



lebensministerium.at

# **Entwicklung von Methoden zur Prüfung der Eignung von Substraten für die Oberflächenwasserbehandlung von Dach- und Verkehrsflächen**

**Fördervertrag GZ B100121**

## **Kurzfassung**



## Unser Leitbild / *Our Mission*



lebensministerium.at

## Nachhaltig für Natur und Mensch / *Sustainable for nature and mankind*

### Lebensqualität / *Quality of life*

Wir schaffen und sichern die Voraussetzungen für eine hohe Qualität des Lebens in Österreich. /

*We create and assure the requirements for a high quality of life in Austria.*

### Lebensgrundlagen / *Bases of life*

Wir stehen für vorsorgende Erhaltung und verantwortungsvolle Nutzung der Lebensgrundlagen Boden, Wasser, Luft, Energie und biologische Vielfalt. / *We stand for a preventive conservation as well as responsible use of soil, water, air, energy and biodiversity.*

### Lebensraum / *Living environment*

Wir setzen uns für eine umweltgerechte Entwicklung und den Schutz der Lebensräume in Stadt und Land ein. / *We support environmentally friendly development and the protection of living environments in urban and rural areas.*

### Lebensmittel / *Food*

Wir sorgen für die nachhaltige Produktion insbesondere sicherer und hochwertiger Lebensmittel und nachwachsender Rohstoffe. / *We ensure sustainable production in particular of safe and high-quality food as well as renewable resources.*

#### Impressum

#### Medieninhaber, Herausgeber, Copyright:

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft,  
Sektion VII Wasser  
Marxergasse 2, 1030 Wien

Alle Rechte vorbehalten

#### Gesamtkoordination:

**Ao. Univ. Prof. DI Dr. Maria Fürhacker**  
**Universität für Bodenkultur Wien**  
**Institut für Siedlungswasserbau,**  
**Industriewasserwirtschaft**  
**und Gewässerschutz**  
**Muthgasse 18, 1190 Wien**

#### AutorInnen:

**Ao. Univ. Prof. DI Dr M. Fürhacker,**  
DI T. M. Haile, B. Schärffinger,  
Ass.-Prof. DI Dr. G. Kammerer,  
Dr. DI Roza Allabashi und  
S. Magnat, A. Lins

Ad-hoc-Gruppe in alphabetischer Reihenfolge:

DI Gerhard Cordt, Ao. Univ. Prof. DI Dr. Maria Fürhacker, DI Tadele Measho Haile, Dr. Fritz Hefler, Ing Raimund Herndl, Prok. Ing. Siegfried Leitner, DI Bernhard Monai, DI Ernst Nöbl, DI Johannes Tatzber, DI Rupert Worel

Wien, November 2013

#### Layout:

ZS communication + art GmbH

#### Bildnachweis, Produktion und Druck:

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

**Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier mit Pflanzenfarben.**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Zielsetzung der Studie</b> .....	<b>1</b>
<b>3. Material und Methoden</b> .....	<b>3</b>
<b>4. Methodenvorschläge</b> .....	<b>4</b>
4.1 „Vorläufiger“ Methodenvorschlag zur Prüfung der Filtermaterialien auf Eignung vor dem Einbau .....	4
4.1.1 Prüfung nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag bei einem Flächenverhältnis 1:15 .....	5
4.1.2 Prüfung nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag bei einem Flächenverhältnis 1:200 .....	10
<b>5. Kapazitätsprüfung</b> .....	<b>13</b>
5.1 Praktische Durchführung der Untersuchungen im upflow Modus (Beschickung von unten nach oben): .....	14
5.2 Praktische Durchführung der Untersuchungen im downflow Modus (Beschickung von oben nach unten).....	16
<b>6. Ergebnisse der Versuche nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag</b> .....	<b>17</b>
6.1 Ergebnisse der Versuche nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag – Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ ) 1:15 .....	17
6.1.1 Ergebnisse der Infiltrationsratenbestimmung (1:15) .....	17
6.1.2 Ergebnisse der Partikelretention I und II (1:15) .....	17
6.1.3 Ergebnisse des Schwermetallrückhalts (1:15).....	20
6.1.4 Ergebnisse des Mineralölrückhalts (Diesel als Prüfsubstanz) (1:15) .....	24
6.1.5 Ergebnisse der Änderung der Infiltrationsrate und Remobilisierung der AFS (1:15) .....	26
6.1.6 Ergebnisse der Remobilisierung der Schwermetalle während des Winterbetriebs (1:15) .....	26
6.1.7 Ergebnisse der Säureneutralisationskapazitätsprüfung (1:15) .....	27
6.2 Ergebnisse Versuche nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag – Flächenverhältnis 1:200.....	29
6.2.1 Ergebnisse der Infiltrationsratenbestimmung (1:200).....	29
6.2.2 Ergebnisse der Partikelretention I und II (1:200).....	29

6.2.3	Ergebnisse des Schwermetallrückhalts (1:200) .....	30
6.2.4	Ergebnisse des Mineralölrückhalts (Diesel als Prüfsubstanz) (1:200) .....	32
6.2.5	Ergebnisse der Partikelzugabe II und Änderung der Infiltrationsrate (1:200) 32	
6.2.6	Ergebnisse der Remobilisierung der AFS (1:200).....	32
<b>7.</b>	<b>Ergebnisse der Kapazitätsprüfung.....</b>	<b>33</b>
7.1	Ergebnisse Kapazitätsprüfung im Zuge eines Zulassungsverfahrens für Schwermetalle in der 32 mm Säulen.....	33
7.2	Ergebnisse der Untersuchungen im downflow Modus (Beschickung von oben nach unten) .....	39
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>41</b>
<b>9.</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>45</b>
<b>10.</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>46</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: schematische Darstellung der Säulengeometrie und des Säulenaufbaus	7
Abbildung 2: AFS Ablaufkonzentrationen in mg/L der Filtermaterialien TF If, TF IIb, Quarzsand (S) und BA	18
Abbildung 3: Entfernungsraten von Millisil W4 (%) in den verschiedenen Filtersäulen	19
Abbildung 4: Ablaufkonzentrationen von Cu, Zn und Pb in µg/L des Filtermaterials Quarzsand	21
Abbildung 5: Ablaufkonzentrationen von Cu, Zn und Pb in µg/L des Filtermaterials TF If	22
Abbildung 6: Ablaufkonzentrationen von Cu, Zn und Pb in µg/L des Filtermaterials TF IIb	22
Abbildung 7: Ablaufkonzentrationen von Cu, Zn und Pb in µg/L des Filtermaterials BA	23
Abbildung 8: pH Pufferkapazität der Filtersubstrate, TF If, TF IIb, BA und Quarzsand bei einem Start pH-Wert von $3,0 \pm 0,1$ im Zulauf	28
Abbildung 9: AFS Ablaufkonzentrationen (mg/L) von TF If der Partikelretention I und II	29
Abbildung 10: AFS-Rückhalt (%) von TF If der Partikelretention I und II	30
Abbildung 11: Ablaufkonzentrationen von Pb, Cu und Zn in µg/L des Filtermaterials TF If bei einem Flächenverhältnis von 1:200	31
Abbildung 12: Pb Beladung Säulenversuch 32 mm, $\frac{1}{2}Q$ von unten nach oben (upflow)	34
Abbildung 13: Cu Beladung beim Säulenversuch 32 mm, $\frac{1}{2}Q$ von unten nach oben (upflow)	34
Abbildung 14: Zn Beladung beim 32 mm Säulenversuch, $\frac{1}{2}Q$ von unten nach oben (upflow)	35
Abbildung 15: Durchbruchskurven von Sand in 32 mm Säulen von unten nach oben mit $\frac{1}{2}Q$	35
Abbildung 16: Durchbruchskurven von TF I (mit geringerer Pufferkapazität) in 32 mm Säulen von unten nach oben mit $\frac{1}{2}Q$	36
Abbildung 17: Durchbruchskurven von TF IIb in 32 mm Säulen von unten nach oben mit $\frac{1}{2}Q$	36
Abbildung 18: Durchbruchskurven von BA in 32 mm Säulen von unten nach oben mit $\frac{1}{2}Q$	37
Abbildung 19: Durchbruchskurven von TF If in upflow und downflow modus mit Durchfluss Q	40

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Prüfschritte: Anforderungen und Zugabemengen bei einem Flächenverhältnis von 1:200	10
Tabelle 2: Abflussvolumina in L nach 1, 2, 3 und 4 Jahren und 3 Flächenverhältnissen FV bezogen auf die Säulen	14
Tabelle 3: Übersicht der Schwermetallkonzentrationen in µg/L für die Zulaufkonzentrationen der Kapazitätsprüfung und die Jahresfracht in mg für ein Flächenverhältnis von 1:15	15
Tabelle 4: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten (m/s) der Filtermaterialien TF If, TF IIb, BA und Quarzsand zu Beginn und Ende des Versuchs	17
Tabelle 5: Ergebnisse der Säulenversuche (µg/L) und der berechneten Entfernungsraten für Pb, Cu und Zn (%) der Filtermaterialien Quarzsand, TF If, TF IIb und BA	20
Tabelle 6: Ergebnisse der Versuche mit der Prüfschubstanz Diesel (mg/L) und den Filtermaterialien TF I+AK, TF If, TF IIb, Quarzsand und BA mit einem Flächenverhältnis 1:15	25
Tabelle 7: Darstellung der adsorbierten Schwermetallfrachten der Filtermaterialien (mg) und Konzentrationen der Schwermetalle in der aufgetragenen NaCl-Lösung (µg/L)	26
Entwicklung von Methoden zur Prüfung der Eignung von Substraten für die Oberflächenwasserbehandlung von Dach- und Verkehrsflächen, Kurzfassung	iii

Tabelle 8: Schwermetallkonzentrationen ( $\mu\text{g/L}$ ) im Ablauf nach Spülung mit einer 5 g/L NaCl-Lösung	27
Tabelle 9: Schwermetallfrachten des adsorbierten und des rückgelösten Anteils von Pb, Cu und Zn in gewichteten mg pro Masse in der Säule bzw. % bezogen auf die sorbierte Menge	27
Tabelle 10: Ergebnisse der Säulenversuche ( $\mu\text{g/L}$ ) von TF If bei einem Flächenverhältnis von 1:200 und der berechneten Entfernungsraten für Pb, Cu und Zn	31
Tabelle 11: Ergebnisse der Versuche mit der Prüfsubstanz Diesel (mg/L) und dem Filtermaterial TF If mit einem Flächenverhältnis 1:200	32
Tabelle 12: Vorhergesagte Standzeiten bis zum Durchbruch von Pb für zwei verschiedene Flächenverhältnisse: mittlerer Jahresniederschlag = 700 mm	38

# 1. Einleitung

Abwässer von hochrangigen Straßen, aber auch von gering befahrenen Straßen und von Dachoberflächen können mit Substanzen verunreinigt sein, die in der „Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser“ geregelt sind und deshalb vor der Versickerung entfernt werden sollen. Die Elimination von Partikeln, Schwermetallen und Mineralölkohlenwasserstoffen aus Oberflächenabflüssen geschieht in Reinigungsanlagen nach dem Stand der Technik durch folgende Prozesse: Elimination der an den Partikeln adsorbierten Anteil durch Filtration, Fällung als schwerlösliche Salze, Einschluss in Fällungsprodukte oder durch Adsorption an „aktive“ Anteile der Sorptionsmaterialien. Die Reinigung von Straßenabwässern ist eine Herausforderung, da eine möglichst gute Reinigungsleistung mit einer hohen hydraulischen Durchlässigkeit, kombiniert mit einem geringen Flächenbedarf und einer langen Standzeit, verbunden werden soll. Um diese Ziele erfüllen zu können, müssen, die in den Filteranlagen eingesetzten Materialien die Anforderungen an die Entfernung von Partikeln, Schwermetallen und Kohlenwasserstoffen erfüllen und eine entsprechende Durchlässigkeit aufweisen.

In der ÖNORM B 2506 „Regenwasser-Sickeranlagen“ für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen Teil 2 - „Qualitative Anforderungen an das zu versickernde Regenwasser, Bemessung, Bau und Betrieb von Reinigungsanlagen“, dem ÖWAV Regelblatt 35 „Behandlung von Niederschlagswässern“ und dem in Bearbeitung befindlichen ÖWAV Regelblatt 45 „Oberflächenentwässerung ausgewählter Betriebsanlagen durch Versickerung und Verrieselung in den Untergrund“ sind Grundlagen für eine entsprechende Reinigung von z.B. Dachflächenwässern, Hofflächen- bzw. von Verkehrsflächenabläufen festgelegt. Trotz dieser Vorschriften bleiben noch viele Fragen über die konkreten Anforderungen an die Filtermaterialien, die anstatt von natürlichem Bodensubstrat in Filterbecken zur Reinigung von verunreinigtem Niederschlagswasser eingesetzt werden können, speziell an deren Prüfmethode offen.

## 2. Zielsetzung der Studie

Das Ziel der Studie ist es, die Grundlagen für die Beurteilung von Substraten zu schaffen und mit Werten aus der Praxis zu vergleichen. Damit soll auch Erfahrung für die Vorschreibung von Grenzwerten in Behördenverfahren gewonnen werden.

Dazu werden folgende Projektmeilensteine definiert:

- Entwicklung von Methoden zur Beschreibung der Rückhaltekapazität für Partikel, Schwermetalle, organische Kontaminanten und Mineralöle
- Vergleich von Batch- und Säulenmethoden (z.B. analog zu OECD 106 „Adsorption und Desorption“)
- Prüfung der Möglichkeiten zur Vorhersage der Beladung von Substraten mit Schadstoffen und der max. Rückhaltekapazität
- Untersuchung der Reinigungsleistung von Filterbecken für Straßenoberflächenwässer in der Praxis
- Abschätzung der Standzeiten der verwendeten Materialien

Das generelle Ziel dieser Studie ist die Entwicklung von Methoden zur Prüfung von technischen Filtermaterialien zur Reinigung von Oberflächenwässern auf ihre Eignung für den Einsatz in Reinigungsanlagen zum Schutz von Oberflächen- und Grundwässern. In diesem Bericht werden als „technisches Filtermaterial“ einerseits die Filtermaterialien, die in der ÖNORM B 2506 Teil 2 als „technische Bodenfilter“ bezeichnet werden, andererseits die Filtermaterialien, die im ÖWAV-Regelblatt 45 unter technische Filter genannt sind, verstanden.

Es sollen folgende Teilziele verfolgt werden:

- Festlegung eines einheitlichen repräsentativen Prüfsubstrats, z.B. Quarzmehl Millisil W4, zur Simulation des Partikelrückhaltes im Filterkörper; Vergleich mit der Partikelverteilung in realen Proben
- Prüfung der Korngrößenverteilung der Partikel in Hinblick auf die optimale Entfernung der Feinteile, da diese besonders belastet sind
- Ermittlung des optimalen hydraulischen Durchsatzes bezogen auf das zu prüfende Medium
- Auswahl der Schadstoffe und deren Konzentration im Standardprüfgemisch, Pufferung der Lösung, der Zudosierungsart und des Beaufschlagungszeitraums
- Auswahl und Prüfung der Testmethode für Kohlenwasserstoffe
- Abschätzung der Relevanz der Laborversuche bezogen auf eine technische Anlage
- Abschätzung der Standzeiten von Materialien in Hinblick auf einen Filtertausch bzw. der Beladungskapazitäten
- Prüfung des Einflusses von Salzgaben auf die Remobilisierung von Schwermetallen
- Abschätzung der möglichen Auswirkungen von weiteren Schadstoffen in Hinblick auf einen effizienten umfassenden Umweltschutz
- Betrachtung der oben genannten Überlegungen an Hand in der Praxis ausgeführter Beispiele

Um die Anwendbarkeit der Methode zu überprüfen wurden einerseits zwei Bodenmaterialien (BA und BB) andererseits mineralische Filtermaterialien wie Quarzsand und handelsübliche Materialmischungen verwendet. Zur Erzielung bestimmter Eigenschaften wurden Mischungen auch selbst hergestellt. Die Versuchsergebnisse wurden periodisch einer Expertengruppe (Ad-hoc-Gruppe der ÖNORM bzw. ÖWAV) bestehend aus D.I. Worel (Fa. Triiagua W.N.), D.I. Monai, Ing. Leitner (beide Fa. SWUT), Dr. Cordt (Ziviltechniker, Zell am See), Ing. Herndl (MA45), D.I. Tatzber (NÖ Landesregierung), D.I. Nöbl (Ingenieurbüro Nöbl) und Dr. Friedrich Hefler vorgestellt. Von der Gruppe wurde die weitere Vorgehensweise diskutiert und vorgeschlagen. Vom BOKU-Team wurden diese Vorschläge aufgenommen und auf ihre Anwendbarkeit geprüft. Zusätzlich wurden zum besseren Verständnis auch Daten aus anderen Studien mitbetrachtet.

### 3. Material und Methoden

Ursprünglich wurden fünf verschiedene Filtersubstrate eingesetzt: zwei basierend auf natürlichem Bodenmaterial: BA - eher sandiger Boden, BB - eher toniger Schluffboden, Sand (S) - Quarzsand als inertes Referenzmaterial (Korngröße 0,71 bis 1,25 mm) und technisches Filtermaterial TFI in zwei Variationen als grobes TF Ia (grob, Korngrößen 0,63 bis 5,6 mm) und als feines TF If (fein, Korngrößen zwischen 0,5 bis 2,5 mm) und TF II in zwei Variationen a und b (mit geringerem und höherem Anteil an Aktivkohle). Um einzelne Prozesse zu beobachten, wurden zusätzliche Variationen betreffend Pufferkapazität und Adsorptionskapazität vorgenommen.

Als Schwermetalllösungen wurden gemischte Lösungen von 3 bis 5 Schwermetallen in Form von Merckstandards, gelöst in reverse osmosis Wasser (RO-Wasser), bei pH-Werten von 5,5 – 5,8 verwendet.

Es wurden Batch- und Säulenversuche (mit unterschiedlichen Säulen) mit verschiedenen Filtermaterialien durchgeführt. Ausgehend von einer deutschen Prüfmethode DIBt (2005) wurde der vorläufige Methodenvorschlag für die Prüfung der Eignung von Filtermaterialien erarbeitet. Zusätzlich wurden auch Versuche mit realem Abwasser in Laborsäulen und Untersuchungen an Gewässerschutzanlagen im Betrieb vorgenommen. Die Daten sind in der Langfassung zu finden. Gemeinsam mit der Ad-hoc-Gruppe wurde folgender Methodenvorschlag zur Prüfung der Filtermaterialien auf Eignung vor dem Einbau und folgende Methodenvorschläge zur Prüfung der Kapazität erarbeitet.

## 4. Methodenvorschläge

### 4.1 „Vorläufiger“ Methodenvorschlag zur Prüfung der Filtermaterialien auf Eignung vor dem Einbau

Ausgehend von den Erkenntnissen aus den Vorversuchen wurde in Abstimmung mit der Ad-hoc-Gruppe ein „vorläufiger“ Methodenvorschlag erarbeitet. Durch die Diskussionen und laufenden Anpassungen der Methode an die Praxis durch die Ad-hoc-Gruppe, war es nicht immer möglich, für alle Materialien vergleichbare Versuchsdaten zu liefern.

Der „vorläufige“ Methodenvorschlag zur Prüfung von technischen Filtermaterialien für die Reinigung von Abwässern von Dach- und Verkehrsflächen beruht auf einer Materialprüfung im Labor im Säulenversuch in einer 100 mm Filtersäule.

Die Prüfung besteht aus neun verschiedenen Teilprüfungen und wird in folgender Reihenfolge durchgeführt:

- 1) Säulenvorbereitung, Entlüftung und Spülung der Säule
- 2) Infiltrationsratenbestimmung
- 3) Partikelretention I
- 4) Schwermetallrückhalt
- 5) Mineralölrückhalt
- 6) Partikelretention II
- 7) Bestimmung der Änderung der Infiltrationsrate und Remobilisierung der AFS
- 8) Winterbetrieb und Remobilisierung der Schwermetalle
- 9) Prüfung der Säureneutralisationskapazität

Die Teilprüfungen 1) bis 8) werden mit ein und derselben mit Filtermaterial gefüllten Säule durchgeführt. Für Teilprüfung 9), zur Bestimmung der Säureneutralisationskapazität, muss die Säule mit frischem Filtermaterial gefüllt werden.

Die Untersuchungen werden so gewählt, dass das gesamte Säulenvolumen beaufschlagt wird. Das ist sichergestellt, wenn die Säule nach Entlüftung im Überstaubetrieb gefahren wird. Dieses Kriterium ist verglichen mit anderen Prüfmethode sehr streng, erlaubt allerdings für jede Säule einen adäquaten Betrieb, was bei einem vorgegebenen Durchfluss nicht der Fall ist. Die durchgesetzten Frachten sollten zumindest einer 4-Jahresfracht entsprechen; das berechnete Wasservolumen basiert auf einem Jahresniederschlag von 700 mm und einem Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ ) von 1:15 (entsprechen 84 L für 1 Jahr bezogen auf die Säulenfläche). Dieses Volumen wurde den Teilschritten zugrunde gelegt, wobei manchmal nur ein Teil oder ein Vielfaches davon eingesetzt wird. Als Prüfsubstanz für die Prüfung der Partikelentfernung wurde Millisil W4 gewählt, da dieses Quarzmehl einen relativ hohen Feinanteil hat und die Schwermetalle und auch PAKs besonders im Feinanteil konzentriert sind. Der Partikeldurchmesser von ca. 50 % des Quarzmehls liegt unter 63 µm. Außerdem wird Millisil W4 auch in Deutschland vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) als Prüfsubstanz für die Prüfung des Partikelrückhalts eingesetzt. Der Berechnung der Jahresfracht an AFS im Zulauf liegen mittlere Konzentrationen im Straßenabwasser von 90 bis 100 mg/L AFS (Göbel et al, 2007) zugrunde; tatsächlich wurde eine Konzentration von 91 mg/L AFS eingesetzt, um für das gewählte Niederschlagsvolumen auf 30 g pro 4 Jahre zu kommen.

Als Prüfsubstanzen für die Schwermetallentfernung werden handelsübliche Schwermetallstandardlösungen eingesetzt: Merck KGaA, Darmstadt Germany 1000 mg Cu (CuCl in H<sub>2</sub>O), 1000 mg Cr (CrCl<sub>3</sub> in 4,2 % HCl), 1000 mg Pb (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O), 1000 mg Ni (NiCl<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O) und

1000 mg Zn ( $\text{ZnCl}_2$  in 0,06 % HCl). Aus diesen Konzentrationen werden die Lösungen mit den entsprechenden Konzentrationen und pH-Werten hergestellt. Die Schwermetallkonzentrationen werden ursprünglich aus mittleren Konzentrationen der Gesamtgehalte von 170  $\mu\text{g/L}$  Pb, 97  $\mu\text{g/L}$  Cu und 407  $\mu\text{g/L}$  Zn aus der Literatur (Göbel et al., 2007) abgeleitet, wurden aber durch die Ad-hoc-Gruppe vereinfacht und angepasst. Im Laufe der Versuche wurden besonders die Pb-Konzentrationen diskutiert und für die Kapazitätsprüfung werden andere Konzentrationsverhältnisse vorgeschlagen.

Als Prüfschubstanz für die Prüfung von Mineralölrückhalt wird Diesel (kommerzielles Produkt mit Anteilen an Fettsäuremethylester FAME) verwendet. Die Frachtberechnung geht von einer Konzentration von 5 mg/L Diesel aus. Diese Konzentration wurde gewählt, weil für den Fall, dass höhere Konzentrationen zu erwarten sind, diese durch Mineralölabscheider zurückgehalten werden können. Außerdem zeigen die Daten aus der Literatur, dass die Konzentrationen im Straßenabwasser < 5 mg/L KW-Index sind (Göbel et al., 2007).

