand bei keiner der Varianten statt. Die Festphasenkonzentrationen sind zum Teil deutlich angestiegen. Dies hatte jedoch keinerlei Auswirkungen auf die Lösungskonzentrationen im Sickerwasser.

Aufgrund der Ergebnisse des Säulenversuchs wurde festgelegt, die Varianten III, V und VI (OB15, OB und BS) in einem Feldversuch genauer zu untersuchen.

### 3 Feldversuch – Lysimeterstation

Es wurde eine Lysimeterstation zur Bestimmung der Schwermetallretention aus dem Straßenabfluss in standfesten Banketten errichtet. Die Anlage befindet sich an der BAB A 115 zwischen den Ausfahrten Potsdam-Babelsberg und Kleinmachnow, am Betriebskilometer 13. Das Verkehrsaufkommen liegt zwischen 63 000 – 80 000 Fahrzeugen pro Tag, mit einem Lkw-Anteil von ca. 6 – 7 % (Fitschen & Nordmann, 2012). Die BAB A 115 ist an diesem Abschnitt 36 m breit (inklusive Bankett und Mittelstreifen). Die Fahrbahn besteht aus Beton und besitzt drei Fahr- und einen Randstreifen je Richtung. Die befestigte Fahrbahn hat je Richtung eine Breite von 14,5 m und wird über das angrenzende Bankett entwässert. In dem ausgewählten Abschnitt gibt es keine Leitplanke neben der Fahrbahn.

Es wurden sechs Gruben unmittelbar neben der Fahrbahn ausgehoben, in die die Lysimeterwannen eingesetzt wurden. Die Lysimeterwannen bestehen aus PE und wurden der Neigung des Banketts entsprechend (ca. 7 %) in den Straßenrand eingebaut.

Drei Lysimeter dienen zur Erfassung des Straßenabflusses (Leerlysimeter), in drei weitere wurden verschiedene Bankettmaterialien eingebaut. Sie haben die folgenden Maße:

Bankettlysimeter: 3 x 1000 l (L: 150 cm, B: 100 cm, H: 70 cm);

Leerlysimeter: 3 x 225 l (L: 150 cm, B: 100 cm, H: 15 cm).

Die Bankettlysimeter haben an der straßenabgewandten Seite einen 15 cm langen und 15 cm tiefen Vorsprung, an dem Anschlüsse zur Sammlung des Oberflächenabflusses angebracht wurden. Weiterhin besitzen sie Anschlüsse in zwei weiteren Tiefen, mit denen Zwischenabfluss und Sickerwasser aufgefangen werden können (Bild 1).

Zur quantitativen Messung des Abflusses und der Versickerung in verschiedenen Tiefen sowie zur qualitativen Beprobung wurden zwölf Kippwaagen installiert.

Von Sickerwasser, Oberflächenabfluss und Straßenabfluss wurde jeweils eine Teilprobe (ca. 10 %) in ein Sammelgefäß überführt, der Zwischenabfluss wird vollständig erfasst. Die drei Leerlysimeter (225 l) wurden mit gewaschenem, kalkfreiem Drainagekies (Ø 5,6 – 8 mm) befüllt, die drei Bankettlysimeter (1000 l) wurden bis zur Hälfte mit einer gestaffelten Drainageschicht aus gewaschenem, kalkfreiem Kies und Sand befüllt.

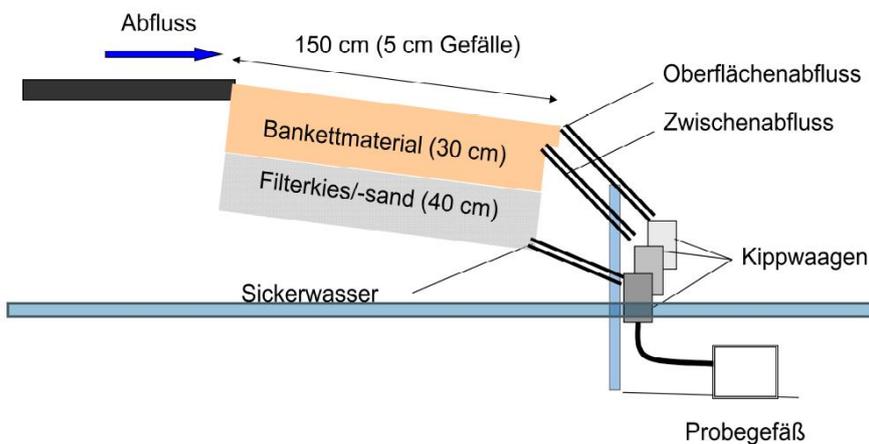
Über die Drainageschicht wurden die zu untersuchenden Bankettmaterialien eingebaut. Es wurden die drei folgenden Materialien/Varianten hinsichtlich ihres Schwermetallrückhalts untersucht:

