

**Verfahrensvalidierung des  
inversen Säulenversuchs zur  
Bewertung und Beurteilung  
umweltrelevanter Auswirkungen  
von Kanalrohrsanierungsmitteln  
im Flutungsverfahren**

**T 3338**

T 3338

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2016

ISBN 978-3-8167-9755-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

## **Abschlussbericht**

Verfahrensvalidierung des inversen Säulenversuchs zur Bewertung und Beurteilung umweltrelevanter Auswirkungen von Kanalrohrsanierungsmitteln im Flutungsverfahren

Freie Universität Berlin  
Fachbereich Geowissenschaften  
AG Geoökologie  
Malteserstr. 74-100, Haus G  
12249 Berlin

Bearbeiter:  
Dr. rer. nat. Robert Wagner  
Dipl.-Geogr. Judith Elfeldt  
Msc.-Geol. Sebastian Möller

Projektleitung:  
Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Terytze

Im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik

November 2015

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>7</b>
<b>2 Leistungsbeschreibung.....</b>	<b>8</b>
<b>3 Versuchsvorbereitung .....</b>	<b>9</b>
3.1 Auswahl der Bauprodukte .....	9
3.2 Säulenversuchsanlage.....	10
3.3 Überführung des Bauprodukts in die Säule .....	11
3.4 Prüfsand und Elutionsmittel .....	12
<b>4 Versuchsdurchführung .....</b>	<b>13</b>
4.1 Vor-/Injektionstests .....	13
4.2 Elutionsversuche.....	14
4.3 Parameterbestimmung.....	14
4.4 Ökotoxikologische Tests .....	15
4.5 Charakterisierung der Probekörper .....	16
4.6 Auswertung.....	16
<b>5 Ergebnisse.....</b>	<b>17</b>
5.1 Elutionsergebnisse.....	17
5.1.1 Erstcharakterisierung .....	17
5.1.2 Einfluss der Startzeit .....	19
5.1.3 Einfluss des Komponentenverhältnisses .....	21
5.1.4 Einfluss Sättigung Säulensand.....	23
5.1.5 Einfluss Komponentenverhältnis im gesättigten Zustand .....	25
5.2 Kumulative Freisetzungen.....	28
5.3 Ökotoxikologische Untersuchungen.....	31

<b>6</b>	<b>Auswertung und Diskussion</b> .....	<b>33</b>
6.1	Versuchsdurchführung.....	33
6.2	Einfluss verschiedener Versuchsrahmenbedingungen auf die Freisetzung.....	34
6.2.1	Un-/Gesättigter Säulenprüfsand.....	34
6.2.2	Komponentenverhältnis .....	35
6.2.3	Elutionsbeginn .....	35
6.3	Ökotoxikologische Bewertung .....	36
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b> .....	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>40</b>

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Säulenaufbau – Säule mit umgekehrter Fließrichtung	10
<b>Abbildung 2:</b>	Säulenanlage mit Vorratsbehältern	11
<b>Abbildung 3:</b>	Verwendete Windkesselanlage zur Injektion	11
<b>Abbildung 4:</b>	Sieblinienkurve des verwendeten Prüfsandes	12
<b>Abbildung 5:</b>	Gebildeter Prüfkörper mit charakteristischer „Haube“	17
<b>Abbildung 6:</b>	Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC, Al <sup>3+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> und K <sup>+</sup> im Elutionsversuch Flut 1	18
<b>Abbildung 7:</b>	Verlauf pH-Wert und Leitfähigkeit von Flut 1, kontinuierliche Aufzeichnung	19
<b>Abbildung 8:</b>	Verlauf pH-Wert und Leitfähigkeit von Flut 2, kontinuierliche Aufzeichnung	19
<b>Abbildung 9:</b>	Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC, Al <sup>3+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> und K <sup>+</sup> im Elutionsversuch Flut 2 (hell) im Vergleich zu den Ergebnissen von Flut 1 (dunkel)	20
<b>Abbildung 10:</b>	Verlauf pH-Wert und Leitfähigkeit von Flut 3, kontinuierliche Aufzeichnung	21
<b>Abbildung 11:</b>	Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC, Al <sup>3+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> und K <sup>+</sup> im Elutionsversuch Flut 3 (hell) im Vergleich zu den Ergebnissen von Flut 1 (dunkel)	22
<b>Abbildung 12:</b>	Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC, Al <sup>3+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> und K <sup>+</sup> im Elutionsversuch Flut 4 (hell) im Vergleich zu den Ergebnissen von Flut 1 (dunkel)	24
<b>Abbildung 13:</b>	Verlauf pH-Wert und Leitfähigkeit von Flut 6 (Wiederholung zu Flut 4), kontinuierliche Aufzeichnung (1 Messwert pro Minute)	25
<b>Abbildung 14:</b>	Verlauf pH-Wert und Leitfähigkeit von Flut 5, kontinuierliche Aufzeichnung	26
<b>Abbildung 15:</b>	Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC, Al <sup>3+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> und K <sup>+</sup> im Elutionsversuch Flut 5 (dunkel) im Vergleich zu den Ergebnissen von Flut 4 (hell)	27
<b>Abbildung 16:</b>	Kumulierte Freisetzung von Al <sup>3+</sup> , TOC, Na <sup>+</sup> und K <sup>+</sup> bezogen auf die Oberfläche der gebildeten Probekörper (ohne Haube) in den ersten 12 Fraktionen (Flut 1 bis 3) bzw. bis Fraktion 18 (Flut 4/6 und Flut 5)	29
<b>Abbildung 17:</b>	Kumulierte Freisetzung von Ca <sup>2+</sup> bezogen auf die Oberfläche der gebildeten Probekörper (ohne Haube) in den ersten 12 Fraktionen (Flut 1 bis 3) bzw. bis Fraktion 18 (Flut 4/6 und Flut 5)	30
<b>Abbildung 18:</b>	Verlauf der Hemmung im Algenhemmtest in Abhängigkeit zur Verdünnungsstufe	32

## **Tabellenverzeichnis**

<b>Tabelle 1:</b>	Überblick Parameter und Testvarianten	8
<b>Tabelle 2:</b>	Inhaltsstoffe des verwendeten Bauproduktes	9
<b>Tabelle 3:</b>	Gelietest mit pH und Leitfähigkeits-Bestimmung	10
<b>Tabelle 4:</b>	Physikalische und chemische Kennwerte des verwendeten	12
<b>Tabelle 5:</b>	Injektionstest mit unterschiedlicher Packervorbereitung/spülung	13
<b>Tabelle 6:</b>	Durchgeführte Elutionsversuche	14
<b>Tabelle 7:</b>	Verfahren zur Bestimmung der allgemeinen Parameter und des TOCs	15
<b>Tabelle 8:</b>	Gewicht, Volumen und Oberfläche der ausgebauten Prüfkörper Flut 1	17
<b>Tabelle 9:</b>	Gewicht, Volumen und Oberfläche der ausgebauten Prüfkörper im Versuch Flut 2 im Vergleich zu Flut 1	21
<b>Tabelle 10:</b>	Gewicht, Volumen und Oberfläche der ausgebauten Prüfkörper Flut 3 im Vergleich zu Flut 1	23
<b>Tabelle 11:</b>	Gewicht, Volumen und Oberfläche des ausgebauten Prüfkörpers Flut 4 im Vergleich zu Flut 1	25
<b>Tabelle 12:</b>	Gewicht, Volumen und Oberfläche des ausgebauten Prüfkörpers Flut 5 im Vergleich zu Flut 4	26
<b>Tabelle 13:</b>	Charakterisierung der Eluatproben für ökotoxikologische Untersuchungen	31
<b>Tabelle 14:</b>	Ergebnisse der ökotoxikologischen Untersuchungen	32



# 1 Einleitung

In den „Grundsätzen zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ (Teil I + Teil III Mai 2009, Teil II September 2011) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) ist festgeschrieben, dass das umweltrelevante Gefährdungspotential jener Bauprodukte, die im Zuge ihrer Anwendung als erdberührend charakterisiert werden, objektiv zu überprüfen ist. Grundlegend muss in Versuchsverfahren die Mobilisierbarkeit ökologisch relevanter Inhaltsstoffe aus Bauprodukten simuliert werden. Als geeignete Methoden sind Elutionsversuche festgelegt, deren Eignung für die Bewertung von Bodeninjektionsmitteln in mehreren Studien nachgewiesen wurde (Wagner, 2011; Wagner et al., 2012).

Für die Sanierung von nicht begehbaren Abwasserkanälen und -leitungen werden Bauprodukte als Bodeninjektionsmittel in sog. Flutungsverfahren eingesetzt. Hierbei werden zwei Komponenten nacheinander und in unterschiedlichen Verhältnissen in den Abwasserkanal gepumpt (Osebold, 2006). Das entscheidende Merkmal dieser Sanierungsmethode ist, dass die Arbeiten in situ durchgeführt und eine Freilegung der Leitungen vermieden werden kann. Die Sanierung umschließt vertikale und horizontale Leitungsabschnitte, bestehend aus Guss- und Steingut- sowie Kunststoffrohren aus PVC und PVC-U. Der Anwendungsbereich des Flutungsverfahrens zur Sanierung von Abwasserkanälen erstreckt sich von öffentlichen Kanälen, Hausanschlüssen bis Grundstücksentwässerungsanlagen.

Für die in Flutungsverfahren eingesetzten Bauprodukte im Bereich der Grundstücksentwässerung ist eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich. Zurzeit existiert jedoch für die Zulassung kein standardisiertes Elutionsverfahren zur Ermittlung des Freisetzungsverhaltens solcher Produkte. Für die Zulassung ist es jedoch erforderlich, das umweltrelevante Gefährdungspotential bewerten zu können. Nach Tabelle II.3, Teil II der „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ (DIBt, 2011) ist ein Prüfplan mit dem DIBt abzustimmen.

Da für die Bestimmung des Freisetzungsverhaltens von Bodeninjektions- und Kanalsanierungsmitteln nach DIBt (2011) das inverse Säulenverfahren als standardisierte Prüfmethode anzuwenden ist, war das Ziel den inversen Säulenversuch auch als Prüfmethode für Bauprodukte die in Flutungsverfahren eingesetzt werden, unter Berücksichtigung einer praxisnahen Herangehensweise und relevanter Parameter, anzupassen und zu standardisieren.

Die Bewertung der Umweltverträglichkeit von Bauprodukten und deren Zulassung erfordert ein anerkanntes und genormtes Prüfverfahren. Osebold (2006) weist in seinen Studien zwar darauf hin, dass sich bei realen Sanierungsvorhaben die Resultate /Zusammenhänge aufgrund vielseitiger Bedingungen Vor-Ort nicht verallgemeinern lassen. Für die Zulassung ist es jedoch notwendig, über ein Verfahren zu verfügen, was unter gegebenen Rahmenbedingungen reproduzierbare Ergebnisse gewinnt.

## 2 Leistungsbeschreibung

Ziel dieses Projekts war es, den inversen Säulenversuch, zur Gewinnung von Eluaten als Untersuchungsmedium für die ökotoxikologische Bewertung von zwei-komponentigen Bauprodukten zur Sanierung von erdverlegten Abwasserkanälen und –leitungen, praxisnah zu optimieren.

Anhand von Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses von Veränderungen verschiedener Parameter auf das Freisetzungsverhalten wurde, ausgehend vom inversen Säulenversuch, eine auf Flutungsverfahren abgestimmte Vorgehensweise entwickelt, die eine praxisnahe Bestimmung des Freisetzungsverhaltens der eingesetzten Bauprodukte gewährleistet. Als wichtigste Parameter wurden dabei die Applikationsart des Bauprodukts, das Verhältnis der Komponenten A und B zueinander, der Injektionsdruck, die Startzeit der Elution und die Wassersättigung der Säule betrachtet. Als Bauprodukt wurde ein Wasserglassystem (Komponente A) mit organischem Härter (Komponente B), das in Flutungsverfahren zur Anwendung kommt, bereitgestellt.

Der inverse Säulenversuch wurde nach dem DIN Norm-Entwurf *Elution von Bauprodukten — Perkulationsverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von Bodeninjektionsmitteln* (Stand 09.2014) vorbereitet und durchgeführt.

Das Material (Bauprodukt) wurde komponentenweise injiziert. Das Verhältnis von Komponente A und B wurde dabei variiert. Die Zeit zwischen Applikation der einzelnen Komponenten wurde an das praxisübliche Vorgehen angepasst. Die Injektion der Komponenten erfolgte in die gesättigte wie ungesättigte Säule, um mögliche Einflüsse auf die Ausbreitung und Freisetzung abschätzen zu können. Nach festgelegtem Elutionsbeginn wurde die Elution gestartet und das austretende Eluat aufgefangen. Die Säulenversuche wurden mit drei Wiederholungen (drei Parallelen) durchgeführt.

Ein Überblick über die ursprünglich geplanten Parameter und Testvarianten gibt Tabelle 1.

**Tabelle 1:** Überblick Parameter und Testvarianten

Parameter	Varianten	Bemerkung
Bauprodukt	1	Auswahl zwischen 2 versch. Härtern möglich
Applikation	1	Injektion
Verhältnis Komponenten	2	A : B = 1:1, 2:1 <sup>1</sup>
Injektionsdruck	2	0,2, 0,5
Startzeit Elution	2	10/60 min nach Applikation von Komp. 2
Wassersättigung	2	ungesättigt, gesättigt <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Durchschnittlich bei untersuchten Sanierungsmaßnahmen eingesetzte Mengen waren 262 l für Komponente 1 und 136 l für Komponente 2. Dabei variierten die Injektionsmengen für die Komponente 1 zwischen 54 l und 605 l und für die Komponente 2 zwischen 28 l und 515 l.

<sup>2</sup> Die Säule ist einmal ohne Wasser (ungesättigt) und einmal mit Wasser gefüllt (gesättigt).

Im Eluat wurden die vorgegebenen physikalischen, physiko-chemischen und chemischen (allgemeine und stoffliche) Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, TOC, Temperatur, Trübung, Geruch, Färbung und Neigung zur Schaumbildung über maximal 5 Tage bestimmt. Darüber hinaus wurden verschiedene Ionen ( $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  und  $Na^+$ ) analysiert. An ausgewählten Eluaten wurden ökotoxikologische Tests durchgeführt.

Nach erfolgter Elution wurden die gebildeten Prüfkörper ausgebaut und Masse und Volumen bestimmt sowie der Umfang gemessen.

### 3 Versuchsvorbereitung

#### 3.1 Auswahl der Bauprodukte

Als Bauprodukte wurde ein „Zwei-Komponenten-Flutverfahren zur temporären Sanierung von erdverlegten Abwasserkanälen und –leitungen“ eingesetzt. Das Bauprodukte besteht aus den Komponenten:

- Silikatkomponente (Komp. A): - Dichte bei 20°C: 1,34 – 1,38 g/cm<sup>3</sup>  
 - Leitfähigkeit bei 20°C: 25 - 40 ms/cm
- Härter CA (Komp. B): - Dichte bei 20°C: 1,31 – 1,35 g/cm<sup>3</sup>  
 - Leitfähigkeit bei 20°C: 120 - 155 ms/cm

Alle Angaben in Tabelle 2 sind den Sicherheitsdatenblättern entnommen. Der prozentuale Anteil sowie die Masse der Einzelkomponenten im verwendeten Mischverhältnis sind dem Kapitel 4.2.1 zu entnehmen.

**Tabelle 2:** Inhaltsstoffe des verwendeten Bauproduktes (Quelle: Sicherheitsdatenblätter)

Bau- produkt	Komponente	Zusammensetzung, Gefährliche Inhaltsstoffe	Wassergefährdungs- klasse (Selbsteinstufung)
Zwei-Komponenten- Flutverfahren	A: Silikat- komponente	Siliciumoxidhaltige, alkalische Lsg.	1: schwach wassergefährdend
	B: Härter	Calciumverbindung (25-50%)	1: schwach wassergefährdend
		Cycloaliphatische Ester (2,5 – 10%)	
	Beimengungen ohne gefährliche Inhaltsstoffe		

Um im Vorfeld die Reaktion beider Komponenten zu testen, wurden beide Komponenten im Verhältnis von 1:1 und 1,4:1 in einem Becher gemischt. Dabei bildete sich innerhalb von wenigen Sekunden ein weißes Konglomerat am Becherboden. Eine Messung des pH-Wertes und der Leitfähigkeit ergab folgende in Tabelle 3 aufgeführten Werte. Die Komponente A ist ein stark basisches Produkt mit einer Leitfähigkeit von 35 mS/cm. Komponente B hingegen reagiert sauer mit einem pH-Wert von 3,8 und einer Leitfähigkeit von 145 mS/cm. Die

gemessenen Leitfähigkeiten liegen in dem in Sicherheitsdatenblättern angegebenen Bereich. Der pH-Wert und die Leitfähigkeit des weißes Konglomerats (ausgehärtetes Bauprodukt) liegt bei pH 11,29 und 33 mS/cm (Mischungsverhältnis A/B 1:1) und pH 11,37 und 32 mS/cm (Mischungsverhältnis A/B 1,4:1).

Neben dem weißen Konglomerat bildet sich ein klarer Überstand. Dieser ist ebenfalls sauer und zeigt eine Leitfähigkeit die höher als die der Einzelkomponenten ist. Die Menge des Überstandes, pH-Wert und Leitfähigkeit sind jedoch abhängig vom Komponentenverhältnis.

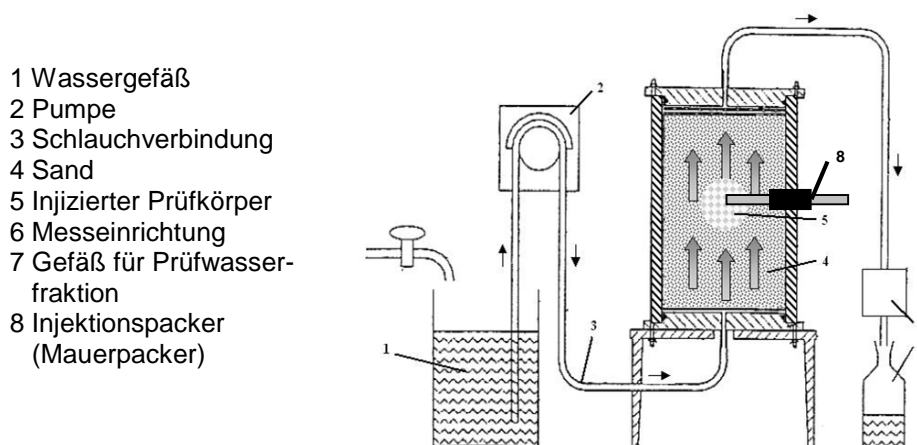
**Tabelle 3:** Geliertest mit pH und Leitfähigkeits-Bestimmung

Einzelkomponenten, Bauprodukt und Überstand nach Anmischung		Volumen	pH	Leitf.
		[ml]		[mS/cm]
Komp. A		100,00	11,64	35
Komp. B		100,00	3,82	145
Mischverhältnis 1:1	Bauprodukt	n.b.	11,29	33
	Überstand	95,00	4,42	174
Mischverhältnis 1,4:1	Bauprodukt	n.b.	11,37	32
	Überstand	67,00	4,57	192

n.b.: nicht bestimmt

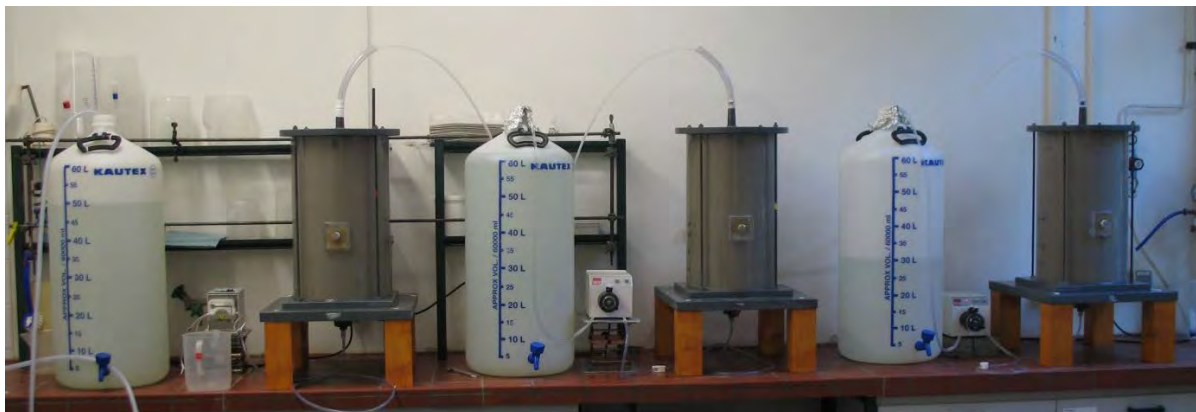
### 3.2 Säulenversuchsanlage

Der Aufbau der Säulenversuchsanlage ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Eine 50 cm hohe und im Durchmesser 30 cm breite Acrylglassäule ist an der Bodenöffnung mit einem Zufuhrschlauch und am Deckel mit einem Abfuhrschlauch versehen. Die Säule ist mit Quarzsand gefüllt. Das Prüfmaterial kann über einen Mauerpacker an einer seitlichen Öffnung in die Säule injiziert werden, oder durch Öffnung des Deckels und Schaffung einer Aushöhlung per Hand in die Säule überführt werden. Aus einem Vorratsgefäß wird das Elutionswasser mit einer Fließgeschwindigkeit von 4 l/h in die Säule von unten nach oben gepumpt. Das am oberen Abfuhrschlauch austretende Eluat wird in Messbechern aufgefangen.



**Abbildung 1:** Säulenaufbau – Säule mit umgekehrter Fließrichtung (Quelle: Schössner 2005)

In Abbildung 2 ist die Säulenversuchsanlage der AG Geoökologie der Freien Universität Berlin dargestellt.



**Abbildung 2:** Säulenanlage mit Vorratsbehältern

### 3.3 Überführung des Bauprodukts in die Säule

Die einzelnen Komponenten wurden hintereinander mittels Windkesselanlage in die Säule überführt. Das Bauprodukt wird dabei mittels Druckluft aus der Windkesselanlage (WKA) durch das Ansaugrohr und den Überlaufschlauch, der mit dem Injektionspacker in der Säule verbunden ist, injiziert.