Da bei Gewässerschutzanlagen in Betrieb verschiedene Flächenverhältnisse (Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ )) anzutreffen sind, wird für höhere Flächenverhältnisse, eine Anpassung der Prüfung empfohlen. Praktisch wurde die Prüfung nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag, nach Absprache mit der Ad-hoc-Gruppe, in Bezug auf 2 verschiedene Flächenverhältnisse mit 1:15 und 1:200 geprüft. Dabei wurden folgende Filtermaterialien auf folgende Flächenverhältnisse geprüft:

Flächenverhältnis 1:15: TF If, TF IIb, Quarzsand und BA

Flächenverhältnis 1:200: TF If

#### 4.1.1 Prüfung nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag bei einem Flächenverhältnis 1:15

##### 1. Säulenvorbereitung, Spülung und Entlüftung der Säule (1:15)

Eine 800 mm lange Plexiglassäule mit 100 mm Innendurchmesser und einem Auslass von 30 mm Innendurchmesser wird, wie in Abbildung 1 dargestellt, befüllt. Für die Förderung der Flüssigkeit werden regelbare Schlauchquetschpumpen eingesetzt und das Wasser wird aus einem großen Vorlagebehälter (z.B. 160 L Aquariumglasbehälter oder äquivalent) von oben in die Säulen gepumpt. Für die Überprüfung der Schwermetalladsorption ist jedenfalls ein Glasvorlagebehälter erforderlich. Zur Beschickung können Präzisionspumpen wie z.B. WATSON-MARLON-Pumpen, Verder oder ISMATEC Schlauchquetschpumpen verwendet werden.

Befüllen der Säule: In die Säule wird unten ein Trenngewebe eingelegt, das jedenfalls selbst nicht aktiv sein sollte, z.B. Kunststoffgitter Maschenweite 1,3 mm, darauf werden 250 mm Drainageschicht (4/8 mm Rundkorn) aufgebracht. Das für die Prüfung verwendete Filtermaterial wird ohne chemisch-physikalische Veränderung über einem Trenngewebe in einer Schichthöhe von 300 mm Schicht für Schicht vorsichtig lufttrocken eingefüllt. Darauf wird ein weiteres Trenngewebe gelegt und zum Abschluss werden wieder 50 mm Drainageschicht (4/8 mm Rundkorn) aufgebracht, die der Verdichtung des Filtermaterials dient und das Aufschwimmen bzw. innere und äußere Erosion vermeiden soll.

Die Säule mit entionisiertem Wasser langsam von unten nach oben füllen, dadurch kann die Porenluft aus dem Filter entweichen. Nach der vollständigen Sättigung der Säule wird der Wasserspiegel für einige Minuten mit ca. 50 mm Überstau konstant gehalten. Lufteinschlüsse im Filtermaterial, durch mangelhafte Entlüftung, können die Infiltration und damit den  $k_f$ -Wert negativ beeinflussen. Im Zweifelsfall ist entlüftetes Wasser zu verwenden.

Danach wird die Säule zur Entfernung der Feinteile aus dem Material im Überstaubetrieb (von oben nach unten) gespült dabei ist zu Beginn der Spülung die Trübung zu bestimmen. Durch das Spülen des Filtermaterials wird eine visuell erkennbare Trübung bzw. ein Messwert mit dem Trübungsmessgerät als Kriterium für die Dauer der Spülung herangezogen. Die Spülung wird bis zu einer Trübung < 10 NTU durchgeführt. Sollte das Material dauernd Partikel abgeben, wird der

Versuch nach max. 30 min abgebrochen (das Gefüge des Filtermaterials ist damit zu instabil und damit ungeeignet).

## 2. Infiltrationsratenbestimmung (1:15)

Die Bestimmung der Infiltrationsrate wird mit 84 Liter pro Prüfung (im Überstauverfahren) durchgeführt. Bei einem Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ ) von 1:15 entspricht dieses Volumen, bezogen auf unsere Filterfläche, dem einer hydraulischen Jahresbelastung. Die hydraulische Leistung sollte  $\geq 0,6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$  sein.

Bei der Infiltrationsratenbestimmung werden Volumenstrom ( $Q$ ), Überstauhöhe über der Substratschicht ( $h_{\bar{U}}$ ) und Höhe der Substratschicht ( $L$ ) der Säule gemessen. Daraus wird der  $k_f$ -Wert nach Darcy Gleichung 1 berechnet. Schwankt die Überstauhöhe während der Prüfung zu stark, sind aus mehreren Teilmessungen der  $k_f$ -Wert und daraus ein Mittelwert zu bestimmen. Dieser sollte nicht  $< 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  sein (ansonsten ist das Filtermedium zu undurchlässig und damit ungeeignet).

$$k_f = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (L + h_{\bar{U}})}$$

Gleichung 1

Messgrößen:

$k_f$	Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)
$Q$	Durchfluss ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$L$	Höhe der Substratschicht (m)
$A$	Säulenquerschnittsfläche ( $\text{m}^2$ )
$h_{\bar{U}}$	Überstauhöhe über der Substratoberfläche (m)

Schnitt durch die Filtersäule  
alle Maße in mm

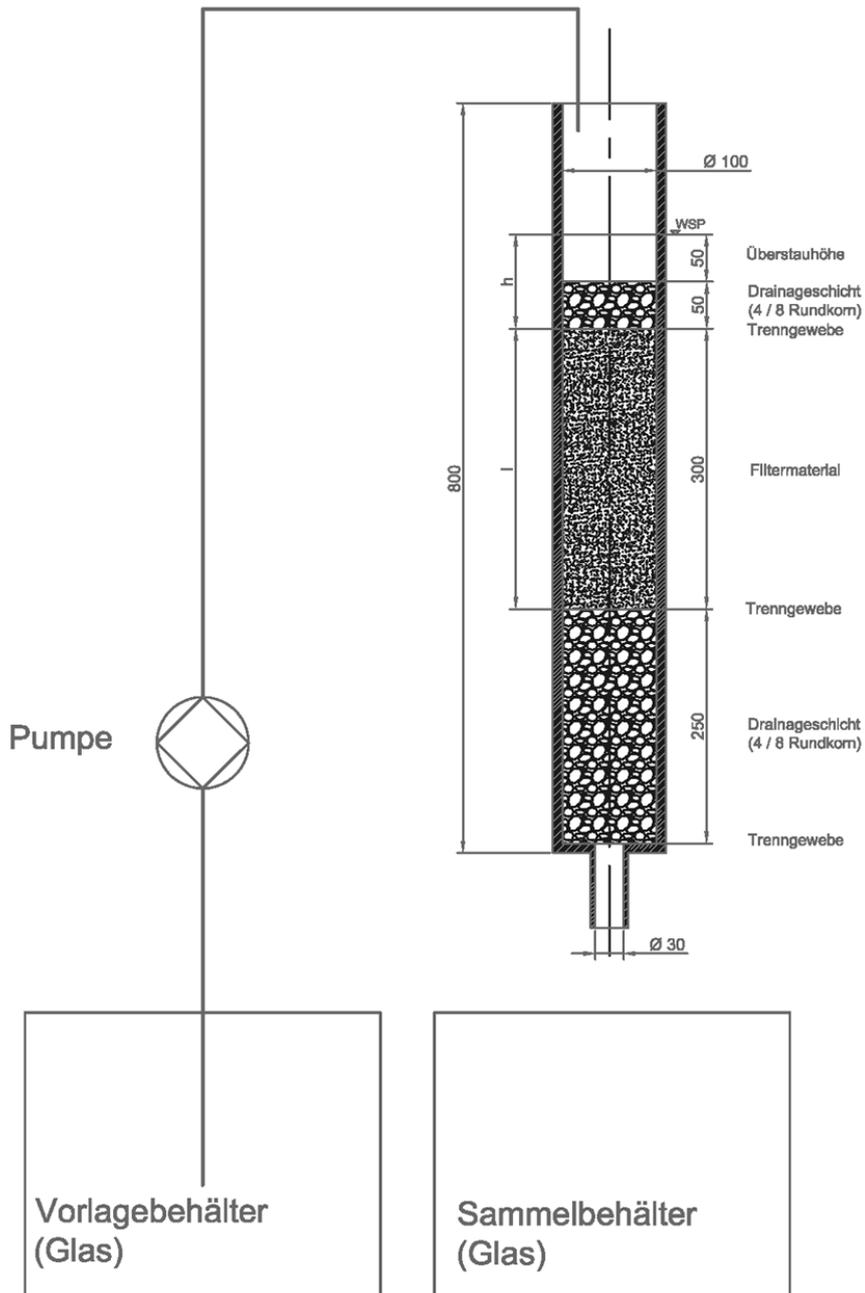


Abbildung 1: schematische Darstellung der Säulengeometrie und des Säulenaufbaus



im Überstau durchgespült. Prüfvolumen: insgesamt 84 L Durchsatz d.h. 21 L/Gabe. Es werden nach jeder Zugabe 4 Stichproben zu je 100 mL in einer graduierten Probenflasche (500 mL) nach 5, 10, 15 und 20 min gesammelt. In dieser Mischprobe wird die Konzentration des KW-Indexes untersucht.

Kriterium Ablaufkonzentration 0,3 mg/L oder Entfernung 95 %

#### 6. Prüfung der Partikelretention II (1:15)

Die Säule wird austropfen gelassen.

In diesem Schritt werden 10 g Quarzmehl (Millisil W4) gleichmäßig auf der Oberfläche der ausgetropften Säule verteilt. Dann wird mit 21 L im Überstau beregnet. Die Proben werden jeweils als Mischproben von 3 Mal 1 Liter ab Beginn der Beregnung gezogen. Danach die Säule austropfen lassen und wieder mit 10 g Quarzmehl beschicken und mit 21 L beregnen. Probenahme wie oben. Die hochgerechnete Fracht aus allen 3 Versuchen muss zu 80 % zurückgehalten werden.

Bei der Partikelretention soll als Kriterium 80 % Rückhalt erreicht werden.

#### 7. Bestimmung der Änderung der Infiltrationsrate und Remobilisierung der AFS (1:15)

Die Durchführung erfolgt ebenfalls im Überstaubetrieb mit 84 L. Die Säule 1 Stunde trocknen lassen dann mit derselben Einstellung wie oben Wasser durchlaufen lassen. Die ersten 3 Liter des Ablaufs werden auf AFS untersucht. Die errechnete Fracht darf 1,6 g nicht überschreiten.

Akzeptanzkriterium: maximal 50 % Reduktion der Infiltration und 10 % Partikelaustrag von den letzten 20 g Quarzmehl (Millisil W4).

#### 8. Remobilisierung der Schwermetalle während des Winterbetriebs durch Aufbringung von NaCl (1:15)

Spätestens 24 Stunden nach Beendigung des Experiments erfolgt die Beaufschlagung der mit Schwermetallen beladenen Säule mit 42 L einer 5 g/L NaCl-hältigen Lösung, die mit RO-Wasser hergestellt wurde. Gesamtdurchflussmenge 42 L Probenahme von 4 Stichproben in je 100 mL mit HNO<sub>3</sub> suprapur angesäuerten Glasflaschen. Die erste 100 mL Probe werden nach Durchfluss eines Bettvolumens und die restlichen 3 Proben nach Aufteilung des Restvolumens in jeweils gleiche Volumina nach Durchlauf dieser Teilvolumina entnommen. Die Proben werden zuerst mit Hilfe eines Spritzenaufsteckfilters (Porenweite 0,45 µm) filtriert und erst nach der Filtration mit HNO<sub>3</sub> suprapur angesäuert.

Akzeptanzkriterium für die Einhaltung der Remobilisierung der Schwermetalle während des Winterbetriebs:

Die Kriterien wurden noch nicht endgültig festgelegt. Es wird empfohlen Konzentrationsziele im Ablauf in Anlehnung an die Werte in Deutschland DIBt (2011) von Cu ≤ 50 µg/L und Zn ≤ 500 µg/L, (ev. Pb ≤ 9 µg/L) festzulegen. Um zu verhindern, dass eine potentielle hohe Remobilisation zu Beginn des Versuches übersehen wird, wird empfohlen Mischproben aus dem Sammeltank nach Durchlauf des ersten, zweiten und dritten Drittels des gesamten Volumens (42 L) zu ziehen.

#### 9. Prüfung der Säureneutralisationskapazität (1:15)

RO-Wasser mit einem Start pH-Wert von 3,0 ± 0,1 mit HNO<sub>3</sub> eingestellt. Die Säule wird mit frischem Material gefüllt und mit einer Durchflussmenge von 120 L oder über einen Zeitraum von 30 Minuten beschickt. Die Durchflussrate wird so eingestellt, dass sich 5 cm Überstand über dem Filtermaterial ergeben.

Akzeptanzkriterium der Prüfung der Säureneutralisationskapazität:

Der pH-Wert soll während des Durchlaufs des Wasservolumens entsprechend dem Niederschlag von einem halben Jahr oder während einer Versuchsdauer von 30 Minuten nicht unter 6,0 fallen.

#### 4.1.2 Prüfung nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag bei einem Flächenverhältnis 1:200

In der Tabelle 1 sind die einzelnen Prüfschritte, die bei einer Prüfung von Filtermaterialien die bei einem Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ ) von 1 : 200 eingesetzt werden, kurz zusammengefasst.

Tabelle 1: Übersicht über die Prüfschritte: Anforderungen und Zugabemengen bei einem Flächenverhältnis von 1:200

Nr.	Prüfung	Zugabe	Anforderung / Kriterium der Prüfung
1	Säulenvorbereitung	RO-Wasser nach Bedarf	Trübung < 10 NTU
2	Infiltrationsrate und Suffusionsstabilitätstest	110 L RO-Wasser	Mindestens $1 \cdot 10^{-5}$ $\leq$ Trübung aus Pkt.1
3	Partikelretention I	133 g Quarzmehl Millisil W 4 auf 100 L RO-Wasser	$\geq 80 \% \leq 2 \text{ g} (\leq 20 \%)$
4	Schwermetallrückhalt (Abfluss von Verkehrsflächen)	Pb 200, Cu 400 und Zn 1600 $\mu\text{g/L}$ , gelöst in 1100 L RO-Wasser	Pb $\leq 9 \mu\text{g/L}$ , Cu $\geq 80 \%$ , Zn $\geq 50 \%$
5	Mineralölrückhalt	5,6 g Diesel (in vier Teilen je. 42 L)	$\leq 0,3 \text{ mg/L} (\geq 95 \% \text{ Rückhalt})$
6	Partikelretention II	266 g Quarzmehl Millisil W 4 (In 20 Teilen jeweils 26,6 g) auf 200 L (10 bis 20 L je Gabe) RO-Wasser	AFS $\geq 80 \%$ Rückhalt
7	Remobilisierung der AFS und Änderung der Infiltrationsrate	84 L RO-Wasser Probenahme 3 Mal je 1 L	$\geq 50 \%$ der Infiltrationsrate aus Teil 2 AFS $\leq 20,8 \text{ g} (8 \% \text{ der } 266 \text{ g})$

##### 1. Säulenvorbereitung, Spülung und Entlüftung der Säule (1:200)

Die Säulenvorbereitung, Spülung und Entlüftung bei der Prüfung nach „vorläufigem“ Methodenvorschlag bei einem Flächenverhältnis von 1:200 wird analog der Säulenvorbereitung, Spülung und Entlüftung der Säule bei einem Flächenverhältnis von 1:15 vorgenommen.

##### 2. Infiltrationsratenbestimmung (1:200)

Da beim Versuch mit dem Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ ) von 1:200 das Hauptaugenmerk auf dem Partikel- und Schwermetallrückhalt gelegt wird, wird die Infiltrationsratenbestimmung, in Abstimmung mit der Ad-hoc-Gruppe, nicht mit Volumina von  $> 1 \text{ m}^3$  sondern wieder mit einem Volumen von 84 L (siehe Flächenverhältnis 1:15) durchgeführt. Die hydraulische Leistung sollte  $\geq 0,6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$  (d.h. der  $k_f$ -Wert  $> 10^{-5} \text{ m/s}$ ) sein. Die Bestimmung der Infiltrationsrate wird pro Prüfung mit 84 Liter und einer Zuflussgeschwindigkeit, bei der sich ein konstanter Überstau von  $\sim 5 \text{ cm}$  über dem Substrat einstellt, betrieben. Die Durchflussraten durch die gesättigten Säulen werden mit einer Stoppuhr und einem 1000 mL Messzylinder (20 bis 30 Messungen pro Säule) gemessen.

Zur Berechnung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, wird eine Ableitung der erweiterten Darcy-Gleichung (Gleichung 1) verwendet. Die hydraulischen Leitfähigkeitstests werden nach den Experimenten zur Bestimmung der Schadstoffentfernungseffizienz wiederholt, um etwaige Veränderungen der Infiltrationsrate der Filtermedien zu bestimmen.

### 3. Partikelretention I (1:200)

Die Partikelretention wird analog der Prüfung bei einem Flächenverhältnis von 1:15 in 2 Schritten durchgeführt. Die Gesamtmenge an Partikel von 400 g entspricht einer 4-Jahresfracht. Dabei wird während der Partikelretention I mit  $\frac{1}{3}$  und während der Partikelretention II mit  $\frac{2}{3}$  der gesamten Quarzmehlzugabe gearbeitet. Die Partikelretention I und II wird mit Hilfe des Parameters abfiltrierbare Stoffe (AFS in mg/L) und der Prüfsubstanz Quarzmehl Millisil W4 durchgeführt. Vor Prüfung der Partikelretention I wird die mit dem zu prüfenden Filtermaterial gefüllte Säule mit einem Volumen von 84 L gespült (siehe oben) und anschließend austropfen lassen. Es werden insgesamt 133 g Quarzmehl auf die Säule aufgebracht und mit insgesamt 100 L (Monatsniederschlag) beregnet. Diese Quarzmehlmenge wird in 10 Gaben zu je 13 g Quarzmehl auf der Säule aufgebracht und mit 10 L pro Quarzmehlzugabe im Überstau gespült. Die Proben werden ab Beginn der Beregnung als Stich- und Mischproben zu je 2 Mal 1 L entnommen. Bei einem höheren Flächenverhältnis wird nicht die gesamte Quarzmehlmenge auf die Säulen aufgebracht, sondern auf 10 Gaben aufgeteilt. Diese Aufteilung der Quarzmehlzugabe entspricht auch eher der Prüfung der Partikelretention im Feld, da bekannt ist, dass sich während des gesamten NS-Ereignisses Partikel im Zulauf befinden.

Nach diesem erstmaligen Aufbringen von 133 g Quarzmehl (Partikelretention I) wird die hydraulische Leitfähigkeit nochmals gemessen, um den Effekt des Verstopfens aufgrund des Partikelrückhalts und der Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit zu beurteilen.

Der zweite Schritt der Partikelretention erfolgt im Kapitel Partikelretention II.

Kriterium der Einhaltung Partikelretention I:

Als Kriterium der Partikelreduktion sollen 80 % AFS-Rückhalt erreicht werden.

### 4. Schwermetallrückhalt (1:200)

Für die Prüfung des Schwermetallrückhalts (Cu, Zn und Pb) werden pro Versuch und Konzentration die ausgetropften Säulen mit einer 4-Jahresfracht an Schwermetallen und einem Jahresniederschlag von 1100 L pro Versuch beschickt. Da im Laufe der Versuche in der Ad-hoc-Gruppe neuerlich die Zusammensetzung der Straßenabwässer bzw. die zu wählenden Schwermetallverhältnisse diskutiert wurden, wurden folgende Konzentrationen festgesetzt. Für diese Versuche wurden 3 Metalle mit einem Schwermetallverhältnis von 50 : 100 : 400 für Pb, Cu und Zn gewählt. Als Grundlage für diese Schwermetallverteilung wurden Literaturdaten herangezogen. Da eine 4-Jahresfracht in nur einem Jahresniederschlagsvolumen aufgebracht wird, werden 4-fache Konzentrationen (von 200 µg/L Pb, 400 µg/L Cu und 1600 µg/L Zn; pH 5,5 +/- 0,2) eingesetzt. Nach jedem Abflussvolumen von 110 L ( $\pm 10\%$ ) wird eine Probe, d.h. insgesamt 10 repräsentative Mischproben gezogen und untersucht. Da der Entfernung der gelösten Fraktion an Schwermetallen größere Bedeutung beigemessen wird, werden die Proben mit Hilfe eines Spritzenaufsteckfilters (Porenweite 0,45 µm) filtriert und erst nach der Filtration mit HNO<sub>3</sub> suprapur angesäuert. Die Ablaufkonzentrationen werden von Mischproben über 0,4 Jahre (d.h. 10 Mischproben in 4 Jahren), die in einem 110 L Glasbehälter gesammelt werden, analysiert. Die Ergebnisse werden gewichtet gemittelt.

Akzeptanzkriterium für den Schwermetallrückhalt:

Folgende Kriterien der Schwermetallentfernung wurden für die Mischproben festgelegt:

1. Kriterium: Entfernung von  $\geq 80\%$  für Cu und  $\geq 50\%$  für Zn;
2. Grenzwert für Pb:  $< 9\ \mu\text{g/L}$  fraglich und offen

### 5. Mineralölrückhalt (1:200)

Vor Prüfung des Mineralölrückhalts werden die Säulen austropfen gelassen und die Zugabe von 5,6 g Diesel (4 Jahresfracht) erfolgt zu je 4 Gaben à 1,4 g (=1,68 mL) pro Säule. Nach 5 Minuten

Sickerzeit wird pro Dieselgabe mit 42 L RO-Wasser gespült (Gesamtvolumen 168 L). Nach jeder Dieselzugabe werden in gleichen Zeitabständen 4 Stichproben zu je 100 mL in einer graduierten 500 mL Probenflasche gesammelt. Als Probenflaschen dienen Braunglasschliffflaschen, aus denen direkt die KW-Indizes, durch Extrahieren mit dem Lösungsmittel Hexan, gemessen werden.

Kriterium der Einhaltung der Mineralölenentfernung von Mischproben:

1. Kriterium: Ablaufkonzentration < 0,3 mg/L
2. Kriterium: Entfernung von  $\geq 95$  %

## 6. Partikelretention II (1:200)

Dieser Schritt wird zwar vorgeschlagen, sollte aber vor der Festlegung noch einmal diskutiert werden. Die Annahmen über die Partikelfracht, die bei derart hochbelasteten Anlagen ankommen, erscheinen in der Praxis wesentlich geringer zu sein, insbesondere, wenn ein Sedimentationsbecken vorgeschaltet ist.

Bei Schritt Partikelretention II werden 10 Mal Partikel zugegeben, wobei die Beschickung dazwischen unterbrochen werden kann und die Säule austropfen kann. Nach gleichmäßiger Aufbringung des Quarzmehls wird wieder im Überstau gearbeitet. Während des Versuchs Partikelretention II werden insgesamt 260 g Quarzmehl in 10 Gaben aufgebracht. Nach jeder Gabe von Quarzmehl (=26 g) wird die Säule mit 10 Mal 20 L RO-Wasser beschickt.

Im Laborversuch konnte dieser Versuch nur mit geringeren Wassermengen durchgeführt werden, weil sich die Säule verlegt hat. Das verringerte Volumen ergab sich durch die Abnahme der Infiltrationsrate (von 740 mL/min auf 60 mL/min).