- (1) Ein Oberboden (OB), welcher nach KA5 der Bodenart schwach schluffiger Sand (Su2) zugeordnet werden kann und einen C<sub>org</sub>-Anteil < 1 % aufweist.
- (2) Ein Baustoffgemisch aus natürlicher Gesteinskörnung (BS), welches auch zur Konstruktion der Schottertragschicht (0/32) verwendet wird.
- (3) Ein Gemisch aus (1) und (2), mit einem OB-Anteil von 15 M.-% (OB15).

Im Rahmen des Forschungsprojekts FE-Nr. 05.0177/2012/MRB wurde die Tragfähigkeit des Materials OB15 untersucht und gemäß ZTV E-StB 09 als ausreichend befunden (Koukoulidou et al., 2014). Die BS entspricht den Anforderungen der TL SoB-StB an Schottertragschichten unter Betondecken und ist somit ebenfalls tragfähig. Der OB ist nicht tragfähig, wurde aber als nicht standfeste Referenzvariante mit untersucht.

Im November 2013 wurden die Leerlysimeter 2 und 3 gereinigt, da sich größere Mengen Sedimente von der Straße in den Leerlysimetern abgelagert hatten. Die gesammelten Sedimente wurden auf Schwermetalle untersucht. Anhand der ermittelten Schwermetallgehalte wurde eine korrigierte Gesamtkonzentration für den Straßenablauf berechnet.

Die Probenahmen erfolgten während des gesamten Untersuchungszeitraums alle zwei beziehungsweise vier Wochen. Für die Analyse wurden die Proben im Labor gefiltert (0,45 µm) und mit 5 M HNO<sub>3</sub>-Lösung angesäuert (auf pH < 2). Um die Gesamtkonzentration der Schwermetalle (gelöst und partikulär) in den Proben zu bestimmen, wurden ab dem 17.04.2013 Teilproben gemäß DIN EN ISO 15587-2 in der Mikrowelle aufgeschlossen. Die Bestimmung der Schwermetallkonzentrationen (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn) in den Lösungen erfolgte mittels ICP-OES. Falls eine sofortige Analyse nicht möglich war, wurden die Proben bis zur Analyse bei 4 °C im Kühlschrank aufbewahrt.



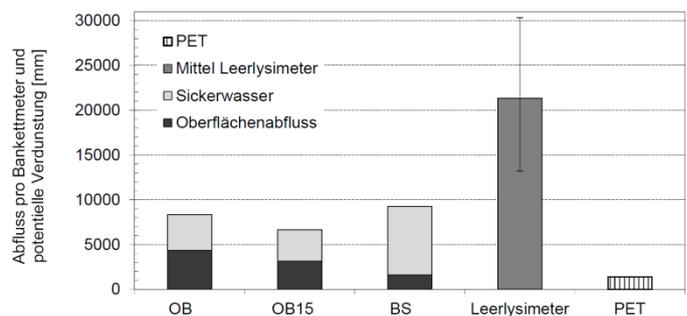
**Bild 1:** Schematische Darstellung eines befüllten Bankettlysimeters mit Kippwaagen und Probenahmegefäß (links). Foto der begrünten Lysimeteranlage (rechts).

### 3.1 Untersuchungsergebnisse

#### 3.1.1 Abflussmengen

Der Gesamtabfluss der Bankettlysimeter während des bisherigen Versuchszeitraums (15.11.2012 – 30.11.2014) entspricht etwa 30 – 40 % der Abflussmenge der Leerlysimeter (Bild 2). Zieht man die PET von ca. 1 400 mm von der Abflussmenge der Leerlysimeter ab (dort findet im Vergleich zu den Bankettlysimetern kaum Verdunstung statt), zeigen sich immer noch große Unterschiede. Diese Unterschiede sind auf die Konstruktion der Fahrbahn (Betonfugen, leichte Längsneigung), Instandhaltungsarbeiten am umgebenden Bankett (Schälung, Rasenschnitt) und auf temporär beschädigte Fugen zwischen der Fahrbahnkante und den Lysimetern zurückzuführen.