**Abbildung 3:** Verwendete Windkesselanlage zur Injektion

Anmischversuche (Gelierprobe) zeigten, dass das Bauprodukt nach Vereinigung beider Komponenten sehr schnell, innerhalb von einigen Sekunden, ein festes weißes Konglomerat bildete (vgl. Kap. 3.1). Zur Überprüfung der Injektionsfähigkeit beider Komponenten wurden daraufhin verschiedene Vortests absolviert (Kap. 4.1). In einem ersten Injektionsversuch wurde versucht die Komponenten hintereinander in einen trockenen Sand zu injizieren. Komponente A wurde problemlos injiziert. Komponente B konnte jedoch auch mit gesteigertem Druck nicht injiziert werden. Grund dafür war die relativ schnelle Reaktion beider Komponenten

bereits im Packer. Für alle weiteren Injektionstest wurde der Packer nach Injektion von Komponente A von dieser gesäubert. Dabei wurden eine kurze Injektion/Spülung mit Trinkwasser mittels WKA sowie eine Spülung des Packers mit einer Pipette vorgenommen. Bei der ersten Variante wurde Trinkwasser durch den Packer in die Säule gepresst. Bei der zweiten Variante lief das Spülmittel und die Reste der Komponente A aus dem Packereingang wieder heraus, so dass keine Spülflüssigkeit in die Säule eintrat.

### 3.4 Prüfsand und Elutionsmittel

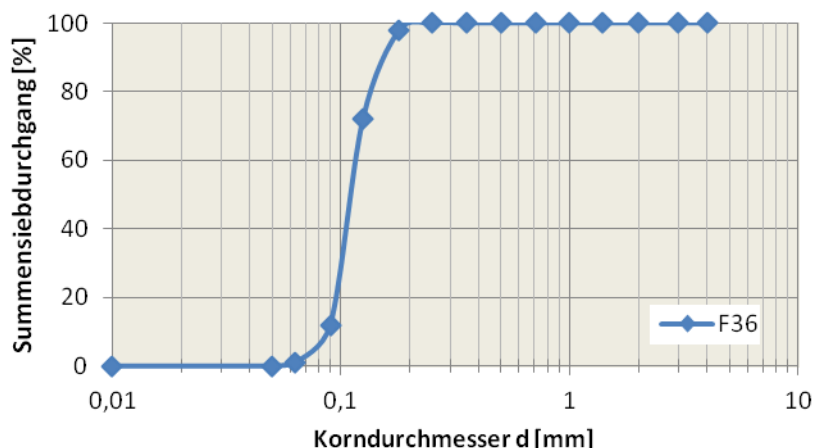
Als Füllsand für die Versuchssäulen wurde der Quarzsand aus Frechen mit der mittleren Korngröße von 0,16 mm gewählt. Dieser Sand erfüllt die Qualitätskriterien einer engen Stufung und der SiO<sub>2</sub>-Reinheit > 99 %.

In Tabelle 4 sind die wesentlichen Kennwerte des Prüfsands zusammengefasst. Die Daten entstammen dem Sicherheitsdatenblatt des Herstellers. Der Sand wird als F36 bezeichnet.

**Tabelle 4:** Physikalische und chemische Kennwerte des verwendeten Prüfsands  
(Quelle: Sicherheitsdatenblatt)

Prüfsand	F36	Kornklasse [mm]	Mengenanteil Gew.-%
mittlere Korngröße [mm]	0,16	0,250 - 0,355	2
Theor. spez. Oberfläche [cm <sup>2</sup> /g]	144	0,180 - 0,250	26
SiO <sub>2</sub> [%]	99,3	0,125 - 0,180	60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,5	0,090 - 0,125	11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,06	< 0,090	1

Der Abbildung 4 ist die Summenkurve der Sieblinie des Sandes F36 zu entnehmen.



**Abbildung 4:** Sieblinienkurve des verwendeten Prüfsandes

Als Elutionsmittel wurde nach E DIN 19631 (2014-09) Trinkwasser verwendet.

## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Vor-/Injektionstests

Die Vortests zeigten, dass nur eine Zwischenspülung des Packers zu einem Injektionserfolg führt. Die favorisierte Variante ist dabei die Spülung mittels Pipette, da dadurch die bereits injizierte Komponente A unbeeinflusst bleibt. Dies ist jedoch nur in der ungesättigten Säule möglich. In der gesättigten Säule wird das Wasser/Bauprodukt bei offenem Packer wieder aus der Säule gedrückt. Hier wurde eine kurze Injektionsspülung mit 10 – 20 ml TW erfolgreich erprobt. Dabei kommt es jedoch zu geringen Verdünnungseffekten.

Der Injektionsdruck bei Komponente A musste von anfänglich 0,5 bar auf 1 bar angehoben werden. Die Injektion bei diesem Druck dauerte zwischen 9 und 24 Minuten. Bei Injektion von Komponente B musste der Druck von 1 bar auf 1,5 bar angehoben werden, um das Bauprodukt vollständig in die Säule zu überführen. Nach ca. insgesamt 60 min konnte die Injektion beider Komponenten abgeschlossen werden.

Die Prüfkörper waren dabei bei der Injektion in einen ungesättigten Sand am besten (rund) ausgebildet.

**Tabelle 5:** Injektionstest mit unterschiedlicher Packervorbereitung/spülung

Vortest	Sand	Packer	Ergebnis Injektion	Bemerkung
1	Trocken, nicht gespült	Unbehandelt, nicht gespült	Nicht möglich	Verstopfung Packer
2	Trocken, nicht gespült	Freigespült mit 10-20ml Trinkwasser	möglich	Langgezogener Prüfkörper
3	Feucht ungesättigt	Freigespült mit 10-20ml Trinkwasser	möglich	Runder Prüfkörper
4	Feucht ungesättigt	Spülen des Packers mit Pipette	möglich	Runder Prüfkörper
5	Feucht ungesättigt	Unbehandelt, nicht gespült	Nicht möglich	Verstopfung Packer
6	Feucht ungesättigt	Spülen des Packers mit Pipette	möglich	Runder Prüfkörper
7	Feucht gesättigt	Freigespült mit 10-20ml Trinkwasser	möglich	Unförmiger Prüfkörper
8	Feucht gesättigt	Spülen des Packers mit Pipette	Nicht möglich	Komp. A dringt aufgrund des Druckes des umgebenden Wassers von innen durch den Packer

## 4.2 Elutionsversuche

Die Vorbereitung der Säulen und die Elution der Bauprodukte erfolgten auf Grundlage der E DIN 19631 (2014-09) „Elution von Bauprodukten — Perkolationsverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von Bodeninjektionsmitteln“

Die geplanten Testvarianten aus Tabelle 1 wurden durch die durchgeführten Voruntersuchungen reduziert. Der Parameter Injektionsdruck ist nicht variabel, zumindest nicht in dem Bereich von 0,2 bis 1,5 bar. Die Injektionen erfolgen somit bei wesentlich höheren Drücken als bei realen Sanierungsmaßnahmen. Eine Ursache könnte im verwendeten Säulensand liegen, der sich stark von Böden/Substraten unterscheidet, die bei der Verfüllung von Leitungsräumen verwendet werden (vgl. Osebold, 2006).

Das Verhältnis der Komponente A zu Komponente B wurde in Absprache mit dem DIBt nachträglich, auf Grundlage einer Auswertung von durchgeführten Sanierungsmaßnahmen, angepasst.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die durchgeführten Elutionsvarianten.

**Tabelle 6:** Durchgeführte Elutionsversuche

Elution	Verhältnis Komponente A zu B	Startzeit Elution	Wasser-sättigung	Säulen-parallelen	Probenentnahme für ökotoxikologische Untersuchung
Flut 1	1,4 : 1	10 min	ungesättigt	3	
Flut 2	1,4 : 1	60 min	ungesättigt	3	
Flut 3	1 : 1	10 min	ungesättigt	3	
Flut 4	1,4 : 1	10 min	gesättigt	1	
Flut 5	1 : 1	10 min	gesättigt	2	X
Flut 6	1,4 : 1	10 min	gesättigt	1 (Wdhl. Flut 4)	X

Für die ökotoxikologischen Untersuchungen der Eluate wurde aus Versuch Flut 5 und 6 insgesamt 5 Proben entnommen.

## 4.3 Parameterbestimmung

Die Prüfwässer (Eluate) wurden durch die AG Geoökologie der FU Berlin alle 30 Minuten auf die Parameter Geruch, Färbung, Trübung und Neigung zur Schaumbildung analysiert und anhand von pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und TOC charakterisiert. Weiterhin wurden die Blindwerte und Proben des Elutionswassers nach den genannten Parametern untersucht. Die verwendeten Methoden sind der Tabelle 7 zu entnehmen.



**Tabelle 7:** Verfahren zur Bestimmung der allgemeinen Parameter und des TOCs

Parameter	Verfahren
pH-Wert	DIN 38404-5:2009-07
elektrische Leitfähigkeit	DIN EN 27888:1993-11
Geruch	DIN EN 1622:2006-10 (Anhang C – Qualitatives, vereinfachtes Verfahren)
Färbung	DIN EN ISO 7887:2012-04
Trübung	DIN EN ISO 7027:2000-04
Neigung zur Schaumbildung	Arbeitsanweisung FU Berlin
TOC	DIN EN 1484:1997-08
Elemente	DIN EN ISO 11885:2009-09 (Wasser) (mittels ICP-OES)

Für jeden Untersuchungsansatz wurde zusätzlich eine Säule ausgewählt die mit einer kontinuierlichen Datenerfassung der Parameter pH und Leitfähigkeit ausgestattet wurde und so über die gesamte Versuchszeit Ergebnisse zum Freisetzungverlauf lieferte.

#### 4.4 Ökotoxikologische Tests

Aus den Einzelfractionen ausgewählter Elutionsversuche wurden insgesamt 5 Mischfraktionen (2-mal Maximalphase, 2-mal Abklingphase und 1-mal Anstiegsphase) gebildet. Als Leitparameter diente die Leitfähigkeit, TOC und die Na<sup>+</sup> Konzentration in den Eluaten.

Die Mischfraktionen wurden ebenfalls auf die vorgegebenen physikalisch-chemischen (allgemeinen und stofflichen) Parameter untersucht.

Folgenden aquatischen Ökotoxizitätstest wurden untersucht:

- Leuchtbakterienlumineszenztest: nach DIN EN ISO 11348-2 mit flüssig getrockneten Bakterien (*Vibrio fischeri*)
- Algenwachstumshemmtest: nach DIN 38412-33 mit der Grünalge *Desmodesmus subspicatus*
- Daphnientest: nach DIN 38412-30 mit *Daphnia magna*

#### **4.5 Charakterisierung der Probekörper**

Zur Charakterisierung der gebildeten Probekörper wurden die ausgebauten Probekörper gewogen. Das Volumen wurde im Wasserbad durch die Verdrängung des Wassers bestimmt. Die Oberfläche des bei der Injektion ausgebildeten Probekörpers wurde rechnerisch ermittelt.

#### **4.6 Auswertung**

Die Ergebnisse der Elutionsversuche wurden statistisch ausgewertet. In einem ersten Schritt wurden aus den 3 Parallelen pro Versuch die Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet. Danach wurden die Mittelwerte der Parameter TOC , Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> in der Phase der kontinuierlichen Beprobung kumulativ bestimmt und die Abgabe pro m<sup>2</sup> Bauprodukt berechnet.

Um den Einfluss verschiedener Parameter herauszustellen, werden die kumulativ bestimmten, freigesetzten Inhaltsstoffe verglichen.

Des Weiteren werden hinsichtlich der folgenden Punkte die erhobenen Ergebnisse ausgewertet:

1. Verhältnis Komp. A : Komp. B
2. un-/gesättigter Säulenprüfsand
3. Injektion des zu prüfenden Materials
4. Injektionsdruck
5. Startpunkt Elution
6. Elutionsdauer
7. Prüfbericht

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Elutionsergebnisse

#### 5.1.1 Erstcharakterisierung

In einem ersten Versuch (Flut 1) zur generellen Charakterisierung des Elutions- bzw. Freisetzungsverlauf wurde das Bauprodukt in eine ungesättigte Säule injiziert. Die vorbereitete Säule wurde nach der Abnahme des Blindwertes entwässert. Die Bauproduktkomponenten wurden nacheinander mit dem Komponentenverhältnis von 1,4 (A) : 1 (B) eingepresst. 10 min nach Aushärtung des Bauproduktes wurde die Elution gestartet.



**Abbildung 5:** Gebildeter Prüfkörper mit charakteristischer „Haube“

Die Injektion verlief in allen drei Säulen reibungslos. Alle drei Prüfkörper waren im unteren Bereich rund, mit einer aufgesetzten Haube (Abb. 5 & Anhang A), die sich bis zur Sandoberkante in der Säule ausdehnte. Die aufgesetzte Haube zeigte eine geringe Stabilität.

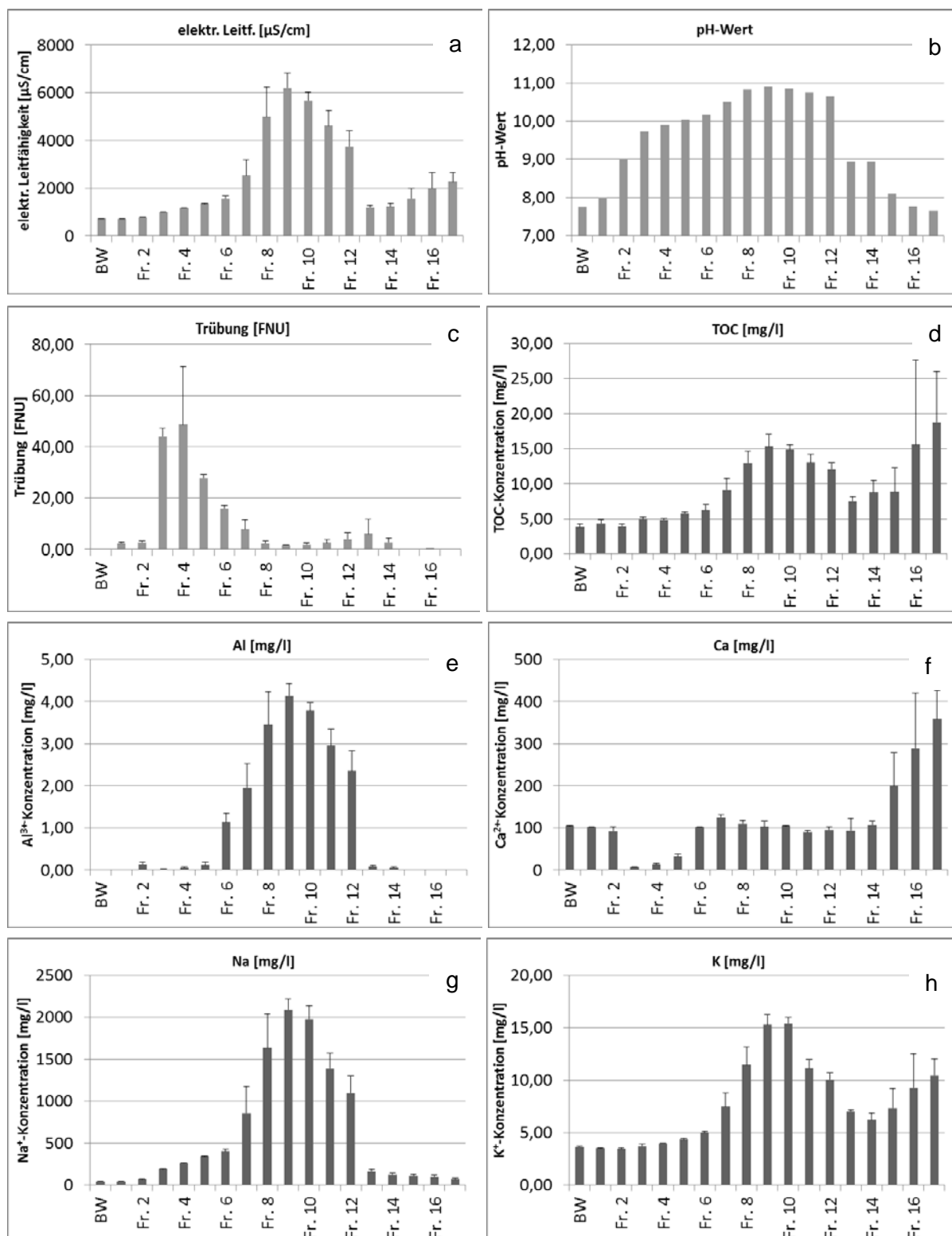
Für die ‚Prüfkörper mit Haube‘ als auch für ‚Prüfkörper ohne Haube‘ wurden die Merkmale Gewicht und Volumen erhoben (Tab. 8). Umfang und Oberfläche wurden jedoch nur für „ohne Haube“ ermittelt.

Die Prüfkörper der 3 Parallelen zeigten ein ähnliches Aussehen und ein vergleichbares Gewicht und Volumen sowie eine vergleichbare Oberfläche.

**Tabelle 8:** Gewicht, Volumen und Oberfläche der ausgebauten Prüfkörper Flut 1

Prüfkörper & Haube	MW	STABW
Gewicht [g]	4544,67	237,00
Volumen [ml]	2480,00	125,30
Prüfkörper ohne Haube	MW	STABW
Gewicht [g]	3075,67	165,06
Volumen [ml]	1630,00	95,39
Umfang [cm]	43,50	0,50
Oberfläche (cm <sup>2</sup> )	602,32	13,85

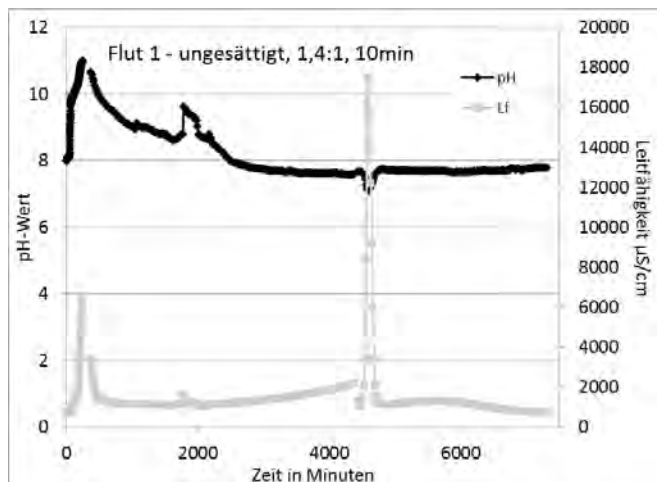
In Abbildung 6 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> dargestellt. Die Parameter Geruch, Farbe und Neigung zur Schaumbildung waren in allen Versuchen unauffällig (nicht dargestellt).



**Abbildung 6 a-h:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> im Elutionsversuch Flut 1

Die einzelnen Parameter zeigten eine unterschiedliche Ausprägung im Freisetzungverhalten an. Das Peakmaximum bei den Parametern pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, TOC, Al<sup>3+</sup>, Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> wurde in der Fraktion 9/10 erreicht. Die elektr. Leitfähigkeit, TOC und K<sup>+</sup> stiegen jedoch

zum Ende der Elution (Fr. 17) wieder an. Der TOC-Verlauf zeigte in Fraktion 17 die höchste Konzentration an organischen Kohlenstoff.

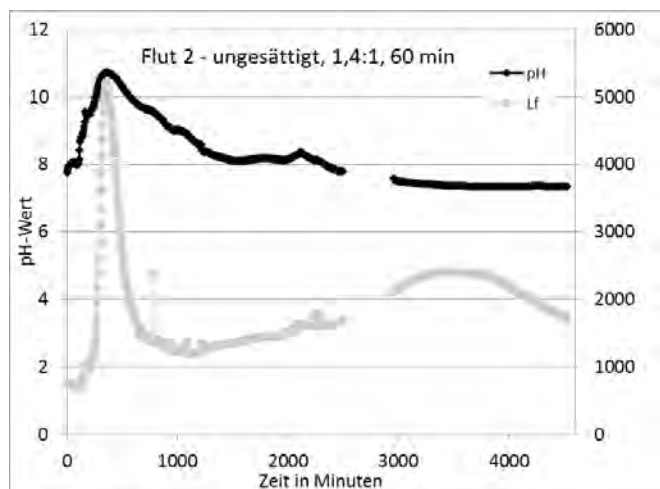


**Abbildung 7:** Verlauf pH-Wert und Leitfähigkeit von Flut 1, kontinuierliche Aufzeichnung (1 Messwert pro Minute)

ist durch eine 60 minütige Standzeit der Pumpe entstanden. Durch längere Kontaktzeit zum umgebenden Wasser haben sich höhere Konzentrationen gebildet, die bei Wiederanstellen der Pumpe zu Leitfähigkeitswerten bis zu 18 mS/cm und einer pH-Wertabsenkung auf 7,1 geführt haben.

### 5.1.2 Einfluss der Startzeit

Zur Überprüfung des Einflusses der Startzeit (Flut 2) wurde die Elution nach 60 min bei ansonst gleichen Versuchsbedingungen wie 'Flut 1' (Komponentenverhältnis 1,4 (A) : 1 (B), Injektion in ungesättigte Säule) gestartet.