Kriterium der Einhaltung Partikelretention II:

Bei der Partikelreduktion soll als Kriterium 80 % Rückhalt erreicht werden, obwohl von der ÖNORM B 2506 Teil 2 nur > 50 % gefordert werden.

## 7. Bestimmung der Änderung der Infiltrationsrate und Remobilisierung der AFS (1:200)

Für die Bestimmung der Änderung der Infiltrationsrate und Remobilisierung der AFS wurden die Versuche ebenfalls im Überstaubetrieb durchgeführt. Zuerst floss das Wasser aus der Säule und sie trocknete für 1 Stunde. Danach wurde wieder Wasser über die Säule geleitet. Allerdings war die Infiltrationsrate schon sehr gering, sodass dieser Versuch nicht zu Ende geführt wurde.

Kriterium der Einhaltung Änderung der Infiltrationsrate und Remobilisierung der AFS (1:200):

Da die Infiltrationsrate sehr gering war, sollte der Versuchsansatz überdacht werden und ev. Die Quarzmehlzugabe reduziert und an reale Bedingungen angepasst werden (Absetzbecken berücksichtigen!). Bei einer einfachen Multiplikation der Frachten, sehen die Versuchsbedingungen vor, dass ca. 2,1 kg Filtermaterial mit 0,4 kg Partikel beaufschlagt werden.

## 8. Remobilisierung der Schwermetalle während des Winterbetriebs durch Aufbringung von NaCl (1:200)

Dafür wurde noch keine Methode erarbeitet.

## 9. Prüfung der Säureneutralisationskapazität (1:200)

Dafür wurde noch keine Methode erarbeitet.

## 5. Kapazitätsprüfung

Die Kapazität eines Filtermaterials ist definiert als die „Lebensspanne“, in der das Filtermaterial betrieben werden kann, bis die Ablaufkonzentration einen Zielwert oder das Verhältnis  $C_e/C_o \leq 0,9$  überschreitet (Helliges, 2007). Um diese Funktionsperiode, bevor das Material getauscht werden muss, vorhersagen zu können, ist es notwendig, Kapazitätstests mit den eingesetzten Materialien durchzuführen.

Die Versuche werden analog zu jenen des „vorläufigen“ Methodenvorschlages durchgeführt, aber in kleineren Säulen über einen längeren Zeitraum. Da der Durchbruch bei manchen Materialien erst nach tausenden von Bettvolumina erreicht wird, wurde eine alternative Methode mit kleineren Säulen gewählt, um die sehr großen Volumina zu reduzieren. Für jeden Versuch wird eine Säule frisch gefüllt, d.h. alle Durchbruchkurven werden mit „frischen“ unbelasteten Materialien ermittelt. Für die Kapazitätsprüfung wurde in dieser Studie eine minimale Standzeit von 4 Jahren gewählt und mit den dafür entsprechenden Schwermetallfrachten geprüft.

Da es unterschiedliche Anforderungen an die Kapazitätsprüfung gibt, je nachdem ob es sich um Material handelt, das bereits einer Prüfung bzw. einem Zulassungsverfahren unterzogen wurde, oder ob es sich um Material handelt, das vor einer potentiellen Prüfung eingebaut wurde.

### Ermittlung der Kapazität im Zuge eines Zulassungsverfahrens:

Bei Prüfung des Materials im Zuge eines Zulassungsverfahrens wird vorgeschlagen, neben den Informationen die im „vorläufigen“ Methodenvorschlag formuliert wurden, eine Adsorptionsisotherme zu bestimmen. Dazu wird die Kapazität unter optimierten Bedingungen (upflow mit einem Durchfluss entsprechend dem halben  $k_f$ -Wert) in 32 mm Säulen mit den Elementen Pb, Cu und Zn bestimmt, wobei die Ausgangskonzentrationen für Cu und Zn über dem Bereich der Straßenabwasserkonzentrationen liegen. Diese Adsorptionsisotherme ist nur einmal im Zulassungsverfahren zu ermitteln. Von der Ad-hoc-Gruppe wurde beschlossen, dass für Cu und Zn die Werte der BBodSchV (1999idF 2012) von 50 µg/L für Cu und 500 µg/L für Zink im Ablauf von Bodenfiltern vor der Versickerung nicht überschritten werden sollen und gleichzeitig die prozentuelle Entfernung von 80 % für Cu und 50 % für Zn geprüft werden soll. Um die Zielkonzentrationen (50 µg/L Cu und 500 µg/L Zn) und die Entfernungsraten (80 % für Cu und 50 % für Zn) ermitteln zu können müssen die Ausgangskonzentrationen für Cu bei 250 µg/L und für Zn bei 1000 µg/L liegen. Für Pb wurde eine Ausgangskonzentration von 50 µg/L und als Zielkonzentration der Schwellenwert der QZV Chemie GW (9 µg/L Pb) gewählt. Die Konzentrationen in der Wasserphase beziehen sich auf gelöste Gehalte.

## 5.1 Praktische Durchführung der Untersuchungen im upflow Modus (Beschickung von unten nach oben):

Die Kapazitätsprüfung erfolgt im Durchlaufversuch in Filtersäulen mit einer Beschickung von unten nach oben (upflow).

### Versuchsaufbau:

Die Befüllung der Glassäulen erfolgt gleichmäßig. Um einen gleichmäßigen Zulauf zu gewährleisten und eine Verblockung zu verhindern, werden im Zulaufbereich hohle Glaszylinder mit einer Abmessung von 5 mm Durchmesser und 5 mm Länge als unterste Schicht, mit einer Schichthöhe von 3 bis 4 cm eingefüllt. Darüber wird eine 1 bis 2 cm hohe Schicht Glaskugeln (Durchmesser 1 bis 4 mm) und darüber eine Glasfritte positioniert. Auf diese Fritte wurde das zu prüfende Filtermaterial mit einer Filterschichthöhe von insgesamt 20 cm vorsichtig eingefüllt. Dabei wird vor der Füllung der Säule das Material gut durchmischt und in Teilen in die Säule gefüllt. Als letzte bzw. oberste Schicht werden wiederum Glaskugeln (Durchmesser 1 bis 4 mm) verwendet.

Die Beschickung erfolgt von unten nach oben mit der halben Menge an Q, die sich laut  $k_f$ -Wert normalerweise bei einer Beschickung von oben nach unten einstellen würde.

Der Zulauf wird mittels Silikonschläuchen aus einem Vorlagebehälter bestehend aus Glas, mit einem Fassungsvermögen von 160 Liter, eingebracht und wird mittels Präzisionsschlauchquetschpumpe geregelt. Vor Versuchsstart wird die Säule mit RO-Wasser von unten nach oben gesättigt, damit etwaige Porenluft aus dem Material entweichen kann. Die Abläufe werden in separaten Glasbehältern mit einem Fassungsvermögen von 100 Liter gesammelt.

Die gesamte Beschickungsmenge entspricht einer 4-Jahres-Abflussmenge und wird abhängig vom Säulendurchmesser, der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge in Österreich (ca. 700 mm/a laut Hydrographischem Jahrbuch) und verschiedenen Verhältnissen von wirksamer Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ ) 1 :15, 1:100 und 1:200 berechnet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Abflussvolumina in L nach 1, 2, 3 und 4 Jahren und 3 Flächenverhältnissen FV bezogen auf die Säulen

Flächen- verhältnis	Beschickungsmenge			
	1 Jahr (L)	2 Jahre (L)	3 Jahre (L)	4 Jahre (L)
1:15	8,44	16,9	25,3	33,8
1:100	56,3	113	169	225
1:200	113	225	338	450

### Schwermetallkonzentrationen

Die Säule wird mit Schwermetall-Standardlösungen beschickt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Übersicht der Schwermetallkonzentrationen in µg/L für die Zulaufkonzentrationen der Kapazitätsprüfung und die Jahresfracht in mg für ein Flächenverhältnis von 1:15

Schwermetalle	Zulaufkonzentrationen Kapazitätsprüfung (µg/L)	Jahresfracht für ein Flächenverhältnis 1:15 (mg)
Blei, (Chrom und Nickel)	50	0,42
Kupfer	250	0,82
Zink	1000	3,44

### Probenahme:

Während der Versuche werden Ablaufproben als Stichproben, sobald die 4.-Jahresfracht die Säulen passiert hat, in 100 mL Glasflaschen entnommen, filtriert und mit HNO<sub>3</sub> suprapur stabilisiert. Zur Beurteilung des Kurvenverlaufs müssen mindestens 20 Werte zur Beschreibung der Adsorptionsisotherme ermittelt werden. Da die Standzeiten für manche Materialien sehr lange sein können, sollte von Herstellerangaben ausgegangen, diese geprüft und die Probenahmezeitpunkte entsprechend angepasst werden.

### Kriterium der Einhaltung:

Die Kriterien für die Entscheidung, ob das Filtermaterial weiterhin einsatzfähig ist, sind erfüllt, wenn die Konzentrationen von 50 µg/L Cu, 500 µg/L Zn und/oder 9 µg/L Pb nicht überschritten werden.

Nach Einbau des Materials wird empfohlen alle 4 Jahre die aktuelle Beladung des Feststoffes im Vergleich zur maximalen Beladung, die für die Elemente Cu und Zn für die Zielkonzentration ermittelt werden zu prüfen; zur Beurteilung der maximal zulässigen Beladung wird die 80 % Beladung jenes Elementes herangezogen, das als Erstes die Zielkonzentration überschreitet. Die bisher gewonnenen Erfahrungen mit GSA in Betrieb zeigen, dass Feinanteile ins Filtermaterial eingetragen werden, die zu einer wesentlichen „scheinbaren Verkürzung“ der Standzeit beitragen können. Da die errechneten Standzeiten relativ hoch sind, kann dieses System vermutlich über einen langen Zeitraum gute Ergebnisse liefern. Allerdings sollte vor einem Filtertausch aufgrund der Kapazitätserschöpfung eine Prüfung der „Kapazität von Materialien ohne Adsorptionsisotherme“ durchgeführt werden (s.u.).

### Ermittlung der Kapazität von Materialien ohne Adsorptionsisotherme:

Für jene Materialien, von denen keine Adsorptionsisotherme vom Ausgangsmaterial bekannt ist, wird vorgeschlagen in einem vereinfachten Verfahren die Standzeit für die nächsten 4 Jahre sicherzustellen. Je nach Zulaufkonzentration und Verhältnis von Filterfläche:Einzugsfläche wird eine 4-Jahresfracht für die Elemente im Zulauf (z.B. Pb, Cu, Ni, Cr und Zn) bestimmt. Es wird eine Schwermetalllösung hergestellt, die im Bereich der tatsächlichen Konzentration liegt. Sollte keine aktuelle Zulaufkonzentration vorliegen, wird vorgeschlagen eine Ausgangskonzentration von 50 µg/L Pb, 250 µg/L Cu und 1000 µg/L Zn zu verwenden und auf die Einhaltung der Zielkonzentrationen im Ablauf von 9 µg/L Pb, 50 µg/L Cu und 5000 µg/L Zn zu prüfen.

## 5.2 Praktische Durchführung der Untersuchungen im downflow Modus (Beschickung von oben nach unten)

Bei der Kapazitätsprüfung, bei der die Beschickung von oben nach unten erfolgt, wird die Säule mit jenem Q, das sich laut  $k_f$ -Wert ergibt bzw. mit leichtem Überstau betrieben.

Das vor Ort gesammelte Material wird in eine 32 mm Säule über einer Glasdränage mit Filterfritte gefüllt, und mit einer Jahresniederschlagsmenge gespült. Danach wird eine 4-Jahresfracht der Schwermetalllösung von oben nach unten über die Säule filtriert; zur Beurteilung wird entweder der Verlauf der 4 einzelnen Jahresfrachten als Mischprobe der letzten 2 L der jeweiligen Halbjahresniederschlagsmenge (4 L für ein Flächenverhältnis von 1:15, bzw. 28 L bei einem Flächenverhältnis von 1:100) herangezogen oder alternativ wird eine Mischprobe der letzten 2 L nach einem Durchgang von 4-Jahresfrachten (bzw. 16 L) gesammelt. Aus dieser Mischprobe wird eine repräsentative Teilprobe entnommen, filtriert und analysiert. Alle Ablaufproben sollen unter den Zielkonzentrationen von 9 µg/L Pb, 50 µg/L Cu und 500 µg/L Zn liegen.

Da das Verfahren auch für betriebliches Abwasser eingesetzt wird, sollte die Ausgangskonzentration und das Flächenverhältnis an die Herstellerinformationen angepasst werden.

### Versuchsaufbau und Probenahme:

Die Versuchsanordnung und Probenahme war wie für den upflow Modus.

### Kriterium der Einhaltung:

Siehe oben.

### Ermittlung der Kapazität für den Mineralölrückhalt

Die Kapazitätsprüfung für Mineralöl wird analog dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag 1:15 nach der Kapazitätsprüfung für die Schwermetalle durchgeführt.

Kriterium:

95 % Rückhalt einer 4-Jahresfracht

## 6. Ergebnisse der Versuche nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag

Nachdem sich die Versuche analog zur DIBt-Methode (2005) vom Versuchsansatz bewährt haben, wurde die Detailausführung an die Filtersubstrate und die ausgewählten Jahresfrachten angepasst.

### 6.1 Ergebnisse der Versuche nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag – Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ ) 1:15

#### 6.1.1 Ergebnisse der Infiltrationsratenbestimmung (1:15)

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ein Maß der Infiltrationskapazität, war für das bodenbasierte Substrat, die technischen Filtermedien und Quarzsand sehr verschieden. Die hydraulische Leitfähigkeit zu Beginn reichte von  $k_f$   $3,7 \cdot 10^{-3}$  m/s für die Sandsäule bis  $k_f$   $4,1 \cdot 10^{-4}$  m/s für die BA-Säule. Die Messungen der hydraulischen Leitfähigkeiten der technischen Filtermaterialien und von Quarzsand, die vor Start und nach Ende des Partikelrückhaltexperiments durchgeführt wurden (Tabelle 4), waren annähernd gleich ohne offensichtliches Anzeichen einer Systemverstopfung. Die technischen Filtermaterialien halten die hydraulische Leistung in allen Versuchsreihen aufrecht. Nach der Aufbringung der ersten 10 g Millisil W4 reduzierte sich die hydraulische Leitfähigkeit des Bodenfilters BA von  $k_f$   $4,7 \cdot 10^{-4}$  m/s auf  $k_f$   $7,6 \cdot 10^{-5}$  m/s. Die Teilchen, die vor und nach der Schadstoffbelastung aufgebracht wurden, dienten der Bewertung der Reinigungsleistung in Hinblick auf die Entfernung von Partikeln aus dem Zulauf und des Verstopfungsrisikos, das typischerweise ein häufiges Problem in bodenbasierten Filtersystemen ist. Das Material BB wurde aufgrund der Ergebnisse in der BOKU Prüfung nach DIBt-Prüfmethode (2005) von den Versuchen ausgeschlossen.

Tabelle 4: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten (m/s) der Filtermaterialien TF If, TF IIb, BA und Quarzsand zu Beginn und Ende des Versuchs

Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (m/s) der Filtermaterialien TF If, TF IIb, BA und Quarzsand vom Start und Ende des Versuchs		
Filtermaterialien	$k_f$ Start	$k_f$ Ende
TF If	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
TF IIb	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
BA	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Quarzsand	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$2,76 \cdot 10^{-3}$

Die hydraulische Leitfähigkeit hängt auch wesentlich von der Einbringung des Substrats in die Säule ab, dies ist besonders bei Boden schwierig, Versuche am Bodenfilter, aus dem das Material BA gewonnen wurde, haben in der Praxis hydraulische Leitfähigkeiten zwischen  $k_f$   $8,4 \cdot 10^{-5}$  und  $1,3 \cdot 10^{-4}$  m/s nach einer Betriebszeit von ca. 3 Jahren ergeben.

#### 6.1.2 Ergebnisse der Partikelretention I und II (1:15)

In der Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Partikelretention I, II und III der Filtermaterialien TF If, TF IIb, Quarzsand und des Bodens BA mit der Prüfanordnung für das Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ ) von 1:15 dargestellt. Dabei wurden nach jeder Zugabe die ersten drei Liter beprobt. Aus Anteilen der gesammelten ersten drei Liter wurde je Partikelzugabe eine Mischprobe hergestellt.

## Ergebnisse der Versuche nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag

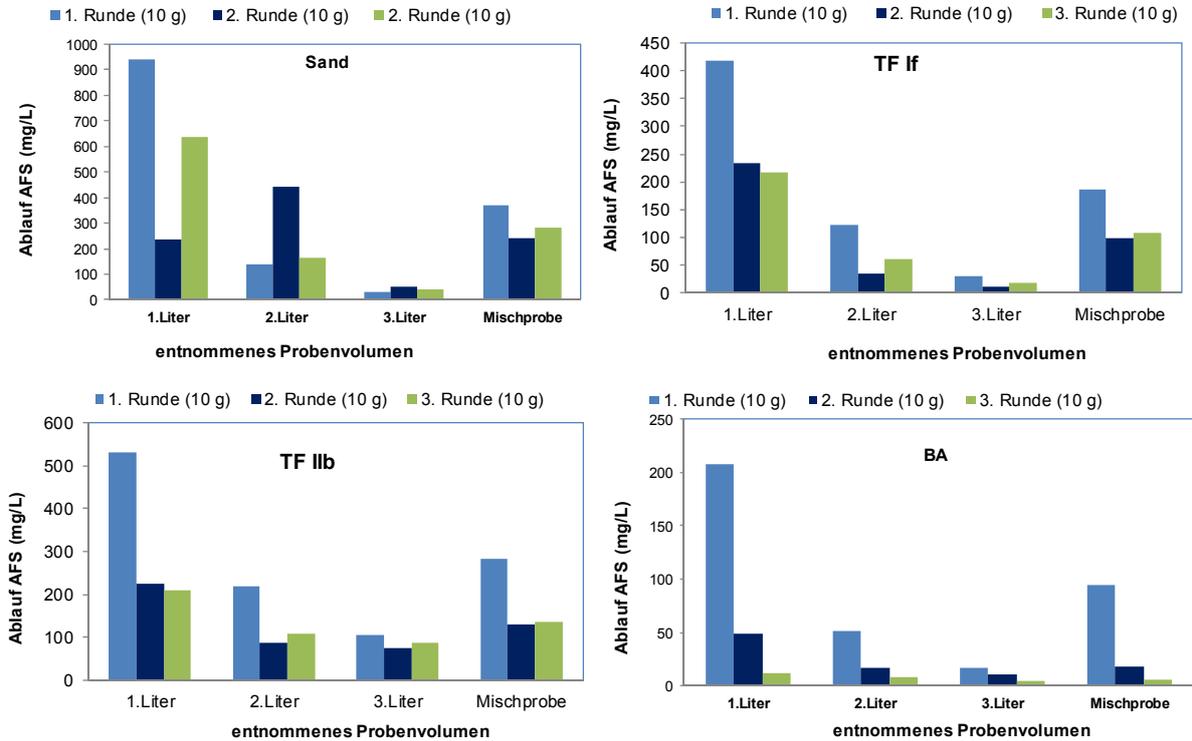


Abbildung 2: AFS Ablaufkonzentrationen in mg/L der Filtermaterialien TF If, TF IIb, Quarzsand (S) und BA

Abbildung 2 zeigt, dass die AFS-Konzentration im Ablauf zu Beginn des Experiments (1. Zeitabschnitt) zumeist größer war, als in den darauf entnommenen Proben des 2. und 3. Zeitabschnitts (2. Liter und 3. Liter). Ebenfalls waren die Konzentrationen der Partikelretention I höher als die Partikelretention II (2. und 3. Zugabe), obwohl zwischen den Partikelretentionen Partikel aufgebracht wurden. Da in vorhergehenden Experimenten gezeigt werden konnte, dass die höchsten AFS-Konzentrationen zu Beginn emittiert werden, wurde von der Ad-hoc-Gruppe beschlossen, dass der Ablauf sofort nach Start der Spülung der Säulen beprobt werden soll (1. Liter). Für die Bewertung des Partikelrückhalts wurde die Konzentration an AFS der ersten 3 Liter des Ablaufs herangezogen. Die AFS-Ablaufkonzentrationen betragen im 1. Liter für TF If 420 mg/L, für TF IIb 530 mg/L, für Quarzsand 938 mg/L und für BA 208 mg/L nach der ersten Quarzmehlzugabe (Partikelretention I). Bezogen auf die mittleren Konzentrationen der drei Liter zeigten alle Filtermaterialien eine Effizienz des Partikelrückhalts > 89 % für eine Gesamtzugabe von 10 g Quarzmehl.

Die Leistung der einzelnen Filtersäulen in Bezug auf die AFS (bezogen auf eine Partikelzugabe von 30 g) ist in der Abbildung 3 dargestellt. Die Entfernungsrates nahm nach jeder Aufbringung von Quarzmehl stetig zu. Beim bodenbasierten Filtermaterial BA sank nach der dritten Aufbringung von Quarzmehl die hydraulische Leistung, was auf eine Verstopfung des Filtermaterials hinweist.

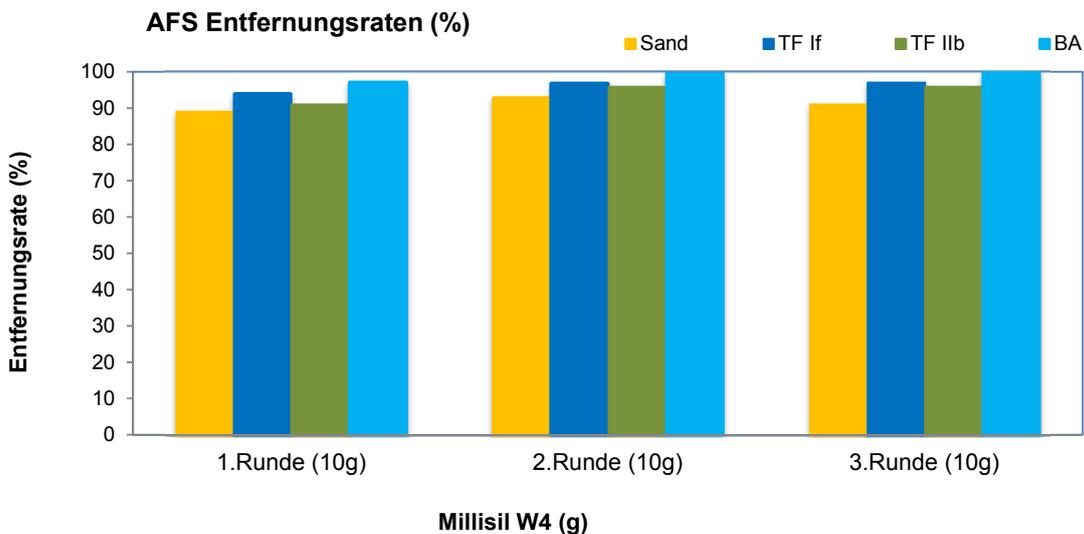


Abbildung 3: Entfernungsraten von Millisil W4 (%) in den verschiedenen Filtersäulen

Während der Partikelrückhalteversuche konnte rein optisch festgestellt werden, dass sich zwischen dem aufgebracht Quarzmehl und dem darunter liegenden Bodenmaterial, eine Schicht gebildet hat, die den Filter verschließt. Unter den beobachteten Filtermaterialien war der Partikelrückhalt des Bodenfilters BA mit > 95% besser als der der anderen Filtermaterialien TF If, TF IIb und Quarzsand. Allerdings nahm die Infiltrationsrate für BA nach der Zugabe von 30 g Quarzmehl von 100 mL/min auf 5 mL/min ab. Der Gesamtdurchfluss von 600 L entspricht einem 7 Jahresniederschlag.