Die Sickerwassermengen der Bankettlysimeter OB und OB15 liegen in einer Größenordnung (4 000 mm beziehungsweise 3 550 mm), während das Bankettlysimeter BS eine deutlich höhere Sickerwassermenge aufweist (7 650 mm). Die Körnung des BS begünstigt eine schnelle Infiltration des Straßenabflusses, was zu einer erhöhten Grundwasserneubildung führt. An der Lysimeteranlage betrug die Grundwasserneubildung beim BS ca. 4 000 mm pro Jahr, beim OB15 und OB ca. 2 000 mm pro Jahr.



**Bild 2:** Gesamtabfluss (Sickerwasser = Zwischenabfluss + Versickerung) der drei Bankettlysimeter und mittlere Abflussmenge der Leerlysimeter vom 15.11.2012 – 30.11.2014.

#### 3.1.2 Schwermetallkonzentrationen im Straßenabfluss

Die Konzentrationen der Schwermetalle im Straßenabfluss sind neben der Verkehrsstärke unter anderem auch von der umgebenden Vegetation, Windrichtung, Niederschlagsereignissen und deren Intensität, Fahrbahnkonstruktion und Material abhängig (Pagotto et al., 2001, und Lee et al., 2011). Die Lösungskonzentrationen sowie die Gesamtkonzentrationen der

drei Leerlysimeter zeigen, mit Ausnahme vereinzelter Werte, einen sehr ähnlichen Verlauf.

Bei Untersuchungen an der A 555 und A 61 fanden Beer et al. (2011) vergleichbare Lösungskonzentrationen von Cd, Cu, Cr, Ni und Pb im Straßenabfluss. Die Zn-Konzentrationen waren dagegen wesentlich niedriger (Tabelle 3). Dies lässt sich durch das Fehlen von Schutzplanken am Untersuchungsstandort erklären. Kluge und Wessolek (2012) konnten zeigen, dass das Vorhandensein von Schutzplanken zu einer erhöhten Abflusskonzentration von Zn und Cd führt.

Die Lösungskonzentrationen der Schwermetalle im Straßenabfluss liegen insgesamt auf einem relativ niedrigen Niveau. Im

Mittel liegen sie unterhalb der Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA (ausgenommen Cu).

Ein Grund dafür ist, dass ein Teil der durch den Straßenverkehr emittierten Schwermetalle in partikulärer gebundener Form vorliegt (Tabelle 3, Bild 4). Untersuchungen von Thorpe und Harrison (2008) bestätigen diese Feststellung. Darüber hinaus kann es bereits im Straßenabfluss zu Reaktionen mit gelösten Schwermetallen kommen. Diese können beispielsweise an Partikel im Straßenabfluss adsorbieren, es können Fällungsreaktionen auftreten (zum Beispiel mit CaCO<sub>3</sub>) oder es kann zu einer Komplexbildung durch organische Substanzen und Febeziehungsweise Mn-Oxiden und Hydroxiden kommen (Folke-son et al., 2009).

**Tabelle 3: Gelöste und ungelöste Metallkonzentrationen im Straßenabfluss von stark befahrenen Straßen.**

	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
<b>Lösungskonzentration</b>	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$					
Beer et al. (2011)	0,16	3,8	22,1	4,4	< 0,1	144
Hallberg et al. (2007)	0,11	5,4	19,6	3,8	0,1	98
Diese Studie	0,13	4,7	16,1	2,4	0,8	50
<b>Gesamtkonzentration</b>	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$					
Beer et al. (2011)	0,51	96,8	226,1	35,3	8,4	738
Helmreich et al. (2010)	< 0,5	-	155,0	35,0	43,0	592
Diese Studie (gemessen)	0,19	12,6	59,0	6,1	7,8	140
Diese Studie (korrigiert um Schwermetallgehalte im Sediment)	0,5	57,7	157,1	18,0	26,8	500
<b>Partikuläre Konzentration</b>	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$					
Beer et al. (2011)	0,35	93,0	204,0	30,9	8,4	594
Diese Studie	0,37	53,0	141,0	15,6	7,6	450

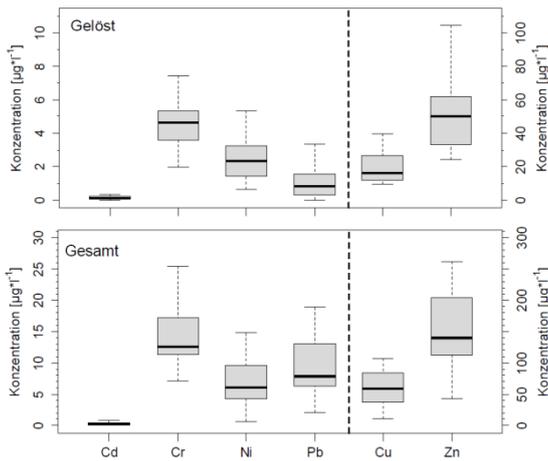
Die im Rahmen dieser Studie ermittelten Gesamtkonzentrationen sind im Vergleich zu Beer et al. (2011) und Helmreich et al. (2010) im Mittel deutlich niedriger. Dies kann verschiedene Ursachen haben. Neben den oben genannten Faktoren ist das Sammelsystem für die gemessenen Schwermetallkonzentrationen entscheidend.