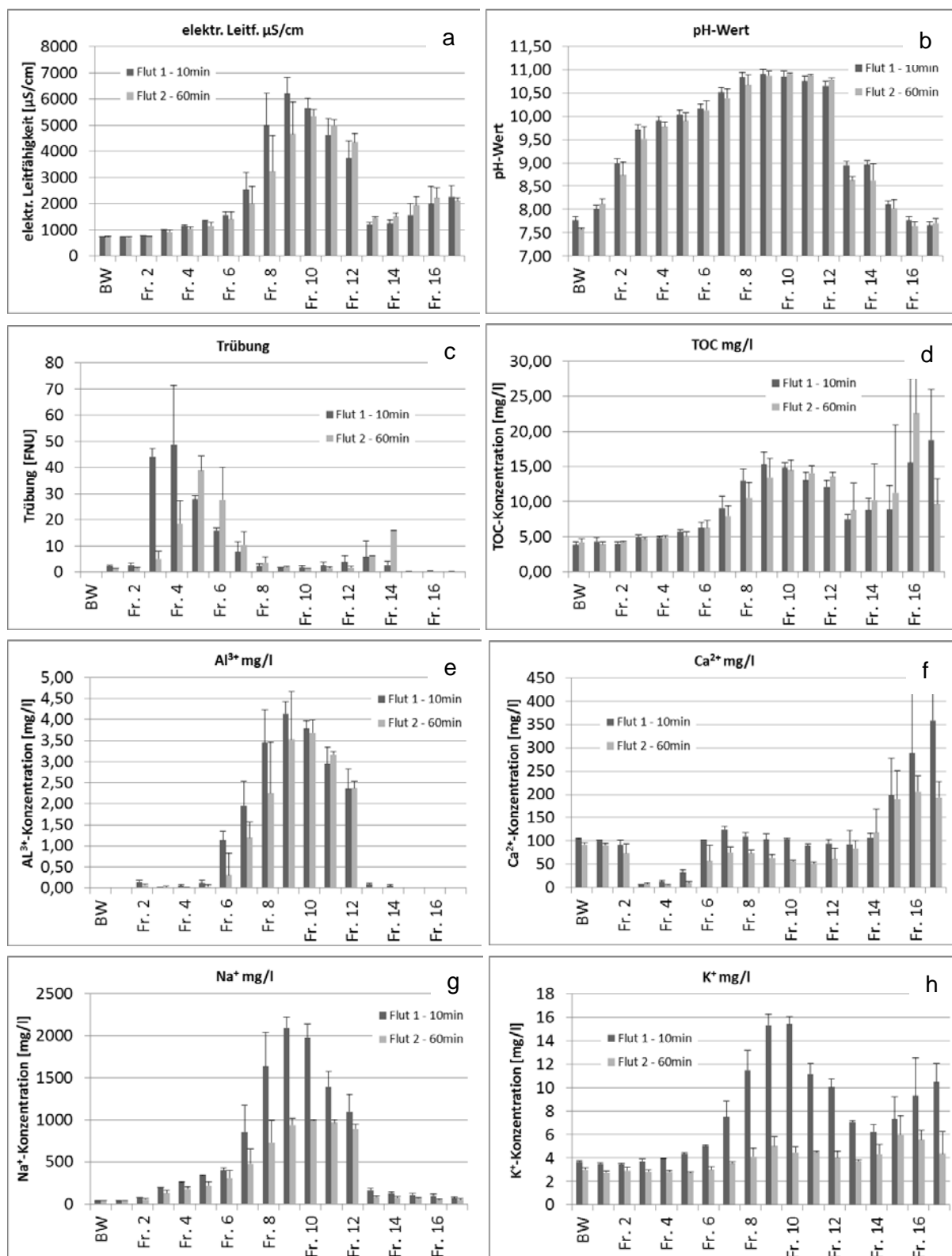
**Abbildung 8:** Verlauf pH-Wert und Leitfähigkeit von Flut 2, kontinuierliche Aufzeichnung (1 Messwert pro Minute)

PH-Wert,  $Al^{3+}$ - und  $Na^{+}$ -Konzentration gingen in der 17. Fraktion wieder auf das Blindwertniveau zurück. Die Trübung zeigte eine anfängliche sichtbare Trübe bis ca. 50 FNU und ging danach schnell wieder zum Ausgangsniveau zurück. Calcium zeigte in Fraktion 3 – 5 eine Abnahme der Konzentration bis unter 10 mg/l (Blindwertniveau 105 mg/l). Ab Fraktion 15 kam es dagegen zu einer verstärkten Freisetzung an  $Ca^{2+}$ -Ionen.

Abbildung 7 zeigt den Verlauf des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit über einen Zeitraum von 120 Stunden. Nach dieser Zeit sind die gemessenen Werte wieder auf Blindwertniveau abgesunken. Der Peak bei ca. 4600 min

Die Injektion verlief ebenfalls in allen drei Säulen reibungslos. Die kontinuierliche Messung von pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit über die gesamte Versuchsdauer ist in Abbildung 8 dargestellt. In Abbildung 9 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC,  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^{+}$  und  $K^{+}$  im Vergleich zu den Ergebnissen von Versuch 'Flut 1' fraktionsweise dargestellt. Die Parameter Geruch, Farbe und Neigung zur Schaumbildung waren in allen Versuchen unauffällig (nicht dargestellt).

Die einzelnen Parameter zeigten eine vergleichbare Kurvenform zu Flut 1 (10 min Elutionsstart). Die Intensität der Freisetzung war jedoch in allen betrachteten Parametern geringer. Der TOC-Verlauf zeigt 2 Konzentrationsmaxima bei Fraktion 9 und 16.



**Abbildung 9 a-h:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  im Elutionsversuch Flut 2 (hell) im Vergleich zu den Ergebnissen von Flut 1 (dunkel)

Nach beendeter Elution wurden die gebildeten Prüfkörper ausgebaut, vermessen, gewogen und das Volumen bestimmt (Tab. 9) sowie fotografiert (siehe Anhang A). Wie die Prüfkörper im ersten Versuch, besaßen auch die Prüfkörper Flut 2 eine ‚Haube‘. Die ausgebauten Prüfkörper („Prüfkörper ohne Haube“) besaßen im Vergleich zu Flut 1 ein größeres Gewicht und Volumen.

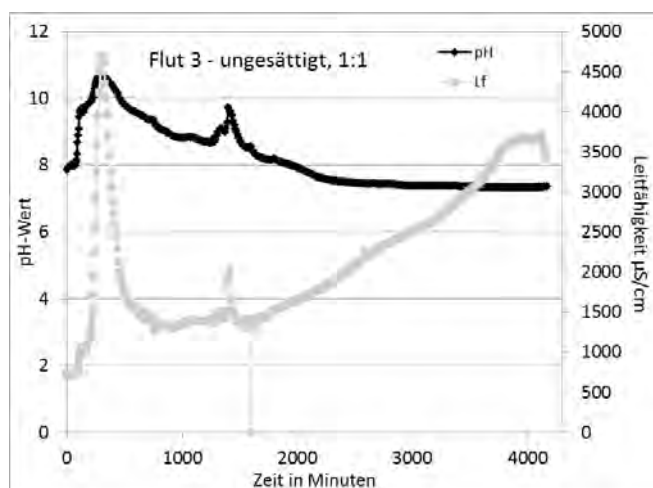
**Tabelle 9:** Gewicht, Volumen und Oberfläche der ausgebauten Prüfkörper im Versuch Flut 2 im Vergleich zu Flut 1

Prüfkörper & Haube	FLUT 2					FLUT 1	
	Säule A	Säule B	Säule C	MW	STABW	MW	STABW
<b>Gewicht [g]</b>	4985,00	5507,00	4990,00	<b>5160,67</b>	299,94	4544,67	237,00
<b>Volumen [ml]</b>	2650,00	2825,00	2700,00	<b>2725,00</b>	90,14	2480,00	125,30
Prüfkörper ohne Haube	Säule A	Säule B	Säule C	MW	STABW	MW	STABW
<b>Gewicht [g]</b>	3640,00	3382,00	3331,00	<b>3451,00</b>	165,65	3075,67	165,06
<b>Volumen [ml]</b>	1970,00	1750,00	1740,00	<b>1820,00</b>	130,00	1630,00	95,39
<b>Umfang [cm]</b>	43,50	43,50	44,00	<b>43,67</b>	0,29	43,50	0,50
<b>Oberfläche (cm<sup>2</sup>)</b>	602,26	602,26	616,19	<b>606,91</b>	8,04	602,32	13,85

### 5.1.3 Einfluss des Komponentenverhältnisses

Zur Überprüfung des Einflusses des Komponentenverhältnis (Flut 3) wurde das Verhältnis der Komponenten 1 (A) : 1 (B) gewählt. Die Injektion fand wieder in eine ungesättigte Säule statt. Die Elution wurde 10 min nach der Aushärtung des Bauproduktes gestartet.

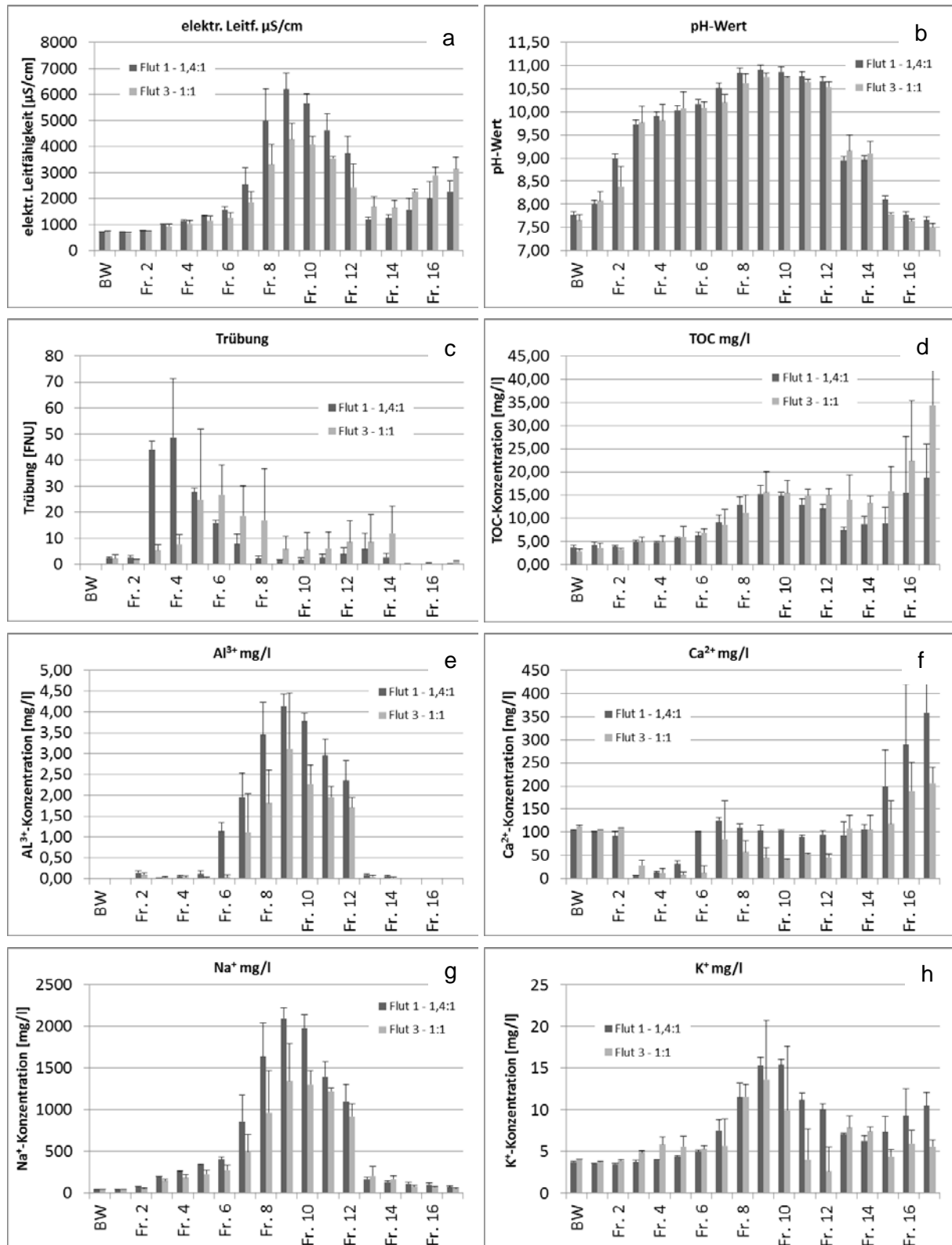
Die Injektion verlief wie Flut 1 und 2 in allen drei Säulen reibungslos. Der TOC-Verlauf zeigt wieder 2 Konzentrationsmaxima (Fraktion 9 und 17). Im Vergleich zu Flut 1 ist die TOC-



**Abbildung 10:** Verlauf pH-Wert und Leitfähigkeit von Flut 3, kontinuierliche Aufzeichnung (1 Messwert pro Minute)

Freisetzung ab Fraktion 11 höher. Dies war ebenfalls beim Parameter elektr. Leitfähigkeit zu beobachten, der durch das angleichen der Komponentenverhältnisse eine höhere Leitfähigkeit ab Fraktion 13 aufzeigte, die am Ende der Elution, wie in Flut 1 und 2, wieder sank (Abb. 10).

In Abbildung 11 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> im Vergleich zu den Ergebnissen von Versuch 'Flut 1' dargestellt. Die Parameter Geruch, Farbe und Neigung zur Schaumbildung waren in allen Versuchen unauffällig (nicht dargestellt).



**Abbildung 11 a-h:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  und  $\text{K}^{+}$  im Elutionsversuch Flut 3 (hell) im Vergleich zu den Ergebnissen von Flut 1 (dunkel)



Die einzelnen Parameter zeigten wieder eine vergleichbare Kurvenform zu Flut 1 und Flut 2. Die Intensität der Freisetzung war in ihrer Gesamtheit geringer als im Versuch Flut 1 mit dem Komponentenverhältnis 1,4 : 1.

Nach beendeter Elution wurden die gebildeten Prüfkörper ausgebaut, vermessen, gewogen und das Volumen bestimmt (Tab. 10) sowie fotografiert (siehe Anhang A).

Im Vergleich zu Flut 1 bildeten sich durch das geänderte Komponentenverhältnis (1:1) größere und schwerere Prüfkörper heraus. Die ausgebauten Prüfkörper zeigten ein ähnliches Aussehen wie bei Flut 1 und 2.

**Tabelle 10:** Gewicht, Volumen und Oberfläche der ausgebauten Prüfkörper Flut 3

Prüfkörper & Haube	FLUT 3					FLUT 1	
	Säule A	Säule B	Säule C	MW	STABW	MW	STABW
<b>Gewicht [g]</b>	5639,00	5695,00	5676,00	5670,00	28,48	4544,67	237,00
<b>Volumen [ml]</b>	2850,00	2520,00	2790,00	2720,00	175,78	2480,00	125,30
Prüfkörper ohne Haube	Säule A	Säule B	Säule C	MW	STABW	MW	STABW
<b>Gewicht [g]</b>	3935,00	3930,00	3864,00	3909,67	39,63	3075,67	165,06
<b>Volumen [ml]</b>	1940,00	1880,00	2300,00	2040,00	227,16	1630,00	95,39
<b>Umfang [cm]</b>	45,75	47,00	49,50	47,42	1,91	43,50	0,50
<b>Oberfläche (cm<sup>2</sup>)</b>	666,18	703,08	779,86	716,37	58,00	602,32	13,85

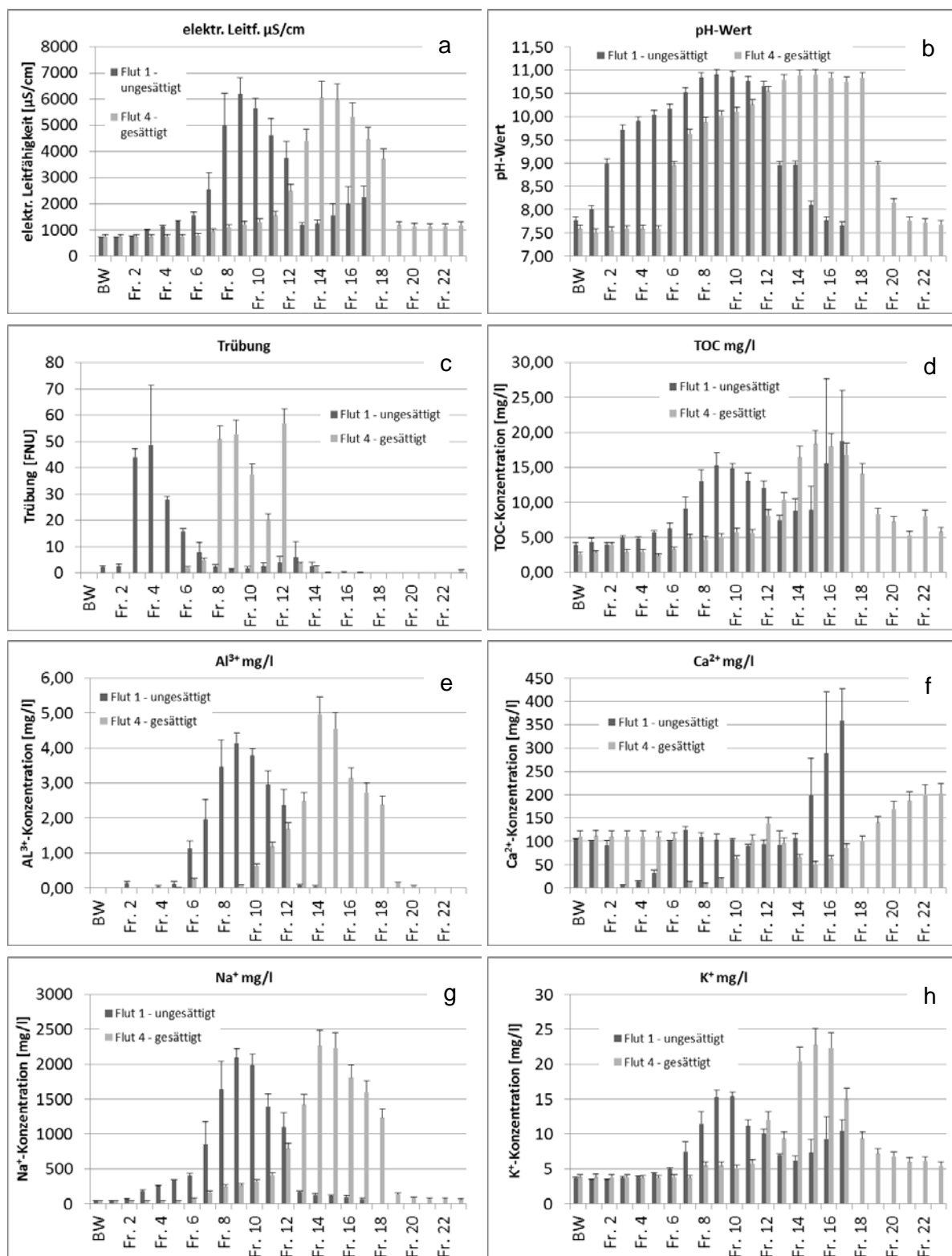
#### 5.1.4 Einfluss Sättigung Säulensand

Zur Überprüfung des Einflusses der Sättigung des Säulensandes wurde die Säule nach Abnahme des Blindwertes nicht entwässert. Die Injektion wurde somit nach Abnahme des Blindwertes direkt durchgeführt. Das Verhältnis der Komponenten betrug 1,4 (A) : 1 (B). 10 min nach Aushärtung des Bauproduktes wurde die Elution gestartet. Der Versuch wird als ‚Flut 4‘ bezeichnet.

Die Injektion verlief nur in einer der drei Säulen ohne Probleme. Die Elution wurde deshalb nur mit einer Säule durchgeführt. In Abbildung 12 sind die Einzelwerte der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> im Vergleich zu den Ergebnissen von Versuch ‚Flut 1‘ dargestellt. Die Parameter Geruch, Farbe und Neigung zur Schaumbildung waren in allen Versuchen unauffällig (nicht dargestellt).

Durch den unterschiedlichen Sättigungszustand des Säulensandes ist der Kurvenverlauf im Vergleich zu den erhaltenen Freisetzungsverläufen in Flut 1 bis 3 um ca. 6 Fraktionen verschoben.

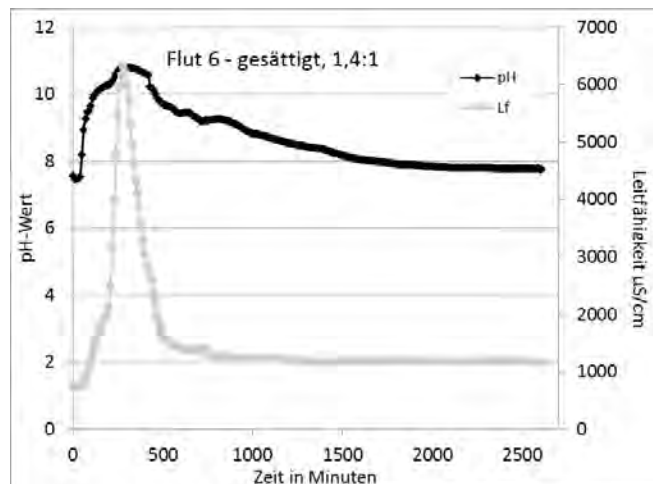
Eine kontinuierliche Aufzeichnung konnte durch Ausfall der dafür vorgesehenen Säule im Versuch Flut 4 nicht erfolgen. Dies wurde in Flut 6 nachgeholt und ist im Folgenden ebenfalls dargestellt (Abb. 13).



**Abbildung 12 a-h:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  und  $\text{K}^{+}$  im Elutionsversuch Flut 4 (hell) im Vergleich zu den Ergebnissen von Flut 1 (dunkel)

Der erhaltene pH-Wert war im gesättigten Zustand (Flut 4) in Verlauf und Höhe vergleichbar mit dem pH-Werten im ungesättigten Zustand (Flut 1). Die elektr. Leitfähigkeit zeigte ebenfalls

gleiche Werte. Ausgenommen der Verlauf in den letzten vier Fraktionen. Im ungesättigten Zustand stieg die Leitfähigkeit um ca. 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf über 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  an. Im gesättigten Zustand verblieb die Leitfähigkeit konstant bei knapp über 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Der Blindwert wurde innerhalb der Versuchszeit nicht erreicht (vgl. auch Abb. 13). Der TOC Wert erreichte im gesättigten Zustand eine höhere Freisetzung im ersten Peakmaximum als im ungesättigten Zustand. Ähnlich wie beim Parameter elektr. Leitfähigkeit blieb die TOC-Konzentration über dem Niveau des Blindwertes, stieg aber nicht wie in Flut 1 zum Ende hin an. Die Parameter  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  wiesen geringfügig höhere Konzentrationen im Peakmaximum auf, als im Vergleich zu den Ergebnissen von Versuch 'Flut 1'. Am Ende der Elution am Tag 4 war bei  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  das Blindwertniveau wieder erreicht. Calcium zeigte eine zusätzliche kleinere Konzentrations-abnahme am Ende des ersten Elutions-tages und eine geringeren Anstieg der Freisetzung am Ende des Versuches im Vergleich zum Versuch 'Flut 1'. Nach beendeter Elution wurden die gebildeten Prüfkörper wie zuvor ausgebaut, vermessen, gewogen und das Volumen bestimmt (Tab. 11)



**Abbildung 13:** Verlauf pH-Wert und Leitfähigkeit von Flut 6 (Wiederholung zu Flut 4), kontinuierliche Aufzeichnung (1 Messwert pro Minute)

dem Niveau des Blindwertes, stieg aber nicht wie in Flut 1 zum Ende hin an. Die Parameter  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  wiesen geringfügig höhere Konzentrationen im Peakmaximum auf, als im Vergleich zu den Ergebnissen von Versuch 'Flut 1'. Am Ende der Elution am Tag 4 war bei  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  das Blindwertniveau wieder erreicht. Calcium zeigte eine zusätzliche kleinere Konzentrations-abnahme am Ende des ersten Elutions-tages und eine geringeren Anstieg der Freisetzung am Ende des Versuches im Vergleich zum Versuch 'Flut 1'. Nach beendeter Elution wurden die gebildeten Prüfkörper wie zuvor ausgebaut, vermessen, gewogen und das Volumen bestimmt (Tab. 11)

sowie fotografiert (siehe Anhang A).