Die von der ÖNORM B 2506 Teil 2 geforderte Entfernungsrate von 80 % wurde von allen Materialien erreicht.

### 6.1.3 Ergebnisse des Schwermetallrückhalts (1:15)

Die Schwermetallkonzentrationen und Entfernungsraten bei einem Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ ) 1:15 sind von den zusammengesetzten Filtermaterialien TF If und TF IIb, dem Bodenmaterial BA und dem Filtermaterial Quarzsand in der Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse der Säulenversuche ( $\mu\text{g/L}$ ) und der berechneten Entfernungsraten für Pb, Cu und Zn (%) der Filtermaterialien Quarzsand, TF If, TF IIb und BA

Probenbezeichnung Filtermedien	Vol. (L)	Pb ( $\mu\text{g/L}$ )				Cu ( $\mu\text{g/L}$ )				Zn ( $\mu\text{g/L}$ )			
		Sand	TF If	TF IIb	BA	Sand	TF If	TF IIb	BA	Sand	TF If	TF IIb	BA
Zulauf (Serie 1)	84±5	121	95,8	128	91,8	113	116	133	102	142	128	138	113
Ablauf 1	28±2	<0,5	<0,5	1,1	<0,5	<1,0	1,4	3,6	3,6	5,4	10,4	6,2	<3,0
Ablauf 2	28±2	<0,5	<0,5	0,8	<0,5	<1,0	<1,0	3,1	3,1	5,1	<3,0	7	<3,0
Ablauf 3	28±2	<0,5	<0,5	0,9	<0,5	<1,0	<1,0	3,0	3,0	9,2	4,1	10,2	<3,0
Ablaufmittelwert	84±5	<0,5	<0,5	0,9	<0,5	<1,0	0,8	3,2	3,2	6,6	5,3	7,8	<3,0
Entfernungsraten		99,6	99,5	99,3	99,5	99,1	99,3	97,6	96,9	95,4	95,9	94,3	98,7
Zulauf (Serie 1)	84±5	475	484	526	495	530	537	560	560	531	547	563	506
Ablauf 4	28±2	0,5	<0,5	4,6	1,6	4,8	1,5	7,9	7,9	58,5	9,1	9,1	15,2
Ablauf 5	28±2	<0,5	<0,5	5,9	1,6	36,8	1,3	8	8	193	84	14,5	17,3
Ablauf 6	28±2	1,1	<0,5	8,8	2,7	84,7	1	10,3	10,3	272	3,5	21,2	20,3
Ablaufmittelwert	84	0,5	<0,5	6,4	2	42,1	1,3	8,7	8,7	174,5	32,2	14,9	17,6
Entfernungsraten		99,9	99,9	98,8	99,6	92,1	99,8	98,4	98,4	67,1	94,1	97,4	96,5
Zulauf Kupferdach	84±5	14,4	3,4	2,2	28,1	3250	3250	2610	2950	542	592	496	545
Ablauf 7	28±2	2,8	<0,5	17,5	3	686	18	42,4	134	502	12,8	27,9	13,7
Ablauf 8	28±2	13,5	<0,5	3,5	1,6	2030	25	68,5	134	595	3,3	41,7	13,7
Ablauf 9	28±2	22,3	<0,5	2,8	1,7	2460	16,2	108	165	581	10,1	64,3	70,5
Ablaufmittelwert	84±5	12,9	<0,5	7,9	2,1	1725	19,7	73	144	559	8,7	44,6	32,6
Entfernungsraten						46,9	99,4	97,2	95,1	-3,1	98,5	91	94
Zulauf Zinkdach	84±5	2,9	10,4	11,2	11,5	184	205	228	258	5560	5330	4800	6000
Ablauf 10	28±2	19,7	<0,5	2	1,5	1510	10,5	53,2	53,2	2910	26	665	611
Ablauf 11	28±2	21,4	<0,5	2,4	1,5	757	9,9	78,3	78,3	4630	84,2	1330	1030
Ablauf 12	28±2	21,9	<0,5	2,6	1,7	528	11,6	84,1	84,1	4950	182	1750	907
Ablaufmittelwert	84±5	21	<0,5	2,3	1,6	932	10,7	71,9	71,9	4163	97,4	1248	849,3
Entfernungsraten						-407	95	68	72	25	98	74	86
Zulauffracht (mg)		51,5	49,9	56,1	52,6	3435	345	297	325	569	554	504	602
Ablauffracht (mg)		2,9	<0,14	1,68	0,49	226,8	2,7	13	19	411,9	12,1	110,5	75,7
Fracht-Entfernung (%)		94,4	>99	97	99,1	33,8	99,2	95,6	94,2	27,6	97,8	78,1	87,4

Die Entfernungsraten der gelösten Fraktion der Schwermetalle im Gemisch von Kupfer, Blei und Zink konnte während der Untersuchungen in folgender absteigender Reihenfolge ermittelt werden: Pb > Cu > Zn. Für die Zulaufkonzentrationen von 100  $\mu\text{g/L}$  für Kupfer und Blei und 500  $\mu\text{g/L}$  für Zink, die den Konzentrationen von stark belasteten Straßenabwässern entsprechen, konnten die Filtermaterialien, außer Sand, in Bezug auf den gelösten Anteil von Kupfer, Blei und Zink Entfernungsraten von > 94 % erzielen. In Bezug auf die Entfernungsraten von Kupfer und Zink konnte zwischen den Kupferdachkonzentrationen (Zulaufkonzentrationen von 3000  $\mu\text{g/L}$  Cu und 500 mg/L Zn) und den

Zinkdachkonzentrationen (Zulaufkonzentrationen von 150 µg/L Cu und 5000 µg/L Zn) große Unterschiede beobachtet werden. Für die Konzentrationen von Dachabwässern erreichte das Filtermaterial TF If eine Entfernungsrate von Kupfer > 99 % und Zink > 94 %. Das Filtermaterial TF IIb zeigte bei der Behandlung von Abwässern eines Kupferdachs Entfernungsraten für Kupfer > 97 % und für Zink 74 %. Die Zulauf- und Ablaufkonzentrationen der synthetisch hergestellten Lösung für Straßenabwasser und deren dazugehörige Schwermetallkonzentration und die Zielwerte (basierend auf den Schwellenwerten der QZV Chemie GW) sind für Sand in Abbildung 4 für TF If in Abbildung 5, für TF IIb in Abbildung 6 und für BA in Abbildung 7 mit logarithmischer Skala dargestellt. Für die untersuchten Materialien bei Verwendung von Zulaufkonzentrationen, die den ursprünglichen Straßenabwasserkonzentrationen entsprechen (Serie 1 und 2), wurden die Entfernungsraten aller Schwermetalle laut Abscheidungskriterien 1 und 2 (für Cu 80 %, für Zn 50 % und für 100 µg/L Pb < 9 µg/L bzw. für 500 µg/L Pb 95 %) erreicht.

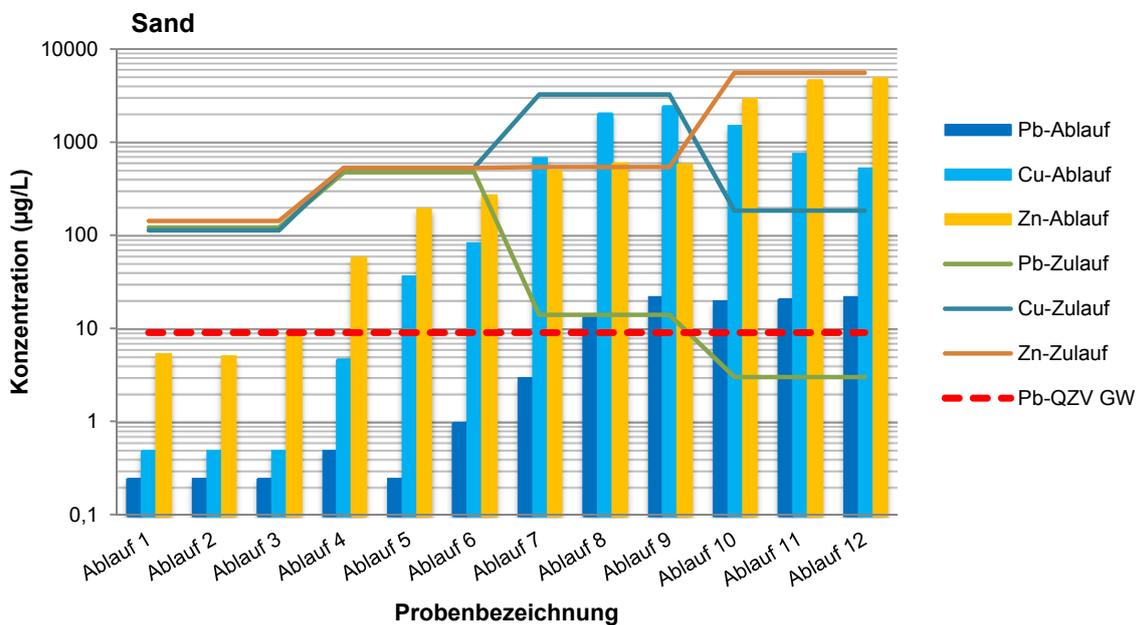


Abbildung 4: Ablaufkonzentrationen von Cu, Zn und Pb in µg/L des Filtermaterials Quarzsand

Ergebnisse der Versuche nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag

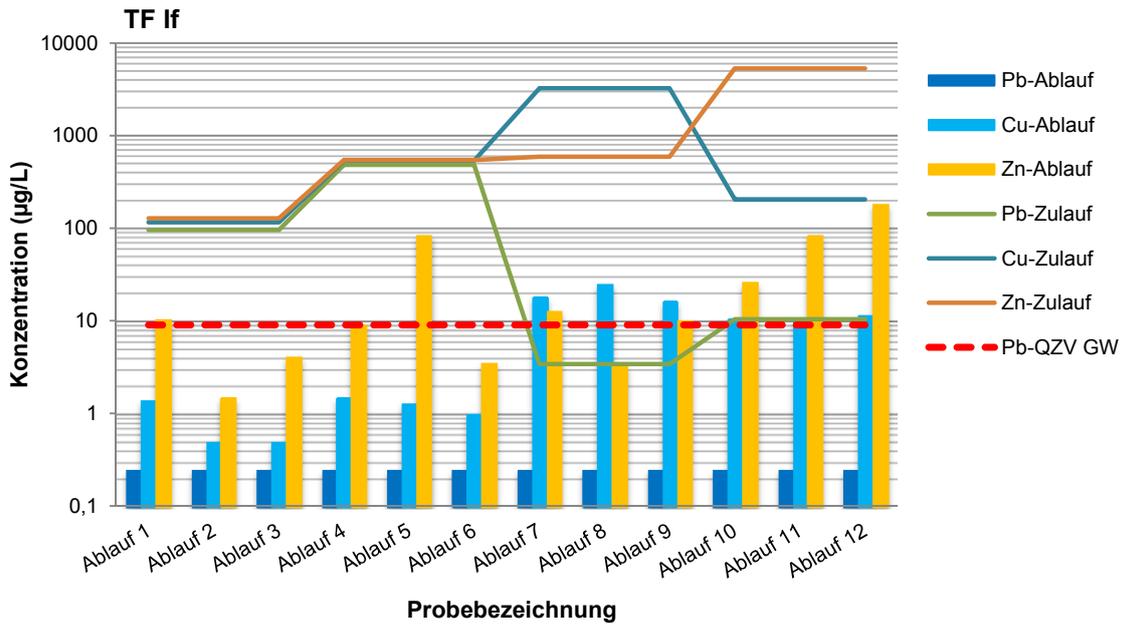


Abbildung 5: Ablaufkonzentrationen von Cu, Zn und Pb in µg/L des Filtermaterials TF If

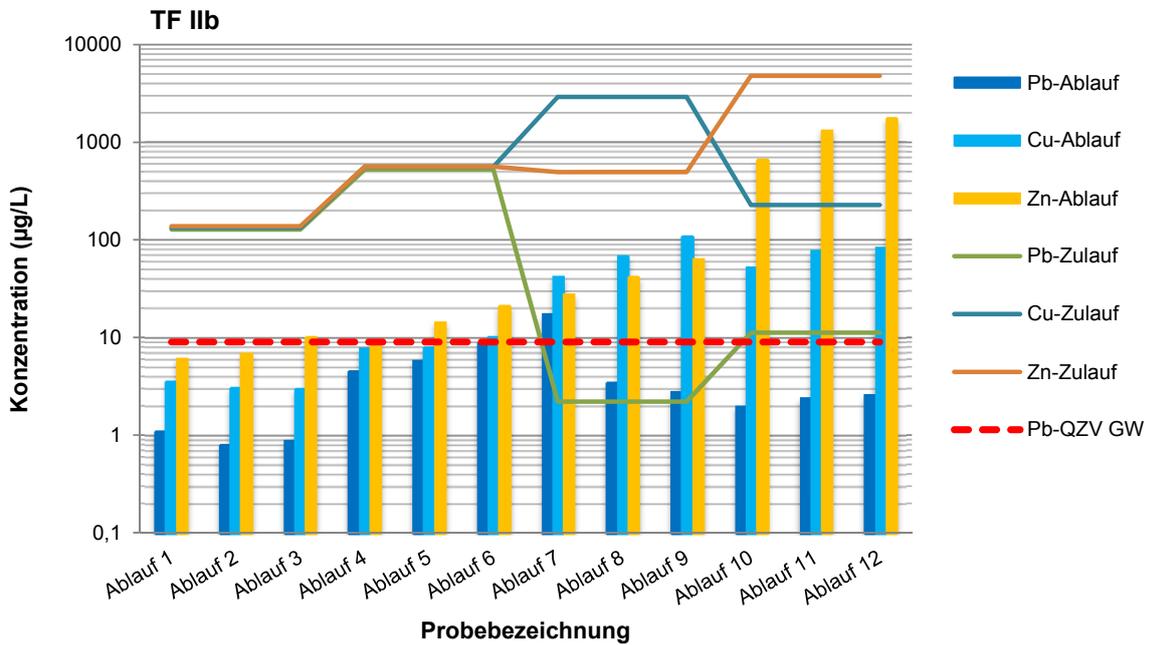


Abbildung 6: Ablaufkonzentrationen von Cu, Zn und Pb in µg/L des Filtermaterials TF IIb

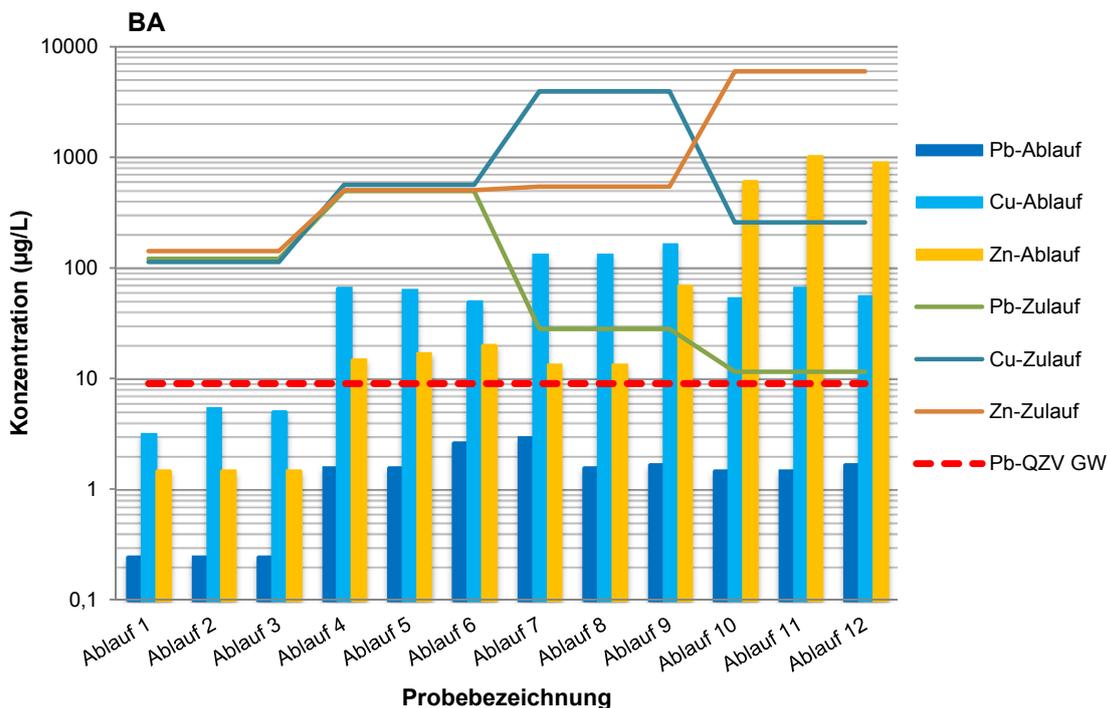


Abbildung 7: Ablaufkonzentrationen von Cu, Zn und Pb in µg/L des Filtermaterials BA

Vergleicht man die Ergebnisse der 4 Filtermaterialien aller Versuche, zeigten die Materialien TF If, TF IIb und BA die besten Entfernungsraten für gelöste Schwermetalle. Die Entfernungsraten von Kupfer, Blei und Zink (> 95 %) während der ersten Versuche sind für alle 4 Filtermaterialien (Quarzsand, TF If, TF IIb und BA) vergleichbar, wobei TF If und BA die effektivsten Schwermetallentfernungsraten von >99 % und auch sehr niedrige Bleiablaufkonzentrationen, die die Grenzwerte der AAEV (BGBl. Nr. 186/1996), bzw. Zielwerte QZV Chemie GW (2010 i.d.g.F.) und QZV Chemie OG unterschreiten, aufweisen. Das Filtermaterial TF IIb wies ähnlich gute Entfernungsraten für die 3 Versuchsserien wie TF If und BA auf. Jedoch war während der 4. Versuchsserie die Kupfer- und Zinkentfernung von TF If und BA besser als von TF IIb und auch der Unterschied zwischen den Entfernungsraten der Filtermaterialien nahm mit der Zeit zu. Sand zeigte in der ersten Versuchsreihe für alle Schwermetalle ähnliche Entfernungsraten.

Der Wirkungsgrad des Sandes verringerte sich jedoch signifikant während der dritten und vierten Versuchsreihe und endete in einer Remobilisierung von adsorbierten Schwermetallen aus vorherigen Experimenten.

Die Leistung der Filtermaterialien in Bezug auf die Schwermetallentfernung war bei niedrigen Konzentrationen vergleichbar, jedoch waren die Entfernungsraten des Quarzsandes, vor allem bei der Behandlung von Dachabwässern, sehr unterschiedlich. Die Filtermaterialien TF If und BA erzielten die effektivsten Schwermetallentfernungsraten (Tabelle 5). Bezüglich der Serie 2 (500 µg/L) wurde von allen Filtermaterialien der Großteil von Blei, Kupfer und Zink entfernt, wobei BA und TF If die größten Entfernungsraten mit 98 % erzielten. TF If und BA waren die effektivsten und Sand das ineffektivste Filtermaterial.

Bei der Behandlung von Kupferdachabläufen wurden mit Sand Entfernungsraten für Kupfer von 47 % für Kupfer erreicht. Die negative Zinkentfernungsraten zeigt, dass bei hohen Kupferkonzentrationen im Zulauf, das zuvor adsorbierte Zink wieder mobilisiert wird. Obwohl bei den Dachabflüssen im Zulauf kein Blei zudosiert wurde, konnten im Zulauf und im Ablauf Bleikonzentrationen von 3 bis 22 µg/L festgestellt werden, was wiederum auf eine Mobilisation von zuvor adsorbiertem Blei von der Oberfläche des Zulaufgefäßes und / oder des Filtermaterials zurückzuführen ist. Nach der Behandlung von

Zinkdachabflüssen konnten Entfernungsraten von Zink von 25 % und Freisetzungen von Kupfer von 400 % erzielt werden. Das durch den vorherigen Kupferdachversuch adsorbierte Kupfer wurde während des darauf folgenden Zinkdachversuchs wieder mobilisiert und lieferte dadurch 5 Mal höhere Ablauf- als Zulaufkonzentrationen. TF If, TF IIb und BA wurden während der Säulenversuche mit denselben Konzentrationen von Kupfer und Zink beschickt. Obwohl bei den Kupfer- und Zinkdachversuchen kein Blei zugesetzt wurde, konnten doch immer wieder geringe Konzentrationen im Zulauf und im Ablauf gemessen werden. Dies ist wahrscheinlich auf eine Kontamination aus den Glasvorlagebehältern zurückzuführen; jedenfalls wurde auf eine stark saure Reinigung zwischendurch verzichtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kriterien der ÖNORM B 2506 Teil 2 über den gesamten Versuchsverlauf von den Materialien, außer von Sand, eingehalten wurden und dass die Entfernungsraten für die technischen Filtersubstrate TF I und TF II ähnlich gut bzw. besser als jene des Bodenfilters BA waren.

Für zinkbelastetes Wasser ist eine Pufferung durch karbonathaltige Filterelemente oder Filterfüllungen von großer Bedeutung, da bei höheren pH-Werten Zinkkarbonate und -hydroxide ausfallen, die entweder im Filterelement direkt oder in den obersten Zentimeter der Sickerstrecke herausgefiltert werden, weshalb eine gute Pufferkapazität wichtig ist. Die Ergebnisse lagen für alle Varianten in derselben Größenordnung. Für die Filtermedien BA, TF IIb und Quarzsand wiesen die Kupferablaufkonzentrationen Werte von < 100 µg/L bis 2460 µg/L auf. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse und Anforderungen der ÖNORM B 2506 Teil 2 an das Filtermaterial von 80 % Kupferentfernung in dieser Studie zeigen sich die Materialien TF If, TF IIb und BA als Filtermaterialien für Vor-Ort-Versickerungsanlagen von Kupfer- bzw. Zinkdachabflüssen effizient und würden die Kriterien erfüllen. Quarzsand zeigte als Filtermaterial geringere bis gar keine Kupfer- bzw. Zinkentfernung bei Dachabflüssen und erfüllt deswegen die Kriterien nicht.