In den mit Kies befüllten Leerlysimetern kommt es mit der Zeit zu einer Akkumulation von Sedimenten. Daher wurde eine Korrektur der gemessenen Gesamtkonzentration durchgeführt. Die Schwermetallkonzentrationen der Sedimente wurden auf die eingetragene Sedimentfracht und die Abflussmengen der Leerlysimeter des entsprechenden Zeitraums bezogen. Dadurch ergeben sich korrigierte Gesamtkonzentrationen (Tabelle 3), welche mit den aufgelisteten Literaturwerten vergleichbar sind.

In Bild 3 sind die (nicht korrigierten) Gesamt- und Lösungskonzentrationen des Straßenabflusses als Boxplots dargestellt.

3.1.3 Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser der Bankettlysimeter

In Bild 4 sind die Mediane der partikulären und gelösten Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser der drei Bankettlysimeter sowie die mittlere Konzentration des Straßenabflusses (LL) über den gesamten Untersuchungszeitraum abgebildet. Die Lösungskonzentrationen der Schwermetalle liegen bei allen Varianten im Mittel unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV (Tabelle 4), ausgenommen Cu bei OB. Für partikuläre Schwermetalle im Sickerwasser gibt es in der BBodSchV keine Prüf- oder Grenzwerte.



**Bild 3:** Lösungs- und Gesamtkonzentration des Straßenabflusses (Median; Min., Max., oberes und unteres Quartil; Ausreißer sind nicht dargestellt). Gestrichelte Linie = Änderung y-Achse

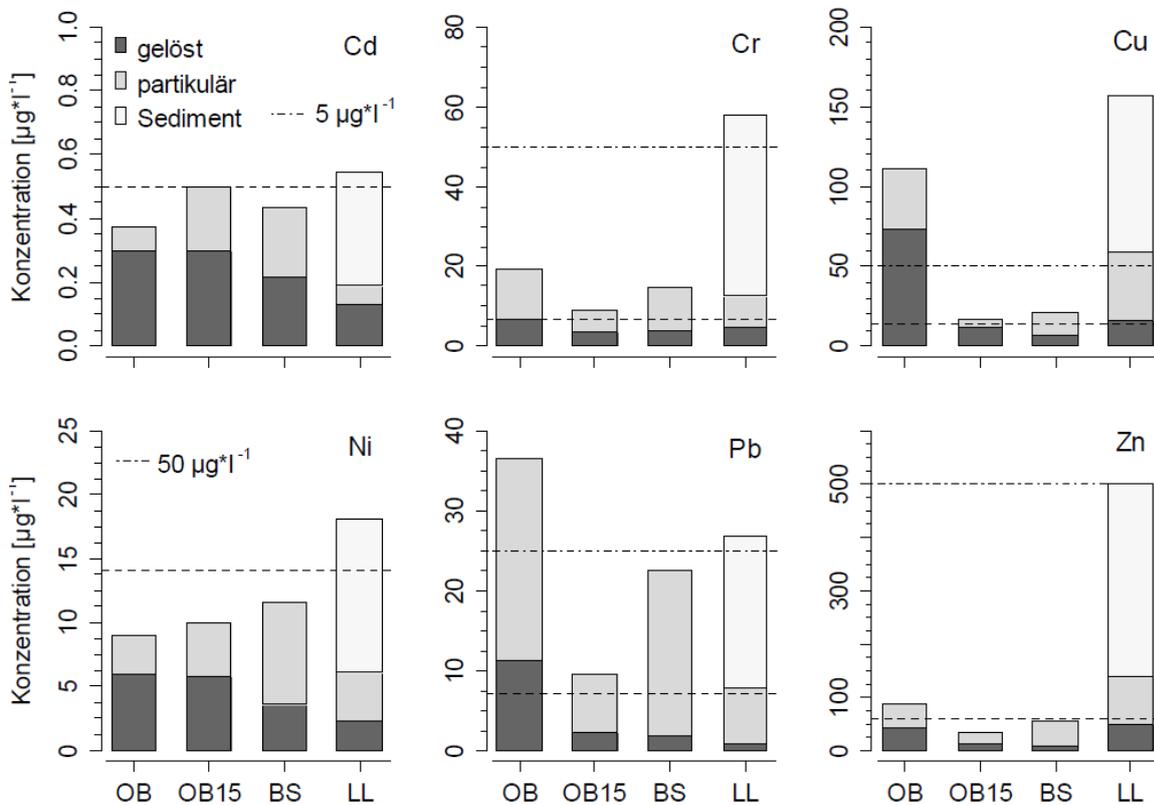
**Tabelle 4:** Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser und Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA für Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	$\mu\text{g}\cdot\text{k}^{-1}$					
BBodSchV (1999)	5	50	50	50	25	500
LAWA (2004, 2006)	0,5	7	14	14	7	58