**Tabelle 11:** Gewicht, Volumen und Oberfläche des ausgebauten Prüfkörpers Flut 4 im Vergleich zu Flut 1

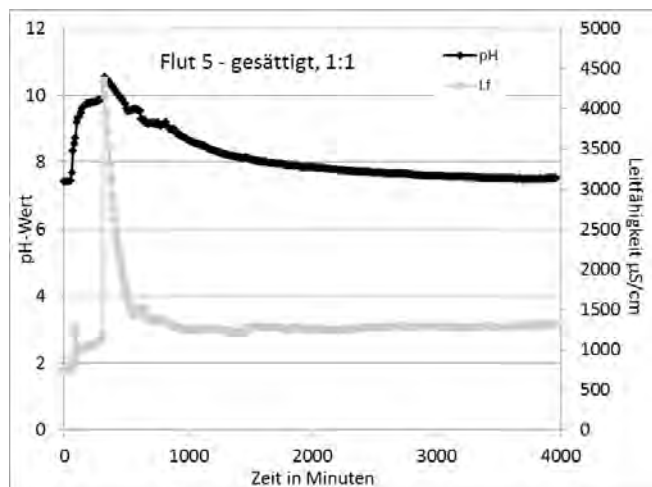
	FLUT 4		FLUT 1	
Prüfkörper & Haube	Säule A	MW	STABW	
Gewicht [g]	4081,00	4544,67	237,00	
Volumen [ml]	1980,00	2480,00	125,30	
Prüfkörper ohne Haube	Säule A	MW	STABW	
Gewicht [g]	3108,00	3075,67	165,06	
Volumen [ml]	1640,00	1630,00	95,39	
Umfang [cm]	44,00	43,50	0,50	
Oberfläche (cm <sup>2</sup> )	616,19	602,32	13,85	

Der erhaltene Prüfkörper zeigte ein ähnliches Aussehen und ein vergleichbares Gewicht und Volumen sowie eine vergleichbare Oberfläche.

### 5.1.5 Einfluss Komponentenverhältnis im gesättigten Zustand

Zur wiederholten Überprüfung des Einflusses des Komponentenverhältnisses wurde der Versuch in der gesättigten Säule nochmals durchgeführt (Flut 5). Das Verhältnis der Komponenten betrug 1 (A) : 1 (B). 10 min nach Aushärtung des Bauproduktes wurde die Elution gestartet.

Die Injektion verlief nur in zwei der drei Säulen ohne Probleme. Die Elution wurde deshalb mit zwei Säulen durchgeführt.



**Abbildung 14:** Verlauf pH-Wert und Leitfähigkeit von Flut 5, kontinuierliche Aufzeichnung (1 Messwert pro Minute)

Der erhaltene pH-Wert in Flut 5 war in Verlauf und Höhe vergleichbar mit den pH-Werten in Flut 4. Die elektr. Leitfähigkeit zeigte eine geringere Freisetzung an, die jedoch am Ende des Versuchs ebenfalls konstant bei knapp über 1000 µS/cm über dem Blindwert lag (Abb. 14). Der TOC Wert zeigte eine frühere und geringfügig höhere Freisetzung im Vergleich zu Flut 4 an. Wie beim Parameter elektr. Leitfähigkeit blieb die TOC-Konzentration auch in der letzten Fraktion über dem Niveau des Blindwertes. Die Parameter  $Al^{3+}$ ,  $Na^+$  und  $K^+$  wiesen geringere Konzentrationen im Elutionsverlauf, im Vergleich zu den Ergebnissen von Versuch 'Flut 4', auf. Am

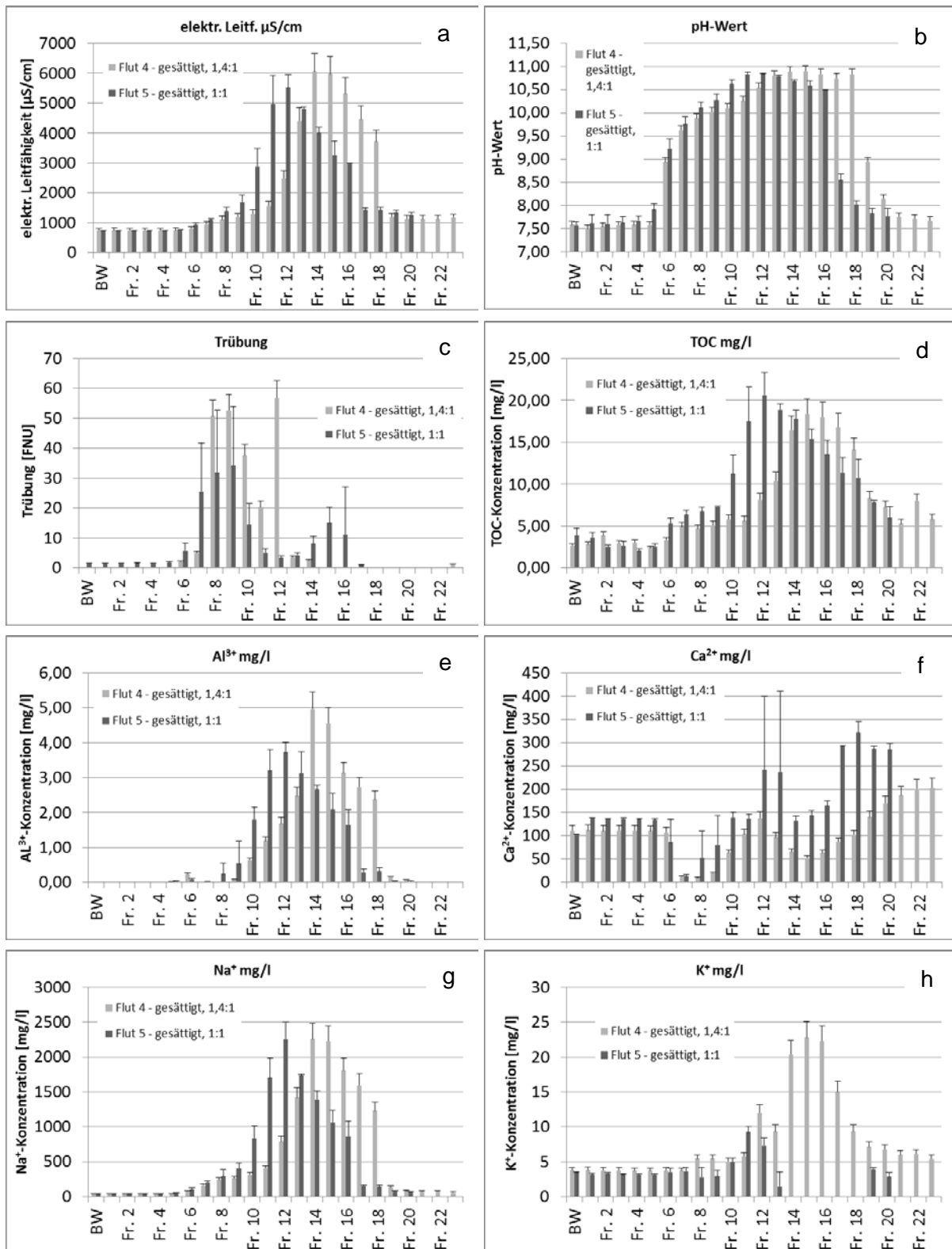
Ende der Elution am Tag 4 war bei  $Al^{3+}$ ,  $Na^+$  und  $K^+$  das Blindwertniveau wieder erreicht. Kalium wies jedoch einen untypischen Verlauf im Bereich der Fraktionen 13 – 18 auf. Hier wurde kein Kalium detektiert. Calcium zeigte einen ähnlichen Kurvenverlauf mit zwei Konzentrationsabnahmen und einem Anstieg in den letzten Eluatfraktionen. Im Vergleich zum Versuch 'Flut 4' wurde jedoch mehr  $Ca^{2+}$  freigesetzt.

**Tabelle 12:** Gewicht, Volumen und Oberfläche des ausgebauten Prüfkörpers Flut 5 im Vergleich zu Flut 4

	FLUT 5			FLUT 4
Prüfkörper & Haube	Säule A	Säule C	MW	Säule A
Gewicht [g]	4950,00	n.b.b.	--	4081,00
Volumen [ml]	2400,00	n.b.b.	--	1980,00
Prüfkörper ohne Haube	Säule A	Säule C	MW	Säule A
Gewicht [g]	3937,00	3939,00	3937,00	3108,00
Volumen [ml]	1865,00	1790,00	1865,00	1640,00
Umfang [cm]	46,25	46,75	46,25	44,00
Oberfläche (cm <sup>2</sup> )	680,90	695,62	680,90	616,19

\*n.b.b.: nicht bestimmbar, da Haube beim Ausbau zerstört

Nach beendeter Elution wurden die gebildeten Prüfkörper wie zuvor ausgebaut, vermessen, gewogen und das Volumen bestimmt (Tab. 12) sowie fotografiert (siehe Anhang A). Die Werte für 'Prüfkörper mit Haube' konnten nur für Säule A bestimmt werden, da die Haube des Prüfkörpers in der zweiten Säule beim Ausbau zerbrach. In Abbildung 15 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC,  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  und  $K^+$  im Vergleich zu den Ergebnissen von Versuch 'Flut 4' dargestellt.



**Abbildung 15 a-h:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Trübung, TOC,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  und  $\text{K}^{+}$  im Elutionsversuch Flut 5 (dunkel) im Vergleich zu den Ergebnissen von Flut 4 (hell)

## **5.2 Kumulative Freisetzungen**

Zur Berechnung der kumulativen Freisetzung wurde aus dem gemessenen Umfang der Baukörper die Oberfläche der Prüfkörper berechnet und mit den freigesetzten Stoffmengen ins Verhältnis gesetzt. Die blindwertbereinigten Stoffmengen von TOC, Al<sup>3+</sup>, Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> wurden im Bereich der kontinuierlichen Probenahme kumulativ aufsummiert (Abb. 16). Versuch Flut 4 und Flut 6 wurde gemittelt, da es sich bei Flut 6 um eine Wiederholung von Flut 4 handelte.

In den Säulenversuchen im ungesättigten Zustand wurden die kumulativen Stoffmengen bis Fraktion 12 (Bereich der kontinuierlichen Probenahme Flut 1 - 3) berechnet. In den Säulenversuchen im gesättigten Zustand wurde, um eine bessere Vergleichbarkeit herzustellen, die kumulativen Stoffmengen bis max. Fraktion 18 (Bereich der kontinuierlichen Probenahme Flut 4 - 6) ermittelt.

Bei Aluminium und Natrium wurde damit der Bereich der höchsten Freisetzung berücksichtigt. Bei TOC und Kalium kam es in den Versuchen Flut 1 bis 3 nach Fraktion 12 zu einem erneuten Anstieg der Konzentration. Dieser Anstieg ist in der Berechnung der kumulativen Stoffmenge zum Vergleich des Parametereinflusses nicht berücksichtigt.

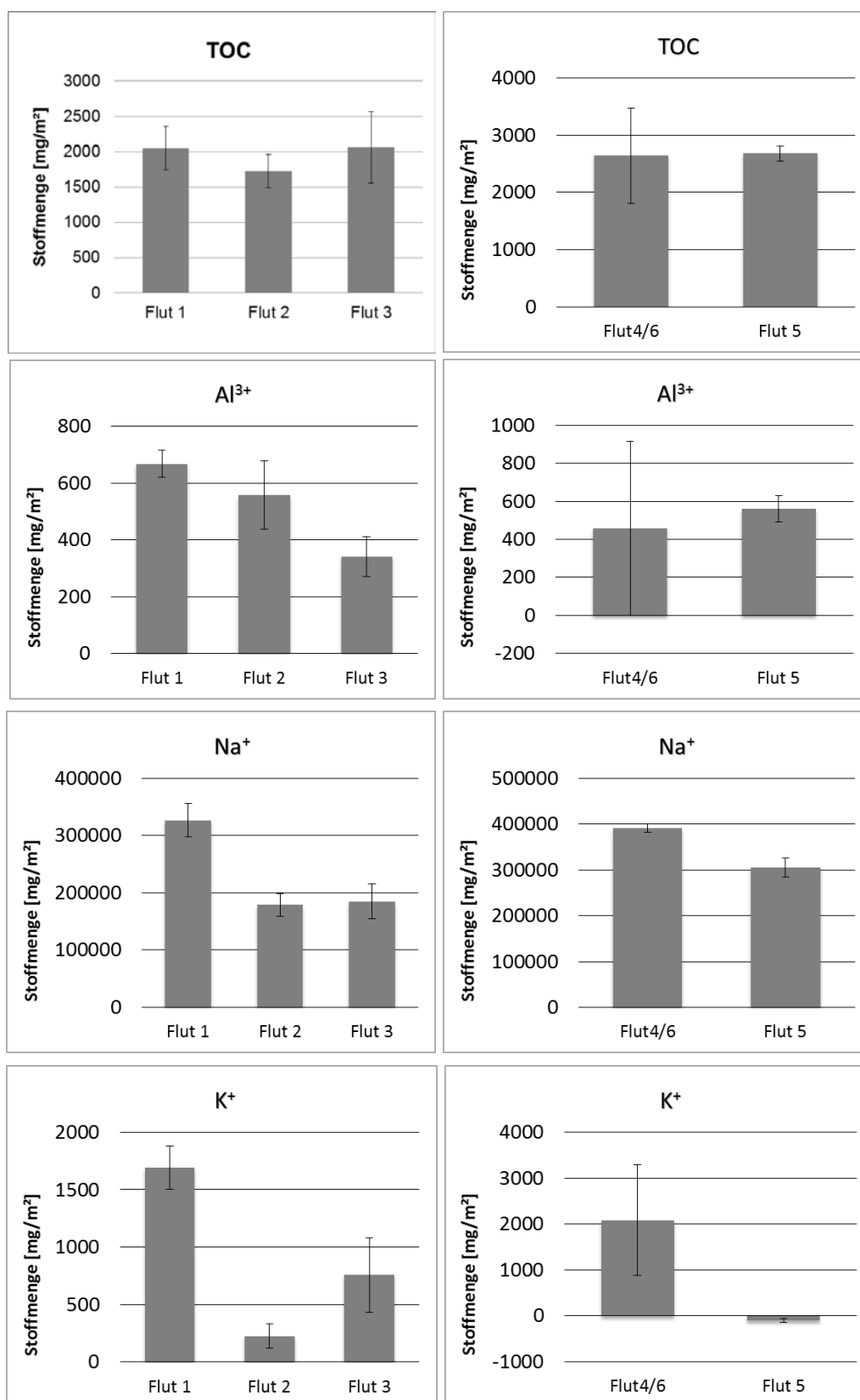
In den Versuchen Flut 4 bis 6 ist dieser Anstieg zum Ende der Elution wenig bis gar nicht ausgeprägt.

Beim Parameter TOC im ungesättigten Zustand geben die Bauprodukte im Versuch Flut 1 und 3 mit ca. 2000 mg/m<sup>2</sup> nahezu gleichviel organischen Kohlenstoff in den ersten 6 Stunden ab. Der Versuch Flut 2 führt in der gleichen Zeit zu ca. 15 % geringerem Austrag an TOC. Durch die Versuchsbedingungen in Flut 4/6 und 5 (gesättigte Säule) werden in den ersten Stunden mehr organische Inhaltsstoffe aus dem injizierten Bauprodukt im Vergleich zum ungesättigten Säulenzustand freigesetzt. Durch den späteren Anstieg der TOC-Konzentration im ungesättigten Zustand ist die gesamte Menge an freigesetzten organischen Inhaltsstoffen jedoch in Flut 1 bis 3 wesentlich höher.

Die Aluminiumfreisetzung zeigt im Versuch Flut 1 und 2 sowie in Flut 4/6 die höchste Konzentration an und somit auch die höchste kumulierte Stofffreisetzung im Vergleich zu Flut 3 und 5 (Komponentenverhältnis 1:1). Der Versuch Flut 4/6 zeigte jedoch eine sehr hohe Standardabweichung.

Die Freisetzung von Natrium wird durch den gesättigten Säulenzustand gefördert. Die Verzögerung des Elutionsbeginns nach Injektion reduziert die Stoffmenge in ungesättigten Zustand um ca. 50 % (Flut 2). Das veränderte Komponentenverhältnis reduziert die Natriumfreisetzung in ungesättigten Zustand um ca. 50 % (Flut 3) und im gesättigten um 25 % (Flut 5).

Kalium wird ebenfalls durch einen verzögerten Elutionsbeginn und ein verändertes Komponentenverhältnis sowie veränderte Säulensättigung beeinflusst. In Flut 5 wurde kein Kalium detektiert.

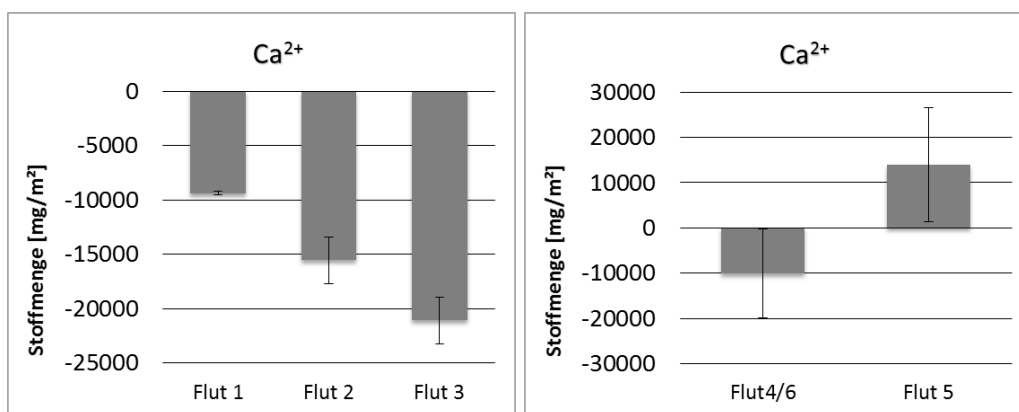


**Abbildung 16:** Kumulierte Freisetzung von Al<sup>3+</sup>, TOC, Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> bezogen auf die Oberfläche der gebildeten Probekörper (ohne Haube) in den ersten 12 Fraktionen (Flut 1 bis 3) bzw. bis Fraktion 18 (Flut 4/6 und Flut 5)

Calcium wird durch das Bauprodukt aus dem Trinkwasser sorbiert bzw. bindet sich an frei werdende  $\text{OH}^-$ -Ionen zu Calciumhydroxid.

Im ungesättigten Zustand wird der Rückhalt an Calcium durch den verzögerten Elutionsbeginn gefördert. Auch die Änderung des Komponentenverhältnisses führt zu einem verstärkten Rückhalt. Der Einfluss der Säulensättigung scheint jedoch vernachlässigbar. Flut 4/6 zeigt mit ca.  $10 \text{ g/m}^2$  ein vergleichbares Ergebnis wie Flut 1.

Einzig der Versuch Flut 5 zeigt im Vergleich zu allen anderen Versuchen eine Freisetzung von Calcium an (Abb. 17).



**Abbildung 17:** Kumulierte Freisetzung von  $\text{Ca}^{2+}$  bezogen auf die Oberfläche der gebildeten Probekörper (ohne Haube) in den ersten 12 Fraktionen (Flut 1 bis 3) bzw. bis Fraktion 18 (Flut 4/6 und Flut 5)



### 5.3 Ökotoxikologische Untersuchungen

Für die aquatischen Ökotoxizitätstest wurden zwei Mischproben aus dem Peakmaximum zweier Elutionstests (Flut 5 und Flut 6, gesättigter Zustand, variierendes Komponentenverhältnis) ausgewählt. Als Leitparameter diente der TOC und die elektrische Leitfähigkeit sowie Natrium. Weiterhin wurden drei Einzelfraktionen ausgewählt, zwei aus der Abklingphase und ein Eluat aus dem Konzentrationsanstieg vor Erreichen des Peakmaximums (Tab. 13).

Die Proben wurden tiefgefroren und eine bzw. zwei Wochen nach Probenahme an ein beauftragtes Labor gekühlt über Nacht versendet.

**Tabelle 13:** Charakterisierung der Eluatproben für ökotoxikologische Untersuchungen

Elution	MW	Mischprobe/ Einzelprobe	Zeit	pH-Wert	elektr. Leitf.	TOC	Al	Na
			[h]		[ $\mu$ S/cm]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Flut 5 (A)	Fr. 11 - 13	MP	5,5 - 6,5	10,82	5407	20,77	3,71	2023
	Fr. 19	EP	44,5	7,75	1269	7,97	0,03	80,3
Flut 6	Fr. 9	EP	4,5	10,39	1919	6,82	1,5	585
	Fr. 12 - 14	MP	6 - 7	10,90	5610	18,64	0,5	2193
	Fr. 18	EP	16	9,04	1340	9,96	0	155

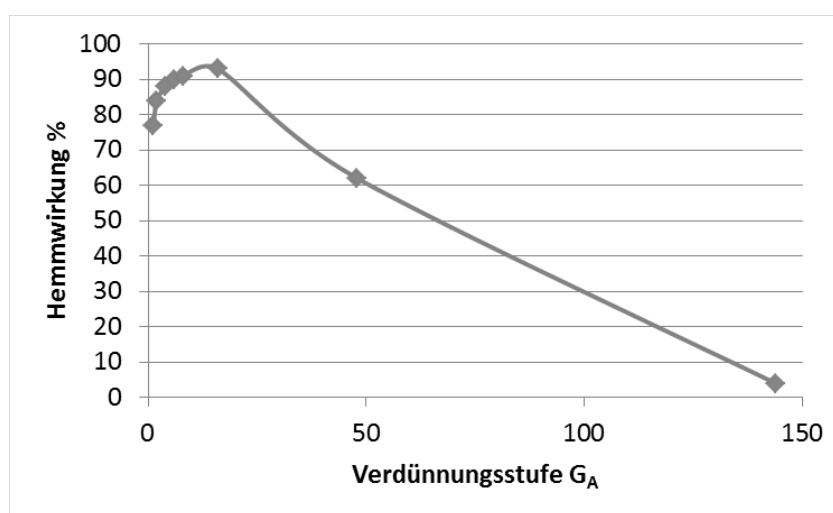
Die Ergebnisse des Leuchtbakterienlumineszenztests ( $G_L$ ), des Algenwachstumshemmtests ( $G_A$ ) und des Daphnientest ( $G_D$ ) sind in Tabelle 14 aufgeführt. Des Weiteren wurden vom beauftragten Labor der pH-Wert, die Leitfähigkeit sowie Geruch, Farbe und Trübung vermerkt. Der pH und die Leitfähigkeit der Proben stimmen gut mit dem bei der Elution gemessenen Werten überein. Geruch und Farbe waren nicht auffällig. Nach dem Auftauen bildete sich ein milchiger Bodensatz, der das Eluat im unteren Bereich eintrübte.