### 6.1.4 Ergebnisse des Mineralölrückhalts (Diesel als Prüfsubstanz) (1:15)

Als Prüfsubstanz des Mineralölrückhalts wurde so viel Diesel auf die Säulen aufgebracht, dass dies einer maximalen jährlichen österreichischen Abflusskonzentration bei Starkregenereignissen von 5 mg/L KW-Index entsprach (Tabelle 6). Das Filtermaterial TF If mit und ohne Aktivkohle wurden als Varianten verwendet, um den Einfluss von Aktivkohle auf die Reinigungsleistung zu ermitteln. TF If mit Aktivkohle und der Boden BA lieferten Ablaufkonzentrationen, die unter der Bestimmungsgrenze von 0,1 mg/L KW-Index lagen. Das Filtermaterial TF If, das keine Aktivkohle enthielt, Quarzsand und TF IIb erzielten Ablaufkonzentrationen zwischen < 0,1 mg/L und 0,2 mg/L KW-Index. In der Tabelle 6 sind die einzelnen Filtermaterialien, die Menge der zugegebenen Prüfsubstanz (mg) mit dem beschickten Gesamtvolumen (Wasser in L) und den dazugehörigen Ablaufkonzentrationen (mg/L KW-Index) dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Versuche mit der Prüfsubstanz Diesel (mg/L) und den Filtermaterialien TF I+AK, TF If, TF IIb, Quarzsand und BA mit einem Flächenverhältnis 1:15

Filtermaterial	Proben- bezeichnung	Zudosierte Dieselmenge	beschicktes Volumen mit RO-Wasser	KW-Index
		(mg)	(L)	(mg/L)
<b>TF If m AK</b>	TF If + AK 1	105	21	<0,1
	TF If + AK 2	105	21	<0,1
	TF If + AK 3	105	21	<0,1
	TF If + AK 4	105	21	<0,1
<b>TF If</b>	TF If 1	105	21	<0,1
	TF If 2	105	21	0,1
	TF If 3	105	21	0,1
	TF If 4	105	21	0,2
<b>TF IIb</b>	TF IIb 1	105	21	0,2
	TF IIb 2	105	21	2,7 *)
	TF IIb 3	105	21	0,1
	TF IIb 4	105	21	3,0 *)
<b>Quarzsand</b>	S 1	105	21	0,1
	S 2	105	21	0,1
	S 3	105	21	0,1
	S 4	105	21	0,2
<b>BA</b>	BA 1	105	21	<0,1
	BA 2	105	21	<0,1
	BA 3	105	21	<0,1
	BA 4	105	21	0,1

\*) Proben mit Lösungsmittel verunreinigt (nach Auswertung der Diagramme ausgeschieden)

Die Zusammensetzung der Filtermaterialien war nicht ausschlaggebend für die Entfernung von Mineralöl, da alle Ablaufkonzentrationen, exklusive der Versuche mit Verunreinigungen (Substrat TF IIb: Proben TF IIb2 und TF IIb4), Werte zwischen < 0,1 mg/L und 0,2 mg/L KW-Index aufwiesen. Alle Filtermaterialien und Zusammensetzungen erzielten hervorragende Entfernungsraten der Prüfsubstanz Diesel. Dies zeigt, dass die Entfernung von Mineralöl hauptsächlich durch physikalische Bindung der Mineralölpartikel an das Filtermaterial bzw. durch Oberflächenphänomene entsteht. Laut Literatur kann davon ausgegangen werden, dass Öle und Schmierfette bevorzugt von GAC und Böden mit hohem Kohlenstoffgehalt aufgrund ihres hohen organischen Anteils entfernt werden. Die Versuche dieser Studie zeigten, dass auch Sand und technisches Filtermaterial ohne Aktivkohle ähnlich gute Ergebnisse erzielten.

### 6.1.5 Ergebnisse der Änderung der Infiltrationsrate und Remobilisierung der AFS (1:15)

Die Ergebnisse des Partikelrückhaltes Teil II (2. und 3. Zugabe von je 10 g Quarzmehl) sind in Abbildung 2 mit Entfernungsraten von ca. 89 bis > 90 % dargestellt, wobei der Sand mit 89 % die schlechteste Entfernungsrates zeigte.

Die Änderung der Infiltrationsrate ist in Tabelle 4 dargestellt. Die Durchlässigkeiten der technischen Filtermaterialien und des Sands änderten sich kaum; jene des Bodens BA schon. BA würde das Kriterium, dass die Durchlässigkeit um nicht mehr als 50 % zurückgehen darf, nicht einhalten.

Die Partikelfreisetzung war am größten von der Sandsäule mit < 2 % und damit wurde das Kriterium von allen Materialien eingehalten.

### 6.1.6 Ergebnisse der Remobilisierung der Schwermetalle während des Winterbetriebs (1:15)

Die beschickten Säulen wurden nach der letzten Partikelauflage austropfen lassen und mit Salzlösung beaufschlagt. Von allen Proben wurde Blei, Kupfer und Zink analysiert. Die Schwermetallfrachten in den Säulen bezogen auf die jeweilige Masse an Filtermaterial nach der Beaufschlagung und die Schwermetallausgangskonzentrationen in der NaCl-Lösung (5 g/L) sind in der Tabelle 7 und die Mittelwerte der Schwermetallkonzentrationen in den Ablaufproben der einzelnen Filtermaterialien in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 7: Darstellung der adsorbierten Schwermetallfrachten der Filtermaterialien (mg) und Konzentrationen der Schwermetalle in der aufgetragenen NaCl-Lösung (µg/L)

Schwermetalle	Schwermetallfracht in den Säulen (mg)				Schwermetalle in der Tausalzlösung (µg/L)	Zulässige Ablaufkonzentrationen (µg/L)
	TF If	TF IIb	BA	S		
Pb	49,8	54,6	52,1	48,6	2,8	9
Cu	342	309	303	98,5	11	
Zn	542	393	526	157	24,1	

Durch Auftaumittel wie z.B. Natriumchlorid (NaCl), die während der Winterperiode auf Straßenoberflächen aufgebracht werden, können in an Straßen angrenzenden Böden und Filtermaterialien Mobilisierungseffekte auftreten. Amrhein et al. (1993) zeigte in Laborstudien, dass NaCl in Abhängigkeit von der organischen Substanz und von vorhandenen Kolloiden Schwermetalle (wie Cr, Pb, Fe und Cu) freisetzen kann und dass diese Freisetzung vor allem dann auftrat, wenn der adsorbierte Natriumanteil hoch und die Ionenstärke schwach waren.

Von den Ablaufproben wurden 3 bis 5 Teilproben entnommen. Vom Material TF If wurde auch eine Mischprobe aus dem Ablauf gezogen, um eventuelle Peaks zu Beginn des Versuchs besser detektieren zu können. In diesem Fall, werden die Ergebnisse der Teilproben durch die Mischprobe gut wiedergegeben.

In der Salzlösung im Ablauf der Säulen nehmen die Konzentrationen von Pb, Cu und Zn über die Zeit mit zunehmender Durchflussrate ab. Dies legt nahe, dass die Schwermetalle durch den Kationenaustausch und oder durch die Komplexbildung von Chlorid mobilisiert werden. Bächström et al. (2004) untersuchte die Mobilisierung von Schwermetallen durch Auftausalze in der Umgebung eines Straßenrandes und fand heraus, dass die vorherrschenden Mobilisierungsmechanismen Ionenaustausch, Bildung von Chloridkomplexen und mögliche Kolloiddispersion sind. In dieser Studie konnten die Konzentrationen der remobilisierten Schwermetalle in der NaCl-Ablauflösung in folgender Reihenfolge festgestellt werden: Zn

> Cu > Pb. Die Filtersubstrate rangieren in Bezug auf den Remobilisierungseffekt wie folgt: Sand >> TF IIb > TF If = BA.

Tabelle 8: Schwermetallkonzentrationen ( $\mu\text{g/L}$ ) im Ablauf nach Spülung mit einer 5 g/L NaCl-Lösung

Substrat	Probenbezeichnung	Schwermetallkonzentrationen im Ablauf ( $\mu\text{g/L}$ )		
		Pb	Cu	Zn
Quarzsand	Ablauf 1	203	305	1377
	Ablauf 2	55,5	31,8	424
	Ablauf 3	63,2	43	676
TF If	Ablauf 1	5,4	17,9	37,4
	Ablauf 2	3,0	<4,0	13
	Ablauf 3	2,8	<4,0	<12
	Ablauf 4	2,7	<4,0	<12
	Ablauf 5	2,7	<4,0	<12
	Ablauf Mischprobe	3,3	4,9	15,9
TF IIb	Ablauf 1	13,9	38,8	121
	Ablauf 2	6,1	14,6	146
	Ablauf 3	3	14,1	186
	Ablauf 4	2,7	13,8	185
BA	Ablauf 1	5,9	15,8	30
	Ablauf 2	2,7	<4	<12
	Ablauf 3	2,9	<4	<12

Der Gesamtgehalt der remobilisierten Schwermetalle der Säulen wurde berechnet unter Verwendung der Konzentrationen der einzelnen Schwermetallparameter in den analysierten Ablaufproben und des dazugehörigen Durchflusses. Die Frachten der einzelnen remobilisierten Schwermetalle wurden als prozentueller Anteil der an den Filtermaterialien adsorbierten Gesamtgehalte berechnet. Tabelle 9 zeigt deutlich, dass die NaCl-Lösung keinen signifikanten Einfluss auf die Remobilisation hatte und dass der prozentuelle Anteil der remobilisierten Schwermetallfracht bezogen auf den Gesamtgehalt der adsorbierten Schwermetallfracht gering ist.

Tabelle 9: Schwermetallfrachten des adsorbierten und des rückgelösten Anteils von Pb, Cu und Zn in gewichteten mg pro Masse in der Säule bzw. % bezogen auf die sorbierte Menge

Parameter	Sorbierte Fracht (mg)				Rückgelöste Fracht (mg)				Rückgelöste Fracht (%)			
	TF If	TF IIb	BA	S	TF If	TF IIb	BA	S	TF If	TF IIb	BA	S
Pb	49,8	54,6	52,1	48,6	0,23	0,28	0,14	2,8	0,47	0,5	0,28	5,7
Cu	342	309	303	98,5	0,29	0,11	0,29	2,3	0,08	0,4	0,1	2
Zn	542	393	526	157	0,95	12,6	0,86	25,2	0,18	3,2	0,16	16

Es wurden nicht alle Teilproben bestimmt. Bezogen auf die Kriterien für die Remobilisierung von Schwermetallen von  $\text{Cu} \leq 50 \mu\text{g/L}$  und  $\text{Zn} \leq 500 \mu\text{g/L}$  ( $\text{Pb} \leq 9 \mu\text{g/L}$ ) wären BA, TF If und TF IIb für den Einsatz in entsprechenden Reinigungsanlagen geeignet. Es wird empfohlen für die Beurteilung gewichtete Mittelwerte oder Mischproben heranzuziehen.

Auch in diesem Fall wurden für Sand die höchsten Werte ermittelt.

### 6.1.7 Ergebnisse der Säureneutralisationskapazitätsprüfung (1:15)

Die Ergebnisse der Pufferkapazitätsprüfungen sind in Abbildung 8 dargestellt. In Deutschland ist in der DIBt-Prüfvorschrift (2005) "Zulassungsgrundsätze für Abwasserbehandelnde Flächenbeläge" ebenfalls ein pH Neutralisationstest vorgesehen. Im Protokoll des DIBt (2005) wurde vorgeschlagen, dass die Entwicklung von Methoden zur Prüfung der Eignung von Substraten für die Oberflächenwasserbehandlung von Dach- und Verkehrsflächen, Kurzfassung

## Ergebnisse der Versuche nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag

Experiment mit einem Start pH-Wert von  $3,0 \pm 0,1$  und einer Durchflussrate von  $200 \pm 10 \text{ L/(s*ha)}$  für 120 Minuten durchgeführt wird. Die Prüfung ist akzeptabel, wenn der pH-Wert des Sickerwassers über einen Zeitraum von mindestens 30 Minuten konstant  $\geq 6,5 \pm 0,1$  beträgt. In der vorliegende Studie wurde mit einem 5 cm Wasserüberstand gearbeitet, der bei massiven Regenfällen unter Feldbedingungen auftreten kann, was im Vergleich zur DIBt Prüfung (2005) zu einem viel höheren Durchfluss führte. Die Pufferkapazität hängt wesentlich von der Kontaktzeit zwischen Substrat und Zulauf ab.

Bei diesen Versuchen wurden die verschiedenen Filtermaterialien TF If, TF IIb, Sand und BA geprüft.

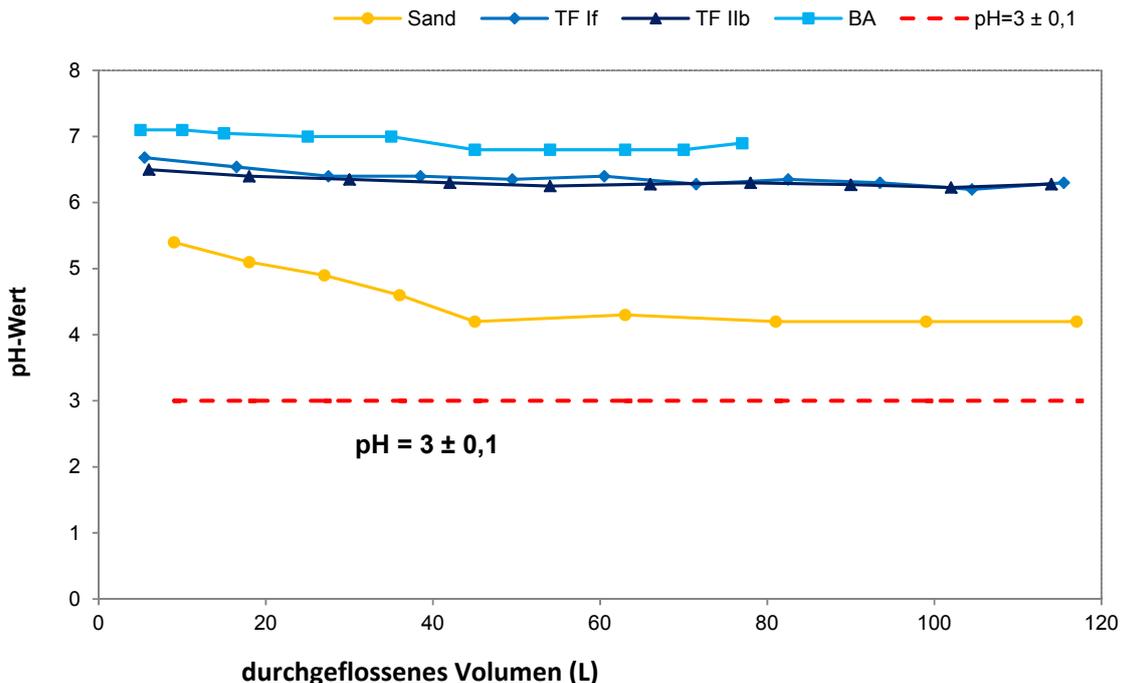


Abbildung 8: pH Pufferkapazität der Filtersubstrate, TF If, TF IIb, BA und Quarzsand bei einem Start pH-Wert von  $3,0 \pm 0,1$  im Zulauf

Die Reihung der Pufferkapazität der Filtersubstrate bei einem Start-pH-Wert von  $3,0 \pm 0,1$  ist Quarzsand < TF IIb < TF If < BA (Abbildung 8). Das Bodenfiltermaterial BA und die beiden technischen Filtermaterialien TF If und TF IIb haben eine gute Pufferkapazität, welche für den Rückhalt der Schadstoffe genutzt werden kann. In dieser Studie wird vorgeschlagen, dass das Filtermaterial akzeptabel ist, wenn der pH-Wert des Abflusses während einer Zeitperiode von 30 Minuten oder einem Durchfluss von 42 Liter im Überstaubetrieb größer  $6,0 \pm 0,1$  beträgt.

Die Kontaktzeit, die in der DIBt Prüfung (2005) verwendet wurde, war für alle Materialien viel größer als jene in dieser Studie. Die Mobilisierung von Cadmium nimmt bei einem pH von 6,5, jene der anderen Schwermetalle bei einem pH-Wert von < 6,0 zu (Scheffer, 2002); auch Genç-Fuhrman et al. (2007) untersuchten die Entfernung von Schwermetallen mit verschiedenen Filtersubstraten und fanden, dass Cu bei einem pH größer 6,5 als  $\text{CuCO}_3$  und Zn ab 8,5 als  $\text{Zn(OH)}_2$  vorliegt. Die Löslichkeitsprodukte sind für  $\text{Cd(OH)}_2$   $7,2 \times 10^{-15} \text{ mol}^3/\text{L}^3$ , für  $\text{CuCO}_3$   $1,4 \times 10^{-10} \text{ mol}^3/\text{L}^3$ ,  $\text{Cu(OH)}_2$   $4,8 \times 10^{-20} \text{ mol}^3/\text{L}^3$  und für  $\text{Zn(OH)}_2$   $2,3 \times 10^{-17} \text{ mol}^3/\text{L}^3$ . Da Cadmium im Straßenablauf nur in sehr geringen Konzentrationen vorkommt und als nicht relevant gilt, wird als Kriterium für die Prüfbedingungen des „vorläufigen“ Methodenvorschlags gemeinsam mit der Ad-hoc-Gruppe ein Ablauf pH-Wert von  $\geq 6,0 \pm 0,1$  vorgeschlagen.

Die in dieser Studie getesteten Filtermaterialien TF If, TF IIb und BA halten dieses Kriterium ein.

## 6.2 Ergebnisse Versuche nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag – Flächenverhältnis 1:200

Da besonders technische Filtermaterialien eine sehr hohe hydraulische Leitfähigkeit aufweisen, können derartige Anlagen auch für größere Flächenverhältnisse ausgelegt werden. In einem ersten Ansatz wurde eine Methode für ein Flächenverhältnis von 1:200 auf Anwendbarkeit geprüft. Da es eine Anlage (GSA H) im praktischen Betrieb mit dem Filtermaterial TF I mit einem Flächenverhältnis von 1:400 gibt, wurde TF If zum Vergleich herangezogen. In dieser Studie wurde das technische Filtermaterial TF If in Bezug auf ein Flächenverhältnis von 1:200 untersucht, da davon ausgegangen wurde, dass sowohl die Partikelfracht als auch die Schwermetallfracht durch ein Sedimentationsbecken stark vermindert wird (> 50 %) und die Schwermetalle außerdem nur zu einem Teil gelöst vorliegen.

### 6.2.1 Ergebnisse der Infiltrationsratenbestimmung (1:200)

Siehe Ergebnisse in der Langfassung.

### 6.2.2 Ergebnisse der Partikelretention I und II (1:200)

Die Partikelmenge für ein Flächenverhältnis 1:200 errechnete sich mit 400 g/Säule bei einem Jahresniederschlag von 1000 L. Davon wurden aber nur 100 L eingesetzt um die Versuchsdauer zu verkürzen. Die Zugabe erfolgte für den Teil I in 10 Portionen von 13 g bei je 10 L Durchfluss und für den Teil II mit 20 Portionen und 10 bis 20 L. Das Filtermaterial TF If wurde laut Versuchsanordnung für ein Flächenverhältnis von 1:200 geprüft. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 9 und in der Abbildung 10 dargestellt.

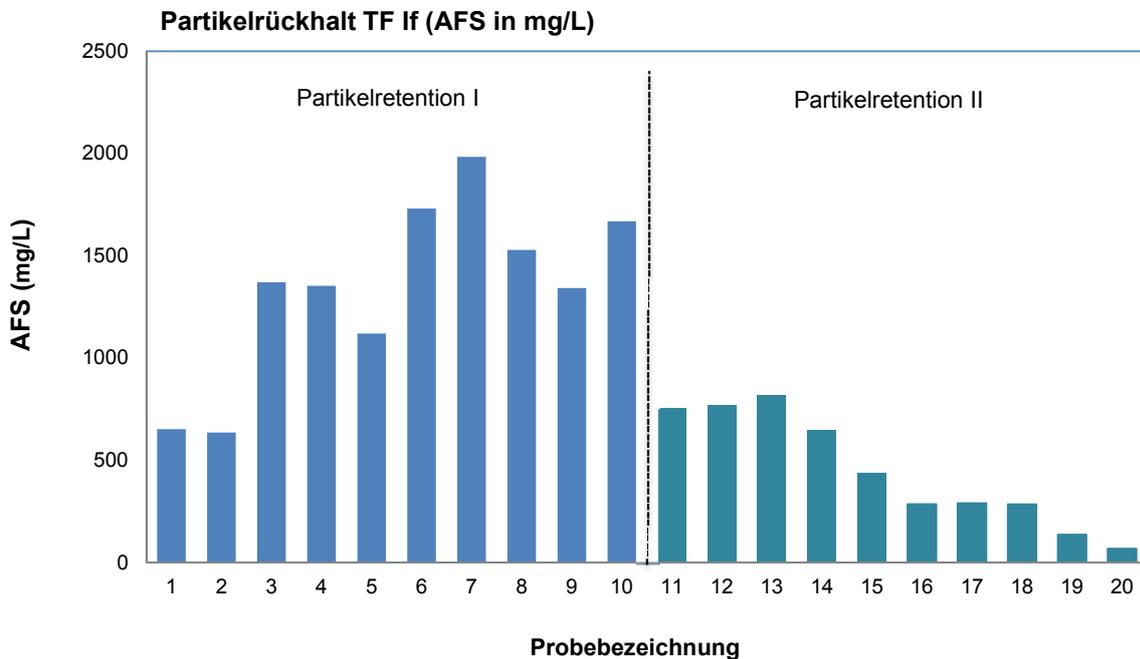


Abbildung 9: AFS Ablaufkonzentrationen (mg/L) von TF If der Partikelretention I und II

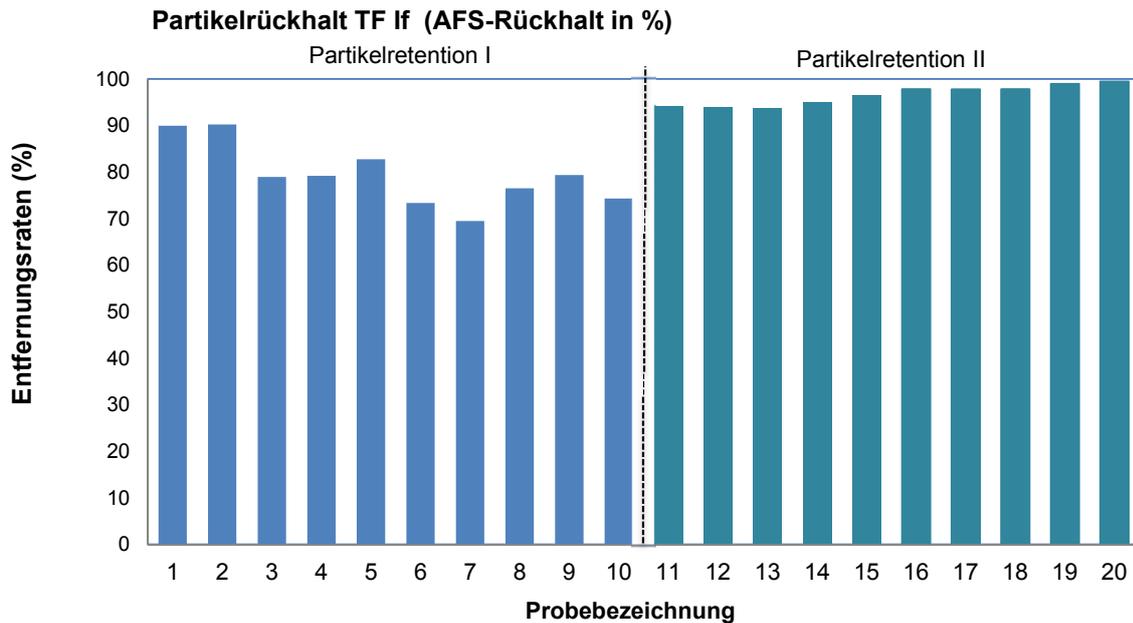


Abbildung 10: AFS-Rückhalt (%) von TF If der Partikelretention I und II

Während der Partikelretention I konnte nicht nach jeder der einzelnen Quarzmehlzugaben von 13 g ein Anstieg der AFS im Ablauf festgestellt werden. Dies zeigt, dass die Mobilisierung von Partikeln der vorherigen Quarzmehlzugabe vermindert wird. Die Partikelentfernungsraten während der Partikelretention I liegt zwischen 70 % und 90 %. Im Vergleich zur Partikelretention I weist die Partikelretention II niedrigere AFS-Werte auf. Nach den einzelnen Quarzmehlzugaben während der Partikelretention II nahm die AFS-Konzentration eher ab.

Dies deutet darauf hin, dass die Partikel im Porenraum der Filtermaterialien zurückgehalten wurden und sich ein Filterkuchen gebildet hat, und dadurch bessere Entfernungsraten erzielt wurden. Ebenfalls konnte eine Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit von 1,5 L/min während der Partikelretention I auf 0,06 L/min am Ende der Partikelretention II festgestellt werden, was wiederum auf die Bildung eines Filterkuchens hindeutet.