Verglichen mit den von der LAWA empfohlenen Geringfügigkeitswerten (LAWA, 2004), welche ebenfalls nur für gelöste Schwermetalle gelten, lassen sich Überschreitungen für Cu und Pb im Sickerwasser bei der OB-Variante feststellen. Die Geringfügigkeitswerte nach LAWA sind jedoch lediglich für die Bewertung von Grundwasserschäden gedacht.

Vergleicht man die Lösungskonzentrationen im Sickerwasser der drei Bankettlysimeter untereinander, so zeigt sich, dass die OB-Variante für Cr, Cu, Pb und Zn die höchsten Konzentrationen aufweist. Auch die Gesamtkonzentrationen von Cr, Cu, Pb und Zn sind im Sickerwasser des OB-Lysimeters am höchsten. Die höchsten Gesamtkonzentrationen für Ni wurden im Sickerwasser der BS-Variante gemessen, die höchste Cd-Konzentration (gesamt) im Sickerwasser der OB15-Variante. Die Lösungskonzentrationen von Cd, Cr und Ni sind bei allen drei Varianten insgesamt eher gering. Es zeigen sich insgesamt keine großen Unterschiede zwischen den drei Varianten. Der Schwermetalleintrag über Sedimente macht bei allen untersuchten Schwermetallen teilweise deutlich über 50 % der Gesamtkonzentration aus.

Die eingetragenen Sedimente erhöhen in erster Linie die Festphasenkonzentrationen der Schwermetalle der Bankettböden, was mit der Zeit vermutlich zu höheren Gleichgewichtskonzentrationen in der Bodenlösung führen wird.



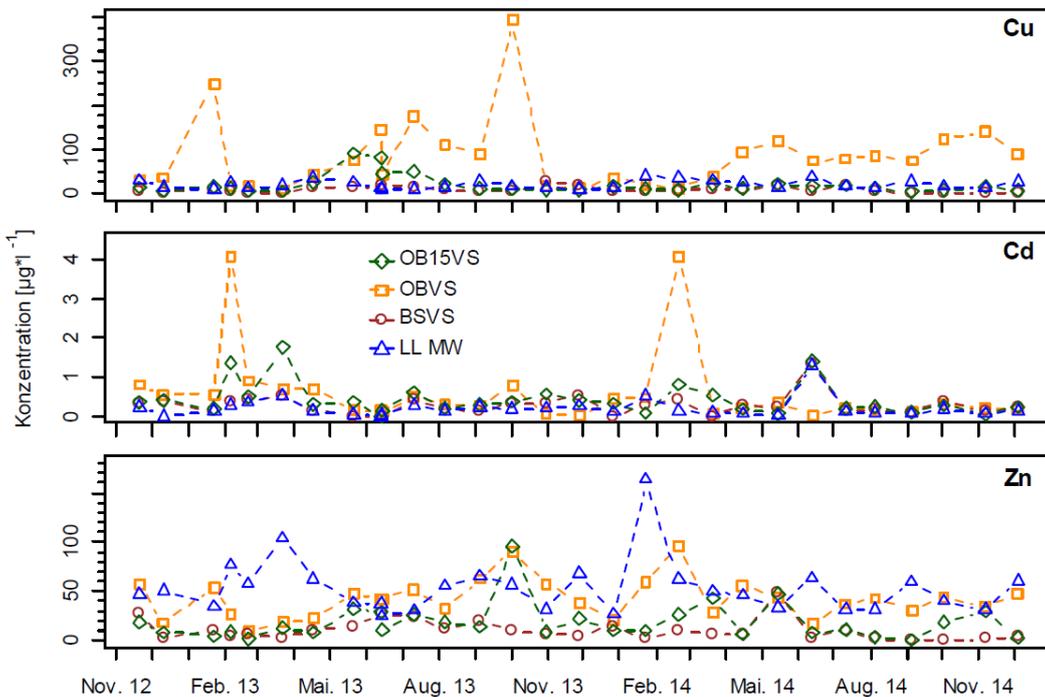
**Bild 4:** Mediane der gelösten, partikulären und sedimentgebundenen Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser der Bankettlysimeter und im Straßenablauf. Die gestrichelte Linie zeigt den momentan gültigen Prüfwert der BBodSchV, die Strichpunktlinie zeigt den Geringfügigkeitsschwellenwert (LAWA 2004)