Die Ergebnisse des Leuchtbakterienlumineszenztests ( $G_L$ ) zeigen keine Hemmwirkung über 20 % an ( $G_L$  1). Der Daphnientest zeigt nur für die Mischprobe Flut 6 eine Hemmwirkung bis zur Verdünnungsstufe 2 an (Hemmwirkung nach 48 h in Stufe 2 = 70 %). In Verdünnungsstufe 4 ist keine Hemmung mehr nachweisbar ( $G_D$  4). Am auffälligsten sind die Ergebnisse im Algentest. Hier zeigen alle Eluatproben eine geringe bis starke Hemmung an. Die Abklingphasen der Elutionen Flut 5 und Flut 6 liegen dabei noch bei niedrigen  $G_A$  –Werten von 2 bzw. 8. In dem Eluat aus der Phase der Konzentrationszunahme (Flut 6, Fr. 9) ist bereits eine starke Hemmwirkung des Eluats auf *Desmodesmus subspicatus* nachweisbar. Im getesteten Ansatz  $G_A$  16 wird das Wachstum um 87 % gehemmt. Bei den Mischproben aus dem Peakmaximum liegt die Hemmung bei  $G_A$  16 bei 91 % bzw. 93 %.

**Tabelle 14:** Ergebnisse der ökotoxikologischen Untersuchungen

Probe	G <sub>D</sub>	G <sub>A</sub>	G <sub>L</sub>	LF [μS/cm]	pH	Geruch	Farbe	Trübung	Bemerkung
Flut 5A MP 11-13	1	>16	1	5.810	10,87	unauffällig	farblos	unten trüb, oben klar	Bodensatz milchig
Flut 5A Fr. 19	1	2	1	1.266	7,63				
Flut 6 Fr. 9	1	>16	1	2.060	10,40				
Flut 6 MP 12-14	4	144	1	5.940	10,90				
Flut 6 Fr. 18	1	8	1	1.299	8,04				

Für die Probe Flut 6 - MP 12-14 wurde daraufhin die Untersuchung von weiteren Verdünnungsstufen (48, 144, 432 und 1296) nach Absprache mit dem beauftragten Labor angewiesen. In Stufe G<sub>A</sub> 48 betrug die Hemmung immer noch 64 %. Erst bei der Stufe G<sub>A</sub> 144 lag die Hemmung unter 20 % (Abb. 18).



**Abbildung 18:** Verlauf der Hemmung im Algenhemmtest in Abhängigkeit zur Verdünnungsstufe

Der Verlauf der Hemmung in den ersten Verdünnungsstufen ist durch einen Anstieg bei abnehmender Konzentration des eingesetzten Eluates gekennzeichnet. Erst nach Verdünnungsstufe 16 geht die Hemmwirkung des Eluates zurück.

## **6 Auswertung und Diskussion**

Das Forschungsvorhaben hatte das Ziel, den inversen Säulenversuch hinsichtlich seiner Eignung zur Prüfung von Kanalrohrsaniierungsmitteln die im Flutungsverfahren eingesetzt werden zu validieren. Dabei sollte der Einfluss unterschiedlicher Rahmenbedingungen auf die Freisetzung organischer und anorganischer Inhaltsstoffe überprüft werden. Des Weiteren sollte das ökotoxikologische Potential des eingesetzten Bauproduktes untersucht werden.

### **6.1 Versuchsdurchführung**

Die Durchführung der Versuche nach der vorliegenden Arbeitsanweisung zum inversen Säulenversuch verlief weitgehend unproblematisch.

Der Injektionsvorgang musste jedoch aufgrund des zu Kanalrohrsaniierungen im Flutungsverfahren eingesetzten Bauproduktes angepasst werden. Da es sich um ein Bauprodukt handelt, was komponentenweise hintereinander in die Säule injiziert werden muss, ist die Injektion des Bauproduktes in mehreren Schritten durchzuführen.

Durch die schnelle Reaktion der Komponenten miteinander, musste eine Zwischenspülung des Packers nach Injektion der ersten Komponente erfolgen. Das Reinigen mit wenig Wasser mit Hilfe einer Pipette hat sich dabei als praktikabel bei den durchgeführten Injektionsversuchen im ungesättigten Zustand bewährt.

In der gesättigten Säule ist eine andere Art von Zwischenspülung erforderlich. Hier wurde eine Injektionsspülung mit 10 – 20 ml TW durchgeführt. Dabei kann es zu geringen Verdünnungseffekten bei der Injektion kommen. Die Auswirkung auf das Gesamtergebnis scheint jedoch gering zu sein. Die erfolgreich durchgeführten Injektionen lagen jedoch in der gesättigten Säule nur bei 50 %. Im Vergleich dazu waren fast alle Injektionen in die ungesättigte Säule erfolgreich.

Der für die Injektion notwendige Injektionsdruck konnte nicht wie ursprünglich geplant mit an der Praxis angelehnten Druck von 0,2 bar durchgeführt werden. In den Versuchen war für eine vollständige Injektion ein Druck bis 1,5 bar notwendig. Begründet liegt dies im eingesetzten Säulensand. Dieser ist im Vergleich zu Praxisverhältnisse sehr feinkörnig und befindet sich an der untersten Grenze der Injizierfähigkeit (untere Anwendungsgrenze). Trotz dieser verhältnismäßig hohen Drücke dauerte die Injektion zwischen 30 und 44 min. Durch die Verwendung eines gröberen Sandes könnte die Injektion verbessert werden.

Die Elution von Wasserglassystemen ist geprägt durch die Mobilisierung von Hydroxidionen, die mit dem im Elutionsmittel Trinkwasser enthaltenen Calciumionen schwer lösliche Calciumhydroxide ausbilden. Diese fallen an der Grenze von Sand zu Freiwasser aus und können den Säulenausgang verstopfen. Abhilfe schaffte eine größere Bemessung des Freiwasserbereiches in der Säule, d.h. die Säule wurde nur bis max. 3 cm unter Säulenoberkante gefüllt.

In früheren Untersuchungen von Schössner und Kunz (2004) wurden bereits Bauprodukte, die im Flutungsverfahren zu Einsatz kommen, mit dem inversen Säulenversuch eluiert. Die Reproduzierbarkeit der Freisetzungsraten wurden jedoch als gering eingestuft, was u.a. an der Überführung des Bauproduktes in die Säule gelegen hat. Komponente A und B wurde nacheinander über ein Rohr bei geöffnetem Säulendeckel in die Säule gegeben (Schössner & Kunz, 2004). Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei gleichen Bauprodukt und vorgegebenen Rahmenbedingungen sind hingegen bei der Injektion der Komponenten gut.

Das Komponentenverhältnis und die Startzeit haben nach vorliegenden Ergebnissen keinen Einfluss auf die Durchführung des Säulenverlaufes.

## **6.2 Einfluss verschiedener Versuchsrahmenbedingungen auf die Freisetzung**

### **6.2.1 un-/gesättigter Säulenprüfsand**

Der Sättigungsgrad der Säule hatte in den vorliegenden Untersuchungen vor allem einen Einfluss auf die Parameter Kalium und Natrium sowie eingeschränkt auf Aluminium. Bei vollständiger Wassersättigung kam es zu einem erhöhten Austrag, der vermutlich auf einer Vermischung der Komponente A mit Porenwasser bei der Injektion zurückzuführen ist. Dies hat zur Folge, dass Komponente B mit der wasserverdünnten Wasserglaslösung ein Gel bildet, was durch eine hohe Anzahl eingelagerter Wassermoleküle gekennzeichnet ist (Osebold, 2006). Damit steigt die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von anorganischen und organischen Inhaltsstoffen.

Andere Parameter wie elektr. Leitfähigkeit, pH-Wert und Trübung werden in der Intensität jedoch kaum beeinflusst.

Über die Parameter TOC und Calcium lässt sich nur sehr eingeschränkt eine Aussage treffen. Calcium zeigt einen Konzentrationsverlauf, der durch einen Konzentrationsrückgang in den ersten Fraktionen und eine Konzentrationszunahme in den letzten Fraktionen geprägt ist. Der Rückgang ist auf die Bildung von Calciumhydroxid durch freie Calciumionen aus dem Trinkwasser und Hydroxidionen aus dem Bauprodukt (Komponente A) zurückzuführen. Die Zunahme am Elutionsende ist wiederum durch freiwerdende Calciumionen aus Komponente B und wieder gelöstes Calcium aus dem anfänglich gebildeten Calciumhydroxid durch Abnahme der OH<sup>-</sup>-Konzentration (pH-Wertabnahme) erklärbar.

Der ungesättigte Säulenzustand bewirkt bei den Parametern elektr. Leitfähigkeit, TOC und Kalium im späteren Elutionsverlauf (Tag 3 und 4) einen zweiten Konzentrationsanstieg im Vergleich zur gesättigten Säule. Die Ursache dieses Effektes konnte im Verlauf des Projektes nicht geklärt werden.

In Untersuchungen der RWTH Aachen wurde nachgewiesen, dass die Bodenfeuchte einen hohen Einfluss auf die Größe und Stabilität der Abdichtungskörper besitzt. Im erdfeuchten Boden wiesen die Abdichtungskörper eine festere Beschaffenheit und größere Abmessungen

auf. Im wassergesättigten Boden bildeten sich hingegen sehr weiche instabile Abdichtungskörper mit kleinen Abmessungen aus (Osebold, 2006). Dies konnte in den vorliegenden Untersuchungen nicht bestätigt werden, was eventuell an den eingesetzten feineren Säulensand liegt. Die ausgebauten Prüfkörper zeigten ein vergleichbares Volumen und Gewicht.

Durch den fast ausschließlichen Einsatz des Flutungsverfahrens in der ungesättigten Bodenzone (Handreichung DIBt, 2014) und den in dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen und Ergebnissen, sollte die Injektion der Komponenten in eine ungesättigte Säule ausgeführt werden.

### **6.2.2 Komponentenverhältnis**

Die Veränderung des Komponentenverhältnisses reduziert bei der Injektion in die ungesättigte Säule die Freisetzung an Aluminium, Natrium und Kalium bei verringerter Leitfähigkeit und verringertem pH-Wert. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die Reduzierung der Komponente A im Komponentenverhältnis 1:1 (von 630 ml auf 550 ml) zurückzuführen.

Durch die Steigerung der Komponente B (von 450 ml auf 550 ml) wurde ein höherer Austrag an TOC in den höheren Fraktionen detektiert, was durch den Eintrag einer größeren Menge an organischen Inhaltsstoffen zu erklären ist. Der gesteigerte Anteil an organischen Inhaltsstoffen fördert zum Ende auch einen Wiederanstieg der elektr. Leitfähigkeit.

Die Festlegung von Calcium ist im Komponentenverhältnis 1:1 im ungesättigten Zustand stärker und die folgende Freisetzung schwächer ausgeprägt. Im gesättigten Zustand ist es genau umgekehrt, d.h. die Festlegung ist schwächer und die Freisetzung am Ende des Versuches stärker ausgeprägt. Dies könnte an der von Osebold (2006) angesprochenen Stabilität der Abdichtungskörper liegen.

Interessant ist, dass die gebildeten Prüfkörper bei gleichem Komponentenverhältnis ein ca. 20 – 25 % größeres Gewicht und damit auch ein größeres Volumen sowie eine größere Oberfläche aufweisen. Dadurch könnten die niedrigeren freigesetzten Stoffmengen im Komponentenverhältnis 1:1 erklärt werden. Eine höhere Masse dürfte eine mengenmäßig größere Einbindung der Inhaltstoffe aus den Einzelkomponenten in den Prüfkörper bedeuten. Folglich steht weniger Stoffmenge für einen Austrag zur Verfügung.

### **6.2.3 Elutionsbeginn**

Der spätere Beginn der Elution (60 min anstatt 10 min nach Gelbildung) zeigte einen Einfluss auf die Intensität der Freisetzung. Alle Parameter, außer TOC, zeigten deutlich geringere Konzentrationen im Verlauf der Elution. Die Konzentration an TOC war vergleichbar.

Bei der Auswertung der Prüfkörper zeigte sich ebenfalls ein deutlicher Unterschied. Die Prüfkörper, die bei der Elution mit ‚60 min Elutionsbeginn‘ entstanden sind zeigten ein ca. 11% größeres Volumen und Gewicht. Die längere Standphase des Gels bis zum Elutionsstart

könnte zu einer stabileren Ausbildung der Randzonen geführt haben, die einen größeren Prüfkörper hervorgebracht haben, was wiederum zu einer mengenmäßig größeren Einbindung der Inhaltstoffe aus den Einzelkomponenten in den Prüfkörper bedeutet. Folglich steht auch hier weniger Stoffmenge für einen Austrag zur Verfügung.

### **6.3 Ökotoxikologische Bewertung**

Die durchgeführten aquatischen ökotoxikologischen Tests zeigten eine unterschiedliche Wirkung der im Säulenversuch erhaltenen Eluate an. Während im Leuchtbakterien- und Daphnientest bei keinem Eluat eine Hemmung auftrat, die über dem festgelegten Schwellenwert lag, wurde beim Testorganismus Grünalge eine eindeutige Hemmung detektiert. Die Eluate der Maximalphase reagieren auf den Testorganismus mit einer Hemmung von  $G_A > 16$ . Der Schwellenwert wurde damit deutlich überschritten. Im Eluat aus der Abklingphase war dagegen nur eine geringe Toxizität nachweisbar. Das zusätzlich geprüfte Eluat aus dem Konzentrationsanstieg zeigte ebenfalls eine Hemmung von  $G_A > 16$ .

Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Hemmung erst bei Stufe  $G_A$  144 unter 20 % lag.

Zur Beurteilung der Ergebnisse und der Bewertung der Umweltwirkung von Bauprodukten wurden vom DIBt Schwellenwerte festgelegt (vgl. DIBt 2009). Danach gilt ein Eluat als toxisch, wenn ein G-Wert im Leuchtbakterientest und im Algentest von  $8^1$  überschritten wird. Durch die Ergebnisse im Algentest zeigen die Eluate aus den Maximalphasen und dem Konzentrationsanstieg demnach ein ökotoxikologisches Gefährdungspotenzial an. Im Gegensatz dazu war in den Abklingphasen keine Toxizität zu erkennen. In Untersuchungen von Haussmann et al. (2006) an vergleichbaren Bauprodukten traten in Batchversuchen erhöhte Toxizitäten im Daphnien- und Algentest auf. Diese wurden im Umströmungsversuch mit einer eigens konzipierten Testvorrichtung jedoch nicht bestätigt.

Der Vergleich der Ergebnisse im Algentest ergab, dass, je höher die elektr. Leitfähigkeit im Testeluat war, umso größer die Hemmung ausfiel. Die Konzentration an Natrium korrelierte ebenfalls mit der Hemmwirkung im Grünalgentest. Eine hohe TOC Konzentration ging einher mit einer hohen Hemmung, jedoch gab es auch eine hohe Hemmwirkung bei einer geringen TOC-Konzentration. Der Parameter Aluminium zeigte keine Abhängigkeit. Der Grund für das ökotoxikologische Gefährdungspotenzial könnte daher in eluierten organische Bestandteile und Natrium liegen. Nähere Untersuchungen zur Algentoxizität sind jedoch erforderlich.

Insgesamt ist keine anhaltend erhöhte Belastung mit ökotoxischen Inhaltstoffen zu erwarten. Das Freisetzungverhalten gleicht in allen ausgewerteten Untersuchungen einem Verlauf, der nach Elutionsstart eine ansteigende Parameterkurve (z.B. TOC, elektr. Leitfähigkeit und Ionen) aufweist, kurz darauf ein Maximum erreicht, absinkt und nach einem zweiten Anstieg nach einigen Tagen wieder auf das Ausgangsniveau zurückgeht.

---

<sup>1</sup> Bei Produkten die nachträglich aushärten ist der G-Wert im Algentest 8 anstatt 4 (DIBt, 2009).

## **7 Zusammenfassung und Fazit**

In den „Grundsätzen zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ (DIBt, 2011) ist die Erfassung mobilisierbarer Stoffe während der Reaktionszeit und im ausgehärteten Zustand gefordert.

In den hier vorliegenden Untersuchungen wurde wie auch bei Osebold (2006) deutlich, dass nicht das gesamte Bauprodukt miteinander reagiert, sondern ein Teil der zuerst injizierten Komponente im Überschuss vorliegt und nicht für die Gelbildung benötigt wird und daher ungebunden im Boden verbleibt. Im inversen Säulenversuch kann, neben den gelösten und freigesetzten Inhaltsstoffen bei der Reaktion, dieser nicht reagierte Komponentenanteil erfasst werden. Im Vergleich zu Standtests ist hier eine Aussage zur Umweltverträglichkeit nicht reagierter Anteile des Bauproduktes und austretender Flüssigkeit aus dem Gel (Synärese) möglich.

Die durchgeführten Untersuchungen haben grundlegend die Eignung des inversen Säulenversuchs zur Bewertung und Beurteilung umweltrelevanter Auswirkungen von Kanalrohrsanierungsmitteln im Flutungsverfahren nachgewiesen.

Durch die nacheinander durchzuführende Injektion der beiden Bauproduktkomponenten muss zwischen den Injektionen von Komponente A und B ein Spülvorgang des Packers eingeplant werden, da es ansonsten, aufgrund der Schnellen Reaktion beider Komponenten, zu Verstopfungen des Packers kommen kann. Die Zwischenspülung ist auch in der Praxis erforderlich und vorgeschrieben (Staubco, 2008). Dabei hat sich der ungesättigte Säulenzustand als hilfreich erwiesen. Die Zwischenspülung konnte hier einfach und ohne Probleme durchgeführt werden.

Durch den fast ausschließlichen Einsatz des Flutungsverfahrens in der ungesättigten Bodenzone (Handreichung DIBt, 2014) und den in dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen und Ergebnissen, sollte die Injektion in eine ungesättigte Säule ausgeführt werden.

Das Komponentenverhältnis und die Startzeit haben keinen Einfluss auf die Durchführung des Säulenverlaufes.

Der für die Injektion notwendige Injektionsdruck konnte nicht wie ursprünglich geplant mit einem an die Praxis angelehnten Druck von 0,2 bar durchgeführt werden. Durch den verwendeten Feinsand als Säulenfüllung waren Drücke bis 1,5 bar notwendig. Trotz dieser verhältnismäßig hohen Drücke dauerte die Injektion zwischen 30 und 44 min. Eine bessere Injektion könnte durch einen gröberen Versuchssand, der im mittleren Anwendungsbereich für Flutungsverfahren bzw. der eingesetzten Bauprodukte liegt, ermöglicht werden. Die Größe der Poren in den möglichen potentiellen Sanden könnte die Vermischung der einzelnen Komponenten im Porensystem beeinflussen. Hier sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Die aufgenommenen Parameter pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, TOC,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  zeigten eine unterschiedliche Ausprägung im Freisetzungsverhalten. Das Freisetzungsverhalten gleicht jedoch in allen ausgewerteten Untersuchungen einem Verlauf, der nach Elutionsstart eine ansteigende Parameterkurve (z.B. TOC, elektr. Leitfähigkeit und Ionen) aufweist, kurz darauf ein Maximum erreicht, absinkt und nach einem zweiten Anstieg nach einigen Tagen wieder auf das Ausgangsniveau zurückgeht. Die Trübung zeigte eine anfängliche sichtbare Trübe bis ca. 50 FNU und ging danach schnell wieder zum Ausgangsniveau zurück. Calcium zeigte in den ersten Fraktionen eine Abnahme der Konzentration, die in den höheren Fraktionen in eine verstärkte Freisetzung an  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen umschlug. Alle Prüfkörper waren im unteren Bereich rund, mit einer aufgesetzten Haube, die sich bis zur Sandoberkante in der Säule ausdehnte. Die aufgesetzte Haube zeigte eine geringe Stabilität.

Die durchgeführten aquatischen ökotoxikologischen Tests zeigten eine unterschiedliche Wirkung der im Säulenversuch erhaltenen Eluate an. Während im Leuchtbakterien- und Daphnientest bei keinem Eluat eine Hemmung auftrat, die über dem festgelegten Schwellenwert lag, wurde beim Testorganismus Grünalge eine eindeutige Hemmung detektiert ( $G_A$  144). Der Grund für das ökotoxikologische Gefährdungspotenzial könnte in eluierten organischen Bestandteilen und Natrium liegen. Nähere Untersuchungen zur Algentoxizität sind jedoch erforderlich. Insgesamt ist keine anhaltend erhöhte Belastung mit ökotoxischen Inhaltstoffen zu erwarten.



## **8 Literaturverzeichnis**

- DIBt (2011): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser (Fassung September 2011). Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.
- DIN 38404-5:2009-07: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C) - Teil 5: Bestimmung des pH-Werts (C 5)
- DIN EN 1484:1997-08: Wasseranalytik - Anleitungen zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC)
- DIN EN 1622:2006-10: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des Geruchsschwellenwerts (TON) und des Geschmacksschwellenwerts (TFN), (Anhang C – Qualitatives, vereinfachtes Verfahren)
- DIN EN 27888:1993-11: Wasserbeschaffenheit; Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (ISO 7888:1985)
- DIN EN ISO 7027:2000-04: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Trübung (ISO 7027:1999); Deutsche Fassung EN ISO 7027:1999
- DIN EN ISO 7887:2012-04: Wasserbeschaffenheit - Untersuchung und Bestimmung der Färbung (ISO 7887:2011); Deutsche Fassung EN ISO 7887:2011
- Dumm, Michaela (2011, unveröffentlicht): Das Freisetzungverhalten von Inhaltsstoffen aus Bodeninjektionsmitteln am Beispiel von Zementleim und Polyacrylat im Boden. Diplom-Arbeit. Freie Universität Berlin.
- E DIN 19631:2014-09: Elution von Bauprodukten — Perkolationsverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von Bodeninjektionsmitteln.
- Hausmann, R., Ostrowski, R und Siekmann, M. (2006): Dauerhaftigkeit und Umweltverträglichkeit von Sanierungen an Hausanschlussleitungen mit dem Flutungsverfahren. Teilbericht Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen. S. 26.
- Osebold (2006): Sanierungen an Grundstücksentwässerungsanlagen mit dem Flutungsverfahren. Forschungsbericht, Ibb - RWTH Aachen, S. 123
- Schössner, H. und Kunz, H. (2004): Erarbeitung einer standardisierten Methode zur Beurteilung der Auswirkungen von Bauprodukten zur Bodeninjektion und Kanalsanierung auf Boden und Grundwasser unter Verwendung des Säulenversuchs mit umgekehrter Fließrichtung, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Staubco (2008): Verfahrenshandbuch für das Staubco Kanalsanierungssystem. Version 2, S. 10, München.
- Wagner, Robert (2011): Inverser Säulenversuch zur Beurteilung der Auswirkungen von Bodeninjektionsmitteln auf Boden und Grundwasser. Laborvergleichsuntersuchung und ökotoxikologische Bewertung am Beispiel von Polyacrylaten/Acrylatgelinjektionen. Dissertation. Freie Universität Berlin.