### 6.2.3 Ergebnisse des Schwermetallrückhalts (1:200)

Die Ergebnisse der Schwermetallversuche sind für das Filtermaterial TF If bei einem Flächenverhältnis von 1:200 in Tabelle 10 dargestellt. Die Zulaufkonzentrationen der Schwermetalle (Pb, Cu und Zn) waren 4 Mal größer als die typischen NS-Ablaufkonzentrationen (außer für Pb) bei hochrangigen Straßen (Göbel et al., 2007). Während des Versuches sollte je eine 4-Jahresfracht an Schwermetallen (Pb, Cu und Zn) aufgebracht werden. Dazu wurden andere Konzentrationsverhältnisse gewählt als bei den Versuchen mit einem Flächenverhältnis 1:15, da zwischenzeitlich die mittlere Pb-Konzentration des Straßenabwassers diskutiert wurde, wurde diese auf 50 µg/L statt 100 µg/L angepasst. Die Konzentrationen für Cu und Zn wurden ebenfalls verändert, um eine Löslichkeit bei einem pH-Wert von 5,0 sicherzustellen. Diese Vorgangsweise wurde mit der Ad-hoc-Gruppe diskutiert und von dieser akzeptiert.

Die Entfernung von Blei, Kupfer und Zink war hoch, trotz der hohen berechneten Beladung bei diesem höheren Flächenverhältnis. Die Entfernung der gelösten Schwermetallfraktion konnte in folgender abnehmender Reihenfolge festgestellt werden: Pb > Cu > Zn. Die Ablaufkonzentrationen von Blei waren unter oder bei der Bestimmungsgrenze von 0,5 µg/L und die Entfernungsraten von Blei war > 99,7 %. Die Ablaufkonzentrationen von Kupfer rangierten zwischen 1,6 und 8,8 µg/L und ergaben eine Entfernungsraten für Kupfer von 98,8%, die Ablaufkonzentrationen von Zink lagen zwischen 13,5 und 154 µg/L und ergaben für Zink eine Entfernungsraten von 95,8 %. Der pH-Bereich des Zulaufes betrug  $5,5 \pm 0,2$  und der Ablauf wies einen neutralen pH-Wert von  $7,6 \pm 0,4$  auf.

Tabelle 10: Ergebnisse der Säulenversuche (µg/L) von TF If bei einem Flächenverhältnis von 1:200 und der berechneten Entfernungsraten für Pb, Cu und Zn

Probenbezeichnung	Konzentrationen (µg/L)			Entfernungsrate (%)		
	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
Zulauf filtriert	182	408	1630			
Zulauf nicht filtriert	217	417	1590			
Ablauf 1	<0,5	5,3	13,5	>99,7	98,7	99,2
Ablauf 2	<0,5	3,7	19,7	>99,7	99,1	98,8
Ablauf 3	<0,5	4,7	51,5	>99,7	98,9	96,8
Ablauf 4	<0,5	1,6	33,7	>99,7	99,6	97,9
Ablauf 5	<0,5	4,4	48,0	>99,7	98,9	97
Ablauf 6	<0,5	4,6	75,3	>99,7	98,9	95,3
Ablauf 7	<0,5	6	99,9	>99,7	98,5	93,8
Ablauf 8	<0,5	8,8	154	>99,7	97,9	90,4
Ablauf 9	<0,5	5,3	76,1	>99,7	98,7	95,3
Ablauf 10	0,5	5,3	106	>99,7	98,7	93,4
<b>Zulaufmenge gesamt (mg)</b>	<b>220</b>	<b>454</b>	<b>1771</b>			
<b>Ablaufmenge gesamt (mg)</b>	<b>&lt;0,5</b>	<b>5,5</b>	<b>74,5</b>			
<b>Entfernungsrate (%)</b>	<b>&gt;99,7</b>	<b>98,8</b>	<b>95,8</b>			

Während der Prüfung der Schwermetallretention blieb die Durchflussrate annähernd konstant (bei 1,2 L/min), obwohl in dem vorangegangenen Prüfschritt (Partikelretention I) 130 g Quarzmehl auf die Säule aufgetragen wurden.

In Abbildung 11 sind die Schwermetallfrachtzugaben auf die Jahre aufgeteilt in 0,4 Jahresschritten und die ermittelten Ablaufkonzentrationen dargestellt.

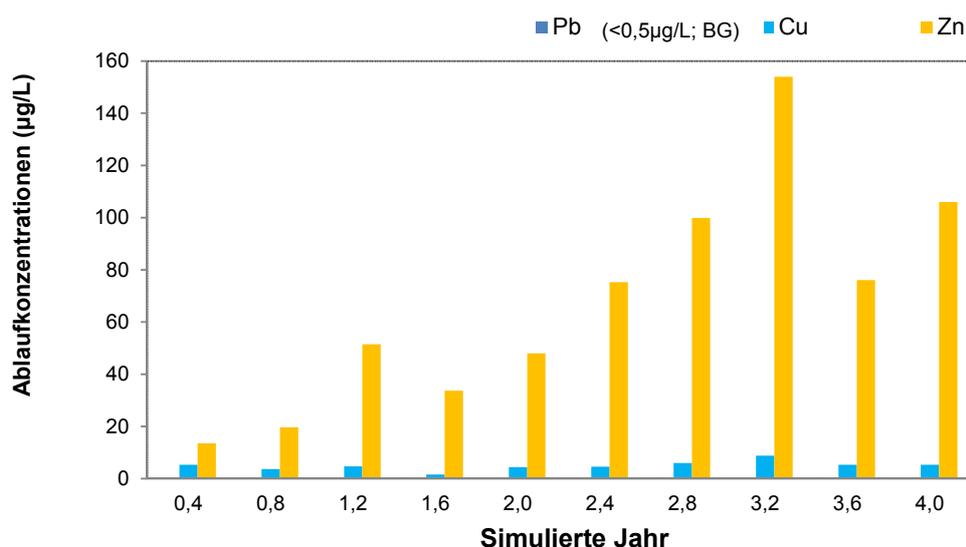


Abbildung 11: Ablaufkonzentrationen von Pb, Cu und Zn in µg/L des Filtermaterials TF If bei einem Flächenverhältnis von 1:200

Die durchgesetzten Frachten sollten jener von 4 Jahren entsprechen, da die Anlage laut QZV Chemie GW (2010) alle 4 Jahre überprüft werden soll. Als Prüfkriterien können ebenfalls die in der ÖNORM B 2506 Teil 2 festgelegten 80 % für Kupfer und 50 % für Zink herangezogen, oder speziell festgesetzt werden.

#### 6.2.4 Ergebnisse des Mineralölrückhalts (Diesel als Prüfsubstanz) (1:200)

Es wurden in 4 Chargen (insgesamt 5,60 g) Diesel auf der Oberfläche des Filtermaterials TF If aufgebracht und mit insgesamt 168 Liter RO-Wasser gespült. Die Ergebnisse des Mineralölrückhalts sind in der Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Ergebnisse der Versuche mit der Prüfsubstanz Diesel (mg/L) und dem Filtermaterial TF If mit einem Flächenverhältnis 1:200

Substrat	Probenbezeichnung	Zudotierte Dieselmenge (mg)	beschicktes Volumen mit RO-Wasser (L)	Ablauf KW-Index (mg/L)	Entfernungsrate (%)
TF If	TF If1	1400	42	0,2	< 99 %
	TF If2	1400	42	0,3	< 99 %
	TF If3	1400	42	0,3	< 99 %
	TF If4	1400	42	0,3	< 99 %

Die Prüfsubstanz Diesel konnte bis auf eine Ablaufkonzentration von ca. 0,3 mg/L KW-Index mit einer Entfernrungsrate von > 99% entfernt werden. Daraus resultiert eine durchschnittliche Beladung der 100 mm Säule mit TF If mit 5,55 g Diesel. Die Ablaufkonzentrationen waren während des gesamten Versuchs konstant.

Es wird vorgeschlagen die Entfernrungsrate von 95 % für Diesel anzuwenden. Das Kriterium wurde erfüllt.

#### 6.2.5 Ergebnisse der Partikelzugabe II und Änderung der Infiltrationsrate (1:200)

Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 und Abbildung 10 zu finden. Der Durchfluss ging von 0,74 L/min auf 0,06 L/min zurück.

#### 6.2.6 Ergebnisse der Remobilisierung der AFS (1:200)

Diese Versuche konnten nicht durchgeführt werden (siehe Methodenteil), weil der Durchfluss bereits sehr gering war.

## 7. Ergebnisse der Kapazitätsprüfung

### 7.1 Ergebnisse Kapazitätsprüfung im Zuge eines Zulassungsverfahrens für Schwermetalle in der 32 mm Säulen

Der Einsatz der 32 mm Säulchen erfüllt die in der Literatur angegebenen Randbedingungen wie: Verhältnis Korndurchmesser zu Säulendurchmesser entspricht 1:10 (Fanfan et al., 2005; Hilliges, 2007), Verhältnis Querschnitt der Säule zu Länge der Säule von 1:10 (Inczédy, 1966; Hilliges, 2007).

Die 32 mm-Säulen wurden von unten nach oben (upflow-Modus) mit einer Durchflussgeschwindigkeit die nur der Hälfte der maximalen Durchflussgeschwindigkeit entspricht (ermittelt als Durchflussrate mit einem Überstau von ca. 50 mm) betrieben und die Gleichgewichte zwischen Beladung und Wasserkonzentration unter optimierten Bedingungen ermittelt. In beiden Fällen wurde ein Schwermetallgemisch aus entweder 3 oder 5 Schwermetallen eingesetzt, wobei die Zulaufkonzentrationen nach Diskussion mit der Ad-hoc-Gruppe gegenüber dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag abgeändert wurden und diese betragen 50 µg/L Pb, Cr, Ni, 100 µg/L Cu und 400 µg/L Zn, weil die Bleikonzentration zu hoch erschien und Blei für die Kapazitätsprüfung als Prüfparameter in Frage gestellt wurde. Falls Blei in den zu überprüfenden Abwässern z.B. betrieblichen Abwässern nicht oder nicht in entsprechender Konzentration vorkommt, könnte man aus der Prüfung der Gleichgewichtskonzentration nicht auf die Beladung schließen. Da für Cu und Zn entweder ein zu hoher oder kein Schwellenwert in der QZVChemie GW enthalten ist, wurde ein Gemisch mit 5 Elementen gewählt, weil diese auch in realen Abwässern vorkommen, um die Gleichgewichtseinstellung, die sich aus Sorption bzw. Desorption ergibt, beobachten zu können. Nach der letzten Ad-hoc-Gruppensitzung am 04.11.2013 wurden neue Kriterien akzeptiert und es wurde der Vorschlag abgeändert. Die neuen Zielwerte sollen der Beurteilung einer 80 %igen Cu- und 50 %igen Zn-Entfernung erlauben und die Zielwerte von 9 µg/L Pb, 50 µg/L Cu und 500 µg/L Zn nicht überschreiten. Aus diesem Grund werden 3 Parameter mit Ausgangskonzentrationen von 50 µg/L Pb, 250 µg/L Cu und 500 µg/L Zn als ausreichend erachtet.

Die Laborversuche sollten erlauben, die Beladungskapazität von verschiedenen Filtermaterialien, die Entfernungsraten der Schwermetalle (Cr, Cu, Ni, Cu and Zn) und die Standzeit bis zum Durchbruch abzuschätzen. Die Konzentrationen im Zulauf lagen mit 50 bis 63,4 µg/L Pb, 111 bis 135 µg/L Cu und 435 bis 661 µg/L Zn in einem typischen Abwasserkonzentrationsbereich von verunreinigten Straßen. Die Ergebnisse in Abbildung 12 (Pb), Abbildung 13 (Cu) und Abbildung 14 (Zn) zeigen, dass die Filtermaterialien die Schwermetalllösungen sehr gut adsorbieren und dass sich zu Beginn Konzentrationen unter der Quantifizierungsgrenze einstellen. Es wurden Versuche mit TF I mit geringer und hoher Pufferkapazität (TF If) durchgeführt.

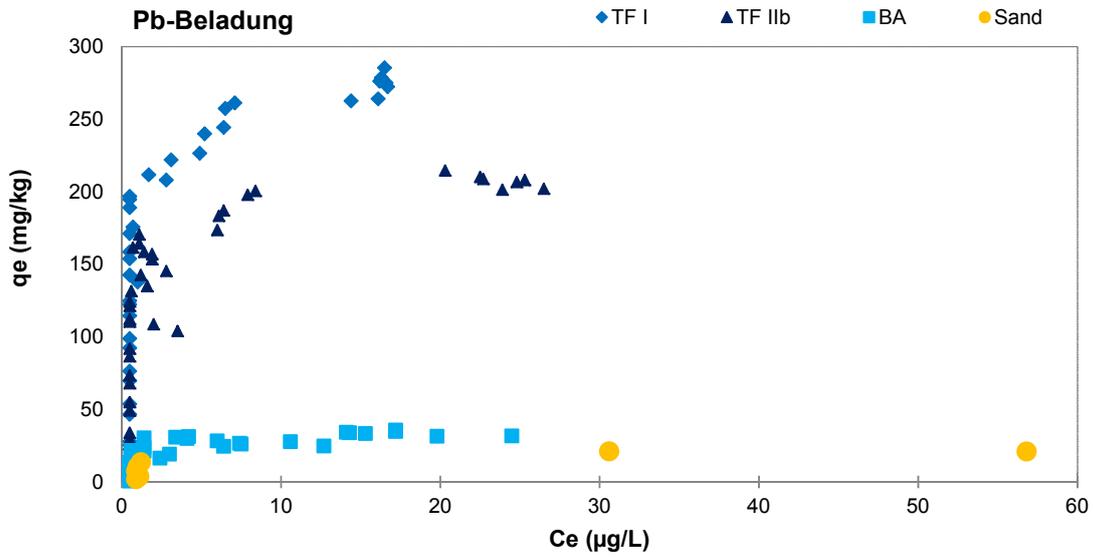


Abbildung 12: Pb Beladung Säulenversuch 32 mm, 1/2Q von unten nach oben (upflow)

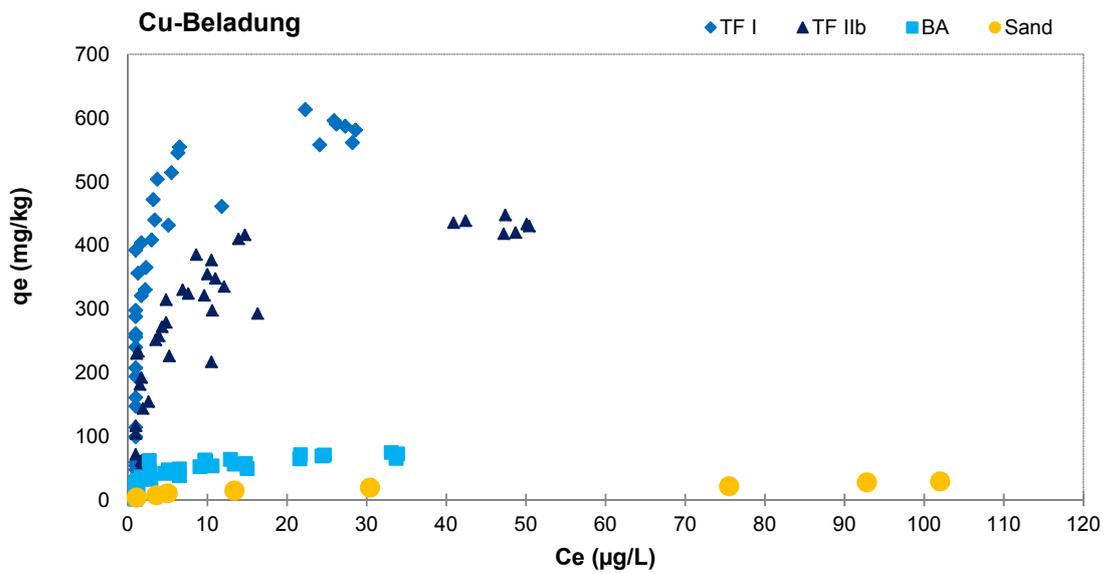


Abbildung 13: Cu Beladung beim Säulenversuch 32 mm, 1/2Q von unten nach oben (upflow)

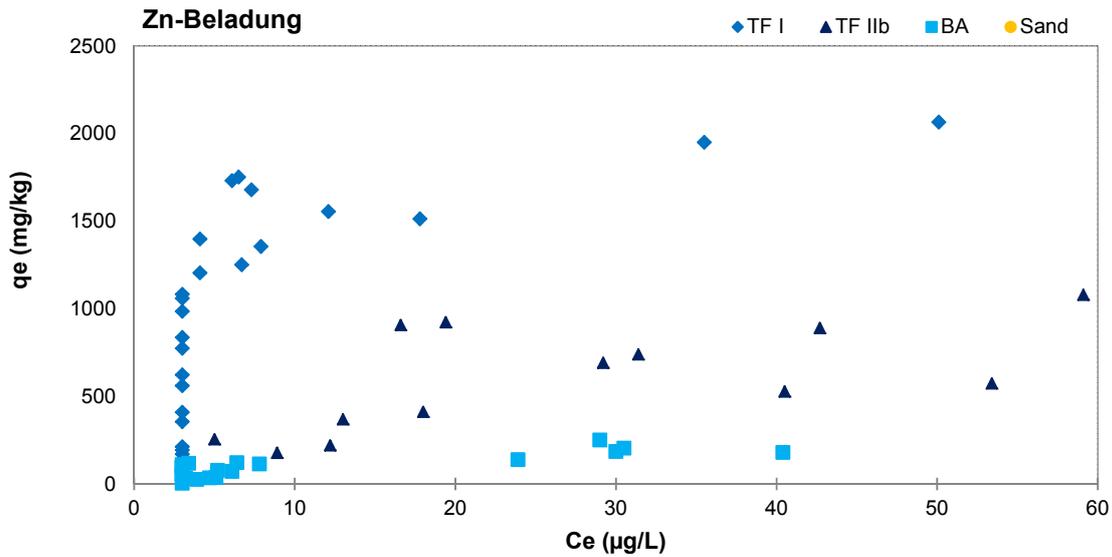


Abbildung 14: Zn Beladung beim 32 mm Säulenversuch, 1/2Q von unten nach oben (upflow)

Die Durchbruchkurven als Konzentrationsverhältnis  $C_e/C_o$  in Abhängigkeit des durchflossenen Bettvolumens sind von Sand in Abbildung 15, von TF I mit geringer Pufferkapazität in Abbildung 16, von TF IIb in Abbildung 17 und von BA in Abbildung 18 dargestellt. Der Pb Durchbruch (basierend auf dem Schwellenwert der QZV Chemie GW von 9 µg/L) trat für die Materialien in folgender Reihenfolge ein: Sand < BA < TF IIb < TF I mit geringer Pufferkapazität. Allerdings wurde das Kriterium des vollen Durchbruchs ( $C_e/C_o = 0,9$ ) bei Sättigung, außer für Sand, innerhalb einer Versuchsdauer von 4 Wochen von keiner anderen Säule erreicht.

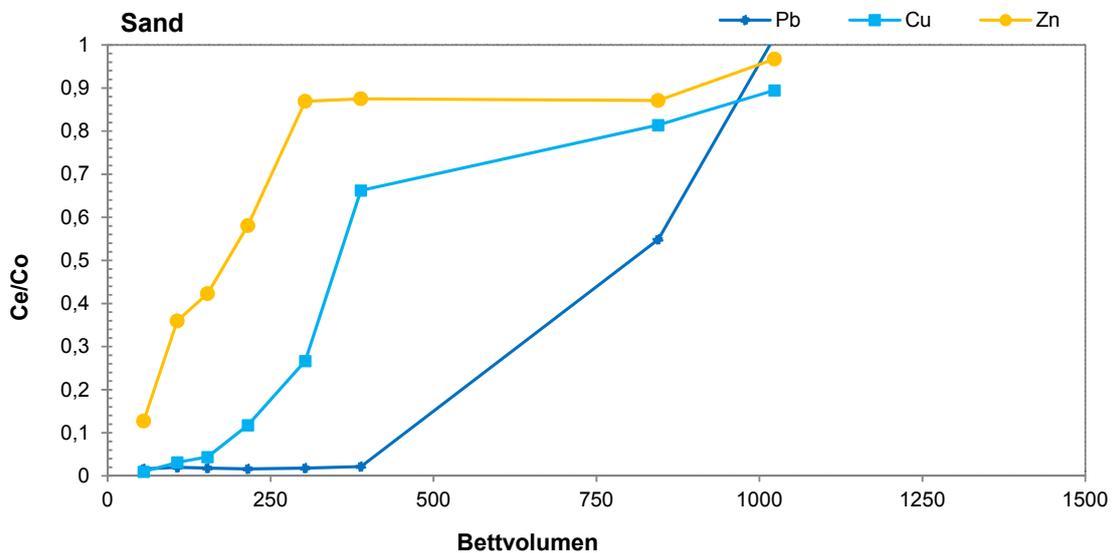


Abbildung 15: Durchbruchkurven von Sand in 32 mm Säulen von unten nach oben mit 1/2Q

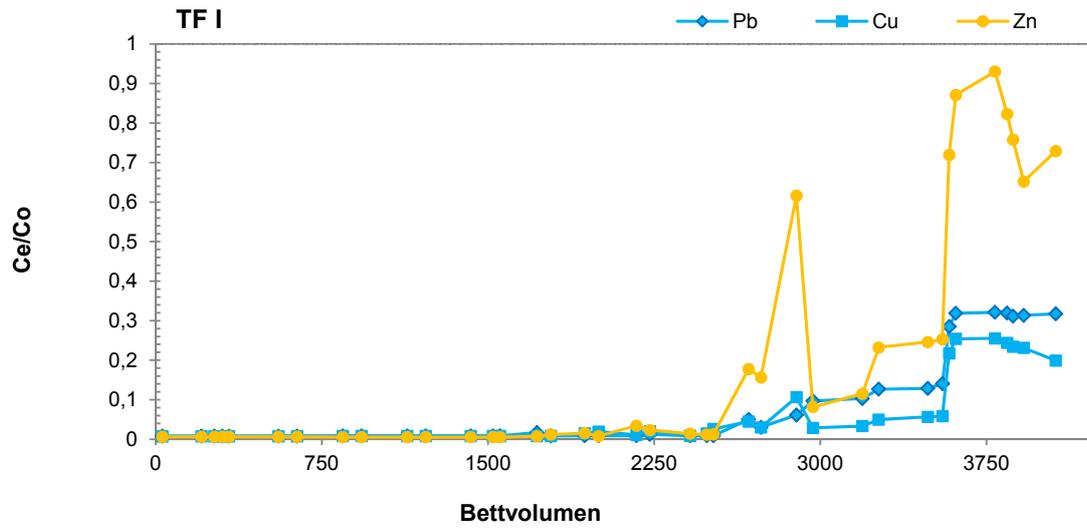


Abbildung 16: Durchbruchskurven von TF I (mit geringerer Pufferkapazität) in 32 mm Säulen von unten nach oben mit  $\frac{1}{2}Q$