Aus den monatlich gemessenen Sickerwasserkonzentrationen und -raten wurden die Schwermetallfrachten für die verschiedenen Lysimeter berechnet. Bezüglich der gelösten Schwermetallfrachten weist der OB15 die besten Retentionseigenschaften auf (Details siehe Schlussbericht).

An den einzelnen Beprobungsterminen sind die Lösungskonzentrationen des Sickerwassers wiederholt höher als die Konzentrationen im Straßenabfluss. Die Sickerwasserkonzentrationen werden durch eine Gleichgewichtseinstellung der Schwermetalle aus dem Straßenabfluss und der Bodenmatrix bestimmt. Bei relativ geringen Lösungskonzentrationen im Straßenabfluss ist es daher möglich, dass die Sickerwasserkon-

zentrationen zumeist über den Konzentrationen im Straßenabfluss liegen (Bild 5). Dies ist möglicherweise ein zeitlich begrenzter Effekt, der sich nach der Gleichgewichtseinstellung wieder verändert.

Die Lösungskonzentrationen von Cd, Cu und Zn im Sickerwasser des BS-Lysimeters überschreiten die Prüfwerte der BBodSchV nicht. Im Sickerwasser des OB15-Lysimeters kommt es im Mai und Juni 2013 zur Überschreitung des Prüfwerts für Cu. Die Konzentrationen der anderen Schwermetalle lagen während des Untersuchungszeitraums unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV.



**Bild 5:** Lösungskonzentrationen Cd, Cu, Zn im Sickerwasser der drei Bankettlysimeter sowie die mittleren Lösungskonzentrationen des Straßenabflusses (LLMW)

Im Sickerwasser des OB-Lysimeters lagen die Lösungskonzentrationen von Cu im Januar 2013, von Mai bis Oktober 2013 und April bis Dezember 2014 über dem Prüfwert der BBodSchV. Dies entspricht etwa 55 % der Beprobungstermine. Die Lösungskonzentration von Pb lag im Januar und Oktober 2013 und im Oktober/November 2014 oberhalb des Prüfwerts, die anderen Schwermetalle lagen während des gesamten bisherigen Untersuchungszeitraums unterhalb der vorgeschriebenen Prüfwerte.

Die erhöhten Konzentrationen im Sickerwasser lassen sich durch Schwermetall-desorption/-mobilisation (Cu und Pb) von der Festphase erklären; die erhöhten Konzentrationen im Januar 2013 sind auf den Einsatz von Streusalz zurückzuführen. Die Erhöhung der Konzentrationen von Cu und Pb im 2. und 3. Quartal 2013/14 und im 4. Quartal 2014 im OB-Lysimeter sind auf einen verstärkten Umsatz von organischen Bestandteilen durch Mikroorganismen zurückzuführen, was eine Mobilisierung der Schwermetalle zur Folge hat (Bäckström et al., 2004; Hjortenkrans et al., 2008). Die Lösungs- und Gesamtkonzentrationen

aller Schwermetalle der einzelnen Beprobungstermine werden im Schlussbericht dargestellt und diskutiert.

#### 4 Modellierung Stofftransport

Die mit einem numerischen Stofftransportmodell (HYDRUS1D) durchgeführten Modellrechnungen zeigen, dass es selbst nach zehn Jahren Laufzeit bei keiner der drei untersuchten Bankettvarianten zu einer Überschreitung der Prüfwerte im Sickerwasser kommt. Auch bei dem "worst case"-Szenario stellen die Schwermetallkonzentrationen unterhalb des Banketts keine Gefährdung nach der BBodSchV für das Grundwasser dar. Die Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA im Sickerwasser für Cu, Pb und Zn werden nur im "worst case"-Szenario der OB- und BS-Variante überschritten, welches die zukünftigen Lösungskonzentrationen im Sickerwasser vermutlich überschätzt.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

Die Lösungs- und Gesamtkonzentrationen der drei Leerlysimeter zeigen ähnliche Werte. Die mittleren Lösungskonzentrationen der Schwermetalle im Sickerwasser der drei Bankettlysimeter liegen durchweg unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser (ausgenommen Cu bei OB). Die in dieser Studie untersuchten, standfesten Bankettvarianten OB15 und BS genügen somit den geltenden Ansprüchen hinsichtlich des Schwermetallrückhalts. Momentan wird diskutiert, ob neue Grenzwerte für Schwermetalle im Sickerwasser eingeführt werden sollen, die sich an den Geringfügigkeitsschwellen in LAWA (2004) orientieren. Diese Werte konnten unterhalb des Bankettaufbaus (30 cm Bodentiefe) bei den untersuchten standfesten Bankettvarianten eingehalten werden.