## **9 Anhang**

**Anhang A Messprotokolle und Prüfkörper**

**Anhang B Laborbericht Ökotox**

## **Anhang A**

Tabelle: Protokoll zum Versuch Flut 1 (ungesättigt – 1,4:1 - 10min) mit Angaben zu Injektionszeit, -menge und Elutionsdauer sowie Prüfkörpercharakterisierung

<b>Bauprodukt:</b>	<b>Weichgel</b>		
<b>Elutionswasser:</b>	<b>Trinkwasser</b>		
	<b>Parallelen (Säule)</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Dauer Spülung Sandsäule [h]</b>	20	20	20
<b>Fließrate Q [l/h]</b>	4	4	4
<b>Datum - Beginn der Prüfung [TT.MM.JJJJ]</b>	05.05.2015	05.05.2015	05.05.2015
<b>Abnahme Blindwert [h:min]</b>	08:40	08:40	08:40
<b>Start Aushärtezeit (Vermischung A+B)</b>	13:17	14:05	14:58
<b>Injektionsdauer [min:sek]</b>	71:00:00	30:00:00	78:00:00
<b>Beginn des Gelierens nach [min:sek]</b>			
<b>Ende Aushärtezeit (Gelierzzeit) nach</b>			
<b>Masse Bauprodukt A [g]</b>	802,7	804,7	814,7
<b>Masse Rückstand Becherglas A [g]</b>	63,7	74,7	69,7
<b>Masse Bauprodukt B [g]</b>	595,2	595,2	596,2
<b>Masse Rückstand Becherglas B [g]</b>	62,2	73,2	67,2
<b>Masse injiziertes Bauprodukt [g]</b>	1272,00	1252,00	1274,00
<b>Start Elution [h:min]</b>	13:33	14:24	15:14
<b>Datum - Ende der Prüfung [TT.MM.JJJJ]</b>	08.05.2015	08.05.2015	08.05.2015
<b>Uhrzeit - Ende der Prüfung [h:min]</b>	08:50	08:50	08:50
<b>Gesamtdauer der Elution [Tage]</b>	4	4	4

	Einheit	A	B	C
Volumen	l	1080	1080	1080
Masse	g	1397,9	1399,9	1410,9
Restmenge Gefäß	g	125,9	147,9	136,9
Injektionsstart		12:52	13:43	14:36
Injektionsende		13:33	14:24	15:14

Charakterisierung der Prüfkörper					
mit Haube					
Prüfkörper & Haube	Säule A	Säule B	Säule C	MW	STABW
<b>Gewicht [g]</b>	4781,00	4307,00	4546,00	4544,67	237,00
<b>Volumen [ml]</b>	2600,00	2490,00	2350,00	2480,00	125,30
ohne Haube					
Prüfkörper ohne Haube	Säule A	Säule B	Säule C	MW	STABW
<b>Gewicht [g]</b>	3265,00	3000,00	2962,00	3075,67	165,06
<b>Volumen [ml]</b>	1570,00	1740,00	1580,00	1630,00	95,39
<b>Umfang [cm]</b>	44,00	43,00	43,50	43,50	0,50
<b>Oberfläche [cm<sup>2</sup>]</b>	616,19	588,50	602,26	602,32	13,85

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 1 (ungesättigt – 1,4:1 - 10min), Säule A mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele A	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmekzeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]
Fractionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]					
BW	19,8	7,78	728	< 1	4,317	0,00	105	3,740	45,10	geruchlos	farblos	keine	08:40	1000
Fr. 1	20,7	8,14	705	2,04	4,570	0,00	102	3,450	45,00	geruchlos	farblos	keine	15:37	1940
Fr. 2	20,6	8,91	775	2,20	4,240	0,17	97	3,370	67,60	geruchlos	farblos	keine	16:07	2000
Fr. 3	20,5	9,69	996	41,70	4,990	0,00	7	3,680	185,00	geruchlos	farblos	keine	16:37	1900
Fr. 4	20,6	9,90	1162	74,60	4,840	0,07	15	3,960	255,00	geruchlos	farblos	keine	17:07	2000
Fr. 5	20,5	10,05	1356	27,10	5,945	0,08	35	4,330	348,00	geruchlos	farblos	keine	17:37	2070
Fr. 6	20,5	10,16	1543	17,10	6,270	1,21	102	4,910	389,00	geruchlos	farblos	keine	18:07	2060
Fr. 7	20,4	10,60	2760	5,82	9,885	2,23	118	7,380	900,00	geruchlos	farblos	keine	18:37	2060
Fr. 8	20,4	10,93	5860	1,92	13,207	3,97	103	12,100	1890,00	geruchlos	farblos	keine	19:07	2060
Fr. 9	20,4	10,95	6570	1,73	16,024	4,33	93	14,700	2090,00	geruchlos	farblos	keine	19:37	2080
Fr. 10	20,6	10,83	5250	2,28	14,031	3,57	103	14,700	1800,00	geruchlos	farblos	keine	20:07	2000
Fr. 11	20,5	10,69	3920	4,11	11,740	2,54	94	10,200	1200,00	geruchlos	farblos	keine	20:37	1960
Fr. 12	20,5	10,55	3040	6,67	11,011	1,87	104	9,820	922,00	geruchlos	farblos	keine	21:07	1960
Fr. 13	19,5	8,94	1295	1,90	6,820	0,07	112	6,970	145,00	geruchlos	farblos	keine	08:33	2000
Fr. 14	19,9	9,18	1387	4,24	10,698	0,08	103	6,880	146,00	geruchlos	farblos	keine	16:33	1840
Fr. 15	19,9	7,86	2043	< 1	12,350	0,00	290	9,450	105,00	geruchlos	farblos	keine	08:23	2000
Fr. 16	19,6	7,65	2710	< 1	28,824	0,00	438	12,900	77,50	geruchlos	farblos	keine	18:20	2040
Fr. 17	19,7	7,67	2350	< 1	11,846	0,00	365	10,400	84,50	geruchlos	farblos	keine	08:50	2020

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 1 (ungesättigt – 1,4:1 - 10min), Säule B mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele B	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]					
BW	19,8	7,76	726	< 1	3,583	0,00	103	4	45	geruchlos	farblos	keine	08:40	1000
Fr. 1	20,7	7,98	718	2,74	3,740	0,01	101	4	45	geruchlos	farblos	keine	16:38	1920
Fr. 2	20,7	9,07	773	3,44	3,930	0,15	98	3	74	geruchlos	farblos	keine	17:08	1950
Fr. 3	20,8	9,72	994	42,70	5,250	0,01	7	4	187	geruchlos	farblos	keine	17:38	2000
Fr. 4	20,7	9,91	1145	32,70	4,640	0,02	11	4	254	geruchlos	farblos	keine	18:08	2000
Fr. 5	20,6	10,04	1345	29,40	5,742	0,07	25	4	339	geruchlos	farblos	keine	18:38	2050
Fr. 6	20,6	10,23	1689	14,90	7,063	1,29	102	5	437	geruchlos	farblos	keine	19:08	2060
Fr. 7	20,5	10,64	3040	5,65	10,187	2,35	132	9	1150,00	geruchlos	farblos	keine	19:38	2050
Fr. 8	20,6	10,88	5540	1,79	14,536	3,84	106	13	1850,00	geruchlos	farblos	keine	20:08	2010
Fr. 9	20,6	10,92	6550	1,43	16,577	4,27	101	16	2220,00	geruchlos	farblos	keine	20:38	2000
Fr. 10	20,5	10,86	5850	1,92	15,086	3,83	106	16	2110,00	geruchlos	farblos	keine	21:08	1960
Fr. 11	20,5	10,77	4800	1,85	14,118	3,01	87	12	1410,00	geruchlos	farblos	keine	21:38	1960
Fr. 12	20,4	10,68	3840	2,91	12,469	2,40	86	10	1050,00	geruchlos	farblos	keine	22:08	2080
Fr. 13	19,1	8,94	1138	3,29	7,475	0,09	108	7	173	geruchlos	farblos	keine	08:33	2040
Fr. 14	19,8	8,91	1132	1,10	7,551	0,05	100	6	118	geruchlos	farblos	keine	16:33	1960
Fr. 15	19,8	8,17	1213	0,33	5,581	0,00	147	6	98	geruchlos	farblos	keine	08:23	2100
Fr. 16	19,4	7,89	1399	0,60	5,161	0,00	193	7	86	geruchlos	farblos	keine	18:20	2060
Fr. 17	19,4	7,73	1832	0,28	18,159	0,00	289	9	66	geruchlos	farblos	keine	08:50	2040

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 1 (ungesättigt – 1,4:1 - 10min), Säule C mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele C	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]					
BW	19,7	7,75	728	< 1	3,561	0,00	106	4	46	geruchlos	farblos	keine	08:40	1000
Fr. 1	20,8	7,90	726	2,27	4,700	0,00	102	4	45	geruchlos	farblos	keine	16:52	2300
Fr. 2	20,8	9,00	778	2,45	3,710	0,08	79	4	76	geruchlos	farblos	keine	17:22	2000
Fr. 3	20,8	9,75	1014	47,60	4,690	0,00	8	4	198	geruchlos	farblos	keine	17:52	1840
Fr. 4	20,7	9,90	1175	38,60	5,080	0,06	13	4	264	geruchlos	farblos	keine	18:22	2050
Fr. 5	20,7	10,02	1313	26,80	5,579	0,20	35	4	342	geruchlos	farblos	keine	18:52	2060
Fr. 6	20,7	10,11	1458	15,60	5,469	0,90	102	5	377	geruchlos	farblos	keine	19:22	2060
Fr. 7	20,7	10,30	1802	12,10	7,262	1,29	124	6	520,00	geruchlos	farblos	keine	19:52	2030
Fr. 8	20,7	10,70	3590	3,30	11,217	2,56	120	10	1170,00	geruchlos	farblos	keine	20:22	2010
Fr. 9	20,6	10,85	5490	1,61	13,264	3,81	117	15	1960,00	geruchlos	farblos	keine	20:52	2050
Fr. 10	20,6	10,88	5890	1,23	15,433	3,94	104	16	2030,00	geruchlos	farblos	keine	21:22	1990
Fr. 11	20,5	10,81	5160	1,44	13,221	3,32	89	12	1560,00	geruchlos	farblos	keine	21:52	2060
Fr. 12	20,4	10,73	4340	2,28	12,827	2,81	94	11	1320,00	geruchlos	farblos	keine	22:22	2060
Fr. 13	19,1	8,96	1164	12,60	8,183	0,11	61	7	183	geruchlos	farblos	keine	08:33	2020
Fr. 14	20,0	8,78	1181	2,55	8,159	0,03	118	6	114	geruchlos	farblos	keine	16:33	2060
Fr. 15	19,9	8,29	1434	< 1	8,782	0,00	161	7	132	geruchlos	farblos	keine	08:23	2000
Fr. 16	19,6	7,76	1847	< 1	12,679	0,00	236	8	127	geruchlos	farblos	keine	18:20	2020
Fr. 17	19,5	7,56	2620	< 1	26,301	0,00	424	12	66	geruchlos	farblos	keine	08:50	2040



Abbildung: Typische Prüfkörperformen vor Ausbau (A), beim Ausbau (B) und nach dem Ausbau (C-F). Im oberen Verlauf bildet das Bauprodukt eine feine kristalline Form (A, B) die beim Ausbau sehr schnell zerstört werden kann (D). Alle gebildeten Prüfkörper zeigten dieselben Ausbildungen. Die Form in C und F zeigt die aufgesetzte ‚Haube‘ und den Kern des Prüfkörpers (E) nach Ausbau. Die Haube zerfällt bei Austrocknung und ist im nassen Zustand ebenfalls leicht zu entfernen. Der Kern (E) ist fester und stabiler. Der Ansatz der ‚Haube‘ ist deutlich erkennbar (rote Linie in E).



Tabelle: Protokoll zum Versuch Flut 2 (ungesättigt – 1,4:1 - 60min) mit Angaben zu Injektionszeit, -menge und Elutionsdauer sowie Prüfkörpercharakterisierung

<b>Bauprodukt:</b>	<b>Weichgel</b>		
<b>Elutionswasser:</b>	<b>Trinkwasser</b>		
	<b>Parallelen (Säule)</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Dauer Spülung Sandsäule [h]</b>	20	20	20
<b>Fließrate Q [l/h]</b>	4	4	4
<b>Datum - Beginn der Prüfung [TT.MM.JJJJ]</b>	19.05.2015	19.05.2015	19.05.2015
<b>Abnahme Blindwert [h:min]</b>	09:00	09:00	09:00
<b>Start Aushärtezeit (Vermischung A+B)</b>			
<b>Injektionsdauer [min:sek]</b>	42:00:00	34:00:00	35:00:00
<b>Masse angemischte Bauprodukt A [g]</b>	809,70	809,10	809,10
<b>Masse Rückstand Becherglas A [g]</b>	56,70	48,10	80,10
<b>Masse angemischte Bauprodukt B [g]</b>	599,70	599,70	599,70
<b>Masse Rückstand Becherglas B [g]</b>	60,20	43,20	68,70
<b>Masse injiziertes Bauprodukt [g]</b>	1292,50	1317,50	1260,00
<b>Start Elution [h:min]</b>	13:27	12:25	11:35
<b>Datum - Ende der Prüfung [TT.MM.JJJJ]</b>	22.05.2015	22.05.2015	22.05.2015
<b>Uhrzeit - Ende der Prüfung [h:min]</b>	09:05	09:05	09:05
<b>Gesamtdauer der Elution [Tage]</b>	4	4	4

	<b>Einheit</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Volumen</b>	l	1080	1080	1080
<b>Masse</b>	g	1409,4	1408,8	1408,8
<b>Restmenge Gefäß</b>	g	116,9	91,3	148,8
<b>Injektionsstart</b>		11:46	10:51	10:00
<b>Injektionsende</b>		12:27	11:25	10:35

<b>Charakterisierung der Prüfkörper</b>					
mit Haube					
<b>Prüfkörper &amp; Haube</b>	<b>Säule A</b>	<b>Säule B</b>	<b>Säule C</b>	<b>MW</b>	<b>STABW</b>
<b>Gewicht [g]</b>	4985,00	5507,00	4990,00	5160,67	299,94
<b>Volumen [ml]</b>	2650,00	2825,00	2700,00	2725,00	90,14
ohne Haube					
<b>Prüfkörper o. Haube</b>	<b>Säule A</b>	<b>Säule B</b>	<b>Säule C</b>	<b>MW</b>	<b>STABW</b>
<b>Gewicht [g]</b>	3640,00	3382,00	3331,00	3451,00	165,65
<b>Volumen [ml]</b>	1970,00	1750,00	1740,00	1820,00	130,00
<b>Umfang [cm]</b>	43,50	43,50	44,00	43,67	0,29
<b>Oberfläche [cm²]</b>	602,26	602,26	616,19	606,91	8,04

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 2 (ungesättigt – 1,4:1 - 60min), Säule A mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

<b>Parallele A</b>	<b>Temp.</b>	<b>pH-Wert</b>	<b>elektr. Leitf.</b>	<b>Trübung</b>	<b>TOC</b>	<b>Al</b>	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Na</b>	<b>Geruch</b>	<b>Farbe</b>	<b>N. z. Schaumb.</b>	<b>Entnahmezeitpunkt [h:min]</b>	<b>Entnahmevolumen [ml]</b>
<b>Fraktionen</b>	<b>[°C]</b>		<b>[µS/cm]</b>	<b>[FNU]</b>	<b>[mg/l]</b>	<b>[mg/l]</b>	<b>[mg/l]</b>	<b>[mg/l]</b>	<b>[mg/l]</b>					
BW	19,8	7,56	737	< 1	4,644	-0,03	94,71	3,09	45,21	geruchlos	farblos	keine	09:00	2060
Fr. 1	20,2	8,18	688	1,43	4,306	-0,02	84,97	2,65	43,59	geruchlos	farblos	keine	15:32	2050
Fr. 2	20,0	9,05	762	1,65	4,310	0,10	76,95	2,63	70,44	geruchlos	farblos	keine	16:02	1960
Fr. 3	20,0	9,73	990	7,20	4,983	0,00	9,41	2,69	162,30	geruchlos	farblos	keine	16:32	2020
Fr. 4	19,7	9,82	1068	9,73	5,161	0,00	6,29	2,78	186,20	geruchlos	farblos	keine	17:02	1950
Fr. 5	19,6	10,01	1242	41,00	5,718	0,00	7,77	2,79	248,00	geruchlos	farblos	keine	17:32	2000
Fr. 6	19,3	10,32	1714	17,50	7,447	0,92	75,32	3,29	408,20	geruchlos	farblos	keine	18:02	1980
Fr. 7	19,1	10,62	2740	5,07	9,584	1,63	68,92	3,48	685,90	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	18:32	2000
Fr. 8	19,1	10,89	4740	1,72	12,559	3,60	69,09	4,59	998,60	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	19:02	2040
Fr. 9	19,1	10,97	5990	2,08	16,516	4,74	62,71	5,11	998,20	geruchlos	farblos	keine	19:32	2060
Fr. 10	19,0	10,92	5620	1,34	15,935	4,02	58,27	4,99	998,50	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	20:02	2060
Fr. 11	19,0	10,87	4860	1,85	14,411	3,13	54,62	4,47	927,50	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	20:32	2040
Fr. 12	19,0	10,75	3960	2,39	13,234	2,36	55,93	4,64	876,30	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	21:02	2040
Fr. 13	19,7	8,57	1462	< 1	8,902	-0,01	84,03	3,65	80,14	geruchlos	farblos	keine	09:35	2020
Fr. 14	19,5	8,25	1646	< 1	13,986	-0,01	126,30	4,11	66,59	geruchlos	farblos	keine	16:18	2450
Fr. 15	17,8	7,94	2280	< 1	22,405	-0,03	211,80	7,22	61,66	geruchlos	farblos	keine	08:25	2100
Fr. 16	19,8	7,57	2460	< 1	29,300	-0,04	236,80	6,48	55,09	geruchlos	farblos	keine	19:03	2000
Fr. 17	19,9	7,63	1974	< 1	7,017	-0,04	181,50	4,68	63,47	geruchlos	farblos	keine	09:05	2020

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 2 (ungesättigt – 1,4:1 - 60min), Säule B mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele B	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]					
BW	20,0	7,61	738	< 1	3,661	-0,02	95,78	4,05	45,33	geruchlos	farblos	keine	09:00	2000
Fr. 1	19,8	8,18	698	< 1	3,779	-0,03	85,65	2,81	43,77	geruchlos	farblos	keine	14:36	1950
Fr. 2	20,0	8,68	755	1,51	4,273	0,07	92,92	2,78	57,65	geruchlos	farblos	keine	15:06	1850
Fr. 3	19,9	9,22	810	1,78	4,437	0,05	52,20	2,90	87,84	geruchlos	farblos	keine	15:36	1910
Fr. 4	19,8	9,67	966	27,20	4,614	0,00	6,80	2,98	152,10	geruchlos	farblos	keine	16:06	2000
Fr. 5	20,0	9,70	1006	32,90	4,537	0,00	6,10	2,94	167,10	geruchlos	farblos	keine	16:36	2080
Fr. 6	19,4	9,92	1158	41,40	5,402	0,00	11,92	2,79	221,90	geruchlos	farblos	keine	17:06	1950
Fr. 7	19,3	10,28	1686	14,90	7,646	0,97	78,76	3,02	381,30	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	17:36	1980
Fr. 8	19,1	10,67	2920	3,24	10,873	1,89	69,47	3,72	726,10	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	18:06	1975
Fr. 9	19,1	10,87	4370	1,79	12,360	3,36	69,95	4,48	970,70	geruchlos	farblos	keine	18:36	1980
Fr. 10	19,1	10,90	5110	1,46	13,071	3,60	56,44	5,75	988,20	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	19:06	1980
Fr. 11	19,0	10,87	4890	1,60	13,003	3,09	53,45	4,18	976,70	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	19:36	1980
Fr. 12	19,0	10,80	4530	1,50	13,245	2,54	49,39	4,54	958,60	geruchlos	farblos	keine	20:06	2000
Fr. 13	19,4	8,61	1415	< 1	4,815	-0,01	86,99	3,49	75,97	geruchlos	farblos	keine	09:35	1980
Fr. 14	19,7	8,66	1490	< 1	4,296	0,00	100,30	3,84	74,19	geruchlos	farblos	keine	16:18	2450
Fr. 15	19,4	8,23	1911	< 1	6,508	-0,03	163,80	5,27	71,74	geruchlos	farblos	keine	08:25	2060
Fr. 16	19,7	7,74	2420	< 1	20,471	-0,04	236,20	6,52	57,56	geruchlos	farblos	keine	19:03	2000
Fr. 17	19,9	7,82	2160	< 1	8,291	-0,04	211,40	5,25	59,60	geruchlos	farblos	keine	09:05	2000
Fr. 18	19,9	7,76	1773	< 1	10,677	-0,03	168,20	2,33	58,13	geruchlos	farblos	keine	16:15	500

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 2 (ungesättigt – 1,4:1 - 60min), Säule C mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele C	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]					
BW	19,4	7,56	742	< 1	4,398	-0,03	94,86	3,07	44,88	geruchlos	farblos	keine	09:00	1000
Fr. 1	19,7	8,00	718	1,57	3,700	-0,03	93,20	2,88	44,38	geruchlos	farblos	keine	13:42	1850
Fr. 2	19,9	8,48	757	1,46	4,132	0,06	92,32	3,24	56,36	geruchlos	farblos	keine	14:12	1950
Fr. 3	19,8	9,60	925	6,27	4,474	0,00	8,58	2,79	141,20	geruchlos	farblos	keine	14:42	2240
Fr. 4	19,9	9,85	1094	18,80	4,742	0,01	5,15	2,77	201,90	geruchlos	farblos	keine	15:12	1800
Fr. 5	19,8	10,00	1212	42,90	5,014	0,08	11,03	2,61	242,30	geruchlos	farblos	keine	15:42	2080
Fr. 6	19,6	10,15	1368	24,30	5,976	0,02	18,29	2,74	299,20	geruchlos	farblos	keine	16:12	2100
Fr. 7	19,4	10,26	1564	11,20	6,643	0,98	88,64	3,49	379,80	geruchlos	farblos	keine	16:42	2000
Fr. 8	19,4	10,47	2060	5,93	8,233	1,26	81,78	3,30	468,40	geruchlos	farblos	keine	17:12	2050
Fr. 9	19,3	10,79	3620	2,17	11,445	2,49	71,68	4,19	855,80	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	17:42	2080
Fr. 10	19,3	10,93	5290	1,37	14,484	3,44	57,66	4,13	998,30	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	18:12	1980
Fr. 11	19,0	10,91	5240	1,02	14,887	3,25	52,33	4,40	993,60	geruchlos	farblos	keine	18:42	2000
Fr. 12	19,1	10,82	4550	1,07	14,310	2,21	42,24	3,87	852,10	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	19:12	2000
Fr. 13	19,6	8,72	1503	6,36	12,638	-0,01	67,29	3,78	100,20	geruchlos	farblos	keine	09:36	1960
Fr. 14	19,9	8,96	1364	15,90	12,296	0,00	65,98	3,66	93,79	geruchlos	farblos	keine	16:18	2450
Fr. 15	19,8	7,89	1624	< 1	4,902	-0,03	120,50	4,13	76,52	geruchlos	farblos	keine	08:25	2040
Fr. 16	19,7	7,64	1803	< 1	18,100	-0,03	169,90	4,95	49,76	geruchlos	farblos	keine	19:03	1980
Fr. 17	19,9	7,67	2200	< 1	13,807	-0,04	231,90	6,10	44,39	geruchlos	farblos	keine	09:05	2040





Abbildung: Sicht auf geöffnete Säule von oben (A), beim Ausbau (B) und nach dem Ausbau (C-F). Im oberen Verlauf bildet das Bauprodukt eine feine kristalline Form (A, B) die beim Ausbau sehr schnell zerstört werden kann (D). Alle gebildeten Prüfkörper zeigten dieselben Ausbildungen. Die Form in C (liegend) und E (stehend) zeigt die aufgesetzte ‚Haube‘ und den Kern des Prüfkörpers (D, F) nach Ausbau. Die Haube zerfällt bei Austrocknung und ist im nassen Zustand ebenfalls leicht zu entfernen. Der Kern (D, F) ist fester und stabiler. Der Ansatz der ‚Haube‘ ist deutlich erkennbar (rote Linie in D).