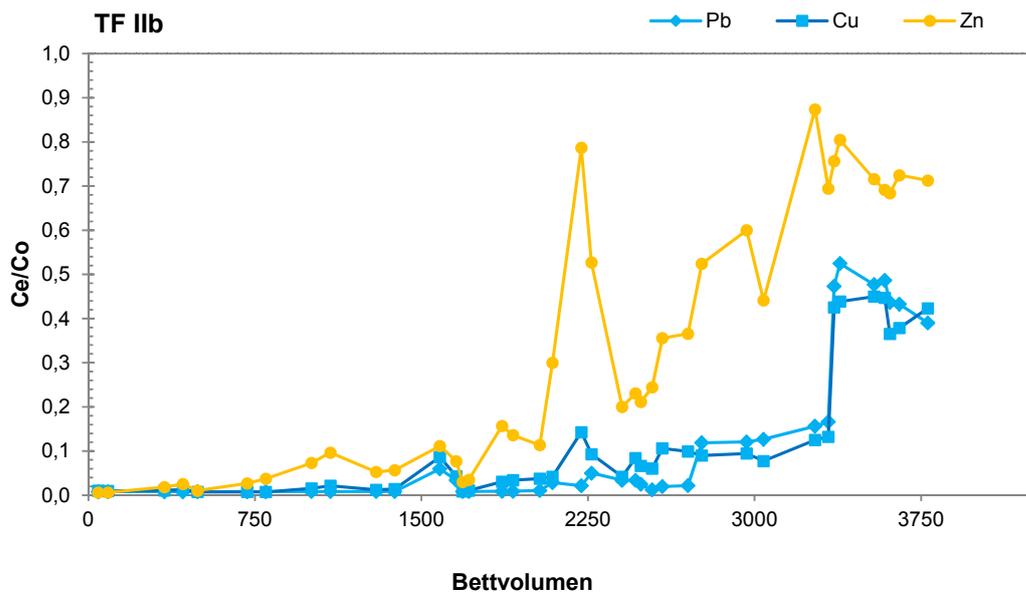


Abbildung 17: Durchbruchskurven von TF IIb in 32 mm Säulen von unten nach oben mit  $\frac{1}{2}Q$

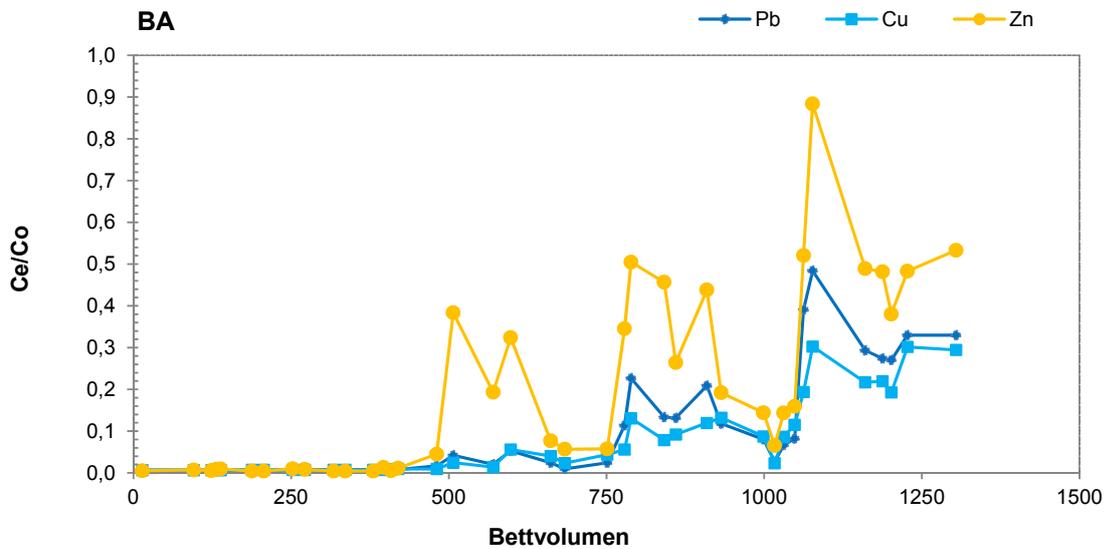


Abbildung 18: Durchbruchkurven von BA in 32 mm Säulen von unten nach oben mit  $\frac{1}{2}Q$

Das Bodenmaterial BA wies die geringste und die technischen Filtermaterialien (TF If, TF I mit geringer Pufferkapazität und TF IIb) die höchsten hydraulischen Durchlässigkeiten auf. Grundsätzlich wird das gereinigte Abwasser in den Untergrund oberhalb des Grundwassers infiltriert. Zurzeit gibt es zwar in der QZV Chemie GW einen Zielwert für Pb, allerdings nur einen sehr hohen für Cu und gar keinen für Zn. Deshalb wurde ursprünglich nur der Parameter Pb als Zielwert für die Bestimmung des Durchbruchs der verschiedenen Materialien in Hinblick auf eine Versickerung ins Grundwasser und den Grundwasserschutz herangezogen.

Die Ergebnisse zeigten, dass > 99 % von Pb, Cu und Zn von TF I (mit geringerer Pufferkapazität), und TF IIb nach 1550 Bettvolumina und von BA nach 420 Bettvolumina entfernt werden konnten, wobei die Konzentrationen für Pb immer unter der BG von  $0,5 \mu\text{g/L}$  lagen; allerdings war Cu nach diesen Volumina bereits messbar. Außer für TF If (mit verminderter Pufferkapazität) (1550 BV), waren die Zn-Konzentrationen bereits nach einem durchflossenen Volumen von 7 L (ca. 44 BV) messbar. Einerseits waren die Zn-Zulaufkonzentrationen um den Faktor 4 höher als die von Kupfer und andererseits ist Zn mobiler, wodurch sich dieser Effekt erklären lässt.

Im weiteren Betrieb stiegen ab 2000 L durchgelaufenes Volumen die Konzentrationen für Pb und Zn stetig bzw. vorübergehend an. Da gemeinsam mit der Ad-hoc-Gruppe ursprünglich der Zielwert für die Versuche von  $9 \mu\text{g/L}$  Pb (Schwellenwert der QZV GW, 2010) festgelegt wurde, wurde der Versuch nach Erreichen des Zielwertes abgebrochen. In einer späteren Diskussion wurden Bedenken angemeldet, dass nicht in jedem Fall hohe Pb-Konzentrationen zu erwarten sind, weshalb nachträglich Cu und Zn mit Zielwerten belegt wurden.

Der Durchbruch und die Beladungskapazität basierend auf Pb unterschieden sich bei den technischen Filtermaterialien sehr stark von denen des bodenbasierten Materials und denen des Sands. Generell ist zu bemerken, dass die Filtermaterialien TF If (auch mit geringerer Pufferkapazität) und TF IIb die Schwermetalle besser entfernten als BA und Sand. Die Sandsäule zeigte eine sehr schlechte Leistung, was auf eine geringe Oberflächenadsorption und keine oder eine geringe Kationenaustauschkapazität zurückzuführen ist. Die Durchbruchkurven von Pb, Cu und Zn wiesen für die technischen Filtermaterialien bei einem pH im Zulauf von  $(\text{pH}) 5,5 \pm 0,2$  konstante Entfernungsraten mit Ablaufkonzentrationen unter der BG vom Start weg bis zu 2000 BV für TF If (mit geringerer Pufferkapazität) und TF IIb, und 600 BV für BA auf. Die Konzentrationen stiegen zunehmend an und erreichten zum Ende des Versuchs relative Konzentrationen von  $(C_e/C_0)$  0,3 bis 0,5 für Pb, 0,23 bis 0,45 für Cu und bis zu 0,9 für Zn (Abbildung 15).

Die Sandsäule zeigte einen anderen Trend; die Ablaufkonzentrationen stiegen langsam aber konstant an und erreichten bei 1000 BV  $C_e/C_o$  von rund 1,0. Verglichen mit BA war die Leistung der TF If (mit geringer Pufferkapazität) und TF IIb Säulen besser. Von den untersuchten Schwermetallen wurde der Durchbruch von Zn ( $C_e/C_o = 0,9$ ) von allen Materialien erreicht. Der Durchbruch für Cu und Pb war langsamer ( $C_e/C_o < 0,5$  für Cu und Pb). Der Unterschied könnte auf die hohe Zinkkonzentration im Zulauf zurückzuführen sein. Der Durchbruch (basierend auf dem Schwellenwert von Pb war nach Durchlauf von 3580 BV für TF I (mit geringerer Pufferkapazität), 3360 BV für TF IIb, 1060 BV für BA und 844 BV für Sand erreicht. Die Anzahl der Bettvolumina bis zum Durchbruch von ( $C_e/C_o = 0,1$  für Pb) betrug ca. 2960, 2760, 1014, und 450 für TF I (mit geringerer Pufferkapazität), TF IIb, BA und Sand. Diese Versuche wurden mit halbmaximalem Durchfluss durchgeführt, wobei sich der Durchbruch bei Sättigung gegenüber einer tatsächlichen Flussrate verzögern kann.

In allen Filtersäulen konnte ein abnehmender Trend der Reinigungsleistung über die Zeit beobachtet werden, wobei ein völliger Durchbruch, außer für Sand, ( $C_e/C_o = 0,9$  bis 1,0) nicht beobachtet werden konnte. Allerdings gingen die Konzentrationen zwischendurch bei allen Proben zeitgleich sehr stark zurück, um anschließend wieder stark anzusteigen. Diese Effekte sind in der Literatur gut beschrieben (z.B. Hillige, 2007, Genç-Fuhrman et al., 2008) und treten besonders nach einer Stagnation auf. In unserem Fall sind die Säulen aber durchgehend betrieben worden, sodass dies nicht der Grund sein kann. Derartige Effekte konnten auch bei der 100 mm Säule mit dem Filtermaterial TF IIb beobachtet werden. In diesem Fall könnten diese kurzzeitigen hohen Konzentrationen eventuell auf einen Partikelaustrag zurückzuführen sein. Dies ist jedoch bei den von unten nach oben betriebenen Säulen eher unwahrscheinlich. Eine Verwechslung von Proben ist ebenfalls unwahrscheinlich. Nach anderen Gründen zur Erklärung des Phänomens wird noch geforscht.

In den Batchtests konnten für die Materialien TF Ia, TF IIb und BA potentiell Beladungen von 110 bis 120 mg für Cu und Pb und 1100 mg für Zn pro kg Substrat ermittelt werden, wobei dabei die Schwermetallkonzentration limitierend war. In den 32 mm-Säulenversuchen im upflow bei  $\frac{1}{2}Q$  entfernten TF If (mit geringer Pufferkapazität) bis 280 mg an Pb, 615 mg an Cu und 2358 mg an Zn, TF IIb 218 mg an Pb, 451 mg an Cu und 1560 mg an Zn und BA 36 mg an Pb, 75 mg an Cu und 300 mg an Zn. Dies ist mehr als doppelt so viel wie in den Batchtests z.B. für TF Ia erzielt wurde. Dies ist vor allem auf die Limitierung der Konzentrationen im Batchtest durch die Löslichkeit zurückzuführen.

Der Zulauf pH von  $5,5 \pm 0,2$  und der Ablauf pH wurden einmal pro Tag gemessen. Der Ablauf pH änderte sich über die Versuchszeit nicht wesentlich. Mittelwerte und Standardabweichungen waren  $7,8 \pm 0,3$  für TF I (mit geringerer Pufferkapazität) und TF IIb,  $8,1 \pm 0,2$  für BA und  $6,4 \pm 0,4$  für Sand. Außer für Sand waren die Ablauf-pH-Werte für die anderen Filtersubstrate im leicht Alkalischen und lagen zwischen 7,8 bis 8,5. Durch die Sandsäule wurde der pH des Zulaufs um ca. 1 bis 1,5 Einheiten erhöht. Die anderen Abläufe lagen bei 8,1 bis 8,5 und gingen auf pH 7,8 im Laufe des Experiments zurück. Der Ablauf pH der Sandsäule war neutral (pH 6,5 bis 7,2) und zunehmend sauer (pH 6,0 bei vollem Durchbruch ( $C_e/C_o = 0,9$  bis 1,0)).

Die Verteilung der Schwermetallkonzentrationen im Feststoff innerhalb der Säule wurde nicht untersucht.

### **Vorhersage der Standzeiten**

Die Zeit bis zur Erreichung des Durchbruchs des Pb Zielwertes (Pb = 9 µg/L; QZV Chemie GW) ist für die verschiedenen Filtermaterialien und unterschiedlichen Flächenverhältnissen von Filter zur abflusswirksamen Einzugsfläche in Tabelle 12 dargestellt. Die Standzeiten wurden für ein Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S : A_{ent}$ ) von 1:15 und 1:200 berechnet. Für den Bodenfilter ist ein Flächenverhältnis von 1:200 nicht machbar, für die technischen Filtermaterialien allerdings schon, weshalb alle Filtermaterialien für beide Fälle betrachtet wurden. Die Berechnung basiert auf einer gleichmäßigen Beladung des ganzen Filterkörpers. Sollte dies nicht der Fall sein, kann es bereits früher zu einer partiellen Überlastung kommen; dies ist auch eine Frage der Lage und des Kurzschlusses durch die Dränagen etc..

Tabelle 12: Vorhergesagte Standzeiten bis zum Durchbruch von Pb für zwei verschiedene Flächenverhältnisse: mittlerer Jahresniederschlag = 700 mm

Filtermaterial	Sand	TF I	TF IIb	BA
Durchgesetztes Volumen (L)	135	576	540	170
<b>Standzeit bis zum Durchbruch von Pb für <math>A_S : A_{ent} = 1 : 15</math></b>				
Pb	19	80	75	23
Cu	24	>95	>83	>31
Zn	25	>100	>88	>32
<b>Standzeit bis zum Durchbruch von Pb für <math>A_S : A_{ent} = 1 : 200</math></b>				
Standzeit bis zum Durchbruch von Pb für $A_S : A_{ent} = 1:200$				
Pb	1,6	>6,5	>5,7	>2,1
Cu	1,8	>7,2	>6,3	>2,3
Zn	1,9	>7,5	>6,6	>2,4

Bei einem Flächenverhältnis von 1:200 haben die Filtermaterialien TF I (mit geringerer Pufferkapazität) und TF IIb eine vorhergesagte Standzeit (basierend auf dem Pb Wert) von > 5 Jahren; bei einem Flächenverhältnis von 1:15 von ca. 80 Jahren. Für BA werden bei einem Flächenverhältnis von 1:15 20 Jahre bis zum Erreichen des Pb Wertes der QZV Chemie GW errechnet. Wegen der Kolmation sollten aber noch andere Betrachtungen angestellt werden. Vor allem sollte zwischen größeren und tieferen Filtern besonders schon im Designprozess abgewogen werden. Durchbruchsszenarien sind besonders bei hotspot-Flächen mit Verunreinigungen wie Autobahnen und Flächen mit hohen Regenfällen, wo Durchbrüche schnell eintreten können, zu berücksichtigen. Es sollte beachtet werden, dass es sich um maximale Beladungen unter optimierten Bedingungen (Betrieb von unten nach oben bei halbmaximalem Q) handelt. Unter Betriebsbedingungen kann Niederschlagswasser kurzzeitig auf der Oberfläche einen Überstau verursachen und die Kontaktzeit zwischen Filtermedium und gelösten Stoffen herabsetzen. Außerdem können sich partikelgebundene Metalle an der Oberfläche absetzen. Diese Versuche zeigen, dass die maximalen Kapazitäten, der Durchbruch und die Standzeiten mit dieser Methode sehr gut berechnet werden können.

## 7.2 Ergebnisse der Untersuchungen im downflow Modus (Beschickung von oben nach unten)

Beim Betrieb von oben nach unten (downflow) mit Überstau sollten die Gleichgewichtsbedingungen unter angewandten Bedingungen ermittelt werden. Dieser Betrieb ist gleich mit dem, der im „vorläufigen“ Methodenvorschlag angewandt wurde.

Es wurden direkte Vergleiche mit 32-mm Säulen im upflow und downflow Modus bei  $Q = kf$ -Wert allerdings nur mit einem technischen Filtermaterial (TF II mit hoher Pufferkapazität) durchgeführt. Die Versuche im upflow-Modus lassen einen ruhigen Verlauf der Ablaufwerte mit Werten für Cu, Ni und Zn < BG bis 4020 BV erkennen. Im downflow Modus wird die BG von Cu, Cr, Ni und Zn ab 50 BV und von Pb ab 460 BV überschritten. Die Konzentrationen sind sehr instabil und schwanken zwischen  $C_e/C_o = 0,1$  (Pb), 0,35 (Cu) und 0,65 (Zn), bei Zulaufkonzentrationen von 50 µg/L Pb, 100 µg/L Cu und 400 µg/L Zn, obwohl die Kapazität bei Sättigung noch lange nicht erreicht ist (Siehe Abbildung 15).

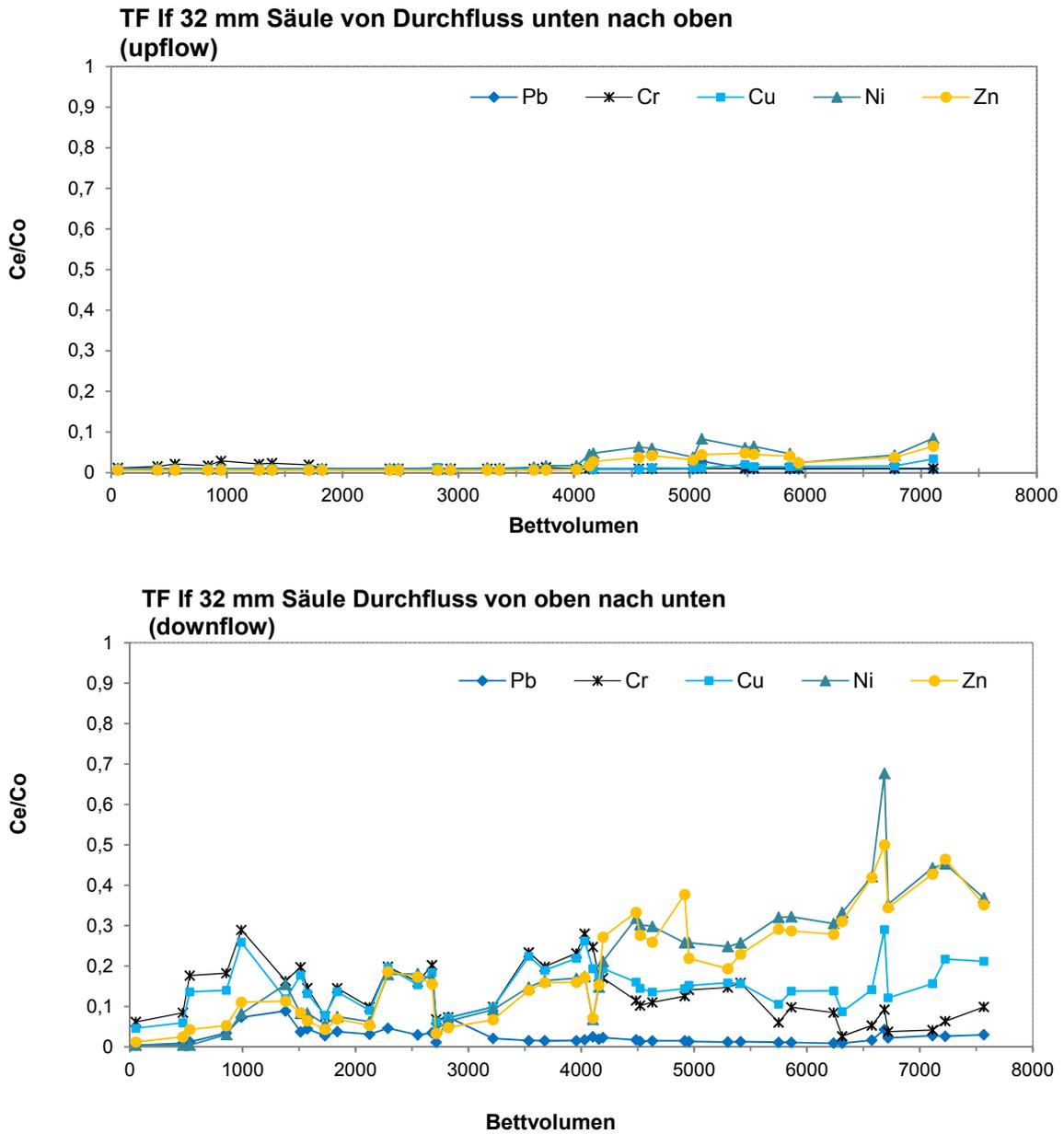


Abbildung 19: Durchbruchkurven von TF If in upflow und downflow modus mit Durchfluss Q

Das genaue Verhalten von Filtermaterialien mit den neuen Zulaufkonzentrationen sollte noch in Erfahrung gebracht werden. Dies sollte dann bei der Festlegung der Zielwerte nach Aufbringung von 4-Jahresfrachten berücksichtigt werden.

## 8. Zusammenfassung

Niederschlagsabwässer von undurchlässigen Oberflächen wie Straßen-, Dach-, Lager- oder Hofflächen können mit Substanzen verunreinigt sein, die in der EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) bzw. in den „Qualitätszielverordnungen Chemie Oberflächenwasser bzw. Chemie Grundwasser“ geregelt sind. Wässer sollten möglichst am Entstehungsort nach einer entsprechenden Reinigung wieder in den Wasserkreislauf zurückgeführt werden. Die notwendigen Reinigungsschritte vor einer Ableitung ins Grundwasser werden flächentypspezifisch in der ÖNORM B 2506 Teil 2 (2013) oder im zukünftigen ÖWAV Regelblatt 45 beschrieben. Dies kann entweder über eine belebte Bodenzone oder technische Filtermaterialien mit vergleichbarer Reinigungsleistung erfolgen. Die Behandlung von Oberflächenabflüssen ist eine besondere Herausforderung, da eine möglichst gute Reinigungsleistung mit einer hohen hydraulischen Durchlässigkeit, kombiniert mit einem geringen Flächenbedarf und einer langen Standzeit, verbunden werden soll. Um diese Ziele erfüllen zu können, müssen die in den Filteranlagen eingesetzten Materialien die Anforderungen an die Entfernung von Partikeln, Schwermetallen und Kohlenwasserstoffen erfüllen und eine entsprechende Durchlässigkeit aufweisen.

Mit Vertrag vom 24.02.2011 GZ B100121 wurde die Universität für Bodenkultur beauftragt eine Methode zur Prüfung der Eignung von Substraten für die Oberflächenwasserbehandlung von Dach- und Verkehrsflächen zu entwickeln. Diese Methode wurde gemeinsam mit einer Ad hoc-Gruppe aus Mitgliedern der Arbeitskreise der ÖNORM B 2506 und ÖNORM RB 45 erarbeitet. Neben dieser Eignungsprüfungsmethode wird auch eine Prüfung zur Bestimmung der Kapazität vorgeschlagen. Im Zuge der Methodenentwicklung wurden Versuche mit definierten Partikeln, Schwermetalllösungen und Mineralölen aber auch mit realem Straßenabwasser in Laboranlagen und Untersuchungen an Gewässerschutzanlagen im Betrieb vorgenommen.

Die Auswahl der Prüfparameter und Prüfschritte wurde ausgehend von einer bestehenden Methode des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt, 2005) gemeinsam mit der Ad-hoc-Gruppe vorgenommen und schrittweise in eine Prüfung für Filtermaterialien umgewandelt. Dabei wurden fünf verschiedene Arten von Filtermedien, in Batch und verschiedene Arten von Säulenversuchen (Aufbau) und mit diversen Beladungsmengen an gelösten Stoffen und Feststoffen (Quarzmehl Millisil W4) bei konstanten Durchströmungsraten vor allem im Überstaubetrieb getestet, um die effektivsten Prüfmethode zu bestimmen.