Bei der BS-Variante wurden aufgrund der hohen Durchlässigkeit des BS die höchsten Gesamtfrachten für alle Schwermetalle ermittelt. Gemäß den RAS-Ew sollte das Bankett nur schwach durchlässig sein ( $K_f < 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Ziel dieser Vorgabe war die Gewährleistung eines guten Schadstoffrückhalts (mdl. Mitteilung Kocher und Porst, 2008). Die BS-Variante erfüllt mit einem  $K_f$ -Wert von  $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  diese Vorgabe nicht. Trotzdem sind die Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser der BS-Variante relativ niedrig und liegen alle unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV.

Die OB15-Variante hat eine wesentlich geringere Durchlässigkeit ( $K_f < 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), was zu geringeren Sickerwasserraten und einem verstärkten Oberflächenabfluss führt. Der Straßenabfluss kann dadurch auf einer größeren Fläche versickern, was vermutlich zu einer geringeren Sickerwasserrate im Straßenrandbereich führt. Die Schwermetallfracht ist daher bei der OB15-Variante wesentlich geringer als bei der BS-Variante.

Auch nach den Prognosen der Modellierung ist die OB15-Variante die am besten geeignete Variante, um die Sickerwasserkonzentrationen des Banketts langfristig gering zu halten.

### 5.1 Empfehlungen

Anhand der vorliegenden Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die in den ZTV E-StB 09 beschriebenen Materialien/Varianten zur Konstruktion standfester Bankette über einen ausreichenden Schwermetallrückhalt verfügen. Die Aufbringung einer separaten Oberbodenschicht auf standfesten Banketten ist nicht erforderlich.

Die Vorgaben der BBodSchV bezüglich Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser können von einem Gemisch aus gebrochenen Gesteinskörnungen, industriell hergestellten Gesteinskörnungen und Oberboden (sogenannter Schotterrasen) eingehalten werden.

Der Begriff Schotterrasen aus den ZTV E-StB 09 sollte jedoch genauer definiert werden, um sicher zu stellen, dass das Bankett eine ausreichende Schwermetallretention gewährleisten kann. Anhand der hier durchgeführten Untersuchungen wird empfohlen, einen Mindestfeinkornanteil für die im Bankettbau verwendeten Mischungen zu definieren, um die Schwermetallfrachten im Bankettbereich möglichst gering zu halten. In Verbindung mit den Untersuchungen von Koukoulidou et al. (2014) zu Baustoffen für standfeste Bankette wird vorgeschlagen,

einen Mindestfeinkornanteil von 5 M.-% festzulegen. Hinsichtlich der bautechnischen Anforderungen sollten zusätzlich ein maximaler Feinkornanteil sowie ein minimaler Kiesanteil festgelegt werden. Da dies jedoch nicht Inhalt der durchgeführten Forschung war, wird diesbezüglich auf die Ergebnisse des Vorhabens Koukoulidou et al. (2014) verwiesen.

In der Projektlaufzeit konnten hauptsächlich Transport- und Retardationsprozesse in neu gebauten Banketten untersucht werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich das Schwermetallrückhaltevermögen der Bankette im Laufe der Zeit verändert. Durch Staub- und Sedimenteintrag wird der organische Gehalt in den Banketten vermutlich zunehmen. Dieser Eintrag wird auch das Retentionsvermögen der sorptionschwachen Bankette in Zukunft vermutlich erhöhen. Die Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser der Bankettvarianten mit Oberboden liegen häufig höher als die der Varianten ohne Oberboden. Möglicherweise handelt es sich um einen vorübergehenden Effekt, der durch Umsetzung organischer Substanz in Folge der Umlagerung und des Einbaus des Oberbodens ausgelöst wurde. Es sollte über einen mehrjährigen Zeitraum verfolgt werden, ob diese Unterschiede anhalten, verstärken oder ob sich die Konzentrationen angleichen. Dabei sollten keine baulichen Veränderungen am Bodenkörper der Bankettlysimeter vorgenommen werden.