Tabelle: Protokoll zum Versuch Flut 3 (ungesättigt - 1:1 – 10 min) mit Angaben zu Injektionszeit, -menge und Elutionsdauer sowie Prüfkörpercharakterisierung

<b>Bauprodukt:</b>	<b>Weichgel</b>		
<b>Elutionswasser:</b>	<b>Trinkwasser</b>		
	<b>Parallelen (Säule)</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Dauer Spülung Sandsäule [h]</b>	20	20	20
<b>Fließrate Q [l/h]</b>	4	4	4
<b>Datum - Beginn der Prüfung [TT.MM.JJJJ]</b>	02.06.2015	02.06.2015	02.06.2015
<b>Abnahme Blindwert [h:min]</b>	09:30	09:30	09:30
<b>Start Aushärtezeit (Vermischung A+B)</b>			
<b>Injektionsdauer [min:sek]</b>	30:00:00	44:00:00	23:00:00
<b>Masse angemischte Bauprodukt A [g]</b>	685,76	685,76	686,04
<b>Masse Rückstand Becherglas A [g]</b>	46,76	48,54	45,06
<b>Masse angemischte Bauprodukt B [g]</b>	720,38	720,58	720,48
<b>Masse Rückstand Becherglas B [g]</b>	54,56	53,68	40,28
<b>Masse injiziertes Bauprodukt [g]</b>	1304,82	1304,12	1321,18
<b>Start Elution [h:min]</b>	11:17	12:08	12:40
<b>Datum - Ende der Prüfung [TT.MM.JJJJ]</b>	05.06.2015	05.06.2015	05.06.2015
<b>Uhrzeit - Ende der Prüfung [h:min]</b>	10:10	10:10	10:10
<b>Gesamtdauer der Elution [Tage]</b>	4	4	4

	Einheit	A	B	C
Volumen	l	1100	1100	1100
Masse	g	1406,14	1406,34	1406,52
Restmenge Gefäß	g	101,32	102,22	85,34
Injektionsstart		10:37	11:14	12:07
Injektionsende		11:07	11:58	12:30

### Charakterisierung der Prüfkörper

mit Haube					
	Säule A	Säule B	Säule C	MW	STABW
<b>Gewicht [g]</b>	5639,00	5695,00	5676,00	5670,00	28,48
<b>Volumen [ml]</b>	2850,00	2520,00	2790,00	2720,00	175,78
ohne Haube					
	Säule A	Säule B	Säule C	MW	STABW
<b>Gewicht [g]</b>	3935,00	3930,00	3864,00	3909,67	39,63
<b>Volumen [ml]</b>	1940,00	1880,00	2300,00	2040,00	227,16
<b>Umfang [cm]</b>	45,75	47,00	49,50	47,42	1,91
<b>Oberfläche [cm<sup>2</sup>]</b>	666,18	703,08	779,86	716,37	58,00

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 3 (ungesättigt - 1:1 - 10min), Säule A mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele A	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]					
BW	20,0	7,60	742	< 1	3,437	0,00	111	4,05	43	geruchlos	farblos	keine	09:30	2040
Fr. 1	20,6	7,90	704	1,47	4,721	0,00	106	3,66	43	geruchlos	farblos	keine	12:58	2100
Fr. 2	20,5	8,24	744	1,65	3,382	0,09	111	4,00	53	geruchlos	farblos	keine	13:28	2000
Fr. 3	20,5	9,46	850	4,02	4,064	0,05	40	4,71	121	geruchlos	farblos	keine	13:58	2100
Fr. 4	20,5	9,55	899	6,81	4,184	0,06	23	5,62	142	geruchlos	farblos	keine	14:28	1900
Fr. 5	20,5	9,66	969	9,22	5,124	0,02	13	5,23	172	geruchlos	farblos	keine	14:58	2000
Fr. 6	20,5	9,99	1032	14,30	6,273	0,01	5	5,26	200	geruchlos	farblos	keine	15:28	2000
Fr. 7	20,4	10,30	1103	11,00	5,254	0,05	0	2,13	250	geruchlos	farblos	keine	15:58	1960
Fr. 8	20,3	10,37	1391	39,40	6,857	0,93	84	9,73	379	geruchlos	farblos	keine	16:28	1960
Fr. 9	20,3	10,66	2440	4,79	11,382	1,58	70	5,86	829	geruchlos	farblos	keine	16:58	1980
Fr. 10	20,4	10,74	3560	1,96	12,766	1,90	41	6,35	1120	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	17:28	1980
Fr. 11	20,3	10,71	3720	1,93	13,894	2,21	54	8,22	1240	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	17:58	1960
Fr. 12	20,4	10,65	3500	3,32	13,524	1,98	39	1,99	1090	geruchlos	farblos	keine	18:28	1980
Fr. 13	20,7	8,95	1393	2,91	11,277	0,07	129	6,89	142	geruchlos	farblos	keine	10:14	2000
Fr. 14	20,8	9,31	1600	10,10	13,873	0,00	75	7,28	197	geruchlos	farblos	keine	16:33	1920
Fr. 15	20,0	7,77	1929	< 1	15,698	0,00	250	9,64	95	geruchlos	farblos	keine	10:14	2020
Fr. 16	19,9	7,60	2130	< 1	7,506	0,00	294	11,40	73	geruchlos	farblos	keine	17:27	1980
Fr. 17	19,4	7,44	3250	1,56	31,926	0,00	477	16,70	78	geruchlos	farblos	keine	10:10	1865

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 3 (ungesättigt - 1:1 - 10min), Säule B mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele B	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]					
BW	19,9	7,79	732	< 1	2,641	0,00	113	4,05	43	geruchlos	farblos	keine	09:30	1880
Fr. 1	20,5	8,29	697	1,33	3,164	0,01	106	3,81	44	geruchlos	farblos	keine	13:59	2220
Fr. 2	20,5	8,87	748	2,07	3,520	0,14	109	3,81	60	geruchlos	farblos	keine	14:29	1950
Fr. 3	20,6	9,70	969	7,71	4,601	0,04	17	5,10	165	geruchlos	farblos	keine	14:59	2000
Fr. 4	20,5	9,69	1036	11,70	4,251	0,06	6	5,06	201	geruchlos	farblos	keine	15:29	1900
Fr. 5	20,6	10,32	1147	56,10	4,578	0,02	4	4,55	249	geruchlos	farblos	keine	15:59	1940
Fr. 6	20,5	10,23	1280	36,20	6,422	0,10	29	5,69	301	geruchlos	farblos	keine	16:29	1950
Fr. 7	20,5	10,00	2150	12,70	8,761	1,52	88	8,64	633	geruchlos	farblos	keine	16:59	1920
Fr. 8	20,3	10,77	3780	2,99	12,525	2,43	42	12,30	1280	geruchlos	farblos	keine	17:29	1980
Fr. 9	20,4	10,81	4520	1,70	15,275	3,68	32	19,70	1560	geruchlos	farblos	keine	17:59	1960
Fr. 10	20,4	10,75	4320	1,94	15,694	2,77	42	4,60	1460	geruchlos	farblos	keine	18:29	1980
Fr. 11	20,4	10,63	3630	2,86	14,258	1,97	50	2,48	1240	geruchlos	farblos	keine	18:59	1900
Fr. 12	20,4	10,52	3020	4,32	15,953	1,54	46	0,00	867	geruchlos	farblos	keine	19:29	1980
Fr. 13	20,9	8,99	1380	1,89	10,680	0,06	120	7,12	137	geruchlos	farblos	keine	10:12	1920
Fr. 14	20,7	8,80	1395	2,54	11,673	0,03	137	6,99	124	geruchlos	farblos	keine	16:34	1900
Fr. 15	19,6	7,82	2310	< 1	21,213	0,00	303	11,50	96	geruchlos	farblos	keine	10:14	2040
Fr. 16	19,7	7,69	2620	< 1	29,239	0,00	364	13,90	81	geruchlos	farblos	keine	17:27	1980
Fr. 17	19,4	7,59	3520	< 1	43,646	0,00	502	16,80	107	geruchlos	farblos	keine	10:10	1850

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 3 (ungesättigt - 1:1 - 10min), Säule C mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele C	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]					
BW	20,0	7,58	731	< 1	2,923	0,00	115	4,08	44	geruchlos	farblos	keine	09:00	1000
Fr. 1	20,8	8,03	689	3,88	3,139	0,00	105	3,75	43	geruchlos	farblos	keine	13:42	1850
Fr. 2	20,8	8,04	735	1,91	3,198	0,06	109	3,84	50	geruchlos	farblos	keine	14:12	1950
Fr. 3	20,7	10,15	1007	4,65	6,176	0,03	28	4,76	149	geruchlos	farblos	keine	14:42	2240
Fr. 4	20,6	10,20	1167	4,66	6,497	0,01	7	6,82	211	geruchlos	farblos	keine	15:12	1800
Fr. 5	20,8	10,24	1341	9,13	8,643	0,03	8	6,91	260	geruchlos	farblos	keine	15:42	2080
Fr. 6	20,6	10,04	1433	29,70	7,942	0,01	4	4,95	316	geruchlos	farblos	keine	16:12	2100
Fr. 7	20,5	10,30	2020	31,90	11,898	1,76	168	6,11	595	geruchlos	farblos	keine	16:42	2000
Fr. 8	20,6	10,70	3710	8,26	14,315	2,09	47	12,50	1230	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	17:12	2050
Fr. 9	20,6	10,79	4740	11,10	20,255	4,09	33	15,30	1640	geruchlos	farblos	keine	17:42	2080
Fr. 10	20,5	10,72	4180	13,10	18,094	2,15	40	18,80	1320	geruchlos	farblos	keine	18:12	1980
Fr. 11	20,6	10,58	3500	13,40	16,471	1,69	54	1,28	1180	geruchlos	farblos	keine	18:42	2000
Fr. 12	20,7	10,43	2890	17,90	15,690	1,61	53	5,75	792	geruchlos	farblos	keine	19:12	2000
Fr. 13	20,8	9,54	2110	20,70	20,196	0,00	76	9,53	331	geruchlos	farblos	keine	09:36	1960
Fr. 14	20,8	9,18	1639	22,90	14,534	0,02	107	7,99	178	geruchlos	farblos	keine	16:18	2450
Fr. 15	19,9	7,77	2320	< 1	10,528	0,00	297	11,60	106	geruchlos	farblos	keine	08:25	2040
Fr. 16	19,9	7,63	2810	< 1	30,518	0,00	397	14,80	82	geruchlos	farblos	keine	19:03	1980
Fr. 17	19,6	7,49	2670	< 1	27,580	0,00	380	14,10	75	geruchlos	farblos	keine	09:05	2040





Abbildung: Sicht auf freigelegte Prüfkörper (A, B) und nach dem Ausbau (C-F). Alle gebildeten Prüfkörper zeigten dieselben Ausbildungen. Die Form in C (liegend) und E (stehend) zeigt die aufgesetzte ‚Haube‘ und den Kern des Prüfkörpers (D, F) nach Ausbau. Die Haube zerfällt bei Austrocknung und ist im nassen Zustand ebenfalls leicht zu entfernen. Der Kern (D, F) ist fester und stabiler. Der Ansatz der ‚Haube‘ ist deutlich erkennbar (rote Linie in D).

Tabelle: Protokoll zum Versuch Flut 4 (gesättigt – 1,4:1 – 10 min) mit Angaben zu Injektionszeit, -menge und Elutionsdauer sowie Prüfkörpercharakterisierung

<b>Bauprodukt:</b>	<b>Weichgel</b>		
<b>Elutionswasser:</b>	<b>Trinkwasser</b>		
	<b>Parallelen (Säule)</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Dauer Spülung Sandsäule [h]	20	Injektion nicht erfolgreich	Injektion nicht erfolgreich
Fließrate Q [l/h]	4		
Datum - Beginn der Prüfung [TT.MM.JJJJ]	09.06.2015		
Abnahme Blindwert [h:min]	09:11		
Start Aushärtezeit (Vermischung A+B)			
Injektionsdauer [min:sek]	36:00:00		
Masse angemischte Bauprodukt A [g]	809,76		
Masse Rückstand Becherglas A [g]	50,66		
Masse angemischte Bauprodukt B [g]	599,68		
Masse Rückstand Becherglas B [g]	66,16		
Masse injiziertes Bauprodukt [g]	1292,62		
Start Elution [h:min]	10:54		
Datum - Ende der Prüfung [TT.MM.JJJJ]	12.06.2015		
Uhrzeit - Ende der Prüfung [h:min]	14:10		
Gesamtdauer der Elution [Tage]	4		

	Einheit	A
Volumen	l	1080
Masse	g	1409,44
Restmenge Gefäß	g	116,82
Injektionsstart		10:08
Injektionsende		10:44

<b>Charakterisierung der Prüfkörper</b>			
mit Haube			
	Säule A	Säule B	Säule C
Gewicht [g]	4081,00		
Volumen [ml]	1980,00		
ohne Haube			
	Säule A	Säule B	Säule C
Gewicht [g]	3108,00		
Volumen [ml]	1640,00		
Umfang [cm]	44,00		
Oberfläche [cm²]	616,19		



Abbildung: Sicht auf freigelegten (A) und ausgebauten Prüfkörper (B, C). Die Oberfläche ist im Vergleich zu Flut 1 – 3 im unteren Bereich rauer.

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 4 (gesättigt – 1,4:1 - 10min), Säule A mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele A	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmekzeitpunkt [h:min]	Entnahmekvolumen [ml]
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]					
BW	19,1	7,59	741	< 1	2,616	0,00	111	3,82	43	geruchlos	farblos	keine	09:11	1660
Fr. 1	19,3	7,51	748	< 1	2,825	0,00	112	3,84	43	geruchlos	farblos	keine	11:24	1680
Fr. 2	19,0	7,55	739	< 1	3,885	0,00	111	3,79	43	geruchlos	farblos	keine	11:54	2100
Fr. 3	19,3	7,58	738	< 1	2,934	0,00	111	3,80	43	geruchlos	farblos	keine	12:24	2100
Fr. 4	19,2	7,59	740	< 1	2,993	0,00	111	3,73	44	geruchlos	farblos	keine	12:54	2050
Fr. 5	19,2	7,58	748	< 1	2,374	0,03	110	3,75	46	geruchlos	farblos	keine	13:24	2000
Fr. 6	19,1	8,94	797	2,15	3,308	0,24	107	3,77	77	geruchlos	farblos	keine	13:54	1980
Fr. 7	19,3	9,63	945	5,10	4,910	0,00	13	3,74	163	geruchlos	farblos	keine	14:24	2000
Fr. 8	19,3	9,88	1107	50,90	4,684	0,00	10	5,46	246	geruchlos	farblos	keine	14:54	2000
Fr. 9	19,3	10,02	1198	52,70	5,052	0,09	20	5,46	266	geruchlos	milchig	keine	15:24	1940
Fr. 10	19,0	10,10	1303	37,60	5,789	0,63	63	5,06	316	geruchlos	milchig	keine	15:54	2080
Fr. 11	19,1	10,26	1557	20,30	5,596	1,18	104	5,77	407	geruchlos	milchig	keine	16:24	1950
Fr. 12	19,1	10,54	2490	56,85	8,119	1,69	138	12,00	792	geruchlos	farblos	keine	16:54	2000
Fr. 13	19,2	10,79	4400	3,73	10,397	2,49	97	9,35	1420	geruchlos	farblos	keine	17:24	1850
Fr. 14	19,0	10,89	6060	2,52	16,473	4,97	66	20,40	2260	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	17:54	1950
Fr. 15	19,0	10,90	5970	< 1	18,367	4,55	52	22,80	2230	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	18:24	2050
Fr. 16	19,0	10,83	5320	< 1	17,990	3,13	63	22,30	1810	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	18:54	2000
Fr. 17	19,1	10,74	4460	< 1	16,771	2,73	87	15,00	1600	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	19:24	2000
Fr. 18	19,3	10,83	3720	< 1	14,124	2,38	102	9,35	1230	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	19:54	2020
Fr. 19	19,0	8,95	1196	< 1	8,301	0,16	140	7,17	139	geruchlos	farblos	keine	09:32	2000
Fr. 20	19,5	8,15	1136	< 1	7,249	0,08	169	6,78	86	geruchlos	farblos	keine	18:07	2040
Fr. 21	18,9	7,76	1125	< 1	5,315	0,00	188	6,00	75	geruchlos	farblos	keine	09:11	2000
Fr. 22	19,9	7,72	1129	< 1	8,033	0,00	200	6,13	78	geruchlos	farblos	keine	16:00	2040
Fr. 23	20,8	7,68	1182	1,22	5,843	0,00	203	5,41	65	geruchlos	farblos	keine	14:10	2000



Tabelle: Protokoll zum Versuch Flut 5 (gesättigt - 1:1 – 10 min) mit Angaben zu Injektionszeit, -menge und Elutionsdauer sowie Prüfkörpercharakterisierung

<b>Bauprodukt:</b>	<b>Weichgel</b>		
<b>Elutionswasser:</b>	<b>Trinkwasser</b>		
	<b>Parallelen (Säule)</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Dauer Spülung Sandsäule [h]</b>	20		20
<b>Fließrate Q [l/h]</b>	4		4
<b>Datum - Beginn der Prüfung [TT.MM.JJJJ]</b>	07.07.2015		07.07.2015
<b>Abnahme Blindwert [h:min]</b>	10:20		10:20
<b>Start Aushärtezeit (Vermischung A+B)</b>			
<b>Injektionsdauer [min:sek]</b>	36:00:00		40:00:00
<b>Masse angemischte Bauprodukt A [g]</b>	685,76		686,76
<b>Masse Rückstand Becherglas A [g]</b>	36,36		36,56
<b>Masse angemischte Bauprodukt B [g]</b>	720,38		720,38
<b>Masse Rückstand Becherglas B [g]</b>	50,88		46,98
<b>Masse injiziertes Bauprodukt [g]</b>	1318,90		1323,60
<b>Start Elution [h:min]</b>	13:44		12:46
<b>Datum - Ende der Prüfung [TT.MM.JJJJ]</b>	10.07.2015		10.07.2015
<b>Uhrzeit - Ende der Prüfung [h:min]</b>	08:10		08:10
<b>Gesamtdauer der Elution [Tage]</b>	3		3

	Einheit	A	B	C
Volumen	l	1100		1100
Masse	g	1406,14		1407,14
Restmenge Gefäß	g	87,24		83,54
aus Säule ausgetretenes Eluat	l			
Injektionsstart		12:58		11:56
Injektionsende		13:34		12:36

<b>Charakterisierung der Prüfkörper</b>			
mit Haube			
	Säule A	Säule B	Säule C
<b>Gewicht [g]</b>	4950,00		
<b>Volumen [ml]</b>	2400,00		
ohne Haube			
	Säule A	Säule B	Säule C
<b>Gewicht [g]</b>	3935,00		3939,00
<b>Volumen [ml]</b>	1940,00		1790,00
<b>Umfang [cm]</b>	45,75		46,75
<b>Oberfläche [cm²]</b>	666,18		695,62