### **„Vorläufiger“ Methodenvorschlag zur Prüfung der Eignung von Filtermaterialien für die Oberflächenwasserbehandlung**

Die Prüfung nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag erfolgt in Säulen mit 100 cm Innendurchmesser mit einem freien Auslauf nach unten. Um die gesamte Filterfläche auszunutzen und für jedes Material einen adäquaten Durchfluss zu gewährleisten, werden die Säulen im Überstau betrieben. Das Konzept beruht auf der Aufgabe von mehreren Jahresfrachten (üblicherweise 4), die mit jeweils Jahresniederschlägen (oder Teilen davon) beaufschlagt wird.

Die Untersuchungen werden so gewählt, dass das gesamte Säulenvolumen beaufschlagt wird, das ist sichergestellt, wenn die Säule nach Entlüftung im Überstaubetrieb gefahren wird. Dieses Kriterium ist verglichen mit anderen Prüfmethode sehr streng, erlaubt allerdings für jede Säule einen adäquaten Betrieb, was bei einem vorgegebenen Durchfluss nicht der Fall ist. Die durchgesetzten Frachten sollten zumindest einer 4-Jahresfracht entsprechen; das berechnete Wasservolumen basiert auf einem Jahresniederschlag von 700 mm und einem Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ ) von 1:15 (entsprechend 84 L für 1 Jahr bezogen auf die Säulenfläche). Dieses Volumen wurde den Teilschritten zugrunde gelegt, wobei manchmal nur ein Teil oder ein Vielfaches davon eingesetzt wird. Als Prübsubstanz für die Prüfung der Partikelentfernung wurde Millisil W4 gewählt, da dieses Quarzmehl einen relativ hohen Feinanteil hat und die Schwermetalle und auch PAKs besonders im Feinanteil konzentriert sind. Der Partikeldurchmesser von ca. 50 % des Quarzmehls liegt unter 63 µm. Außerdem wird Millisil W4 auch in Deutschland vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) als Prübsubstanz für die Prüfung des Partikelrückhalts eingesetzt. Der Berechnung der Jahresfracht an AFS

im Zulauf liegen mittlere Konzentrationen im Straßenabwasser von 90 bis 100 mg/L AFS (Göbel et al., 2007) zugrunde; tatsächlich wurde eine Konzentration von 91 mg/L AFS eingesetzt um, für das gewählte Niederschlagsvolumen, auf 30 g pro 4 Jahre zu kommen.

Als Prüfsubstanzen für die Schwermetallentfernung werden handelsübliche Schwermetallstandardlösungen eingesetzt: Merck KGaA, Darmstadt Germany 1000 mg Cu (CuCl in H<sub>2</sub>O), 1000 mg Cr (CrCl<sub>3</sub> in 4,2 % HCl), 1000 mg Pb (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O), 1000 mg Ni (NiCl<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O) und 1000 mg Zn (ZnCl<sub>2</sub> in 0,06 % HCl). Aus diesen Konzentrationen werden die Lösungen mit den entsprechenden Konzentrationen und pH-Werten hergestellt. Die Schwermetallkonzentrationen werden ursprünglich aus mittleren Konzentrationen der Gesamtgehalte von 170 µg/L Pb, 97 µg/L Cu und 407 µg/L Zn aus der Literatur (Göbel et al., 2007) abgeleitet, wurden aber durch die Ad-hoc-Gruppe vereinfacht und angepasst. Im Laufe der Versuche wurden besonders die Pb-Konzentrationen diskutiert und für die Kapazitätsprüfung werden andere Konzentrationsverhältnisse vorgeschlagen.

Als Prüfsubstanz für die Prüfung des Mineralölrückhalts wird Diesel (kommerzielles Produkt mit Anteilen an Fettsäuremethylester FAME) verwendet. Die Frachtberechnung geht von einer Konzentration von 5 mg/L Diesel aus. Diese Konzentration wurde gewählt, weil für den Fall, dass höhere Konzentrationen zu erwarten sind, diese durch Mineralölabscheider zurückgehalten werden können. Außerdem zeigen die Daten aus der Literatur, dass die Konzentrationen im Straßenabwasser kleiner 5 mg/L KW-Index sind (Göbel et al., 2007).

Da bei Gewässerschutzanlagen in Betrieb verschiedene Flächenverhältnisse (Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche ( $A_S:A_{ent}$ )) anzutreffen sind, wird für höhere Flächenverhältnisse, eine Anpassung der Prüfung empfohlen. Praktisch wurde die Prüfung nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag, nach Absprache mit der Ad-hoc-Gruppe, in Bezug auf 2 verschiedene Flächenverhältnisse mit 1:15 und 1 :200 geprüft.

Eine mögliche Ausführung wurde praktisch erprobt und Einschränkungen beschrieben. Wie das Flächenverhältnis an die Herstellerangaben angepasst werden kann, ist noch offen. Anhand verschiedener Materialien: zweier Böden (BA und BB), eines Quarzsandes (Referenz) und zweier technischer Filtermaterialien (TF I und TF II), die entweder handelsüblich oder für bestimmte Fragestellungen angepasst, verwendet wurden, wurde die Praxistauglichkeit der Methode überprüft. Die Prüfmethode besteht aus einer Durchlässigkeitsprüfung, der Prüfung des Partikel-, des Schwermetall- und Mineralölrückhalts und der Prüfung der Verblockungsneigung. Zusätzlich werden Pufferkapazität und Schwermetallfreisetzung durch Salz untersucht. Für alle Prüfungen werden Akzeptanzkriterien vorgeschlagen, die entweder jenen der ÖNORM B2506 Teil 2 entsprechen oder strenger sind.

Die Ergebnisse der Säulenversuche nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag zur Prüfung der Eignung von Filtermaterialien für die Oberflächenwasserbehandlung zeigen, dass mit den Filtermedien TF Ia (grobes TF I) und Sand zwischen 80 und 94 % der Partikel bei einer einmaligen Trockenbeladung mit Quarzmehl entfernt werden konnten. Eine Erhöhung der Partikelbeladung durch dreimaliges Aufbringen von Partikeln führte zu einer höheren Partikelretention. Die Verwendung von feineren Filtermaterialien (TF If, TF IIa und TF IIb), BA und BB kann zu einer höheren Entfernrates führen, allerdings wurden in der Folge für die Materialien BB und TF IIa die Filtrationsraten wesentlich vermindert, was auf die Verstopfung des Filtermaterials zurückzuführen ist. Die Auswirkung von kurzen Trockenfallperioden (Pause) und die anschließende Wiederberegnung (Durchströmung) auf die Partikelkonzentrationen im Abfluss wurden ebenfalls getestet. Mit dem Ergebnis, dass die Behandlung der Filtermedien durch Trocken- und Beregnungsphasen die Leistung aller Filtermedien, bezogen auf die Partikelentfernung beeinflusst. Die Remobilisierung der zurückgehaltenen Teilchen war nach der ersten Trocknungs- und Beregnungsphase hoch (im Bereich von 80 bis 100 mg/L), nahm aber in den nachfolgenden Phasen laufend ab. Die Benetzungs- und Trocknungszeiten hatten auch einen deutlichen Einfluss auf die Trübung des Ablaufs. Nach einer erneuten Beregnung nach erstem Trockenfallen wurde eine deutlich höhere Trübung im Vergleich zu nassen Perioden beobachtet.

In Hinblick auf die Schwermetallentfernung wurden verschiedene Konzentrationen gewählt und in Batch- und Säulenversuchen untersucht. Die Batchversuche erlaubten aufgrund der begrenzten Löslichkeit der Metalle, nur zum Teil Aussagen über die Beladungskapazitäten, verglichen mit jenen, die sich in den Säulenversuchen ergaben. Diese waren stark von der Durchlässigkeit des Materials und der Kontaktzeit

abhängig. Die Säulenversuche wurde als Kurzzeitversuche mit verschiedenen Konzentrationen von Schwermetallmischungen (entweder Pb, Cu, Zn oder Pb, Cu, Ni, Cr und Zn) und als Langzeitversuche mit steigenden Konzentrationen durchgeführt. Die Kriterien von 50 % Zn-Entfernung, 80 % Cu-Entfernung und 9 µg/L Pb- bzw. 95 % Pb-Entfernung konnten nicht von allen Materialien (insbesondere nicht von Sand) eingehalten werden. Der Austrag von Kohlenwasserstoffen hängt von der Durchlaufgeschwindigkeit und auch der Aufgabemenge ab. Jene Versuche, die entweder mit geringem Volumenstrom oder mit geringen Mengen durchgeführt wurden, zeigten Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze. Trotz Überstaubetrieb waren die Konzentrationen gering und es wurden nur für manche Materialien Konzentrationen größer BG ermittelt.

Die technischen Filtermaterialien sollten für die Gewässerschutzanlagen eine hohe Durchlässigkeit (hohen  $k_f$ -Wert) und eine große Adsorptionskapazität für die entsprechenden Verunreinigungen aufweisen. Dies erlaubt eine längere Standzeit der Filtermaterialien, ohne diese austauschen zu müssen. Die Kinetik des vermuteten Adsorptionsprozesses sollte sehr schnell sein, da bei einer kurzen Kontaktzeit der Filtermaterialien mit dem Straßenabwasser, die vorgegebenen Entfernungsraten nicht eingehalten werden können. Die Batch-Untersuchungen zeigten, dass die Adsorption rascher vor sich ging als die kürzeste Manipulationszeit dauerte. Allerdings ergaben sich deutliche Unterschiede zwischen groben ( $k_f$ -Wert  $> 10^{-2}$  m/s) und feinerem Material ( $k_f$ -Wert  $> 10^{-3}$  m/s). Aber auch bei Werten  $> 10^{-3}$  m/s konnten die Schwermetalle gut aus der Lösung entfernt werden (TF I f und TF II b); die ÖNORM B 2506 Teil 2 sieht theoretisch eine Begrenzung des  $k_f$ -Wertes bei  $< 10^{-3}$  m/s vor. Wenn die Materialien die Kriterien erfüllen, sollten auch größere Durchlässigkeiten akzeptiert werden, wobei ein wesentliches Kriterium die Art der  $k_f$ -Wert Bestimmung ist. Die Adsorptionsversuche ergeben für die meisten Materialien außer für Quarzsand gute Ergebnisse, die die Anforderungen, die von der ÖNORM-Arbeitsgruppe aufgestellt und von der Ad-hoc-Gruppe verfeinert wurden, einhalten konnten. Damit gute Ergebnisse in Bezug auf die Entfernung von Verunreinigungen bei niedrigen Konzentrationen und hohen Durchflüssen (z.B. Starkregenereignissen) erreicht werden können, ist eine niedrige Gleichgewichtskonzentration erforderlich. Diese Eigenschaft wird durch die Adsorptionsisotherme beschrieben, welche die Menge der adsorbierten Verunreinigungen aus der flüssigen Phase an das Filtermaterial berechnet. Eine Verbesserung der Adsorption der Schwermetalle konnte ebenfalls durch den Partikelrückhalt nach einer „Einfahrzeit“, und einer damit einhergehenden Kontaktzeiterhöhung beobachtet werden. Grundsätzlich zeigt sich aber, dass die Entfernungsraten bei Konzentrationen  $< 50$  µg/L geringer sind als bei höheren Konzentrationen. Aus diesem Grund sollten die Zulaufkonzentrationen sorgfältig gewählt werden, besonders wenn als Kriterium Zielkonzentrationen z.B. der QZV Chemie GW herangezogen werden. Außerdem zeigt sich, dass der Durchbruch bei Sättigung nicht stabil erreicht werden kann, aus diesem Grund wird von einem Durchbruch bei Sättigung von einem  $C_e/C_o$ -Wert von 0,9 bis 1,0 ausgegangen.

Die Ergebnisse, die mit den verschiedenen Materialien nach dem „vorläufigen“ Methodenvorschlag erhalten wurden, zeigten dass der Boden BB wegen der umgehenden Kolmation eliminiert wurde und der Sand die Kriterien für die Adsorption nicht erfüllte. Die anderen Materialien konnten die Kriterien einhalten.

Da es unterschiedliche Anforderungen an die Kapazitätsprüfung gibt, je nachdem ob es sich um Material handelt, das bereits einer Prüfung bzw. einem Zulassungsverfahren unterzogen wurde, oder ob es sich um Material handelt, das vor einer potentiellen Prüfung eingebaut werden zwei verschiedene Vorgangsweisen vorgeschlagen.

#### **Ermittlung der Kapazität im Zuge eines Zulassungsverfahrens:**

Bei Prüfung des Materials im Zuge eines Zulassungsverfahrens soll neben den Informationen die im „vorläufigen“ Methodenvorschlag formuliert wurden eine Adsorptionsisotherme bestimmt werden. Dazu wird die Kapazität unter optimierten Bedingungen (upflow Modus) in 32 mm Säulen ermittelt, wobei die Ausgangskonzentrationen bei 50 µg/L Pb, 250 µg/L Cu und 1000 µg/L Zn liegen und die 3 Elemente Pb, Cu und Zn in der Lösung enthalten. Diese Adsorptionsisotherme ist nur einmal im Zulassungsverfahren zu ermitteln. Als Zielkonzentrationen werden 9 µg/L Pb (Schwellenwert der QZV Chemie GW), 50 µg/L Cu und 500 µg/L Zn (analog zu den Werten der BBodSchV (1999) vorgeschlagen. Durch diese Ausgangs- und Zielkonzentrationen sollen auch die Forderungen der ÖNORM B 2506 Teil 2 erfüllt werden. Die Konzentrationen in der Wasserphase beziehen sich auf gelöste Gehalte.

Nach Einbau des Materials wird empfohlen alle 4 Jahre die aktuelle Beladung des Feststoffes im Vergleich zur maximalen Beladung, die für die Elemente (Pb) Cu und Zn für die Zielkonzentration ermittelt wurden zu prüfen; zur Beurteilung der maximal zulässigen Beladung wird die 90 % Beladung jenes Elementes herangezogen, das als Erstes die Zielkonzentration überschreitet. Wegen eines möglichen Überbefundes durch die Feinanteile wird empfohlen vor dem Materialtausch eine Prüfung der Restkapazität für eine weitere Standzeit von 4-Jahren (Kapazitätsprüfung ohne Adsorptionsisotherme) durchzuführen.

#### **Ermittlung der Kapazität von Materialien ohne Adsorptionsisotherme:**

Für jene Materialien, von denen keine Adsorptionsisotherme vom Ausgangsmaterial bekannt ist, wird vorgeschlagen in einem vereinfachten Verfahren die Standzeit für die nächsten 4 Jahre sicherzustellen. Je nach Zulaufkonzentration und Verhältnis von Filterfläche zu Einzugsfläche wird eine 4-Jahresfracht für die Elemente im Zulauf (z.B. Pb, Cu, und Zn) bestimmt. Es wird eine Schwermetalllösung hergestellt, die im Bereich der tatsächlichen Konzentration liegt. Diese Lösung wird von oben nach unten über eine 32 mm Säule filtriert; Proben werden nach je einer Jahresfracht als Kurzzeitmischproben gezogen. Zur Beurteilung werden entweder der Verlauf der 4 Konzentrationen der Kurzzeitmischproben oder nur die der letzten Probe (4. Jahr) herangezogen. Alle Proben sollen unter den Zielkonzentrationen von 9 µg/L Pb, 50 µg/L Cu und 500 µg/L Zn liegen.

Da das Verfahren auch für betriebliches Abwasser eingesetzt wird, sollte die Ausgangskonzentration und das Flächenverhältnis an die Herstellerinformationen angepasst werden.

Die Laborversuche im upflow-Modus mit  $\frac{1}{2}Q$  erlauben, die Beladungskapazität von verschiedenen Filtermaterialien, die Entfernungsraten der Schwermetalle (Pb, (ev. Cr, Ni) Cu and Zn) und die Standzeit bis zum Durchbruch abzuschätzen. Die Konzentrationen im Zulauf lagen mit 50 bis 63,4 µg/L Pb, 111 bis 135 µg/L Cu und 435 bis 661 µg/L Zn in einem typischen Abwasserkonzentrationsbereich von verunreinigten Straßen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Filtermaterialien die Schwermetalllösungen sehr gut adsorbieren und dass sich zu Beginn Konzentrationen unter der Quantifizierungsgrenze einstellen. Der Durchbruch und die Beladungskapazität basierend auf Pb unterschieden sich bei den technischen Filtermaterialien sehr stark von denen des bodenbasierten Materials und denen des Sands. Generell ist zu bemerken, dass die Filtermaterialien TF If (auch mit geringerer Pufferkapazität) und TF IIb die Schwermetalle besser entfernten als BA und Sand.

Die errechneten Standzeiten, als Zeit bis zur Erreichung des Durchbruchs des Pb Zielwertes (Pb = 9 µg/L; QZV Chemie GW) wurden für das Verhältnis wirksame Sickerfläche zu abflusswirksamer Einzugsfläche (AS:Aent) von 1:15 und 1:200 berechnet. Für den Bodenfilter ist ein Flächenverhältnis von 1:200 nicht machbar, für die technischen Filtermaterialien allerdings schon, weshalb alle Filtermaterialien für beide Fälle betrachtet wurden. Bei einem Flächenverhältnis von 1:200 haben die Filtermaterialien TF I (mit geringerer Pufferkapazität) und TF IIb eine vorhergesagte Standzeit (basierend auf dem Pb Wert) von > 5 Jahren; bei einem Flächenverhältnis von 1:15 von ca. 80 Jahren. Für BA werden bei einem Flächenverhältnis von 1:15 20 Jahre bis zum Erreichen des Pb Wertes der QZV Chemie GW errechnet. Wegen der Kolmation sollten aber noch andere Betrachtungen angestellt werden. Die Berechnung basiert auf einer gleichmäßigen Beladung des ganzen Filterkörpers. Sollte dies nicht der Fall sein, kann es bereits früher zu einer partiellen Überlastung kommen; dies ist auch eine Frage der Lage und des Kurzschlusses durch die Dränagen etc..

Neben der reinen Methodenentwicklung wurden zusätzliche Untersuchungen für eine weitergehende Interpretation durchgeführt z.B. Vergleich upflow- und downflow-Modus. Die Versuche im upflow-Modus lassen einen ruhigen Verlauf der Ablaufwerte mit Werten für Cu, Ni und Zn < BG bis 4020 BV erkennen. Im downflow-Modus wird die BG von Cu, Cr, Ni und Zn ab 50 BV und von Pb ab 460 BV überschritten. Die Konzentrationen sind sehr instabil und schwanken zwischen  $C_e/C_o = 0,1$  (Pb), 0,35 (Cu) und 0,65 (Zn), bei Zulaufkonzentrationen von 50 µg/L Pb, 100 µg/L Cu und 400 µg/L Zn, obwohl die Kapazität bei Sättigung noch lange nicht erreicht ist.

Im Zuge des Projekts konnten Methoden **zur Prüfung der Eignung von Filtermaterialien für die Oberflächenwasserbehandlung und Methode zur Kapazitätsprüfung erarbeitet werden.**

## 9. Ausblick

In einem nächsten Schritt ist die vorgeschlagene Methode weiterhin auf Praxistauglichkeit zu prüfen. Die Prüfung auf Kapazität mit Mineralölsurrogaten ergab noch keine zufriedenstellende Methode. Ob sich MTBE im Säulenversuch eignet oder nicht konnte nicht mehr untersucht werden. Eine weitere Möglichkeit wäre ein Verfahren mit Mineralöl selbst analog zum „vorläufigen“ Methodenvorschlag zur Prüfung auf Eignung zu entwickeln.

Außerdem wird empfohlen noch eine praxistaugliche Anpassung an höhere Flächenverhältnisse in Laborversuchen zu ermitteln.

Die Untersuchungen an Anlagen in Betrieb hat eine Reihe von offenen Fragen aufgezeigt. Insbesondere das Verhalten von trockenen Bodenfiltern bei Regenfällen sollte untersucht werden, um in weiterer Folge Auswahlkriterien für Filtermedien bzw. hydraulisch optimierte Absetzbecken zu entwickeln. Zusätzlich wäre auch die Probenahme an Gewässerschutzanlagen zu optimieren und Ergebnisse, die im Trockenwetterfall entnommen wurden, mit denen im Regenwetterfall zu vergleichen. Eine weitere offene Frage ergibt sich auch aus dem Durchgang von Schwermetallen durch die Filtermaterialien. Es sollte geprüft werden, welche Materialien zum Durchtritt führen und ob es sich um eine tatsächlich gelöste Fraktion oder ob es sich um Matrixeffekte handelt.

Eine Diskussion der Ad-hoc-Gruppe betraf den Begriff „belebte Bodenzone“: was beinhaltet er, wie kann er quantifiziert werden, was bewirkt er. Wie wird der DOC oder TOC im Oberflächenabfluss beim Durchgang durch die „belebte Bodenzone“ beeinflusst?

Eine wesentliche Frage betrifft die Auswahl und Art der Bestimmung der Durchlässigkeit der Filtersubstrate (kf-Wert) für die Dimensionierung von Filterbecken, da sich falsche Annahmen in der Anlagengröße erheblich auswirken.

## 10. Literatur

- AAEV: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen, StF: BGBl. Nr. 186/1996
- DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) (2005): „Zulassungsgrundsätze für Abwasserbehandelnde Flächenbeläge“. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) (2011): „Zulassungsgrundsätze für Niederschlagswasserbehandlungsanlagen. Teil 1: Anlagen zum Anschluss von Kfz-Verkehrsflächen bis 2.000 m<sup>2</sup> und Behandlung des Abwassers zur anschließenden Versickerung in Boden und Grundwasser“. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Entwurf Februar 2011
- Fanfan, P.N., Mabon, N., Carletti, I., Claustriaux, J.J., Thonart, P., Lognay<sup>1</sup>, G., Copin, A., Barthelemy, J.P. (2005). New model for performance prediction in fixed-bed reactors based on the approach of the unused bed zone. *Water research*, 39, 4004-4010.
- Göbel, P., Dierkes, C., and Coldwey, W.G. (2007). Stormwater runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*. Vol. 91, p.26-42.
- Genç-Fuhrman, H., Mikkelsen, P.S. and Ledin, A. (2007). Simultaneous removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from stormwater: Experimental comparison of 11 different sorbents. *Water research*. Vol. 41(3), 591 – 602.
- Genç-Fuhrman, H., Wu, P., Zhou, Y., Ledin, A. (2008). Removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from polluted water using an iron based sorbent. *Desalination* 226,57 – 370.
- Hilliges, R. (2007a): Entwicklung eines dezentralen Behandlungssystems für hochbelastete Verkehrsflächenabläufe im urbanen Raum. *Berichte aus Siedlungswasserwirtschaft Technische Universität München*, Nr.193. 185 Seiten.
- Inczédy, J., 1966. *Analytical Applications of Ion Exchangers*. Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 1-80
- OECD (2000): *Guidelines for the Testing of Chemicals/Section 1: Physical-Chemical properties Test No. 106: Adsorption - Desorption Using a Batch Equilibrium Method* OECD. Published by OECD Publishing, 44 pp
- ÖNORM B 2506-2 (2012): *Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen* (Ausgabe 15.11.2012)
- ÖNORM M 6274 (1985) *Wasseruntersuchung; Bestimmung der Massenkonzentration an abfiltrierbaren Stoffen und ihres Glührückstandes*. (Ausgabe 01.09 1985)
- Regelblatt 45: ÖWAV-Regelblatt 45 „Oberflächenentwässerung ausgewählter Betriebsanlagen durch Versickerung und Verrieselung in den Untergrund“, Entwurf, Stand 2013
- QZV Chemie GW (2010): *Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser mit dazugehöriger Änderung der Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer, Ökologie Oberflächengewässer und Chemie Grundwasser* (Ausgabe 29.03. und 23.12.2010)