Um Erkenntnisse über die Änderung des Schwermetallrückhaltevermögens von Banketten zu erlangen und somit die langfristige Entwicklung der Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser standfester Bankette besser vorhersagen zu können, wird daher eine Weiterführung der Lysimeteruntersuchungen für notwendig erachtet.

## 6 Literaturverzeichnis

- Bäckstrom, M., Karlsson, S., Backman, L., Folkesson, L., Lind, B.: Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment. *Water Research* 38, 2004, 720-732.
- Beer, F., Surkus, B., & Kocher, B.: Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2008/2009. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 209*, 40 S. NW-Verlag Bremerhaven, 2011.
- BMU (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Bonn, den 1.7.1999.
- Dierkes, C., Geiger, W.F.: Pollution retention capabilities of roadside soils. *Water Science and Technology* 39, 1999, 201-208.
- DIN EN ISO 15587-2: Aufschluss für die Bestimmung ausgewählter Elemente in Wasser, Teil 2: Salpetersäure-Aufschluss (ISO 15587-2:2002) Deutsche Fassung EN ISO 15587-2:2002. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin 2002.
- DIN 18196: Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin 2006.

- Fitschen, A., Nordmann, H.: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2010. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Verkehrstechnik, Heft 223, 2012
- Folkesson, L., Bækken, T., Brenčič, M., Andrew Dawson, A., François, D., Kuřimská, P., Leitão, T., Ličbinský, R., Vojtěšek, M.: Sources and Fate of Water Contaminants in Roads. In: Dawson, A. (Ed.), Water in Road Structures, Springer Netherlands, 2009
- Golwer, A.: Belastung von Böden und Grundwasser durch Verkehrswege. Forum Städte-Hygiene 42 (5) 1991, 266-275.
- Hallberg, M., Renman, G., Lundbom, T.: Seasonal variations of ten metals in highway runoff and their partition between dissolved and particulate matter. Water, Air, and Soil Pollution, 181(1-4) 2007, 183-191.
- Hjortenkrans, D.S.T., Bergbäck, B.G., Häggerud, A.V.: Transversal immission patterns and leachability of heavy metals in road side soils. Journal of Environmental Monitoring 10, 2008, 739-746.
- Kayhanian, M., Fruchtmann, B.D., Gulliver, J.S., Montanaro, C., Ranieri, E., Wuertz, S.: Review of highway runoff characteristics: Comparative analysis and universal implications. Water Research 46, 2012, 6609-6624.
- Kluge, B., Wessolek, G.: Heavy metal pattern and solute concentration in soils along the oldest highway of the world – the AVUS Autobahn. Environmental Monitoring and Assessment 184, 2012, 6469-6481.
- Kocher, B., Wessolek, G.: Verlagerung verkehrsbedingter Stoffe mit dem Sickerwasser. FE-Abschlussbericht 05.0118/1997/GRB. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Nr. 864. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2003
- Koukoulidou, A., Heyer, D., Birle, E.: Baustoffe für standfeste Bankette. Abschlussbericht FE 05.0177/2012/MRB, 2014
- LAWA (2004) Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. – Bericht Grund- und Trinkwasser. Kulturbuch-Verlag, Berlin.
- Lee, J. Y., Kim, H., Kim, Y., Han, M. Y.: Characteristics of the event mean concentration (EMC) from rainfall runoff on an urban highway. Environmental Pollution, 159 (4) 2011, S. 884-888.
- Mündliche Mitteilung 2008. Kocher, B und Porst, F; Mitglieder des Arbeitskreises 5.2.2 RAS-EW zur Erarbeitung der RAS-EW 2005.
- Pagotto, C., Remy, N., Legret, M., Le Cloirec, P. (2001): Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway. Environmental Technology, 22, 307–19.
- RAS-Ew: Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung (RAS-Ew). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2005
- STLK LB 112: Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau Leistungsbereich 112, "Schichten ohne Bindemittel", Ausgabe Oktober 2010, FGSV Verlag, Köln.
- Thorpe, A., Harrison, R. M.: Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review. Science of the total environment, 400 (1) 2008, 270-282.
- TL SoB-StB: Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, TL SoB-StB 04, Ausgabe 2004, Fassung 2007. FGSV Verlag, FGSV 697, Köln 2007.
- TL Gestein-StB: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, TL Gestein-StB 04, Ausgabe 2004, Fassung 2007. FGSV Verlag, FGSV 613, Köln 2008.
- ZTV E-StB: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, ZTV E-StB 09, Ausgabe 2009. FGSV Verlag, FGSV 599, Köln 2009.