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 5 (gesättigt - 1:1 - 10min), Säule A mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele A	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]	Datum
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]						
BW	22,3	7,54	734	1,33	4,522	0,007	102,6	3,50	44,5	geruchlos	farblos	keine	11:18	2150	07.07.2015
Fr. 1	22,4	7,49	739	1,17	4,045	0,000	138,9	3,08	42,9	geruchlos	farblos	keine	14:14	2100	07.07.2015
Fr. 2	22,4	7,47	738	1,46	2,679	0,000	137,5	3,17	42,6	geruchlos	farblos	keine	14:44	2000	07.07.2015
Fr. 3	22,5	7,54	736	1,61	2,993	0,000	137,5	3,17	42,7	geruchlos	farblos	keine	15:14	2050	07.07.2015
Fr. 4	22,2	7,61	743	1,43	1,881	0,000	136,0	3,13	42,7	geruchlos	farblos	keine	15:44	2200	07.07.2015
Fr. 5	22,2	7,82	772	1,67	2,367	0,047	133,8	3,06	51,5	geruchlos	farblos	keine	16:14	2050	07.07.2015
Fr. 6	22,2	9,38	891	7,55	4,875	0,098	50,1	3,10	119,0	geruchlos	farblos	keine	16:44	1900	07.07.2015
Fr. 7	22,3	9,87	1131	37,00	5,986	0,019	9,7	3,21	224,0	geruchlos	farblos	keine	17:14	2030	07.07.2015
Fr. 8	22,3	10,19	1484	46,60	7,084	0,458	93,6	3,78	359,0	geruchlos	farblos	keine	17:44	2010	07.07.2015
Fr. 9	22,3	10,36	1858	20,50	7,217	0,995	124,9	3,54	456,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	18:14	2000	07.07.2015
Fr. 10	22,2	10,69	3310	9,40	12,840	2,054	131,6	4,55	962,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	18:44	2010	07.07.2015
Fr. 11	22,4	10,86	5640	4,12	20,402	3,620	130,2	9,79	1910,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	19:14	2080	07.07.2015
Fr. 12	22,4	10,83	5820	3,11	22,519	3,935	353,8	8,09	2430,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	19:44	1960	07.07.2015
Fr. 13	22,9	10,78	4760	4,90	19,395	3,566	359,9	0,00	1730,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	20:14	2020	07.07.2015
Fr. 14	23,0	10,65	3890	9,80	17,095	2,568	139,4	0,00	1300,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	20:44	2060	07.07.2015
Fr. 15	23,2	10,50	2930	18,70	14,595	1,754	152,0	0,00	942,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	21:14	2100	07.07.2015
Fr. 16					12,410	1,336	171,7	0,00	716,0				21:44		07.07.2015
Fr. 17	22,6	8,46	1370	< 1	10,097	0,350	293,9	0,00	149,0	geruchlos	farblos	keine	10:11	2050	08.07.2015
Fr. 18	22,4	7,98	1347	< 1	9,186	0,387	305,3	0,00	121,0	geruchlos	farblos	keine	16:47	2000	08.07.2015
Fr. 19	20,6	7,75	1269	< 1	7,969	0,036	290,9	4,13	80,3	geruchlos	farblos	keine	09:30	2050	09.07.2015
Fr. 20	19,2	7,65	1202	< 1	5,026	0,000	276,1	3,29	75,5	geruchlos	farblos	keine	08:02	1980	10.07.2015

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 5 (gesättigt - 1:1 - 10min), Säule C mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele C	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmekzeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]	Datum
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]						
BW	22,4	7,63	745	1,47	3,327	0,007	103,30	3,42	44,6	geruchlos	farblos	keine	11:08	2400	07.07.2015
Fr. 1	22,3	7,75	743	1,50	3,137	0,000	138,80	3,31	43,7	geruchlos	farblos	keine	13:16	2000	07.07.2015
Fr. 2	22,4	7,75	743	1,53	2,441	0,000	137,00	3,40	43,4	geruchlos	farblos	keine	13:46	2150	07.07.2015
Fr. 3	22,4	7,72	741	1,47	2,240	0,000	135,90	3,23	43,2	geruchlos	farblos	keine	14:16	2150	07.07.2015
Fr. 4	22,4	7,75	745	1,51	2,228	0,000	136,40	3,21	43,7	geruchlos	farblos	keine	14:46	2400	07.07.2015
Fr. 5	22,5	8,01	770	2,13	2,770	0,047	136,00	3,21	50,5	geruchlos	farblos	keine	15:16	2000	07.07.2015
Fr. 6	22,1	9,09	978	3,81	5,785	0,072	121,50	3,93	92,4	geruchlos	farblos	keine	15:46	1950	07.07.2015
Fr. 7	22,2	9,64	1086	13,90	6,699	0,000	15,62	4,00	187,0	geruchlos	farblos	keine	16:16	1980	07.07.2015
Fr. 8	22,2	10,02	1278	17,50	6,354	0,037	12,56	1,85	230,0	geruchlos	farblos	keine	16:46	1930	07.07.2015
Fr. 9	22,2	10,18	1518	48,20	7,344	0,070	34,61	2,36	352,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	17:16	2000	07.07.2015
Fr. 10	22,2	10,56	2460	19,50	9,644	1,558	147,60	5,38	721,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	17:46	2040	07.07.2015
Fr. 11	22,2	10,81	4310	5,91	14,583	2,785	143,90	8,67	1510,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	18:16	2000	07.07.2015
Fr. 12	22,1	10,85	5240	3,84	18,711	3,519	130,50	6,55	2080,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	18:46	2020	07.07.2015
Fr. 13	22,4	10,80	4850	3,49	18,366	2,676	114,40	2,92	1750,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	19:16	2000	07.07.2015
Fr. 14	22,4	10,70	4140	6,50	18,532	2,754	125,90	0,00	1480,0	geruchlos	farblos	keine	19:46	1950	07.07.2015
Fr. 15	22,8	10,66	3590	11,40	16,226	2,417	137,80	0,00	1190,0	geruchlos	farblos	keine	20:16	2000	07.07.2015
Fr. 16	23,1	10,50	2990	22,30	14,716	1,953	156,90	0,00	1020,0	geruchlos	farblos	keine	20:46	2050	07.07.2015
Fr. 17	22,5	8,64	1477	1,10	12,646	0,222	293,00	0,00	161,0	geruchlos	farblos	keine	10:11	2020	08.07.2015
Fr. 18	22,2	8,08	1499	< 1	12,294	0,249	338,30	0,00	157,0	geruchlos	farblos	keine	16:48	2000	08.07.2015
Fr. 19	20,0	7,91	1397	< 1	7,599	0,033	282,10	3,82	82,0	geruchlos	farblos	keine	09:30	2050	09.07.2015
Fr. 20	19,1	7,89	1331	< 1	6,944	0,030	294,60	2,37	67,4	geruchlos	farblos	keine	08:02	2000	10.07.2015



Abbildung: Sicht auf freigelegte Prüfkörper (A) und nach dem Ausbau (B-C). Alle gebildeten Prüfkörper zeigten dieselben Ausbildungen. B und C Kern des Prüfkörpers nach Ausbau. Die Haube zerfällt bei Austrocknung und ist im nassen Zustand ebenfalls leicht zu entfernen. Der Kern (D, F) ist fester und stabiler. Der Ansatz der ‚Haube‘ ist deutlich erkennbar (rote Linie in C).



Tabelle: Protokoll zum Versuch Flut 6 (gesättigt – 1,4:1 – 10 min) mit Angaben zu Injektionszeit, -menge und Elutionsdauer sowie Prüfkörpercharakterisierung

<b>Bauprodukt:</b>	<b>Weichgel</b>		
<b>Elutionswasser:</b>	<b>Trinkwasser</b>		
	<b>Parallelen (Säule)</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Dauer Spülung Sandsäule [h]	20		
Fließrate Q [l/h]	4		
Datum - Beginn der Prüfung [TT.MM.JJJJ]	15.07.2015		
Abnahme Blindwert [h:min]	09:00		
Start Aushärtezeit (Vermischung A+B)			
Injektionsdauer [min:sek]	44:00:00		
Masse angemischte Bauprodukt A [g]	809,76		
Masse Rückstand Becherglas A [g]	52,53		
Masse angemischte Bauprodukt B [g]	599,68		
Masse Rückstand Becherglas B [g]	36,89		
Masse injiziertes Bauprodukt [g]	1320,02		
Start Elution [h:min]	11:22		
Datum - Ende der Prüfung [TT.MM.JJJJ]	17.07.2015		
Uhrzeit - Ende der Prüfung [h:min]	08:25		
Gesamtdauer der Elution [Tage]	3		

	Einheit	A	B	C
Volumen	l	1080		
Masse	g	1409,44		
Restmenge Gefäß	g	89,42		
aus Säule ausgetretenes Eluat	l			
Injektionsstart		12:28		
Injektionsende		11:12		

### Charakterisierung der Prüfkörper

mit Haube			
	Säule A	Säule B	Säule C
Gewicht [g]	4194,00		
Volumen [ml]	2075,00		
ohne Haube			
	Säule A	Säule B	Säule C
Gewicht [g]	3028,00		
Volumen [ml]	1460,00		
Umfang [cm]	47,00		
Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	703,08		



Abbildung: Sicht auf freigelegten (A) und ausgebauten Prüfkörper (B, C). Der Baukörper ist leicht ausgehöhlt (C).

Tabelle: Detaillierte Ergebnisse zum Versuch Flut 6 (gesättigt – 1,4:1 - 10min), Säule A mit Angabe aller aufgenommenen Parameter, Eluatvolumen und Zeiten

Parallele A	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC	Al	Ca	K	Na	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt [h:min]	Entnahmevolumen [ml]	Datum
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]						
BW	19,8	7,60	735	< 1	4,980	0,00	105,50	3,31	45,2	geruchlos	farblos	keine	09:00	1000	15.07.2015
Fr. 1	19,9	7,77	739	< 1	2,761	0,00	110,30	3,40	45,3	geruchlos	farblos	keine	11:52	2225	15.07.2015
Fr. 2	19,9	7,77	736	< 1	2,603	0,00	110,80	3,34	45,2	geruchlos	farblos	keine	12:22	2250	15.07.2015
Fr. 3	19,9	7,83	737	< 1	2,492	0,00	111,70	3,52	45,4	geruchlos	farblos	keine	12:52	2225	15.07.2015
Fr. 4	20,1	7,81	745	< 1	2,346	0,00	111,60	3,50	48,2	geruchlos	farblos	keine	13:22	2000	15.07.2015
Fr. 5	20,3	9,07	814	2,43	3,893	0,11	110,30	3,51	84,4	geruchlos	farblos	keine	13:52	2200	15.07.2015
Fr. 6	20,3	9,73	1039	14,90	4,967	0,00	7,24	3,38	186,0	geruchlos	farblos	keine	14:22	1920	15.07.2015
Fr. 7	20,3	10,12	1417	28,70	6,727	0,72	93,50	4,24	339,0	geruchlos	farblos	keine	14:52	2000	15.07.2015
Fr. 8	20,4	10,33	1716	12,70	6,504	0,00	113,50	5,38	505,0	geruchlos	farblos	keine	15:22	2000	15.07.2015
Fr. 9	20,3	10,39	1919	7,89	6,824	0,00	113,90	5,58	585,0	geruchlos	farblos	keine	15:52	1920	15.07.2015
Fr. 10	20,4	10,56	2500	6,01	8,387	0,89	120,90	6,47	822,0	geruchlos	farblos	keine	16:22	2000	15.07.2015
Fr. 11	20,4	10,86	4580		13,580	2,95	112,70	8,93	1700,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	16:52	2000	15.07.2015
Fr. 12	20,4	10,95	6070	2,12	18,983	0,00	79,20	10,10	2460,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	17:22	2000	15.07.2015
Fr. 13	20,5	10,93	5890	2,06	19,447	0,00	68,82	11,60	2330,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	17:52	1920	15.07.2015
Fr. 14	20,5	10,83	4870	2,94	17,476	0,00	77,42	14,90	1790,0	geruchlos	farblos	leicht, nicht stabil	18:22	2000	15.07.2015
Fr. 15	20,5	10,73	3920	5,61	14,998	0,00	100,90	11,60	1340,0	geruchlos	farblos	keine	18:52	1920	15.07.2015
Fr. 16	20,6	10,59	3150	10,30	12,654	0,00	118,10	0,00	1070,0	geruchlos	farblos	keine	19:22	2000	15.07.2015
Fr. 17	20,5	10,47	2690	18,60	12,169	0,00	123,20	0,00	895,0	geruchlos	farblos	keine	19:52	1980	15.07.2015
Fr. 18	20,3	9,04	1340	< 1	9,956	0,00	185,30	0,00	155,0	geruchlos	farblos	keine	08:22	2000	16.07.2015
Fr. 19	21,4	8,01	1184	< 1	8,631	0,00	235,60	5,54	70,8	geruchlos	farblos	keine	16:24	2000	16.07.2015
Fr. 20	21,3	8,09	1169	< 1	7,861	0,00	226,10	5,19	64,6	geruchlos	farblos	keine	08:25	1980	17.07.2015

## **Anhang B**

synlab Umweltinstitut GmbH - Hauptstraße 105 - 04416 Markkleeberg

Freie Universität Berlin  
Fachbereich Geowissenschaften  
AG Geoökologie  
Herr Dr. rer. nat. Robert Wagner  
Malteser Straße 74-100, Haus G  
12249 Berlin

### Leipzig-Markkleeberg

Durchwahl: 0341/492899-0  
Telefax: 0341/492899-333  
E-Mail: sui-leipzig@synlab.com  
Internet: www.synlab.com

Seite 1 von 2

Datum: 14.09.2015

Prüfbericht Nr.: ULE-15-0064454/02-1  
Auftrag-Nr.: ULE-15-0064454  
Ihr Auftrag: vom 17.07.2015  
Projekt: Ökotoxizitätstest  
Probenahme durch: AG  
Eingangsdatum: 17.07.2015  
Prüfzeitraum: 17.07.2015 - 14.09.2015  
Probenart: Eluat



### Untersuchungsergebnisse

Probe-Nr.:		ULE-15-0064454-01	ULE-15-0064454-02	ULE-15-0064454-03
Bezeichnung:		Flut 5A MP 11-13	Flut 16 Fr. 9	Flut 6 MP 12-14

### Biologische Parameter

Leuchtbakterientoxizität	GL-Wert	1	1	1
Toxizitätstest Daphnien	GD-Wert	1	1	4
Algtoxizität	GA-Wert	>16	>16	144

## Untersuchungsergebnisse

Probe-Nr.:		ULE-15-0064454-04	ULE-15-0064454-05
Bezeichnung:		Flut 6 Fr. 18	Flut 5 Fr. 19A

## Biologische Parameter

Leuchtbakterientoxizität	GL-Wert	1	1
Toxizitätstest Daphnien	GD-Wert	1	1
Algentoxizität	GA-Wert	8	2

Der Prüfbericht enthält eine Anlage mit 4 Seiten.

Die Auswahl der Verdünnungsstufen richtete sich nach den Vorgaben des DIBt.

Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf der Zustimmung der Synlab Umweltinstitut GmbH.

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Prüfbericht spezifizierten Prüfgegenstände. (DIN EN ISO 17025).

Der Prüfbericht wurde am 14.09.2015 um 14:20 Uhr durch Ulf Biermann (Projektleiter) elektronisch freigegeben und ist ohne Unterschrift gültig.

Angewandte Methoden	
Parameter	Norm
Leuchtbakterientoxizität	DIN EN ISO 11348-2 (L 52)
Toxizitätstest Daphnien	DIN 38 412-L 30
Algentoxizität	DIN 38412 L33

**Anlage zum Prüfbericht ULE-15-0064454/02-1**

Detaillierte Untersuchungsergebnisse zum Daphnientest nach DIN 38412 (L30) - DIBt Vorgaben:

Probennummer **ULE-15-0064454-01**  
 Probenbezeichnung: Flut 5A MP 11-13

Verdünnungsstufe G	Hemmwirkung nach 24 h %	Hemmwirkung nach 48 h %	pH-Werte	
			Testbeginn	Testende
1	0	10	8,6	8,9
2	10	10	8,6	8,6
4	0	0	8,5	8,4
6	0	0	8,5	8,3
8	0	0	8,4	8,2
16	0	0	8,4	8,1

G<sub>D</sub>-Wert: 1 1

Probennummer **ULE-15-0064454-02**  
 Probenbezeichnung: Flut 16 Fr. 9

Verdünnungsstufe G	Hemmwirkung nach 24 h %	Hemmwirkung nach 48 h %	pH-Werte	
			Testbeginn	Testende
1	0	0	8,6	8,7
2	0	0	8,5	8,5
4	0	0	8,4	8,3
6	0	0	8,4	8,2
8	0	0	8,3	8,1
16	0	0	8,3	8,0

G<sub>D</sub>-Wert: 1 1

Probennummer **ULE-15-0064454-03**  
 Probenbezeichnung: Flut 6 MP 12-14

Verdünnungsstufe G	Hemmwirkung nach 24 h %	Hemmwirkung nach 48 h %	pH-Werte	
			Testbeginn	Testende
1	40	90	9,4	9,0
2	10	70	9,1	8,9
4	0	0	9,0	8,7
6	0	0	9,0	8,5
8	0	0	8,9	8,3
16	0	0	8,1	7,9

G<sub>D</sub>-Wert: 2 4

**Anlage zum Prüfbericht ULE-15-0064454/02-1**

Detaillierte Untersuchungsergebnisse zum Daphnientest nach DIN 38412 (L30) - DIBt Vorgaben:

Probennummer **ULE-15-0064454-04**  
 Probenbezeichnung: Flut 6 Fr. 18

Verdünnungsstufe G	Hemmwirkung nach 24 h %	Hemmwirkung nach 48 h %	pH-Werte	
			Testbeginn	Testende
1	0	0	8,1	8,2
2	0	0	8,1	8,2
4	0	0	8,1	8,1
6	0	0	8,1	8,0
8	0	0	8,1	8,0
16	0	0	7,8	7,9

G<sub>D</sub>-Wert: 1 1

Probennummer **ULE-15-0064454-05**  
 Probenbezeichnung: Flut 5 Fr. 19A

Verdünnungsstufe G	Hemmwirkung nach 24 h %	Hemmwirkung nach 48 h %	pH-Werte	
			Testbeginn	Testende
1	0	0	7,3	8,1
2	0	0	7,6	8,2
4	0	0	7,7	8,1
6	0	0	7,7	8,0
8	0	0	7,8	8,0
16	0	0	7,8	7,9

G<sub>D</sub>-Wert: 1 1

Die Gültigkeitskriterien der Tests wurden erfüllt.

**Anlage zum Prüfbericht ULE-15-0064454/02-1**

Detaillierte Untersuchungsergebnisse zum Algentest nach DIN 38412 (L33) - DIBt Vorgaben:

Probennummer **ULE-15-0064454-01**  
 Probenbezeichnung: Flut 5A MP 11-13

Verdünnungsstufe	Hemmwirkung	pH-Werte	
		Testbeginn	Testende
G	%		
1,25	77	9,1	9,1
2	81	9,1	9,1
4	87	9,0	9,0
6	87	8,9	8,9
8	89	8,8	8,9
16	91	8,7	8,8

G<sub>A</sub>-Wert: >16

Detaillierte Untersuchungsergebnisse zum Leucht-bakterientest nach DIN EN ISO 11348-2 (L52) - DIBt Vorgaben:

Probennummer **ULE-15-0064454-01**  
 Probenbezeichnung: Flut 5A MP 11-13

Verdünnungsstufe	Hemmwirkung
G	%
1,25	1
2	-1
4	0
6	-3
8	-2
16	-5

G<sub>L</sub>-Wert: 1

Probennummer **ULE-15-0064454-02**  
 Probenbezeichnung: Flut 16 Fr. 9

Verdünnungsstufe	Hemmwirkung	pH-Werte	
		Testbeginn	Testende
G	%		
1,25	83	8,8	9,0
2	87	8,7	8,9
4	88	8,7	8,9
6	88	8,7	8,9
8	88	8,6	8,8
16	87	8,6	8,8

G<sub>A</sub>-Wert: >16

Probennummer **ULE-15-0064454-02**  
 Probenbezeichnung: Flut 16 Fr. 9

Verdünnungsstufe	Hemmwirkung
G	%
1,25	15
2	1
4	2
6	-3
8	-3
16	-2

G<sub>L</sub>-Wert: 1

Probennummer **ULE-15-0064454-03**  
 Probenbezeichnung: Flut 6 MP 12-14

Verdünnungsstufe	Hemmwirkung	pH-Werte	
		Testbeginn	Testende
G	%		
1,25	77	9,2	9,1
2	84	9,2	9,0
4	88	9,1	8,9
6	90	9,0	8,8
8	91	9,0	8,8
16	93	8,9	8,7
48	62	8,4	8,8
144	4	8,3	9,4
432	1	8,4	9,5
1296	2	8,4	9,6

G<sub>A</sub>-Wert: 144

Probennummer **ULE-15-0064454-03**  
 Probenbezeichnung: Flut 6 MP 12-14

Verdünnungsstufe	Hemmwirkung
G	%
1,25	7
2	-23
4	-20
6	-18
8	-14
16	-6

G<sub>L</sub>-Wert: 1



**Anlage zum Prüfbericht ULE-15-0064454/02-1**

Detaillierte Untersuchungsergebnisse zum Algentest nach DIN 38412 (L33) - DIBt Vorgaben:

Probennummer **ULE-15-0064454-04**  
 Probenbezeichnung: Flut 6 Fr. 18

Verdünnungsstufe G	Hemmwirkung %	pH-Werte	
		Testbeginn	Testende
1,25	91	8,4	8,4
2	62	8,5	8,5
4	39	8,6	8,8
6	23	8,6	9,0
8	16	8,7	9,1
16	16	8,7	9,1

G<sub>A</sub>-Wert: 8

Detaillierte Untersuchungsergebnisse zum Leucht-bakterientest nach DIN EN ISO 11348-2 (L52) - DIBt Vorgaben:

Probennummer **ULE-15-0064454-04**  
 Probenbezeichnung: Flut 6 Fr. 18

Verdünnungsstufe G	Hemmwirkung %
1,25	12
2	-26
4	-29
6	-27
8	-26
16	-23

G<sub>L</sub>-Wert: 1

Probennummer **ULE-15-0064454-05**  
 Probenbezeichnung: Flut 5 Fr. 19A

Verdünnungsstufe G	Hemmwirkung %	pH-Werte	
		Testbeginn	Testende
1,25	50	8,3	8,3
2	17	8,4	8,5
4	8	8,5	9,0
6	7	8,6	9,1
8	4	8,6	9,2
16	12	8,7	9,3

G<sub>A</sub>-Wert: 2

Probennummer **ULE-15-0064454-05**  
 Probenbezeichnung: Flut 5 Fr. 19A

Verdünnungsstufe G	Hemmwirkung %
1,25	11
2	12
4	8
6	7
8	5
16	4

G<sub>L</sub>-Wert: 1

Die Gültigkeitskriterien der Tests wurden erfüllt.

1. Ansatz (Verdünnungsstufen bis 1:16)  
 Faktor der Fluoreszenzerhöhung: 52 - 66  
 Hemmung der Positivkontrolle: 35 - 52%

2. Ansatz (Verdünnungsstufen > 1:16)  
 Faktor der Fluoreszenzerhöhung: 110  
 Hemmung der Positivkontrolle: 56%

Die Gültigkeitskriterien der Tests wurden erfüllt.